

مروری بر هیدرودینامیک تولید قطرات مایع به روش پاشش الکتریکی

حمید مقدم‌دیمه، عبدالرضا صمیمی*

زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

پیام نگار: a.samimi@hamoon.usb.ac.ir

چکیده

پاشش الکتریکی^۱ روشی است که با اعمال میدان الکتریکی ثابت یا متغیر، به عنوان نیروی خارجی وارده بر جریان مایع خروجی از یک افشانه، اندازه و توزیع اندازه قطرات را در پاشش مایعات، کنترل می‌کند. سطح خارجی مایعی با خاصیت هدایت الکتریکی در دهانه افشانه تحت تأثیر میدان الکتریکی با نیروی مشخصی، علاوه بر نیروی ثقل، به سمت پایین کشیده شده و در نهایت با غلبه این نیروها بر نیروی کشش سطحی و پاره شدن سطح مایع، قطره ایجاد می‌شود. استفاده از نیروی الکتریکی سبب می‌شود تا قطرات با اندازه‌های کوچکتر نیز قادر به غلبه بر نیروی کشش سطحی باشند. به عبارتی این امکان وجود دارد که با تغییر نیروی ایجاد شده توسط میدان الکتریکی، قطراتی با قطر دلخواه و توزیع اندازه یکنواخت ایجاد گردند. روش پاشش الکتریکی یکی از چند روش شناخته شده محدود است که قادر به ریزسازی مایعات و تبدیل آنها به قطرات بسیار کوچک و یک اندازه در ابعاد میکرو و نانو، می‌باشد. هدف این مقاله مروری بر چگونگی تولید قطرات مایع به روش پاشش الکتریکی و بررسی تأثیر متغیرهای موجود بر پیدایش حالت‌های مختلف این فرایند می‌باشد.

کلمات کلیدی: پاشش الکتریکی، کنترل اندازه قطرات، توزیع اندازه قطرات، حالت قطره‌ای، حالت جت

۱- مقدمه

بی اثر به منظور تولید قطرات مایع استفاده می‌شود که به دو نوع اختلاط داخلی و خارجی، با کاربردهای مخصوص به خود، تقسیم می‌شوند.

۳- افشانه‌های فراصوتی: که در آنها امواج فراصوت سبب ایجاد شوک بر سطح مایع و در نهایت تولید قطرات می‌شوند.

۴- افشانه‌های لرزان: لرزش مکانیکی در این نوع افشانه‌ها باعث ایجاد ناپایداری سطح مایع در دهانه افشانک، و در نتیجه، تولید قطرات مایع می‌شود.

پاشش قطرات با توجه به سادگی مکانیزم دارای کاربردهای وسیع و متفاوتی می‌باشد که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- در صنایع شیمیایی به منظور بهبود توزیع قطرات و افزایش سطح تماس برای بالا بردن انتقال جرم (گاز - مایع)

فرایند فیزیکی پراکندن مایع به صورت جریانی از قطرات در محیط گازی، پاشش نامیده می‌شود. هدف کلی از این فرایند بیشینه کردن اثرات مایع به طریق افزایش سطح آن می‌باشد. افشانه‌ها وسایلی برای آسان‌سازی فرایند پاشش مایعات هستند و مایع پس از عبور از آنها تحت تأثیر عوامل مختلف، بسته به نوع افشانه، به صورت قطره پراکنده می‌گردد. انواع مختلف افشانه‌ها را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

۱- افشانه‌های هیدرولیکی: در این نوع افشانه‌ها از فشار مایع برای شکسته شدن سطح مایع و تولید قطره استفاده می‌شود.

