
Numerical Evaluation of the Electro-hydrodynamic Flow and Particle Concentration Effects on the Wire-Plate Electrostatic Precipitator Efficiency

M. Gholami* , H. Kazerooni

* Researcher, Department of Defense Sciences and Technologies, Research Institute of Defense Technologies and Passive Defense, National Defense and Strategic Research University and Research Institute, Tehran, Iran

(Received: 09/05/2020; Accepted: 22/01/2022)

Abstract

In this paper, a two-dimensional computational model is implemented to study all the necessary phenomena in a simple one-stage plane depositor by considering the interactions between the electrostatic field, the flow field, the charge of the particles and their turbulent motions. In the first step of this research, while presenting the relations between electrostatic fields, particle dynamics and fluid dynamics, the mathematical model of the corona field, air flow and particle motion is explained. In the next step, the electrical state (electric field and space charge) and the induced flux pattern are analyzed by the interaction of the ion wind and the main gas flux in the implemented model. Also, while examining the path of movement and accumulation of particles, their sediment distribution in the channel is investigated and the partial efficiency of particles with different diameters is calculated. In the following step, the effect of electro-hydrodynamic flux on the efficiency of the equipment is investigated. Finally, considering the normal logarithmic distribution for particles at the input of the sediment channel, the effect of different concentrations of particles at the input on the overall efficiency of the equipment is analyzed. This model is simulated in COMSOL software.

Keywords: particle concentration, electrostatic precipitator, finite element method, electro-hydrodynamic flow.

* Corresponding author E-mail: M_gholami_ee@yahoo.com

تحلیل عددی اثر شارش الکتروهیدرودینامیکی و غلظت ذرات بر راندمان ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی صفحه‌ای - سیمی

محمد غلامی^{۱*}، حنیف کازرونی^۲

۱- پژوهشگر، ۲- استادیار، گروه علوم و فناوری‌های دفاعی، پژوهشکده فناوری‌های دفاعی و پدافند غیرعامل،

دانشگاه و پژوهشگاه عالی دفاع ملی و تحقیقات راهبردی، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۰۵، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۲)

چکیده

در این مقاله یک مدل محاسباتی دوبعدی به منظور مطالعه همه پدیده‌های ضروری در یک ته‌نشین کننده صفحه‌ای یک مرحله‌ای ساده با در نظر گرفتن عکس‌العمل‌های متقابل بین میدان الکتروستاتیکی، میدان شارش، باردار شدن ذرات و حرکات آشفته آن‌ها پیاده‌سازی شد. در گام اول این مقاله، ضمن ارائه ارتباطات میان میدان‌های الکتروستاتیکی، دینامیک ذرات و دینامیک سیال به تبیین مدل ریاضی میدان کرونا، شارش هوا و حرکت ذرات پرداخته است. در ادامه، به تحلیل شرایط الکتریکی (میدان الکتریکی و بار فضایی) و الگوی شارش القاء شده توسط عکس‌العمل متقابل باد یونی و شارش گاز اصلی در مدل مورد مطالعه پرداخته شده است. همچنین، ضمن بررسی مسیر حرکت و انباشته شدن ذرات، توزیع ته‌نشینی آن‌ها در کانال مورد بررسی قرار گرفته و راندمان جزئی ذرات با قطرهای مختلف محاسبه شده است. در ادامه، اثر شارش الکتروهیدرودینامیکی بر راندمان تجهیز بررسی شده است. در نهایت، با در نظر گرفتن توزیع نرمال لگاریتمی برای ذرات در ورودی کانال ته‌نشین کننده، اثر غلظت‌های متفاوت ذرات در ورودی بر راندمان کلی تجهیز آنالیز شده است. این مدل در نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شده است.

کلیدواژه‌ها: ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی، غلظت ذرات، رسوب دهنده الکتروستاتیکی، روش اجزاء محدود، شارش

الکتروهیدرودینامیکی

۱- مقدمه

گذشته تلاش‌های زیادی در جهت فهم بیشتر تمامی پدیده‌هایی که در درون ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی رخ می‌دهد انجام شده است. تعدادی مطالعات آزمایشگاهی بر روی مشخصه‌های تخلیه ته‌نشین کننده صفحه‌ای - سیمی با آرایش‌های مختلف الکتروود تخلیه انجام گرفته است. این مطالعات شامل بررسی هندسه‌های مختلف امیتر بر تخلیه کرونا الکتروود است تا تخلیه الکتریکی بهینه گردد [۴]. در مراجع [۵-۷]، الکتروود با شکل‌ها، قطرها و فاصله نسبت به هم مختلف در یک ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی در ابعاد آزمایشگاهی و دمایی بالا مورد آزمایش قرار گرفته است. در مقایسه با روش‌های آزمایشگاهی، شبیه‌سازی‌های عددی به دلیل انعطاف پذیری، هزینه پایین و دقت نتایج به نسبت بالا ترجیح داده می‌شوند [۸ و ۹]. در این راستا روش‌ها و رویکردهای حل عددی بسیاری در گزارش‌های مختلف، در جهت حل معاملات ته‌نشین کننده ارائه شده است [۱۰ و ۱۱].

یکی از مناسب‌ترین ابزارها برای فیلترسازی ذرات در جهت رسیدن به سطوح انتشار مطلوب، به ویژه برای کارخانه‌های فرآوری که دارای نرخ تولید جریان گاز بزرگی هستند، ته‌نشین کننده الکترواستاتیکی است. اصل اساسی عملکرد ته‌نشین کننده‌های (رسوب دهنده‌های) الکتروستاتیکی اینگونه است که ذرات از میان میدان الکتریکی عبور می‌کنند. آن‌ها ابتدا در شروع مسیر بار الکتریکی دریافت می‌کنند و در نتیجه به‌عنوان یک ذره باردار، در میدان الکتریکی منحرف می‌شوند تا در روی یک صفحه زمین شده جمع‌آوری شوند [۱].

درک مناسب از سازوکارهای پیچیده درگیر در فرآیند ته‌نشینی و پارامترهای مختلف مؤثر بر رسوب ذرات مانند اندازه ذرات، نسبت بار به جرم، سرعت جابه‌جایی، پارامترهای الکتریکی و شرایط بهره‌برداری، جهت دستیابی به بهترین طراحی و ارضای راندمان جمع‌آوری مورد نیاز بسیار مهم است [۲ و ۳]. در سالیان

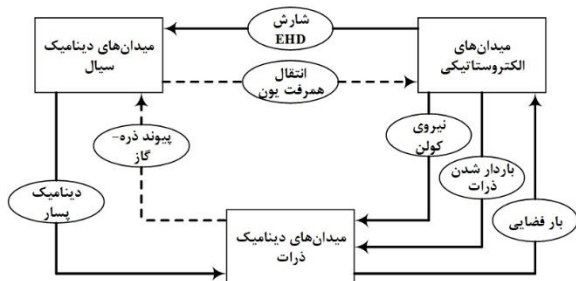
² Electrohydrodynamic (EHD)

* نویسنده پاسخگو: Gholami.m.ee@gmail.com

حائز اهمیت خواهد بود. بدین منظور، ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی صفحه‌ای تک مرحله شبیه‌سازی شده و مشخصه‌های الکتریکی، الگوهای شارش الکتروهایدرودینامیکی به ازای سرعت‌های مختلف سیال اصلی، باردار شدن ذرات و مسیر حرکت، اثر شارش الکتروهایدرودینامیکی بر عملکرد ته‌نشین کننده و اثر غلظت ذرات بر عملکرد ته‌نشین کننده و جریان تخلیه کرونا بررسی می‌شود.

۲- مدل سازی 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 (۱) نشان داده شده است. خطوط پیوسته و خط چین به ترتیب نشان از پیوند قوی و ضعیف بین دو میدان هستند. مدل سازی ریاضی برای شبیه‌سازی ته‌نشین کننده باید شامل تخلیه کرونا، شارش گاز و سیال اصلی، باردار شدن ذرات و جابه‌جایی ذرات باشند. با اعمال ولتاژ به اندازه کافی قوی به الکتروود تخلیه با شعاع انحنای کوچک در حالی که کلکتور زمین شده است، یک کرونا یکنواخت در طول سیم الکتروود و انحراف یون‌ها به سمت صفحات کلکتور اتفاق می‌افتد.



