

الگوی جذب و نشست افشانه‌ی قطرات مایع بر اثر باردارسازی الکتریکی

محمد رضا جهان‌نما (استادیار)

حامد صالحی (استادیار)

حوزه‌ی معاونت پژوهشی، پژوهشکده‌ی مهندسی، وزارت جهاد کشاورزی

در این پژوهش جذب و نشست قطرات باردار مایع بر روی هدف‌هایی فلزی با هندسه‌های مختلف مورد مطالعه‌ی تجربی قرار گرفته است. برای این کار از چیدمانی تجربی استفاده شده است که امکان اندازه‌گیری جریان الکتریکی القا شده در هدف و جریان الکتریکی پاشش — به منظور بررسی برهم‌کنش میان قطرات باردار و هدف‌های فلزی، هم‌زمان با تغییر در مشخصات عملکردی نازل — را فراهم می‌سازد. نتایج حاصله حاکی از آن است که تغییر در فاصله‌ی میان افشانه و هدف تأثیر به‌سزایی بر عملکرد هیدرولیکی نازل ندارد، در حالی که کاهش این فاصله ضمن تقویت نسبی باردارسازی افشانه موجب افزایش نرخ القای بار الکتریکی در هدف به میزان ۲/۲ تا ۲/۶ برابر می‌شود. تغییر در هندسه‌ی هدف نیز به تغییر مشهودی در عملکرد هیدرولیکی نازل منجر نمی‌شود ولی ضمن تأثیر بر جریان‌های الکتریکی القایی و پاشش، تغییر چشمگیری (در حد ۲/۹ برابر) برای هدف‌های تخت در مقایسه با هدف‌های کروی به نمایش می‌گذارد. این تأثیر از تمرکز شدید میدان الکتریکی در برجستگی‌های موجود در هدف‌های تخت مانند لبه‌ها و رئوس تیز ناشی می‌شود که هم‌زمان با اثرگذاری بر بالادست جریان پاشش، القای الکتریکی در هدف را نیز تشدید می‌کند. تصاویر پاشش نیز حاکی از پیدایش میدان جاذبه‌ی الکتریکی در مجاورت هدف است که تجمع و جذب قطرات باردار در اطراف هدف‌های فلزی مؤید این نکته‌اند.

واژگان کلیدی: پاشش مایع، القای الکتریکی، قطرات باردار، نازل دوسیاله، نشست.

مقدمه

جذب و نشست افشانه‌ی قطرات مایع^۱ و ذرات پودر بر روی سطوح اجسام موضوعی اساسی در قلمروی گسترده و گوناگون از کاربردهای فنی محسوب می‌شود. رنگ‌پاشی بدنه‌ی خودرو، پوشش‌دهی سطوح^۲، چاپ پاششی^۳، سم‌پاشی گیاهان، شست‌وشو و حفاظت محصولات گیاهی، خشک‌کن‌های پاششی^۴ و افشانه‌های دارویی نمونه‌هایی از این کاربردها محسوب می‌شوند.^{۵-۱} این وسعت و تنوع به ایجاد زمینه‌هایی مشترک برای محققان حوزه‌های علمی مختلف و صنایع مرتبط انجامیده است تا از این طریق به پدیده‌ی نشست افشانه از زوایای علمی مختلف نگریسته شود. در این راستا، بهبود فرایند جذب و نشست به عنوان هدف اصلی پژوهش‌ها از دو دیدگاه کمیت و کیفیت مورد بررسی قرار گرفته است.

بررسی‌های کمی نشست به دنبال بهبود روش‌های موجود، یا یافتن روش‌های جدید برای افزایش مقدار نشست افشانه بر روی اهداف مفروض صورت می‌گیرد.^{۶-۷} تحقق این امر از یک سو از اتلاف مواد جلوگیری می‌کند و از سوی دیگر منافع اقتصادی مهمی را از طریق صرفه‌جویی و کاهش ماده‌ی مصرفی به همراه دارد.^۸ اتلاف مواد افشانه عموماً موجب ورود این مواد به اکوسیستم می‌شود که به دلیل ماهیت سمی

آنها نهایتاً به آلودگی محیط زیست منتهی می‌شود. لذا بهینه‌سازی نشست افشانه علاوه بر مزایای اقتصادی سبب کاهش آلودگی محیط زیست می‌شود و از همین رو، این مبحث اساساً در عرصه‌ی کاهش آلودگی^۵ نیز مورد توجه محققان قرار گرفته است.^۹ رویکرد کیفی نشست، با دقت در کیفیت نشست افشانه بر روی سطوح در وهله‌ی نخست برای پوشش دائمی^۶ سطوحی که باید دوره‌ی کاری سخت و طولانی را سپری کنند (مانند پره‌های توربین گاز و بدنه‌ی پرتابه‌ها و سفینه‌های فضایی) مورد توجه قرار گرفته است.^{۱۰-۱۱} کیفیت نشست همچنین در پوشش کوتاه‌مدت سطوح که طی آن فرایندی شیمیایی میان ماده‌ی افشانه و سطح (مانند جذب افشانه‌ی دارویی در ریه) به وقوع می‌پیوندد بسیار حائز اهمیت است.^{۱۲} مورد اخیر غالباً در ارتباط با موجودات زیستی و در حوزه‌ی زیست‌فناوری، کشاورزی و پزشکی موضوعیت یافته است.

باردارسازی الکتریکی یکی از راهکارهای مؤثری است که برای بهبود کمی و کیفی نشست اسپری مورد استفاده قرار گرفته است.^{۱۳} در یک نگاه کلان، دو قابلیت اساسی برای کاربرد افشانه‌های الکترواستاتیکی در فعالیت‌های پژوهشی می‌توان مشاهده کرد. قابلیت اول به استفاده از نیروی الکتریکی برای اتمی‌کردن (ریزسازی) مایع و تولید افشانه مربوط می‌شود که تحقیقات گسترده‌ی را به‌ویژه طی دهه‌های

اخیر به خود اختصاص داده است. بررسی ناپایداری هیدروپنایمیک مایعات در اثر بار الکتریکی و بر پایه‌ی حد ناپایداری ریلی^۷ موضوع اصلی این مطالعات است. احتراق سوخت به‌ویژه در موتورهای درون‌سوز، میکروپیشران^۸ (درحد میکرونیوتن برای تولید تراست) در سامانه‌های فضایی، و ساختارهای ریزسرامیک مصادیقی کاربردی برای پژوهش‌های اتمی‌کردن (ریزسازی) الکتریکی هستند.^{۱۳-۱۵} قابلیت دوم، از قطرات باردار در پاشش پلوم برای بهبود برخی پدیده‌ها مانند جذب و نشست، و انبساط و اختلاط بهره می‌گیرد. مورد اخیر مبتنی است بر پیدایش میدان الکتریکی بر اثر تولید افشانه‌ی قطرات باردار در دو حالت: ۱. میدان الکتریکی شکل‌گرفته در درون افشانه و میان قطرات باردار هم‌نام موجب رانش الکتریکی این قطرات نسبت به یکدیگر می‌شود و انبساط حجمی افشانه و در نتیجه نفوذ و اختلاط بیشتر هوا در درون افشانه را به دنبال دارد.^{۱۶} ۲. شکل‌گیری میدان الکتریکی میان قطرات باردار در مجاورت اجسام هدف (با پتانسیل الکتریکی صفر)، که با ایجاد نیروی ربایشی به تسهیل حرکت قطرات باردار به سوی هدف و بهبود جذب و نشست آنها بر روی سطح هدف منجر می‌شود.^{۱۷}

مروری بر مطالعات پژوهشی مرتبط با نشست پاشش قطرات باردار نشان می‌دهد که این موضوع از اواسط دهه‌ی بیست میلادی مورد توجه قرار گرفته است. نخستین آزمایش‌های تجربی نشأت‌گرفته از پاشش قطرات سموم دارای بار الکتریکی مثبت بر روی گیاهان است که تأییدی بر جذب بهتر قطرات سم بر برگ‌های گیاه محسوب می‌شود.^{۱۸} اگرچه در گستره‌ی بسیار محدود پژوهش‌های آن دوره می‌توان نتایجی در منابع علمی یافت که دال بر عدم نقش قابل توجه باردارسازی افشانه‌ی مایع بر نشست است،^{۱۹} دانش امروزی نشان می‌دهد که بیشینه سطوح باردارسازی به دست آمده در آن بررسی‌ها معادل $1/61 \mu C/kg^{-1}$ بوده است که اساساً برای اثربخشی نشست الکترواستاتیکی قطرات باردار بسیار اندک است. با این حال فعالیت‌های پژوهشی نسبتاً پراکنده‌ی پس از این دوره تماماً مؤید نقش مثبت باردارسازی الکتریکی افشانه در بهبود نشست است.^{۲۰، ۲۱}

شکل‌گیری یک نگرش نظام‌مند درخصوص نشست افشانه‌ی باردار را می‌توان به دهه‌ی هشتاد میلادی نسبت داد. ماهیت این فعالیت‌ها را می‌توان در کاربردهای مختلف، شامل حوزه‌ی صنعت (پوشش سطوحی مانند تراشه‌ها و صنعت رنگ خودرو)، کشاورزی (سم‌پاشی گیاهان)، پزشکی (جذب و نشست قطرات افشانه در مجاری تنفسی) جست‌وجو کرد.^{۲۲} یک وجه از این مطالعات به شبیه‌سازی عددی پاشش و نشست مربوط می‌شود. مدل‌های اولیه در این زمینه با رویکردی لاپلاسی و بدون در نظر گرفتن تأثیر بار حجمی ناشی از مجموعه قطرات افشانه، به مطالعه‌ی عددی حرکت و نشست افشانه پرداخته‌اند.^{۲۳}

روند توسعه‌ی این مدل‌ها با در نظر گرفتن ابعاد بیشتری از برهم‌کنش‌های موجود در افشانه‌ی قطرات باردار و در ارتباط با اجسام هدف، رویکردی اوپری را برای فاز پیوسته‌ی هوا و رویکردی لاگرانژی را برای قطرات افشانه به‌طور هم‌زمان مد نظر قرار داده‌اند.^{۲۴} وجه دوم پژوهش‌های نشست افشانه‌ی باردار به بررسی‌های تجربی مربوط می‌شود. در این بررسی‌ها، تأثیر باردارسازی بر نشست قطرات باردار روی اجسام هدف بیشتر از طریق اندازه‌گیری مقدار کمی نشست مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از روش‌های رایج در کمی‌سازی نشست استفاده از روش فلورومتری محلول‌های فلورسنت بوده است. نشست در این روش با اندازه‌گیری طیف نشر^۹ حاصل از محلول نشست‌یافته بر روی هدف و مقایسه‌ی آن با نمودار کالیبراسیون آن محلول تعیین می‌شود. این روش هم اکنون در کارهای پژوهشی، به‌ویژه در کاربردهای زیست‌شناختی و کشاورزی-- کاربرد گسترده دارد.^{۲۵}

مقاله‌ی حاضر در ادامه‌ی پژوهش‌های پیشین نگارنده^{۲۶} به بررسی پدیده‌ی جذب و نشست افشانه‌ی متشکل از قطرات باردار می‌پردازد. این موضوع برای دریافتی بهتر از فیزیک مسئله با رویکردی متفاوت از بررسی‌های مطرح در منابع علمی صورت گرفته است. در این راستا زیرمجموعه‌ی جدیدی برای استقرار اهداف فلزی به چیدمان تجربی مورد استفاده در پژوهش قبلی افزوده شده است. این چیدمان علاوه بر تأمین هوای فشرده، جریان مایع و ولتاژ الکتریکی برای نازل، امکان اندازه‌گیری جریان الکتریکی القا شده به سطح هدف فلزی را نیز میسر می‌سازد که در تحلیل کمی جذب و نشست مورد استفاده قرار گرفته است. برهم‌کنش میان افشانه‌ی قطرات و اهداف فلزی، با بهره‌گیری از تصویربرداری نیز مورد مطالعه قرار گرفته تا بتوان به درکی کیفی از نشست افشانه‌ی باردار دست یافت.