۲- افشانه‌های گازی: در این نوع افشانه‌ها از جریان هوا یا یک گاز

1. Electro-Spray

۲- پاشش الکتریکی

پاشش مایعات به منظور تولید قطرات با اندازه‌های مشخص و توزیع یکنواخت، نیازمند اعمال یک نیروی خارجی است. پاشش الکتریکی روشی است که با اعمال میدان الکتریکی، به‌عنوان یک نیروی خارجی، توزیع اندازه قطرات مایع را، کنترل می‌کند [۱]. نظریه پراکندن یک مایع به صورت قطرات باردار ریز با استفاده از میدان الکتریکی برای اولین بار توسط لرد ریلی^۱ در حدود یک قرن پیش پیشنهاد شد [۲]. به‌طور معمول در این روش، میدان الکتریکی با استفاده از یک جریان الکتریکی مستقیم با ولتاژ بالا با اتصال قطب مثبت به افشانه و قطب منفی به دیسکی که در فاصله معینی پایین تر از افشانه قرار دارد، ایجاد می‌شود [۳]. در برخی از موارد نیز از زمین به‌عنوان قطب منفی استفاده می‌شود [۴]. استفاده از مایعی با خاصیت هدایت الکتریکی سبب می‌شود تا سطح خارجی مایع در دهانه افشانک، تحت تأثیر و کنترل میدان الکتریکی، با نیروی مشخصی به سمت پایین کشیده شود و در نهایت با غلبه این نیرو بر کشش سطحی و پاره شدن سطح مایع، قطره ایجاد گردد. روش کار در این فرایند به این صورت است که ابتدا مایع مورد نظر به‌وسیله یک پمپ با شدت جریان مشخص به سمت افشانک هدایت می‌شود. در ابتدا هیچگونه اختلاف پتانسیلی بین افشانک و دیسکی که زیر آن قرار دارد وجود نداشته و قطرات ایجاد شده مایع در این حالت نسبتاً بزرگ می‌باشند. در مرحله بعد، افزایش اختلاف پتانسیل بین افشانک و دیسک که به‌وسیله دستگاه اختلاف پتانسیل با ولتاژ بالا ایجاد می‌شود، سبب ایجاد میدان الکتریکی بین این دو قسمت خواهد شد. همانطور که اشاره شد، پیدایش میدان الکتریکی سبب کشیده شدن بیشتر سطح مایع در دهانه افشانک به سمت پایین و ایجاد قطرات کوچکتر خواهد شد. تغییرات اختلاف پتانسیل اعمال شده سبب تغییر شدت میدان الکتریکی ایجاد شده و ایجاد حالت خاصی از فرایند پاشش الکتریکی می‌شود. شکل (۱) پاشش بدون میدان الکتریکی و به صورت قطره‌ای را در قسمت (الف)، و تحت تأثیر و اعمال میدان الکتریکی را در قسمت (ب) نمایش می‌دهد.

۲- در صنایع داروسازی به صورت خشک‌کن‌های پاششی

۳- در صنایع الکترونیکی به منظور ایجاد پوشش مؤثر قطعات الکترونیکی

۴- در زمینه محیط زیست و در صنایع معدنی و سیمان و صنایع دیگر به منظور کاهش آلاینده‌ها

۵- در صنایع کشاورزی به منظور پاشش حشره‌کش‌ها و علف‌کش‌ها

۶- در صنعت فولاد به منظور جداسازی تفاله از فولاد داغ و همچنین خنک نمودن آن

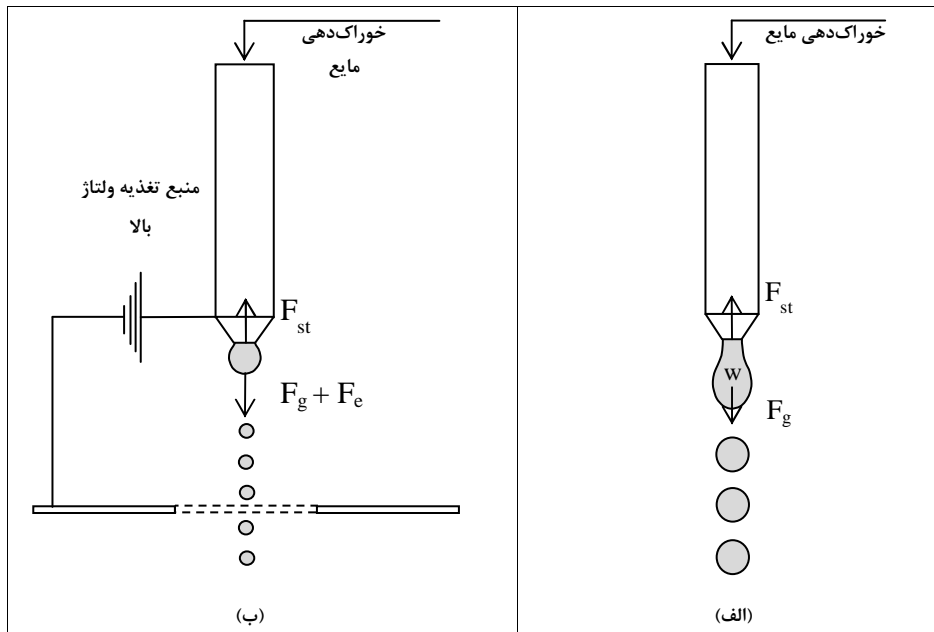
۷- در احتراق به منظور ایجاد نسبت بسیار بالای سطح به جرم سوخت مصرفی و تسریع تبخیر و در نتیجه دستیابی به نرخ بالای احتراق

۸- در صنعت رنگ به منظور توزیع یکنواخت رنگ بر روی سطح

۹- به منظور شست و شو در بسیاری از صنایع، و دیگر کاربردها در تمامی کاربردهای پاشش مایعات، بازدهی فرایند کم و بیش به یکنواختی قطرات تولید شده بستگی دارد. برای مثال در پاشش سوخت در صورتی که قطرات تولید شده به اندازه‌های مناسب و کاملاً یکسان باشند احتراق به بهترین صورت ممکن انجام می‌گیرد و هیچ قطره‌ای به صورت نسوخته باقی نمی‌ماند و درصد آلودگی نیز کاهش می‌یابد؛ و حال آنکه در مورد پاشش به منظور شست و شو این حساسیت نسبت به توزیع اندازه قطرات تولید شده بسیار کمتر است.

