

# تأثیر مشخصه‌های عملکردی یک نازل دوسیاله بر باردارسازی الکتریکی اسپری

محمد رضا جهان‌نما (استادیار)

حوزه معاونت پژوهشی، پژوهشکده مهندسی، وزارت جهاد کشاورزی

در این نوشتار رفتار الکتروهایدرودینامیکی یک نازل دوسیاله‌ی القایی مورد بررسی قرار گرفته است. برای راه‌اندازی و آزمایش نازل از چیدمانی تجربی استفاده شده است که از قابلیت تأمین همزمان و پایای جریان هوای فشرده، جریان مایع و ولتاژ الکتریکی برخوردار است. «فشار» مشخصه‌ی است که در تغییر دبی در جریان هوای فشرده، و نیز در جریان مایع، نقشی محوری دارد، در حالی که ولتاژ باردارسازی تأثیر به‌سزایی بر آن کمیت‌ها ندارد. فشار هوا همچنین نقشی دوسویه در باردارسازی اسپری مایع ایفا می‌کند، از یک سو با تقویت لایه‌ی دی‌الکتریک هوا بر روی الکتروده باردارساز موجب تقویت القای بار الکتریکی بر قطرات مایع شده و از سوی دیگر با یونیزاسیون سبب تضعیف سازوکار القایی می‌شود. برآیند این دو تأثیر، فشار بهینه‌ی از هوای فشرده را برای باردارسازی به دست می‌دهد که مقدار آن با افزایش ولتاژ به مقادیر بزرگ‌تری سوق می‌یابد. تأثیر دبی مایع در وقوع پدیده‌ی خیس‌شدگی الکتروده القایی و کاهش باردارسازی اسپری بروز می‌یابد. افزایش فشار هوا با ایجاد تأخیر در وقوع این پدیده، امکان استفاده از مقادیر بزرگ‌تری از دبی بهینه‌ی مایع را میسر می‌سازد.

mjahannama@eri.ac.ir

واژگان کلیدی: نازل دوسیاله، باردارسازی القایی، اسپری مایع، قطرات باردار.

## مقدمه

در مقایسه با اسپری خنثی، با افزایش حجم ابر اسپری (ناشی از انبساط) و ممانعت از تولید قطرات بزرگ‌تر (به دلیل عدم ترکیب قطرات) به افزایش سطح تماس میان مایع و محیط (هوا یا جسم) منتهی می‌شود. افزایش نرخ تبخیر در خنک‌کاری صنعتی و بهبود اختلاط هوا و قطرات سوخت در فرایند احتراق نمونه‌هایی از برتری کاربردی اسپری و نتیجه‌ی ازدیاد سطح تماس به‌شمار می‌آیند.<sup>[۱]</sup>

مروری بر منابع علمی نشان می‌دهد که به‌رغم شکل‌گیری علم الکتروهایدرودینامیک در اواخر قرن نوزدهم میلادی، آغاز پژوهش‌های نظام‌مند بر روی پاشنده‌های الکترواستاتیک<sup>۲</sup> به اوایل دهه‌ی پنجاه میلادی بازمی‌گردد. تلاش‌های اولیه در این عرصه، سامانه‌هایی از پاشنده‌های الکترواستاتیکی را به نمایش می‌گذارند که کاهش هوا بردگی<sup>۳</sup> و تقویت چسبندگی<sup>۴</sup> قطرات باردار را به همراه دارند.<sup>[۸]</sup> با این حال این سامانه‌ها در ابتدا از حجم و وزن بالایی برخوردار بودند به طوری که استفاده‌ی عملی از آنها در کاربردهای مختلف (اعم از صنعتی و کشاورزی) با محدودیت مواجه بود. این مشکلات از یک سو متأثر از پیچیدگی‌های فنی و ناشناختگی فرایندهای حاکم، و از سوی دیگر به دلیل نارسایی و سطوح پایین‌تر فناوری در آن دوره است.<sup>[۹]</sup> این فعالیت‌ها تا اواسط دهه‌ی شصت میلادی مبنی بر استفاده از روش میدان یونیزه (یا کرونا)<sup>۵</sup> برای باردارسازی قطرات بود. این روش به دلیل بهره‌گیری از تمرکز بالای میدان الکتریکی در نقاطی با شعاع اندک (یا انحنا زیاد) مستلزم اعمال ولتاژ بالا (در حدود بیش از ۲۰ kV) است. در این زمان می‌توان شاهد طرح استفاده از روش القای الکتریکی<sup>۶</sup> به‌منظور باردارسازی قطرات اسپری با هدف کاهش سطح ولتاژ

اسپری قطرات مایع در شرایط عادی از نظر الکتریکی خنثی است و تحت تأثیر نیروهای مکانیکی (مانند اینرسی و ثقل) در محیط پخش می‌شوند. اعمال ولتاژ الکتریکی بر جریان مایع ممکن است به انتقال بار الکتریکی و تولید قطرات باردار در اسپری منجر شود.<sup>[۱]</sup> در این حالت، اسپری قطرات باردار علاوه بر نیروهای مکانیکی تحت تأثیر نیروی الکتریکی نیز قرار می‌گیرند. از پیدایش نیروی الکتریکی می‌توان در راستای گسست<sup>۱</sup> بیشتر قطرات و هدایت مسیر حرکت اسپری بهره جست. این امتیاز، زمینه‌ی پیدایش و معرفی نازل‌های الکترواستاتیکی را برای تولید اسپری قطرات باردار به وجود آورده است.<sup>[۲]</sup>

گرایش به استفاده از اسپری باردار را می‌توان در دو ویژگی اساسی جست‌وجو کرد. ویژگی نخست به ایجاد میدان جاذبه‌ی الکتریکی میان قطرات باردار و اجسام متصل به زمین (دارای پتانسیل الکتریکی صفر) مربوط می‌شود. این میدان الکتریکی با اعمال نیروی جاذبه‌ی الکتریکی بر قطرات باعث بهبود رانش اسپری به سوی اجسام در فرایندهای پوشش‌دهی سطوح شده و از اتلاف مواد در محیط جلوگیری می‌کند.<sup>[۳]</sup> این موضوع به‌ویژه در پوشش‌دهی اجسامی با هندسه‌ی پیچیده، امکان نفوذ قطرات باردار را به قسمت‌های خارج از مسیر حرکت اسپری فراهم ساخته و به پوشش پیرامونی جسم<sup>۲</sup> می‌انجامد.

دومین دلیل گرایش به استفاده از اسپری باردار، ایجاد نیروی الکتریکی دافعه میان قطرات همنام موجود در اسپری است. این نیرو از یک سو موجب انبساط اسپری، و از سوی دیگر مانع از ترکیب و درهم‌تنیدگی<sup>۳</sup> قطرات می‌شود.<sup>[۵]</sup> این ویژگی،

که از دو قسمت: نازل و تجهیزات پایش و کنترل تشکیل شده است. بخش دوم نیز به راه‌اندازی چیدمان آزمایش به‌عنوان مقدمه‌ای بر اجرای آزمایش‌های اصلی مربوط می‌شود.

## چیدمان آزمایش

شکل ۱ تصویر و طرح‌واره‌ی از نازل دوسپاله‌ی القایی را نشان می‌دهد. نازل مورد استفاده براساس تقسیم‌بندی رایج در حوزه‌ی اسپری و اتمیزاسیون، از نوع دوسپاله‌ی «اختلاط درونی»<sup>۱۵</sup> است. این نازل همچنین به یک الکتروود حلقوی برای تولید اسپری باردار مجهز شده است. مطابق شکل ۱ ب، نازل از دو خط جریان هوای فشرده و جریان مایع تشکیل شده است. تغذیه‌ی هوای فشرده به نازل موجب مکش مایع در داخل آن می‌شود و تلاقی این دو جریان را در ناحیه‌ی اختلاط و اتمیزاسیون به‌همراه دارد. در این ناحیه، جریان پیوسته‌ی مایع در اثر انرژی جنبشی جریان هوای فشرده تمیزه شده و جریانی دوفازی (اسپری قطرات) را به وجود می‌آورد. جریان هوای فشرده علاوه بر اتمیزاسیون جریان مایع، امکان هدایت و رانش اسپری قطرات را به خارج از نازل فراهم می‌سازد. پس از ناحیه‌ی اختلاط و اتمیزاسیون همچنین یک الکتروود حلقوی در نازل تعبیه شده است. اتصال این الکتروود به یک منبع تغذیه‌ی الکتریکی موجب شکل‌گیری میدان الکتریکی در داخل نازل می‌شود. از این رو جریان دو فازی همچنین تحت تأثیر میدان الکتریکی ناشی از این الکتروود حلقوی، تعبیه‌شده در فضای خروجی نازل، قرار می‌گیرد. بدین ترتیب همزمان با اتمیزاسیون جریان مایع، باردارسازی قطرات مایع نیز متأثر از میدان الکتریکی الکتروود صورت گرفته که سرانجام به تولید و پاشش قطرات باردار در خروج نازل منتهی می‌شود. راه‌اندازی نازل و آزمایش عملکرد باردارسازی آن مستلزم طرح و برپایی تجهیزات لازم است. این تجهیزات علاوه بر تأمین هوای فشرده، تغذیه‌ی جریان مایع و اعمال ولتاژ الکتریکی بر الکتروود القایی، باید امکان کنترل و پایش جریان‌های مزبور را نیز فراهم سازند. شکل ۲ الف تصویری از چیدمان تجربی آزمایش را نشان می‌دهد.