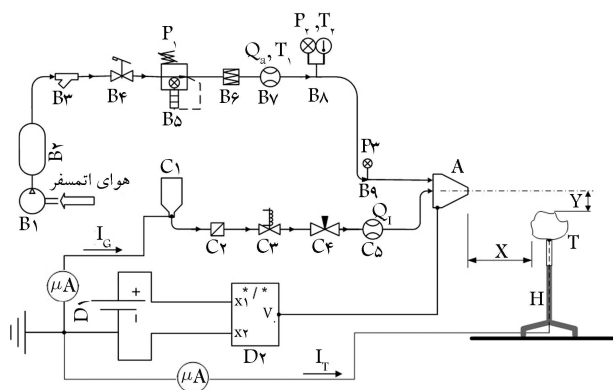
مواد و روش‌ها

این قسمت در قالب سه بخش شامل چیدمان تجربی، روش بررسی موضوع و پیش‌آزمایش اولیه ارائه می‌شود.

چیدمان تجربی

در این مطالعه از چیدمانی تجربی مطابق شکل ۱ استفاده شده است. این چیدمان ترکیبی از المان‌های مورد استفاده در بررسی نازل دوسیاله‌ی القایی^{۲۶} است که به آن المان‌های جدیدی برای استقرار هدف فلزی و اندازه‌گیری جریان الکتریکی القا شده به آن هدف افزوده شده است. در این حالت، چیدمان تجربی از یک سو امکان تنظیم و پایش مشخصات افشانه‌ی تولید شده و از سوی دیگر امکان بررسی کمی برهم‌کنش میان افشانه و هدف فلزی متصل به زمین را فراهم می‌سازد. طرح‌واره‌ی چیدمان تجربی در شکل ۱ با استفاده از نمادهایی شامل نماد A برای نازل، B_1 تا B_9 برای المان‌های خط هوای فشرده، C_1 تا C_5 برای المان‌های خط جریان مایع، D_1 و D_2 برای المان‌های خط ولتاژ الکتریکی، H و T برای مجموعه‌ی استقرار هدف نشان داده شده است؛ هریک از این المان‌ها در جدول ۱ معرفی شده‌اند. ابعاد کلی این چیدمان (به‌استثنای مجموعه‌ی استقرار هدف) در مقاله‌ی دیگری ارائه شده است^{۲۶} اما برای حفظ پیوستگی موضوع در نوشتار حاضر، بیان موجزتری از آن موارد به همراه معرفی المان‌های مجموعه‌ی استقرار هدف ارائه می‌شود:

۱. خط هوای فشرده: این خط شامل ۹ المان است که در آن هوای اتمسفر پس از فشرده‌سازی در یک کمپرسور (B_1) و ذخیره در یک مخزن (B_2) با گذر



شکل ۱. طرح‌واره‌ی چیدمان تجربی.

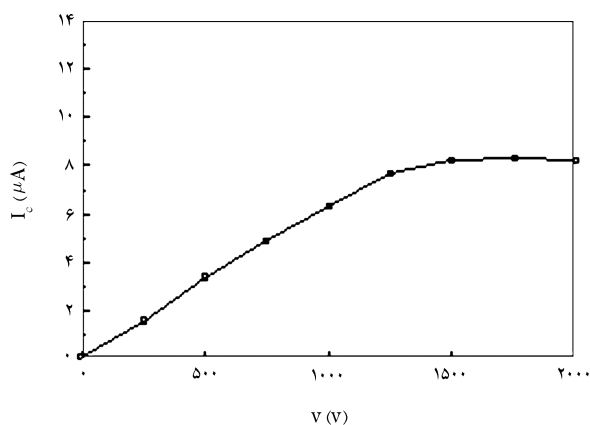
جدول ۱. معرفی المان‌های چیدمان تجربی.

نماد	شرح	نماد	شرح
A	نازل دوسیاله درون اختلاط القایی	C_1	مخزن مدرج مایع
B_1	کمپرسور هوا	C_2	صافی توری فلزی
B_2	مخزن کمپرسور هوا	C_3	شیر قطع و وصل
B_3	صافی توری فلزی	C_4	شیر کنترلی سوزنی
B_4	شیر قطع و وصل	C_5	دبی سنج مایع
B_5	رگلاتور (تنظیم‌کننده‌ی) هوا	D_1	باتری ۲۴ VDC
B_6	صافی کاغذی هوا	D_2	منبع تغذیه ولتاژ بالا
B_7	دبی سنج هوا	H	پایه‌ی نگه‌دارنده
B_8	دما و فشارسنج ترکیبی	T	هدف فلزی
B_9	فشارسنج		

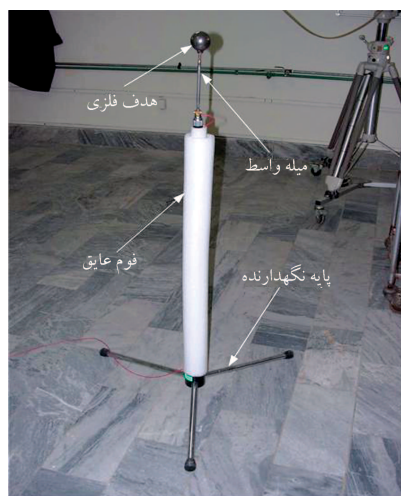
معادل 981 تا 5886 پاسکال برای مقادیر دبی مایع در بازه‌ی $1 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ تا $3 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ برخوردار است. شکل ۲ نمودار تغییرات جریان الکتریکی افشانه‌ی تولیدشده توسط نازل را برحسب ولتاژ باردارسازی نشان می‌دهد که حاکی از روند صعودی جریان الکتریکی تا مقدار معینی از ولتاژ است؛ پس از آن مقدار افزایش ولتاژ تأثیر به‌سزایی بر بازده باردارسازی نازل ندارد.

۵. مجموعه‌ی استقرار هدف: این مجموعه در ارتباط با چیدمان راه‌اندازی نازل برای مطالعه‌ی رفتار افشانه‌ی قطرات مایع در مجاورت یک هدف رسانای الکتریکی تعبیه شده است. این مجموعه متشکل از یک هدف فلزی (T) است که از طریق یک میله‌ی فلزی واسط بر روی پایه‌ی نگه‌دارنده‌ی هدف (H) استقرار می‌یابد (شکل ۳).

میله‌ی فلزی واسط با اتصال به زمین امکان انتقال بار الکتریکی را میان هدف فلزی و زمین فراهم می‌سازد؛ جریان الکتریکی متناظر با این انتقال توسط یک ریزآمپرسنج اندازه‌گیری می‌شود (I_T در شکل ۱). از طرف دیگر، میله‌ی فلزی واسط با استفاده از یک اتصال غیرفلزی (پلاستیک صلب) به پایه‌ی نگه‌دارنده پیچ می‌شود (شکل ۴ الف) و لذا اتصال هدف فلزی به پایه‌ی نگه‌دارنده در شرایط ایزوله‌ی الکتریکی صورت می‌گیرد. همچنین پایه‌ی نگه‌دارنده از یک سو با فوم عایق پوشیده شده تا از تعامل الکتریکی آن با افشانه‌ی قطرات باردار جلوگیری شود و از سوی



شکل ۲. تغییرات جریان الکتریکی افشانه برحسب ولتاژ باردارسازی به‌ازای فشار $P_1 = 3 \text{ bar}$ و دبی مایع $4/5 \text{ Lh}^{-1}$.



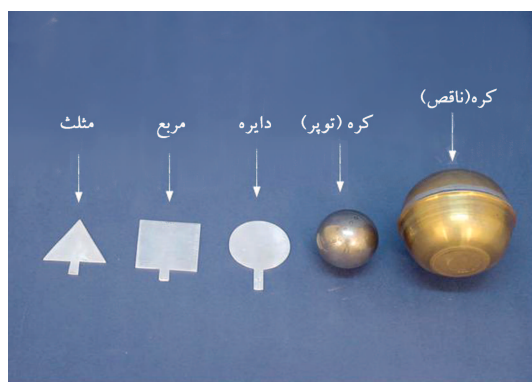
شکل ۳. تصویری از هدف و پایه‌ی نگه‌دارنده.

از یک صافی برنجی (B_2) و سپس یک شیر قطع و وصل دستی (B_2) به یک تنظیم‌کننده‌ی (رگلاتور) فشار هوا (B_5) مجهز به فشارسنج و رطوبت‌گیر متداخل وارد می‌شود. هوای فشرده پس از تنظیم فشار (P_1) در تنظیم‌کننده (رگلاتور) از یک ریزفیلتر کاغذی (B_6) عبور کرده و دبی و دمای آن توسط یک دبی‌سنج دیجیتال (B_7) اندازه‌گیری می‌شود. در حد فاصل میان دبی‌سنج و نازل از یک دما و فشارسنج ترکیبی (B_8) و نیز در ورود به نازل از یک فشارسنج (B_9) استفاده شده است. در این حالت امکان پایش فشار و دمای جریان هوای فشرده علاوه بر تنظیم‌کننده (B_5) در دو نقطه‌ی دیگر در طول مسیر هوا به نازل برای حصول اطمینان از پایداری فشار و دما و عدم وجود نشتی فراهم می‌شود.

۲. خط جریان مایع: این خط شامل پنج المان است که در آن مایع در مخزنی پلاستیکی (C_1) ذخیره می‌شود که این مخزن برای جابه‌جایی عمودی (به‌منظور تغییر ارتفاع مکش مایع به نازل) بر روی شیار عمودی استقرار یافته است. جریان مایع از مخزن به یک صافی فلزی (C_2) و سپس به یک شیر قطع و وصل برقی (C_4) هدایت می‌شود. سپس از یک شیر سوزنی (C_4) برای تنظیم دبی جریان مایع استفاده شده است که مقدار این دبی توسط دبی‌سنج آنالوگ (C_5) اندازه‌گیری می‌شود. خط جریان مایع همچنین از طریق یک اتصال فولادی ضدزنگ (تعبیه‌شده در خروجی مخزن مایع) به زمین (پتانسیل صفر) متصل شده است تا با بسته‌شدن مدار الکتریکی امکان انتقال جریان الکتریکی به مایع I_G (در شکل ۱) و وقوع فرایند باردارسازی میسر شود.

۳. خط جریان الکتریکی: این خط شامل دو المان اصلی است: ۱. باتری (D_1) است که به‌عنوان منبع انرژی برای راه‌اندازی منبع تغذیه ولتاژ بالا استفاده می‌شود؛ ۲. منبع تغذیه ولتاژ بالا (D_2) است که با اتصال مستقیم به نازل (الکتروود حلقوی) زمینه‌ی باردارسازی القایی قطرات افشانه را فراهم می‌کند. کنترل منبع تغذیه توسط یک مدار راه‌انداز جانبی صورت می‌گیرد که در آن با تنظیم ولتاژ تحریک V_G (در بازه‌ی 10 VDC تا 0) می‌توان ولتاژ خروجی منبع تغذیه V_o (5000 VDC تا 10) را تغییر داد.

۴. نازل: نازل از نوع دوسیاله‌ی جریان موازی درون اختلاط است که در آن مسیرهای تغذیه‌ی هوای فشرده و مایع در داخل نازل و در ناحیه‌ی اختلاط و ریزسازی با یکدیگر تلاقی می‌یابد. مشخصات طراحی و عملکردی نازل در پژوهش دیگری تشریح شده است^[۴۶] که طی آن مجرای ورود مایع به ناحیه‌ی اختلاط و ریزسازی معادل 1 میلی‌متر و گلوگاه خروجی نازل معادل $3/6$ میلی‌متر است و از افقی



شکل ۵. تصویری از هدف‌های فلزی.