در صورتی که یک فرایند مشخص، نسبت به اندازه قطرات حساس باشد مسئله مهم، کنترل شرایط عملیاتی در راستای تولید قطرات با اندازه‌های مطلوب و یکنواخت می‌باشد. قطر افشانک و شدت جریان حجمی مایع به عنوان متغیرهای عملیاتی فرایند افشاندن، کنترل مناسبی بر اندازه قطرات تولید شده ندارند. شدت جریان حجمی اثر ناچیزی بر اندازه قطرات تولید شده دارد و به طور عمده بر نرخ تولید آنها تأثیر می‌گذارد [۱] و قطر افشانک نیز در محدوده مشخصی بر اندازه قطره تولید شده تأثیر دارد، به طوری که کاهش و یا افزایش قطر افشانه خارج از این محدوده تأثیری بر اندازه قطره تولید شده نمی‌گذارد. بنابراین در برخی از شرایط، تولید قطراتی با اندازه مشخص و توزیع اندازه یکنواخت، صرفاً با تغییر این دو پارامتر، در عمل غیر ممکن خواهد بود.

1. Lord Rayleigh



شکل ۱- مقایسه بین روش پاشش قطره‌ای (الف) و پاشش الکتریکی (ب) [۱]

۲. توزیع اندازه قطرات تولید شده محدود، و دارای انحراف معیار کوچکی می‌باشد. لذا امکان تولید ذرات تقریباً یک اندازه وجود دارد.

۳. با توجه به اینکه قطرات تولید شده در این روش باردار هستند، خاصیت (خود-پراکندگی) در آنها سبب می‌شود تا پدیده اتصال قطرات و لخته شدن مجدد آنها از بین برود.

۴. مسیر حرکت قطرات باردار به آسانی با استفاده از میدان الکتریکی قابل کنترل است.

با توجه به قابلیت پاشش الکتریکی در تولید قطرات در اندازه‌های دلخواه و یکنواخت، جایگزینی این روش به جای روش‌های مرسوم منجر به بهبود فرایند پاشش شده و به‌عنوان روش جدیدی برای ایجاد ذرات میکرو و نانو، کاربردهای وسیعی یافته است. برخی از کاربردهای پاشش الکتریکی عبارتند از:

- سمپاشی محصولات کشاورزی [۴، ۱] (باعث توزیع سم در قسمت‌هایی که در دید پاشش مستقیم قرار ندارند، مانند پشت برگها، شده و با توجه به باردار بودن قطرات پس از توزیع، قسمت بیشتری از قطرات به گیاهان رسیده و باعث کاهش مصرف و آلودگی خاک می‌گردد).

همانطور که در شکل مشخص است، در حالت (الف) سطح مایع باید به اندازه کافی رشد کند تا پس از غلبه نیروی وزن مایع موجود در دهانه افشانه بر نیروی کشش سطحی، نوعی گسیختگی در سطح مایع به وجود آید و قطره‌ای از دهانه افشانه جدا گردد. این در حالی است که در حالت (ب) برآیند نیروی اضافی حاصل از میدان الکتریکی و نیروی وزن سبب می‌شود که قطرات به اندازه‌های کوچکتر نیز قادر به غلبه بر نیروی کشش سطحی باشند. به عبارتی می‌توان با تغییرات نیروی ایجاد شده توسط میدان الکتریکی، تحت شرایطی، قطراتی با قطر دلخواه و توزیع اندازه یکنواخت ایجاد کرد. روش پاشش الکتریکی یکی از چند روش شناخته شده است که قادر به ریزسازی مایعات به قطرات بسیار کوچک می‌باشد. در برخی از تحقیقات با استفاده از این روش، در شرایط عملیاتی خاص (مایع با هدایت الکتریکی بالا و شدت جریان حجمی پایین [۵])، قطراتی در ابعاد میکرو و نانو تولید شده است [۲].

در زیر به برخی از مزایای پاشش الکتریکی در مقایسه با روش‌های متداول پاشش اشاره شده است [۶]:

۱. قطرات تولید شده کوچکتر از قطراتی هستند که به روش‌های مرسوم پراکنده‌سازی مایعات تولید می‌شوند.

مزیت‌هایی می‌باشد که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
 ۱- در هر حالت پاشش الکتریکی، قطرات با اندازه‌ها و بارهای متفاوت تولید می‌شوند.