شکل (۱): عکس‌العمل‌ها و ارتباطات متقابل بین میدان‌های ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی

۲-۱- مدل کرونا

در این شبیه‌سازی از مدل ساده شده کرونا که بر پایه پایستگی جریان انتقال یافته توسط ذرات باردار 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:

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

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

طبیعی تولید می‌شود. تعامل جریان بین جریان ثانویه الکتروهایدرودینامیکی و جریان اصلی برای تخلیه کرونا منفی و مثبت متفاوت بوده و منجر به الگوهای مختلف در ساختار جریان می‌شود [۱۴-۱۲]. علاوه بر جریان اولیه و میدان الکتریکی، الگوی جریان الکتروهایدرودینامیکی نیز به خواص ذرات مانند اندازه و غلظت ذرات بستگی دارد [۱۵]. به دلیل ماهیت پیچیده و تصادفی این جریان، نتیجه‌گیری‌های متناقض بسیاری درباره تأثیر آن بر بهره‌وری جمع‌آوری ذرات در گزارش‌های قبلی ارائه شده است. برخی محققان معتقدند در صورت از بین رفتن جریان الکتروهایدرودینامیکی، بازده جمع‌آوری ذرات می‌تواند به میزان قابل توجهی بهبود یابد [۱۶]. در سال ۲۰۰۰، سولداتی نشان داد که برآیند جریان‌های الکتروهایدرودینامیکی روی جریان کانال آشفته، به‌طور قابل توجهی ساختار آشفته در ناحیه دیواره را تغییر می‌دهد و منجر به کاهش نیروی پسار می‌شود. این مسئله باعث تغییر رفتار محلی ذراتی که می‌بایست توسط ته‌نشین کننده‌های الکتروستاتیکی جمع شود، می‌شود [۱۷]. وی همچنین خاطر نشان کرد که جریان الکتروهایدرودینامیکی تنها منجر به بازگرداندن ذرات به ناحیه مرکزی کانال نشده و در مقابل در جارو کردن ذرات به دیواره‌های جمع‌آوری نیز کمک می‌کند، بنابراین تأثیر ناچیزی در بازده کل مجموعه دارد.

همچنین، بسیاری از نویسندگان از روش‌های ریاضیاتی و آزمایشگاهی برای بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف ذرات بر الگوهای جریان الکتروهایدرودینامیکی، جریان تخلیه کرونا، مسیر ذرات و رسوب در کانال ته‌نشین کننده با آرایش‌های مختلف استفاده کردند [۱۸ و ۱۹]. در مرجع [۲۰]، این اثر بر روی یک ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی صفحه‌ای تک الکتروود بررسی و نشان داده شد که الگوی جریان توسط جریان الکتروهایدرودینامیکی ثانویه به شدت به غلظت ذرات بستگی دارد. با این وجود، تأثیر غلظت‌های مختلف ذرات بر عملکرد رسوبگر الکتروستاتیکی بررسی نشده است.

در راستای پاسخگویی به چالش‌های مذکور، در این مقاله پس از تبیین مدل سازی ریاضی ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی، کلیه فرآیندهایی که در درون ته‌نشین کننده‌های الکتروستاتیکی تک مرحله‌ای و تک الکتروود انجام می‌شود، به همراه اثرات فاکتورهای مختلف، نظیر شارش الکتروهایدرودینامیکی، سرعت سیال ورودی، غلظت ذرات بر عملکرد تجهیز با استفاده از شبیه‌سازی‌های دوبعدی در نرم‌افزار کامسول^۱ بررسی می‌شود. نتیجه این بررسی در جهت تفهیم بهتر فرآیندهای درونی تجهیز و در نتیجه تنظیم فاکتورهای اثرگذار بر عملکرد ته‌نشین کننده در جهت بیشینه‌سازی راندمان و کارایی ته‌نشین کننده بسیار

^۱ COMSOL

ثانیه، u سرعت سیال بر حسب متر بر ثانیه و $\rho \mathbf{E}$ نشان دهنده نیروی حجم یا بدنه خارجی بر مولکول‌های گاز بر مبنای واحد حجم می‌باشد. در ته‌نشین کننده، این نیرو نیروی کولن بوده که باعث ایجاد شارش ثانویه الکتروهایدرودینامیکی (باد یونی) توسط کرونا می‌باشد. برای میدان‌های شارش لامینار، این معادلات پایه به‌دست آمده برای پایستگی جرم و مومنتوم کافی بوده و معادلاتی که در ادامه بیان می‌شود، صرفاً برای میدان شارش آشفته می‌باشد. در صورتی که مدل‌سازی آشفته‌گی در معادلات شارش سیال ضروری باشد، روند مدل‌سازی شامل محاسبه عدد رینالدز می‌باشد [۲۲].

۲-۳- رویکرد لاگرانژ برای فاز پراکندگی (ذرات)

در مسائل ته‌نشین کننده‌های الکتروستاتیکی که سیال ورودی به همراه ذرات موجود در آن تشکیل یک محیط دوفاز را می‌دهند، مدل اولر برای توصیف رفتار گاز (فاز پیوستگی) و فاز ذرات (فاز پراکندگی) بر مبنای رویکرد لاگرانژ شبیه‌سازی می‌شوند [۲۳]. 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، به دست می‌آید:

$$\frac{d\mathbf{q}}{dt} = \mathbf{v} \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt}(m_p \mathbf{v}) = \mathbf{F}_i \quad (10)$$

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 F_i کل نیروی است که بر ذرات اثر می‌کند. در این مورد، نیروهایی 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 (نیروی که ذرات را از حرکت در سیال باز می‌دارند) F_D بر اساس مدل کانینگهام-میلیکان-دیویس به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\mathbf{F}_D = \frac{1}{\tau_p S} m_p (\mathbf{u} - \mathbf{v}) \quad (11)$$

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:

$$\tau_p = \frac{4\rho_p d_p^2}{3\mu C_D \text{Re}_r} \quad (12)$$

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

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

در روابط فوق، J چگالی سطحی جریان بر حسب A/m^2 ، μ تحرک 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 خلأ هستند. سه مؤلفه چگالی جریان سطحی در سمت راست تساوی معادله (۲) به ترتیب، جریان‌های رانشی (ناشی از حرکت ذرات باردار به وسیله میدان الکتریکی)، همرفتی (ناشی از حرکت ذرات باردار به وسیله 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 (10^4) 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 ارضاء 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.

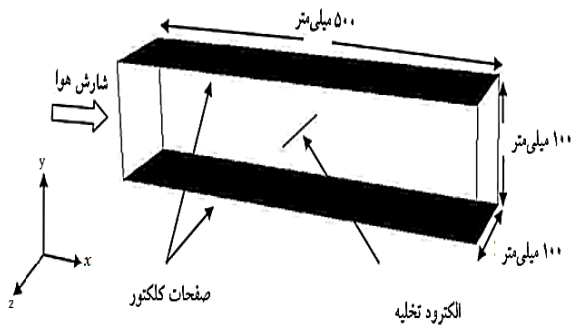
۲-۲- روش اولر برای فاز پیوسته (شارش هوا)

ابتدایی‌ترین و شاید مهم‌ترین قدم در مطالعه ته‌نشینی ذرات در ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی، تعیین مشخصه‌های شارش میدان سیال است. با توجه به افت فشار پایین ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی، گاز محیط به صورت سیال تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده که نتیجه آن ثابت بودن گرانیوی و چگالی می‌باشد. همچنین شارش سیال پایدار بوده و آشفته‌گی آن با مدل $k-\epsilon$ [۲۱] در نظر گرفته شده است. با مفروضات انجام شده، شارش هوا می‌بایست از معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس را ارضاء کند:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (7)$$

$$\rho_f \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{E} \quad (8)$$

که در آن، ρ_f چگالی سیال بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، P فشار بر حسب پاسکال، μ گرانیوی گاز بر حسب کیلوگرم بر متر



