

رویکردی تک‌فازی در طراحی، آزمایش و مقایسه‌ی عملکرد یک نازل دوسیاله‌ی القایی

محمد رضا جهان‌نما (استادیار)

سعید شاخسی (استادیار)

حوزه‌ی معاونت پژوهشی، پژوهشکده‌ی مهندسی، وزارت جهاد کشاورزی

در این پژوهش رفتار یک نازل دوسیاله‌ی القایی بررسی شده است. در طراحی این نازل از رویکردی مبتنی بر تحلیل جریان تک‌فازی در ارتباط با شرایط عملکردی یک نازل مینا استفاده شده است که روشی را برای تخمین اندازه‌ی مجرای مایع براساس معادله‌ی برنولی و قطر گلوگاه بر پایه‌ی وقوع خفگی پیش روی قرار می‌دهد. نازل با استفاده از چیدمانی تجربی با قابلیت تأمین هم‌زمان و پایای جریان هوای فشرده، جریان مایع و ولتاژ الکتریکی مورد آزمایش قرار گرفته است. فشار هوای فشرده از طریق تقویت لایه‌ی عایق دی‌الکتریک روی الکتروود القایی، و ولتاژ به دلیل تشدید میدان الکتریکی موجب بهبود باردارسازی می‌شوند. افزایش فشار در یک ولتاژ ثابت حاکی از وجود یک فشار بهینه است که گذر از آن فشار با تقویت باردارسازی تماسی موجب تضعیف باردارسازی القایی می‌شود. ازدیاد دبی مایع با وقوع پدیده‌ی خیس‌شدگی الکتروود سبب کاهش باردارسازی القایی می‌شود؛ تأخیر در وقوع این پدیده مستلزم اعمال سطوح بالاتری از فشار هوا است. عملکرد نازل در مقایسه با نازل مینا از مطابقت کمتی و کیفی بسیار مناسبی برخوردار است که تأییدی بر قابلیت استفاده از رویکرد تک‌فازی است. نازل علاوه بر تأمین سطوح بالاتری از باردارسازی القایی در فشار و ولتاژهای بالا، مصرف کم‌تری از هوای فشرده را نیز در تمامی شرایط مشابه نسبت به نازل مینا به نمایش می‌گذارد.

واژگان کلیدی: اسپری قطرات، بار الکتریکی ویژه، باردارسازی القایی، خفگی، نازل دوسیاله.

mjahannama@eri.ac.ir
sshakhesi@eri.ac.ir

مقدمه

قطره‌ساز^۱ برای تولید اسپری مایعات شده است که نازل‌های دوسیاله^۲ از جمله‌ی آن وسایل محسوب می‌شوند. نازل‌های دوسیاله با بهره‌گیری از انرژی جنبشی جریان پرسرعت گاز (غالباً هوا، به دلیل فراوانی) در مقایسه با سایر قطره‌سازها (فشاری و دوار) از سه امتیاز اساسی برخوردارند. مزیت نخست به قابلیت این نازل‌ها در قطره‌سازی مایعاتی با لزجت بسیار بالا مربوط می‌شود که قلمرو وسیعی از مایعات را تا لزجت $10^{-6} \times 115 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ پوشش می‌دهند.^[۳] دومین مزیت به وابستگی اندک میان کیفیت قطره‌سازی مایع و دبی مایع بازمی‌گردد که خود ناشی از فشار پایین خط جریان مایع و تفوق جریان گاز است.^[۴] براین اساس می‌توان محدوده‌ی وسیع‌تری از دبی مایع را بدون نگرانی از افت قابل توجه کیفیت قطره‌سازی مورد استفاده قرار داد. سومین مزیت نشأت‌گرفته از رانش جریان کم‌فشار مایع توسط جریان پرسرعت گاز است که وقوع پدیده‌ی بغرنج‌گرفتگی روزنه^۵ در نازل‌ها را تا حد زیادی مرتفع می‌سازد.^[۵]

روش‌های نظری (اعم از تحلیلی و عددی) در توسعه‌ی نازل‌های دوسیاله، به‌رغم مزایای مرتب بر این نازل‌ها، از سهم بسیار اندکی در مقایسه با روش‌های تجربی برخوردارند.^[۶] دلیل این موضوع را می‌توان در تمرکز و سرعت فوق‌العاده بالای حاکم

تبدیل جریان پیوسته‌ی مایع به اسپری قطرات^۱ در صنعت، کشاورزی و پزشکی کاربردهای وسیع و متنوعی دارد. افزایش بسیار چشمگیر سطح کل مایع در بهبود فرایندهای عملیاتی (مانند انتقال حرارت، احتراق، نشت و پوشش‌دهی) را می‌توان مهم‌ترین دلیل برتری حاصل از کاربرد اسپری به‌شمار آورد.^[۱] تولید اسپری قطرات مستلزم اعمال فرایند قطره‌سازی^۲ بر جریان یک‌پارچه‌ی مایع است که موجب فروپاشی نیروی کشش سطحی مایع متأثر از منبعی با انرژی جنبشی بالا می‌شود. نقش این منبع انرژی مبتنی بر ایجاد سرعت نسبی میان مایع و سیالی ثانویه (مانند هوا) است که زمینه‌ساز اعمال نیروی پسا بر جریان مایع در راستای غلبه بر کشش نگه‌دارنده‌ی سطحی مایع و تولید قطرات مایع است.^[۲] فرایند قطره‌سازی ممکن است ناشی از انرژی جنبشی جریان مایع نسبت به هوای محیطی، تماس یک‌گاز پرسرعت با سطح جریان مایع، یا انتقال انرژی مکانیکی (مانند انرژی دورانی دیسک) به جریان مایع باشد.

نوع منبع انرژی جنبشی منجر به ابداع وسایل مختلفی تحت عنوان نازل با

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۹/۱۲، داوری ۱۳۸۸/۱۰/۷، پذیرش ۱۳۸۸/۱۰/۲۹.

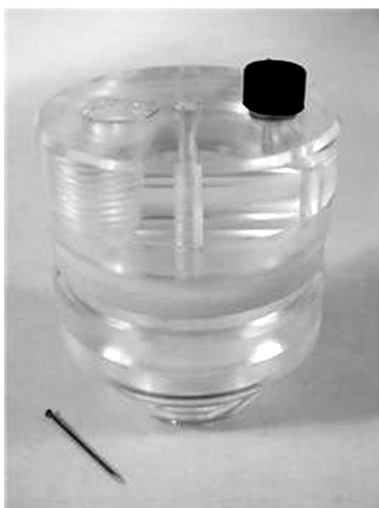
است. نتایج حاصل همچنین امکان مقایسه‌ی عملکرد الکتروهیدرودینامیکی نازل را با عملکرد نازل مینا فراهم ساخته است.

مواد و روش‌ها

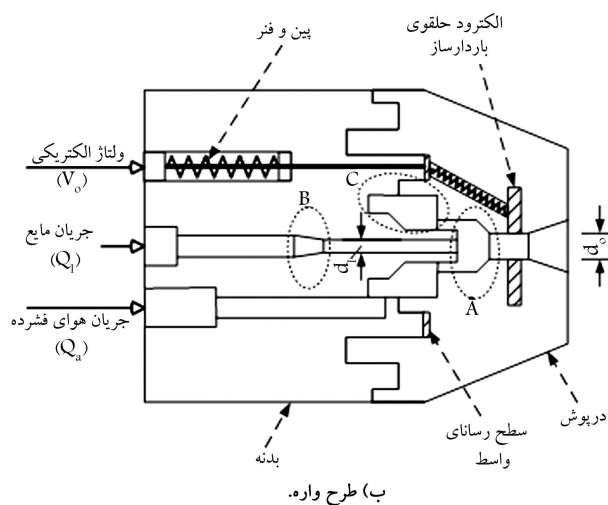
بررسی حاضر مبتنی بر روشی تجربی است که در سه بخش تشریح می‌شود: معرفی نازل، چیدمان تجربی و پیش‌آزمایش.

نازل

نازل مورد بررسی در این نوشتار، یک نازل دوسیاله‌ی جریان موازی با اختلاط درونی^{۱۱} است (شکل ۱) که در آن، مسیرهای تغذیه‌ی هوای فشرده و مایع در داخل نازل و در ناحیه‌ی اختلاط و قطره‌سازی^{۱۲} (ناحیه‌ی A در شکل ۱ ب) با یکدیگر تلاقی می‌کنند. در شکل‌گیری این ناحیه، جریان هوای فشرده دارای نقشی محوری است که می‌توان آن را در تحقق سه مرحله‌ی هیدرودینامیکی اصلی جست‌وجو کرد. مرحله‌ی اول به مکش مایع درون نازل مربوط می‌شود که در اثر ایجاد ناحیه‌ی



الف) تصویر واقعی؛



ب) طرح وارده.

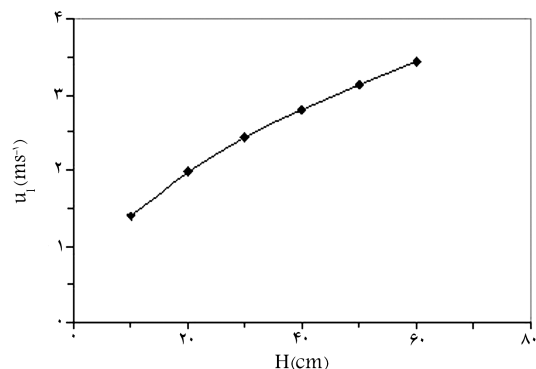
شکل ۱. نازل دوسیاله‌ی القایی با اختلاط درونی.

بر سازوکار اختلاط دو سیال مایع و گاز در محفظه‌ی قطره‌سازی نازل جست‌وجو کرد.^{۱۳} این پیچیدگی پدیده‌هایی با نرخ وقوع بسیار بالا را سبب می‌شود که سرعت و حجم محاسباتی لازم برای بررسی آنها خارج از توان رایانه‌های فعلی است. این پیچیدگی علاوه بر ممانعت از توسعه‌ی روش‌های نظری برای نازل‌های دوسیاله، آهنگ رشد روش‌های تجربی را نیز (به‌ویژه در تعمیق میانی قطره‌سازی هوا-مایع) کند کرده است. از این رو دریافت بسیار ضعیفی از میانی قطره‌سازی مایع در تماس با جریان پرسرعت گاز، نظیر آنچه در یک نازل دوسیاله اتفاق می‌افتد، همچنان در حوزه‌ی مکانیک سیالات وجود دارد.^{۱۴} با مروری بر پژوهش‌های منتشره می‌توان دریافت که توسعه‌ی نازل‌های دوسیاله غالباً مبتنی بر روش‌های تجربی‌اند که در این راستا نیز معرفی نازل‌های جدید بر پایه‌ی اصلاح و ارتقاء ویژگی‌های ساختاری نازل‌های مینا^{۱۵-۱۶} صورت می‌گیرد.

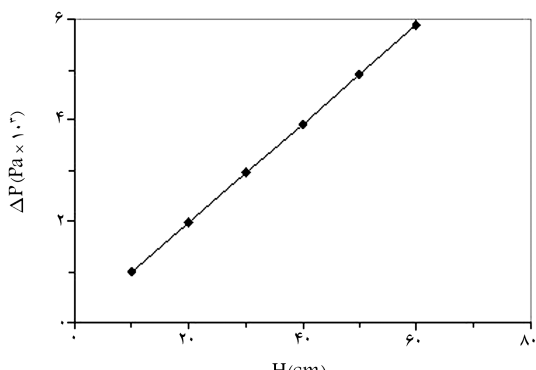
اسپری قطراتی که توسط قطره‌سازهای مختلف تولید می‌شود در حالت عادی از نظر الکتریکی خنثی است. از این رو هدایت دینامیکی و انتقال بوم اسپری^۷ متأثر از نیروهای مکانیکی - مانند نیروهای اینرسی و ثقلی - به فضای محیطی خارج از نازل صورت می‌پذیرد. درهم‌تنیدگی قطرات اسپری^۸ و تشکیل قطرات بزرگ‌تر، محدودیت نیروی چسبندگی و نشست قطرات بر روی اجسام (که زمینه‌ساز پوشش‌دهی نامناسب سطح است) و کنترل‌پذیری اندک مسیر حرکت قطرات در اطراف اجسام (که به عدم نفوذ اسپری به قسمت‌های ناپیدا در اجسامی با هندسه‌ی پیچیده می‌انجامد) از جمله مواردی هستند که محققان را به یافتن راهکارهای مناسب ترغیب کرده است.^{۱۷-۱۵}

تجهیز قطرات مایع به بار الکتریکی و تولید اسپری باردار رویکردی است که طی دهه‌های گذشته برای رفع یا تقلیل نارسایی‌های هیدرودینامیکی اسپری مایعات مورد توجه و پژوهش قرار گرفته است.^{۱۸-۱۹} اهمیت تولید اسپری قطرات باردار در شکل‌گیری میدان الکتریکی در فضای درونی اسپری، و نیز در فضای میان اسپری و اجسامی با پتانسیل الکتریکی صفر تبلور می‌یابد. این میدان از یک سو در درون اسپری از طریق ایجاد نیروی رانش میان قطرات دارای بار الکتریکی همنام، مانع اختلاط و شکل‌گیری قطرات بزرگ‌تر می‌شود و از سوی دیگر با ایجاد نیروی ربایش الکتریکی زمینه‌ی تغییر مسیر حرکت قطرات اسپری به طرف اجسام و بهبود جذب و نشست آنها را روی سطح اجسام فراهم می‌سازد.^{۲۰-۲۱} رانش الکتریکی قطرات همچنین این فرصت را فراهم می‌سازد تا اسپری انبساط بیشتری یابد و از این طریق سطح بیشتری از قطرات اسپری را در معرض نیروی پسای محیطی قرار داده و احتمال تجزیه‌ی ثانویه قطرات^۹ را تقویت می‌کند.^{۲۲}