۲- توزیع اندازه قطرات تولید شده در هر حالت متفاوت می‌باشد.
 ۳- محدوده عملیاتی (خصوصیات مایع، ولتاژ، شدت جریان حجمی و قطر افشانک) هر حالت به صورت کیفی مشخص و کاربرد مجدد آن به آسانی قابل تکرار است.

به طور کلی پاشش الکتریکی به دو حالت تقسیم می‌شود. در حالت اول که به حالت قطره‌ای^۱ معروف است تکه‌هایی از مایع از دهانه افشانک به صورت مجزا جدا می‌شوند. در این حالت، عامل اصلی در ایجاد قطرات، غلبه نیروی وزن و نیروی میدان الکتریکی بر کشش سطحی و پاره شدن سطح مایع در دهانه افشانک می‌باشد. به کار بردن پتانسیل الکتریکی بالاتر در افشانک منجر به کاهش قطر قطره‌ها و افزایش فرکانس تولید آنها می‌شود. قطر قطرات تأثیر چندانی از شدت جریان حجمی در این حالت نمی‌گیرد. با این حال، شدت جریان حجمی بر روی فرکانس تولید قطره‌ها تأثیر دارد [۱]. میدان الکتریکی سبب کشیده شدن سطح مایع و تشکیل رشته‌ای از مایع، بین قطره اصلی رشد یافته و مایع چسبیده به دهانه افشانک می‌گردد. سطح مایع هنگامی که این رشته به بیشترین طول ممکن خود برسد گسسته می‌شود. قطرات تولید شده در این حالت، معمولاً بزرگ و بسته به خواص مایع و شرایط عملیاتی در محدوده ۵-۵۰/۵) mm و دارای توزیع اندازه نسبتاً یکسانی می‌باشند.

در حالت دوم، افزایش شدت جریان حجمی در میدان الکتریکی ثابت و یا افزایش میدان الکتریکی در شدت جریان حجمی ثابت و یا افزایش همزمان این دو متغیر سبب می‌شود تا رشته یا ستونی پایدار از مایع در دهانه افشانک تشکیل شود و حالت قطره‌ای به وضعیت دیگری که به حالت جت^۲ معروف است تبدیل گردد. بنابراین، حالت جت، هم به صورت هیدرودینامیکی و هم به صورت الکتروهیدرودینامیکی قابل شکل‌گیری است [۱۴]. در این حالت، قطرات در فاصله مشخصی پایین تر از دهانه افشانک به علت ناپایداری‌های پیچشی و تورمی^۳ از این ستون جدا می‌شوند. قطرات تولید شده در این حالت بسیار کوچکتر از حالت قطره‌ای بوده و گاهی اندازه آنها به ۱۰ nm هم می‌رسد، ولی در اکثر موارد به علت

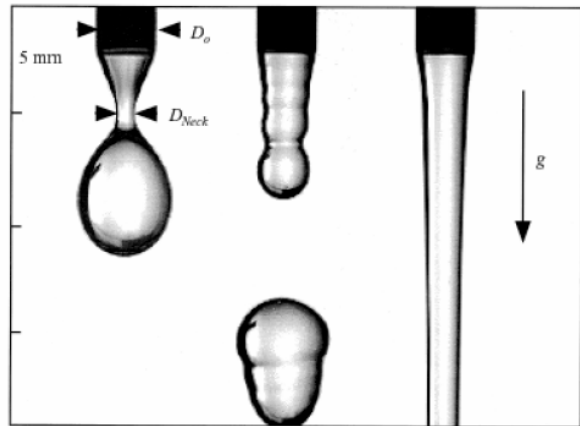
- رنگ‌آمیزی پاششی [۷] (در کناره‌ها و لبه‌های دور از دسترس، رنگ‌آمیزی آسان می‌شود و موجب یکنواختی بیشتر سطوح رنگ شده می‌گردد).
- موتورهای احتراق داخلی [۱] (تزریق سوخت را بهبود بخشیده و منجر به کاهش مصرف سوخت و آلودگی هوا می‌گردد).
- تولید ذرات بسیاری زیست تخریب پذیر در ابعاد میکرومتر و نانومتر که به صورت گسترده در سامانه‌های دارورسانی کاربرد دارند [۲].
- تولید پودر و ذرات قابل کاربرد در صنایع مختلف [۸]. به عنوان مثال در تولید ذرات ریز و یک اندازه سیلیس که به‌عنوان ردیاب در آشکارسازی الگوی جریان در مایعات و همچنین در شعله به کار می‌رود و نیز به عنوان افزودنی به پودرهای آرایشی به کار رفته و دارای کاربردهای دیگری نیز می‌باشند [۹].
- چاپ جوهر افشان [۴،۸]
- در صنعت داروسازی در دو بخش تولید ذرات در محدوده ۵-۲) μm برای استفاده در داروهای استنشاقی [۱۰] و تولید کپسول‌هایی کوچکتر از ۴۰۰ nm که توسط سیستم ایمنی بدن رهگیری نشده و به سرعت با استفاده از جریان خون به اندام‌های مورد نظر می‌رسند [۶] به کار می‌رود.
- تولید زیست‌کاتالیزگر در اندازه‌هایی که نفوذ مواد شیمیایی به داخل ذرات آن به آسانی انجام گیرد [۱۱].
- تولید روکش‌های سرامیکی [۱۲] و همچنین روکش‌هایی با قطرهای بسیار کم در حدود ۱۰ میکرومتر [۳،۶] (قابل کاربرد در صنایع میکرو الکترونیک به‌عنوان نیمه رسانا، همچنین به منظور بهبود خصوصیات سطح در اجزای مکانیکی، در ساخت سلول‌های خورشیدی و سایر صنایع).