شکل (۲): مدل محاسباتی سه بعدی یک ته نشین کننده الکتروستاتیکی صفحه‌ای با الکتروود صاف

همان‌طور که مشاهده می‌شود، این مدل از دو مؤلفه مکانیکی تشکیل شده است: دو صفحه موازی که انباشتگی ذرات بر روی آن‌ها صورت می‌پذیرد و یک الکتروود میله‌ای با شعاع ۱ میلی‌متر که در مرکز دو صفحه موازی مستقر شده است. شارش گاز در راستای مثبت محور x می‌باشد. با توجه به اینکه هندسه ته نشین کننده الکتروستاتیکی در راستای محور z متقارن بوده و در این فرآیند از نیروی جاذبه (در راستای z) صرف نظر می‌شود، راستای نیروهای موجود محدود به راستای x و y می‌شود. بنابراین، می‌توان از تقارن در راستای z استفاده کرده و از مدل دو بعدی به جای سه بعدی بهره برد. در این شرایط، الکتروود تخلیه به یک نقطه در مرکز صفحه xy تبدیل شده و صفحات کلکتور نیز به دو خط موازی $y = 50\text{mm}$ و $y = -50\text{mm}$ در صفحه xy تبدیل می‌شود. بنابراین مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار کامسول در محدوده $-0.25 < x < 0.25(m)$ و $-0.05 < y < 0.05(m)$ از مختصات دکارتی می‌باشد.

۴- روش تحقیق و شبیه‌سازی

در این مقاله، نتایج شبیه‌سازی عددی ته نشین کننده الکتروستاتیکی نوع صفحه‌ای ساده یک مرحله‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این شبیه‌سازی فرض شده است که توزیع جریان کرونای در طول الکتروود میله‌ای یکنواخت بوده (یعنی تخلیه کرونا مثبت) و محاسبات شامل ارزیابی میدان‌های الکتروستاتیکی، چگالی بار فضایی در ته نشین کننده، باردار شدن ذرات و در نتیجه نیروهای الکتریکی می‌باشند.

بدین منظور از فیزیک‌های مختلفی که در نرم‌افزار کامسول در نظر گرفته شده، استفاده شده است. برای حل معادلات مربوط به شارش هوا از رابط فیزیک شارش اغتشاشی^۱ نوع مدل $k-\epsilon$ بهره برده شده است. پتانسیل الکتریکی و چگالی بار فضایی یونی با استفاده از رابط‌های فیزیک الکتروستاتیک^۲ و انتقال بار^۳ تعیین می‌شود. همچنین از رویکرد حرکت تصادفی لاگرانژی به منظور

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

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

$$\mathbf{F}_e = eZ\mathbf{E} \quad (13)$$

که در آن، 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.

$$\tau_c \frac{dZ}{dt} = \begin{cases} R_f + f_a (|v_e| \leq |v_s|) \\ R_d f_a (|v_e| > |v_s|) \end{cases} \quad (14)$$

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:

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

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

$$v_e = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_p k_B T_i} \quad (15)$$

$$v_s = 3\omega_e \frac{\epsilon_{r,p}}{\epsilon_{r,p} + 2}$$

$$\omega_e = \frac{er_p |E|}{k_B T_i}$$

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

$$f_a = \begin{cases} \frac{1}{(\omega_e + 0.475)^{0.575}} & (\omega_e \geq 0.525) \\ 1 & (\omega_e < 0.525) \end{cases} \quad (16)$$

۳- توصیف مدل

مدل محاسباتی سه بعدی یک ته نشین کننده الکتروستاتیکی نوع صفحه‌ای- میله‌ای در نظر گرفته شده در این بخش در شکل (۲) نشان داده شده است.

¹ Turbulent Flow

² Electrostatic

³ Charge Transport

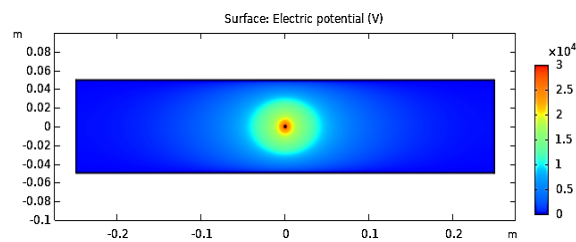
همان‌طور که مشاهده می‌شود، المان‌ها در مجاورت میله الکتروتود به شدت سایز کوچک‌تری نسبت به بخش‌های دیگر دارند. یک ولتاژ 30 kV + جریان مستقیم با فرض توزیع یکنواخت تخلیه الکتریکی در راستای الکتروتود تخلیه به آن اعمال می‌شود. گاز مورد بررسی در این شبیه‌سازی، هوای محیط بوده (چگالی $\rho_F = 1.255 \text{ kg/m}^3$ و گرانیوی $\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$) و فرض شده است که ذرات به شکل ثابت کروی و با ضریب گذردهی نسبی ۳ (ϵ_r) و چگالی جرم $998/2 \text{ kg/m}^3$ (ρ_p) هستند. ذرات بی‌بار همراه با شارش هوا با سرعت ۱ متر بر ثانیه در راستای مثبت x وارد کانال شده و در طول کانال باردار شده و به سمت کلکتور منحرف می‌شوند. در این فرآیند از برخورد و لختگی ذرات صرف نظر شده است.

۵- نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آن‌ها

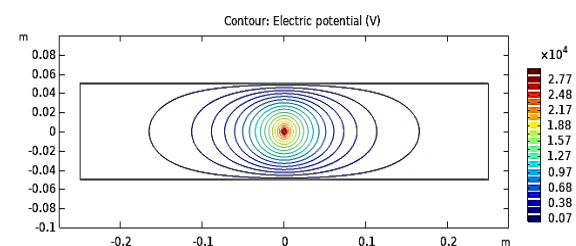
در این بخش عملکرد ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی در جمع‌آوری ذرات و همچنین اثر غلظت‌های ذرات بر الگوی شارش گاز و جریان تخلیه کرونا، برای پراکندگی‌های انفرادی و چندگانه ذرات با در نظر گرفتن توزیع نرمال-لگاریتمی برای اندازه ذرات بررسی شده است.

۵-۱- مشخصه‌های الکتریکی

اگر چه به دلیل بار همرفتی کوپلینگ کمی بین چگالی بار فضایی و سرعت شارش هوا وجود دارد، این پدیده با توجه به قابل چشم‌پوشی بودن آن در شبیه‌سازی وارد نشده است. بنابراین، به ازای هر سرعت شارش هوا، توزیع پتانسیل و چگالی بار فضایی در صفحه $Z = 0$ برای ولتاژ اعمال شده 30 kV مطابق شکل‌های (۴-۷) است.