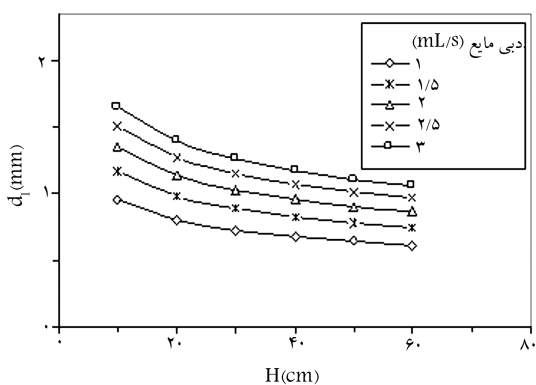
نوشتار حاضر، در چارچوب یک طرح تحقیقاتی و در ادامه‌ی بررسی پیشین،^{۲۳} با ارائه‌ی نتایج حاصل از فعالیتی پژوهشی به تبیین عملکرد یک نازل الکترواستاتیکی می‌پردازد. در بررسی پیشین روشی نظام‌مند برای مطالعه‌ی اسپری‌های باردار با استفاده از یک نازل الکترواستاتیکی تجاری (ساخت شرکت^{۱۰} ESS آمریکا) مطرح و ارائه شد. در پژوهش حاضر، با مینا قراردادن نازل مزبور، نسبت به «طراحی، ساخت و آزمایش» یک نازل دوسیاله‌ی القایی اقدام شده است. در این نازل از جریان پرفشار هوا برای مکش و قطره‌سازی مایع در داخل نازل و سپس انتقال اسپری قطرات به خارج از نازل استفاده شده است. باردارسازی الکتریکی قطرات اسپری توسط یک الکتروود حلقوی مستقر در داخل نازل صورت می‌گیرد. در این بررسی که مبتنی بر رویکردی تجربی است از یک چیدمان آزمایش متشکل از مجموعه‌ی آلمان‌های مکانیکی و الکتریکی برای مطالعه‌ی رفتاری نازل استفاده شده است. با بهره‌گیری از این چیدمان و از طریق کنترل و پایش پارامترهای مختلف بر روی جریان هوای فشرده، جریان مایع و جریان الکتریکی، شرایط عملکرد بهینه‌ی نازل تعیین شده



الف) سرعت؛

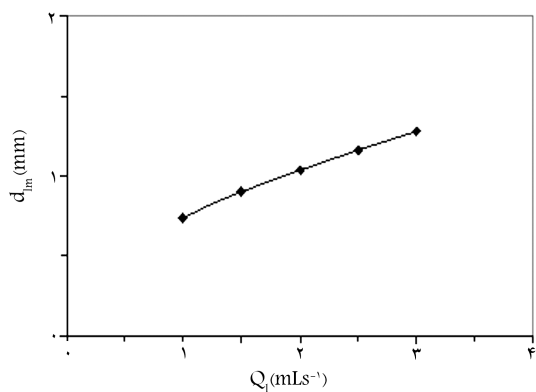


ب) اختلاف فشار؛



ج) قطر مجرای خروجی مایع.

شکل ۲. تأثیر ارتفاع مکش مایع بر تغییرات کمیت‌های جریان و مجرای خروجی.



شکل ۳. میانگین قطر مجرای خروجی مایع بر حسب دبی مایع.

فشار منفی در درون نازل، میان منبع مایع و ناحیه اختلاط و قطره‌سازی به وقوع می‌پیوندد. مرحله دوم به فرایند اختلاط و قطره‌سازی در درون نازل اختصاص دارد که در پی مکش مایع و سپس تلاقی جریان‌های مایع و هوای فشرده تأمین می‌شود. در این مرحله، جریان مایع بر اثر تنش برشی ناشی از انرژی جنبشی هوای فشرده به جریانی گسسته تبدیل می‌شود که نتیجه آن شکل‌گیری اسپری قطرات (جریان دوفازی) است. در سومین مرحله، جریان هوای فشرده موجب انتقال و هدایت قطرات به خارج از نازل، به شکل پلوم اسپری می‌شود.

چنان که پیش‌تر در مقدمه اشاره شد، نازل‌های دوسیاله بنا بر پیچیدگی سازوکار اختلاط و قطره‌سازی براساس روش‌های تجربی و با رویکردی مبتنی بر نازل مینا توسعه یافته‌اند. با این حال، اگرچه نمی‌توان شرایط هیدرودینامیکی جریان دوفازی شکل‌یافته در داخل نازل را براساس فرمول‌بندی نظری مشخصی ارزیابی کرد، در پژوهش حاضر براساس نگرشی تک‌فازی بر جریان‌های مایع و هوای فشرده، در جهت دست‌یابی به راهکاری تخمینی برای تعیین گلوگاه‌های عبور این دو جریان تلاش شده است. این دو موضوع همراه با ابعاد باردارسازی الکتریکی، جنس و ساختار نازل در چهار قسمت ارائه می‌شوند:

۱. جریان مایع: در طرح نازل، مجرای عبور جریان مایع بر روی محور نازل تعبیه شده است (شکل ۱ ب). در این راستا، دو نکته مورد توجه قرار گرفته است. نخست این که مقدار ضریب تخلیه مایع^{۱۳} از خروجی این مجرا به الگوی هندسی مجرای مایع وابسته است؛ این مقدار برای یک لبه‌ی اریب -مستقیم^{۱۴} (پیش از رسیدن مایع به خروجی مجرا) دارای بیشترین مقدار است.^[۱۳] در طرح حاضر نیز از این الگو پیروی شده است (ناحیه B در شکل ۱ ب).

دوم این که قطر خروجی مجرای مایع (d_i در شکل ۱ ب) در ورودی محفظه اختلاط و قطره‌سازی (ناحیه A در شکل ۱ ب) براساس روشی تخمین زده می‌شود که مبتنی بر ارزیابی سرعت مایع در خروج از آن مجراست. با در نظر گرفتن صورت ایده‌آل معادله برنولی میان خروجی مجرای مایع در داخل نازل و مخزن نگهداری مایع، می‌توان سرعت مایع (u_i) را از رابطه‌ی ۱ به دست آورد:

$$u_i = \left(\frac{2\Delta P}{\rho_i} \right)^{0.5} = (2gH)^{0.5} \quad (1)$$

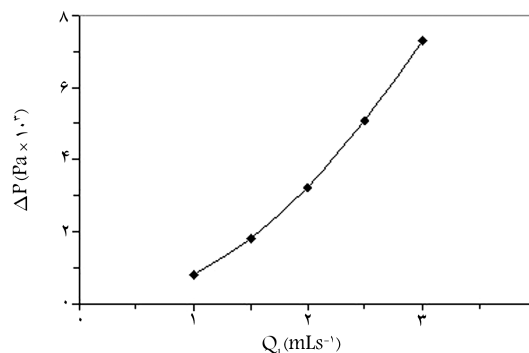
که در آن ΔP و H به ترتیب اختلاف فشار و ارتفاع مایع در ورود به محفظه قطره‌سازی نسبت به مخزن مایع هستند. براساس چیدمان آزمایشی مورد استفاده در این بررسی می‌توان عملاً موقعیت مخزن نگهداری مایع را نسبت به محور مرکزی نازل تنظیم کرد. از این رو می‌توان کمیت H را متغیری مستقل در نظر گرفت و نمودار تغییرات u_i و ΔP را مطابق شکل ۲ رسم کرد (فرض می‌شود که مایع مورد استفاده آب باشد). حال با معلوم بودن سرعت مایع می‌توان قطر خروجی مجرای مایع (d_i) را به‌ازای مقادیر مختلف دبی مایع (Q_i) محاسبه کرد. طی بررسی قبلی^[۱۳] تغییرات دبی مایع برای نازل مینا تقریباً در محدوده‌ی $1-2 \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ اندازه‌گیری شد. با مینا قراردادن این محدوده و تعمیم آن تا $3 \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ برای نازل حاضر، و نیز با توجه به مقادیر u_i در شکل ۲ الف می‌توان تغییرات قطر مجرای خروجی مایع را برحسب H و به‌ازای مقادیر مختلف دبی مایع (مطابق شکل ۲ ج) تخمین زد. با استفاده از این شکل می‌توان میانگین قطر مجرای خروجی مایع (d_{im}) را در هر دبی مایع محاسبه کرد (شکل ۳). مطابق شکل ۳، میانگین قطر مجرای خروجی مایع در بازه‌ی 0.73 mm تا 1.27 mm متغیر است. در بررسی حاضر قطر مجرای خروجی مایع معادل 1 mm در نظر گرفته شده است.

وقوع شرایط بحرانی (خفگی) در گلوگاه نازل است که تحت این شرایط می‌توان سطح مقطع گلوگاه (A_c) را برای سیال هوا (به‌ازای $R=287 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) از رابطه‌ی ۲ محاسبه کرد: [۲۵]

$$A_c = \frac{25 \dot{m}_c}{P_o} \sqrt{T_o} \quad (2)$$

که در آن \dot{m}_c دبی جرمی هوای فشرده و P_o و T_o به ترتیب فشار و دمای سکون جریان هوای فشرده هستند. چون سطح مقطع گلوگاه به‌ازای مقادیر معینی از \dot{m}_c ، P_o و T_o به مقدار منحصر به فردی برای A_c منجر می‌شود، برای تخمین مساحت گلوگاه باید نقطه‌ی طراحی مشخصی (یعنی \dot{m}_c و P_o و T_o)، برای نازل در نظر گرفته شود. در این راستا، مجدداً با رجوع به نازل مینا می‌توان دریافت که جریان هوای فشرده در آن نازل در محدوده‌ی فشار نسبی bar ۲٫۵-۳٫۵ قادر به تأمین بیشینه‌ی دبی مایع است. [۲۳] همچنین با رجوع به داده‌های نازل مینا مشاهده می‌شود که افزایش فشار هوا مترادف با دبی بیشتری از هوای فشرده است و نتیجتاً انرژی مصرفی بالاتری توسط کمپرسور مصرف می‌شود. به بیان دیگر، افزایش فشار از ۲٫۵ به ۳٫۵ bar تأثیر به‌سزایی در افزایش دبی مایع ندارد و بنابراین، با انتخاب فشار ۲٫۵ bar (معادل فشار مطلق bar ۳٫۷۵) می‌توان به‌ازای صرف انرژی کم‌تر به تأمین دبی بیشینه‌ی مایع نیز نایل آمد. از طرفی میانگین دبی حجمی و دمای هوای فشرده در این فشار معادل 116.9 Lmin^{-1} و 22.1°C اندازه‌گیری شده است. [۲۲] بدین ترتیب با معلوم‌بودن فشار و دما می‌توان چگالی هوای فشرده را از معادله‌ی حالت گاز ایده‌آل معادل 4.13 kgm^{-3} محاسبه کرد. حال دبی جرمی هوای فشرده از حاصل ضرب چگالی و دبی حجمی هوای فشرده معادل $8.71 \times 10^{-2} \text{ kgs}^{-1}$ به دست می‌آید. بدین ترتیب نقطه‌ی طراحی ($8.71 \times 10^{-2} \text{ kgs}^{-1}$ ، $3.75 \times 10^5 \text{ Pa}$ ، 295 K) با اعمال این شرایط در رابطه‌ی ۲، مساحت گلوگاه برابر $9.93 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ به دست می‌آید که قطری معادل 3.56 mm را ایجاد می‌کند. در بررسی حاضر (بنا به محدودیت دقت و نیز سهولت ساخت)، قطر گلوگاه نازل معادل 3.6 mm در نظر گرفته شده است.

۳. باردارسازی الکتریکی: برای تولید اسپری از قطرات با بار الکتریکی، باید قطرات تولیدشده در نازل در معرض یک میدان الکتریکی قرار بگیرند. بدین منظور طبق شکل ۱ ب، الکتروود باردارساز پس از ناحیه‌ی اختلاط و قطره‌ساز تعبیه شده است که با اتصال به یک منبع تغذیه‌ی الکتریکی موجب پیدایش میدانی الکتریکی در داخل نازل می‌شود. در این حالت فرایند باردارسازی الکتریکی هم‌زمان با فرایند قطره‌سازی و شکل‌گیری قطرات مایع به وقوع می‌پیوندد که نتیجه‌ی آن تولید و پاشش اسپری قطرات باردار در خروج از نازل است. لازم به توضیح است که جریان هوای فشرده علاوه بر نقش هیدرودینامیکی که در بالا بیان شد، در فرایند باردارسازی قطرات مایع نیز ایفای نقش می‌کند. این نقش در شکل‌گیری لایه‌ی از جریان هوای فشرده بر روی الکتروود باردارساز بروز می‌یابد که القای بار الکتریکی به قطرات اسپری را تسهیل می‌سازد. به عبارت دیگر هوا به‌عنوان ماده‌ی عایق الکتریکی (دارای ولتاژ شکست 3 MVm^{-1}) [۲۶] در نقش لایه‌ی دی‌الکتریک در فضای میان الکتروود باردارساز و قطرات مایع عمل می‌کند. در این حالت، اعمال ولتاژ الکتریکی بر الکتروود باردارساز سبب القای بار الکتریکی با قطبیتی مخالف قطبیت منبع تغذیه بر قطرات مایع شده که تولید اسپری قطرات باردار را در خروج از نازل به دنبال خواهد داشت.



شکل ۴. تغییرات اختلاف فشار مایع برحسب دبی مایع به‌ازای قطر مجرای خروجی مایع.

حال به‌ازای قطر 1 mm برای خروجی مجرای مایع می‌توان سرعت مایع (خارج قسمت دبی بر سطح مقطع) و سپس اختلاف فشار مایع (رابطه‌ی ۱) را برحسب دبی مایع محاسبه کرد (شکل ۴). چنان که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، نازل به‌ازای قطر 1 mm برای مجرای خروجی مایع از قابلیت تأمین دبی در بازه‌ی $1 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ تا $3 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ با به‌ازای اختلاف فشاری در محدوده‌ی 811 Pa تا 7303 Pa برخوردار است. این در حالی است که تأمین دبی $1 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ تا $3 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ در شکل ۲ ج برای قطرهای مختلف مجرای خروجی مایع براساس اختلاف فشاری در محدوده‌ی 981 Pa تا 5886 Pa (شکل ۲ ب) حاصل شده است. مقایسه‌ی این دو محدوده‌ی اختلاف فشار نشان‌گر تفاوتی اندک (با دقت در بسیار کوچک‌بودن واحد پاسکال) است، که مؤید امکان‌پذیری استفاده از قطر 1 mm برای خروجی مجرای مایع است.