۳- دسته‌بندی حالت‌های مختلف پاشش الکتریکی

با توجه به اینکه فرایند پاشش الکتریکی به وسیله مشخصه‌های مایع مانند کشش سطحی، گرانشی، چگالی و هدایت الکتریکی و همچنین برخی از خصوصیات دستگاه مانند قطر افشانک، شدت میدان الکتریکی و شدت جریان حجمی مایع کنترل می‌شود، ترکیب این متغیرها حالت‌های مختلف پاشش الکتریکی را نتیجه می‌دهد [۱۳]. بنابراین دسته‌بندی حالت‌های گوناگون این فرایند دارای

1. Dripping Mode
 2. Jet Mode
 3. Kink and Varicose Instabilities

ناپایداری‌های ذکر شده توزیع اندازه قطرات گسترده است. شکل (۲) حالت قطره‌ای و جت و حالت انتقالی بین آنها را نشان می‌دهد.



شکل ۲- حالت‌های کلی در پاشش الکتریکی. به ترتیب از سمت چپ، قطره‌ای، انتقالی و جت [۱۳]

همانطور که بیان شد، از آنجا که ترکیب خصوصیات مایع و خصوصیات دستگاه یک حالت خاص از فرایند پاشش الکتریکی را نتیجه می‌دهد بنابراین مرزبندی خاصی را نمی‌توان در شرایط عملیاتی انجام داد. به‌طور مثال نمی‌توان به صورت کمی محدوده ولتاژی را که در آن حالت قطره‌ای ایجاد می‌شود تعیین کرد زیرا به جز ولتاژ، متغیرهای دیگری نیز بر آن تأثیر گذار هستند. ممکن است در ولتاژی ثابت تغییر دیگر متغیرها فرایند را از حالت قطره‌ای به حالت جت تغییر دهد. بنابراین تعیین محدوده‌ای برای هر یک از متغیرها در هر حالت از فرایند امکان‌پذیر نخواهد بود. با وجود این می‌توان از لحاظ کمی بیان کرد که به‌طور معمول، حالت قطره‌ای در ولتاژهای پایین و حالت جت در ولتاژهای بالا به وجود می‌آیند. برای دسته‌بندی جامع‌تر که دربرگیرنده تمامی حالت‌های مشاهده شده در فرایند پاشش الکتریکی باشد، دو معیار شکل هندسی مایع در دهانه خروجی افشانک و رفتار جت در جدا شدن قطره‌ها از آن مورد تحلیل قرار می‌گیرد. با توجه به معیارهای مذکور می‌توان فرایند پاشش الکتریکی را به شرح زیر، همانگونه که در شکل (۳) نمایش داده شده است، دسته‌بندی کرد [۱۳].

۱-۳ حالت قطره‌ای

این حالت با شرایطی که در آن میدان الکتریکی وجود ندارد تفاوت

چندانی نمی‌کند. در حالت قطره‌ای، قطرات با غلبه نیروهای الکتریکی و وزن بر کشش سطحی، با شکل کروی منظم از دهانه افشانک، جدا می‌شوند. پس از جدا شدن قطره از افشانک، سطح کشیده شده مایع در دهانه افشانک به شکل یک نیم کره جمع می‌شود. با افزایش ولتاژ اعمال شده، سطح مایع در دهانه افشانک بیشتر کشیده شده و لذا قطرات کوچکتری تولید می‌گردد. با افزایش بیشتر ولتاژ نرخ تولید قطرات بالا رفته و قطرات در هنگام جدا شدن از سطح مایع به گونه‌ای به نظر می‌رسند که به‌وسیله یک رشته بسیار باریک از مایع به سطح مایع اتصال دارند (شکل (۱-۳)).