بود.<sup>۱۰</sup> به‌رغم مزیت روش القایی در کاهش ولتاژ، بنا بر ماهیت این روش که بر القای بار الکتریکی با قطبیتی<sup>۹</sup> مخالف با ولتاژ باردارسازی بنا نهاده شده است، امکان جذب بخشی از قطرات باردار در حین القا به سطح (یا الکتروود) باردارسازی اجتناب‌ناپذیر است. این مسئله در ابتدا خود به چالشی اساسی برای محققان تبدیل شد که ارائه‌ی راهکارهای مختلف از قبیل استفاده از لایه‌ی مادری از دی‌الکتریک در فضای میان الکتروود باردارساز و قطرات اسپری دستاورد آن است.<sup>۱۱</sup> استفاده از روش تماسی (یا مستقیم)<sup>۱۰</sup> برای باردارسازی مایعات نارسانا<sup>۱۱</sup> و تولید اسپری باردار شاخه‌ی دیگری از پژوهش‌ها را به خود اختصاص می‌دهد. این روش علاوه بر تولید قطرات باردار، با هدف اتمیزاسیون جریان مایع در خروج از پاشنده مورد توجه قرار گرفت. این هدف بر ناپایداری هیدرودینامیکی جریان مایع در خروج از پاشنده در اثر باردارسازی الکتریکی آن جریان تأکید می‌ورزد. هرچند این روش در باردارسازی و اتمیزاسیون مایع موفق به نظر می‌رسید، برای رانش قطرات در محیط به‌دلیل عدم اتکا بر نیروهای مکانیکی با نتایج مطلوب مواجه نشد.<sup>۱۲</sup> اما در تلاش‌های بعدی، به‌منظور تجاری‌سازی این سامانه به نارسایی مزبور توجه شد که طی آن استفاده از یک منبع انرژی ثانویه (مانند جریان هوای کمکی) برای رانش قطرات اسپری همراه با باردارسازی الکترواستاتیکی مورد تأکید قرار گرفت.<sup>۱۳</sup> روش تماسی همچنین برای باردارسازی مایعات رسانا<sup>۱۲</sup> مورد استفاده قرار گرفته است. هر چند در این حالت، به‌دلیل تماس مستقیم میان مایع و الکتروود باردارساز و بنا بر رسانایی الکتریکی مایع، از سوی الکتروود باردارساز ولتاژ بالا به مخزن مایع منتقل شده و استفاده‌ی عملی از این روش را با مشکل مواجه می‌سازد.<sup>۱۴</sup>

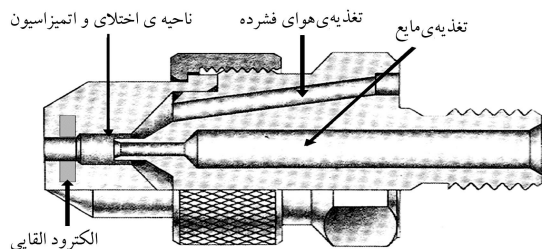
در نوشتار حاضر روش و نتایج حاصل از یک فعالیت پژوهشی درخصوص یک نازل الکترواستاتیک، برپایه‌ی استفاده از یک نازل دوسپاله‌ی القایی ساخت شرکت آمریکایی ESS<sup>۱۳</sup> تشریح شده است. این نازل از نوع دوسپاله (پنوماتیک<sup>۱۴</sup>) بوده و مایعات رسانا را به روش القایی باردار می‌کند. شرکت سازنده این نازل را برای کاربردهای اسپری در کشاورزی شامل مراحل داشت (نظیر سم‌پاشی) و پس از برداشت (مانند شست‌وشوی محصول)، و نیز برای کاربردهای خاص (مانند پوشش‌دهی سطوح پلاستیکی و فلزی) پیشنهاد داده است.<sup>۱۵</sup> این نازل بیشتر از نقطه‌نظر کشاورزی و کاربردهای مرتبط بر آن (مانند نشست اسپری بر اهداف گیاهی و اثر بخشی زیست‌شناختی سموم باردار) مورد مطالعه قرار گرفته است.<sup>۱۶-۱۸</sup> لذا در مطالعات صورت‌گرفته درخصوص ابعاد عملکرد الکتروهیدرودینامیکی نازل (مانند تأثیر پارامترهای جریان‌های سیال بر باردارسازی و شرایط عملکرد بهینه) خلأهایی را شاهد هستیم. از این رو، در مطالعه‌ی حاضر، از این نازل برای تولید اسپری قطرات باردار و بررسی نقش پارامترهای مختلف مانند ولتاژ باردارسازی، فشار هوا و دبی مایع بر رفتار باردارسازی نازل استفاده شده است. این بررسی مبتنی بر روشی تجربی است که طی آن از المان‌های مختلف برای برپایی چیدمان آزمایش استفاده می‌شود. این المان‌ها امکان کنترل و پایش پارامترهای مختلف را در ۳ بخش، شامل جریان هوای فشرده، جریان مایع و خط جریان الکتریکی فراهم می‌سازند. فعالیت صورت‌گرفته علاوه بر معرفی یک روش نظام‌مند تجربی در مطالعه‌ی اسپری‌های باردار، رفتار پارامتریک نازل را مورد تحلیل قرار داده و شرایط عملکرد بهینه‌ی آن را تعیین می‌کند.

## روش بررسی

روش بررسی در این پژوهش مبتنی بر رویکردی تجربی است که در دو بخش تبیین می‌شود. بخش اول به چیدمان لازم برای اجرای آزمایش‌های تجربی مربوط می‌شود



الف) تصویر واقعی،



ب) طرح واره.

شکل ۱. نمایشی از نازل دوسپاله‌ی القایی.

دبی‌سنج به رایانه صورت گرفته است. در همین راستا، برنامه‌ی در نرم‌افزار Delphi نوشته شده است که متناسب با ارسال فرمان لازم (برای اندازه‌گیری دبی و دما) به ریزکنترل‌کننده، قادر به دریافت داده‌های اندازه‌گیری (دبی و دما) و ترسیم گرافیکی و نمایش هم‌زمان آنها بر روی نمایش‌گر رایانه است. مشاهده‌ی تغییرات زمانی دبی و دما امکان پایش لحظه‌ی جریان هوای فشرده را هم‌زمان با اجرای آزمایش فراهم می‌سازد، که از نظر کنترل و تنظیم پارامترهای جریان برای پژوهش‌گر بسیار حائز اهمیت است.

خط هوای فشرده در سه موقعیت فشارسنجی می‌شود (شکل ۲ ب): روی تنظیم‌کننده‌ی هوا، پس از دبی‌سنجی، و قبل از ورود هوای فشرده به نازل. فشارسنجی در تنظیم‌کننده برای تنظیم و تثبیت فشار هوای فشرده امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. در مقابل، فشارسنجی در دو موقعیت دیگر با هدف پایش فشار و حصول اطمینان از عدم نشتی (مستتر در عدم افت فشار زیاد) در مسیر جریان صورت می‌گیرد. دمای جریان هوای فشرده علاوه بر دبی‌سنج، در دما و فشارسنج ترکیبی نیز اندازه‌گیری می‌شود تا از پایداری دما نیز اطمینان حاصل شود.

برای پیاده‌سازی خط هوای فشرده، المان‌های یادشده بر روی یک تابلوی عمودی جانمایی و تثبیت شده‌اند (شکل ۲ الف). این المان‌ها با استفاده از اتصالات پیچ و مهره از نوع انطباق فشاری<sup>۱۶</sup> (ساخت شرکت CDC Pneumatics از کره جنوبی) و از طریق لوله‌ی ترموپلاستیکی (تحت نام تجاری Polyflex ساخت شرکت ایتالیایی Parker، با فشار بیشینه‌ی ۱۰ bar) به یکدیگر متصل شده‌اند. در اتصالات پیچی همچنین از چسب آب‌بندی (نوع HP-۴۲ تحت نام تجاری Thretalic انگلستان، با دمای کاری  $120^{\circ}C$  تا  $-6^{\circ}C$ ) برای هوابندی جریان هوای فشرده استفاده شده است. در راه‌اندازی خط هوای فشرده نیز، به منظور جلوگیری از صدمه‌های احتمالی دبی‌سنج، فشار بیشینه‌ی عملکرد کمپرسور با استفاده از یک سویچ فشار (مدل MDR ۲-EA/۱۱ ساخت شرکت آلمانی Condor، با فشار بیشینه‌ی ۱۱ bar) بر روی ۶ bar تثبیت شده است.

۲. خط جریان مایع: این خط، مطابق شکل ۲ ب، از پنج المان تشکیل شده است. اولین قسمت مخزن ذخیره‌ی مایع شامل یک ظرف پلاستیکی مدرج به ظرفیت ۱ لیتر است. پس از آن یک صافی (با توری از جنس فولاد ضدزنگ) به منظور جلوگیری از عبور احتمالی ذرات جامد قرار دارد. سپس یک شیر قطع و وصل سلنوتیدی (مدل VE۱۳۱-VE۱۶۱ ساخت شرکت ایتالیایی Parker، با فشار بیشینه‌ی ۹ bar) که با برق شهر کار می‌کند برای قطع آنی جریان مایع تعبیه شده است. این شیر همچنین دارای یک صافی داخلی (توری از جنس فولاد ضدزنگ با تخلخل  $1mm/0^{\circ}$ ) است که از عبور ذرات جامد جلوگیری می‌کند. پس از آن، از یک شیر کنترلی سوزنی (مدل DV۸-۱x/V ساخت شرکت آلمانی FLUTEK، با فشار بیشینه‌ی ۳۵۰ bar) استفاده شده است. این شیر تنظیم دستی دبی مایع را ممکن می‌سازد. جریان مایع پس از شیر کنترلی از یک دبی‌سنج از نوع ونتوری - مغناطیسی (مدل KMI-۱۲۰۵H ساخت شرکت آلمانی KOBOLD، با فشار بیشینه‌ی ۴۰ bar) عبور می‌کند. این دبی‌سنج از نوع آنالوگ (نمایش‌گر عقربه‌ی) است و از توانایی اندازه‌گیری دبی در محدوده‌ی  $10^{-1} Lh^{-1}$  تا  $167 m Lmin^{-1}$  (معادل  $167 m Lmin^{-1}$  تا  $0$ ) برخوردار است.<sup>[۲۲]</sup>