۲. جریان هوای فشرده: در طرح نازل، جریان هوای فشرده از طریق یک مجرای استوانه‌یی به موازات محور مرکزی وارد نازل می‌شود (شکل ۱ ب). انتهای این مجرا به بخشی از یک محفظه‌ی حلقوی (ناحیه‌ی C در شکل ۱ ب) منتهی می‌شود که امکان استقرار و شکل‌گیری جریان هوای فشرده را در حلقه‌یی حول محور مرکزی نازل فراهم می‌سازد. به بیان دیگر، تعبیه‌ی این محفظه‌ی حلقوی باعث تبدیل جریان هوای فشرده از جریانی موازی با محور مرکزی در ورود به نازل، به جریانی هم‌محور با محور مرکزی در قسمت میانی نازل می‌شود. در این حالت، امکان تغذیه‌ی هوای فشرده به صورت متقارن محوری به محفظه‌ی اختلاط و قطره‌سازی فراهم می‌شود. با توجه به این که مجرای جریان مایع روی محور مرکزی نازل تعبیه شده است (شکل ۱ ب)، ورود متقارن هوای فشرده به محفظه‌ی اختلاط و قطره‌سازی پس از مکش مایع به این محفظه، امکان قطره‌شدن و سپس رانش یک‌نواخت قطرات مایع به خارج از نازل را میسر می‌سازد.

در این بررسی برای تعیین قطر گلوگاه نازل از رویکردی تک‌فازی مبتنی بر عبور جریان هوای فشرده در غیاب جریان مایع استفاده شده است. عملکرد یک نازل دوسیاله در قطره‌سازی جریان مایع و تشکیل اسپری قطرات متأثر از عواملی است که مهم‌ترین آنها را می‌توان در انرژی جنبشی جریان هوای فشرده، کشش سطحی، گران‌روی (ویسکوزیته) و چگالی مایع مسترد دانست. [۹] در طراحی نازل برای یک مایع مشخص (با خواص فیزیکی ثابت) مورد نظر باشد، انرژی جنبشی جریان هوای فشرده نقشی اساسی ایفا می‌کند. با توجه به این که انرژی جنبشی جریان هوای فشرده معادل $\frac{1}{2} \rho_a u_a^2$ است، برای شرایط ایده‌آل قطره‌سازی باید اولاً به بیشینه‌ی سرعت هوای فشرده، $(u_a)_{max}$ ، و ثانیاً به بیشترین شار جرم عبوری هوای فشرده، $(\rho_a u_a)_{max}$ ، دست یافت. تأمین این دو هدف مستلزم

جدول ۱. برخی از خواص مواد گزینده ساخت.

خواص	ماده	پلاکسی گلاس	پی وی سی	تفلون
$\rho(\text{kgm}^{-3})$	۱,۱۹	۱,۴۳	۱,۲۰	
Hardness(Shore)	۸۹D	۸۰D	۷۹D	
Tensile(MPa)	۴۸,۲	۴۹,۰	۶۱,۰	
$\rho_r(\Omega\text{m})$	>	>	>	
	$1,725 \times 10^{11}$	$1,725 \times 10^{11}$	$1,725 \times 10^{11}$	

به دست داد که حاکی از عدم تأثیر قیمت است. لذا پلاکسی گلاس با در نظر گرفتن ملاحظات فوق برای ساخت نازل انتخاب شد.

نکته‌ی دوم که در طرح و ساخت نازل مورد توجه قرار گرفت ساختار و پیکره‌بندی نازل است به نحوی که جریان هوای فشرده، جریان مایع و باردارسازی الکتریکی بتوانند به سهولت مأموریت‌های مورد نظر را به انجام برسانند. در این راستا، طرح نازل به صورت دوپارچه (دوتکه) متشکل از یک بدنه اصلی و یک درپوش (کدگی) در نظر گرفته شد (شکل ۵، و نیز دقت در شکل ۱ ب) که ضمن رعایت آب‌بندی و هوابندی (با استفاده از ارینگ) بر روی هم پیچ می‌شوند. بدنه نازل این امکان را فراهم می‌سازد تا جریان هوای فشرده، جریان مایع و جریان باردارسازی الکتریکی بر روی یک سطح مشترک و به موازات محور مرکزی به نازل وارد شوند. بدنه نازل همچنین فضای لازم را برای تغییر و تصحیح مسیر جریان هوای فشرده به منظور ورود متقارن به محفظه‌ی اختلاط و قطره‌سازی فراهم می‌سازد (چنانچه به ضرورت آن در قسمت سوم اشاره شد).

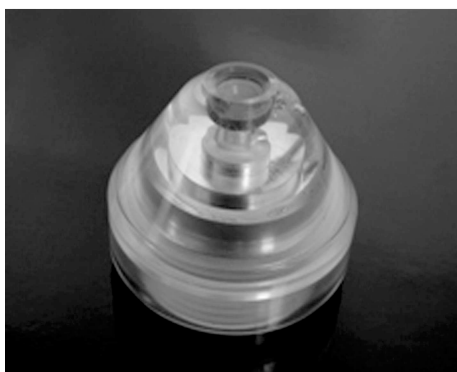
بدین ترتیب، طرح دوپارچه از یک سو امکان تفکیک جریان‌های هوا، مایع و باردارسازی الکتریکی از یکدیگر را در بدنه نازل فراهم می‌سازد، و از سوی دیگر امکان وقوع فرایندهای اختلاط، قطره‌سازی و باردارسازی را در فضای درپوش نازل میسر می‌سازد. بنابراین می‌توان در صورت بروز هرگونه اختلالی در فرایندهای مزبور، عملیات اصلاحی مورد نیاز را صرفاً روی درپوش نازل به اجرا درآورد. لازم به توضیح است که در این طرح دوپارچه، تفکیک‌پذیری الکتروود حلقوی باردارساز (با اتصال با واسطه‌ی آن به) منبع تغذیه الکتریکی با استفاده از یک مجموعه‌ی بین و فزر صورت گرفته است که نیروی لازم فزر برای جلوگیری از پین، طی پیچاندن درپوش روی بدنه فراهم می‌شود (شکل ۱ ب).

۴. جنس و ساختار نازل: در طرح و ساخت نازل دو نکته‌ی اصلی مورد توجه قرار گرفته است. نخست این که برای جنس بدنه نازل، با توجه به اعمال ولتاژ الکتریکی (در حد چندین کیلو ولت) به الکتروود حلقوی، باید از ماده‌ی عایق الکتریکی استفاده شود. بدین منظور با جست‌وجو در بازار داخلی ایران و در میان مواد پلاستیکی موجود، فراوانی سه ماده‌ی ترموپلاست با اسامی رایج پلاکسی گلاس (و بعضاً به نام اکریلیک)، پی وی سی، و تفلون مورد تأیید قرار گرفت. از آنجا که تأمین این مواد صرفاً جنبه‌ی تجاری داشته و خواص الکترومکانیکی آنها برای فروشندگان مربوطه روشن نیست، لذا در وهله‌ی نخست آگاهی از خواص این مواد ضرورت می‌یابد. بدین منظور خواص مورد نظر با تهیه‌ی این مواد و انتخاب نمونه‌هایی از آنها مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج حاصله در جدول ۱ ارائه شده است. یادآور می‌شود که برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی ویژه (ρ_r) از یک دستگاه آزمایشگر مقاومت عایق^{۱۵} (مدل ۱۱۷۵۱-۳۴۵۴، ساخت شرکت ژاپنی Hioki با بیشینه‌ی مقاومت قابل اندازه‌گیری معادل $10^9 \Omega$ تحت ولتاژ 1000 VDC) استفاده شد. در این راستا، نمونه‌ی بی ماده‌ی عایق به صورت ورقی در ابعاد $250 \times 250 \times 2$ میلی‌متر تهیه و تحت ولتاژ آزمایش قرار گرفت که نتیجه‌ی حاصل برای مواد مختلف با پیام «خارج از محدوده‌ی اندازه‌گیری» مواجه شد که حاکی از مقاومتی بیش از $4000 \text{ M}\Omega$ است. از این رو، با این فرض که مقاومت ماده‌ی عایق منطبق بر حد بیشینه‌ی آزمایشگر باشد، مقاومت الکتریکی ویژه ماده با توجه به ابعاد نمونه برابر با $1,725 \times 10^{11} \Omega\text{m}$ خواهد بود. از طرفی مقاومت الکتریکی ویژه‌ی مواد عایق بیش از $10^9 \Omega\text{m}$ ^[۲۷] و لذا می‌توان از نارسایی الکتریکی مواد مزبور مطمئن شد.

در مرحله‌ی بعد، سه نمونه مخروط ناقص توخالی (در تناسب با طرح نازل) از سه ماده‌ی مزبور به روش تراشکاری ساخته شد تا از قابلیت ماشین‌کاری آن مواد ارزیابی اولیه‌ی انجام شده باشد. نتایج حاصل از ماشین‌کاری برای مواد پلاکسی گلاس و پی وی سی نشان داد که این دو ماده، بدون تغییر شکل ظاهری، از تراش‌پذیری مناسبی برخوردارند. در مقابل، ماده‌ی تفلون به رغم تراش‌پذیری خوب، با مشکل حبابی بودن بخشی از حجم این ماده (حین تراش محور مرکزی مخروط ناقص) مواجه شد که حاکی از ناهمگنی و کیفیت پایین این ماده بود. از این رو مواد پلاکسی گلاس و پی وی سی به عنوان گزینه‌های موجود برای ساخت مد نظر قرار گرفتند. شفافیت پلاکسی گلاس، که از یک سو امکان تشخیص هرگونه ناهمگنی را در حجم درونی ماده‌ی تهیه‌شده میسر می‌سازد و از سوی دیگر دید بصری (با در نظر گرفتن ضریب شکست نور) را از جریان مایع در درون نازل ممکن می‌سازد، به عنوان مزایای این ماده در مقایسه با پی وی سی مورد توجه قرار گرفتند. قیمت واحد حجم پلاکسی گلاس به پی وی سی نیز به عنوان شاخص ثانویه در نظر گرفته شد که رقمی تقریباً معادل ۱ را



الف) بدنه؛



ب) درپوش.

شکل ۵. تصویری از اجزای اصلی نازل دوسیاله با جریان اختلاط درونی.

چیدمان تجربی

برای راه‌اندازی و آزمایش عملکرد نازل از یک چیدمان تجربی مطابق شکل ۶ استفاده شده است. این چیدمان تجربی از حیث طرح و المان‌های موجود دقیقاً منطبق بر چیدمانی است که در بررسی نازل مینا مورد استفاده قرار گرفت. عدم ایجاد تغییر در چیدمان قبلی به دلیل کارایی مناسب آن در تأمین هوا، مایع و ولتاژ تحت شرایط پایدار و نیز با هدف مقایسه‌پذیر کردن نتایج حاصل از بررسی نازل حاضر با نازل مینا صورت گرفته است. به عبارت دیگر، چیدمان مورد استفاده امکان اندازه‌گیری پارامترهای مشابه با نازل مینا را دقیقاً با شرایط کنترلی و پایشی یکسان فراهم می‌سازد. با توجه به تشریح نسبتاً مبسوطی که از چیدمان آزمایش در مقاله‌ی پیشین ارائه شد، [۲۳] ابعاد کلی این چیدمان به‌طور موجز در مقاله‌ی حاضر بیان می‌شود.

چیدمان تجربی (شکل ۶) به‌طور همزمان امکان تأمین جریان هوای فشرده، جریان مایع و ولتاژ باردارسازی را برای نازل فراهم می‌سازد. المان‌های مورد استفاده در این چیدمان با نماد A برای نازل، B۱ تا B۹ برای خط هوای فشرده، C۱ تا C۵ برای خط جریان مایع و D۱ و D۲ برای خط ولتاژ الکتریکی مشخص شده‌اند. هر یک از این المان‌ها در جدول ۲ معرفی شده‌اند و کلیات عملکردی چیدمان (شکل ۶) به شرح زیر است:

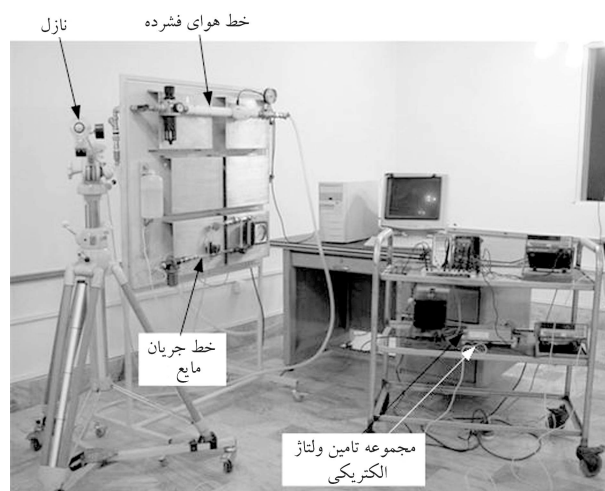
نماد	شرح
A	نازل دوسیماله درون اختلاط القایی
B۱	کمپرسور هوا
B۲	مخزن هوای فشرده
B۳	صافی توری فلزی
B۴	شیر قطع و وصل دستی
B۵	تنظیم‌کننده هوا
B۶	فیلتر کاغذی هوا
B۷	دبی‌سنج هوا
B۸	دما و فشارسنج ترکیبی
B۹	فشارسنج
C۱	مخزن مدرج مایع
C۲	صافی توری فلزی
C۳	شیر قطع و وصل برقی
C۴	شیر کنترلی سوزنی
C۵	دبی‌سنج مایع
D۱	باتری ۲۴VDC
D۲	منبع تغذیه ولتاژ بالا

۱. خط هوای فشرده: این خط شامل ۹ المان است که بر روی یک تابلوی عمودی با استفاده از اتصالات پیچ و مهره از نوع انطباق فشاری ۱۶ و از طریق لوله‌ی ترموپلاستیکی به یکدیگر متصل شده‌اند. در این خط، هوای اتمسفر پس از فشرده‌سازی توسط یک کمپرسور (B۱) و ذخیره در یک مخزن (B۲) با گذر از یک صافی دارای توری برنجی (B۳) و سپس یک شیر قطع و وصل دستی (B۴) به یک تنظیم‌کننده‌ی فشار هوا (B۵) مجهز به فشارسنج و رطوبت‌گیر متداخل وارد می‌شود. در این نقطه فشار هوای فشرده (P_1) برای تغذیه‌ی به نازل روی مقدار مورد نظر تنظیم می‌شود.