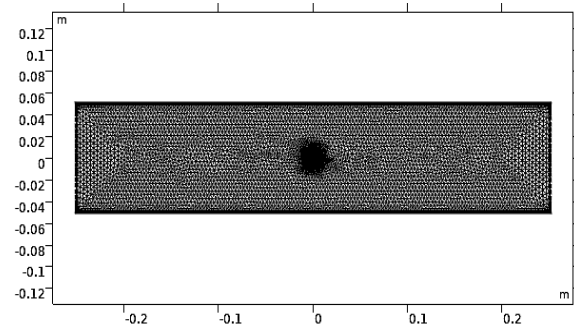
شکل (۴): توزیع پتانسیل در ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی صفحه‌ای با ولتاژ تحریک 30 kV +



شکل (۵): خطوط هم‌پتانسیل در ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی صفحه‌ای با ولتاژ تحریک 30 kV +

تعیین حرکت ذرات که تحت تأثیر شارش الکترویهیدرودینامیکی و اثرات اغتشاشی هستند، استفاده شده است. این بخش با استفاده از رابط فیزیک مسیریابی ذرات برای شارش سیال^۱ در نرم‌افزار کامسول قابل پیاده‌سازی است. مدل در نظر گرفته شده، اثر چگالی بار فضایی ذرات بر توزیع چگالی بار یونی و همچنین اثرات متقابل بین سه میدان موجود در فضای بین الکتروتودی یعنی شارش گاز، مسیرهای پیچیده شده توسط ذرات و میدان الکتریکی لحاظ می‌کند. مطالعات انجام شده در نرم‌افزار کامسول شامل دو مطالعه جداگانه است. در مرحله اول، با انتخاب مدل دوبعدی در بخش تعریف مسئله کامسول، از بخش شارش سیال/شارش تکفاز، فیزیک شارش آشفتگی به مدل اضافه می‌شود. همچنین، فیزیک تخلیه کرونا نیز از زیر بخش پلاسما انتخاب و اضافه می‌شود (این کار منجر به افزودن فیزیک‌های الکترواستاتیک و انتقال بار به مدل می‌شود). در نهایت برای انتخاب نوع مطالعه، مطالعات عمومی که از نوع مطالعات ایستا است، بهره برده می‌شود. خروجی این مطالعه تعیین مشخصه‌های الکتریکی نظیر توزیع پتانسیل و چگالی بار به همراه نمودارهای سرعت سیال و شارش‌های الکترویهیدرودینامیکی می‌باشد. در ادامه، جهت بررسی مسیر عبور ذرات در کانال ته‌نشین کننده و انجام محاسبات راندمان، فیزیک مسیریابی ذرات برای شارش سیال از بخش شارش سیال/مسیریابی ذرات انتخاب و به مدل اضافه می‌شود. مطالعه مربوط به این بخش از نوع وابسته به زمان خواهد بود که از بخش مطالعات برای برخی فیزیک‌های واسطه در بخش انتخاب نوع مطالعه قابل دستیابی است.

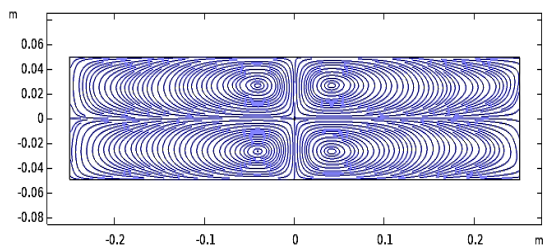
ناحیه محاسباتی با استفاده از نرم‌افزار کامسول مش‌بندی شده و به بخش‌های کوچک‌تری شبکه‌بندی می‌شوند. با توجه به اینکه مش‌بندی مناسب برای دستیابی به دقت نتایج مناسب ضروری می‌باشد [۲۴]، مطابق شکل (۳) مدل مذکور به 17708 المان ناحیه‌ای و 540 المان مرزی به‌صورت غیر یکنواختی تقسیم‌بندی شده است.



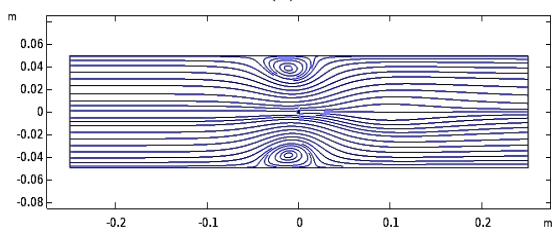
شکل (۳): مش‌بندی مدل محاسباتی دوبعدی ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی صفحه‌ای با الکتروتود صاف (صفحه xy)

¹ Particle Tracking for Fluid Flow

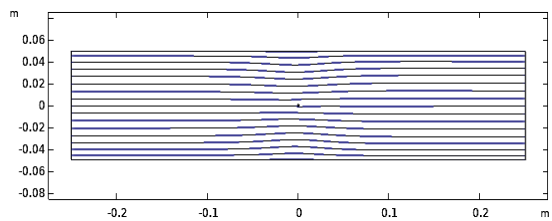
حاکمی از آن است که شارش الکتروهایدرودینامیکی منجر به اصلاح شارش هوا (یا گاز به طور کلی) خواهد شد. در این شرایط الگوی شارش نهایی (اصلاح شده) شکل پیچیده‌ای به خود خواهد گرفت.



(۱)



(۲)



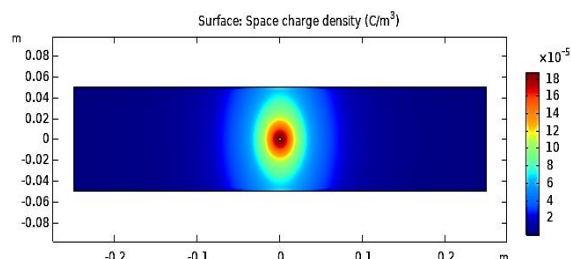
(۳)

شکل (۸): خطوط شارش هوا در کانال ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی با سرعت ورودی سیال: (۱) ۰ m/s، (۲) ۰/۵ m/s، (۳) ۱ m/s

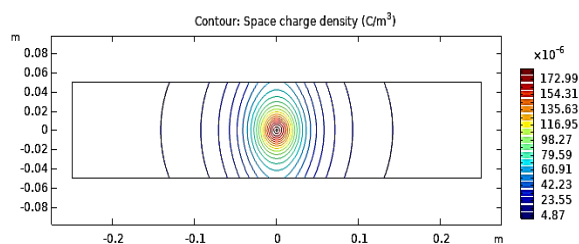
در صورتی که شارش هوا وجود نداشته باشد (معادل با سرعت صفر برای شارش هوا)، چهار تاوه (ناحیه‌ای درون شاره که جریان شاره به صورت چرخشی می‌باشد) بزرگ متقارن حول الکتروود تخلیه شکل می‌گیرد. با افزایش سرعت سیال به ۰/۵ متر بر ثانیه، دو تاوه بسیار کوچکی در نزدیکی صفحه‌های کلکتور به وجود می‌آید که در سرعت‌های بیشتر از بین می‌رود. هنگامی که سرعت سیال به ۱ متر بر ثانیه می‌رسد، اثر شارش الکتروهایدرودینامیکی قابل نظر کردن بوده و الگوی شارش اصلی (جریان هوا)، در عمل یکنواخت خواهد بود.

۵-۳- باردار شدن ذرات، مسیر حرکت و ته‌نشینی

مادامی که ذرات وارد کانال بین صفحات کلکتور شده و به سمت جلو حرکت می‌کنند، به وسیله بمباران کرونا باردار شده و در معرض نیروهای مکانیکی و الکتروستاتیکی قرار می‌گیرند. در این بخش، مسیرهای طی شده توسط ذرات معلق در سیال اصلی از ابتدای کانال تا ته‌نشینی یا خروج از کانال به همراه راندمان جمع‌آوری ذرات توسط ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی برای اندازه‌های مختلف ذرات (ذرات با قطرهای ۱، ۱۰ و ۵۰ میکرومتر)



شکل (۶): توزیع چگالی بار فضایی در ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی صفحه‌ای با ولتاژ تحریک ۳۰ kV+



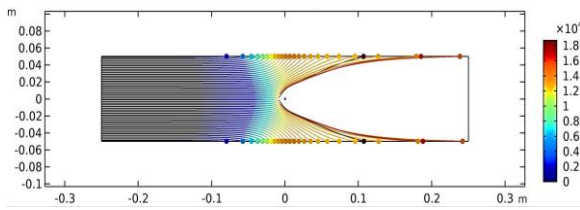
شکل (۷): خطوط با چگالی بار فضایی در ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی صفحه‌ای با ولتاژ تحریک ۳۰ kV+ و بیشینه چگالی بار فضایی $187 \mu\text{C}/\text{m}^2$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، کانتورهای پتانسیل در مجاورت الکتروود تخلیه به صورت دایره‌های متراکم بوده و میدان الکتریکی بسیار بالا و عملاً ثابتی را در آن ناحیه ایجاد می‌کند. هر چه به سمت انتها و ابتدای کانال ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی نزدیک شوید کانتورها به شکل بیضی شده و از تراکم آن کاسته می‌شود.

