

---

## **An Investigation on the Effect of Different Discharge Electrode Geometries on the Performance of the Spiked Electrode-Plate Electrostatic Precipitator**

**M. Gholami <sup>1\*</sup>, H. Kazerooni <sup>2</sup>**

\* Department of Defense Science and Technology, Institute of Defense Technology and Passive Defense, University and Higher Institute for National Defense and Strategic Research, Tehran, Iran

(Received: 25/03/2021; Accepted: 03/08/2021)

### **Abstract**

*Since the early twentieth century, electrostatic precipitators have been recognized as an important industrial technology and have been used as air pollution control devices in industrial applications such as cement plants and diesel engine generators. Despite the high overall efficiency of electrostatic precipitators, the fractional efficiencies for submicron particles are lower than that of larger particles. On the other hand, the laws on particulate matter injected into the ambient air by industrial processes have become increasingly stringent, for example, there has been a 30 percent reduction in the permitted amount of particulate matter emission by the Chinese thermal power plants regulators from 2012 to 2014. Therefore, the need to take precautions to improve the performance of this equipment in the face of these particles is felt more than ever. In this paper, by presenting the formulations related to various processes within the electrostatic precipitators and their three-dimensional numerical modeling, the electrical and electrohydrodynamic properties as well as, the submicron particle collection efficiencies for a precipitator in laboratory dimensions with different spiked electrodes are investigated. For this purpose, airflow lines and particle collection efficiencies with a diameter of 0.25 to 1.5  $\mu\text{m}$  for bidirectional and unidirectional spiked electrodes have been evaluated and compared. The results indicate that for the particles with diameters of 0.25 to 1.5  $\mu\text{m}$ , the two-side spiked electrode is the best discharge electrode arrangement for collecting submicron particles. The effect of particle mass flow rate on the deposition efficiency of fine particles for a two-side spiked electrode has also been investigated. The simulations show that the particle deposition efficiency decreases with increasing particle mass flow rate at the inlet.*

**Keywords:** Spiked discharge electrode, electrostatic precipitator, submicron particles, finite element method, electrohydrodynamic flow.

---

\* Corresponding author E-mail: m\_gholami\_ee@yahoo.com

## بررسی اثر هندسه‌های مختلف الکتروود تخلیه بر عملکرد تهنشین‌کننده الکتروستاتیکی

### صفحه‌ای - الکتروود خاردار

محمد غلامی<sup>۱\*</sup>، حنیف کازرونی<sup>۲</sup>

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: ۱۴۰۰/۰۵/۱۲)

### چکیده

از اوایل قرن بیستم، تهنشین‌کننده‌های الکتروستاتیکی به‌عنوان یک تکنولوژی مهم صنعتی شناخته شده و به‌عنوان یک تجهیز کنترل آلودگی هوا در کاربردهای صنعتی نظیر کارخانه سیمان و ژنراتورهای موتور دیزلی استفاده می‌شوند. با وجود راندمان کلی بالای تهنشین‌کننده‌های الکتروستاتیکی، راندمان کسری به ازای ذرات زیرمیکرون نسبت به ذرات بزرگتر پایین بوده است. از طرفی قوانین مربوط به ذرات ریزی که توسط فرآیندهای صنعتی به هوای محیط تزریق می‌شوند، روز به روز سخت‌گیرانه‌تر شده است (به‌عنوان مثال، کاهش ۳۰ درصدی مقدار مجاز انتشار ریزگرد توسط نیروگاه‌های حرارتی چین از سال ۲۰۱۲ به ۲۰۱۴). بنابراین، نیاز به انجام تهمیداتی به‌منظور بهبود عملکرد این تجهیز در مواجهه با این ذرات بیش از پیش حس می‌شود. در این مقاله با ارائه فرمولاسیون مربوط به فرآیندهای مختلف درون تهنشین‌کننده الکتروستاتیکی و مدل‌سازی عددی سه بعدی آنها، مشخصه‌های الکتریکی و الکتروهایدرودینامیکی و همچنین راندمان‌های جمع‌آوری ذرات زیرمیکرون برای یک تهنشین‌کننده در ابعاد آزمایشگاهی با الکتروودهای خاردار مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور، خطوط شارش هوا و راندمان جمع‌آوری ذرات با قطر ۰/۲۵ الی ۱/۵ میکرومتر برای الکتروودهای خاردار دوجبهته و تک‌جبهته ارزیابی و مقایسه شده است. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که برای ذرات با قطرهای ۰/۲۵ الی ۱/۵ میکرومتر، تهنشین‌کننده با الکتروود خاردار دوجبهته بهترین آرایش الکتروود تخلیه بوده است. اثر نرخ شارش جرم ذرات بر راندمان تهنشینی ذرات ریز برای الکتروود خاردار دوجبهته نیز بررسی شده است. شبیه‌سازی‌ها نشان داده است که با افزایش نرخ شارش جرم ذرات در ورودی، راندمان تهنشینی ذرات کاهش می‌یابد.

**کلید واژه‌ها:** الکتروود تخلیه خاردار، تهنشین‌کننده الکتروستاتیکی، ذرات زیرمیکرون، رسوب‌دهنده الکتروستاتیکی، روش اجزاء محدود، شارش الکتروهایدرودینامیکی

### ۱. مقدمه

الکتریکی در مجاورت الکتروود تخلیه، الکترون‌های آزاد تولید شده و به‌واسطه نیروی الکتریکی به‌سمت صفحات کلکتور حرکت می‌کنند. در این مسیر به‌دلیل داشتن شتاب بالا به مولکول‌های گاز برخورد کرده و براساس فرآیندی که از آن به‌عنوان تکثیر بهممنی یاد می‌شود، تعدادی زیادی از الکترون‌های آزاد در مجاورت الکتروود تخلیه به‌وجود می‌آید. با دور شدن این الکترون‌ها از الکتروود تخلیه، شتاب آنها کاسته شده و در برخورد با مولکول‌های گاز در فضای بین الکتروود منجر به تولید یون‌های گازی منفی می‌شوند. یون‌های گازی با ذرات ریز برخورد کرده و ذرات را باردار می‌کنند. در ادامه ذرات ریز، به‌عنوان یک ذره باردار در طول میدان الکتریکی منحرف می‌شوند تا به‌سمت

یکی از مناسب‌ترین ابزارها برای فیلترسازی ذرات در جهت رسیدن به سطوح انتشار مطلوب، به‌ویژه برای کارخانه‌های فرآوری که دارای نرخ تولید جریان گاز بزرگی هستند، تهنشین‌کننده الکترواستاتیکی است [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 ولتاژ به الکتروود تخلیه و زمین‌شدن صفحات کلکتور در ناحیه بین الکتروود تشکیل می‌گردد. در یونیزاسیون منفی (اعمال ولتاژ منفی به الکتروود تخلیه)، به‌دلیل ایجاد تخلیه

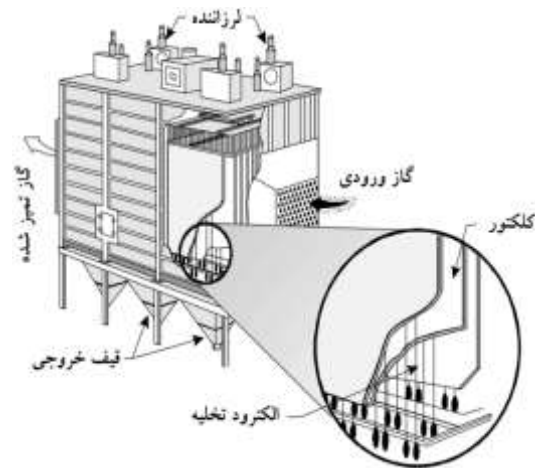
زیرمیکرون دارد. در مرجع [۱۲]، تجزیه و تحلیل عددی برای بررسی تأثیر طول سیم، فاصله بین سیم‌ها و زاویه خم شدن سیم، که مؤلفه‌های هندسی الکتروود تخلیه خازدار هستند، بر راندمان جمع آوری انجام شد.

راندمان جمع آوری جرم ذرات در ته‌نشین‌کننده‌های صفحه‌ای صنعتی مدرن در حدود ۹۹٪ می‌باشد. با وجود راندمان کلی بالای ته‌نشین‌کننده‌های الکتروستاتیکی، راندمان کسری به ازای ذرات زیرمیکرون نسبت به ذرات بزرگتر پایین بوده است. اما به دلیل غلظت پایین ذرات زیرمیکرون نسبت به ذرات بزرگتر، اثر راندمان کسری پایین این ذرات بر راندمان کل، ناچیز بوده و معمولاً راندمانی بالاتر از ۹۹٪ برای ته‌نشین‌کننده‌ها گزارش می‌شود [۱]. از طرفی قوانین مربوط به ذرات ریزی که توسط فرآیندهای صنعتی به هوای محیط تزریق می‌شوند، روز به روز سخت‌گیرانه‌تر شده است. به‌عنوان مثال، مطابق استاندارد ماه جولای سال ۲۰۱۴ در کشور چین، انتشار ریزگردها در خروجی نیروگاه‌های حرارتی می‌بایست کمتر از ۲۰ میلی‌گرم بر نانومتر مکعب باشند که این مقدار در ماه ژانویه سال ۲۰۱۲، ۳۰ میلی‌گرم بر نانومتر بود. اما عمده ته‌نشین‌کننده‌های الکتروستاتیکی نصب شده در نیروگاه‌های حرارتی با سوخت ذغال سنگ قابلیت کاهش مقدار ذرات ریز تا مقدار ۵۰ میلی‌گرم بر نانومتر مکعب را دارند [۴]. بنابراین، با توجه به تغییرات به وجود آمده در استانداردهای انتشار ذرات دیزل، بهبود جمع‌آوری ذرات با قطرهای زیرمیکرون هنوز مهم بوده و از مسائل چالش برانگیز است.