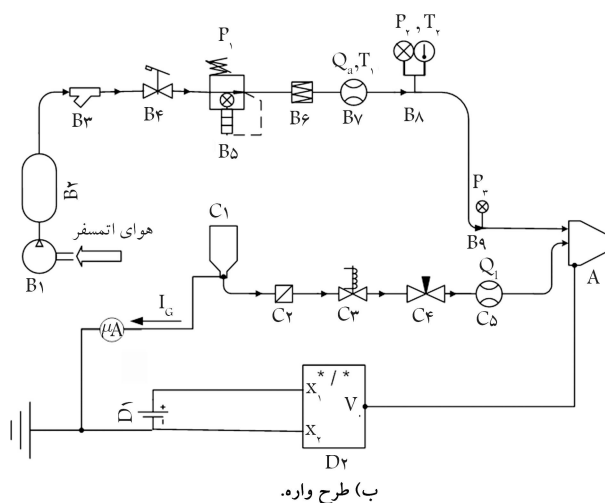
هوای فشرده پس از تنظیم فشار در تنظیم‌کننده از یک ریزفیلتر کاغذی (B۶) عبور کرده و دبی و دمای آن توسط یک دبی‌سنج دیجیتالی (B۷) اندازه‌گیری می‌شود. در حد فاصل میان دبی‌سنج و نازل از یک دما و فشارسنج ترکیبی (B۸)، و نیز در ورود به نازل از یک فشارسنج (B۹) استفاده شده است. در این حالت امکان پایش فشار و دمای جریان هوای فشرده علاوه بر تنظیم‌کننده (B۵) در دو نقطه‌ی دیگر در طول مسیر هوا به نازل فراهم می‌شود. تعبیه‌ی این دو نقطه‌ی پایش و مقایسه‌ی آنها با فشار تنظیم‌کننده این امکان را فراهم می‌سازد تا از پایداری فشار و دما و عدم وجود نشتی در خط جریان هوای فشرده اطمینان حاصل شود.

۲. خط جریان مایع: این خط مطابق شکل ۶ دارای پنج المان است که همانند خط هوای فشرده با استفاده از اتصالات پیچ و مهره از نوع انطباق فشاری و از طریق لوله‌ی ترموپلاستیکی به یکدیگر متصل شده‌اند. در این خط، مایع در مخزنی پلاستیکی (C۱) ذخیره می‌شود که این مخزن بر روی شیار عمودی استقرار یافته است. در این حالت، امکان جابه‌جایی عمودی مخزن نسبت به خروجی نازل فراهم می‌شود و لذا می‌توان ارتفاع مکش مایع را نسبت به نازل تغییر داد.

جریان مایع از مخزن به یک صافی فلزی (C۲) و سپس به یک شیر قطع و وصل



الف) تصویر واقعی؛



ب) طرح واره.

شکل ۶. چیدمان تجربی آزمایش.

تغییر کمیت‌های مجموعه‌ی اول است. این کمیت‌ها شامل دبی هوای فشرده (Q_a)، فشار هوای فشرده در دما و فشار سنخ ترکیبی (P_1)، فشار هوای فشرده در ورود به نازل (P_2)، جریان الکتریکی مخزن مایع (I_G) و جریان الکتریکی اسپری (I_F) هستند. کمیت‌های گروه دوم، جریان برگشتی منبع تغذیه (I_S) را نیز در بر می‌گیرند که از طریق مدار راه‌انداز منبع تغذیه اندازه‌گیری می‌شود. علاوه بر کمیت‌های فوق باید از بار الکتریکی ویژه^{۱۸} نیز یاد کرد. این کمیت از خارج قسمت جریان الکتریکی اسپری (I_F) بر دبی مایع (Q_i) حاصل می‌شود:

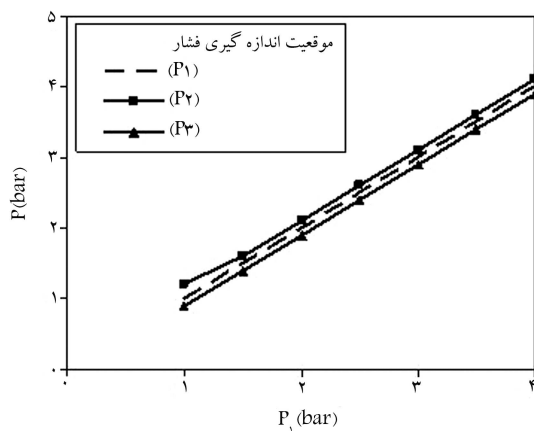
$$\rho_S = \frac{I_F}{Q_i} \quad (3)$$

که شاخصی از بار الکتریکی در واحد حجم قطرات اسپری است.

پیش‌آزمایش

عملکرد چیدمان آزمایش با استفاده از نازل مینا در مطالعات قبلی مورد ارزیابی قرار گرفته است. از آنجا که این چیدمان در بررسی حاضر در ارتباط با مطالعه‌ی عملکرد نازلی دیگر به‌کار گرفته شده، لذا حصول اطمینان مجدد از عملکرد پایدار و صحیح چیدمان آزمایش، قبل از انجام آزمایش‌های اصلی، ضروری به نظر می‌رسد. برای این منظور، پایداری فشار و دما در خط جریان هوای فشرده، و صحت مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی دبی مایع و ولتاژ خروجی منبع تغذیه مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در تمامی مراحل پیش‌آزمایش و نیز آزمایش‌های اصلی از آب شیر به‌عنوان مایع اسپری^{۱۹} استفاده شده است. از آنجا که باردارسازی القایی مایعات برای تولید اسپری قطرات باردار مستلزم استفاده از مایعات رسانا (مایعاتی با مقاومت الکتریکی ویژه کم‌تر از $10^4 \Omega m$) است،^[۲۸] بنابراین از آب شیر^{۲۰} در چندین مرحله نمونه‌برداری شد و سپس رسانایی الکتریکی آن با اندازه‌گیری هدایت الکتریکی ویژه (معکوس مقاومت الکتریکی ویژه) مورد بررسی قرار گرفت. در نتیجه‌ی این اندازه‌گیری‌ها، مقاومت الکتریکی ویژه‌ی آب شیر را به‌طور میانگین معادل $1674 \Omega m$ برآورد شد که این مقدار مؤید رسانایی الکتریکی این مایع و لذا سازگاری آن با باردارسازی القایی است.

در شکل ۸ نمودار تغییرات فشار هوای فشرده، در دما و فشارسنج ترکیبی (P_2) و فشارسنج مستقر در ورودی نازل (P_1) برحسب فشار تنظیم‌کننده (P_1) نشان داده شده است (شکل ۶ ب). مطابق این نمودار، P_2 و P_1 از تغییرات خطی نسبت به P_1 پیروی می‌کنند. مقادیر بالاتر P_2 نسبت به P_1 را می‌توان ناشی از افزایش سطح



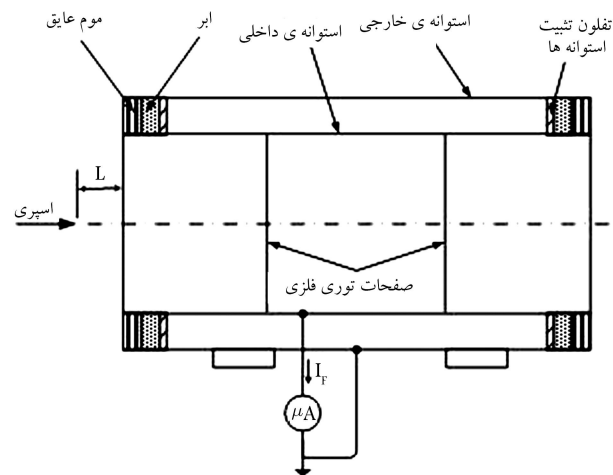
شکل ۸. تغییرات فشار در خط هوای فشرده برحسب فشار تنظیم‌کننده (رگلاتور).

برقی (C۳) هدایت می‌شود. پس از این شیر از یک شیر سوزنی (C۴) برای تنظیم دبی جریان مایع استفاده شده است که مقدار این دبی توسط دبی‌سنج آنالوگ (C۵) اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۶ ب همچنین نشان می‌دهد که خط جریان مایع از طریق یک اتصال فولادی زنگ‌نزن (تعبیه‌شده در خروجی مخزن مایع) به زمین (پتانسیل صفر) متصل شده است تا با بسته شدن مدار الکتریکی امکان انتقال جریان الکتریکی به مایع و وقوع فرایند باردارسازی میسر شود.

۳. خط جریان الکتریکی: این خط از دو المان اصلی شامل باتری (D۱) و منبع تغذیه‌ی ولتاژ بالا (D۲) تشکیل شده است (شکل ۶ ب). باتری به‌عنوان منبع انرژی، نقش راه‌انداز منبع تغذیه‌ی ولتاژ بالا را ایفا می‌کند. منبع تغذیه مستقیماً به نازل (الکتروود القایی) متصل شده است و با اعمال ولتاژ بر نازل امکان باردارسازی القایی قطرات اسپری را فراهم می‌کند. عملکرد منبع تغذیه توسط یک مدار راه‌انداز جانبی کنترل می‌شود که در این مدار با تنظیم ولتاژ تحریک V_C (در بازه‌ی ۱۰-۰ VDC) می‌توان ولتاژ خروجی منبع تغذیه V_o (در بازه‌ی ۵۰۰۰ VDC) تا ۱۰ را تغییر داد. این مدار همچنین امکان پایش جریان برگشتی منبع تغذیه و تغییر قطبیت ولتاژ خروجی را میسر می‌سازد.

علاوه بر چیدمان تجربی از یک مجموعه استوانه‌ی هم‌مرکز مطابق شکل ۷ برای اندازه‌گیری بار الکتریکی اسپری استفاده شده است. این مجموعه متشکل از دو استوانه‌ی هم‌مرکز است که از نظر الکتریکی از یکدیگر ایزوله شده‌اند. استوانه‌ی خارجی با اتصال به زمین همچون یک قفس فارادی^{۱۷} از تأثیر میدان‌های الکتریکی موجود در محیط بر اسپری باردار جلوگیری می‌کند. استوانه‌ی داخلی نیز در تماس مستقیم با پاشش اسپری امکان اندازه‌گیری جریان الکتریکی قطرات اسپری را از طریق یک میکرو آمپرتر فراهم می‌کند.

حال پس از معرفی چیدمان آزمایش (شکل‌های ۶ و ۷) و با توجه به اهمیت کمیت‌های مختلف در این چیدمان، در ادامه‌ی این نوشتار مناسب است مروری بر این کمیت‌ها داشته‌باشیم. کمیت‌های مطرحه در چیدمان آزمایش را می‌توان در قالب دو مجموعه دسته‌بندی کرد. مجموعه‌ی اول با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ شامل کمیت‌هایی هستند که امکان کنترل و تنظیم مستقیم آنها توسط اپراتور وجود دارد. این کمیت‌ها، فشار هوا در تنظیم‌کننده (P_1)، دبی جریان مایع (Q_1)، ولتاژ خروجی منبع تغذیه (V_o) و فاصله‌ی خروجی نازل از استوانه‌ی اندازه‌گیری جریان اسپری (L) هستند. مجموعه‌ی دوم را کمیت‌هایی تشکیل می‌دهند که تنظیم آنها متأثر از



شکل ۷. طرح‌واره‌ی استوانه‌ی اندازه‌گیری جریان الکتریکی اسپری.^[۲۳]

صرف‌شده برای تخلیه‌ی حجم معینی از مایع (از طریق پایش مخزن مدرج مایع) مقایسه شده است. براین اساس، در شکل ۱۰ خطای نسبی دبی‌سنج مایع برحسب فشار هوا نشان داده شده است. مطابق این شکل، دبی‌سنج مایع در مجموع از خطای نظام‌مند کم‌تر از ۷٪ برخوردار است که در فشارهای $P_1 > 1.5 \text{ bar}$ به کم‌تر از ۵٪ کاهش می‌یابد. بنابراین با استناد به گواهی کالیبراسیون دبی‌سنج مایع مبنی بر وجود خطای کم‌تر از ۶٪ برای اندازه‌گیری دبی‌های مایع در مقادیری بیشتر از 4 Lh^{-1} (66.67 mLmin^{-1})^[۲۹] می‌توان با اعتماد بر مشخصات عملکردی گزارش‌شده توسط سازنده از دبی‌سنج مایع در چیدمان آزمایش بهره جست.

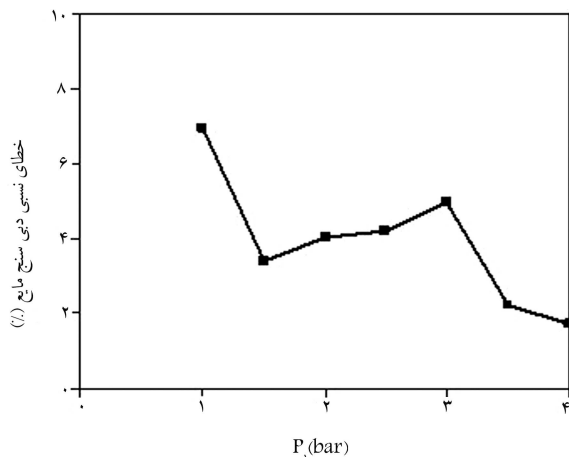
عملکرد منبع تغذیه با اندازه‌گیری جریان برگشتی ولتاژ خروجی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. همان‌طور که بیشتر اشاره شد، برای راه‌اندازی منبع تغذیه از یک مدار جانبی استفاده می‌شود که با تغییر ولتاژ کنترل V_C (در بازه‌ی ۱۰ VDC تا ۰)، امکان تغییر ولتاژ خروجی منبع تغذیه V_O (در محدوده‌ی ۵۰۰۰ VDC تا ۱۰) را فراهم می‌سازد. تغییرات جریان برگشتی برحسب ولتاژ کنترل در حالت بدون بار در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این شکل، تغییرات خطی جریان برگشتی و مطابقت کامل داده‌های اندازه‌گیری با داده‌های سازنده به‌وضوح مشاهده می‌شود.