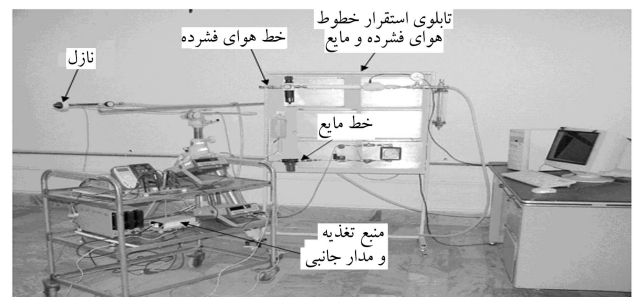
خط جریان مایع همانند خط هوای فشرده بر روی تابلوی عمودی (شکل ۲ الف) پیاده‌سازی شده است. اتصالات و آب‌بندی در خط جریان مایع نیز همانند خط هوای فشرده انجام شده است. در مسیر جریان مایع نکته‌ی دیگری، علاوه بر

این چیدمان براساس طرحی از المان‌های کنترل و تنظیم (شکل ۲ ب) صورت گرفته است. جزئیات کلی این طرح به شرح زیر خلاصه می‌شوند:

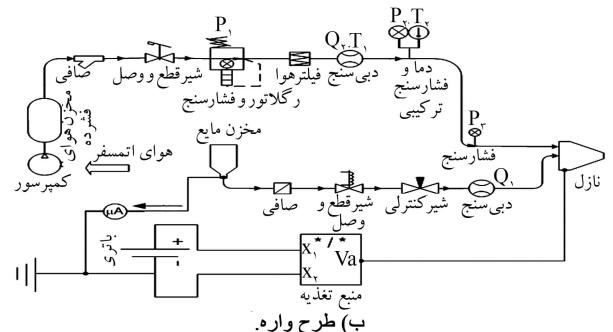
۱. خط هوای فشرده: فشرده‌سازی هوا با استفاده از یک دستگاه کمپرسور (مدل CN۲۵۰-CT، ساخت شرکت هواصنعت مفیدی، ایران) صورت می‌گیرد. توان اسمی این دستگاه ۱٫۵kW و ظرفیت فشرده‌سازی آن  $250 Lmin^{-1}$  در فشار بیشینه‌ی ۱۰ bar است. این دستگاه همچنین مجهز به مخزن ذخیره‌ی هوای فشرده به ظرفیت ۲۵۰ لیتر است.

مطابق شکل ۲ ب، هوای فشرده ابتدا از یک صافی (دارای توری برنجی) با هدف ممانعت از ورود ذرات جامد عبور می‌کند. سپس، یک شیر قطع و وصل (از نوع GS۱٫۲، مورد استفاده در گاز شهری) برای جدایش لحظه‌ی کمپرسور و مخزن هوای فشرده، از نازل و المان‌های تنظیم و پایش جریان هوا تعبیه شده است. سپس هوای فشرده به یک تنظیم‌کننده (رگلاتور)، سری AIRTECH، ساخت شرکت ایتالیایی EXIM، با فشار بیشینه‌ی ۱۲ bar وارد می‌شود که با استفاده از آن می‌توان فشار هوا را به روش دستی تنظیم کرد. این تنظیم‌کننده همچنین یک رطوبت‌گیر متخلخل داخلی دارد که بر روی آن محلی برای نصب فشارسنج تعبیه شده است.

جریان هوای فشرده پس از تنظیم فشار در تنظیم‌کننده، از طریق یک پالاینده‌ی هوا به دبی‌سنج و نهایتاً به نازل وارد می‌شود. پالاینده‌ی هوا از نوع کاغذی با درجه‌ی بالای پالایش ذرات (نوع HEPA ساخت شرکت آمریکایی Pall، با تخلخل یک میکرون) مورد استفاده قرار گرفته است. دبی‌سنج هوا از نوع سیم داغ (مدل ۴۰۲۱۱، ساخت شرکت آمریکایی TSI، با فشار بیشینه‌ی کاری ۶٫۹ bar) و دیجیتالی بوده و از قابلیت اندازه‌گیری دبی و دما به ترتیب در بازه‌ی  $300 Lmin^{-1}$  تا  $50^{\circ}C$  تا  $50^{\circ}C$  برخوردار است. استفاده‌ی عملی از این دبی‌سنج منوط به ارسال و دریافت داده است. این موضوع با بهره‌گیری از راهتمای راه‌اندازی دبی‌سنج<sup>[۲۱]</sup> و از طریق اتصال ریزکنترل‌کننده‌ی (میکروکنترلر)



الف) تصویر واقعی،



ب) طرح وارء.

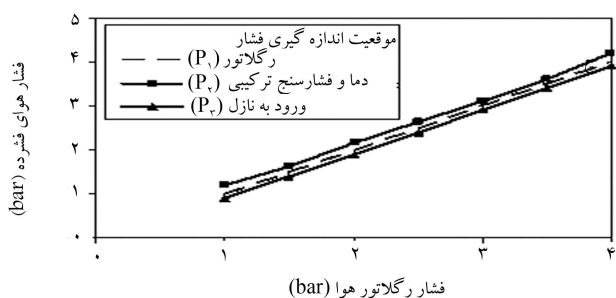
شکل ۲. نمایشی از چیدمان تجربی آزمایش.

متشکل از دو استوانه‌ی رسانای داخلی و خارجی است که از نظر الکتریکی از یکدیگر ایزوله شده‌اند. در دو انتهای این مجموعه از مواد عایق، لوله‌یی از ابرپلاستیکی و موم ریخته‌گری، برای انسداد فضای میان دو استوانه استفاده شده است. استوانه‌ی خارجی با اتصال به زمین همانند یک قفس فارادی عمل می‌کند تا از تأثیر میدان‌های الکتریکی موجود در محیط اطراف بر اسپری باردار جلوگیری کند. در عمل، اسپری باردار به درون استوانه‌ی داخلی پاشیده می‌شود و پس از برخورد با صفحات توری فلزی، جریان الکتریکی آن از طریق یک میکروآمپرسنج اندازه‌گیری و به زمین منتقل می‌شود.

## راه‌اندازی اولیه

پیش از انجام آزمایش‌های اصلی می‌بایستی از عملکرد پایدار و صحیح چیدمان آزمایش اطمینان حاصل شود. در این راستا، تغییرات فشار در خط هوای فشرده، داده‌های دبی‌سنج مایع و ولتاژ خروجی منبع تغذیه به‌عنوان شاخص ارزیابی در نظر گرفته شده‌اند. در راه‌اندازی اولیه و نیز در انجام آزمایش‌های اصلی از آب شیر<sup>۱۸</sup> به‌عنوان مایع اسپری استفاده شده است. نمونه‌هایی از این مایع در زمان‌های مختلف برداشت و مورد هدایت‌سنجی الکتریکی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان داد که میانگین مقاومت الکتریکی ویژه‌ی<sup>۱۹</sup> (معکوس هدایت الکتریکی) مایع اسپری معادل  $1.1 \times 10^2 \Omega m$  است. با توجه به این که مقاومت الکتریکی ویژه‌ی مایعات رسانا کم‌تر از  $1 \times 10^2 \Omega m$  است<sup>[۲۳]</sup>، مایع اسپری در گستره‌ی این نوع مایعات قرار گرفته و لذا با شرایط مطروحه توسط سازنده‌ی نازل مبنی بر استفاده از مایعات رسانا سازگاری دارد.

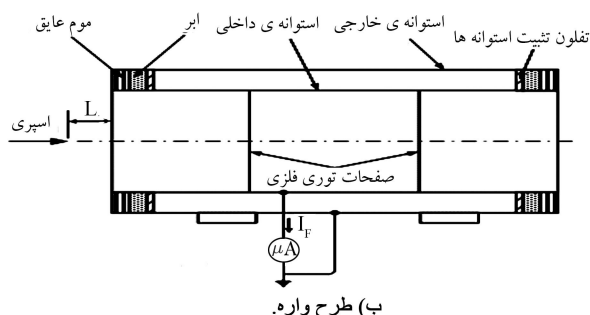
شکل ۴ تغییرات فشار هوای فشرده را در موقعیت‌های دما و فشارسنج ترکیبی نشان می‌دهد (شکل ۲ ب). مطابق این نمودار، فشارهای  $P_1$  و  $P_2$  از تغییرات خطی نسبت به  $P_1$  برخوردارند. در شکل ۴ مقادیر بالاتر فشار  $P_2$  نسبت به  $P_1$  ناشی از افزایش سطح مقطع جریان (انبساط) در ورود به دما و فشارسنج ترکیبی، و مقادیر پایین‌تر  $P_2$  ناشی از کاهش سطح مقطع جریان (انقباض) در فشارسنج ورودی به نازل است. با این حال تفاوت نسبی  $P_2$  با  $P_1$  به کم‌تر از ۱۰٪ بالغ می‌شود که این اختلاف در فشارهای  $P_1 > 2.5 \text{ bar}$  به پایین‌تر از ۵٪ کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که درصد پائینی از انرژی فشاری جریان هوای فشرده در فاصله‌ی میان تنظیم‌کننده و نازل، از یک سو صرف غلبه بر افت فشار مسیر و از سوی دیگر صرف تبدیل به انرژی جنبشی (مستتر در تغییر سطح مقطع جریان) می‌شود. از این رو می‌توان فشار  $P_1$  را شاخص مناسبی برای فشار هوای ورودی به نازل در نظر گرفت.



شکل ۴. تغییرات فشار هوا در خط هوای فشرده برحسب فشار تنظیم‌کننده.



الف) تصویر واقعی،



ب) طرح وارده.