(ب) پایه ی نگهدارنده.

شکل ۴. تصویری از اجزای پایه‌ی نگهدارنده.

جدول ۲. مشخصات هدف‌های فلزی.

هدف	جنس	ابعاد (mm)	سطح کل (cm ²)	شکل هندسی
کره (توپر)	فولاد	$D = 50$	۷۸	
کره (ناقص)	برنج	$D = 92$ $l_1 = 86$ $l_2 = 80$	$\cong 232$	
دایره	آلومینیوم	$D = 50$	۳۹	
مربع	آلومینیوم	$a = 50$	۵۰	
مثلث	آلومینیوم	$a = 50$	22 cm^2	

است. لازم به توضیح است که در ابتدا، صفحه‌ی مثلثی در زمره‌ی هدف‌های فلزی مورد بررسی در این مطالعه قرار نداشت ولی روند برخی از نتایج به دست آمده درخصوص تشدید القای الکتریکی در هدف مربعی امکان ارتباط آن روند را با شکل هندسی و رئوس مربع تقویت کرد. از این رو با استفاده از مثلث به عنوان هدفی دارای رئوس تیز سعی شد تا یافته‌های مزبور با اجرای برخی از آزمایش‌های مشابه دقیق‌تر بررسی شود.

در کنار چیدمان تجربی از یک سامانه‌ی تصویربرداری نیز استفاده شده است. این سامانه متشکل از دو مجموعه دوربین فیلم برداری و یک مجموعه نورپردازی است. یکی از دوربین‌ها برای فیلم برداری تحت زاویه‌ی باز 1° و از دیگری برای زاویه‌ی بسته 11° استفاده شده است. دوربین زاویه‌ی باز با مدل پاناسونیک NV-M9500 EN است که از لنزی با بزرگ‌نمایی $12\times$ و شاتری با سرعتی بالا در حد $s^{-1} \times 10^{-4}$ برخوردار است. دوربین مورد استفاده برای زاویه‌ی بسته نیز از مدل پاناسونیک WV-F250E است که لنز آن دارای بزرگ‌نمایی $12\times$ و شاتر آن دارای سرعت $s^{-1} \times 10^{-3}$ است. برای نورپردازی نیز از یک نورپرداز 1000 واتنی ساخت شرکت Lowel-Light آمریکا استفاده شده است.

دیگر با استفاده از درپوش‌های پلاستیکی بر روی زمین قرار گرفته تا مانع از اتصال مستقیم آن با زمین شود (شکل ۴ ب). لذا پوشش عایق بر روی پایه‌ی نگهدارنده و ایزوله بودن آن از هدف فلزی مانع از برهم‌کنش الکتریکی میان قطرات باردار و پایه‌ی نگهدارنده می‌شود. به بیان دیگر، پاشش قطرات باردار به سوی مجموعه‌ی استقرار هدف به دلیل اتصال هدف فلزی رسانا به زمین (مبتنی بر تبادل بار الکتریکی میان جسم رسانا و زمین) و ایزوله بودن پایه‌ی نگهدارنده مطالعه‌ی الگوی نشست افشانه را صرفاً بر روی هدف فلزی ممکن می‌سازد.

برای اطمینان از صحت نتایج اندازه‌گیری، عملکرد المان‌های چیدمان آزمایش (شکل ۱) مورد ارزیابی قرار گرفت که در پژوهش دیگری تشریح شده است.^[۲۶] نتیجه‌ی این بررسی نشان می‌دهد که تغییرات فشار هوای فشرده در دما و فشارسنج ترکیبی (P_1) و فشارسنج مستقر در ورودی نازل (P_2) نسبت به فشار تنظیم‌کننده (P_3) از تغییراتی خطی پیروی می‌کند. در این حالت، اختلاف نسبی P_2 و P_3 نسبت به P_1 به کم‌تر از 10% محدود می‌شود که در فشارهای $P_1 > 2 \text{ bar}$ به کم‌تر از 5% تقلیل می‌یابد و از این رو می‌توان فشار P_1 را به عنوان شاخص فشار در خط هوای فشرده در نظر گرفت.

برای ارزیابی صحت عملکرد دبی‌سنج مایع (المان C_5 در شکل ۱)، مقادیر اندازه‌گیری شده توسط این دبی‌سنج به طور هم‌زمان با مقادیر حاصل از سنجش زمان صرف شده برای تخلیه‌ی حجم معینی از مایع (از طریق پایش مخزن مدرج مایع) مقایسه شده‌اند. براساس این مقایسه، دبی‌سنج مایع در مجموع از خطای سیستماتیکی کم‌تر از 7% برخوردار است که در فشارهای $P_1 > 1.5 \text{ bar}$ به کم‌تر از 5% کاهش می‌یابد؛ این امر موافق با گواهی کالیبراسیون دبی‌سنج مایع مبنی بر وجود خطای کم‌تر از 6% برای اندازه‌گیری دبی مایع است.

عملکرد منبع تغذیه با اندازه‌گیری جریان برگشتی ولتاژ خروجی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای راه‌اندازی منبع تغذیه از یک مدار جانبی استفاده می‌شود که با تغییر ولتاژ تحریک V_C (در بازه‌ی 10° تا 0°)، امکان تغییر ولتاژ خروجی منبع تغذیه V_o (در محدوده‌ی 5000° VDC تا 10°) فراهم می‌شود. تغییرات جریان برگشتی برحسب ولتاژ تحریک در حالت بدون بار حاکی از تغییرات خطی جریان برگشتی و مطابقت بسیار خوب داده‌های اندازه‌گیری با داده‌های سازنده و با خطایی نسبی کم‌تر از 1% است.

اهداف فلزی که در این بررسی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند شامل یک گوی فولادی کرومی (توپر)، یک گوی برنجی کرومی (ناقص) و سه صفحه‌ی تخت آلومینیومی، هریک به ضخامت 1 mm و با شکل‌های هندسی دایره، مربع و مثلث متساوی‌الاضلاع هستند (شکل ۵). مشخصات کلی این هدف‌های فلزی در جدول ۲ درج شده

در مراحل قبلی این پژوهش،^[۲۶] عملکرد یک نازل دوسیاله‌ی القایی در تولید افشانه‌ی از قطرات باردار مورد بررسی قرار گرفت. حال برای بررسی نشست افشانه‌ی قطرات باردار بر روی یک هدف بیرونی باید به شاخصی مناسب برای مطالعه‌ی نشست دست یافت. برای انتخاب شاخص مناسب می‌توان نخست توجه خود را به ماهیت ذاتی نشست افشانه‌ی باردار بر روی یک هدف رسانای متصل به زمین معطوف کرد. رسانایی الکتریکی و اتصال به زمین برای یک جسم (هدف) مترادف با قابلیت جریان بار الکتریکی میان آن جسم و زمین است. از این رو با قراردادن یک شیء باردار در مجاورت آن جسم می‌توان براساس القای الکترواستاتیکی انتظار داشت که باری الکتریکی مخالف با بار آن شیء باردار بر روی سطح جسم القا شود. القای بار الکتریکی در سطح هدف به معنای شکل‌گیری یک میدان الکتریکی میان شیء و هدف است که تأثیر خود را در اعمال نیروی جاذبه‌ی الکتریکی بر شیء بروز می‌دهد. حال اگر به جای آن شیء باردار مجموعه‌ی از قطرات باردار افشانه به سوی آن جسم رسانا پاشیده شوند می‌توان وقوع پدیده‌ی مشابهی از القای بار الکتریکی را در سطح جسم انتظار داشت. در این حالت نیز شکل‌گیری میدان الکتریکی میان قطرات باردار و هدف به اعمال نیروی جاذبه‌ی الکتریکی بر قطرات باردار می‌انجامد که تأثیر آن در تغییر مسیر حرکت افشانه‌ی قطرات باردار به سوی هدف متبلور می‌شود. برای اندازه‌گیری نرخ بار القا شده (جریان الکتریکی) به سطح جسم می‌توان آمپرسنجی را میان جسم (هدف) و زمین قرار داد. در این حالت تغییر بار الکتریکی افشانه (متأثر از شرایط مختلف عملکردی نازل) موجب تغییر در القای بار الکتریکی در سطح هدف می‌شود که نقش آن در تغییر جریان الکتریکی میان هدف و زمین ظاهر می‌شود. اهمیت این موضوع در این است که جریان الکتریکی القایی در سطح هدف را می‌توان به‌ازای تولید و پاشش سطوح مختلفی از بار الکتریکی قطرات افشانه مورد مطالعه قرار داد.

رویکرد فوق مبنایی برای روش پژوهش در نوشتار حاضر به حساب می‌آید. براین اساس در چیدمان تجربی ارائه شده (شکل ۱)، با اتصال هدف رسانای فلزی به زمین می‌توان جریان القا شده در سطح هدف (I_T) را اندازه‌گیری کرد. از طرفی در بررسی نشست به دلیل حضور هدف فلزی در مسیر پاشش افشانه نمی‌توان از قفس فارادی برای اندازه‌گیری جریان الکتریکی افشانه استفاده کرد. در این راستا می‌توان از جریان الکتریکی انتقالی میان مخزن مایع و زمین (I_G) به عنوان معیاری برای ارزیابی بار الکتریکی ویژه افشانه استفاده کرد (شکل ۱). استفاده از این کمیت، همان‌گونه که در بررسی‌های اولیه^[۲۷] مشاهده شد، به دلیل پیوستگی جریان مایع در مخزن در مقایسه با گسستگی قطرات پاشیده شده به درون قفس، به معیاری با صحت بالاتر نسبت به قفس فارادی برای محاسبه‌ی بار الکتریکی ویژه منتهی می‌شود.

برای افشانه‌ی از قطرات باردار با دبی حجمی Q_I و جریان الکتریکی I_G ، بار الکتریکی ویژه (بار الکتریکی در واحد حجم) را می‌توان از رابطه‌ی ۱ محاسبه کرد:

$$\rho_S(I_G) = \frac{I_G}{Q_I} \quad (۱)$$

این افشانه‌ی باردار در مجاورت یک هدف فلزی متصل به زمین موجب القای بار الکتریکی در سطح آن هدف می‌شود. از آنجا که جریان القایی I_T در هدف خود نشأت گرفته از بارداری الکتریکی قطرات افشانه (مستتر در I_G) است، مقدار نسبی جریان القایی افشانه را می‌توان معیار مناسبی برای نشست دانست. به بیان دیگر، اگر افشانه‌ی باردار تحت شرایط مشخصی از عملکرد نازل (مثلاً به‌ازای مقادیر معینی از

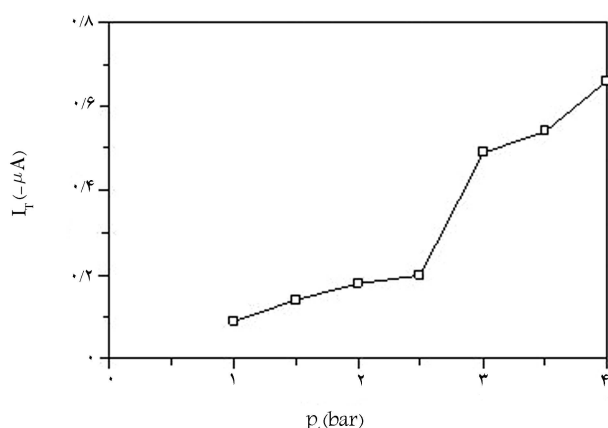
فشار هوا، دبی مایع و ولتاژ باردارسازی) دارای جریان الکتریکی I_G باشد، جریان الکتریکی القایی در سطح هدف بخشی از جریان I_G خواهد بود که در قالب کمیت I_T اندازه‌گیری می‌شود. از این رو، اگر بار الکتریکی ویژه القایی (ناشی از آن بخش از افشانه که بر روی هدف نشست یا ایجاد القای بار الکتریکی کرده) نسبت به بار الکتریکی ویژه افشانه (رابطه‌ی ۱) در نظر گرفته شود، خواهیم داشت:

$$\frac{\rho_S(I_T)}{\rho_S(I_G)} = \left(\frac{I_T}{Q_T} \right) = \frac{Q_I}{Q_T} \cdot \frac{I_T}{I_G} \quad (۲)$$