ارزیابی ولتاژ خروجی منبع تغذیه در دو مرحله صورت گرفته است. در مرحله‌ی اول، ولتاژ خروجی منبع تغذیه به‌طور مستقیم و با استفاده از یک مولتی‌متر (با ولتاژ

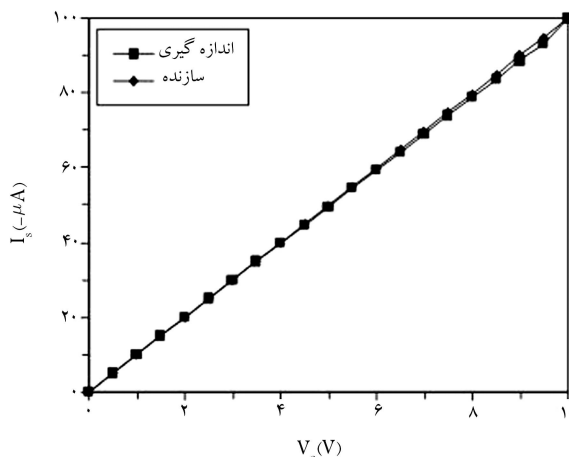
مقطع جریان) انبساط) در ورود به دما و فشارسنج ترکیبی دانست، و نیز مقادیر پایین‌تر P_2 نسبت به P_1 را می‌توان حاصل کاهش سطح مقطع جریان (انقباض) در ورود به فشارسنج مستقر در ورودی نازل معرفی کرد. با این حال، اختلاف نسبی P_2 و P_1 با P_1 به کم‌تر از ۱٪ محدود می‌شود که آن هم در فشارهای $P_1 < 2 \text{ bar}$ به کم‌تر از ۵٪ تقلیل می‌یابد. این موضوع مؤید این نکته است که بخش اندکی از انرژی فشاری جریان هوای فشرده از یک سو صرف فایز آمدن برافت فشار مسیر، و از سوی دیگر صرف تبدیل به انرژی جنبشی (در اثر تغییر سطح مقطع جریان) می‌شود. لذا می‌توان فشار P_1 را به‌عنوان شاخص فشار در خط هوای فشرده در نظر گرفت.

در شکل ۹ نمودار تغییرات لحظه‌ی دبی و دمای هوای فشرده نشان داده شده است. در این شکل می‌توان پایایی دبی و دمای هوای فشرده را مشاهده کرد و از تأمین شرایط پایدار توسط چیدمان آزمایش طی انجام آزمایش‌های اصلی اطمینان یافت. مطابق شکل ۹ ب، اگرچه افزایش فشار موجب ازدیاد دبی جریان می‌شود، این افزایش تأثیری بر دمای جریان نداشته و لذا جریان هوای فشرده از شرایط هم‌دمایی برخوردار است.

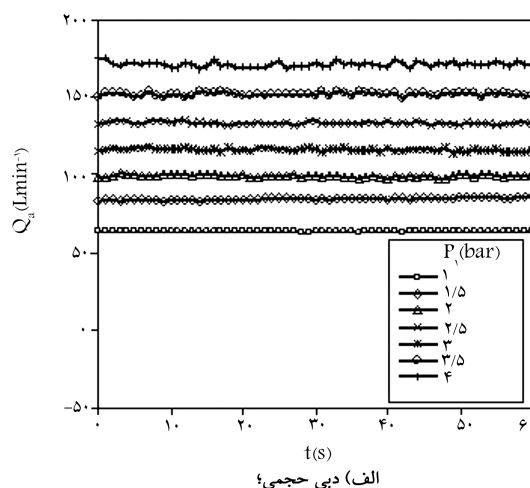
برای ارزیابی صحت عملکرد دبی‌سنج مایع (المان C5 در شکل ۶ ب)، مقادیر اندازه‌گیری شده توسط این دبی‌سنج به‌طور هم‌زمان با مقادیر حاصل از سنجش زمان



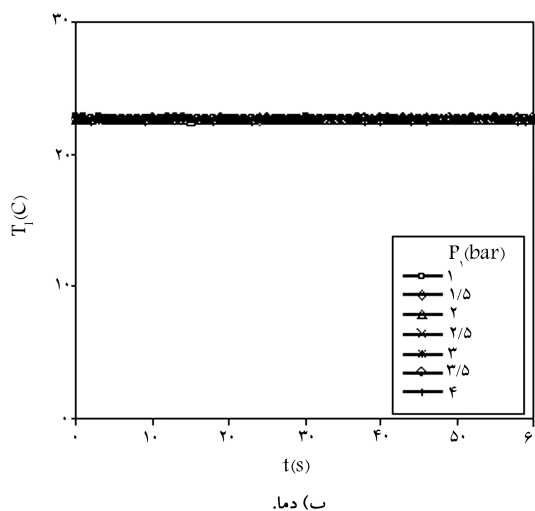
شکل ۱۰. تغییرات خطای نسبی اندازه‌گیری در دبی‌سنج مایع برحسب فشار تنظیم‌کننده (رگلاتور).



شکل ۱۱. جریان برگشتی منبع تغذیه برحسب ولتاژ تحریک.

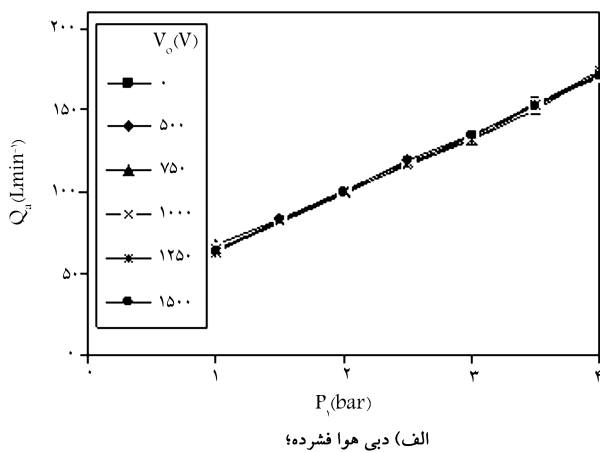


الف) دبی حجمی؛

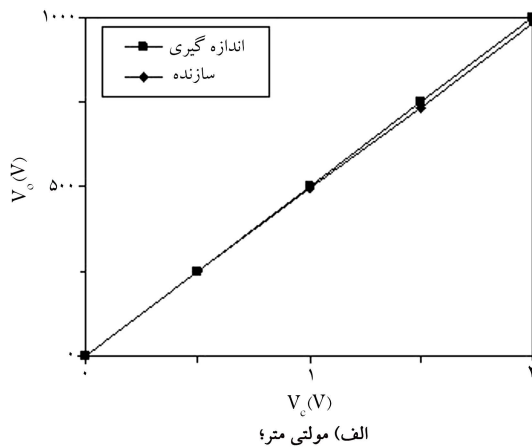


ب) دما.

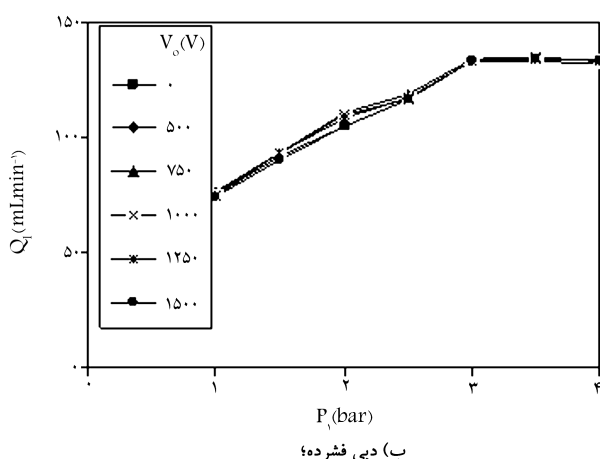
شکل ۹. تغییرات گذرای مشخصه‌های جریان هوای فشرده.



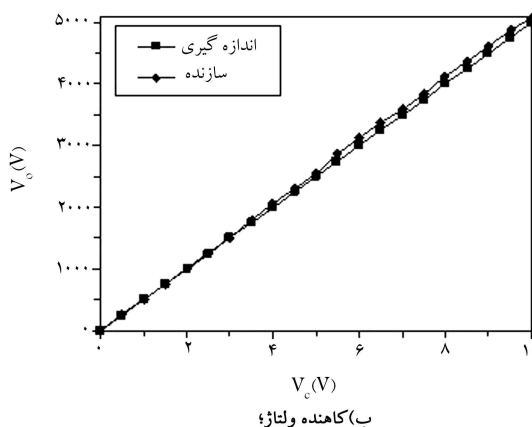
الف) دبی هوا فشرده؛



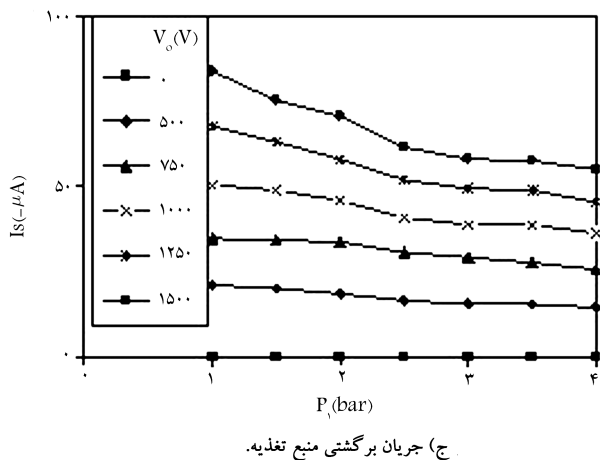
الف) مولتی متر؛



ب) دبی فشرده؛



ب) کاهنده ولتاژ؛



ج) جریان برگشتی منبع تغذیه.

شکل ۱۲. ولتاژ خروجی منبع تغذیه براساس استفاده از ابزار اندازه‌گیری مختلف.

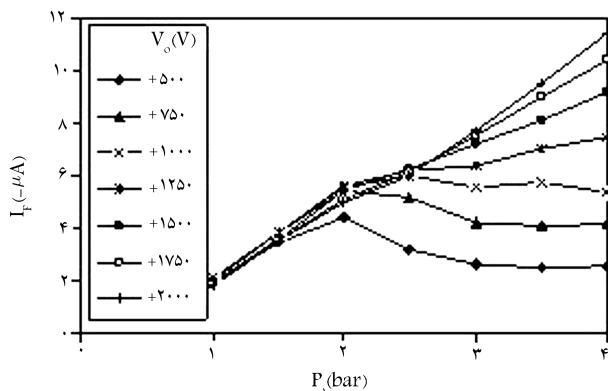
بیشینه‌ی مجاز 1100VDC (مدل Iwatsu SC-۲۴۰۳) اندازه‌گیری شده است. با استفاده از این راهکار، تغییرات ولتاژ خروجی برحسب ولتاژ کنترلی منبع تغذیه مطابق شکل ۱۲ الف است که مؤید عملکرد صحیح منبع تغذیه در محدوده‌ی مورد اندازه‌گیری است. محدودیت مقاومت درونی مولتی‌مترهای معمولی مانع اندازه‌گیری مستقیم ولتاژ بالای منبع تغذیه است و لذا استفاده از کاهنده‌ی ولتاژ برای اندازه‌گیری ولتاژهای بالا اجتناب‌ناپذیر است. در این راستا و برای کسب اطمینان بیشتر، اندازه‌گیری ولتاژ خروجی با استفاده از یک کاهنده‌ی ولتاژ^{۲۱} (مدل HIOKI-۹۰۱۶) با ولتاژ بیشینه‌ی مجاز 3 kVDC و ضریب کاهندگی $(1:800)$ صورت گرفته است (شکل ۱۲ ب). این شکل به خوبی مؤید روند خطی تغییرات ولتاژ خروجی و هم‌خوانی کتی و کیفی میان نتایج حاصل از اندازه‌گیری و داده‌های سازنده است. بر همین اساس می‌توان با اطمینان کامل، از منبع تغذیه برای اعمال ولتاژ به نازل استفاده کرد.

نتایج و بحث

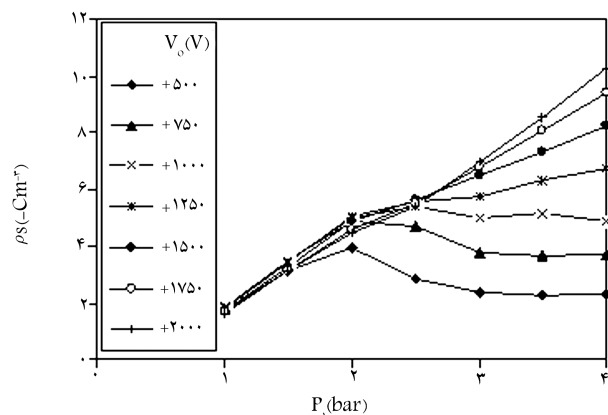
در این بخش نتایج حاصل از آزمایش نازل مورد بحث در بخش‌های قبلی ارائه می‌شود. در شکل ۱۳ نمودار تغییرات دبی هوای فشرده (Q_0) ، دبی جریان مایع (Q_1) و جریان برگشتی منبع تغذیه (I_S) برحسب تغییرات فشار تنظیم‌کننده‌ی هوا (P_1) و به‌ازای مقادیر مختلف ولتاژ باردارسازی (V_0) نشان داده شده است. مطابق این شکل، دبی جریان‌های هوای فشرده و مایع فقط تابعی از فشار هوای فشرده‌اند و

شکل ۱۳. تأثیر فشار تنظیم‌کننده به‌ازای مقادیر مختلف ولتاژ بر مشخصه‌های جریان هوای فشرده، جریان مایع و منبع تغذیه.

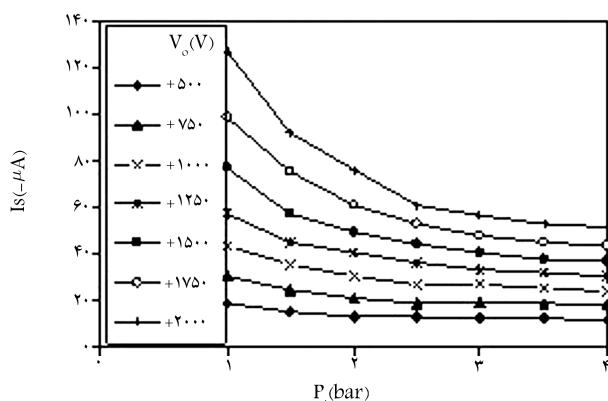
تغییر ولتاژ تأثیر چندانی بر مقدار و روند تغییرات آنها ندارد. این موضوع بیان‌گر غلبه‌ی نیروی آژودینامیکی ناشی از انرژی جنبشی جریان هوای فشرده است که در مکش مایع به درون نازل، گسسته‌سازی این جریان به صورت قطرات، و سپس پاشش این قطرات به صورت اسپری به خارج از نازل نقش اساسی دارد. در این حالت به‌طور هم‌زمان باردارسازی الکتریکی (القایی) قطرات در درون نازل بر اثر اعمال ولتاژ به‌وقوع می‌پیوندد و چنان‌که در بخش قبل نیز بیان شد این فرایند موجب تولید قطرات



الف) جریان الکتریکی اسپری؛



ب) بار الکتریکی ویژه اسپری؛



ج) جریان برگشتی منبع تغذیه.