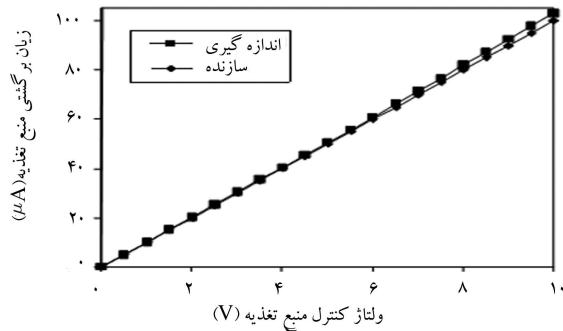
شکل ۳. نمایشی از استوانه‌ی اندازه‌گیری جریان الکتریکی اسپری.

المان‌های مذکور، مورد توجه قرار گرفته است و آن تعبیه‌ی یک اتصال رسانای فلزی (از جنس فولاد ضد زنگ) در خروج از مخزن مایع است که از آن طریق خط جریان مایع به زمین (پتانسیل صفر) متصل می‌شود. ایجاد این اتصال بسیار کلیدی است به طوری که باردارسازی قطرات مایع بدون آن ممکن نیست؛ زیرا بسته شدن مدار الکتریکی لازم برای باردارسازی مایع، مستلزم اتصال جریان مایع به زمین است (شکل ۲ ب). مخزن مایع همچنین بر روی یک شیر عمودی (شکل ۲ الف) استقرار یافته است تا از این طریق تغییر موقعیت عمودی مخزن نسبت به خروجی نازل ممکن شود. تغییر این موقعیت امکان تغییر در نوع تغذیه‌ی مایع به نازل (مکششی یا ثقلی) را فراهم می‌سازد.

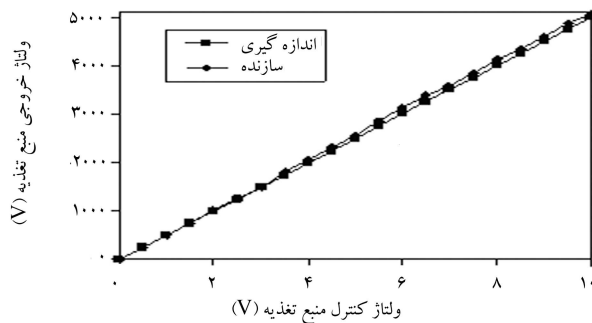
۳. خط جریان الکتریکی: این خط دارای دو المان اصلی شامل باتری و منبع تغذیه است (شکل ۲ ب). باتری به‌عنوان راه‌انداز منبع تغذیه باید ولتاژ ۲۴ VDC را تأمین کند. بدین منظور از یک منبع تغذیه‌ی ولتاژ مستقیم (مدل ۳۳۰۳ ساخت شرکت صنایع الکترونیک ایران) قابل اتصال به برق شهر و قادر به تأمین ولتاژ متغیر VDC ۴۰ تا ° به‌عنوان باتری استفاده شده است.

منبع تغذیه‌ی اصلی (مدل HP00RIS025 ساخت شرکت انگلیسی Applied Kilovolts با دمای مجاز محیط در محدوده‌ی  $50^{\circ}C$  تا ° و رطوبت مجاز  $80\%$  در  $31^{\circ}C$ ) از قابلیت تولید ولتاژ خروجی در بازه‌ی ۵۰۰۰ VDC تا ۱۰ و جریان بیشینه‌ی خروجی  $2mA$  برخوردار است. برای استفاده‌ی عملی از این منبع تغذیه، یک مدار راه‌انداز جانبی براساس دستورالعمل سازنده طراحی و ساخته شده است.<sup>[۲۱]</sup> این مدار تنظیم ولتاژ کنترل (به‌منظور تغییر ولتاژ خروجی منبع)، پایش جریان برگشتی منبع<sup>۱۷</sup> و تغییر قطبیت ولتاژ خروجی را ممکن می‌سازد. خط جریان الکتریکی، جدا از خطوط مایع و هوای فشرده، بر روی یک میز مستقل (شکل ۲ الف) مستقر شده است.

مطالعه‌ی باردارسازی الکتریکی نازل در پژوهش حاضر، مستلزم اندازه‌گیری بار الکتریکی انتقال یافته به اسپری قطرات است. بدین منظور مجموعه‌ی مطابق شکل ۳ الف و براساس طرح‌واره‌ی شکل ۳ ب ساخته شده است. این مجموعه



شکل ۷. تغییرات جریان برگشتی منبع تغذیه برحسب ولتاژ کنترل.



شکل ۸. تغییرات ولتاژ خروجی منبع تغذیه برحسب ولتاژ کنترل.

بالا (مدل ۹۰۱۶، ساخت شرکت ژاپنی HIOKI، تحت ولتاژ بیشینه‌ی مجاز ۳۰kVDC) با ضریب کاهش ۱:۸۰۰ اندازه‌گیری شده است. شکل ۸ تغییرات ولتاژ خروجی منبع تغذیه را برحسب ولتاژ کنترلی نشان می‌دهد. مطابق این شکل، ولتاژ خروجی از رابطه‌ی خطی برحسب ولتاژ کنترل برخوردار است. این شکل همچنین بیان‌گر مطابقت خوب مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی ولتاژ خروجی با مشخصات سازنده است. از این رو می‌توان طی آزمایش‌های اصلی برای اعمال ولتاژ باردارسازی بر الکتروود القایی از منبع تغذیه با اعتمادپذیری بالایی بهره جست.

برای ورود به بحث بعدی این نوشتار (نتایج و بحث)، با توجه به چیدمان آزمایش (شکل‌های ۲ و ۳) باید دو مجموعه کمیت را از یکدیگر متمایز کرد. مجموعه‌ی نخست کمیت‌هایی را در بر می‌گیرد که امکان کنترل و تنظیم مستقیم آنها وجود دارد. مطابق شکل‌های ۲ و ۳ این کمیت‌ها عبارت‌اند از: فشار هوا در تنظیم‌کننده ( $P_1$ )، ولتاژ خروجی منبع تغذیه ( $V_0$ )، دبی جریان مایع ( $Q_i$ ) و فاصله‌ی خروجی نازل از استوانه‌ی اندازه‌گیری جریان الکتریکی اسپری (L). مجموعه‌ی دوم کمیت‌هایی هستند که تغییر آنها حاصل تنظیم کمیت‌های مجموعه‌ی اول است که با توجه به شکل‌های ۲ و ۳، دبی هوای فشرده ( $Q_a$ )، جریان الکتریکی انتقالی از مخزن مایع به زمین ( $I_G$ ) و جریان الکتریکی انتقالی از به زمین ( $I_F$ ) را تشکیل می‌دهد. البته به این کمیت‌ها می‌توان جریان برگشتی منبع تغذیه ( $I_S$ ) را نیز افزود که اندازه‌گیری آن از طریق مدار ساخته‌شده برای راه‌اندازی منبع تغذیه صورت می‌گیرد.

در بخش نتایج و بحث علاوه بر کمیت‌های یادشده، «بار الکتریکی ویژه»<sup>۲</sup> نیز بررسی شده است. بار الکتریکی ویژه ( $\rho_S$ )، حاصل خارج قسمت جریان الکتریکی اسپری ( $I_F$ ) بر دبی مایع ( $Q_i$ ) است، یعنی:

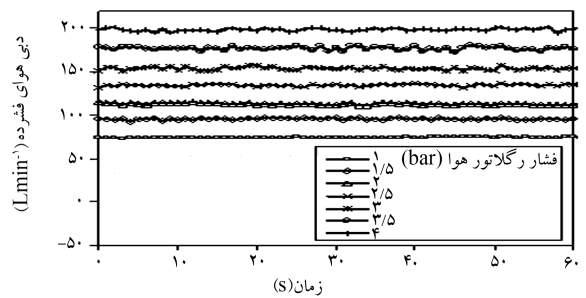
$$\rho_S = \frac{I_F}{Q_i} \quad (1)$$

توزیع گذرای دبی حجمی جریان هوای فشرده در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق این شکل، دبی جریان از روندی یکنواخت نسبت به زمان تبعیت می‌کند که حاکی از جریان پایای هوای فشرده است. تأثیر افزایش فشار بر این جریان علاوه بر ازدیاد دبی، در افزایش دامنه‌ی نوسان دبی بروز می‌یابد. با این حال استمرار پایایی جریان در تمامی فشارها مؤید قابلیت چیدمان آزمایش در ایجاد شرایط پایدار طی آزمایش‌های اصلی است.

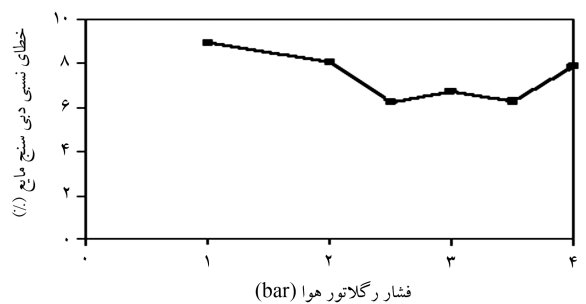
اندازه‌گیری دبی مایع علاوه بر استفاده از دبی‌سنج مربوطه ( $Q_i$  در شکل ۲ ب)، به‌طور مستقیم و با سنجش زمان لازم برای تخلیه‌ی حجم معینی از مایع (با استفاده از مخزن مدرج مایع) امکان‌پذیر است. بر این اساس، و با مقایسه‌ی ارقام قرائت‌شده از دبی‌سنج و مقادیر اندازه‌گیری مستقیم دبی، خطای نسبی دبی‌سنج مایع برحسب فشار هوا مطابق شکل ۶ به دست می‌آید. این شکل نشان می‌دهد که خطای نظام‌مند اندازه‌گیری برای دبی‌سنج مایع به کم‌تر از ۹٪ و در فشارهای  $P_1 > 2 \text{ bar}$  به کم‌تر از ۸٪ محدود می‌شود. از سوی دیگر، سازنده براساس گواهی کالیبراسیون (ارائه‌شده به همراه دبی‌سنج)، خطا را در شرایط مشابه کم‌تر از ۶٪ گزارش کرده است.<sup>[۲۲]</sup> از این رو مقایسه‌ی این خطا و خطای منتج از اندازه‌گیری مستقیم، نمایش‌گر تفاوتی به میزان کم‌تر از ۳٪ است. لذا با اعتمادبر مشخصات عملکردی دبی‌سنج (با استناد به داده‌های سازنده) می‌توان از آن برای اندازه‌گیری دبی مایع استفاده کرد.