۲-۳ حالت ریز قطره‌ای^۱

در این حالت میدان الکتریکی به اندازه‌ای قوی است که سطح مایع در دهانه افشانک به صورت بیضوی در می‌آید. تفاوت این حالت با حالت قطره‌ای در این است که در حالت اول سطح مایع پس از جدا شدن قطره به سوی افشانک برگشته و منقبض می‌شود در صورتی که در حالت اخیر سطح مایع کاملاً ثابت باقی می‌ماند. قطراتی که معمولاً کوچکتر از قطر افشانک می‌باشند در این حالت تولید می‌شوند. حالت ریز قطره‌ای در شدت جریان حجمی پایین رخ می‌دهد. اندازه قطرات تولید شده در این حالت از چند میکرون تا ۱۰۰ میکرون بوده و توزیع اندازه آنها یکنواخت می‌باشد. نرخ تولید قطره در این روش از چند ده تا چند صد قطره در ثانیه متغیر است (شکل (۲-۳)).

۳-۳ حالت دوکی شکل^۲

حالت قطره‌ای و ریز قطره‌ای تنها در ناحیه محدودی از ولتاژ و شدت جریان حجمی اتفاق می‌افتد. در صورتی که شدت جریان حجمی و ولتاژ به اندازه کافی بالا باشد، سطح مایع در راستای میدان الکتریکی کشیده شده و به‌صورت یک جت ضخیم در می‌آید که در نتیجه قطعات دوکی شکل مایع از آن جدا می‌شوند. افزایش ولتاژ در این حالت سبب تولید چند جت به صورت همزمان می‌شود و در صورتی که شدت جریان حجمی مایع نیز افزایش یابد تولید متناوب قطره‌های دوکی با یک جت پیوسته جایگزین خواهد شد (شکل (۳-۳)).

1. Micro Dripping Mode
2. Spindle Mode

۳-۴ حالت چند دوکی^۱

تولید قطرات در این حالت مانند حالت دوکی شکل بوده با این تفاوت که قطرات مایع به صورت تناوبی از نقاطی مجزا واقع در لبه‌های افشانک جدا می‌شوند. در این حالت، نقاطی که در آنها جت مایع تشکیل می‌شوند به صورتی یکنواخت در لبه افشانک پخش می‌گردند (شکل (۳-۴)).

۳-۵ حالت سطح مایع چند شاخه شده^۲

در صورتی که شدت جریان حجمی مایع تا حد ممکن افزایش یابد ولی قادر به تولید یک جت پیوسته مایع نباشد و ولتاژ اعمال شده نیز به اندازه کافی زیاد باشد، قطعات مایع با شکل‌هایی نامشخص و به صورت همزمان از سطح مایع جدا می‌شوند. در این حالت توزیع اندازه قطرات تشکیل شده بسیار گسترده خواهد بود (شکل (۳-۵)).

۳-۶ حالت جت نوسان کننده^۳

با افزایش شدت جریان سیال در حالت قطره‌ای، فرکانس تولید قطرات، بالا می‌رود و در قطرات تولید شده تمایل پیوستن به یکدیگر ایجاد می‌گردد. با افزایش بیشتر شدت جریان سیال پس از عبور از یک ناحیه گذرا سرانجام رشته ثابتی از مایع در دهانه افشانک حاصل می‌شود و سیال پس از طی کردن طول مشخصی از آن، به علت ایجاد شوک‌هایی در طول فیلم به قطرات مایع تبدیل می‌شود. در این حالت به علت فاصله کم بین قطرات باردار تولید شده و فیلم مایع، جت مایع شروع به نوسان می‌کند. قطرات تولید شده نیز از توزیع اندازه یکنواختی برخوردار نمی‌باشند (شکل (۳-۶)).

۳-۷ حالت جت فرره‌ای^۴

در این حالت سطح مایع که به شکل مخروط در آمده و جت مایع که در نوک مخروط تشکیل گشته، با یکدیگر در مسیری مارپیچ شروع به نوسان می‌کنند. افزایش ولتاژ منجر به کشیده شدن جت و چرخش سریع‌تر آن می‌گردد. تغییرات ولتاژ در این حالت، تأثیر چندانی بر توزیع اندازه قطرات ندارد (شکل (۳-۷)).