به طور مشابه، مطابق شکل‌های مربوط به چگالی بار فضایی، بیشترین مقدار چگالی بار در نزدیکی الکتروود تخلیه مشاهده شده که مقداری برابر $187 \mu\text{C}/\text{m}^2$ داشته و با افزایش فاصله نسبت به الکتروود تخلیه این مقدار به سرعت کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه بالاترین چگالی بار فضایی در ناحیه حول الکتروود تخلیه متراکم شده است، این ناحیه جایی است که ذرات معلق در جریان هوا به سرعت بخش عظیمی از بار الکتریکی خود را دریافت کرده و تحت تأثیر نیروی شدید کولنی به سمت صفحات کلکتور حرکت می‌کنند. در صورتی که از بار ذرات صرف نظر شود، جریان تخلیه کلی به اندازه ۱۰۸ میکروآمپر حاصل خواهد شد که با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده در مرجع [۲۵] بسیار نزدیک است.

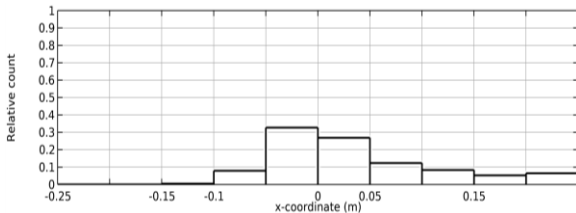
۵-۲- الگوهای شارش الکتروهایدرودینامیکی به ازای سرعت‌های مختلف شارش هوای ورودی

با استفاده از رابط‌های فیزیک و چند فیزیکه مذکور در بخش قبل، اثر شارش الکتروهایدرودینامیکی تولید شده توسط تخلیه کرونا بر شارش اصلی هوا در صفحه $Z = 0$ مطابق شکل‌های (۸) به دست آمده است. در این شکل‌ها سرعت هوا در ورودی کانال از ۰ تا ۱ متر بر ثانیه به صورت متغیر در نظر گرفته شده و نتایج



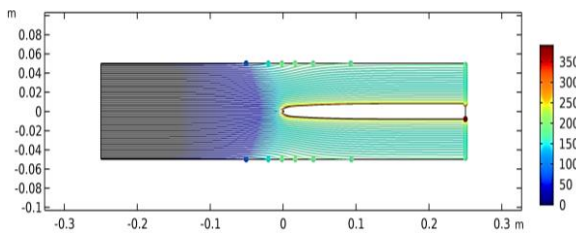
شکل (۱۱): مسیر حرکت ذرات با قطر ۱۰ میکرومتر در ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی

همانگونه که مشاهده می‌شود، بخشی از ذرات قبل از ته‌نشین شدن روی صفحات کلکتور مسیر طولانی‌تری را در طول کانال طی می‌کنند. با این وجود، باز هم تمامی ذرات توسط کلکتور جذب شده و راندمان ۱۰۰٪ برای این ذرات به دست آمده است. با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی (شکل (۱۲)) حدود ۶۰٪ از ذرات در حوالی الکتروود تخلیه ($0 < x < 0.05$) جذب کلکتور شده‌اند.

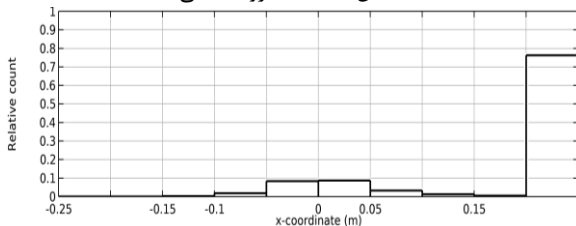


شکل (۱۲): توزیع ته‌نشینی ذرات با قطر ۱۰ میکرومتر در موقعیت‌های مختلف کانال ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی

مطابق شکل (۱۳) با کاهش قطر ذرات به ۱ میکرومتر بخشی از ذرات بدون اینکه جذب کلکتور شوند، از انتهای کانال خارج می‌شوند. در این شرایط راندمان ته‌نشین کننده به ۲۵٪ کاهش پیدا کرد است. همچنین مشابه ذرات با شعاع بزرگ‌تر، بخش اعظم ذرات ته‌نشین شده مربوط به ناحیه اطراف الکتروود تخلیه می‌باشد. همانطور که در شکل (۱۴) نشان داده شده است، حدود ۲۰٪ ذرات با شعاع ۰/۵ میکرومتر در محدوده $0 < x < 0.05$ جذب کلکتورها شده‌اند.



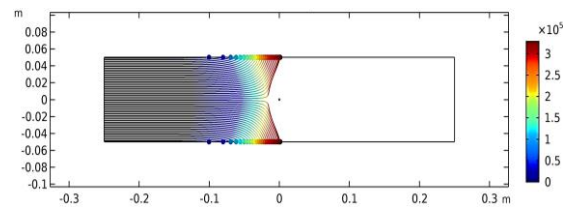
شکل (۱۳): مسیر حرکت ذرات با قطر ۱ میکرومتر در ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی



شکل (۱۴): توزیع ته‌نشینی ذرات با قطر ۱ میکرومتر در موقعیت‌های مختلف کانال ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی

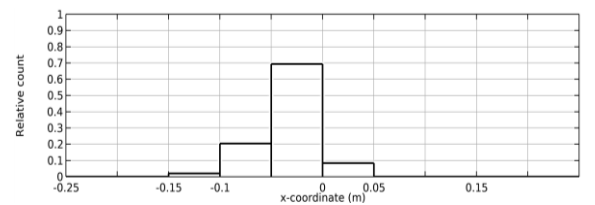
مورد محاسبه قرار گرفته است. در این شبیه‌سازی میزان شدت اغتشاش در ورودی کانال ۵٪ در نظر گرفته شده است. تعداد ۵۰ عدد جریان ذرات به صورت یکنواخت در ورودی کانال با سرعت اولیه برابر با سرعت شارش سیال (۱ m/s) در نظر گرفته شده است. بدین منظور از نتایج به دست آمده در بخش قبل استفاده شده و نتایج طی یک مطالعه وابسته به زمان در بازه زمانی ۰ الی ۱ ثانیه و با فرض آزادسازی ذرات در مبدأ زمانی به دست آمده‌اند.

در شکل (۹) مسیر طی شده توسط ذرات با قطر ۵۰ میکرومتر و همچنین بار انباشته شده روی ذرات با استفاده از طیف رنگی نشان داده شده است. هر مسیر ذره در محاسبات شارش ماندگار نشان دهنده جریانی از تعداد زیادی ذرات هستند که مسیر مشابهی را طی می‌کنند. مطابق شکل، ذرات با عبور از کانال بین کلکتورها بار الکتریکی به دست آورده و عمدتاً در نزدیکی الکتروود صفحات کلکتور می‌چسبند. همچنین، هر چه ذرات به الکتروود تخلیه که حول آن میدان الکتریکی شدیدی وجود دارد، نزدیک می‌شوند، بار الکتریکی زیادتری را جذب می‌کنند. با توجه به اینکه بار ذرات در بخش‌های ابتدایی کانال بسیار کم می‌باشد، بنابراین ته‌نشینی در این بخش‌ها اتفاق نمی‌افتد.



شکل (۹): مسیر حرکت ذرات با قطر ۵۰ میکرومتر در ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی

تعداد نسبی ذراتی که در مکان‌های مختلف از صفحات کلکتور در راستای محور x ته‌نشین شده‌اند، در نمودار ستونی شکل (۱۰) نشان داده شده است. در این نمودار نقطه $x = 0$ نشان دهنده جایگاه الکتروود تخلیه می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تمامی ذرات قبل از رسیدن به انتهای کانال ($x = 0.25$ m) جذب صفحات کلکتور می‌شوند. بنابراین انتظار می‌رود که راندمان ته‌نشین کننده به ازای ذرات با قطر ۵۰ میکرومتر برابر ۱۰۰٪ باشد.