چنان‌که در بخش چیدمان آزمایش بیان شد، یک مدار راه‌انداز به‌منظور استفاده از منبع تغذیه‌ی الکتریکی ساخته شده است. در عمل ولتاژ خروجی منبع تغذیه (VDC) از ۵۰۰۰ تا ۱۰ (از طریق این مدار و با تغییر ولتاژ کنترلی در بازه‌ی VDC ۱۰ تا ۰ صورت می‌گیرد. شکل ۷ تغییرات جریان برگشتی منبع تغذیه را برحسب ولتاژ کنترل در حالت بدون بار نشان می‌دهد. مطابق این شکل، مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی جریان برگشتی نسبت به ولتاژ کنترلی دارای تغییر خطی‌اند و از لحاظ کمی و کیفی با داده‌های سازنده تطابق مناسبی دارند.

ولتاژ خروجی منبع تغذیه همچنین با استفاده از یک دستگاه کاهنده‌ی ولتاژ



شکل ۵. تغییرات زمانی دبی هوای فشرده به‌ازای مقادیر مختلف فشار تنظیم‌کننده.

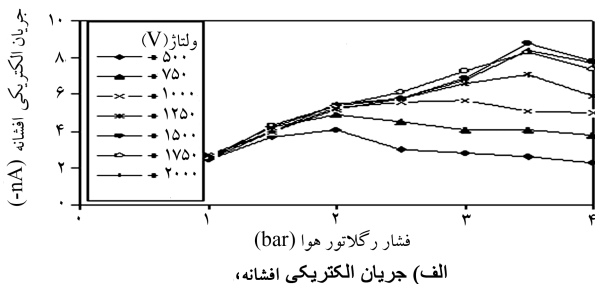


شکل ۶. خطای نسبی دبی‌سنج مایع برحسب فشار تنظیم‌کننده.

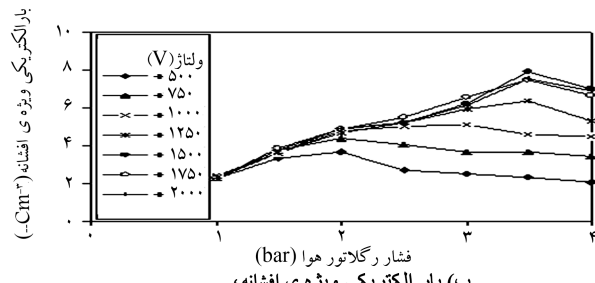
که با توجه به واحد جریان الکتریکی (آمپر یا کولن بر ثانیه)، بار الکتریکی انتقال یافته به واحد حجم قطرات مایع را به دست می‌دهد.

## نتایج و بحث

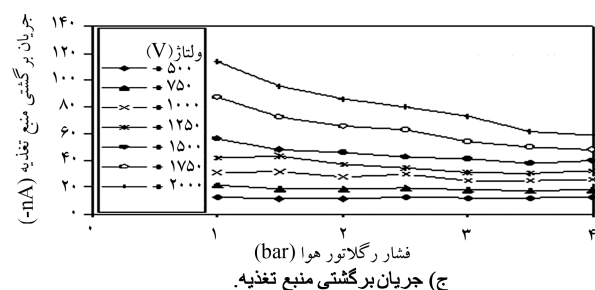
شکل ۹ نشان‌گر تغییرات دبی جریان‌های هوای فشرده و مایع، و نیز جریان برگشتی منبع تغذیه برحسب فشار تنظیم‌کننده در ولتاژهای مختلف است. مطابق شکل‌های ۹ الف و ۹ ب، دبی هوا و مایع تابعی از فشار هوا در تنظیم‌کننده هستند و ولتاژ الکتریکی تأثیری بر این کمیت‌ها ندارد. این موضوع حاکی از وجه غالب نیروی آئروپنما می‌باشد ناشی از جریان هوای فشرده است که عهده‌دار نقش اصلی در تعیین دبی خطوط هوا و مایع در نازل است. شکل ۹ ج نشان می‌دهد که اعمال ولتاژ الکتریکی موجب تغییر جریان برگشتی منبع تغذیه می‌شود. در این شکل، جریان برگشتی در یک ولتاژ معین از روندی نسبتاً هموار با اندکی رفتار صعودی - نزولی برحسب فشار هوای فشرده برخوردار است. این رفتار صعودی - نزولی را می‌توان با رفتار صعودی - نزولی دبی مایع در شکل ۹ ب مرتبط دانست. افزایش دبی مایع در نازل به معنای حضور جرم بیشتری از مایع در نازل در واحد زمان است. در این شرایط، الکتروود القایی باردار ساز (متصل به ولتاژ خروجی منبع تغذیه) در معرض این جرم بیشتر قرار گرفته و جریان الکتریکی بیشتری را در واحد زمان به توده‌ی مایع منتقل می‌کند. نتیجه‌ی این امر، مصرف بیشتر جریان الکتریکی در منبع تغذیه است که به افزایش



الف) جریان الکتریکی افزاینده، فشار رگلاتور هوا (bar)



ب) بار الکتریکی ویژه ی افزاینده، فشار رگلاتور هوا (bar)



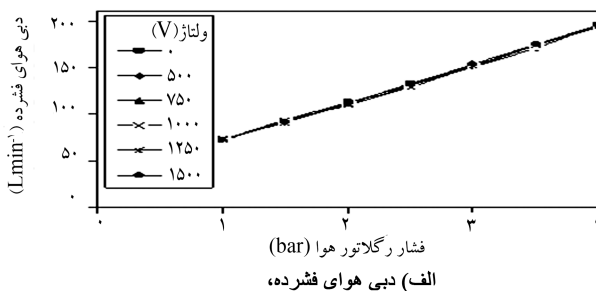
ج) جریان برگشتی منبع تغذیه، فشار رگلاتور هوا (bar)

شکل ۱۰. تأثیر فشار تنظیم‌کننده‌ی هوا به‌ازای مقادیر مختلف ولتاژ القایی و مقادیر ثابت  $L = 12\text{cm}$  و  $Q_1 = 67.7\text{mlmin}^{-1}$  ( $4\text{Lh}^{-1}$ )

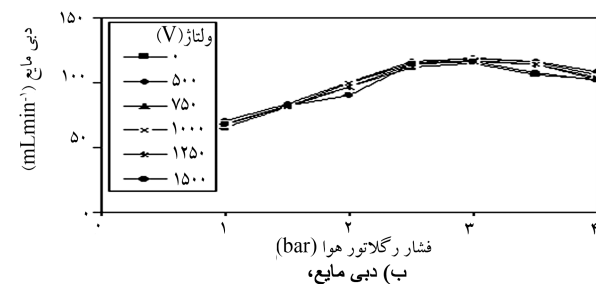
جریان برگشتی می‌انجامد. افزایش جریان برگشتی در یک ولتاژ ثابت تا فشار معینی ادامه می‌یابد و پس از آن فشار متناظر با کاهش دبی مایع با روند نزولی مواجه می‌شود.

در شکل ۹ ج نیز به‌ازای مقدار ثابتی از فشار هوای فشرده، افزایش ولتاژ منجر به افزایش جریان برگشتی می‌شود. مخلوط جریان مایع و هوای فشرده هنگامی که در داخل نازل در معرض ولتاژ ناشی از الکتروود القایی قرار می‌گیرد، به دلیل اتصال جریان مایع (از طریق مخزن مایع) به زمین همانند مقاومت الکتریکی میان الکتروود و زمین عمل می‌کند. لذا در فشار ثابت هوای فشرده و ملاً یک دبی ثابت مایع (شکل ۹ ب)، مقدار این مقاومت الکتریکی ثابت است و افزایش ولتاژ الکتریکی به انتقال جریان الکتریکی بیشتر (مستتر در افزایش در جریان برگشتی) از آن مقاومت به زمین می‌انجامد. انتقال جریان الکتریکی بیشتر مستلزم تأمین جریان الکتریکی بالاتر، از طریق منبع تغذیه است که تأثیر آن مطابق شکل ۹ ج در ازدیاد جریان برگشتی انعکاس می‌یابد.

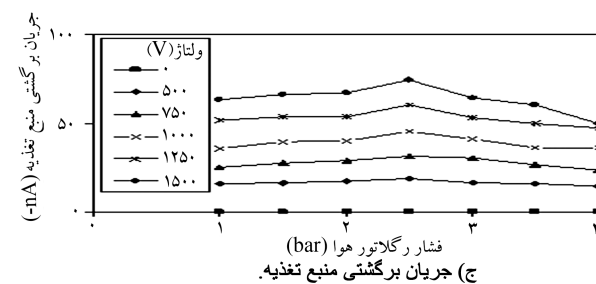
شکل ۱۰ نمودار تغییرات جریان الکتریکی اسپری ( $I_F$ )، بار الکتریکی ویژه ی اسپری ( $\rho_S$ ) و جریان برگشتی منبع تغذیه ( $I_S$ ) را برحسب فشار هوای فشرده، به‌ازای ولتاژهای مختلف باردارسازی و در یک دبی مایع ثابت به نمایش می‌گذارد. مطابق شکل ۱۰ الف، افزایش ولتاژ باردارسازی در یک فشار ثابت موجب ازدیاد جریان الکتریکی اسپری می‌شود. این موضوع مؤید تأثیر مثبت ولتاژ باردارسازی در تقویت باردارسازی اسپری و دست‌یابی به سطوح بالاتر جریان الکتریکی در اسپری است.