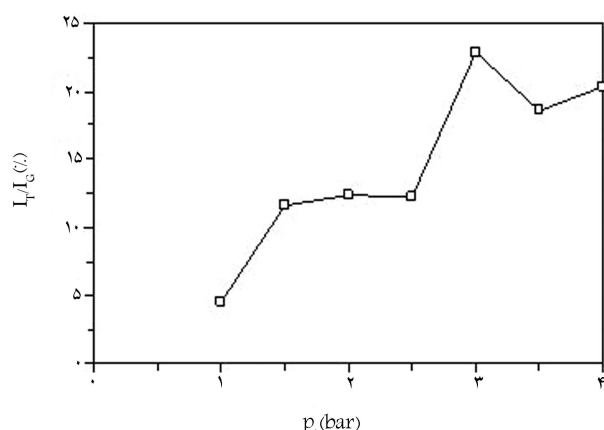
که در آن Q_T دبی آن بخش از افشانه است که به نشست قطرات در سطح هدف منجر می‌شود. با توجه به این که Q_T معیاری از نرخ نشست افشانه روی هدف است و Q_I نیز مقدار معینی برای هر نقطه‌ی عملکردی نازل دارد، رابطه‌ی ۲ نشان می‌دهد که این نسبت جریان‌های الکتریکی است که به صورت پارامتری گنمی برای نسبت دبی‌ها عمل می‌کند. از طرفی در رابطه‌ی ۲، بار الکتریکی ویژه افشانه ($\rho_S(I_G)$) خصوصیتی ویژه (حجمی) از افشانه محسوب می‌شود که تابعی از شرایط عملکردی نازل است و به‌ازای هر نقطه‌ی عملکردی مقداری معین دارد. با توجه به این که از یک سو بار الکتریکی افشانه ناشی از بار الکتریکی قطرات تشکیل‌دهنده‌ی آن است و از سوی دیگر دبی حجمی افشانه (Q_I) همان دبی حجمی قطرات مایع افشانه است، لذا بار الکتریکی ویژه بیان‌گر بار الکتریکی موجود در واحد حجم هر قطره است.

در مقابل، بار الکتریکی ویژه القایی ($\rho_S(I_T)$) یا بار الکتریکی ویژه برای بخشی از افشانه که به القای بار الکتریکی بر روی هدف منجر شده است می‌تواند دو حالت را شامل شود. در حالت اول، تمامی جریان الکتریکی القا شده در سطح هدف (I_T) ناشی از قطراتی است که به سطح هدف رسیده و در تماس با آن سطح موجب القای بار الکتریکی مخالف می‌شوند. در این صورت، تناسبی یک به یک میان نرخ حجمی قطرات نشست یافته بر روی هدف (Q_T) و نرخ بار الکتریکی القا شده بر روی هدف (I_T) وجود دارد. به بیان دیگر، القایی در سطح هدف صورت نمی‌گیرد مگر آن که قطره‌ی باردار از افشانه در تماس و نشست بر روی هدف موجب آن القا شده باشد. در این حالت، از آنجا که فقط قطرات نشست یافته بر روی هدف موجب القای الکتریکی در سطح هدف می‌شوند، لذا بار الکتریکی ویژه (بار در واحد حجم) برای آن بخش از افشانه که بر روی هدف نشست می‌یابد ($\rho_S(I_T)$) برابر با بار الکتریکی در واحد حجم هر قطره خواهد شد. از طرفی بار الکتریکی موجود در واحد حجم هر قطره از افشانه، محصول باردارسازی القایی در درون نازل است که در بار الکتریکی ویژه افشانه ($\rho_S(I_G)$) نهفته است. لذا در حالت اول که جریان القایی در سطح هدف فقط ناشی از قطرات نشست یافته بر روی هدف است، بار الکتریکی ویژه القایی برابر با بار الکتریکی ویژه افشانه است، یعنی $\rho_S(I_T) = \rho_S(I_G)$.

حالت دوم از بار الکتریکی ویژه القایی ($\rho_S(I_T)$) مربوط به شرایطی است که القای الکتریکی در سطح هدف منتج از بار الکتریکی دو گروه از قطرات افشانه باشد. گروه اول را قطراتی تشکیل می‌دهند که دارای نرخ حجمی Q_T بوده و با نشست بر روی هدف موجب القای بار الکتریکی مخالف در سطح هدف می‌شوند. گروه دوم متشکل از قطراتی هستند که در افشانه وجود دارند ولی بر روی هدف نشست نمی‌یابند و فقط حضور و عبور آنها از مجاورت هدف موجب القای بار الکتریکی بر روی هدف می‌شود. از این رو، نرخ حجمی قطرات نشست یافته (Q_T) کمتر از نرخ حجمی کل قطراتی است که القای بار بر روی هدف را به دنبال دارند. در این حالت به دلیل این که I_T ، جریان القایی ناشی از مجموعه‌ی بزرگ‌تری از



شکل ۶. تغییرات جریان القایی در هدف (پیش‌آزمایش).



شکل ۷. تغییرات نسبت جریان‌های الکتریکی (پیش‌آزمایش).

لازم) در جریان الکتریکی القاشده بر روی هدف در واکنش به تغییر عملکردی نازل (مستتر در P_1) است که خود تأییدی بر تأمین ویژگی دوم محسوب می‌شود.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از بررسی تجربی جذب و نشست افشانه‌ی باردار بر روی هدف‌های فلزی در دو بخش ارائه می‌شود. بخش نخست به نتایج کمی و بخش دوم به نتایج کیفی مربوط می‌شود. در تمامی این آزمایش‌ها از آب شیر به‌عنوان سیال کاری استفاده شده، و پارامترهای عملکردی نازل و هندسه‌ی پاشش از شکل ۱ پیروی می‌کنند.

شکل ۸ نمودار تغییرات دما و دبی هوای فشرده را برحسب فشار هوا و برای مقادیر مختلف فاصله‌ی عمودی هدف کروی تا نازل (Y در شکل ۱) و به‌ازای مقادیر ثابت دبی مایع و ولتاژ باردارسازی نشان می‌دهد. این شکل ضمن تأیید یافته‌های قبلی^[۲۶] مربوط به بررسی عملکرد نازل مینی بر وجود شرایط هم‌دمایی و روند خطی تغییرات دبی هوا، نشان می‌دهد که استفاده از هدف فلزی در چیدمان جدید (شکل ۱ ب) نیز تأثیری بر جریان هوای فشرده در نازل ندارد.

شکل ۹ نمودار تغییرات جریان الکتریکی القایی در هدف کروی توپر و جریان الکتریکی افشانه را برحسب فشار هوا نشان می‌دهد. شکل ۹ الف روند صعودی را برای جریان القایی هدف نسبت به فشار به نمایش می‌گذارد. این روند صعودی

قطرات نشست‌یافته بر روی هدف است، بار الکتریکی ویژه‌ی القایی ($\rho_S(I_T)$) به مقداری بزرگ‌تر از بار الکتریکی ویژه‌ی افشانه (بار الکتریکی در واحد حجم هر قطره) منتهی می‌شود، یعنی $\rho_S(I_T) > \rho_S(I_G)$.

مقایسه‌ی دو حالت مفروض نشان می‌دهد که حالت اول حالتی ایده‌آل است در صورتی که حالت دوم (با استناد به میانی القای الکترواستاتیکی و عدم ضرورت تماس و نشست قطره‌ی باردار بر روی هدف به‌منظور ایجاد القا) صورتی واقعی‌تر از موضوع را به نمایش می‌گذارد. در حالت اول، تمامی قطراتی که القای الکتریکی را بر روی هدف موجب می‌شوند با قرار گرفتن در مسیر خطوط میدان الکتریکی شکل‌گرفته میان قطرات باردار و هدف به سوی هدف حرکت کرده و بر روی آن می‌نشینند. در حالی که در حالت دوم، بخشی از قطرات تحت تأثیر میدان جاذبه‌ی الکتریکی به سوی هدف حرکت کرده و بر روی آن می‌نشینند و مابقی قطراتی که در معرض این میدان قرار می‌گیرند بر این میدان به حرکت خود در راستای نیروی آثرو دینامیکی افشانه ادامه می‌دهند. براساس این دو حالت مشاهده می‌شود که نسبت بار الکتریکی ویژه‌ی القایی به بار الکتریکی ویژه‌ی افشانه به صورت ضربی مطابق با رابطه‌ی ۳ عمل می‌کند:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{\rho_S(I_T)}{\rho_S(I_G)} \geq 1, \quad \beta \leq 1 \quad (3)$$

از این رو با توجه به رابطه‌ی ۲، نشست نسبی اسپری را می‌توان در تناسب با نسبت جریان‌های القایی دانست:

$$\frac{Q_T}{Q_I} = \beta \frac{I_T}{I_G}, \quad \beta \leq 1 \quad (4)$$

مطابق رابطه‌ی ۴، نسبت جریان الکتریکی القایی بر روی هدف به جریان الکتریکی افشانه به‌عنوان شاخصی برای تقویت یا تضعیف نشست نسبی افشانه‌ی باردار بر روی هدف در شرایط مختلف عملکردی نازل عمل می‌کند. لذا مطالعه‌ی نسبت جریان‌های الکتریکی مزبور می‌تواند شرایط لازم را برای دریافتی فیزیکی از جذب و نشست افشانه‌ی باردار بر روی یک هدف متصل به زمین فراهم سازد.