در راستای پاسخگویی به چالش‌های مذکور، در این مقاله الگوهای شارش الکتروهیدرودینامیکی، سرعت جابه‌جایی ذرات و راندمان ته‌نشینی برای سه آرایش متفاوت الکتروود تخلیه کرونا مورد بررسی قرار خواهد گرفت: الکتروود خازدار دوجته (نوع ۱)، الکتروود خازدار در خلاف جهت شارش سیال (نوع ۲) و الکتروود خازدار در جهت موافق شارش سیال (نوع ۳). همچنین، شارش ثانویه الکتروهیدرودینامیکی و اثرگذاری متقابل آن با شارش هوای اصلی در صفحات مختلفی از طول کانال ته‌نشین‌کننده، در اثر اعمال ولتاژهای با دامنه متفاوت به الکتروود تخلیه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در ادامه، اثر شارش الکتروهیدرودینامیکی بر نرخ ته‌نشینی ذرات در طول کانال برای سایزهای مختلف ذرات و ولتاژ اعمالی متفاوت ارزیابی می‌شود. در انتها، اثر نرخ شارش ذرات بر راندمان ته‌نشین‌کننده برای فرم‌های مختلف الکتروود تخلیه در یک ولتاژ مشخص مورد سنجش قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است، در برخی موارد نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با

کلکتور منتقل شوند و روی آنها جمع‌آوری شوند [۲]. ته‌نشین‌کننده‌ها از دیدگاه شکل کلکتور به دو دسته ته‌نشین‌کننده‌های صفحه‌ای و استوانه‌ای (سیلندری) تقسیم‌بندی می‌شوند. در شکل (۱)، یک ته‌نشین‌کننده نوع صفحه‌ای - سیمی نشان داده شده است.

درک مناسب از ساز و کارهای پیچیده درگیر در فرآیند ته‌نشینی و مؤلفه‌های مختلف مؤثر بر رسوب ذرات مانند اندازه ذرات، نسبت بار به جرم، سرعت جابه‌جایی، مؤلفه‌های الکتریکی و شرایط بهره‌برداری، جهت دستیابی به بهترین طراحی و ارضاء راندمان جمع‌آوری مورد نیاز بسیار مهم است [۳-۵].



شکل (۱): ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی صفحه‌ای - سیمی

تعیین تجربی این خصوصیات معمولاً از نظر زمان و همچنین هزینه بسیار گران هستند و شبیه‌سازی‌های عددی این فرآیند سلطه بیشتری پیدا کرده‌اند. در میان مقالات متعدد در مورد ته‌نشین‌کننده‌های الکتروستاتیکی، تنها برخی با استفاده از روش‌های محاسباتی سه‌بعدی به مدل‌سازی فرآیند الکتروستاتیکی با در نظر گرفتن هندسه واقعی الکتروودهای تخلیه سر و کار دارند [۶-۸].

طراحی الکتروود تخلیه نیز یک عامل برجسته در حذف ذرات زیرمیکرون می‌باشد. الکتروودهای تخلیه نوع سفت و سخت با خارهای موازی با کلکتورها توسط تعداد کمی از نویسندگان مورد بررسی قرار گرفته است. در مرجع [۹]، میدان الکتریکی و توزیع چگالی یون در یک رسوبگر با الکتروودهای تخلیه خازدار تخمین زده شده و تأثیر هندسه الکتروود صاف و خازدار در حذف ذرات زیرمیکرون بررسی شده است. پودلینسکی و همکاران [۱۰، ۱۱] نشان داده‌اند که در آرایش الکتروود خازدار، تخلیه کرونا منفی به دلیل تزریق مقدار بیشتر بارهای یونی به کانال ته‌نشینی نسبت به تخلیه کرونا مثبت، کارایی بیشتری در جمع‌آوری ذرات

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

در روابط فوق،  $J$  چگالی سطحی جریان بر حسب  $A/m^2$ ،  $\mu$  تحرک پذیری بر حسب  $m^2/(V.s)$ ،  $\rho_q$  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  $\epsilon_0$  ضریب گذردهی خلا 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 ( $10^2$ ) 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 تحرک‌پذیری ثابت است.

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

ابتدایی‌ترین و شاید مهم‌ترین قدم در مطالعه تهنشینی 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  $k-\epsilon$  [۱۳] در نظر گرفته شده است. با مفروضات انجام شده، شارش هوا می‌بایست از معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس را ارضا کند:

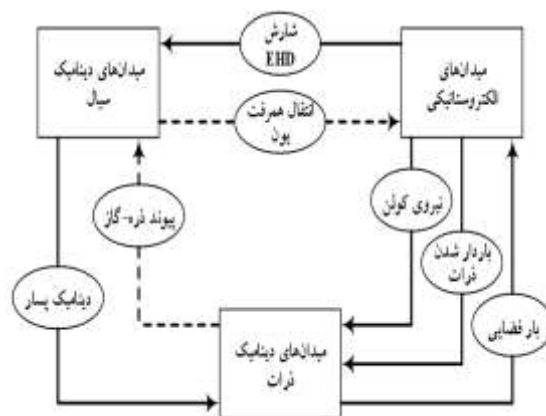
$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (7)$$

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

نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در مراجع [۱۰، ۱۱] مقایسه خواهد شد.

### ۲. 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 (۲) نشان داده شده است. خطوط پیوسته و خط‌چین به ترتیب نشان از پیوند قوی و ضعیف بین دو میدان هستند. مدل‌سازی ریاضی برای شبیه‌سازی تهنشینی‌کننده 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 درحالی که کلکتور زمین شده است، یک کرونا می‌تواند در طول سیم الکتروود و انحراف یون‌ها به سمت صفحات کلکتور اتفاق می‌افتد.



شکل (۲): عکس‌العمل‌ها و ارتباطات متقابل بین میدان‌های تهنشین‌کننده 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:

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

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

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

پسار است. همچنین  $\tau_p$  زمان پاسخ سرعت ذرات هستند که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

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

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

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

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

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.

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

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

که در آن  $\tau_c$  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  $f_a$  تابعی است که برای پیوند نرخ‌های شارژ میدانی و انتشار به کار می‌رود و به صورت زیر تعریف می‌شود:

که در آن  $\rho_f$  چگالی سیال بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب،  $P$  فشار بر حسب پاسکال،  $\mu$  ویسکوزیته گاز بر حسب کیلوگرم بر متر ثانیه،  $u$  سرعت سیال بر حسب متر بر ثانیه و  $\rho E$  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 الکتروهیدرودینامیکی (باد یونی) توسط کرونا می‌باشد. برای میدان‌های شارش لامینار، این معادلات پایه به دست آمده برای پایداری جرم و مومنتوم کافی بوده و معادلاتی که در ادامه بیان می‌شود، صرفاً برای میدان شارش آشفته می‌باشد. در صورتی که مدل‌سازی آشفتگی در معادلات شارش سیال ضروری باشد، روند مدل‌سازی شامل محاسبه عدد رینالدز می‌باشد [۱۴].

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

در مسائل تهنشین‌کننده‌های الکتروستاتیکی که سیال ورودی به همراه 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 [۱۵]. 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:

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

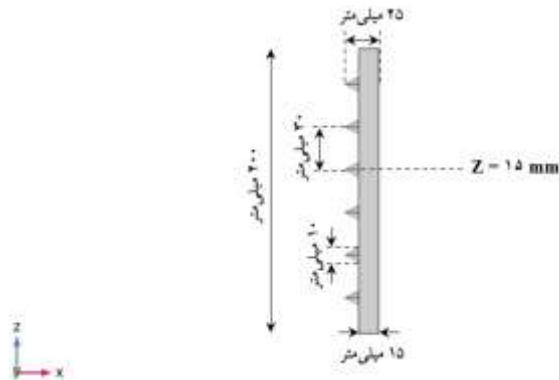
$$\frac{d}{dt}(m_p \mathbf{v}) = \mathbf{F}_t \quad (10)$$

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  $F_t$  کل نیرویی 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 به صورت 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

نوع دوم و سوم الکتروود، که خارهای مخروطی شکل در یک طرف آن وجود دارند، مطابق شکل زیر است. لازم به ذکر است مشخصات الکتروود در این دو مدل یکسان بوده و تنها جهت قرارگیری الکتروود در کانال تهنشین‌کننده متفاوت است (در نوع ۲، خارها رو به ورودی کانال بوده و در نوع ۳ خارها به سمت خروجی کانال هستند).