شکل ۱۴. تأثیر فشار تنظیم‌کننده به‌ازای مقادیر مختلف ولتاژ القایی و مقادیر ثابت منبع تغذیه. $Q_i = 67.7 \text{ mLmin}^{-1}$ (4 Lh^{-1}) و $L = 12 \text{ cm}$ بر مشخصه‌های اسپری و

۱۴ الف نشان داده شده، افزایش ولتاژ در یک فشار ثابت، موجب ازدیاد جریان الکتریکی اسپری قطرات می‌شود. ثابت بودن فشار هوا، با توجه به وابستگی دبی هوا به فشار (شکل ۱۳ الف) مترادف با جرم عبوری ثابتی از هوا از درون نازل، و نیز ثابت بودن دبی مایع مترادف با عبور جرم ثابتی از مایع از درون نازل است. در این حالت، افزایش ولتاژ باردارسازی با تقویت میدان الکتریکی اعمال شده بر جرم ثابتی از مایع در درون نازل موجب افزایش نرخ بار الکتریکی انتقال یافته به قطرات اسپری

باردار با بار الکتریکی مخالف و با قطبیت الکترومی‌شود. لذا قطرات مایع علاوه بر نیروی ناشی از جریان هوای فشرده تحت تأثیر نیروی جاذبه‌ی الکتریکی میان قطرات و الکتروود باردارسازی و نیز نیروی دافعه‌ی میان قطرات (با بار الکتریکی همنام) قرار می‌گیرند، اما این نیروهای جاذبه و دافعه‌ی الکتریکی در درون نازل به‌اندازه‌ی بی‌نیستند که بتوانند در مقابل نیروی آژودینامیکی هوای فشرده بر رفتار هیدرولیکی نازل (مستتر در دبی جریان‌های هوای فشرده و مایع) اثرگذار باشند.

همچنین در شکل ۱۳ ب مشاهده می‌شود که دبی مایع در فشار هوای ۳ bar به مقدار بیشینه‌ی خود رسیده و پس از آن فشار، روندی تقریباً ثابت را با اندکی نزول طی می‌کند. مقدار بیشینه‌ی دبی مایع را می‌توان ناشی از وقوع خفگی در نازل دانست که در فشار ۳ bar (معادل فشار مطلق $P_o = 4 \text{ bar}$) اتفاق افتاده است. این در حالی است که مطابق محاسبات ارائه‌شده در بخش قبلی، قطر گلوگاه نازل برای وقوع خفگی در ۲.۵ bar (معادل فشار مطلق $P_o = 3.5 \text{ bar}$) برآورد شده است. با رجوع به توضیحات مطرح‌شده در مقدمه و نیز در تبیین روند طراحی، و با توجه به فقدان روشی مؤثر برای تخمین قطر گلوگاه جهت جریان دوفازی هوا-مایع، برای این منظور از روش‌های کلاسیک جریان تراکم‌پذیر استفاده شد. در حالی که عملاً فاز مایع نیز علاوه بر هوای فشرده از گلوگاه عبور می‌کند و لذا سطح مقطع عبور جریان هوای فشرده کم‌تر از مقداری خواهد بود که در محاسبات قبلی و فقط برای عبور جریان هوای فشرده در نظر گرفته شده است. این کاهش سطح مقطع جریان هوای فشرده در حضور جریان مایع باعث می‌شود تا خفگی به‌ازای سطح مقطع کوچک‌تر (A_c کم‌تر) در رابطه‌ی ۲، نیازمند فشار (P_o) بالاتری باشد که در عمل فشار محاسبه‌شده‌ی ۲.۵ bar را با ۰.۵ bar تفاوت (معادل ۱۶.۷٪ خطای نسبی) به فشار ۳ bar افزایش داده است. این موضوع نکته‌ی است که طراح باید در تخمین قطر بحرانی گلوگاه آن را مد نظر قرار دهد به‌طوری که ضمن بهره‌گیری از روابط گاز تراکم‌پذیر، برای حضور جریان مایع در نازل و در نتیجه کاهش سطح مقطع جریان گاز از یک ضریب تصحیح نیز استفاده کند.

چنان که در شکل ۱۳ ج نشان داده شده، افزایش فشار هوای فشرده موجب کاهش جریان برگشتی منبع تغذیه می‌شود در حالی که افزایش ولتاژ باردارسازی به افزایش آن جریان می‌انجامد. به‌ازای مقدار ثابتی از فشار هوا، افزایش ولتاژ باردارسازی با تقویت میدان الکتریکی شکل‌گرفته میان الکتروود حلقوی باردارسازی و جریان مایع زمینه‌ی انتقال جریان الکتریکی بیشتری را به قطرات مایع فراهم می‌سازد. در این حالت منبع تغذیه با مصرف انرژی بیشتر مواجه می‌شود که تأثیر آن در افزایش جریان برگشتی نمودار می‌شود. در مقابل، به‌ازای مقدار ثابتی از ولتاژ باردارسازی، افزایش فشار هوای فشرده با عبور جرم بیشتری از هوا (به‌عنوان لایه‌ی عایق دی‌الکتریک) از درون نازل موجب تقویت این لایه بر روی الکتروود حلقوی باردارسازی می‌شود. تقویت این لایه مترادف با نفوذپذیری کم‌تر قطرات باردارشده‌ی مایع به این لایه برای نشست بر روی الکتروود است. در مقابل در فشارهای پایین‌تر هوای فشرده، جرم کم‌تری از هوا با سرعتی کم‌تر، از روی سطح الکتروود باردارسازی عبور می‌کند و لذا امکان جذب و نشست قطرات مایع (به‌عنوان ماده‌ی رسانا) بر روی آن سطح نسبت به فشارهای بالاتر هوا افزایش می‌یابد. تحت این شرایط، نشست قطرات رسانای مایع بر روی سطح الکتروود به مصرف انرژی بالاتری توسط منبع تغذیه منتهی می‌شود که نتیجه‌ی آن در افزایش جریان برگشتی منبع تغذیه در فشارهای پایین‌تر هوای فشرده بروز می‌یابد.

در شکل ۱۴ تأثیر تغییرات فشار هوای فشرده و ولتاژ باردارسازی بر جریان الکتریکی اسپری قطرات (I_E)، بار الکتریکی ویژه اسپری (ρ_S) و جریان برگشتی منبع تغذیه (I_S) به‌ازای مقدار ثابتی از دبی مایع مشاهده می‌شود. چنان که در شکل

در شکل ۱۴ ج روندی کاملاً نزولی برای جریان برگشتی منبع تغذیه برحسب فشار هوا نشان داده شده است. این موضوع مجدداً مؤید نقش مثبت هوای فشرده در بارداری القایی است. افزایش فشار هوا با گسیل داشتن جرم بیشتری از هوا به درون نازل موجب تقویت لایه‌ی عایق دی‌الکتریک بر روی الکتروود بارداری می‌شود و تسهیل القای بار الکتريکی به قطرات مایع را به دنبال دارد. افزون بر این، افزایش فشار هوا با ازدیاد سرعت هوای عبوری از نازل موجب می‌شود تا قطرات اسپری از زمان ماندگاری کم‌تری برای بارداری القایی در درون نازل برخوردار شوند. در این حالت قطرات باردار با سرعت بیشتری از نازل خارج شده و فضا را برای قطرات باردار نشده‌ی بعدی به‌منظور گذر از مرحله‌ی بارداری القایی فراهم می‌سازند. به‌بیان دیگر، سازوکار بارداری القایی در فشار بالاتر هوا با مقاومت الکتريکی کم‌تری به‌واسطه‌ی ماندگاری کوتاه‌تر قطرات در درون نازل مواجه است. از این رو افزایش فشار هوا (از طریق تقویت لایه‌ی دی‌الکتریک و تسریع حرکت قطرات در درون نازل) توان مصرفی کم‌تری را بر منبع تغذیه به‌منظور بارداری القایی تحمیل می‌کند و در نتیجه شاهد کاهش جریان برگشتی خواهیم بود (شکل ۱۴ ج). همچنین در شکل ۱۴ ج نشان داده شده است که افزایش ولتاژ به‌ازای مقدار ثابتی از فشار هوا موجب ازدیاد جریان برگشتی می‌شود. این موضوع ناشی از تقویت میدان الکتريکی بر اثر افزایش ولتاژ است که با افزایش توان مصرفی منبع تغذیه (مستتر در ازدیاد جریان برگشتی) زمینه‌ساز دستیابی به سطوح بالاتری از بار الکتريکی القاشده به قطرات اسپری است (شکل ۱۴ ب).

در شکل ۱۵ تأثیر تغییر دبی مایع در فشار و ولتاژ ثابت بر بارداری الکتريکی اسپری نشان داده شده است. مطابق این شکل، افزایش دبی ثابت در فشارهای پایین متضمن روند نزولی و در فشارهای بالا متضمن روند صعودی برای جریان الکتريکی اسپری است. در هر یک از نمودارهای شکل ۱۵ الف، ثابت بودن فشار و ولتاژ به‌ترتیب به‌معنای ثابت بودن انرژی قطره‌سازی و انرژی بارداری الکتريکی اسپری است. در این حالت، افزایش دبی مایع به‌معنای قراردادن حجم بیشتری از ماده در معرض سطح ثابتی از انرژی قطره‌سازی و بارداری الکتريکی است. با توجه به ثابت بودن هندسه‌ی داخلی نازل، افزایش دبی مایع وقوع پدیده‌ی خیس‌شدگی الکتروود^{۲۳} را محتمل‌تر می‌سازد. وقوع این پدیده موجب تماس مستقیم قطرات مایع با الکتروود می‌شود و بارداری تماسی قطرات را در کنار سازوکار اصلی بارداری القایی فعال می‌کند. تحت این شرایط، قطرات باردار شده به‌روش تماسی موجب خنثی‌شدن بخش بیشتری از قطرات باردار شده به‌روش القایی می‌شوند که کاهش بازده بارداری نازل را به دنبال خواهد داشت. افزایش دبی مایع در فشارهای پایین به‌نوعی بیشتر بارداری تماسی بر بارداری القایی می‌انجامد که نتیجه‌ی آن به‌وضوح در روند نزولی جریان الکتريکی اسپری در شکل ۱۵ الف مشاهده می‌شود. در مقابل، افزایش دبی مایع در فشارهای بالا با جریان سریع‌تری از هوای فشرده مواجه خواهد شد که رانش سریع‌تر قطرات را به خارج از نازل به دنبال داشته و زمینه‌ی کم‌تری را برای خیس‌شدگی الکتروود فراهم می‌سازد. بنابراین، بارداری تماسی از اثرگذاری منفی کم‌تری در فشارهای بالا برخوردار است که نتیجه‌ی آن در روند صعودی جریان الکتريکی اسپری مشهود است.

در شکل ۱۵ ب روند نزولی بار الکتريکی ویژه‌ی اسپری نسبت به دبی مایع در تمامی فشارها نشان داده شده است. این روند را می‌توان در ارتباط با تعریف بار الکتريکی ویژه (رابطه‌ی ۳) توضیح داد. با توجه به این که نتایج ارائه‌شده در شکل ۱۵ ب بررسی تأثیر تغییرات دبی مایع اختصاص دارد، لذا دبی مایع (مخرج کسر) رابطه‌ی ۳) مقداری متغیر است. در این حالت و برخلاف شکل ۱۴ که دبی مایع ثابت بود، افزایش دبی به بزرگ‌تر شدن مخرج کسر و در نتیجه کوچک‌تر شدن مقدار کسر (بار

می‌شود که تأثیر آن را می‌توان در ازدیاد جریان الکتريکی اسپری در شکل ۱۴ الف مشاهده کرد. در مقابل شکل ۱۴ الف نشان می‌دهد که به‌ازای مقدار ثابتی از ولتاژ، جریان الکتريکی اسپری با افزایش فشار هوا از روندی صعودی- نزولی در ولتاژهای پایین و از روندی صعودی در ولتاژهای بالا برخوردار می‌شود. این موضوع را می‌توان برحسب نقش جریان هوای فشرده و ولتاژ الکتريکی طی فرایند بارداری القایی توضیح داد.