پیش‌آزمایش

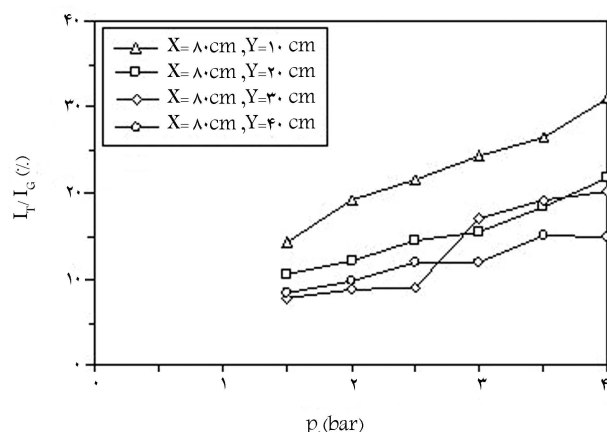
پیش از اجرای روش مطروحه در بخش قبلی، کسب اطمینان از عملی بودن این روش ضروری می‌نماید. در این راستا، شاخص بررسی (نسبت جریان‌های الکتریکی، I_T/I_G) باید از منظر دارا بودن دو ویژگی مورد ارزیابی قرار می‌گرفت. این شاخص اولاً باید قابل اندازه‌گیری باشد تا بتوان ماهیتی کمی برای آن قائل شد و ثانیاً از حساسیت لازم و معنی‌داری در برابر تغییر پارامترهای عملکردی نازل برخوردار باشد. بررسی دو ویژگی یادشده طی آزمایشی مقدماتی بررسی شد. بدین‌منظور از کره برنجی (ناقص) در شکل ۵ به‌عنوان هدف فلزی مستقر بر روی پایه‌ی نگه‌دارنده در شکل ۱ استفاده شد. نتایج آزمایش مقدماتی برای تغییرات I_T و I_T/I_G برحسب فشار هوای فشرده و در شرایطی که هدف در موقعیت $X = 8^\circ \text{ cm}$ و $Y = 3^\circ \text{ cm}$ قرار گرفته باشد، برای ولتاژ باردارسازی $V_o = 1000 \text{ V}$ و دبی $Q_I = 5 \text{ Lh}^{-1}$ در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. در ارزیابی ویژگی اول، شکل ۶ اولاً القای بار الکتریکی در اثر عبور افشانه‌ی باردار از مجاورت هدف و ثانیاً اندازه‌پذیری کمی این جریان را مورد تأیید قرار می‌دهد. در رابطه با ویژگی دوم، شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهند که تغییرات فشار هوای فشرده (به‌عنوان پارامتری عملکردی از نازل) به تغییرات قابل توجهی از جریان القایی و نیز نسبت جریان القایی به جریان الکتریکی افشانه منجر می‌شود. این موضوع حاکی از وجود تغییرات معنی‌دار (یا حساسیت

را می‌توان در ارتباط با بهبود باردارسازی افشانه بر اثر افزایش فشار (شکل ۹ ب) توضیح داد. مطابق شکل ۹ ب، افزایش فشار هوا با تقویت ریزسازی مایع و ممانعت و/یا ایجاد تأخیر در وقوع پدیده‌ی خیس‌شدگی الکتروتود باردارساز، به انتقال سطح بالاتری از جریان الکتریکی به قطرات افشانه منجر می‌شود. از طرفی القای بار الکتریکی در هدف فلزی حاصل پاشش و عبور قطرات افشانه از مجاورت هدف است. لذا افزایش نرخ بار الکتریکی افشانه (مستتر در I_G) به القای بار الکتریکی بیشتری در هدف (مستتر در I_T) می‌انجامد که انعکاس آن در روند صعودی جریان القایی در شکل ۹ الف مشاهده می‌شود.

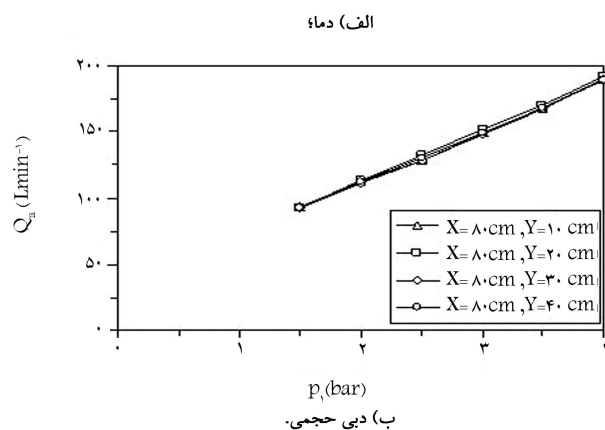
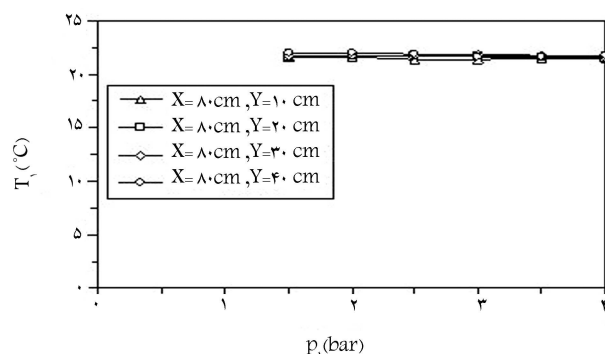
در شکل ۹ الف همچنین نشان داده شده که کاهش فاصله‌ی عمودی میان هدف و نازل (Y) موجب افزایش جریان القایی در هدف می‌شود. این موضوع بنا بر نسبت معکوس میان شدت میدان الکتریکی و فاصله‌ی میان دو جسم باردار^[۲۸] قابل توضیح است. در این حالت، کاهش Y یا نزدیک‌تر شدن سطح هدف به افشانه‌ی قطرات باردار موجب شکل‌گیری میدان الکتریکی قوی‌تری میان هدف و قطرات باردار می‌شود که تأثیر آن از طریق تقویت القای الکتریکی در هدف به صورت افزایش جریان القایی مطابق شکل ۹ الف ظاهر می‌شود. با این حال به‌رغم تأثیر مشهود تغییرات فاصله‌ی عمودی میان افشانه و نازل بر جریان القایی، کاهش فاصله‌ی مزبور از تأثیر کم‌تری بر جریان الکتریکی افشانه در شکل ۹ ب برخوردار است. این موضوع حاکی از این است که سازوکار باردارسازی القایی قطرات در داخل نازل تأثیرپذیری پایین‌تری از میدان الکتریکی میان افشانه‌ی باردار و هدف فلزی در شرایط آزمایش دارد.

در شکل ۱۰ نمودار تغییرات جریان الکتریکی القایی هدف به جریان الکتریکی افشانه، برحسب فشار هوای فشرده برای شرایط متناظر با شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۰، نسبت جریان الکتریکی از روندی صعودی نسبت به فشار برخوردار است. این موضوع نشان می‌دهد که دست‌یابی به سطوح بالاتر جریان الکتریکی افشانه در فشارهای بالاتر موجب تقویت القای الکتریکی در هدف می‌شود، ولی نرخ رشد جریان القایی در هدف بیش از نرخ رشد جریان الکتریکی افشانه‌ی است که نقش خود را در روند صعودی نمودارها در شکل ۱۰ به نمایش گذاشته است. شکل ۱۰ همچنین نشان می‌دهد که کاهش فاصله‌ی عمودی هدف تا افشانه (Y) موجب ازدیاد نسبت جریان الکتریکی می‌شود که خود ناشی از تشدید القا بر اثر تقویت میدان الکتریکی در فواصل کوتاه‌تر میان هدف و افشانه است.

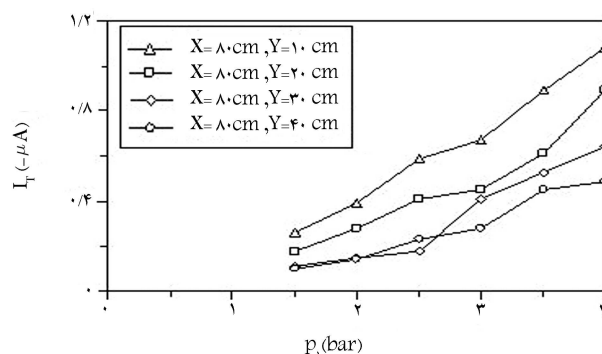
شکل ۱۱ نمودار تغییرات دما و دبی حجمی هوای فشرده را برحسب فشار هوا برای هدف‌های فلزی مختلف (شکل ۵) نشان می‌دهد. این شکل ضمن تأیید



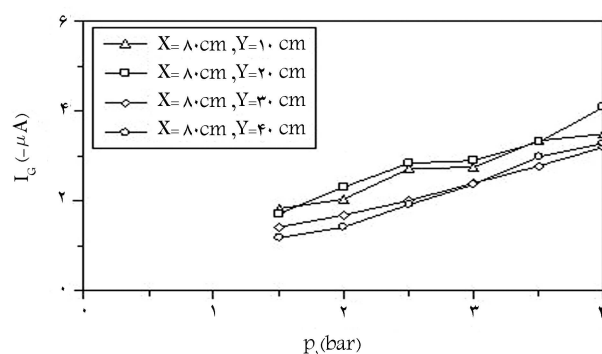
شکل ۹. تأثیر تغییرات فشار برای هدف کروی توپر به‌ازای ولتاژ $V=1000$ ، دبی مایع 5 Lh^{-1} ، و فواصل عمودی مختلف بر نسبت جریان‌های الکتریکی.



شکل ۸. تأثیر تغییرات فشار برای هدف کروی توپر به‌ازای ولتاژ $V=1000$ ، دبی مایع 5 Lh^{-1} ، و فواصل عمودی مختلف بر مشخصه‌های جریان هوای فشرده.

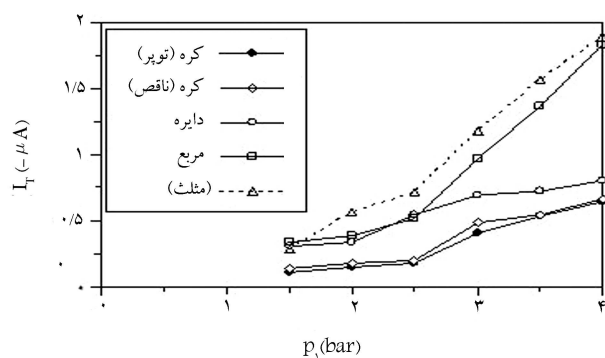


الف) جریان الکتریکی القایی در هدف؛

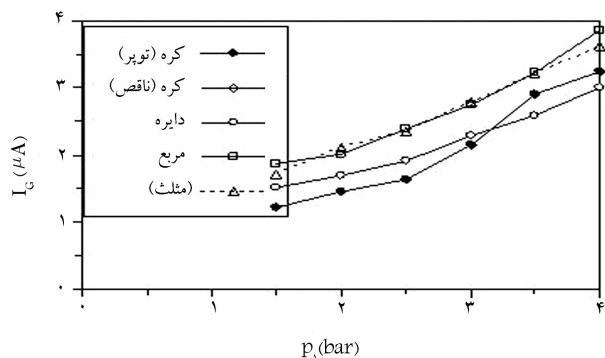


ب) جریان الکتریکی افشانه.

شکل ۹. تأثیر تغییرات فشار برای هدف کروی توپر به‌ازای ولتاژ $V=1000$ ، دبی مایع 5 Lh^{-1} ، و فواصل عمودی مختلف بر مشخصه‌های الکتریکی هدف و افشانه.



الف) جریان الکتریکی القایی در هدف؛

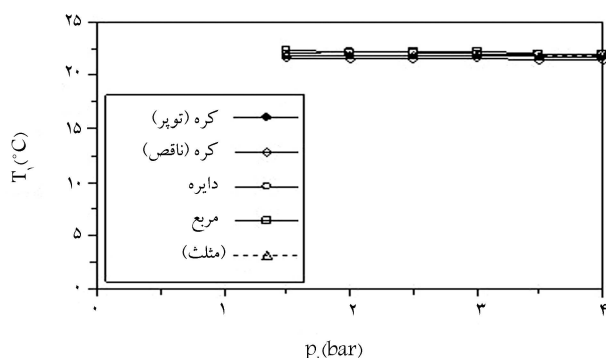


ب) جریان الکتریکی افشانه.

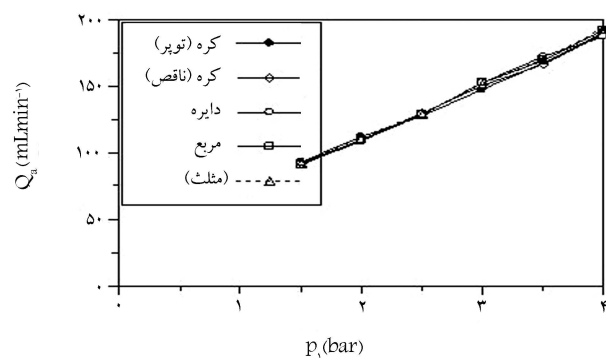
شکل ۱۲. تأثیر تغییرات فشار برای هدف‌های مختلف به ازای ولتاژ $V = 1000$ ، دبی مایع 5 Lh^{-1} و موقعیت $X = 8^\circ \text{ cm}$ و $Y = 3^\circ \text{ cm}$ بر مشخصه‌های الکتریکی هدف و افشانه.