شکل (۵): طراحی شماتیک الکتروود تخلیه خاردار یک‌طرفه

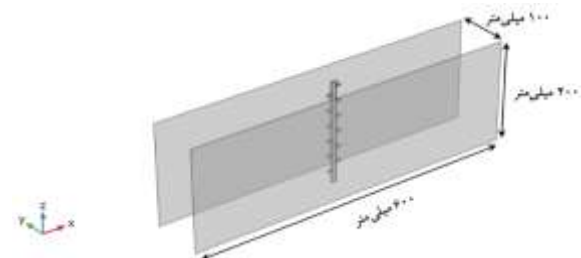
#### ۴. روش تحقیق

در این بخش مشخصه‌های شارش الکتروویدرودینامیکی و الکتریکی یک تهنشین‌کننده الکتروستاتیکی مدل صفحه‌ای در ابعاد آزمایشگاهی و با الکتروودهای خاردار که در مرجع [۱۰، ۱۱] بررسی شده است، ارزیابی شده و راندمان آن برای ذرات زیرمیکرون با قطرهایی در بازه ۰/۲۵ الی ۱/۵ میکرومتر پیش‌بینی می‌شود. تهنشین‌کننده مذکور شامل دو صفحه موازی زمین شده و یک الکتروود خاردار تغذیه شده توسط یک ولتاژ منفی جریان مستقیم در بین صفحات می‌باشد. در این شرایط، با توجه به اینکه میدان الکتریکی حول نقاط نوک تیز شدت بالایی داشته و تولید یون در این نقاط زیاد است، یک تخلیه الکتریکی غیر یکنواخت حول الکتروود تخلیه شکل خواهد گرفت. در این شبیه‌سازی فعل و انفعالات پیچیده بین میدان الکتریکی، دینامیک‌های سیال و شارش ذرات در نظر گرفته شده است. بدین منظور از فیزیک‌های مختلفی که در نرم‌افزار COMSOL نظر گرفته شده، استفاده شده است. برای حل معادلات مربوط به شارش هوا از رابط فیزیک Turbulent Flow نوع مدل k-ε بهره برده شده است. پتانسیل الکتریکی و چگالی بار فضایی یونی با استفاده از رابط‌های فیزیک Electrostatic و Charge Transport تعیین می‌شود. همچنین از رویکرد حرکت تصادفی لگرانژی به منظور تعیین حرکت ذرات که تحت تاثیر شارش الکتروویدرودینامیکی و اثرات اغتشاشی هستند، استفاده شده است. این بخش با استفاده از رابط فیزیک

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

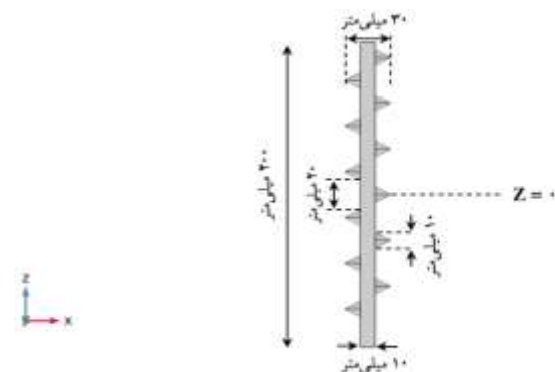
#### ۳. توصیف مدل

مدل محاسباتی سه‌بعدی یک تهنشین‌کننده الکتروستاتیکی نوع صفحه‌ای-میله‌ای در نظر گرفته شده در این بخش، در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل (۳): آرایش سه‌بعدی تهنشین‌کننده الکتروستاتیکی مدل صفحه‌ای با الکتروود خاردار

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 خاردار که در مرکز دو صفحه موازی مستقر شده است. شارش هوا به‌عنوان سیال اصلی در راستای مثبت محور x می‌باشد. لازم به ذکر است با توجه به نامتقارن بودن مدل در راستای محور z، از مدل سه‌بعدی به جای دوبعدی بهره برده شده است. بنابراین مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار COMSOL در محدوده  $-0.3 < x < 0.3(m)$ ،  $-0.05 < y < 0.05(m)$  و  $-0.1 < z < 0.1(m)$  از مختصات دکارتی می‌باشد. نوع اول الکتروود تخلیه مطابق شکل زیر از یک نوار فلزی صاف همراه با خارهای مخروطی شکل در دو جهت آن (راس مخروط‌ها در راستای مثبت و منفی محور x) تشکیل شده است. لازم به ذکر است، پهنای الکتروود تخلیه در راستای y برابر ۱ میلی‌متر بوده و سطح مقطع خارها به صورت بیضی هستند.



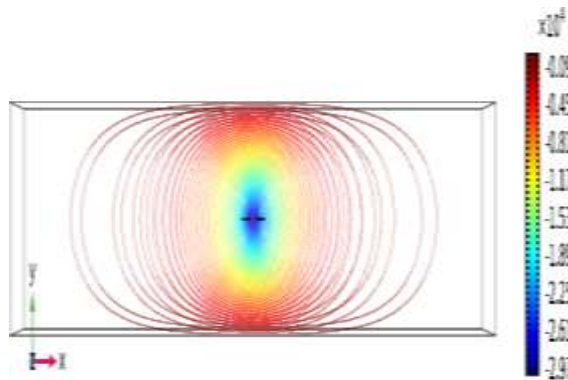
شکل (۴): طراحی شماتیک الکتروود تخلیه خاردار دوطرفه (نوع ۱)

نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی گزارش شده در مراجع [۱۰، ۱۱] مقایسه شده است. در واقع، با استفاده از یک فرآیند تکراری، چگالی بار یونی الکتروود تخلیه آنقدر اصلاح شده تا جریان تخلیه کل به‌دست آمده بسیار نزدیک به نتایج آزمایشگاهی باشد.

## ۵. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آنها

### ۵-۱. مشخصه‌های الکتریکی

در شکل زیر توزیع پتانسیل مربوط به ته‌نشین‌کننده با الکتروود خازدار دوجبهته هنگامی که توسط ولتاژ  $dc$  به اندازه  $30\text{ kV}$  برقرار شده، نشان داده شده است. بدین منظور،  $50$  خطوط هم‌پتانسیل (کانتور) با تفاوت دامنه  $600$  ولت مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تراکم کانتورها با حرکت از ناحیه حول الکتروود تخلیه به سمت کلکتورها کاهش می‌یابد.

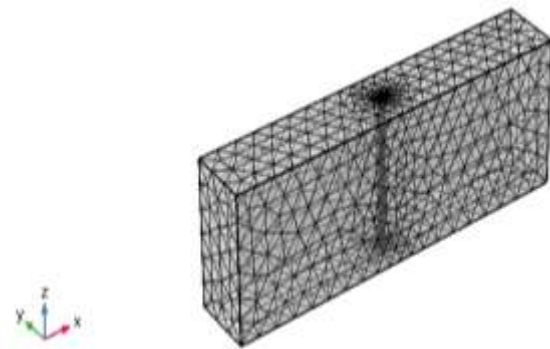


شکل (۷): خطوط هم‌پتانسیل الکتریکی در صفحه  $Z = 0$  ته‌نشین‌کننده الکتروودستاتیکی با الکتروود نوع ۱

با توجه به این قضیه که تزریق یون تنها در نواحی نزدیک به نقاط نوک تیز الکتروود تخلیه انجام شده و بخش بزرگی از ناحیه حول الکتروود بدون بار است، تعیین توزیع سه‌بعدی چگالی بار فضایی یونی در کانال ته‌نشین‌کننده از اهمیت بالایی برخوردار است. چگالی بار یونی در نقاط نوک تیز به‌گونه‌ای تعیین شده است که جریان تخلیه متوسط کل با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در مراجع [۱۰، ۱۱] تا حد امکان تطبیق داشته باشد. در شکل (۸)، توزیع چگالی بار یونی در صفحه  $Y = 0$  از حجم ته‌نشین‌کننده ارائه شده است. در این نمودارها، ولتاژ اعمال شده به الکتروود تخلیه  $30\text{ kV}$  بوده و بیشینه چگالی بار یونی برابر با  $485\text{ }\mu\text{C}/\text{m}^3$  (متناظر با جریان تخلیه کل  $350\text{ }\mu\text{A}$ ) در نقاط نوک تیز به‌عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته است. یون‌های تزریق شده از نقاط نوک تیز به سمت صفحات کلکتور حرکت می‌کنند و چگالی بار یونی را در فضا تشکیل می‌دهند.

Particle Tracking for Fluid Flow در نرم‌افزار COMSOL قابل پیاده‌سازی است.

ناحیه محاسباتی با استفاده از نرم‌افزار COMSOL مش‌بندی شده و به بخش‌های کوچک‌تری شبکه‌بندی می‌شوند. با توجه به اینکه مش‌بندی مناسب برای دستیابی به دقت نتایج مناسب ضروری می‌باشد [۱۴]، مطابق شکل زیر مدل ته‌نشین‌کننده با الکتروود دوجبهته به  $528$  المان مرزی لبه‌ای و  $37283$  المان ناحیه‌ای (از نوع Free Tetrahedral) تقسیم‌بندی شده است. همچنین به‌طور خاص این مش‌بندی در بخش الکتروود شامل  $348$  المان صفحه‌ای (از نوع Free Triangular) و  $1993$  المان ناحیه‌ای (از نوع Free Tetrahedral) می‌باشد.



شکل (۶): مش‌بندی مدل سه‌بعدی ته‌نشین‌کننده الکتروودستاتیکی با الکتروود تخلیه خازدار

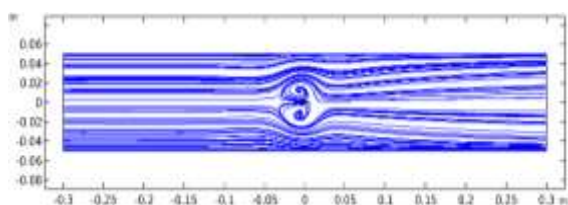
همان‌طور که مشاهده می‌شود، المان‌ها در مجاورت میله الکتروود به شدت سایز کوچک‌تری نسبت به بخش‌های دیگر دارند. یک ولتاژ با دامنه بالا و پلاریته منفی از نوع جریان مستقیم به الکتروود تخلیه اعمال می‌شود که منجر به ایجاد تخلیه کرونا در نقاط نوک تیز الکتروود و تزریق بار فضایی یونی به کانال بین کلکتوری می‌شود. در این شبیه‌سازی فرض می‌شود که هوا یک سیال تراکم‌ناپذیر، در حالت پایدار و مانا و دارای اغتشاش می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر عنوان شد، گاز مورد بررسی در این شبیه‌سازی، هوای محیط بوده و دارای چگالی  $\rho_f = 1.205\text{ kg}/\text{m}^3$  و ویسکوزیته  $\mu = 1.57 \times 10^{-5}\text{ kg}/\text{m}\cdot\text{s}$  می‌باشد. ذرات بی‌بار همراه با شارش هوا با سرعت  $0.6$  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 صرف‌نظر شده و فشار پیمانه‌ای هوا در خروجی برابر صفر فرض شده است.