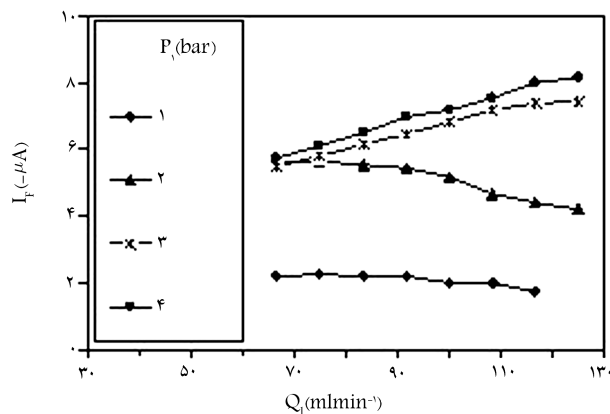
همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها بیان شد، قطرات مایع در روش القایی با قطبیتی مخالف قطبیت الکتروود باردار می‌شوند (شکل ۱۴ الف). از این رو، هم‌زمان با بارداری القایی قطرات در درون نازل، امکان نفوذ بخشی از این قطرات از لایه‌ی عایق هوا به سمت الکتروود القایی وجود دارد. در این حالت از یک سو قطراتی به‌روش القایی (سازوکار اصلی بارداری در نازل) باردار شده‌اند و از سوی دیگر قطرات نفوذ یافته از لایه‌ی هوا در تماس با سطح الکتروود به‌روش تماسی^{۲۲} (سازوکار ناخواسته‌ی بارداری در نازل) و با قطبیتی همانند قطبیت الکتروود باردار می‌شوند. پس اسپری قطرات در خروج از نازل علاوه بر قطرات باردار شده‌ی القایی با قطراتی نیز مواجه خواهد بود که به‌روش تماسی باردار شده‌اند به‌طوری که با خنثی‌کردن بخشی از بار القایی موجب تضعیف بازده بارداری نازل می‌شوند. بنابراین در ولتاژهای پایین، افزایش فشار هوا با تقویت لایه‌ی دی‌الکتریک بر روی الکتروود موجب تقویت بارداری القایی می‌شود و در نتیجه، تا مقدار معینی از فشار شاهد افزایش جریان الکتريکی اسپری خواهیم بود (شکل ۱۴ الف). پس از این فشار معین، افزایش فشار هوا به تقویت بیشتر لایه‌ی عایق دی‌الکتریک و در نتیجه تقویت بارداری القایی منجر می‌شود، ولی این تقویت با تولید قطراتی با بار الکتريکی بیشتر و نیروی جاذبه‌ی بالاتر، زمینه‌ساز نفوذ و تماس بخش بیشتری از قطرات به سوی الکتروود خواهد شد. لذا به‌رغم تقویت بارداری القایی ناشی از افزایش فشار هوا، ورود بخش بیشتری از قطرات باردار شده به روش تماسی به درون اسپری موجب تضعیف بارداری القایی و کاهش جریان الکتريکی اسپری به‌ازای فشار بیشتر می‌شود. در این حال ولتاژ بالاتر با تقویت مضاعف بارداری القایی به نقش مثبت افزایش فشار هوا کمک می‌کند. این موضوع را می‌توان در منحنی‌هایی با مقادیر بالاتر ولتاژ در شکل ۱۴ الف مشاهده کرد که در آن افزایش فشار هوا موجب انتقال فشار بهینه‌ی هوا (متناظر با مقدار بیشینه‌ی جریان الکتريکی اسپری) به مقادیر بزرگ‌تر شده است. به‌بیان دیگر، روند افزایش فشار در یک ولتاژ بالاتر با یک میدان القایی قوی‌تری همراه می‌شود که خود موجد اثر غالب‌تری بر بارداری تماسی خواهد بود. در این حالت، دستیابی به سطوح بالاتری از بار الکتريکی القایی می‌تواند زمینه‌ی جذب و بارداری تعداد بیشتری از قطرات را بر اثر تماس با الکتروود فراهم سازد، ولی سطح افزایش بار الکتريکی القایی قطرات به‌مراتب بیشتر از سطح افزایش بار الکتريکی تماسی است. این موضوع را می‌توان در شکل ۱۴ الف و در مقادیر بالای ولتاژ شاهد بود که روند یک‌پارچه‌ی صعودی را برای جریان الکتريکی اسپری در مقایسه با مقادیر پایین ولتاژ به نمایش گذاشته است.

در شکل ۱۴ ب شاهد روندی کاملاً مشابه با روند تغییرات جریان الکتريکی اسپری (شکل ۱۴ الف) برای بار الکتريکی ویژه‌ی آن هستیم. این موضوع از تعریف بار الکتريکی ویژه (رابطه‌ی ۳) نشأت می‌گیرد که در آن بار الکتريکی ویژه از خارج قسمت جریان الکتريکی اسپری بر دبی مایع حاصل می‌شود. با توجه به ثابت بودن دبی مایع (مخرج کسر) برای هر یک از نقاط شکل ۱۴ الف، شیب نمودار بار الکتريکی ویژه برای تمامی آن نقاط به نسبت یکسان (برابر با معکوس مخرج کسر) تغییر می‌کند. لذا شاهد روند همسان تغییرات برای نمودارهای شکل ۱۴ ب در مقایسه با شکل ۱۴ الف خواهیم بود.

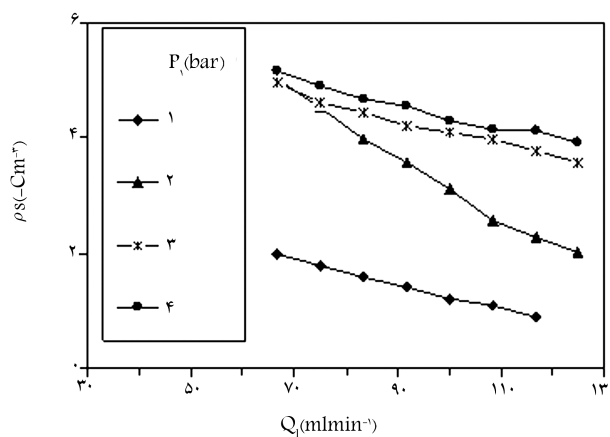
که جریان الکتریکی اسپری (شکل ۱۵ الف) صرفاً مقدار مطلق نرخ بار الکتریکی انتقال یافته به قطرات را پیش روی قرار می‌دهد.

در شکل ۱۵ ج روند صعودی جریان برگشتی منبع تغذیه برحسب دبی مایع نشان داده شده است. این موضوع حاکی از وقوع پدیده‌ی خیس‌شدگی الکتروود بر اثر افزایش دبی مایع است که توان مصرفی و در نتیجه جریان برگشتی بالاتری را بر منبع تغذیه تحمیل می‌کند. همچنین در شکل ۱۵ ج مشاهده می‌شود که افزایش فشار هوا موجب کاهش جریان برگشتی منبع تغذیه می‌شود؛ این امر را می‌توان به منزله‌ی تأیید مجدد نقش مثبت فشار هوا در تقلیل خیس‌شدگی الکتروود از طریق رانش سریع‌تر قطرات به خارج از نازل و نیز تقویت لایه‌ی دی‌الکتریک بر روی الکتروود تلقی کرد.

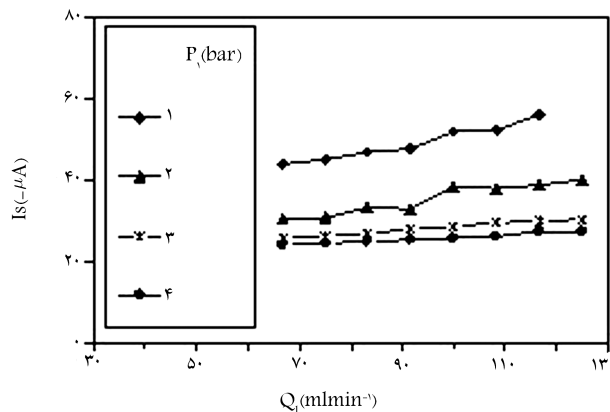
ابعاد عملکرد الکترودهیدرودینامیکی نازل طراحی و ساخته شده در این پژوهش در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ مورد تحلیل قرار گرفته است. این نتایج مؤید قابلیت نازل حاضر در تولید اسپری قطرات باردار است. حال شایسته است به مقایسه و بررسی عملکرد این نازل در ارتباط با عملکرد نازل مینا^[۲۳] پردازیم. در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ نتایج مربوط به این مقایسه ارائه شده است. تغییرات بار الکتریکی ویژه برحسب فشار هوا در ولتاژهای مختلف در شکل ۱۶ حاکی از آن است که عملکرد نازل حاضر بسیار نزدیک به عملکرد نازل میناست. با این حال نمودار مربوط به نازل حاضر در ولتاژ ۲۰۰۰ V و در فشارهای بالا از روندی صعودی با مقادیر بزرگ‌تر برخوردار است، در حالی که پس از فشار ۳/۵ bar این روند برای نازل مینا نزولی می‌شود. برای حصول اطمینان از این عملکرد، آزمایش‌های دیگری به‌ازای مقدار ثابت ولی متفاوت از دبی مایع و براساس تغییر ولتاژ در فشارهای مختلف صورت گرفت که نتایج آن در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود. این شکل نیز به‌وضوح نشان می‌دهد که عملکرد کمی و کیفی نازل حاضر مشابه عملکرد نازل مینا تا فشار ۳ bar است، با این تفاوت که نازل حاضر در فشار ۴ bar قادر به تولید قطرات باردار با بار الکتریکی ویژه‌ی بیشتر است. این نتایج در مجموع مؤید عملکرد مناسب نازل حاضر است، با دقت در این نکته که در فشار و ولتاژهای بالا (در محدوده‌ی $V_o > 1500V$ و $P_1 > 3.5\text{bar}$) این نازل با دست‌یابی به سطح بالاتری از بار الکتریکی ویژه عملکرد بهتری را به نمایش می‌گذارد. شکل ۱۸ نیز نشان‌گر مقایسه‌ی مصرف هوای فشرده توسط نازل‌های مینا و حاضر است. مطابق این شکل، نازل حاضر در تمامی فشارها از مصرف هوای کم‌تری برخوردار است که این مزیت از منظر نیاز به کمپرسور



الف) جریان الکتریکی اسپری؛



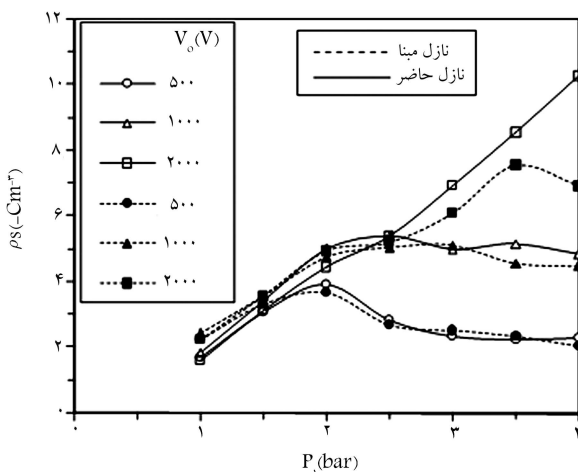
ب) بار الکتریکی ویژه اسپری؛



ج) جریان برگشتی منبع تغذیه.

شکل ۱۵. تأثیر دبی مایع به‌ازای مقادیر مختلف فشار تنظیم‌کننده‌ی هوا و مقادیر ثابت $V=1000V$ و $L=12\text{cm}$ بر مشخصه‌های اسپری و منبع تغذیه.

الکتریکی ویژه) منجر می‌شود (شکل ۱۵ ب). روند نزولی نمودارها در شکل ۱۵ ب (برخلاف روند صعودی نمودارهای متناظر جریان الکتریکی در شکل ۱۵ الف) نشان می‌دهد که کمیت بار الکتریکی ویژه معیاری بهتر برای ارزیابی عملکرد باردارسازی نازل است؛ زیرا بار الکتریکی ویژه با ارائه‌ی تصویری از بار الکتریکی انتقال یافته به واحد حجم مایع امکان مقایسه پذیر کردن نتایج مشابه را فراهم می‌سازد، در حالی



شکل ۱۶. عملکرد نازل حاضر در مقایسه با نازل مینا براساس تأثیر فشار هوای فشرده بر بار الکتریکی ویژه اسپری، به‌ازای مقادیر مختلف ولتاژ باردارسازی و مقادیر ثابت $L=12\text{cm}$ و $Q_1=67.7\text{mlmin}^{-1}$ (4Lh^{-1})

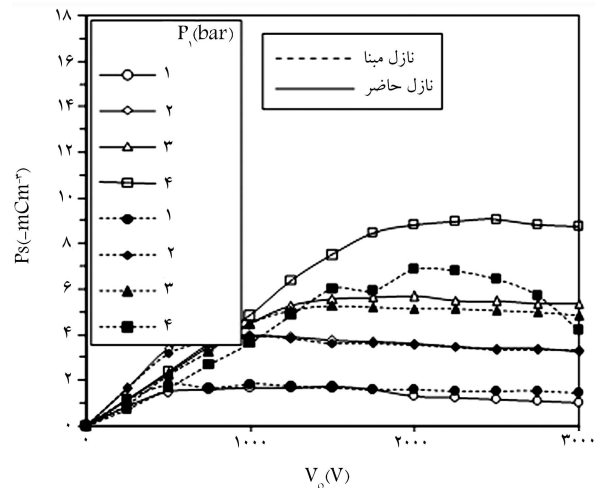
در معرض ولتاژ الکتریکی قرار گرفتن در در پوش فراهم می‌سازد. برای ساخت نازل از ماده‌ی پلاستیکی گلاس استفاده شده است که علاوه بر تراش پذیری مناسب امکان ایجاد فضای عایق برای باردارسازی الکتریکی قطرات مایع را فراهم می‌سازد.

چیدمان تجربی مورد استفاده در آزمایش نازل برای مقایسه پذیر کردن نتایج، دقیقاً همان چیدمانی است که در آزمایش نازل مینا به کار گرفته شده است. ارزیابی عملکرد این چیدمان با استفاده از نازل حاضر مؤید قابلیت چیدمان در تأمین پایا و هم‌زمان هوای فشرده، جریان مایع و ولتاژ الکتریکی است. بررسی جریان هوا حاکی از تغییر خطی فشار در مسیر هوای فشرده به نازل است به طوری که می‌توان فشار هوا در تنظیم‌کننده را به عنوان شاخص فشار هوای ورودی به نازل در نظر گرفت. پایش جریان مایع نیز حاکی از وجود خطای نظام‌مند کم‌تر از ۷٪ در اندازه‌گیری دبی مایع با استفاده از نازل حاضر است. بررسی عملکرد منبع تغذیه ضمن مطابقت بسیار خوب میان داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های سازنده، عملکرد بسیار خوبی را نیز از طریق اندازه‌گیری ولتاژ با استفاده از کاهنده‌ی ولتاژ نشان می‌دهد.

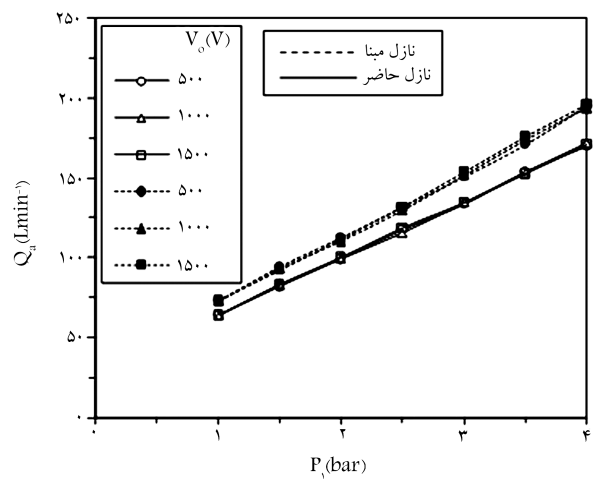
آزمایش نازل در وهله‌ی نخست حاکی از توانایی نازل در قطره‌سازی و باردارسازی قطرات مایع است. تغذیه‌ی هم‌زمان هوای فشرده و مایع به نازل نشان می‌دهد که دبی‌های هوا و مایع فقط تابعی از فشار هوای فشرده هستند و اعمال یا عدم اعمال ولتاژ باردارسازی تأثیری بر آنها ندارد. تأثیر مستقیم اعمال ولتاژ باردارسازی در تغییرات جریان برگشتی منبع تغذیه بروز می‌یابد. افزایش ولتاژ القایی با تقویت میدان الکتریکی در درون نازل و افزایش دبی مایع با ارسال جرم بیشتری از مایع به درون نازل موجب ازدیاد جریان برگشتی منبع تغذیه می‌شود. در مقابل، افزایش فشار هوا با تقویت لایه‌ی عایق دی‌الکتریک بر روی الکتروود القایی سبب کاهش جریان برگشتی می‌شود.