شکل (۱۰): توزیع ته‌نشینی ذرات با قطر ۵۰ میکرومتر در موقعیت‌های مختلف کانال ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی

شبیه‌سازی مشابهی برای ذرات با قطر ۱۰ میکرومتر انجام شده است. مطابق شکل (۱۱)، مسیر طی شده توسط این ذرات نسبت به ذرات با قطر ۵۰ میکرومتر به طور قابل توجهی متفاوت هستند.

جدول (۱): مقایسه راندمان جمع‌آوری ذرات با سرعت ورودی ۵ m/s

قطر ذرات (میکرومتر)	۱	۵	۱۰	۵۰
حالت ۱	٪۴۰	٪۱۰۰	٪۱۰۰	٪۱۰۰
حالت ۲	٪۳۸	٪۱۰۰	٪۱۰۰	٪۱۰۰

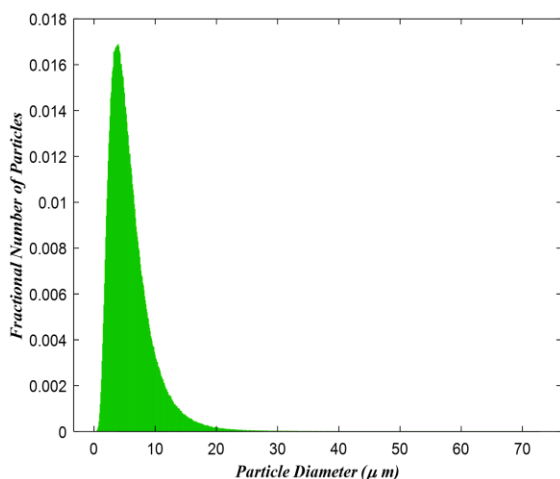
مطابق جدول (۱)، شارش الکتروهایدرودینامیکی منجر به کاهش جزئی راندمان ته‌نشینی ذرات بسیار کوچک می‌شود و تأثیری بر ته‌نشینی ذرات بزرگ‌تر ندارد. به‌طور کلی، همانگونه که در مرجع [۱۷] ذکر شده است، اثر این شارش بر عملکرد کلی ته‌نشینی‌کننده (شامل ذرات با شعاع‌های مختلف) قابل چشم‌پوشی است.

۵-۵- اثر غلظت ذرات موجود در سیال بر عملکرد ته‌نشینی‌کننده الکتروستاتیکی

در این بخش، گستره وسیعی از شعاع ذرات که سازگاری بهتری نسبت به جابه‌جایی ذرات در یک ته‌نشینی‌کننده الکتروستاتیکی واقعی دارد، در نظر گرفته شده است. بدین منظور بازه ۰/۱۵ الی ۴۵ میکرومتر لحاظ شده است (۰/۳ الی ۹۰ میکرومتر برای قطر ذرات). در این شبیه‌سازی از توزیع نرمال لگاریتمی جهت اعمال قطرهای مختلف ذرات فرض شده است. تابع چگالی احتمال مربوط به این توزیع با استفاده از رابطه زیر بیان می‌شود (هاردن، ۱۹۸۰):

$$f(d_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}d_p \log(\sigma_g)} e^{-\frac{(\log(d_p) - \log(d_{p,M}))^2}{2\log^2(\sigma_g)}} \quad (17)$$

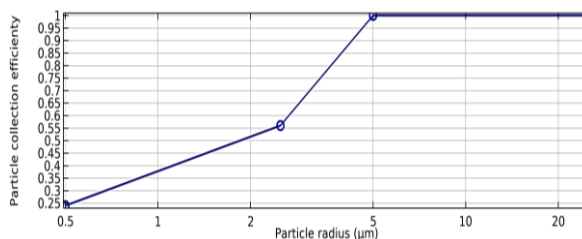
که در آن، d_p قطر ذرات، σ_g انحراف استاندارد هندسی و $d_{p,M}$ قطر میانه ذرات هستند. با توجه به داده‌های ارائه شده در مرجع [۲۳] مقادیر انحراف استاندارد هندسی و قطر میانه به ترتیب ۱/۷۳ و ۵/۰۳ محاسبه شده و نمودار توزیع چگالی احتمال در شکل (۱۷) خواهد آمد.



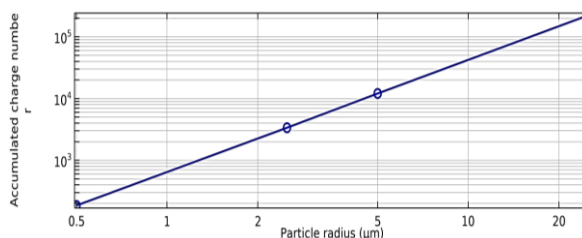
شکل (۱۷): توزیع اندازه ذرات در سیال ورودی به ته‌نشینی‌کننده با تابع نرمال - لگاریتمی

مطابق با نتایج آزمایش‌های گزارش شده در منابع گذشته، در سرعت سیال و ولتاژ اعمال شده یکسان، ذرات کوچک‌تر قبل از جذب توسط کلکتور مسیر طولانی‌تری را در کانال ته‌نشینی‌کننده طی می‌کنند. در واقع، ذرات کوچک‌تر در مقایسه با ذرات بزرگ با عبور از کانال بین کلکتورها بار الکتریکی کمتری را جذب می‌کنند و مسیر طی شده توسط آن‌ها در درجه اول تحت تأثیر نیروهای پسا قرار دارند. نیروهای الکتروستاتیکی در این مورد اثر بسیار ضعیفی بر ذرات دارند و در نتیجه سرعت رانش برای این ذرات بسیار کوچک بوده و مسیر حرکت آن‌ها عمدتاً تابع مسیرهای جریان گاز هستند.

در شکل‌های (۱۵ و ۱۶)، تغییرات راندمان ته‌نشینی‌کننده الکتروستاتیکی و بارهای انباشته شده روی ذرات به ازای شعاع‌های مختلف در نظر گرفته شده برای ذرات نشان داده شده است.



شکل (۱۵): نمودار راندمان جمع‌آوری ذرات با شعاع‌های مختلف در ته‌نشینی‌کننده الکتروستاتیکی صفحه‌ای



شکل (۱۶): مجموع بار انباشته شده بر روی ذرات با شعاع‌های مختلف در ته‌نشینی‌کننده الکتروستاتیکی صفحه‌ای

۵-۴- اثر شارش الکتروهایدرودینامیکی بر عملکرد ته‌نشینی‌کننده

اثر شارش الکتروهایدرودینامیکی ثانویه بر راندمان جذب ذرات، مورد توجه بسیاری از محققین در این حوزه قرار گرفته و گاهی اوقات منجر به نتایج متناقضی شده است. در این مقاله راندمان ته‌نشینی ذرات با قطرهای مختلف به ازای دو حالت زیر بررسی شده و نتایج شبیه‌سازی به‌دست‌آمده در جدول (۱) گزارش شده است:

(۱) بدون در نظر گرفتن شارش الکتروهایدرودینامیکی و سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه برای سیال ورودی؛

(۲) با در نظر گرفتن شارش الکتروهایدرودینامیکی و سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه برای سیال ورودی.

هوا کشیده شده و به سمت صفحات کلکتور هدایت می‌شوند که این مسئله منجر به افزایش شانس به دام افتادن آن‌ها می‌شود. همچنین، کاهش جزئی مشاهده شده در راندمان جمع‌آوری ذرات ۱۰ میکرومتری برای غلظت‌های ذرات بالاتر به دلیل سرکوب تخلیه کرونا می‌باشد. به‌طور کلی، سرکوب تخلیه کرونا ناشی از بار فضایی ذرات در غلظت‌های بالا و متوسط می‌باشد. بار فضایی ذرات در غلظت‌های بالا علاوه بر احتمال کاهش جریان کرونا به دلیل تحرک پایین یون، می‌تواند دو اثر مهم دیگر داشته باشد [۲۵]:

(۱) تضعیف میدان الکتریکی در حوالی الکتروود تخلیه و در نتیجه کاهش غلظت یون‌های تولیدی در ناحیه یونیزاسیون؛

(۲) تقویت شدت میدان الکتریکی در حوالی صفحات کلکتور.