همچنین، با توجه به توزیع غیریکنواخت چگالی بار یونی در سطح الکتروود تخلیه، فرضیه کپزوف در این شبیه‌سازی قابل به‌کارگیری نمی‌باشد. در عوض، جریان تخلیه کل به‌دست آمده از

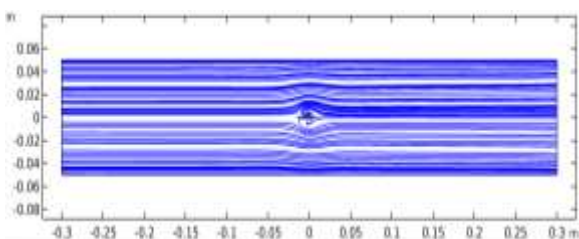
## ۲-۵. الگوهای شارش الکتروودیدرودینامیکی

### ۱-۲-۵. الکتروود تخلیه نوع ۱ (خاردار دو جهته)

در این بخش با بررسی خطوط شارش هوا در صفحات مشخصی از فضای کانال ته‌نشین‌کننده، اثر شارش الکتروودیدرودینامیکی ثانویه بر الگوی شارش هوای اصلی به ازای ولتاژهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل‌های زیر خطوط شارش هوای اصلی در صفحه  $Z = 15 \text{ mm}$  که از راس مخروط در پیشانی الکتروود تخلیه عبور می‌کند، برای سطح ولتاژ ۳۰- و ۱۹/۲- کیلوولت نشان داده شده است. این نمودار تایید کننده ساختار پیچیده شارش هوای در نواحی حول نقاط خاردار الکتروود تخلیه در کانال ته‌نشین‌کننده هست.



(۱۰)

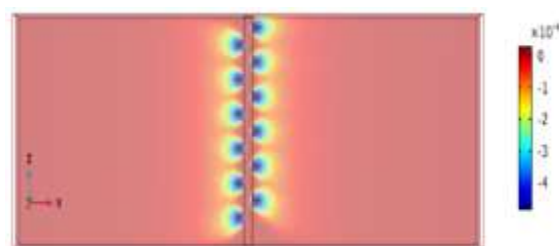


(۱۱)

شکل (۱۱): خطوط جریان هوا در ته‌نشین‌کننده با الکتروود نوع ۱: (۱) ولتاژ ۳۰- کیلوولت، (۲) ولتاژ ۱۹/۲- کیلوولت

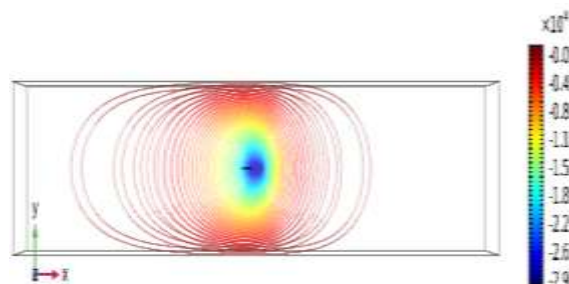
همان‌طور که در شکل‌های فوق نشان داده شده است، به دلیل اثرگذاری متقابل شدید بین شارش هوای اصلی و شارش ثانویه الکتروودیدرودینامیکی یک جفت تاوه در مجاورت خارهای مخروطی شکل الکتروود تخلیه شکل گرفته است. این دو تاوه با شارش هوای اصلی در پیشانی الکتروود تداخل ایجاد کرده و شارش هوا را به سمت کلکتور منحرف می‌کند. لازم به ذکر است، با کاهش دامنه ولتاژ، این تاوه کوچکتر شده و به الکتروود تخلیه نزدیک‌تر می‌شوند.

با بررسی خطوط شارش هوا از زاویه دیگر (شکل ۱۲) برای ته‌نشین‌کننده‌ای که الکتروود تخلیه آن توسط ولتاژ ۳۰kV- برقرار شده است، مشاهده می‌شود خطوط شارش هوای اصلی که به سمت خارهای مخروطی در پیشانی الکتروود تخلیه نزدیک می‌شوند، ۱۸۰ درجه تغییر جهت داده و دوباره پس از طی یک



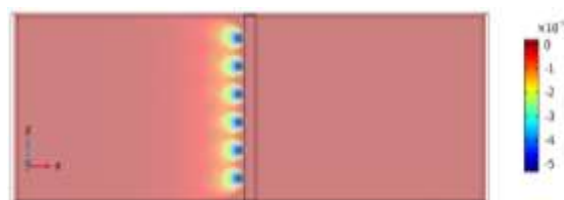
شکل (۸): توزیع بار فضایی یونی در صفحه  $Y = 0$  ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی با الکتروود نوع ۱ (نمای  $zx$ )

همان‌طور که در نمودار مربوط به صفحه  $Y = 0$  نشان داده شده است، چگالی بار فضایی یونی با دور شدن از الکتروود تخلیه کاهش می‌یابد. برای ته‌نشین‌کننده با الکتروود تخلیه خاردار در خلاف جهت شارش اصلی (نوع ۲)، مطابق شکل زیر، ۵۰ خطوط هم‌پتانسیل (کانتور) با تفاوت دامنه ۶۰۰ ولت مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تراکم کانتورها با حرکت از ناحیه حول الکتروود تخلیه به سمت کلکتورها کاهش می‌یابد. با توجه به وجود خارها در یک سمت الکتروود تخلیه (بخش منفی محور  $X$ )، سطوح پتانسیل در سمت چپ تصویر دامنه بالاتری نسبت به موقعیت مناظرشان در سمت راست تصویر دارند.



شکل (۹): خطوط هم‌پتانسیل الکتریکی در صفحه  $Z = 0$  ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی با الکتروود نوع ۲

در شکل (۹)، توزیع چگالی بار یونی در صفحه  $Y = 0$  از حجم ته‌نشین‌کننده با الکتروود تخلیه نوع ۲ ارائه شده است. در این نمودار، ولتاژ اعمال شده به الکتروود تخلیه ۳۰ kV- بوده و بیشینه چگالی بار یونی برابر با  $-532 \mu\text{C}/\text{m}^3$  (به دست آمده از مشخصه‌های ولتاژ-جریان آزمایشگاهی در مرجع [۱۱]) در نقاط نوک تیز به عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته است.

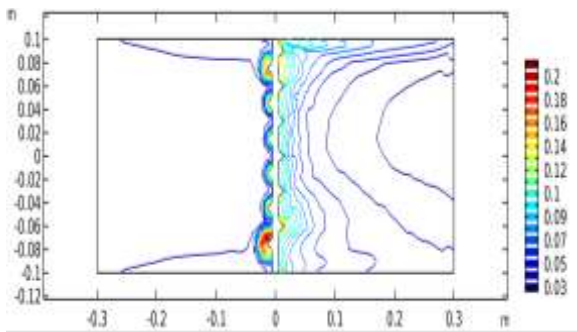


شکل (۱۰): توزیع بار فضایی یونی در صفحه  $Y = 0$  ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی با الکتروود نوع ۲

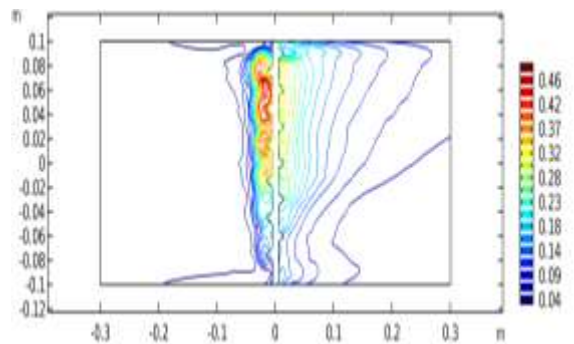


مخروطی شکل الکتروود تخلیه ظاهر شده است. با افزایش ولتاژ تحریک، بسته به میزان دامنه ولتاژ، آشفستگی در الگوی سرعت شارش سیال در صفحه شماره ۱ ظاهر می‌شود. نتایج به دست آمده در این بخش خیلی نزدیک به نتایج آزمایشگاهی گزارش شده در مرجع [۱۰] بوده است. همان گونه که در این مرجع گزارش شده است، دیوارهای جانبی منجر به نوسانات شدید در بخش‌های نزدیک به کلکتور و حول الکتروود تخلیه کرده است. با این وجود الگوی سرعت شارش هوا در بخش‌های مرکزی اطراف الکتروود تخلیه بسیار پایدار و مشابه هم‌دیگر هستند.

کانتورهای شدت اغتشاش<sup>۱</sup> ( $I$ ) در صفحه  $y = 0$  برای کمترین و بیشترین ولتاژ اعمالی به الکتروود تخلیه در شکل‌های زیر نشان داده شده است. بدین منظور از انرژی جنبشی اغتشاشی ( $k$ ) که توسط رابط فیزیک مربوطه محاسبه می‌شود، سرعت متوسط سیال ( $u_{avg}$ ) و رابطه  $k = 1.5(u_{avg}I)^2$  بهره برده شده است.