اساس، انحناهای سطوح هدف‌های تخت (دایره و مربع) صفر است، در حالی که هدف‌های کروی از انحناهای غیرصفر برخوردارند. از این رو مواجهه‌ی قطرات افشانه‌ی باردار با هدف‌های تخت و شکل‌گیری خطوط میدان الکتریکی به‌گونه‌ی است که تمامی سطح هدف در معرض دید مستقیم قطرات باردار قرار دارد، در حالی که در هدف‌های کروی بخشی از سطح هدف (به دلیل انحنا) در معرض دید مستقیم قطرات باردار قرار ندارد و لذا خطوط میدان با ایجاد انحنا به آن قسمت‌ها منتهی می‌شوند. این موضوع با توجه به تناسب مستقیم بردارهای نیرو و میدان الکتریکی (یا اعمال نیروی الکتریکی مماس بر خطوط میدان الکتریکی) موجب تغییر در نرخ القای بار الکتریکی در هدف می‌شود که نتیجه‌ی آن در شکل ۱۲ الف به سطوح بالاتری از القای الکتریکی در هدف‌های تخت نسبت به هدف‌های کروی منجر شده است.

نکته‌ی دومی که می‌توان برای تفاوت القای الکتریکی در هدف‌های تخت و کروی مورد توجه قرار داد به وجود قسمت‌های تیز (لبه‌ها) بازمی‌گردد. هدف‌های فلزی دایره و مربع به دلیل تخت بودن از لبه‌هایی در حد واصل میان سطح هدف و ضخامت هدف برخوردارند که به صورت یک لبه‌ی تیز عمل می‌کند. از طرفی وجود قسمت‌های تیز در سطح هدف موجب تمرکز و گردآیدان بالای میدان الکتریکی در آن قسمت‌ها می‌شود که تجمع زیاد بار الکتریکی را در آن نواحی به دنبال خواهد داشت. [۳۰، ۳۱] از این رو لبه‌های موجود در هدف‌های تخت را می‌توان عاملی برای افزایش نرخ القای بار الکتریکی در هدف دانست که نتیجه‌ی آن در سطوح بالاتری از جریان القایی برای هدف‌های دایروی و مربعی تخت در شکل ۱۲ الف انعکاس یافته است. نکته‌ی سوم در بررسی شکل ۱۲ الف به افزایش فوق‌العاده زیاد جریان القایی در فشارهای بالا برای هدف مربعی نسبت به دایروی مربوط می‌شود. تفاوت هندسی



الف) دما؛



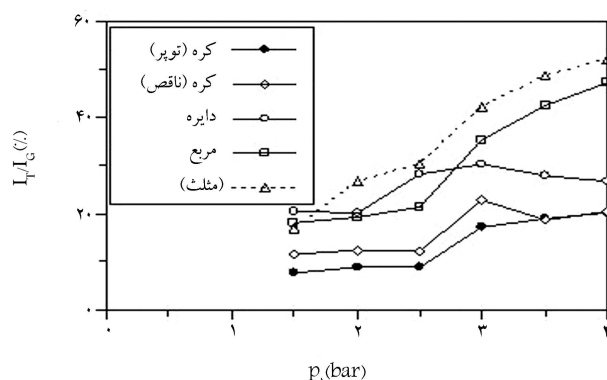
ب) دبی حجمی.

شکل ۱۱. تأثیر تغییرات فشار برای هدف‌های مختلف به ازای ولتاژ $V = 1000$ ، دبی مایع 5 Lh^{-1} و موقعیت $X = 8^\circ \text{ cm}$ و $Y = 3^\circ \text{ cm}$ بر مشخصه‌های جریان هوای فشرده.

یافته‌های قبلی در شکل ۸ نشان می‌دهد که نازل دوسیاله قادر به تأمین شرایط هم‌دمایی و تغییرات خطی دبی حجمی برای هوای فشرده است و تنوع هندسی هدف‌های فلزی نیز تأثیری بر این شرایط ندارد.

در شکل ۱۲ نمودار تغییرات جریان الکتریکی القایی در هدف و جریان الکتریکی افشانه برحسب فشار و برای هدف‌های فلزی مختلف نشان داده شده است. روند صعودی جریان القایی در هدف‌های مختلف (شکل ۱۲ الف) را در مرحله‌ی نخست می‌توان در ارتباط با دست‌یابی به سطوح بالاتری از جریان الکتریکی افشانه بر اثر افزایش فشار (شکل ۱۲ ب) توضیح داد که زمینه‌ی القای بالاتری از بار الکتریکی را فراهم می‌سازد. مطابق شکل ۱۲ الف، تغییر قابل توجهی در جریان القایی هدف‌های کروی نسبت به یکدیگر مشاهده نمی‌شود در حالی که هدف‌های دایره و مربع مقادیر بزرگ‌تری از جریان القایی را به نمایش گذاشته‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که هندسه‌ی هدف، به رغم کوچک‌تر بودن سطح کل هدف‌های دایره و مربع نسبت به هدف‌های کروی، می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر القای الکتریکی در سطح آن داشته باشد. با توجه به این که شرایط عملکردی نازل از حیث فشار هوای فشرده، دبی مایع و ولتاژ الکتریکی برای تمامی هدف‌ها یکسان است، لذا دلیل تفاوت در القای بار الکتریکی را می‌توان در نقش هندسی هدف‌ها جست‌وجو کرد.

نمایز بارزی که میان هدف‌های فلزی مشاهده می‌شود در وهله‌ی نخست به انحناهای هندسی این هدف‌ها مربوط می‌شود. مطابق تعریف، انحناهای هر نقطه از یک منحنی برابر با معکوس شعاع دایره‌ی است که در آن نقطه بر منحنی مماس شده باشد، [۲۹] لذا شعاع انحنا برای دایره‌ی به شعاع R برابر $1/R$ و برای صفحه‌ی تخت (متراذف با قطاعی از دایره‌ی بی‌شعاع بی‌نهایت) برابر صفر است. بر این



شکل ۱۳. تأثیر تغییرات فشار برای هدف‌های مختلف به‌ازای ولتاژ $V = 1000$ ، دبی مایع 5 Lh^{-1} ، و موقعیت $X = 80 \text{ cm}$ و $Y = 30 \text{ cm}$ بر نسبت جریان‌های الکتریکی.

در شکل ۱۳ نسبت جریان الکتریکی القایی در هدف به جریان الکتریکی افشانه، برحسب فشار هوا و برای هدف‌های مختلف نشان داده شده است. مطابق این شکل، نسبت جریان‌های الکتریکی از روندی صعودی نسبت به فشار هوا برخوردار است که شیب افزایشی این روند در فشارهای بالا کاهش یافته و برای هدف‌های کروی و دایروی به روندی تقریباً نزولی تبدیل می‌شود. شکل ۱۳ از نسبت روند صعودی جریان‌های الکتریکی در شکل ۱۲ به دست آمده است و لذا نسبت شیب این نمودارها تعیین‌کننده روند تغییرات در شکل ۱۳ است. روند صعودی مزبور در ارتباط با شکل ۹، ناشی از تقویت باردارسازی افشانه در فشارهای بالا و دست‌یابی به سطوح بالاتری از جریان الکتریکی افشانه است که به القای بار الکتریکی بیشتری در هدف منجر می‌شود. در این حالت، نرخ رشد جریان القایی در هدف (مستتر در IT) بیش از نرخ رشد جریان الکتریکی افشانه (مستتر در IG) است و لذا نسبت IT/IG روندی صعودی را به دنبال دارد. با این حال افزایش بیشتر فشار هوا موجب کاهش نرخ رشد جریان القایی در هدف نسبت به نرخ رشد جریان الکتریکی افشانه می‌شود که تأثیر آن در روند نزولی IT/IG در شکل ۱۳ انعکاس یافته است. در این راستا، شکل ۱۳ نشان می‌دهد که فشار متناظر با بیشینه‌ی نسبت جریان‌های الکتریکی برای هدف‌های کروی و دایره‌ای تحت 3 bar است در حالی که برای هدف‌های مربع و مثلث تحت به مقادیر بیشتری میل می‌کند. این موضوع مطابق شکل ۱۲ الف از مقادیر بزرگ‌تر و شیب تند جریان القایی در هدف‌های مربع و مثلث در فشارهای بالا ناشی می‌شود در حالی که شیب تغییرات جریان الکتریکی اسپری در شکل ۱۲ ب از روندی آرام برخوردار است.

روند صعودی- نزولی نمودارها در شکل ۱۳ نشان‌گر آن است که افزایش فشار هوا به‌رغم تقویت باردارسازی افشانه زمینه‌ی رانش سریع‌تر آن را نیز فراهم می‌سازد که این موضوع غلبه‌ی نیروی رانش آئروپنماتیکی بر نیروی جاذبه‌ی الکتریکی را به‌همراه دارد. به‌عبارت دیگر، هرچند افزایش فشار هوا از طریق بهبود باردارسازی افشانه و دست‌یابی به سطوح بالاتری از جریان الکتریکی افشانه موجب تقویت میدان جاذبه‌ی الکتریکی قطرات در مجاورت هدف می‌شود، به‌طور هم‌زمان حرکت سریع‌تر افشانه را نیز به دنبال دارد. از این رو در شکل ۱۳ می‌توان فشار بهینه‌ی را برای بیشینه‌ی نسبت جریان‌های الکتریکی مشاهده کرد که به‌طور غیرمستقیم ناظر بر بیشینه‌ی نیروی جاذبه‌ی الکتریکی به نیروی رانش آئروپنماتیکی است. این موضوع نشان می‌دهد که هرچند IT و IG می‌توانند به‌تنهایی اطلاعات مفیدی درخصوص باردارسازی افشانه و القای الکتریکی در هدف ارائه دهند، نسبت این

مربع با دایره در وجود رئوس یا گوشه‌های نوک‌تیز در مربع است که این نقاط نوک‌تیز می‌توانند همانند لبه‌های نوک‌تیز به تمرکز بالای میدان الکتریکی و مآلاً تجمع بیشتر بار الکتریکی در آن نقاط منجر شوند. این موضوع، مطابق شکل ۱۲ الف، در فشارهای بالاتر از 2.5 bar سبب افزایش شدید جریان القایی در مربع نسبت به دایره شده است. برای کسب اطمینان بیشتر از نقش لبه‌های نوک‌تیز در ازدیاد شدید جریان القایی، آزمایش مشابهی با استفاده از هدف فلزی مثلثی (شکل ۵) نیز به اجرا درآمد. شکل ۱۲ الف نشان می‌دهد که استفاده از هدف مثلثی نیز روندی مشابه با هدف مربعی به دنبال دارد که تأییدی بر نقش نقاط نوک‌تیز در تمرکز میدان الکتریکی و تشدید القای الکتریکی در هدف محسوب می‌شود. البته جریان القایی در مثلث قدری بیشتر از مربع است که این موضوع را می‌توان ناشی از کم‌تر بودن زاویه‌ی رأس مثلث متساوی‌الاضلاع (60°) نسبت به زاویه‌ی رأس مربع (90°) دانست. به‌عبارتی رئوس مثلث نقاطی نوک‌تیزتر از رئوس مربع‌اند و لذا با ایجاد تمرکز بالاتری از میدان الکتریکی موجب افزایش القای الکتریکی می‌شوند.