الف) دبی هوای فشرده، فشار رگلاتور هوا (bar)

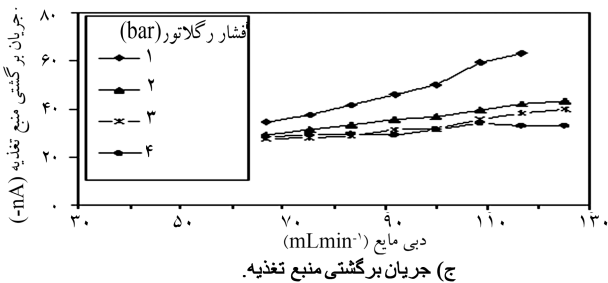
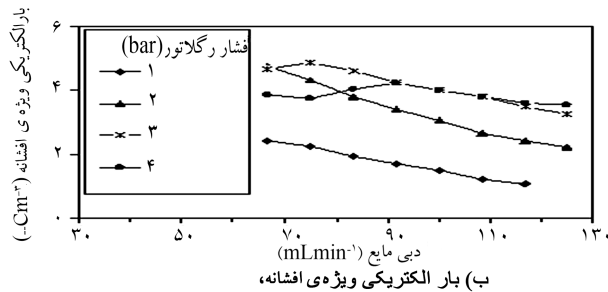
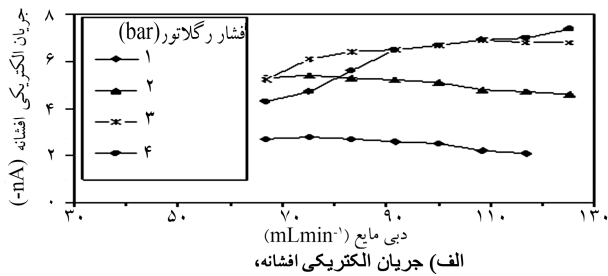


ب) دبی مایع، فشار رگلاتور هوا (bar)



ج) جریان برگشتی منبع تغذیه، فشار رگلاتور هوا (bar)

شکل ۹. تأثیر فشار تنظیم‌کننده به‌ازای مقادیر مختلف ولتاژ القایی.



شکل ۱۱. تأثیر دبی مایع به‌ازای مقادیر مختلف فشار تنظیم‌کننده‌ی هوا و مقادیر ثابت  $V = 1000 \text{ V}$  و  $L = 12 \text{ cm}$ .

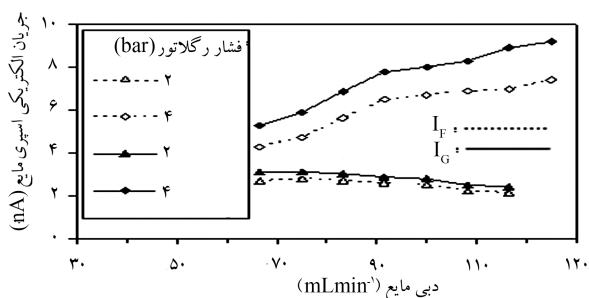
فشرده و به‌ازای مقدار ثابتی از ولتاژ باردارسازی نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۱ الف، جریان الکتریکی اسپری در فشارهای پایین هوا از روندی نزولی نسبت به دبی مایع برخوردار است و با افزایش فشار هوا به روندی صعودی تبدیل می‌شود. افزایش دبی مایع در فشار ثابت هوا و ولتاژ ثابت باردارسازی به معنای افزایش جرم مایع (محیط در معرض اتمیزاسیون و باردارسازی) بدون ایجاد تغییر در انرژی اتمیزاسیون (مستقر در فشار ثابت) و انرژی باردارسازی (مستقر در ولتاژ ثابت) است. در این حالت با توجه به هندسه‌ی ثابت نازل در ناحیه‌ی اتمیزاسیون، با افزایش دبی مایع امکان نشست بخشی از قطرات مایع بر روی الکترود القایی و وقوع پدیده‌ی خیس‌شدگی الکترود<sup>۲۱</sup> باردارساز وجود دارد. وقوع این پدیده باعث می‌شود تا بخشی از قطرات مایع در تماس مستقیم با الکترود القایی، و تحت باردارسازی تماسی (با مستقیم) قرار بگیرند. لذا این قطرات با قطبیتی همانند الکترود القایی باردار شده و به قطرات اسپری که به‌روش القایی و با قطبیتی مخالف قطبیت الکترود باردار شده‌اند می‌پیوندند. ترکیب این دو دسته قطرات با بار الکتریکی مخالف به خنثی شدن بخشی از بار الکتریکی اسپری (تحت سازوکار اصلی باردارسازی القایی) منجر شده و در نتیجه سطح جریان الکتریکی اسپری را با افزایش دبی مایع کاهش می‌دهد. حال اگر افزایش دبی مایع در فشار بالاتری از هوای فشرده صورت گیرد، سطح الکترود باردارساز در معرض جریانی از هوای فشرده در سرعت بالاتر قرار می‌گیرد. در نتیجه قطرات اسپری با سرعت بیشتری از نازل خارج شده و فرصت خیس‌شدگی الکترود توسط قطرات مایع در مقایسه با فشار پایین‌تر هوا کاهش می‌یابد. تأثیر این موضوع را می‌توان در

افزایش ولتاژ با تقویت میدان الکتریکی در ناحیه‌ی اتمیزاسیون در داخل نازل باعث می‌شود تا قطرات اسپری در معرض میدان الکتریکی قوی‌تر قرار گرفته و در نتیجه نرخ بالاتری از بار الکتریکی به آنها منتقل شود.

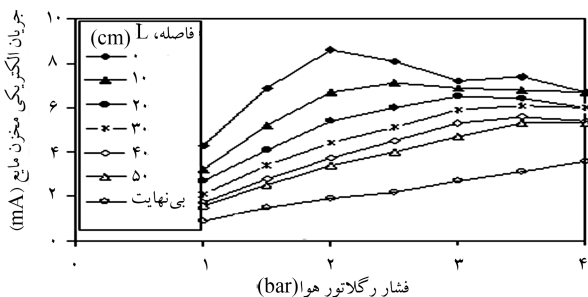
شکل ۱۰ الف همچنین نشان می‌دهد که افزایش فشار در یک ولتاژ ثابت به یک روند صعودی - نزولی برای جریان الکتریکی اسپری منجر می‌شود. دلیل این روند را می‌توان در سازوکار باردارسازی القایی جست‌وجو کرد. از یک سو، جریان هوا در روش القایی همانند یک لایه‌ی دی‌الکتریک (عایق) میان الکترود باردارساز و قطرات اسپری در داخل نازل عمل می‌کند. براساس شکل ۱۰ الف، در روش القایی قطرات مایع با قطبیت مخالف قطبیت الکترود القایی باردار می‌شوند (ولتاژ مثبت و جریان الکتریکی منفی)، از سوی دیگر و همزمان با باردارسازی القایی، بخشی از جریان هوای فشرده که مستقیماً با الکترود القایی در تماس است به‌طور مستقیم و با قطبیتی همانند قطبیت الکترود، باردار و همراه اسپری از نازل خارج می‌شود. بدین ترتیب می‌توان انتظار داشت که جریان الکتریکی اسپری قطرات، برآیند تأثیر دی‌الکتریک هوای فشرده از یک سو و یونیزاسیون هوای فشرده از سوی دیگر باشد. به‌عبارت دیگر، خاصیت دی‌الکتریک جریان هوای فشرده به باردارسازی القایی قطرات کمک می‌کند، در حالی که یونیزاسیون جریان هوا با ورود یون‌هایی با بار الکتریکی مخالف قطرات موجب تضعیف باردارسازی القایی می‌شود. لذا با افزایش فشار هوا و در نتیجه عبور حجم بیشتری از هوا از درون نازل (شکل ۵)، هم‌زمان با تقویت لایه‌ی دی‌الکتریک امکان یونیزاسیون حجم بالاتری از هوا نیز وجود دارد. از این رو در شکل ۱۰ الف، افزایش فشار هوا تا حد معینی با تقویت باردارسازی القایی موجب افزایش جریان الکتریکی اسپری شده که پس از آن با غلبه‌ی نرخ یونیزاسیون هوا بر نرخ القای بار الکتریکی به کاهش جریان الکتریکی اسپری می‌انجامد. شکل ۱۰ الف همچنین نشان می‌دهد که این فشار حدی، که گذر از آن موجب کاهش جریان الکتریکی اسپری می‌شود، با افزایش ولتاژ القایی و در نتیجه تقویت بیشتر باردارسازی القایی به مقادیر بالاتری انتقال می‌یابد.