(۱)



(۲)

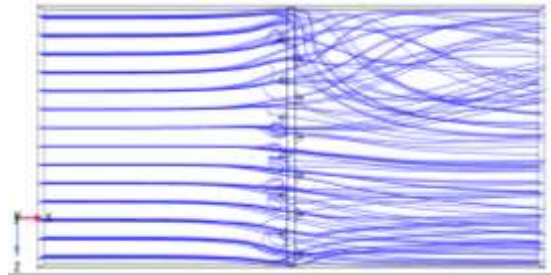
شکل (۱۴): کانتورهای شدت آشفستگی در صفحه  $y = 0$  mm (۱)

ولتاژ ۳۰- کیلوولت، (۲) ولتاژ ۱۹/۲- کیلوولت

افزایش شدید سطح اغتشاش ناشی از تخلیه الکتریکی کرونا می‌باشد. با فرض شدت اغتشاش صفر در ورودی، در مجاورت الکتروود تخلیه بیشینه شدت اغتشاش ۲۳٪ و ۵۰٪ به ترتیب برای ولتاژ ۱۹/۲- و ۳۰- کیلوولت مشاهده شده است.

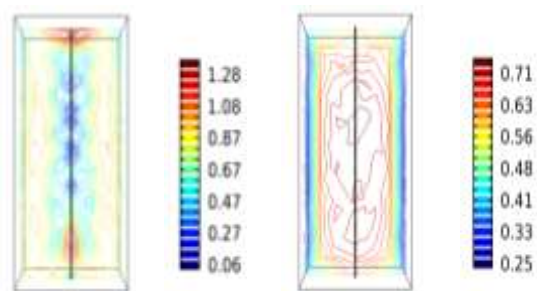
<sup>۱</sup> Turbulent Intensity

مسیر دایره‌ای شکل به سمت خروجی کانال نزدیک می‌شوند. در واقع، این پدیده به دلیل تداخل شدیدی که بین شارش هوای اصلی و شارش ثانویه الکتروویدرودینامیکی به وجود می‌آید، رخ می‌دهد. بنابراین وجود تاوه در صفحاتی که از راس خار مخروطی شکل در پیشانی الکتروود تخلیه عبور می‌کنند (مانند صفحه  $Z = 15$  mm)، نمود بیشتری پیدا می‌کند. همچنین افزایش دامنه ولتاژ اعمالی این موضوع را شدت می‌بخشد.

شکل (۱۲): خطوط جریان شارش هوا در صفحه  $y = 0$  mm

ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی با الکتروود نوع ۱

در ادامه به بررسی بردار سرعت شارش هوای اصلی در صفحات مختلف عمود بر کانال ته‌نشین کننده هنگامی که ولتاژهای مختلف به الکتروود تخلیه اعمال شود، پرداخته می‌شود. این صفحات، عمود بر محور  $x$  بوده (صفحه  $x=0$ ) و به صورت یکنواخت در موقعیت‌های  $-60$  و  $0$  میلی‌متری محور  $x$  واقع شده‌اند. انتظار می‌رود، به دلیل عکس‌العمل متقابل بین شارش اصلی و شارش الکتروویدرودینامیکی، سرعت شارش هوا دارای الگوهای آشفته‌ای باشد. در شکل (۱۳)، به ازای اعمال ولتاژ  $30$  kV- به الکتروود تخلیه، کانتورهای سرعت سیال در صفحه اشاره شده رسم شده است.



(۲)

(۱)

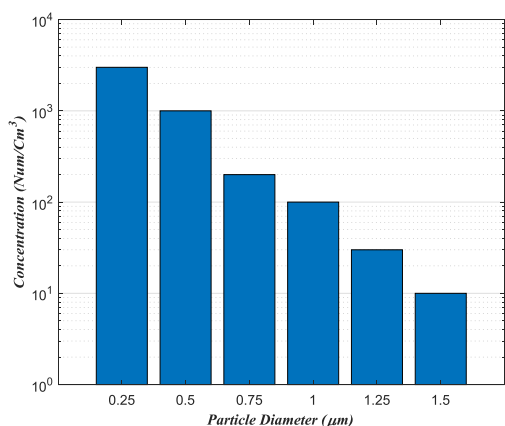
شکل (۱۳): توزیع مؤلفه طولی (در راستای  $x$ ) سرعت شارش هوابه ازای اعمال ولتاژ ۳۰ kV- (۱)  $x = -60$  mm، (۲)  $x = 0$  mm

مطابق شکل فوق، در صفحه شماره یک، الگوی سرعت شارش هوا خیلی آشفته و نامنظم نشده است. در حالی که در صفحه ۲ یک الگوی تقریباً منظم نشات گرفته از راس خارهای

همان‌طور که مشاهده می‌شود، دو تاوه در نزدیکی صفحات کلکتور شکل گرفته است که منجر به سوق دادن جریان هوا به سمت مرکز کانال و الکتروود تخلیه می‌شود. همچنین این دو تاوه در سطح ولتاژهای بالاتر وسیع‌تر و شدیدتر است. بنابراین در سطح ولتاژ بالاتر بهبود در ته‌نشینی ذرات کوچک مورد انتظار است.

### ۳-۵. اثر شارش الکتروود رودینامیکی بر عملکرد ته‌نشین‌کننده

ذراتی که در ورودی کانال ته‌نشین‌کننده تزریق می‌شوند، ذراتی با قطرهای مختلف در بازه ۰/۲۵ الی ۱/۵ میکرومتر، ضریب گذردهی نسبی ۴ و غلظت‌های تعدادی متفاوت (مطابق شکل (۱۷)) هستند.



شکل (۱۷): توزیع غلظت ذرات در ورودی کانال به ازای قطرهای مختلف آن

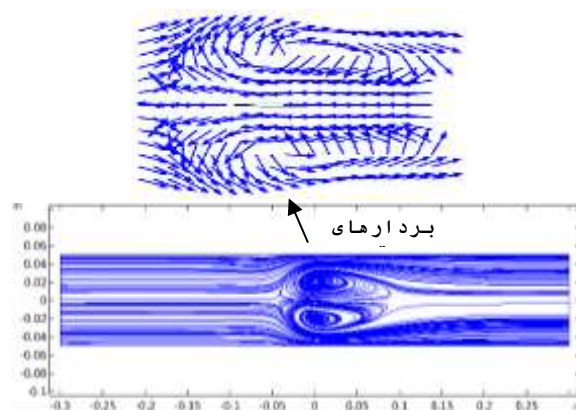
برای هر سایزی از ذرات، ۸۰۰ نقطه با توزیع یکنواخت در ورودی کانال به‌عنوان مکان تزریق ذرات در نظر گرفته شده است. بنابراین  $۴۸۰۰ = ۸۰۰ \times ۶$  مسیر برای تمامی ذرات قابل بررسی هستند. در این بخش ذرات از نظر الکتریکی خنثی به همراه سیال اصلی (هوا) با سرعت ۰/۶ متربرثانیه در ورودی کانال آزاد می‌شوند.

### ۱-۳-۵. الکتروود نوع ۱ (خاردار دو جهته)

در شکل (۱۸)، نتایج به‌دست‌آمده برای راندمان ته‌نشین‌کننده در شبیه‌سازی به ازای گستره مذکور برای قطر ذرات و ولتاژهای مختلف اعمالی رسم شده است. مطابق انتظار با افزایش ولتاژ اعمالی به الکتروود تخلیه، راندمان ته‌نشین‌کننده افزایش خواهد یافت. همچنین، با کاهش قطر ذرات به ازای ولتاژ اعمالی ثابت، راندمان ته‌نشین‌کننده کاهش می‌یابد.

### ۲-۲-۵. الکتروود تخلیه نوع ۲ و ۳ (خاردار یک جهته)

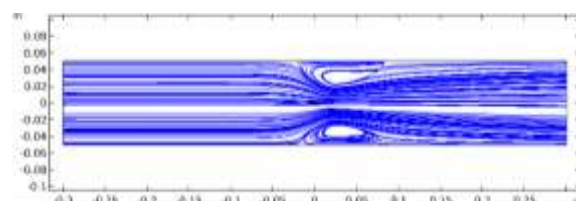
در شکل (۱۵)، خطوط شارش هوای اصلی در صفحه  $Z = 15 \text{ mm}$  برای ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی که دارای الکتروود تخلیه از نوع ۲ (خاردار در خلاف جهت شارش اصلی) بوده، به ازای ولتاژ تحریک ۳۰- کیلوولت نشان داده شده است.



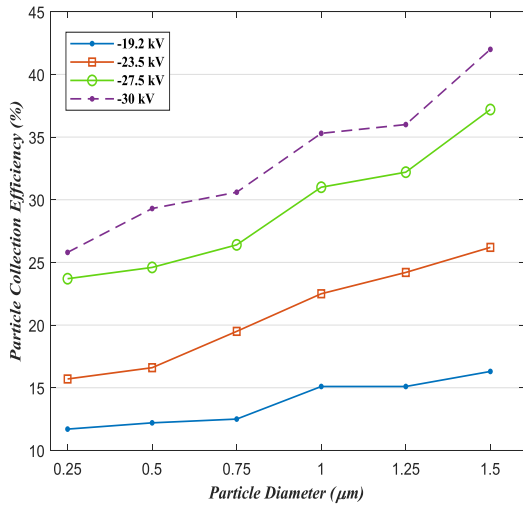
شکل (۱۵): خطوط جریان شارش هوا در صفحه  $Z = 15 \text{ mm}$  ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی با الکتروود نوع ۲ در سرعت سیال ورودی ۰/۶ متربرثانیه

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، دو تاوه در محاورت الکتروود تخلیه شکل گرفته است که در خلاف جهت شارش اصلی به گردش در می‌آیند. این تاوه‌ها شدت و قدرت بیشتری برای ولتاژ تحریک بزرگ‌تر دارند که به‌صورت مقطعی باعث بلوکه شدن شارش هوای اصلی می‌شوند. بنابراین خطوط شارش هوا به صورت وسیع‌تری به سمت صفحات کلکتور منحرف می‌شوند. در این شرایط به‌دلیل عکس‌العمل مقاوم شارش هوای اصلی و شارش ثانویه الکتروود رودینامیکی و همچنین نیروهای الکتروستاتیکی قوی در نزدیکی الکتروود تخلیه، ذرات از بخش میانی کانال ته‌نشین‌کننده به سمت صفحات کلکتور منحرف می‌شوند.