با این حال علت تأثیرگذاری بسیار زیاد نقاط نوک‌تیز در فشارهای بالا ممکن است از سرعت بالای هوای فشرده در آن فشارها و رانش سریع‌تر یون‌های موجود در محیط نشأت گرفته باشد. با ارجاع به پژوهش قبلی در بررسی نازل دوسیاله‌ی القایی مشاهده شد که نازل در عمل در فشارهای بالاتر از 3 bar دچار خفگی می‌شود.^[۲۶] از این رو خروج هوای فشرده در شرایط خفگی (سرعت صوت) می‌تواند توربولانس شدیدتری در هوای محیطی ایجاد کند و به جابه‌جایی نرخ بالاتری از یون‌های موجود در آن محیط بینجامد. در این حالت، تمرکز بالای میدان الکتریکی در رئوس مربع زمینه‌ی مناسب برای تجمع یون‌های آزاد فراهم می‌کند که به دنبال آن می‌توان نرخ بالاتری از القای الکتریکی را در هدف شاهد بود. البته لازم است دقت شود که اساساً وجود لبه و رئوس نوک‌تیز در یک هدف به دلیل ایجاد تمرکز در میدان الکتریکی می‌تواند عاملی منفی محسوب می‌شود. زیرا در این حالت القا و تجمع شدید بار الکتریکی در آن نواحی می‌تواند به خشی‌شدن بار الکتریکی قطرات منجر شود که در عمل با مزایای مترتب بر پاشش افشانه‌ی باردار در تضاد است. در مقابل، توزیع گسترده و غیر متمرکز بار القایی روی یک سطح به پیدایش و اعمال میدانی متوازن از نیروی الکتریکی بر افشانه‌ی قطرات منجر می‌شود که امکان جذب و نشست یکنواخت قطرات را بر روی سطح فراهم می‌کند.

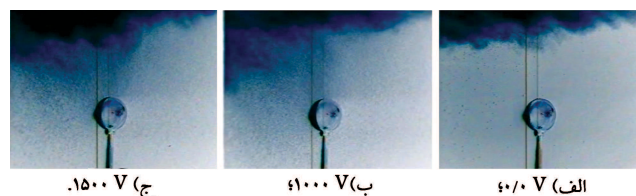
شکل ۱۲ ب تأثیر هدف فلزی را بر جریان الکتریکی افشانه برحسب فشار نشان می‌دهد. مطابق این شکل، روند صعودی جریان الکتریکی افشانه برای تمامی هدف‌ها حاکی از نقش مثبت افزایش فشار هوا در بهبود باردارسازی افشانه محسوب می‌شود (شکل ۹ ب). در شکل ۱۲ ب همچنین نشان داده شده است که نمودار جریان الکتریکی افشانه برای هر دو هدف کروی بر یکدیگر منطبق‌اند و این انطباق برای نمودار مربوط به هدف‌های مربع و مثلث نیز تاحد زیادی صدق می‌کند. این موضوع نشان می‌دهد که ساختار هندسی هدف از نظر انحنای سطح و وجود نقاط و لبه‌های نوک‌تیز بر روی آن می‌تواند تا حدودی باردارسازی القایی قطرات را در داخل نازل تحت تأثیر قرار دهد. به‌بیان دیگر، الگوی میدان الکتریکی شکل‌گرفته میان هدف و قطرات باردار بر بالا دست جریان افشانه در نازل اثر دارد به‌طوری که تمرکز بالای این میدان در هدف‌های فلزی می‌تواند به تقویت سازوکار باردارسازی القایی در داخل نازل و در نتیجه به افزایش جریان الکتریکی افشانه منجر شود. با این حال شکل ۱۲ ب روندی تقریباً همدان از تغییرات جریان الکتریکی اسپری را، بر خلاف آنچه که در جریان الکتریکی القایی در شکل ۱۲ الف مشاهده شد، برای هدف‌های مختلف به نمایش می‌گذارد که حاکی از نقش محوری فشار هوای فشرده در سازوکار باردارسازی القایی افشانه است.

دو جریان به شاخص دقیق‌تری از جذب و نشست افشانه بر روی هدف منتهی می‌شود.

ذکر این نکته ضروری است که در بررسی حاضر بنا بر رسانایی هدف امکان ایجاد مسیر مبادله‌ی بار الکتریکی میان هدف و زمین موجب خنثی شدن بار الکتریکی قطرات افشانه با نشست آن قطرات بر روی هدف می‌شود. در این حالت هدف همواره در پتانسیل صفر زمین قرار دارد و این موضوع امکان تداوم نشست قطرات را بر روی هدف فراهم می‌سازد. در مقایسه، پاشش قطرات باردار بر روی هدف‌های نارسانا با نشست اولین قطرات باردار بر روی سطح هدف، به دلیل عدم امکان مبادله‌ی بار الکتریکی میان هدف و زمین، موجب شکل‌گیری لایه‌ی باردار از قطرات بر روی سطح می‌شود. این موضوع از یک سو به صورت میدانی دافع در برابر قطرات بعدی عمل کرده و آن قطرات را به سوی نقاطی که نشست در آن نقاط صورت نگرفته هدایت می‌کند و از سوی دیگر باعث افزایش پتانسیل جسم نارسانا می‌شود. از این رو در عمل با استقرار الکترودی با پتانسیل مخالف پتانسیل قطرات باردار در پشت سطح هدف، ضمن ایجاد میدانی با جاذبه‌ی الکتریکی برای جذب و نشست قطرات بر روی هدف نارسانا، امکان خنثی‌کردن بار الکتریکی قطرات نشست‌یافته بر روی هدف نیز فراهم می‌شود.

شکل ۱۴ تصاویری از عبور افشانه‌ی قطرات را از مجاورت هدف کروی توپر به‌ازای ولتاژهای مختلف باردارسازی نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۴ الف، افشانه‌ی خنثی (بدون بار الکتریکی) هیچ‌گونه برهم‌کنشی را در عبور از مجاورت هدف کروی متصل به زمین نشان نمی‌دهد و صرفاً می‌توان شاهد ریزش برخی از قطرات افشانه بر اثر نیروی گرانش زمین بود. اعمال ولتاژ باردارسازی بر افشانه و تولید قطرات باردار مطابق شکل‌های ۱۴ ب و ۱۴ ج حاکی از اعمال نیرویی بر قطرات افشانه‌ی باردار است که به شکل‌گیری الگویی از جذب و نشست قطرات بر روی هدف منجر شده است. این الگو پیدایش میدان جاذبه‌ی الکتریکی را در مجاورت هدف فلزی مورد تأیید قرار می‌دهد که برهم‌کنشی الکترواستاتیکی را میان افشانه و هدف به وجود آورده است. شکل ۱۴ همچنین نشان می‌دهد که افزایش ولتاژ به الگوی چگال‌تری از حضور قطرات باردار در مجاورت هدف فلزی منجر می‌شود که حاکی از اعمال نیروی جاذبه‌ی قوی‌تری بر قطرات است. این موضوع ناشی از انتقال سطوح بالاتری از بار الکتریکی به قطرات در ولتاژهای بالاتر است که تقویت میدان جاذبه‌ی الکتریکی میان قطرات و هدف را به دنبال دارد و نتیجه‌ی آن در جذب و نشست بیشتر قطرات بر روی هدف مشاهده می‌شود. تصاویر متناظر با شکل ۱۴، اما تحت زاویه‌ی بسته، در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

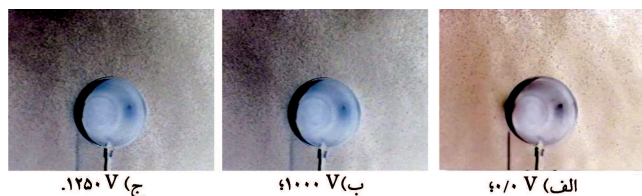
در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ تصاویر برهم‌کنش افشانه‌ی قطرات با هدف‌های کروی ناقص، دایره و مربع نشان داده شده است. این شکل‌ها نیز همانند شکل ۱۴ با نمایش شکل‌گیری الگوی جذب و نشست افشانه‌ی باردار در مجاورت هدف متفقاً بر پیدایش میدان جاذبه‌ی الکتریکی میان قطرات باردار و هدف صحه می‌گذارند.



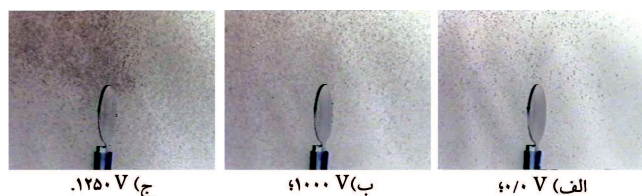
شکل ۱۴. تصاویری تحت زاویه‌ی باز از برهم‌کنش اسپری قطرات باردار و هدف کروی توپر در ولتاژهای مختلف باردارسازی و به‌ازای هوای فشرده در فشار ۲ bar و دبی مایع 6 Lh^{-1} .



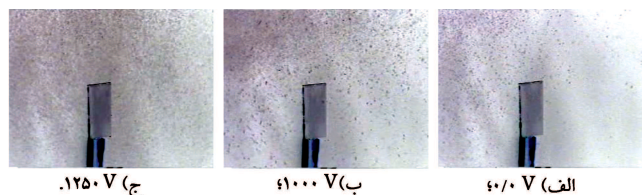
شکل ۱۵. تصاویری تحت زاویه‌ی بسته از برهم‌کنش افشانه‌ی قطرات باردار و هدف کروی توپر در ولتاژهای مختلف باردارسازی و به‌ازای هوای فشرده در فشار ۲ bar و دبی مایع 6 Lh^{-1} .



شکل ۱۶. تصاویری تحت زاویه‌ی بسته از برهم‌کنش افشانه‌ی قطرات باردار و هدف کروی ناقص در ولتاژهای مختلف باردارسازی و به‌ازای هوای فشرده در فشار ۲ bar و دبی مایع 6 Lh^{-1} .



شکل ۱۷. تصاویری تحت زاویه‌ی بسته از برهم‌کنش افشانه‌ی قطرات باردار و هدف دایره در ولتاژهای مختلف باردارسازی و به‌ازای هوای فشرده در فشار ۲ bar و دبی مایع 6 Lh^{-1} .



شکل ۱۸. تصاویری تحت زاویه‌ی بسته از برهم‌کنش افشانه‌ی قطرات باردار و هدف مربع در ولتاژهای مختلف باردارسازی و به‌ازای هوای فشرده در فشار ۲ bar و دبی مایع 6 Lh^{-1} .

از این رو در عمل می‌توان تأثیر پاشش افشانه‌ی قطرات باردار را در غلبه‌ی نیروی الکتریکی بخشی از این قطرات بر نیروی رانش آئروستاتیک اسپری و حرکت به سوی هدف شاهد بود که الگویی از جذب و نشست الکتریکی اسپری باردار را مطابق این شکل‌ها به تصویر کشیده‌اند.

نتیجه‌گیری

مطالعه‌ی پدیده‌ی جذب و نشست افشانه‌ی قطرات باردار بر روی هدف‌های فلزی با استفاده از چیدمانی تجربی، بررسی توان جذب و نشست افشانه‌ی باردار را در ارتباط با مشخصات عملکردی نازل ممکن می‌سازد. برای دستیابی به

در برجستگی‌های هدف ظاهر می‌شود. این افزایش شدید القای الکتریکی در هدف می‌تواند عملاً به خنثی‌سازی بار الکتریکی قطرات باردار بینجامد؛ بنابراین وجود نواحی تیز در هدف را باید به‌عنوان عاملی منفی در جذب و نشست قطرات باردار مورد توجه قرار داد.

تصاویر افشانه‌ی باردار در مجاورت هدف‌های فلزی مختلف برهم‌کنش الکترو هیدرودینامیکی را میان قطرات باردار و هدف به نمایش می‌گذارند در حالی که این تعامل دینامیکی درخصوص افشانه‌ی خنثی و هدف مشاهده نمی‌شود. این موضوع مؤید پیدایش میدان جاذبه‌ی الکتریکی میان افشانه‌ی باردار و هدف فلزی است که به شکل‌گیری الگویی از جذب و نشست قطرات باردار بر روی هدف می‌انجامد. پدیده‌ی خروج قطرات باردار از افشانه‌ی پلوم و حرکت به سوی هدف همچنین حاکی از توانایی میدان الکتریکی در غلبه بر نیروی رانش آئرو دینامیکی افشانه است که تأکیدی بر مزیت بهره‌گیری از باردارسازی افشانه در بهبود نشست به حساب می‌آید.