شکل ۱۰ ب نشان‌گر نمودار تغییرات بار الکتریکی ویژه برای اسپری است. این نمودار نشان‌گر روندی مشابه شکل ۱۰ الف برای بار الکتریکی قطرات اسپری است. در این حالت، دلیل همسان بودن شیب تغییرات بار الکتریکی با شیب تغییرات جریان الکتریکی به تعریف بار الکتریکی ویژه (رابطه‌ی ۱) و ثابت بودن دبی مایع (عبارت مخرج کسر در آن رابطه) برای داده‌های ارائه‌شده در شکل ۱۰ ب بازمی‌گردد. شکل ۱۰ ج نشان می‌دهد که جریان برگشتی منبع تغذیه در یک فشار ثابت با ازدیاد ولتاژ افزایش می‌یابد. این موضوع ناشی از تناسب مستقیم میان جریان برگشتی و ولتاژ باردارسازی است که نمونه‌ی آن قبلاً در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده شد. شکل ۱۰ ج همچنین نشان‌گر روندی نسبتاً هموار و ثابت برای جریان برگشتی برحسب فشار در ولتاژهای پایین است که با افزایش ولتاژ به روندی نزولی تبدیل می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که قطرات اسپری با افزایش فشار از زمان ماندگاری کم‌تری در نازل برخوردار است و در نتیجه، مقاومت الکتریکی کم‌تری در برابر باردارسازی القایی وجود دارد. به‌عبارت دیگر، قطرات باردار شده با سرعت بیشتری از نازل خارج شده و جای خود را سریع‌تر به قطرات بعدی برای اعمال ولتاژ و باردار شدن می‌دهند. این امر از یک سو به بهبود باردارسازی (در فشار و ولتاژهای بالاتر)، و از سوی دیگر به کاهش توان مصرفی منبع تغذیه (مستقر در کاهش جریان برگشتی) منجر می‌شود.

شکل ۱۱ نمودار تغییرات جریان الکتریکی اسپری، بار الکتریکی ویژه اسپری و جریان برگشتی منبع تغذیه را برحسب دبی مایع در فشارهای مختلف جریان هوای



شکل ۱۲. مقایسه‌ی جریان الکتریکی اسپری ( $I_F$ ) و مخزن مایع ( $I_G$ ) برحسب دبی مایع به ازای دو فشار تنظیم‌کننده‌ی هوا و مقادیر ثابت  $V = 1000V$  و  $L = 12cm$ .



شکل ۱۳. جریان الکتریکی انتقالی از مخزن مایع برحسب فشار تنظیم‌کننده‌ی هوا و به ازای مقادیر مختلف فاصله‌ی نازل تا استوانه در  $V = 1000V$  و  $Q_1 = 0.83/3 mLmin^{-1} (5Lh^{-1})$ .

متصل به زمین دانست که امکان انتقال بار الکتریکی بیشتری را بر قطرات اسپری میسر می‌سازد. در حالی که پاشش قطرات باردار به فضای باز محیطی (مترادف با بی‌نهایت =  $L$ ) باعث افزایش زمان تخلیه‌ی بار الکتریکی قطرات از طریق هوای محیطی (ماده‌ی دی الکتریک) به زمین می‌شود که خود ناشی از تضعیف میدان الکتریکی میان پلوم اسپری  $22$  و زمین است.

### نتیجه‌گیری

عملکرد یک نازل دو سیاله‌ی اختلاط درونی القایی براساس برپایی یک چیدمان آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. چیدمان آزمایش از قابلیت تأمین همزمان هوای فشرده، جریان مایع و ولتاژ باردارسازی الکتریکی برای نازل برخوردار است. ارزیابی این چیدمان نشان می‌دهد که فشار هوای فشرده در فاصله‌ی میان تنظیم‌کننده‌ی فشار تا ورود به نازل از تغییراتی خطی و غیر نوسانی پیروی کرده، به طوری که می‌توان فشار تنظیم‌کننده را با تقریبی در محدوده‌ی ۵٪ تا ۱۰٪ به‌عنوان شاخص فشار هوا در ورود به نازل در نظر گرفت. تغییرات زمانی دبی حجمی در خط هوای فشرده نشان می‌دهد که این خط از قابلیت تغذیه‌ی یکنواخت و پایدار هوا به نازل در یک فشار ثابت برخوردار است. چیدمان آزمایش همچنین در خط مایع علاوه بر تنظیم و تثبیت دبی مایع، امکان پایش دبی مایع را با خطای نظام‌مند کم‌تر از ۹٪ فراهم می‌سازد. کارکرد خط جریان الکتریکی نیز نشان می‌دهد که منبع تغذیه‌ی ولتاژ الکتریکی براساس مدار جانبی تعبیه شده، امکان تنظیم خطی ولتاژ بالای باردارسازی را برحسب ولتاژ تحریکی (کنترل) در محدوده‌ی ۰ تا ۱۰ ولت میسر می‌سازد. بررسی دبی مایع و دبی هوای فشرده حاکی از آن است که این کمیت‌ها در حالت اعمال یا عدم اعمال ولتاژ باردارسازی صرفاً متأثر از فشار هوای فشرده بوده

شکل ۱۱ الف و در تبدیل روند نزولی جریان الکتریکی در فشارهای پایین به روند صعودی آن در فشارهای بالا مشاهده کرد.

شکل ۱۱ ب نشان می‌دهد که بار الکتریکی ویژه‌ی اسپری با افزایش دبی مایع از شیبه‌ی نزولی‌تر نسبت به جریان الکتریکی اسپری (شکل ۱۱ الف) برخوردار است. این موضوع در وهله‌ی نخست به تعریف بار الکتریکی ویژه (رابطه‌ی ۱) و بزرگ‌تر شدن مخرج کسر در دبی‌های بالاتر مربوط می‌شود. از طرفی روند تغییرات بار الکتریکی ویژه در شکل ۱۱ ب نشان می‌دهد که استفاده از این کمیت ممکن است به دریافت صحیح‌تری از عملکرد باردارسازی نازل بینجامد. به عبارت دیگر، برخلاف شکل ۱۰ ب که به دلیل ثابت بودن دبی مایع تغییراتی مشابه جریان الکتریکی را برای بار الکتریکی ویژه ارائه می‌دهد، می‌توان تأثیر باردارسازی را در شکل ۱۱ ب، در تلفیق جریان الکتریکی و دبی مایع، ارزیابی کرد. در این حالت، به جای تمرکز بر مقدار مطلق جریان الکتریکی اسپری می‌توان باردارسازی را در ارتباط با بار الکتریکی انتقال یافته به واحد حجم مایع مورد ارزیابی قرار داد.

شکل ۱۱ ج نشان می‌دهد که افزایش دبی مایع از طریق خیس‌شدگی الکتروود القایی موجب افزایش جریان برگشتی منبع تغذیه می‌شود. مطابق شکل همچنین می‌توان تأثیر مثبت افزایش فشار هوا را علاوه بر کاهش مقدار جریان برگشتی، در کاهش شیب صعودی آن شاهد بود که تأییدی بر ممانعت از خیس‌شدگی الکتروود در نتیجه کاهش جریان مصرفی منبع تغذیه است.

شکل ۱۲ نمودار تغییرات مقدار مطلق جریان الکتریکی انتقال یافته از طریق اسپری ( $I_F$  در شکل ۳ ب) و مخزن مایع ( $I_G$  در شکل ۲ ب) را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، جریان‌های  $I_F$  و  $I_G$  روند مشابهی را به نمایش می‌گذارند. چنان که در بخش چیدمان آزمایش بیان شد، با توجه به اتصال مخزن مایع به زمین می‌توان استنتاج کرد که به دلیل بسته شدن مدار الکتریکی (شکل ۲ ب) باید جریان انتقال یافته به قطرات اسپری برابر با جریان الکتریکی انتقال یافته از مخزن مایع به زمین باشد. شکل ۱۲ تأییدی است بر این موضوع، با این تفاوت که مقادیر  $I_F$  همواره کم‌تر از مقادیر  $I_G$  هستند. علت این موضوع، نحوه‌ی جمع‌آوری قطرات اسپری در استوانه‌ی اندازه‌گیری جریان الکتریکی (شکل ۳ ب) است. با توجه به این که جریان الکتریکی قطرات اسپری در برخورد با توری‌های فلزی تعبیه شده در استوانه تخلیه و اندازه‌گیری می‌شود، لذا بخشی از این قطرات می‌توانند از این موانع عبور کرده بدون این که بار الکتریکی آنها به زمین منتقل شود. این موضوع در فشار بالاتر هوا که سرعت بالاتری برای قطرات فراهم می‌کنند به فرار مقدار بیشتری از قطرات و در نتیجه به انحراف بیشتر جریان  $I_F$  نسبت به  $I_G$  منجر می‌شود. در مجموع، به دلیل پیوستگی مایع عبوری از مخزن مایع در مقایسه با گسستگی قطرات اسپری می‌توان  $I_G$  را شاخص دقیق‌تری از جریان باردارسازی نازل به‌شمار آورد.

شکل ۱۳ نمودار تغییرات جریان الکتریکی مخزن مایع را برحسب فشار تنظیم‌کننده‌ی هوا و به ازای فواصل مختلف نازل تا استوانه‌ی اندازه‌گیری جریان الکتریکی اسپری ( $L$  در شکل ۳ ب) در یک ولتاژ و دبی ثابت مایع نشان می‌دهد. با توجه به این که در مقادیر زیاد  $L$  (بی‌نهایت =  $L$ )، جریان  $I_F$  به‌طور عملی وجود ندارد، لذا در شکل ۱۳ از جریان الکتریکی مخزن ( $I_G$ ) استفاده شده است. البته استفاده از این کمیت در راستای شکل ۱۲ نیز معیار دقیق‌تری برای ارزیابی باردارسازی نازل است. مطابق شکل ۱۳، افزایش فاصله‌ی نازل تا استوانه به کاهش جریان الکتریکی اسپری منجر می‌شود که این کاهش سرانجام به نمودار بی‌نهایت =  $L$  (عدم حضور استوانه) میل می‌کند. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از استوانه، به‌عنوان یک جسم متصل به زمین، باعث تقویت باردارسازی قطرات می‌شود. اهمیت عملی این موضوع را می‌توان در پاشش قطرات باردار بر روی اهداف خارجی (مانند گیاه)



جریان الکتریکی اسپری برای ارزیابی بارداری نازل فراهم می‌سازد. بهره‌گیری از بار الکتریکی ویژه حاکی از وجود مقدار بهینه‌ی برای دبی مایع است که در یک فشار و ولتاژ ثابت به بیشینه‌ی بار الکتریکی می‌انجامد.