در شکل (۱۶) خطوط شارش هوای اصلی در صفحه  $Z = 15 \text{ mm}$  برای ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی که دارای الکتروود تخلیه از نوع ۳ (خاردار در جهت شارش اصلی) بوده، به ازای ولتاژ تحریک ۳۰- کیلوولت نشان داده شده است.

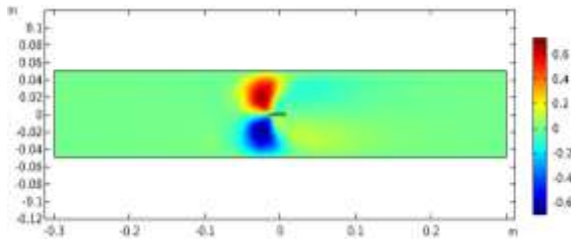


شکل (۱۶): خطوط جریان شارش هوا در صفحه  $Z = 15 \text{ mm}$  ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی با الکتروود نوع ۳ در سرعت سیال ورودی ۰/۶ متربرثانیه

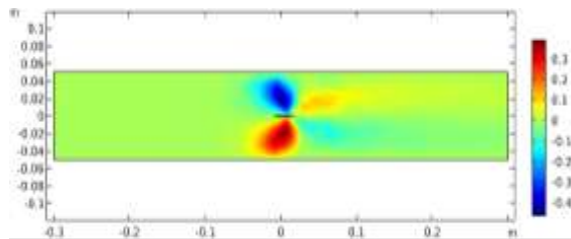


شکل (۲۰): راندمان جمع‌آوری ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی با الکتروود نوع ۳

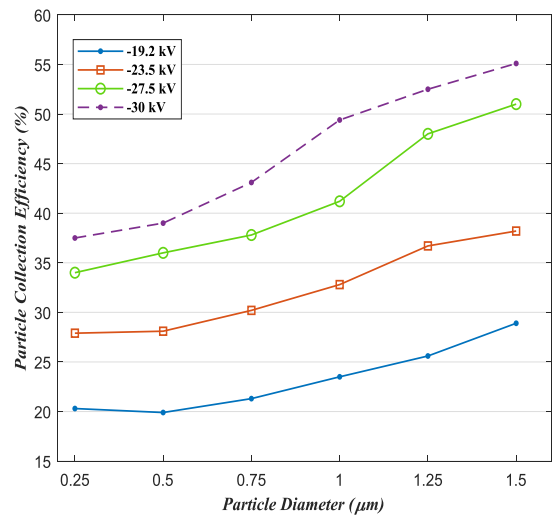
با توجه به اینکه ذرات زیرمیکرون (کوچکتر از یک میکرومتر) دارای سرعت رانشی بسیار پایینی هستند، غالباً مسیر جریان هوای اصلی را دنبال کرده و مسیر حرکتشان کمتر تحت تاثیر میدان الکتریکی قرار می‌گیرد. بنابراین سرعت جابه‌جایی ذرات به سمت صفحات کلکتور (سرعت در راستای محور  $y$  در این شبیه‌سازی) برای توصیف جابه‌جایی و ته‌نشینی ذرات بسیار ریز در شارش هوای دارای اغتشاش از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. در شکل‌های زیر، مؤلفه  $y$  بردار سرعت شارش هوا در صفحه  $Z = 15 \text{ mm}$  به ازای ولتاژ  $-30 \text{ kV}$  برای الکتروود تخلیه نشان داده شده است.



شکل (۲۱): مؤلفه  $y$  سرعت شارش هوا در ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی با الکتروود نوع ۲ در صفحه  $Z = 15 \text{ mm}$



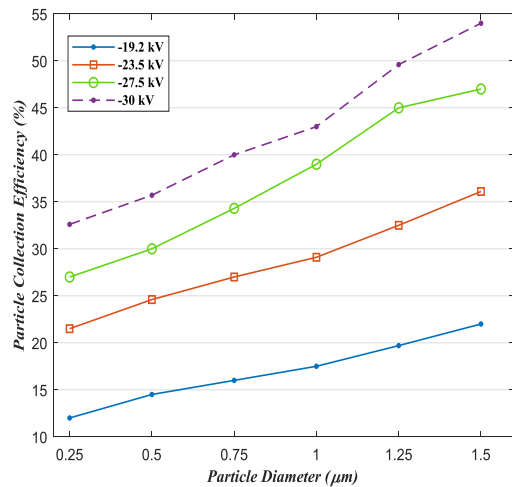
شکل (۲۲): مؤلفه  $y$  سرعت شارش هوا در ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی با الکتروود نوع ۳ در صفحه  $Z = 15 \text{ mm}$



شکل (۱۸): راندمان جمع‌آوری ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی با الکتروود نوع ۱

### ۵-۳-۲. الکتروود نوع ۲ و ۳ (خاردار یک‌جهته)

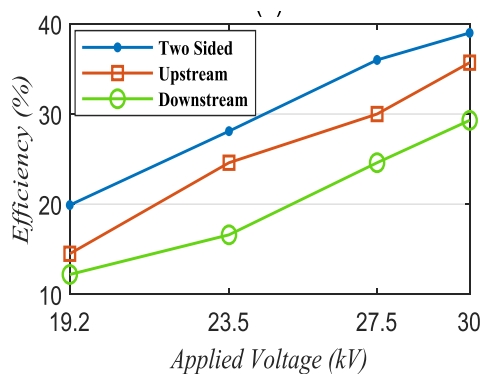
در این بخش همانند الکتروود تخلیه نوع ۱، راندمان ته‌نشین‌کننده به ازای قطرهای مختلف ذرات و ولتاژ اعمالی به الکتروود تخلیه خاردار یک‌جهته مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده در شبیه‌سازی در شکل (۱۹) و (۲۰) نشان داده است. مطابق انتظار راندمان ته‌نشینی ذرات با افزایش اندازه ذرات و سطح ولتاژ اعمال شده به الکتروود تخلیه افزایش می‌یابد. برای بزرگترین ولتاژ اعمالی به الکتروود  $(-30 \text{ kV})$ ، راندمان ته‌نشین‌کننده با الکتروود خاردار نوع ۲ و ۳ برای ذرات با قطر  $0.25 \text{ µm}$  میکرومتر به ترتیب برابر  $32/7\%$  و  $25/9\%$  هستند. همچنین در سطح ولتاژ  $-30 \text{ kV}$ ، برای ذرات با قطر  $1/5$  میکرومتر، راندمان ته‌نشین‌کننده دارای این دو الکتروود برابر  $54/2\%$  و  $42\%$  می‌باشند.



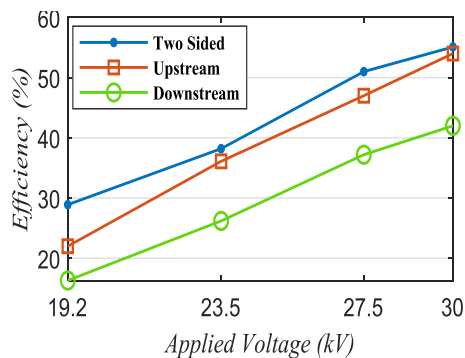
شکل (۱۹): راندمان جمع‌آوری ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی با الکتروود نوع ۲

خاردار به سمت خروجی عملکرد بهتری داشته و راندمان جمع‌آوری تخمین زده شده بالاتری در تمامی سطوح ولتاژ و اندازه ذرات ارائه می‌دهد. در واقع به دلیل نوع جفت تاوه‌هایی که در تهنشین‌کننده با الکتروود تخلیه نوع ۲ رخ می‌دهد، این تهنشین‌کننده عملکرد مؤثرتری در جمع‌آوری زیرمیکرون دارد.

در ادامه به مقایسه راندمان جمع‌آوری ذرات با قطرهای ۰/۵ و ۱/۵ میکرومتر برای الکتروودهای تخلیه نوع ۱، ۲ و ۳ در سطوح ولتاژهای مختلف پرداخته شده است. در بخش‌های ۱ الی ۲ شکل (۲۴)، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی در این رابطه ارائه شده است.