اهمیت هر یک از این اثرات بر عملکرد و راندمان ته‌نشین کننده به کاهش نسبی بار ذرات در مقایسه با افزایش میدان ته‌نشینی دارد. با توجه به تقسیم‌بندی توزیع نرمال لگاریتمی به ۱۸ بخش، ۵۴٪ درصد شارش جرم کل در ورودی ته‌نشین کننده در قالب ذرات بزرگ هستند (۱۵ الی ۹۰ میکرومتر) و این ذرات به‌طور کامل در کانال جذب می‌شوند. از طرف دیگر، ذرات با قطر ۱۰ میکرومتر که حدود ۳۸٪ شارش جرم کل در ورودی را شامل می‌شوند، راندمان جمع‌آوری بالایی دارند. بنابراین، ذرات کوچک (۰/۳ الی ۵ میکرومتر) با راندمان جمع‌آوری پایین که تقریباً ۷/۳٪ از شارش جرم کل ورودی را شامل می‌شوند، اثر ناچیزی بر راندمان جمع‌آوری جرم کل دارند. در نتیجه راندمان جمع‌آوری کل بالا و تقریباً مشابه برای غلظت‌های مختلف نشأت گرفته از همین مسئله می‌باشد.

۵-۶- اثر غلظت ذرات بر جریان تخلیه کرونا

اثر نرخ شارش جرم ذرات بر جریان کرونای کل در شکل (۱۸) نشان داده شده است. افزایش غلظت ذرات منجر به کاهش جریان تخلیه کرونای متوسط از ۱۰۸ میکروآمپر برای غلظت ذرات خیلی کم به ۶۳ میکروآمپر برای غلظت ذرات خیلی زیاد شده است. همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، افزایش غلظت ذرات منجر به افزایش چگالی بار کل در معادله پواسون شده که منجر به کاهش شدت میدان الکتریکی بر روی سطح الکتروود تخلیه می‌شود. بنابراین جریان تخلیه کل که وابسته به چگالی بار یونی و شدت میدان الکتریکی روی سطح الکتروود تخلیه هست، کاهش می‌یابد.

تابع توزیع نرمال لگاریتمی به ۱۸ بخش تقسیم شده و به‌منظور به‌دست آوردن درصد نرخ شارش جرم هر قطر ذره در این بخش‌ها انتگرال‌گیری شده است.

در مدل بررسی شده سرعت سیال ورودی ۱ متر بر ثانیه فرض شده و نرخ شارش جرم ذره بر حسب مقدار مرجع 10^{-5} kg/s بیان شده است. شبیه‌سازی‌ها برای مقادیر مختلفی از نرخ شارش جرم ذره یعنی ۰/۵، ۲، ۱۰ و ۲۰ برابر مقدار مرجع انجام شده است. همچنین مقدار ولتاژ اعمال شده به الکتروود تخلیه نیز برابر ۳۰ کیلوولت می‌باشد.

نتایج راندمان جمع‌آوری جرم کل و راندمان جمع‌آوری ذرات با قطر، ۰/۳، ۱/۴، ۵، ۱۰ و ۱۵ میکرومتر به‌صورت انفرادی به ازای نرخ شارش جرم ذرات مختلف در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۲). عملکرد ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی برای نرخ‌های شارش جرم ذرات مختلف

راندمان جرم کل	راندمان کسری جمع‌آوری ذرات با قطرهای مختلف (میکرومتر)					نرخ شارش جرم کل
	۱۵	۱۰	۵	۱/۴	۰/۳	
۹۶/۷	۱۰۰	۹۸/۵	۵۹/۵	۲۰/۷	۸/۵	$c = 0.5c_0$
۹۶/۶	۱۰۰	۹۸/۵	۵۸/۵	۱۹/۵	۱۰	$c = 2c_0$
۹۶/۵	۱۰۰	۹۷/۷	۶۰	۲۲/۵	۱۰/۷	$c = 10c_0$
۹۶/۴	۱۰۰	۹۶/۷	۶۴/۷	۲۶/۲	۱۲/۵	$c = 20c_0$

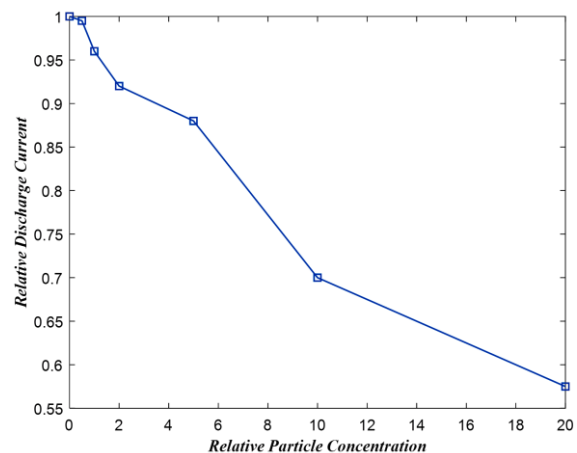
همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای کوچک‌ترین ذره (۰/۳ میکرومتر) راندمان جمع‌آوری بسیار پایین بوده است. با افزایش قطر ذرات تا ۱۰ میکرومتر راندمان جمع‌آوری نیز افزایش یافته و به ازای قطر ۱۵ میکرومتر و اندازه بزرگ‌تر از آن تمامی ذرات روی صفحات کلکتور ته‌نشین می‌شوند. اثرات غلظت‌های مختلف ذرات بر راندمان جمع‌آوری نیز در این جدول قابل مشاهده است.

با افزایش نرخ شارش جرم ذرات از $0.5c_0$ تا $20c_0$ ، راندمان جمع‌آوری ذرات ریز ۰/۳، ۱/۴ و ۵ میکرومتر به ترتیب ۴۷/۱٪، ۲۶/۵٪ و ۸/۸٪ افزایش می‌یابد. همانگونه که در مرجع [۲۳] اشاره شده است، به دلیل آشفته‌گی، نیروهای پसार هوا که منجر به هدایت ذرات به سمت صفحات ته‌نشینی می‌شوند، با افزایش غلظت ذرات قوی‌تر شده و در نتیجه ناحیه خالی از ذرات در پشت الکتروود تخلیه به‌طور قابل توجهی به سمت کلکتورها گسترش می‌یابند. با توجه به اینکه سرعت رانشی ذرات بسیار کوچک قابل چشم‌پوشی است، آن‌ها به راحتی به دنبال شارش

باعث تغییر چشمگیر ساختار جریان هوا در پشت سیم تخلیه شده و باعث آشفته‌گی بیشتر آن می‌شود، افزایش جزئی در راندمان جمع‌آوری ذرات بسیار کوچک مشاهده شده است. همچنین، علی‌رغم در نظر گرفتن نرخ جریان جرمی مختلف در ورودی، به دلیل غالب بودن ذرات بزرگ تزریق شده در ورودی، مقدار مشابهی از راندمان جمع‌آوری جرم به‌دست آمد. در خروجی کانال، ذراتی با سایز هم اندازه و بزرگ‌تر از ۱۵ میکرومتر مشاهده نشده و به ازای غلظت‌های مختلف در نظر گرفته شده، ذرات با قطر ۵ میکرومتر بیشترین درصد جرمی را در خروجی داشتند. با افزایش نرخ شارش جرم از مقدار $c = 0/5c_0$ به $c = 20c_0$ ، تقریباً ۴۲٪ کاهش در جریان تخلیه متوسط مشاهده شده است که با اندازه‌گیری‌های انجام شده در مرجع [۱۹] به خوبی هم‌خوانی دارد.