باردارسازی القایی نازل نشان می‌دهد که این فرایند علاوه بر ولتاژ الکتریکی، از فشار هوای فشرده و دبی مایع نیز متأثر است. تأثیر هوای فشرده در دو محدوده‌ی ولتاژهای پایین و بالا قابل بررسی است. افزایش فشار در ولتاژهای پایین تا فشار معینی به افزایش بار الکتریکی اسپری قطرات می‌انجامد در حالی که افزایش فشار به مقادیری بالاتر از آن فشار معین موجب کاهش بار الکتریکی اسپری می‌شود. در مقابل، افزایش فشار در ولتاژهای بالا روندی یک‌پارچه صعودی را برای بار الکتریکی اسپری به دنبال دارد. در باردارسازی القایی به دلیل قطبیت مخالف قطرات با قطبیت الکتروود همواره امکان تماس برخی از قطرات با الکتروود وجود دارد. در این حالت، قطرات ابتدا بار الکتریکی خود را از دست می‌دهند و سپس به روش تماسی و با قطبیتی همانند قطبیت الکتروود باردار می‌شوند. از این رو، در ولتاژهای پایین که سطوح پایینی از بار الکتریکی به قطرات القا می‌شود، افزایش فشار هوا تا حد معینی می‌تواند به سازوکار القا کمک کند. گذر از این فشار موجب افزایش نرخ ورود قطرات باردار شده به روش تماسی به اسپری می‌شود که نتیجه‌ی آن در افت بار الکتریکی اسپری بروز می‌یابد. این در حالی است که دست‌یابی به سطوح بالای بار الکتریکی در ولتاژهای بالا امکان تأثیر منفی ناشی از باردارسازی تماسی را به مقادیر بالاتری از فشار هوا انتقال می‌دهد.

دبی مایع برخلاف ولتاژ و فشار هوا از تأثیری منفی بر باردارسازی القایی اسپری برخوردار است. افزایش دبی مایع، به‌عنوان هندسه‌ی معین نازل، با تغذیه‌ی جرم بیشتری از مایع به درون نازل موجب خیس‌شدگی الکتروود القایی می‌شود. در این حالت، نفوذ و تماس بخش بیشتری از قطرات باردار شده‌ی القایی با الکتروود صورت می‌گیرد که تقویت باردارسازی تماسی و تضعیف باردارسازی القایی را در پی دارد. نتیجه‌ی این موضوع در روند صعودی جریان برگشتی منبع تغذیه و روند نزولی بار الکتریکی ویژه‌ی اسپری ظاهر می‌شود. در این راستا استفاده از فشارهای بالاتر هوا می‌تواند با



شکل ۱۷. عملکرد نازل حاضر در مقایسه با نازل مینا بر اساس تأثیر ولتاژ باردارسازی بر بار الکتریکی ویژه‌ی اسپری به‌عنوان مقادیر مختلف فشار هوای فشرده و مقادیر ثابت $Q_i = 83.3 \text{ mLmin}^{-1} (\Delta Lh^{-1})$ و $L = 12 \text{ cm}$.



شکل ۱۸. عملکرد نازل حاضر در مقایسه با نازل مینا بر اساس تغییرات دبی هوای فشرده بر حسب فشار و به‌عنوان مقادیر مختلف ولتاژ باردارسازی.

کوچک‌تر و نیز صرفه‌جویی انرژی در یک مقیاس کلان (یعنی پاشش طولانی‌مدت با استفاده از تعداد زیادی نازل) حائز اهمیت خواهد بود.

نتیجه‌گیری

با بررسی طراحی، ساخت و آزمایش یک نازل دوسیاله‌ی القایی دریافتیم که برای طراحی نازل می‌توان از روابط جریان‌های تک‌فازی در مکانیک سیالات به‌منظور تخمین ابعاد مجرای ورودی مایع به نازل و گلوگاه عبور هوای فشرده استفاده کرد. تخمین این ابعاد بر اساس محدوده‌ی کمی دبی مایع و فشار خفگی در یک نازل مینا صورت گرفته است. در طرح نازل علاوه بر تعبیه‌ی مجاری عبور جریان مایع، جریان پرفشار هوا و خط تأمین ولتاژ الکتریکی از یک ساختار دوپارچه (دوتکه) شامل در پوش و بدنه استفاده شده است. این ساختار از یک سو امکان جریان مستقل (جدا از هم) را برای خطوط هوای فشرده، مایع و الکتریکی در بدنه فراهم می‌کند، و از سوی دیگر زمینه‌ی تلاقی هوای فشرده و مایع را برای اختلاط و قطره‌سازی و سپس

- I_G : جریان الکتریکی مخزن مایع (A)
 L : فاصله‌ی نازل تا استوانه‌ی اندازه‌گیری جریان الکتریکی (m)
 \dot{m}_c : دبی هوا (kg s^{-1})
 P_o : فشار سکون هوای فشرده (Pa)
 P_1 : فشار تنظیم‌کننده‌ی هوا (bar)
 P_2 : فشار هوا در دما و فشارسنج ترکیبی (bar)
 P_r : فشار هوا در ورود به نازل (bar)
 Q_a : دبی حجمی هوای فشرده (L min^{-1})
 Q_l : دبی حجمی مایع (L min^{-1})
 R : ثابت گاز ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
 T_o : دمای سکون هوای فشرده (K)
 T_1 : دما در دبی‌سنج هوا ($^{\circ}\text{C}$)
 T_2 : دما در دما و فشارسنج ترکیبی ($^{\circ}\text{C}$)
 u_a : سرعت هوا (ms^{-1})
 u_l : سرعت مایع (ms^{-1})
 V_G : ولتاژ تحریک منبع تغذیه (V)
 V_o : ولتاژ خروجی منبع تغذیه (V)
 ΔP : اختلاف فشار مکش مایع (bar)
 ρ : چگالی ماده (kg m^{-3})
 ρ_a : چگالی هوا (kg m^{-3})
 ρ_l : چگالی مایع (kg m^{-3})
 ρ_r : مقاومت الکتریکی ویژه (Ωm)
 ρ_S : بار الکتریکی ویژه‌ی اسپری (C m^{-2})

رانش حجم و سرعت بالاتری از هوای فشرده از سطح الکتروود باردارساز به خشک نگه داشتن این سطح و تقلیل اثر منفی ناشی از افزایش دبی مایع کمک کند. نتایج حاصل از آزمایش نازل موجود به‌خوبی تطابق کمی و کیفی داده‌های عملکردی این نازل را با نازل مبنا مورد تأیید قرار می‌دهد. با این حال نازل حاضر در شرایط مشابه از دبی پایین‌تر هوای فشرده برخوردار است که از نظر نیازمندی کم‌تر به فشرده‌سازی هوا و مصرف پایین‌تر انرژی به‌ویژه در مقیاس کاربردی وسیع حائز اهمیت است. نازل حاضر همچنین در ولتاژها و فشارهای تقریباً بیش از 150°V و 3.5bar سطوحی بالاتر از بار الکتریکی ویژه را نسبت به نازل مبنا ارائه می‌دهد. در مجموع با توجه به این که طراحی و ساخت نازل حاضر براساس شناخت کلی از ساختار یک نازل دوسیاله با اختلاط درونی و صرفاً با معیار قراردادن داده‌های عملکردی نازل مبنا صورت گرفته است، قابلیت الکتروهدرودینامیکی نازل حاضر در بازتولید عملکرد نازل مبنا می‌تواند تأییدی بر روش طراحی این نازل محسوب شود.

فهرست علائم

- A_G : مساحت گلوگاه نازل (m^2)
 d_l : قطر خروجی مجرای مایع (m)
 d_{lm} : قطر میانگین خروجی مجرای مایع (m)
 d_o : قطر گلوگاه نازل (m)
 H : ارتفاع مکش مایع به نازل (m)
 I_F : جریان الکتریکی اسپری (A)

پانویس

- spray droplets
- atomization
- atomizer
- two-fluid nozzle
- orifice clogging
- benchmark nozzle
- spray plume
- spray drop coalescence
- secondary drop breakup
- electrostatic spraying systems
- internal mixing parallel flow two-fluid nozzle
- mixing and atomization zone
- liquid discharge coefficient
- beveled straight edge
- insulation resistance tester
- compression fitting
- faraday cage
- specific charge
- spray working liquid
- tap water
- potential divider

- contact charging
- electrode wetting

منابع

- Williams, A., "Combustion of liquid fuel sprays", Butterworths, London, p.53 (1990).
- Li, X., and Tankin, R.S., "On the temporal instability of a two-dimensional viscous liquid sheet", *Journal of Fluid Mechanics*, **226**, pp. 425-443 (1991).
- Technical Note, "Two-fluid nozzle or pneumatic atomization", *The Technical Niro Information Library*, GEA Niro, Inc., Hudson, Wisconsin (2004).
- Tsai, S.C.; Childs, P., and Luu, P., "Ultrasound-modulated two-fluid atomization of a water jet", *AICHE Journal*, **42**, pp. 3340-3350 (2004).
- Sanders, J.F.; Keener, T.C., and Wang, J., "Heated fly ash/hydrated lime slurries for SO₂ removal in spray dryer absorbers", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **34**, pp. 302-307 (1995).

6. Bayvel, L., and Orzechowski, Z., "Liquid atomization", Taylor & Francis, Washington, p. 195 (1993).
7. Lefebvre, A.H., "Atomization and sprays", Hemisphere, New York, p. 229 (1989).
8. Inamura, T.; Nagai, N., and Kim, Y.S., "Influences of injection parameters on twin-fluid disintegration of liquid jet", Proc. ICALSS-94, Rouen, France, pp. 593-600 (1994).
9. Varga, C.M.; Lasheras, J.C., and Hopfinger, E.J., "Initial breakup of a small-diameter liquid jet by a high speed gas stream", *Journal of Fluid Mechanics*, **497**, pp. 405-434 (2003).
10. Mullinger, P.J., and Chigier, N.A., "The design and performance of internal mixing multi-jet twin fluid atomizer", *J. Inst. Fuel*, **47**(393), pp. 251-261 (1974).
11. Tanno, S.; Miura, T., and Ohtani, S., "Atomisation of high-velocity liquid by pneumatic nozzle", Proc. 3rd Intl. Conf. on Liquid Atomization and Spray System (ICLASS-85), London, pp. LP/VB/6/1-8 (July 1985).
12. Harada, K.; Shimizu, R.; Kurita, K.; Muramatsu, M.; Makimura, T., and Ohashi, M., "Development of air-assisted injector system", SAE Paper, No. 920294 (1992).
13. Leroux, B.; Delabroy, O., and Lacas, F., "Influence of superpulsating mode on atomization properties in coaxial air-assisted atomizers", Proc. 8th Intl. Conf. on Liquid Atomization and Spray System (ICLASS-85), Pasadena, CA, pp. 45-51 (July 2000).
14. Daikoku, M.; Furudate, H., and Inamura, T., "Characteristics of Y-Jet-Type Airblast Atomizer with Self-Control Function", *JSME International Journal Series B*, **48**(1), pp. 41-47 (2005).
15. Palumbo, J.C.; Horowitz, A.R., and Prabhaker, N., "Insecticidal control and resistance management for Bemisia tabaci", *Crop Protection*, **20**(9), pp. 739-765 (2001).
16. Derksen, R.C.; Zhu, H.; Fox, R.D.; Brazee, R.D., and Krause, C.R., "Coverage and drift produced by air induction and conventional hydraulic nozzles used for orchard applications", *Transactions of ASABE*, **50**(5), pp. 1493-1501 (2007).
17. Stolaroff, J.K.; Keith, D.W., and Lowry, G.V., "Carbon dioxide capture from atmospheric air using sodium hydroxide spray", *Environmental Science Technology*, **42**(8), pp. 2728-2735 (2008).
18. Almekinders, J.C., and Jones, C., "Multiple jet electrohydrodynamic spraying and applications", *Journal of Aerosol Science*, **30**(7), pp. 969-971 (1999).
19. Anderson, E.K.; Carlucci, A.P.; De Risi, A., and Kyritsis, D.C., "Synopsis of experimentally determined effects of electrostatic charge on gasoline sprays", *Energy Conversion and Management*, **48**(11), pp. 2762-2768 (2007).
20. Reitz, R.D., "Liquid atomization and spraying", in: The CRC Handbook of Mechanical Engineering, Eds.: Frank Kreith and D. Yogi Goswami, CRC Press, New York, p. 3-189 (2004).
21. Jaworek, A.; Lachowski, M.; Krupa, A., and Czech, T., "Electrostatic interaction of free EHD jets", *Experiments in Fluids*, **40**, pp. 568-576 (2006).
22. Shrimpton, J.S., "Pulsed charged sprays: application to DISI engines during early injection", *Intl. Journal for Numerical Methods in Engineering*, **58**, pp. 513-536 (2003).
23. Jahannama, M.R., "Characteristic effects of a two-fluid nozzle on electrical charging of a spray", *Sharif Journal of Science & Technology*, **44**, pp. 83-92 (2008) [in Farsi].
24. Huang, P.S.; Piccolo, A.; Paschal, W., and Anderson, B.H., "Design and analysis of reengine Boeing 727-100 center inlet S duct by a reduced Navier-Stokes code", Proc. AIAA Aerospace Design Conference, Irvine, CA, 8p. (Feb. 1992).
25. Fox, R.W.; McDonald, A.T., and Pritchard, P.J., "Introduction to fluid mechanics", John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 638 (2004).
26. Kaiser, K.L., "Electrostatic discharge", CRC Press, Boca Raton, p. I-59 (2005).
27. Cross, J., "Electrostatics: principles, problems and applications", IOP Publishing Ltd., Bristol, England, p. 11 (1987).
28. Hensley, J.L.; Feng, X., and Bryan, J.E., "Induction charging nozzle for flat fan sprays", *Journal of Electrostatics*, **66**, pp. 300-311 (2008).
29. Calibration Certificate, "Flowmeter KMI-1205HR2000", KOBOLD Messring GmbH, Hofheim, Germany (2005).