(۱)



(۲)

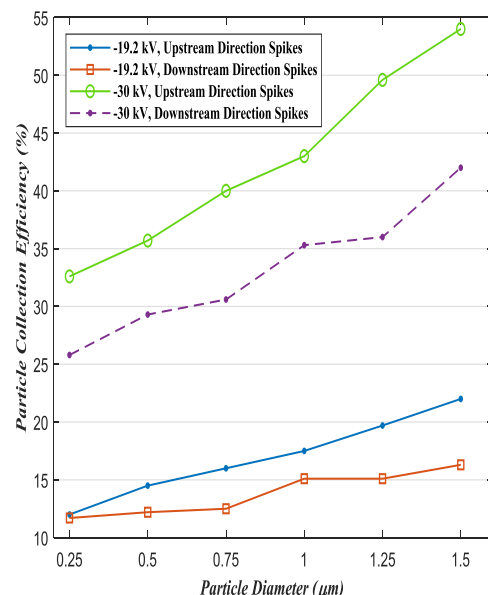
شکل (۲۴): راندمان جمع‌آوری تهنشین‌کننده الکتروستاتیکی با الکتروودهای سه‌گانه به ازای ولتاژهای اعمالی و اندازه ذرات مختلف (سرعت سیال ۰/۶ متربرثانیه): (۱) ۰/۵ میکرومتر، (۲) ۱/۵ میکرومتر

همان‌طور که مشاهده می‌شود، تهنشین‌کننده با الکتروود تخلیه خاردار دوجبه‌ته (نوع ۱) در تمامی سایزهای ذرات و سطوح ولتاژ عملکرد بهتری نسبت به سایر الکتروودها دارد. در واقع، مطابق نمودارهای (۱) الی (۲) شکل فوق، الکتروود نوع ۱ نسبت به نوع‌های ۲ و ۳ بیشترین راندمان را در جمع‌آوری ذرات با قطر ۰/۵ الی ۱/۵ میکرومتر دارد. همچنین، الکتروود خاردار در جهت خروجی کانال دارای پایین‌ترین راندمان تهنشینی است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای الکتروود نوع ۲ که خارهای الکتروود تخلیه به سمت ورودی کانال و یا در خلاف جهت شارش سیال اصلی هستند، سرعت در ابتدای الکتروود (نزدیک به خارهای آن) غیر صفر بوده و در جهت مرکز کانال به کلکتورها بوده (مقدار مثبت برای بخش مثبت محور  $y$  و منفی برای بخش منفی محور  $y$ ) و حداکثر مقدار آن حدود ۰/۷ متربرثانیه است. برای الکتروود نوع ۳ با خارهای الکتروود در جهت شارش سیال، مؤلفه  $y$  سرعت شارش هوا در بخش انتهایی الکتروود (نزدیک به خارهای آن) در جهت مرکز کانال به کلکتورها هستند؛ اما مقدار قدر مطلق سرعت در بخش انتهایی الکتروود خیلی کمتر از ۰/۳ متربرثانیه است. در بخش ابتدایی کانال و نزدیک به الکتروود تخلیه نوع ۳ سرعت سیال هوا از سمت کلکتور به مرکز کانال بوده که به معنی دفع ذرات از کلکتور می‌باشد. بنابراین، این مسئله منجر به کاهش راندمان تهنشینی در تهنشین‌کننده با این نوع الکتروود می‌شوند. لازم به ذکر است، نتایج به دست آمده در این شبیه‌سازی سازگار با نتایج گزارش شده در مرجع [۱۱] است.

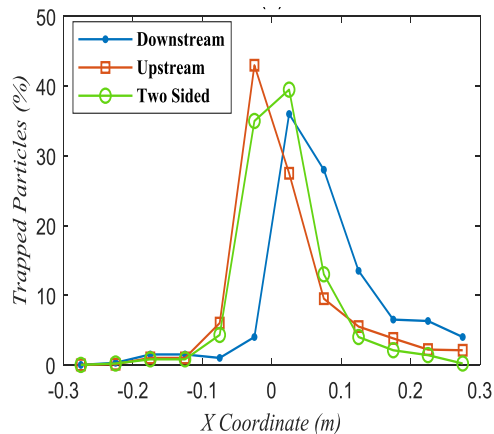
### ۳-۳-۵. مقایسه راندمان جمع‌آوری ذرات

در شکل زیر راندمان‌های جمع‌آوری ذرات زیرمیکرون در تهنشین‌کننده‌های الکتروستاتیکی که ولتاژهای ۱۹/۲ و ۳۰- کیلوولت به الکتروود تخلیه نوع ۲ و ۳ اعمال شده است، مقایسه می‌شوند.



شکل (۲۳): راندمان جمع‌آوری به ازای قطر ذرات مختلف در تهنشین‌کننده الکتروستاتیکی با الکتروودهای نوع ۲ و ۳

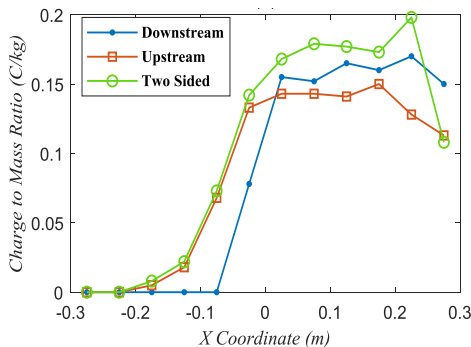
همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌طور واضحی تهنشین‌کننده با الکتروود تخلیه خاردار به سمت ورودی کانال نسبت به نوع



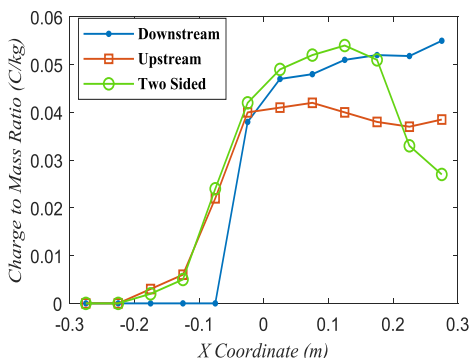
(۲)

شکل (۲۵): نرخ انباشتگی ذرات در طول کانال برای ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی با الکترودهای سه‌گانه (سرعت سیال ورودی ۰/۶ متر بر ثانیه): (۱) ۰/۵ میکرومتر، (۲) ۱/۵ میکرومتر

در ادامه به بررسی متوسط نسبت بار به جرم ذرات در نقاط مختلف کانال ته‌نشین کننده می‌پردازیم. این شاخص به ازای ولتاژ تحریک ۳۰- کیلوولت و اندازه‌های مختلف ذرات محاسبه شده و در شکل (۲۶) نشان داده شده است.



(۱)



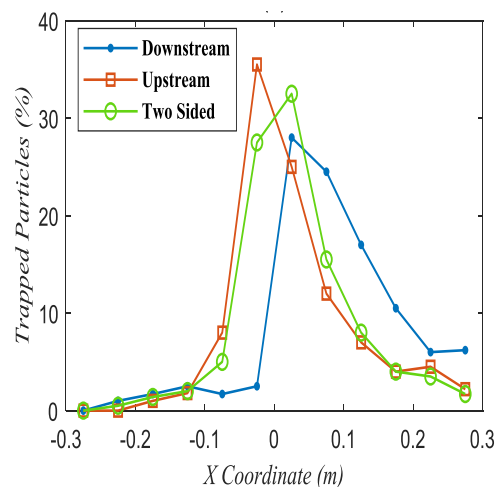
(۲)

شکل (۲۶): نسبت بار به جرم ذرات انباشته شده در طول کانال برای ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی با الکترودهای سه‌گانه (سرعت سیال ورودی ۰/۶ متر بر ثانیه): (۱) ۰/۵ میکرومتر، (۲) ۱/۵ میکرومتر

### ۴-۳-۵. باردار شدن، مسیر طی شده و رسوب ذرات زیرمیکرون

به منظور اثبات بهتر اثر جهت خارهای الکتروود تخلیه و ولتاژ تحریک بر جمع‌آوری ذرات زیرمیکرون، نرخ ته‌نشینی ذرات و نسبت بار به جرم در بخش‌های مختلف کانال ته‌نشین کننده به ازای اعمال ولتاژ ۳۰- کیلوولت برای ذرات با قطرهای ۰/۵ و ۱/۵ میکرومتر مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش‌های ۱ تا ۲ شکل (۲۵)، نرخ ته‌نشینی ذرات در طول کانال ته‌نشین کننده به ازای ولتاژ تحریک ۳۰- کیلوولت نشان داده شده‌اند.

در ته‌نشین کننده با الکتروود تخلیه نوع ۲ که خارهای مخروطی شکل الکتروود در جهت ورودی کانال قرار دارند، انتظار می‌رود بیشینه مقدار نرخ ته‌نشینی ذرات برای تمامی اندازه‌های ذرات در نیمه ابتدایی کانال ( $x < 0$ ) و نزدیک به الکتروود تخلیه رخ دهد. در واقع، همان‌گونه که در بخش‌های قبلی عنوان شده است، دو تاوه در ناحیه مذکور از این ته‌نشین کننده تولید خواهد شد که ذرات را از مرکز کانال به سمت صفحات کلکتور منحرف می‌کند. این مسئله به وضوح در شکل‌های فوق مشهود است. برای ته‌نشین کننده با الکتروود نوع ۳، دو تاوه تولید شده در بخش پیشانی الکتروود ذرات را از صفحات کلکتور به سمت مرکز کانال منحرف می‌کند. بنابراین در این ناحیه بخش بسیار کوچکی از ذرات جذب کلکتور شده و عمده ذرات ته‌نشین شده مربوط به بخش انتهایی الکتروود تخلیه ( $x > 0$ ) هستند. همچنین برای ته‌نشین کننده با الکتروود تخلیه دو جهته منحنی‌های ته‌نشینی ذرات نسبت به مرکز کانال (نقطه  $x = 0$ ) الگوهای کاملاً متقارنی دارند و بخش عمده فرآیند ته‌نشین شدن ذرات حول الکتروود تخلیه رخ می‌دهد.