مقایسه‌ی جریان الکتریکی اسپری قطرات و جریان الکتریکی انتقال یافته از مخزن مایع به زمین حاکی از تطابق کمی و کیفی این دو کمیت است. بدین ترتیب و با دقت بیشتر، به دلیل پیوستگی جریان مایع در مخزن می‌توان جریان الکتریکی مخزن مایع را نیز به عنوان کمیتی از بارداری نازل مد نظر قرار داد. در این حالت می‌توان در شرایط عدم حضور استوانه‌ی اندازه‌گیری جریان الکتریکی اسپری، با اندازه‌گیری جریان الکتریکی مخزن مایع به سطح جریان الکتریکی اسپری دست یافت. این موضوع نشان می‌دهد که فاصله‌ی استقرار نازل تا استوانه‌ی اندازه‌گیری نقش مهمی در عملکرد بارداری دارد. اگرچه افزایش این فاصله موجب تضعیف بارداری شده و جریان الکتریکی اسپری را کاهش می‌دهد، این کاهش در حد به جریان الکتریکی مخزن مایع در شرایط عدم حضور استوانه میل می‌کند.

### فهرست علائم

- $I_F$ : جریان الکتریکی اسپری (A)
- $I_G$ : جریان الکتریکی مخزن مایع (A)
- $L$ : فاصله‌ی نازل تا استوانه‌ی اندازه‌گیری جریان الکتریکی (m)
- $P_1$ : فشار 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 ( $Lmin^{-1}$ )
- $Q_v$ : دبی حجمی مایع ( $Lmin^{-1}$ )
- $T_1$ : دما در دبی‌سنج هوا ( $^{\circ}C$ )
- $T_2$ : دما در دما و فشارسنج ترکیبی ( $^{\circ}C$ )
- $V_s$ : ولتاژ خروجی منبع تغذیه (V)
- $\rho_s$ : بار الکتریکی ویژه‌ی اسپری ترکیبی ( $Cm^{-3}$ )

و مستقل از ولتاژ عمل می‌کنند. این موضوع مؤید وجه غالب جریان هوای فشرده طی مکش و امیراسیون جریان مایع در داخل نازل و انتقال اسپری قطرات مایع به خارج از نازل، مستقل از ساژوکار بارداری القایی است. اولین نقش اعمال ولتاژ القایی را می‌توان در عملکرد منبع تغذیه مشاهده کرد که طی آن جریان برگشتی منبع تغذیه (شاخصی از جریان الکتریکی مصرفی) با ازدیاد ولتاژ افزایش یافته و به تقویت میدان الکتریکی در نازل می‌انجامد. تأثیر فشار هوا بر جریان برگشتی به طور غیر مستقیم از طریق دبی مایع بروز می‌یابد. افزایش دبی مایع (در یک فشار و ولتاژ ثابت) با قرار دادن جرم بیشتری از مایع در معرض الکتروود بارداری، دریافت جریان برگشتی بالاتری را بر منبع تغذیه تحمیل می‌کند.

هرچند ولتاژ بارداری تأثیر به‌سزایی بر تغییر جریان‌های مایع و هوای فشرده ندارد، مشخصه‌های این جریان‌ها بر تولید قطرات باردار مایع اثرگذارند. هوای فشرده از طریق فشار این جریان امکان تغییر بار الکتریکی قطرات را فراهم می‌سازد. فشار هوا دو نقش مثبت و منفی را برای جریان هوای فشرده به نمایش می‌گذارد: نقش مثبت آن در تقویت لایه‌ی دی‌الکتریک هوای فشرده بر روی الکتروود القایی تبلیور می‌یابد که زمینه‌ی انتقال بار الکتریکی بیشتر را بر قطرات مایع فراهم می‌سازد؛ اما نقش منفی آن در یونیزاسیون لایه‌ی هوا در اثر تماس با الکتروود القایی ظاهر می‌شود. تلفیق این دو نقش مثبت و منفی نشان‌دهنده‌ی فشار بهینه برای جریان هوای فشرده است که گذر از آن فشار به کاهش بارداری نازل منجر می‌شود. مقدار این فشار، به‌ازای دبی ثابت مایع، وابسته به ولتاژ بارداری بوده و با ازدیاد ولتاژ افزایش می‌یابد. هرچند افزایش دبی مایع زمینه‌ی بارداری جرم بیشتری از قطرات اسپری را فراهم می‌سازد، امکان وقوع پدیده‌ی خیس‌شدگی الکتروود القایی و در نتیجه بارداری مستقیم (تماسی) قطرات را نیز محتمل می‌سازد. افزایش فشار هوا راهکاری است که سطح الکتروود القایی را در معرض جریان سریع‌تری از هوای فشرده قرار داده و طبعاً تأثیر منفی ناشی از افزایش دبی مایع و نشست قطرات بر روی الکتروود را تقلیل می‌دهد. بار الکتریکی ویژه (بار الکتریکی انتقال یافته به واحد حجم قطرات) با ترکیب مقادیر مطلق جریان الکتریکی و دبی اسپری ارائه‌گر کمیتی است که علاوه بر آگاهی از پدیده‌ی خیس‌شدگی، شاخص جامع‌تری را در مقایسه با مقدار مطلق

### پانویس

1. disintegration
2. wraparound feature
3. coalescence
4. electrostatic sprayers
5. drift
6. adhesion
7. ionised-field or corona
8. electrical induction
9. polarity
10. contact or direct
11. insulating liquid
12. conducting liquid
13. electrostatic spraying systems
14. pneumatic
15. internal mixing

16. compression fitting
17. Stack Return Current
18. tap water
19. electrical resistivity
20. specific charge
21. electrode wetting
22. spray plume

### منابع

1. Son, P.H. and Ohba, K. "Theoretical and experimental investigations on instability of an electrically charged liquid jet", *Int. J. Multiphase Flow*, **24**(4), pp. 605-616 (1998).
2. Jaworek, A.; Balachandran, W.; Lachowski, M.; Kulon,

- J. and Krupa, A. "Multi-nozzle electro-spray system for gas cleaning processes", *J. Electrostatics*, **64**, pp. 194-202 (2006).
3. Wang, X.C. "Prospects on painting technology for automobile in 21st century", *Materials Protection*, **33**(1), pp. 61-64 (2000).
4. Ricks, N.P.; Barringer, S.A.B. and Fitzpatrick, J.J. "Food powder characteristics important to nonelectrostatic and electrostatic coating and dustiness", *J. Food Science*, **67**(6), pp. 2256-2263 (2002).
5. Brandenberger, H.; Nussli, D.; Piech, V. and Widmer, F. "Monodisperse particle production: a method to prevent drop coalescence using electrostatic forces", *J. Electrostatics*, **45**, pp. 227-238 (1999).
6. Franke, M.E. and Hogue, L.E. "Electrostatic cooling of a horizontal cylinder", *ASME Trans., J. Heat Transfer*, **113**, pp. 544-548 (1991).
7. Shrimpton, J.S. and Laonual, Y. "Dynamics of electrically charged transient evaporating sprays", *Intl. J. for Numerical Methods in Eng.*, **67** (8), pp. 1063-1081 (2006).
8. Jones, K.M.; Bound, S.A. and Oakford, M.J. "Spray application technology", *Plant Growth Regulation*, **31**(3), pp. 173-181, (2000).
9. Bailey, A.G. "Electrostatic spraying of liquids", Research Studies Press, Ltd., Somerset, England, p. 135 (1988).
10. Law, S.E. and Bowen, H.D. "Charging liquid spray by induction", *Trans. ASAE*, **9**(4), pp. 501-506 (1966).
11. Splinter, W.E. "Air-curtain nozzle developed for electrostatically charging dusts", *Trans. ASAE*, **11**(4), pp. 487-490 (1968).
12. Morton, N. "The electrodyn sprayer-control of heliothis SPP in cotton", *Proc. British Crop Protection Conf., Pests and Diseases*, pp. 891-901 (1981).
13. Matthews, G.A. "Electrostatic spraying of pesticides: a review", *Crop Protection*, **8**, pp. 3-15 (1989).
14. Marchant, J.A. and Green, R. "An electrostatic charging system for hydraulic spray nozzles", *J. Agricultural Eng. Research*, **32**, pp. 309-319 (1982).
15. Brochure, "ESS electrostatic greenhouse sprayers", Electrostatic Spraying Systems, Inc., Watkinsville, GA (2002).
16. Coates, W. and Palumbo, J. "Deposition, off-target movement, and efficacy of capture<sup>TM</sup> and thiodan<sup>TM</sup> applied to cantaloupes using five sprayers", *Applied Engineering in Agriculture*, **13**(2), pp. 181-187 (1997).
17. Law, S.E. and Cooper, S.C. "Air-assisted electrostatic sprays for postharvest control of fruit and vegetable spoilage microorganisms", *IEEE Trans., Industry Applications*, **37**(6), pp. 1597-1602 (2001).
18. Ebert, T.A.; Derksen, R.C.; Downer, R.A. and Krause, C.R. "Comparing greenhouse sprayers: the dose transfer process", *Pest Management Science*, **60**(5), pp. 507-513 (2003).
19. Lefebvre, A.G. "Atomization and sprays", Hemisphere Publishing Corporation, New York, p. 136 (1989).
20. Manual. "Mass flowmeters: TSI series 4000/4100 high performance linear OEM mass flowmeter", Design Guide, 1980430-Revision D, TSI Incorporated, Shoreview, MN, (2004).
21. Manual. "Safety & installation instruction for HP series", HSP March 05, Applied Kilovolts Ltd., West Sussex, UK (2005).
22. Calibration Certificate. "Flowmeter KMI-1205HR2000", KOBOLD Messring GmbH, Germany (2005).
23. Bailey, A.G., "The theory and practice of electrostatic spraying", *Atomisation and Spray Technology*, **2**, pp. 95-134 (1986).