۷- مراجع

- [1] K., Parker, "Electrical Operation of Electrostatic Precipitators," No. 41. IET, 2003
- [2] Y., Guo, et al., "Enhancing PM Removal by Pulse Energized Electrostatic Precipitators—a Comparative Study," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 47, pp. 365-375, 2018.
- [3] B., Lu, et al., "Comparison of Dust Particle Dynamics Under Different Electrode Shapes at the Early Stage of Negative Corona Discharge," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 47, pp. 4915-4922, 2019.
- [4] X., Wang, J., Chang, C., Xu, P., Wang, L., Cui, and C., Ma, "Electrical Characteristics of Electrostatic Precipitator with a Wet Membrane-based Collecting Electrode," Journal of Electrostatics, vol. 80, pp. 85-94, 2016.
- [5] X. Xu, X. Gao, P. Yan, W. Zhu, C. Zheng, Y. Wang, et al., "Particle Migration and Collection in a High-temperature Electrostatic Precipitator," Separation And Purification Technology, vol. 143, pp. 184-191, 2015.
- [6] X. Xu, C. Zheng, P. Yan, W. Zhu, Y. Wang, X., Gao, et al., "Effect of Electrode Configuration on Particle Collection in a High-temperature Electrostatic Precipitator," Separation And Purification Technology, vol. 166, pp. 157-163, 2016.
- [7] C. Zheng, Y. Wang, X. Zhang, Z. Yang, S. Liu, Y. Guo, et al., "Current Density Distribution and Optimization of the Collection Electrodes of a Honeycomb Wet Electrostatic Precipitator," RSC Advances, vol. 8, pp. 30701-30711, 2018.
- [8] K. Adamiak, "Numerical Models in Simulating Wire-plate Electrostatic Precipitators: A Review," Journal Of Electrostatics, vol. 71, pp. 673-680, 2013.
- [9] H. Shen, W. Yu, H. Jia, and Y. Kang, "Electrohydrodynamic Flows in Electrostatic Precipitator of Five Shaped Collecting Electrodes," Journal of Electrostatics, vol. 95, pp. 61-70, 2018.



شکل (۱۸): جریان تخلیه کرونای نسبی بر حسب غلظت ذرات نسبی

۶- نتیجه‌گیری

یک مدل محاسباتی دوبعدی به منظور مطالعه همه پدیده‌های ضروری در یک ته‌نشین کننده صفحه‌ای یک مرحله‌ای ساده با در نظر گرفتن عکس‌العمل‌های متقابل بین میدان الکتروستاتیکی، میدان شارش، باردار شدن ذرات و حرکات آشفته آن‌ها پیاده‌سازی شد. این مدل شامل تعیین شرایط الکتریکی (میدان الکتریکی و بار فضایی)، الگوی شارش القاء شده توسط عکس‌العمل متقابل باد یونی و شارش گاز اصلی، و مسیر و انباشته شدن ذرات تحت غلظت‌های متفاوت در ورودی می‌باشد. این مدل در نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شده است.

شبیه‌سازی‌های عددی دوبعدی برای یک گستره از قطرهای ذرات تکی (۱ الی ۵۰ میکرومتر)، یک غلظت ذرات رقیق و بار فضایی ذرات قابل چشم‌پوشی انجام داده و در مورد نتایج آن بحث شد. تأثیر جریان الکتروهیدرودینامیکی در جمع‌آوری ذرات نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ارائه شده تأیید کرد که ذرات بزرگ‌تر دارای بازده جمع‌آوری بالاتری هستند. نشان داده شد که جریان الکتروهیدرودینامیکی تأثیر ناچیزی در راندمان جمع‌آوری ذرات بسیار کوچک داشته و هیچ اثر عملی روی ذرات بزرگ ندارد. تأثیر افزایش غلظت ذرات بر عملکرد ته‌نشین کننده نیز مورد بررسی قرار گرفت. توزیع اندازه ذرات نرمال لگاریتمی برای ذرات آزاد شده با قطرهای مختلف در ورودی کانال فرض شده و جابه‌جایی ذرات با قطر مختلف شبیه‌سازی شد. نتایج به‌دست آمده حاکی از آنند که صرف نظر از اندازه ذرات، درصد بالایی از ذرات رسوب شده در مناطق نزدیک به سیم الکتروود تخلیه کرونا بر روی صفحات کلکتور به دام می‌افتند و ذرات بزرگ‌تر همواره به دلیل مواجه شدن با نیروهای الکتروستاتیکی قوی‌تر، بالاترین راندمان جمع‌آوری را دارند. با توجه به اینکه افزایش غلظت ذرات

- [18] H. Fujishima, Y. Ueda, K. Tomimatsu, and T. Yamamoto, "Electrohydrodynamics of Spiked Electrode Electrostatic Precipitators," *Journal Electrostatics*, vol. 62, pp. 291-308, 2004.
- [19] J. Podlinski, A. Niewulis, J. Mizeraczyk, and P. Atten, "ESP Performance for Various Dust Densities," *Journal Electrostatics*, vol. 66, pp. 246-253, 2008.
- [20] J. Podlinski, A. Niewulis, and J. Mizeraczyk, "Electrohydrodynamic Flow and Particle Collection Efficiency of a Spike-Plate Type Electrostatic Precipitator," *Journal Electrostatics*, vol. 67, pp. 99-104, 2009.
- [21] C. J. Chen, Sh. Y. Jaw, "Fundamentals of Turbulence Modeling," Taylor & Francis, 1998.
- [22] 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, pp. 331-335, 2011.
- [23] Farnoosh, N., K. Adamiak, and G. S. P. Castle, "Three-Dimensional Analysis of Electrohydrodynamic Flow in a Spiked Electrode-Plate Electrostatic Precipitator," *Journal of Electrostatics*, vol. 69, pp. 419-428, 2011.
- [24] N. Morasaei, M. Tabrizian, and M. Ansarian, "Modeling and Estimation of Corona Losses in Bipolar HVDC Transmission Line Using Finite Element Methods (FEM)," *Scientific Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 4, pp. 37-47, 2018 (In Persian).
- K. Adamiak and P. Atten, "Numerical Simulation of the 2-D Gas Flow Modified by the Action of Charged Fine Particles in a Single-Wire ESP," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 16, pp. 608-614, 2009.
- [10] Z. He, and E. Dass, "Correlation of Design Parameters with Performance for Electrostatic Precipitator. Part I. 3D Model Development and Validation," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 57, pp. 633-655, 2018.
- [11] Z. Long, and Q. Yao, "Evaluation of Various Particle Charging Models for Simulating Particle Dynamics in Electrostatic Precipitators," *Journal of Aerosol Science*, vol. 41, pp. 702-718, 2010.
- [12] T. Yamamoto, M. Okuda, and M. Okubo, "Three-dimensional Ionic Wind and Electrohydrodynamics of Tuft/Point Corona Electrostatic Precipitator," *IEEE Transactions Industry Applications*, vol. 39, pp. 1602-1607, 2003.
- [13] T. Yamamoto, Y. Morita, H. Fujishima, and M. Okubo, "Three-dimensional EHD Simulation for Point Corona Electrostatic Precipitator Based on Laminar and Turbulent Models," *Journal Electrostatics*, vol. 64, pp. 628-633, 2006.
- [14] Zh. Feng, L. Zhengwei, and A. Kazimierz, "Numerical Simulation of Electrohydrodynamic Flow and Vortex Analysis in Electrostatic Precipitators," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, pp. 404-412, 2018.
- [15] L. Zhao and K. Adamiak, "Numerical Simulation of the Electrohydrodynamic Flow in a Single Wire-plate Electrostatic Precipitator," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, pp. 683-691, 2008.
- [16] U. Kogelschatz, W. Egli, and E. A. Gerteisen, "Advanced Computational Tools for Electrostatic Precipitators," *ABB Review* 4, pp. 33-42, 1999.
- [17] A. Soldati, "On the Effects of Electro-hydrodynamic Flows and Turbulence on Aerosol Transport and Collection in Wire-Plate Electrostatic Precipitators," *Journal Aerosol Science*, vol. 31, pp. 293-305, 2000.