(۱)

## ۶. نتیجه گیری

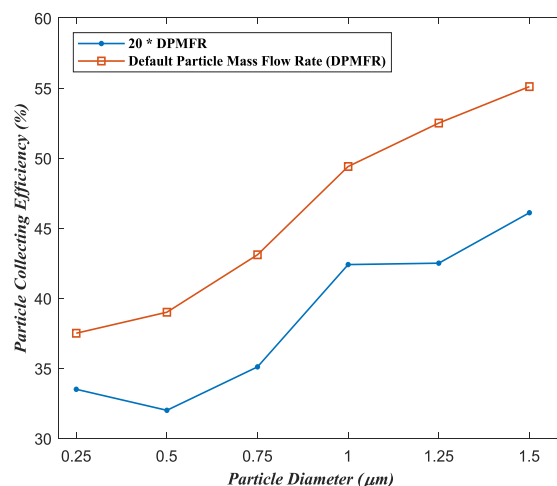
در این مقاله با استفاده از فرمولاسیون ارائه شده جهت مدل‌سازی ته‌نشین‌کننده، مشخصه‌های الکتریکی و الکتروهایدرودینامیکی یک ته‌نشین‌کننده در ابعاد آزمایشگاهی با الکتروودهای خاردار مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، با توجه به تحرک بالای یون‌های تولیدشده توسط الکتروود تخلیه، از اثرات نوسانات سرعت شارش هوا بر توزیع فضایی یونی صرف‌نظر شده است. الگوهای شارش سرعت شارش هوا در کانال به‌دلیل عکس‌العمل‌های متقابل قوی بین شارش هوای اصلی و شارش الکتروهایدرودینامیکی مورد بررسی قرار گرفت. خطوط جریان شارش الکتروهایدرودینامیکی ثانویه در صفحات مختلف از حجم ته‌نشین‌کننده شبیه‌سازی شده است. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که قدرت و ابعاد تاول‌های گازی علاوه‌بر مقدار ولتاژ تحریک ته‌نشین‌کننده به جهت‌گیری متقابل شارش اصلی و شارش الکتروهایدرودینامیکی وابسته هستند. با مقایسه خطوط شارش هوا به‌دست‌آمده از ته‌نشین‌کننده با الکتروودهای خاردار با نتایج به‌دست‌آمده در بخش گذشته که مربوط به الکتروود ساده مفتولی بود، می‌توان به اهمیت ساختار الکتروود تخلیه و یا الگوی تخلیه الکتریکی برای تعیین دامنه و ساختار الکتریکی شارش القا شده و سطوح اغتشاش در کانال پی‌برد. علاوه‌بر این، قدم رو به جلوی برداشته شده در مدل‌سازی و تشخیص مشخصه‌های شارش الکتروهایدرودینامیکی، برای طراحی رسوب‌دهنده با الکتروود خاردار، برای تحلیل دقیق ته‌نشینی ذرات زیرمیکرون در کاربردهای عملی بسیار حائز اهمیت است. این آنالیز عددی می‌تواند برای سایر شکل‌های الکتروود تخلیه و آرایش ته‌نشین‌کننده نیز اعمال شود.

همچنین در این مقاله، راندمان‌های جمع‌آوری ذرات زیرمیکرون در ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی با ابعاد آزمایشگاهی و انواع مختلف الکتروودهای خاردار مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، خطوط شارش هوا، الگوهای مؤلفه  $\gamma$  سرعت شارش هوا و راندمان جمع‌آوری ذرات با قطر  $0.25$  الی  $1.5$  میکرومتر برای الکتروودهای خاردار دوجته و تک‌جته ارزیابی و مقایسه شده است. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که برای ذرات با قطرهای  $0.25$  الی  $1.5$  میکرومتر، ته‌نشین‌کننده با الکتروودهای خاردار دوجته بهترین آرایش الکتروود تخلیه بوده است. اثر نرخ شارش جرم ذرات بر راندمان ته‌نشینی ذرات ریز برای الکتروود خاردار دوجته و بالاترین سطح ولتاژ اعمالی نیز بررسی شده است. شبیه‌سازی‌ها نشان داده است که با افزایش نرخ شارش جرم ذرات در ورودی، راندمان ته‌نشینی ذرات کاهش می‌یابد. در واقع با بیست برابر کردن نرخ شارش جرم ذرات در ورودی کانال،

همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای تمامی ذرات نسبت بار به جرم ذرات با عبور از کانال افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است، نتایج به‌دست‌آمده در این قسمت به‌صورت متوسط نسبت بار به جرم ذراتی که در بازه‌های مشخصی از کانال ته‌نشین شده‌اند، محاسبه شده است.

## ۵-۳-۵. اثر نرخ شارش جرم ذرات بر راندمان ته‌نشین‌کننده

با افزایش نرخ شارش جرم ذرات در ورودی کانال ته‌نشین‌کننده، چگالی بار ذرات در کانال افزایش پیدا کرده و منجر به ایجاد تغییر در میدان الکتریکی و توزیع چگالی بار یونی می‌شود. این پدیده نیز منجر به افزایش اغتشاش و پیچیدگی فرآیند ته‌نشینی در کانال خواهد شد. به‌منظور بررسی این مهم، نرخ شارش جرم ذرات در کانال  $20$  برابر حالت اولیه در نظر گرفته شده و راندمان ته‌نشینی ذرات با اندازه‌های مختلف ( $0.25$  الی  $1.5$  میکرومتر) برای ته‌نشین‌کننده با الکتروود خاردار دوجته و تحریک شده با ولتاژ  $30$ - کیلوولت مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور همان‌گونه که در مرجع [۲] ارائه شده است، کاهش به اندازه  $45\%$  در جریان تخلیه فرض شده است. در شکل زیر، راندمان ته‌نشین‌کننده برای نرخ شارش جرم اولیه و  $20$  برابر شده ذرات با سایز مختلف مقایسه شده است.



شکل (۲۳): راندمان جمع‌آوری بر حسب قطر ذرات مختلف در

ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی با الکتروود نوع ۱ به ازای نرخ شارش جرم مختلف ذرات در ورودی کانال (سرعت سیال ورودی  $0.6$  متر بر ثانیه)

همان‌طور که مشاهده می‌شود، راندمان ته‌نشینی ذرات با افزایش نرخ شارش جرم ذرات در ورودی کانال به وضوح کاهش می‌یابد. در واقع این نتیجه، اساساً نشئت گرفته از سرکوب جریان کرونا و در نتیجه کاهش بار ذرات و نیروی الکتروستاتیکی به آنها می‌باشد.

- dimensional electro-hydrodynamics of spiked-electrode electrostatic precipitator," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 13, no. 1, pp. 160-167, 2006.
- [9] D. Brocilo, "Electrode geometry effects on the collection efficiency of submicron and ultra-fine dust particles in spike-plate electrostatic precipitators," J. Phys. Conf. Ser., vol. 142, no. 1, 2008.
- [10] J. Podlinski, A. Niewulis, and J. Mizeraczyk, "Electrohydrodynamic flow and particle collection efficiency of a spike-plate type electrostatic precipitator," J. Electrostat., vol. 67, pp. 99-104, 2009.
- [11] J. Podlinski, A. Niewulis, V. Shapova, and J. Mizeraczyk, "Electrohydrodynamic flow and particle collection efficiency in a one-sided spike-plate type electrostatic precipitator", 7<sup>th</sup> Conf. French Society of Electrostatics (SFE2010), Montpellier, France, pp. 179-183, 2010.
- [12] L. Gi-Hyuk, "Optimization of pipe-and-spike discharge electrode shape for improving electrostatic precipitator collection efficiency." Powder Technol., vol. 379, pp. 241-250, 2021.
- [13] C. J. Chen, Shenq-Yuh Jaw, Fundamentals of turbulence modeling, Taylor & Francis, 1998.
- [14] H. Hayashi, Y. Takasaki, K. Kawahara, T. Takenaka, K. Takashima, and A. Mizuno, "Electrostatic charging and precipitation of diesel soot," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 47, no. 1, pp. 331-335, 2011.
- [15] N. Farnoosh, K. Adamiak, and G. S. P. Castle, "Three-dimensional analysis of electrohydrodynamic flow in a spiked electrode-plate electrostatic precipitator," J. Electrostat., vol. 69, no.5, pp. 419-428, 2011.
- [16] N. Morasaei, M. Tabrizian, 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, no. 4, pp. 37-47, 2018 (In Persian).
- راندمان جمع‌آوری ذرات با قطر  $1/5$  و  $1/25$  میکرومتر حدوداً به اندازه  $10\%$  کاهش یافته و این تضعیف عملکرد برای ذرات زیرمیکرون در بازه  $4$  الی  $8$  درصد است.
- ### ۵. مراجع
- [1] K. Parker, Electrical operation of electrostatic precipitators. no. 41. IET, 2003.
- [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. 99, 2021 (in Persian).
- [3] M. Gholami, H. Kazerooni, "3D modeling of the cylindrical type electrostatic precipitator for collecting fine diesel particles and controlling the air pollution," Journal of Modeling in Engineering, vol. 99, 2021 (in Persian).
- [4] G. Yishan, "Enhancing PM Removal by Pulse Energized Electrostatic Precipitators—a Comparative Study," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 47, no. 1, pp. 365-375, 2018.
- [5] Lu. Binxian, "Comparison of Dust Particle Dynamics Under Different Electrode Shapes at the Early Stage of Negative Corona Discharge." IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 47, no. 11, pp. 4915-4922, 2019.
- [6] T. Yamamoto, M. Okuda, and M. Okubo, "Three-dimensional ionic wind and electro hydrodynamics of tuft/point corona electrostatic precipitator," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, no. 6, pp. 1602-1607, 2003.
- [7] T. Yamamoto, Y. Morita, H. Fujishima, and M. Okubo, "Three-dimensional EHD simulation for point corona electrostatic precipitator based on laminar and turbulent models," J. Electrostat., vol. 64, no. 7, pp. 628-633, 2006.
- [8] H. Fujishima, Y. Morita, M. Okubo, and T. Yamamoto, "Numerical simulation of three