فهرست علائم

- a : طول (m)
 D : قطر (m)
 I_G : جریان الکتریکی مخزن مایع (A)
 I_T : جریان الکتریکی القاشده در هدف (A)
 l : طول (m)
 P_1 : فشار رگلاتور (تنظیم‌کننده‌ی) هوا (bar)
 P_2 : فشار هوا در دما و فشارسنج ترکیبی (bar)
 P_3 : فشار هوا در ورود به نازل (bar)
 Q_a : دبی حجمی هوای فشرده ($Lmin^{-1}$)
 Q_i : دبی حجمی افشانه‌ی مایع ($Lmin^{-1}$)
 Q_T : دبی حجمی قطرات نشست‌یافته ($Lmin^{-1}$)
 T_1 : دما در دبی‌سنج هوا ($^{\circ}C$)
 T_2 : دما در دما و فشارسنج ترکیبی ($^{\circ}C$)
 V_o : ولتاژ خروجی منبع تغذیه (V)
 V_C : ولتاژ تحریک منبع تغذیه (V)
 X : فاصله‌ی افقی هدف تا نازل (m)
 Y : فاصله‌ی عمودی هدف تا نازل (m)

شاخصی مناسب به‌منظور بررسی جذب و نشست افشانه‌ی باردار می‌توان از رویکردی نظری مبتنی بر اصول اولیه‌ی القای الکترواستاتیکی در اجسام رسانا بهره جست. این رویکرد در مرحله‌ی نخست نشان می‌دهد که جریان (نرخ بار) الکتریکی القاشده در هدف به همراه جریان الکتریکی افشانه (به‌عنوان معیاری از بارده باردارسازی نازل) کمیت‌های اثرگذار بر جذب و نشست افشانه‌اند. این رویکرد در مرحله‌ی دوم حاکی از آن است که نشست نسبی افشانه در تناسبی مستقیم به‌صورت تابعی از نسبت جریان القایی هدف به جریان الکتریکی اسپری رفتار می‌کند.

نتایج حاصله نشان می‌دهند که فاصله‌ی میان هدف و افشانه‌ی باردار تأثیری بر عملکرد هیدرولیکی نازل ندارد به‌طوری که دبی هوای فشرده به‌ازای فواصل مختلف صرفاً تابعی از فشار هوا بوده و تحت شرایط هم‌دمایی به نازل تغذیه می‌شود. کاهش فاصله‌ی میان هدف و افشانه‌ی باردار تا حدودی به تقویت باردارسازی القایی افشانه در داخل نازل کمک می‌کند که خود ناشی از شکل‌گیری میدان جاذبه‌ی الکتریکی میان هدف و قطرات باردار است. تقویت این میدان در عمل با ایجاد مسیری رسانا میان جریان الکتریکی افشانه و هدف موجب تسهیل انتقال بار الکتریکی قطرات به زمین می‌شود که تأثیر آن در بالادست جریان افشانه (در نازل) به ازدیاد نرخ انتقال بار الکتریکی به قطرات منجر می‌شود. با این حال، کاهش فاصله میان هدف و افشانه‌ی باردار نقش اصلی خود را در تقویت میدان الکتریکی ایجادشده در مجاورت هدف و مثلاً در افزایش نرخ القای بار الکتریکی در هدف به میزان ۲/۲ تا ۲/۶ برابر به نمایش می‌گذارد.

استفاده از هدف‌های فلزی مختلف در این مطالعه تأثیر به‌سزایی بر عملکرد هیدرولیکی نازل نشان نمی‌دهند به‌طوری که شرایط هم‌دمایی و روند تغییرات خطی دبی هوای فشرده برحسب فشار همواره برقرار است. نقش هدف‌های فلزی مختلف بر عملکرد باردارسازی الکتریکی نازل نشان می‌دهد که هدف‌هایی با برجستگی‌های تیز (نظیر لبه و رأس) به سطوح بالاتری از جریان الکتریکی افشانه تا حد ۲/۹ برابر هدف‌های کروی منجر می‌شوند. این برجستگی‌ها از طریق تمرکز میدان الکتریکی و تجمع بیشتر بار الکتریکی زمینه‌ی تبادل سریع‌تر بار الکتریکی را از افشانه به هدف فراهم می‌سازند که تأثیر آن در بالادست جریان به‌صورت افزایش جریان الکتریکی افشانه طی سازوکار باردارسازی بروز می‌یابد.

نقش بارز برجستگی‌های تیز در هدف را می‌توان در ازدیاد فوق‌العاده زیاد جریان القایی در هدف، به‌ویژه در مقادیر بالای فشار هوای فشرده مشاهده کرد. در این حالت، جریان هوای فشرده با ازدیاد اغتشاش در هوای محیطی موجب تسریع در جابه‌جایی یون‌های آزاد می‌شود که نتیجه‌ی آن در تشدید زیاد القای بار الکتریکی

پانویس

10. wide angle
11. tele

منابع

1. Ozmen, L. and Langrish, T.A.G. "An experimental investigation of the wall deposition of milk powder in a pilot-scale spray dryer", *Drying Technology*, pp. 1235-1272 (2003).

1. liquid spray droplets
2. substrate coating
3. non-impact printing
4. spray drying
5. pollution abatement
6. permanent coating
7. rayleigh instability limit
8. micropropulsion
9. emittance spectrum

2. Kawakita, M. "Integrated MEMS which produces new functions LSIs, projection aligner and resist spray coating machine for MEMS", *Electronic Parts and Materials*, **43**(11), pp. 53-56 (2004).
3. Tinoco, J.; Widell, B. and Fredriksson, H. "Metal spray deposition of cylindrical performs", *Materials Science and Engineering: A*, **413-414**, pp. 56-65 (2005).
4. Dasari, H. and Bhagvati, C. "Identification of printing process using HSV colour space", *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 692-701 (2006).
5. Gil, E. and Badiola, J. "Design and verification of a portable patternator for vineyard sprayer calibration", *Applied Engineering in Agriculture*, **23**(1), pp. 35-42 (2007).
6. Herman, H. and Sampath, S., *Thermal Spray Coatings*, in: Metallurgical and Ceramic Protective Coatings, Eds: K.H. Stern, Chapman & Hall, p. 261 (1996).
7. Frijlik, H.W. and de Boer, A.H. "Trends in the technology-driven development of new inhalation devices", *Drug Discovery Today: Technologies*, **2**(1), pp. 27-57 (2005).
8. Grant, P.S. "Spray forming", *Progress in Materials Science*, **39**(4-5), pp. 497-545 (1995).
9. Bucheli, T.D.; Muller, S.T.; Heberle, S. and Schwarzenbach, R.P. "Occurrence and behavior of pesticides in rainwater, roof runoff, and artificial stormwater infiltration", *Environmental Science and Technology*, **32**(22), pp. 3457-3464 (1998).
10. Nicholls, J.R.; Wellman, R.G. and Deakin, M.J. "Erosion of thermal barrier coatings", *Materials at High Temperatures*, **20**(2), pp. 207-218 (2003).
11. Rau, J.L. "The inhalation of drugs: Advantages and problems", *Respiratory Care*, **50**(3), pp. 367-382 (2005).
12. Bailey, A.G., *Electrostatic Spraying of Liquids*, Research Studies Press Ltd., Somerset, England, p. 135 (1988).
13. Miao, P.; Balachandran, W. and Xiao, P. "Formation of ceramic thin films using electrospray in cone-jet mode", *IEEE Trans., Industry Applications*, **38**(1), pp. 50-56 (2002).
14. Xiong, J.; Zhou, Z.; Sun, D. and Ye, X. "Development of a MEMS based colloid thruster with sandwich structure", *Sensors and Actuators A*, **117**, pp. 168-172 (2005).
15. Anderson, E.K.; Carlucci, A.P.; De Risi, A. and Kyritsis, D.C. "Experimental investigation of the possibility of automotive gasoline spray manipulation through electrostatic fields", *Intl. Journal of Vehicle Design*, **45**(1-2), pp. 61-79 (2007).
16. Nhumaio, G.C.S. and Watkins, A.P. "Simulation of electrosprays in model direct-injection sprak-ignition engine in-cylinder flows", *Intl. Journal of Engine Research*, **6**(6), pp. 527-546 (2005).
17. Laryea, G.N. and No, S.Y. "Development of electrostatic pressure-swirl nozzle for agricultural applications", *Journal of Electrostatics*, **57**(2), pp. 129-142 (2003).
18. Moore, W. "Electric charge of arsenical particles", *Journal of Economic Entomology*, **18**, pp. 282-286 (1925).
19. Wampler, E.L. and Hoskins, W.M. "Factors concerned in deposit of sprays: The role of electrical charges produced during spraying", *Journal of Economic Entomology*, **32**, pp. 61-69 (1939).
20. Bowen, H.D.; Hebblethwaite, P. and Carelton, W.M. "Application of electrostatic charging to the deposition of insecticides and fungicides on plant surfaces", *Agricultural Engineering*, **33**, pp. 347-350 (1952).
21. Felici, N.J. "Contemporary electrostatics: Physical background and applications", *Contemporary Physics*, **5**(5), pp. 377-390 (1964).
22. Inculet, I.I. "Electrostatic deposition of particles: A review", *Particulate Science and Technology*, **16**, pp. 7-24 (1998).
23. Elmoursi, A.A. "Laplacian fields of bell-type electrostatic painting systems", *IEEE Trans., Industry Applications*, **25**(2), pp. 234-240 (1989).
24. Conner, D.C.; Greenfield, A.; Atkar, P.N.; Rizzi, A.A. and Choset, H. "Paint deposition modeling for trajectory planning on automotive surfaces", *IEEE Trans., Automation Science and Engineering*, **2**(4), pp. 381-392 (2005).
25. Palladini, L.A.; Raetano, C.G.; Velini, E.D. "Choice of tracers for the evaluation of spray deposits", *Scientia Agricola*, **62**(5), pp. 440-445 (2005).
۲۶. جهان نما، محمدرضا و شاخص، سعید، «رویگردی نک فازی در طراحی، آزمایش و مقایسه‌ی عملکرد یک نازل دوسیاله القایی»، مجله علمی پژوهشی شریف، ۳-۲۶، (۱) ص. ۹۱-۷۸، (۱۳۸۹).
۲۷. جهان نما، محمدرضا «تأثیر مشخصه های عملکردی یک نازل دوسیاله بر باردارسازی الکتریکی اسپری»، مجله علمی پژوهشی شریف، (۴۴)، ص. ۸۳-۹۲ (۱۳۸۷).
28. Taylor, D.M. and Secker, P.E., *Industrial Electrostatics: Fundamentals and Measurements*, Research Studies Press Ltd., Somerset, England, p. 29 (1994).
29. Kline, M., *Calculus: An Intuitive and Physical Approach*, Dover Publications, New York, p. 461 (1998).
30. Rousseau, J.S. and Fricker, H.S. "Charge concentration on points", *Physics Education*, **25**, pp. 7-9 (1990).
31. Biris, A.S.; Mazumder, M.K.; Sims, R.A.; Yurteri, C.U.; Farmer, S.; Snodgrass, J. and Sterling, R. "The effect of ring electrodes attachment to a corona gun on control of free ion concentration and back corona for improving powder paint appearance", *Industry Applications, IEEE Trans.*, **39**(6), pp. 1614-1621 (2003).