۳-۸ حالت جت مخروطی^۵

در این حالت سطح مایع در دهانه افشانک به صورت یک مخروط منظم و متقارن نسبت به محور افشانک می‌باشد و یک جت باریک (در حدود ۱۰۰ میکرو متر) در نوک این مخروط تشکیل می‌شود. سطح جانبی مخروط ممکن است به سه صورت مقعر، محدب و یا مسطح وجود داشته باشد. این جت مایع متحمل دو نوع ناپایداری تورم و چرخش می‌گردد. در ناپایداری تورمی، موج‌هایی در سطح جت ایجاد می‌شود ولی جت از مسیر مستقیم خود که در راستای محور افشانک است منحرف نشده و این موجها در نقاطی منقبض شده و جت پیوسته به قطرات مایع شکسته می‌شود. در ناپایداری چرخشی مسیر جت به علت نیروهای اینرسی و الکتریکی اندکی منحرف شده و به دور خود می‌چرخد و به قطرات مایع تبدیل می‌شود. قطره‌های تولید شده در این حالت تقریباً یک اندازه و کروی می‌باشند. با افزایش ولتاژ در این حالت، قطر جت کاهش می‌یابد و طول آن نیز کوتاه‌تر می‌شود. قطره‌های کوچکی در اندازه‌های چند ده میکرون در این حالت تولید می‌گردد. به طور مثال با استفاده از آب مقطر اندازه قطره‌ها تقریباً کوچکتر از ۳۰ μm بوده است (شکل (۳-۸)).

۳-۹ حالت جت چندگانه^۶

این حالت با افزایش پتانسیل الکتریکی و شدت جریان حجمی از حالت جت مخروطی بوجود می‌آید. ابتدا سطح مایع مخروطی، منحرف شده و جت در لبه‌های افشانک تشکیل می‌شود. این انتقال جت از مرکز به لبه افشانک ناپایدار بوده و سرانجام دو و یا سه جت که نسبت به محور افشانک متقارن هستند تشکیل می‌گردد. سطح مایع در دهانه افشانک کاملاً مسطح شده و تنها در نقاطی که جت تشکیل می‌شود به صورت مخروط‌های کوچکی ظاهر می‌گردد. در این حالت ضخامت هر جت کوچکتر از چند ده میکرومتر می‌باشد. هر جت به صورت جداگانه قطرات بسیار ریز مایع را تولید می‌کند و موجب ایجاد یک مه رقیق در اطراف افشانک می‌گردد. با افزایش شدت جریان حجمی مایع تعداد نقاطی که در آنها جت مایع تشکیل می‌شود بیشتر شده و افزایش پتانسیل الکتریکی منجر به نازک‌تر شدن جت‌ها می‌گردد (شکل (۳-۹)).

1. Multi-Spindle Mode
2. Ramified-meniscus
3. Oscillating-jet Mode
4. Precession-jet Mode

5. Cone-jet Mode
6. Multi. Jet Mode

۳-۱۰ حالت جت چند شاخه^۱

افزایش بیش از اندازه شدت جریان حجمی مایع در حالت جت چندگانه هنگامی که پتانسیل الکتریکی به اندازه کافی زیاد باشد منجر به رشد سطح مایع و تغییر شکل آن از حالت مسطح به صورت یک دوک که به دهانه افشانک متصل است، می شود. در این حالت جت های مایع در سطح دوک پخش می شوند (شکل (۱۰-۳)).

در بین این حالات، تنها در حالت قطره ای، ریز قطره ای و جت مخروطی، قطرات کروی با توزیع اندازه یکسان تولید خواهند شد و قطرات تولید شده در حالت جت مخروطی به مراتب کوچکتر از دو حالت دیگر بوده و بنابراین دارای کاربردهای وسیع تری نیز می باشند.

همانطور که بیان شد در فرایند پاشش الکتریکی، شرایط عملیاتی از جمله شدت جریان حجمی، شدت میدان الکتریکی، قطر افشانک و همچنین خواص مایع مانند چگالی، هدایت الکتریکی، گرانی و کشش سطحی، بر اندازه قطرات و توزیع اندازه آنها و در نهایت حالت تولید قطرات تأثیر می گذارند. در زیر به بررسی تأثیر هر کدام از این عوامل بر فرایند پاشش الکتریکی می پردازیم:

۴- تأثیر پارامترهای مختلف بر فرایند پاشش الکتریکی

۴-۱-۱ شرایط عملیاتی

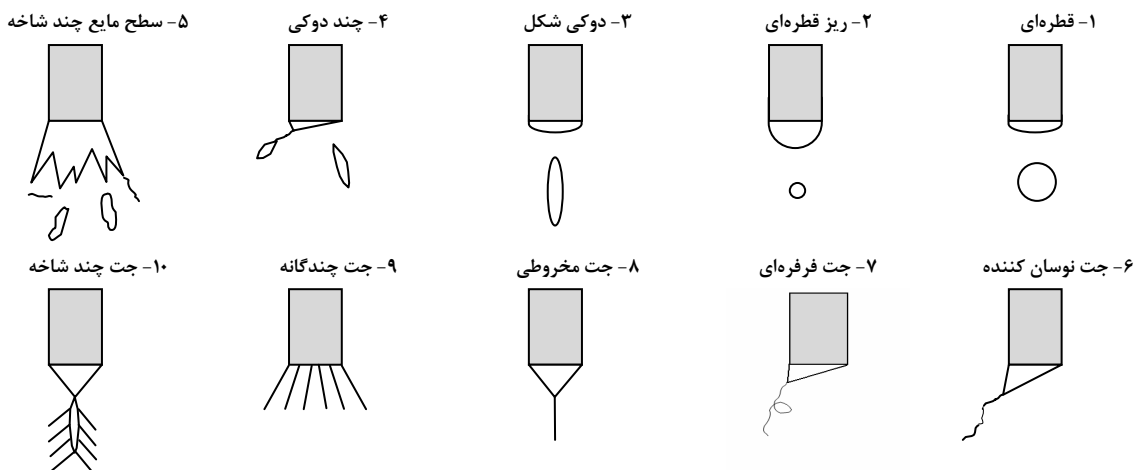
۴-۱-۱-۱ شدت جریان حجمی

تأثیر شدت جریان حجمی به حالت کلی پاشش الکتریکی بستگی دارد. در حالت قطره ای تغییرات این پارامتر تنها بر نرخ تولید قطرات

تأثیر دارد و افزایش یا کاهش آن منجر به افزایش یا کاهش در تعداد قطرات تولید شده در واحد زمان می شود در حالی که اندازه قطرات بدون تغییر باقی می ماند [۱]. در حالت جت، اندازه قطرات تولید شده با ریشه دوم شدت جریان حجمی رابطه مستقیم دارد [۲، ۱۵].

۴-۱-۲ شدت میدان الکتریکی

در اکثر مطالعات، میدان الکتریکی توسط اختلاف پتانسیل اعمال شده بین افشانک و یک الکتروود حلقوی که در فاصله مشخصی پایین تر از افشانک قرار دارد ایجاد می شود. شدت میدان الکتریکی ایجاد شده به عوامل مختلف از جمله شدت اختلاف پتانسیل اعمال شده بین افشانک و الکتروود حلقوی، فاصله بین افشانک و الکتروود حلقوی، قطر خارجی افشانک و قطر سوراخ الکتروود حلقوی بستگی دارد، که در بین آنها دو پارامتر اول تأثیر بیشتری بر شدت میدان الکتریکی دارند. شدت میدان با اختلاف پتانسیل اعمال شده رابطه مستقیم و با فاصله بین افشانک و الکتروود حلقوی نسبت عکس دارد. در روش پاشش الکتریکی، میدان الکتریکی اصلی ترین پارامتر برای اعمال نیرویی در جهت شتاب گرانش بر سطح مایع چسبیده به دهانه افشانک و غلبه بر نیروی کشش سطحی و تولید قطرات در اندازه های مختلف می باشد [۸]. همواره یک ولتاژ بحرانی V_c وجود دارد که قبل از آن، افزایش ولتاژ منجر به کاهش تدریجی اندازه قطرات می گردد. در ولتاژ بحرانی اندازه قطرات به طور ناگهانی کاهش پیدا می کند. کاهش اندازه قطرات بعد از ولتاژ بحرانی نسبت به افزایش ولتاژ چندان حساس نمی باشد [۴].

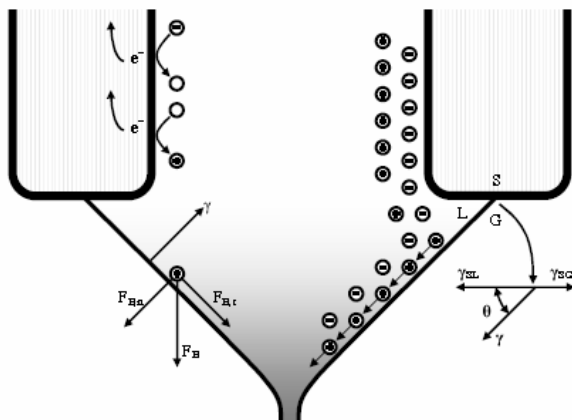


شکل ۳- انواع حالت های پاشش الکتریکی [۱۳]

آویخته به افشانک می‌شود و این نیرو پس از غلبه بر نیروی کشش سطحی منجر به پاره شدن سطح مایع و تولید قطره می‌گردد. بنابراین می‌توان با افزایش چگالی، قطرات کوچکتری از مایع را تولید کرد.

۴-۲-۳ هدایت الکتریکی

هدایت الکتریکی به عنوان خصوصیتی از مایع که میدان الکتریکی بر آن اثر می‌کند در فرایند پاشش نقش مهمی دارد، به گونه‌ای که پاشش الکتریکی مایعاتی که قابلیت هدایت الکتریکی ندارند، ممکن نیست. در مواردی که نیاز به تولید قطرات از یک محلول غیر هادی باشد، افزودن اندکی از یک نمک یا مایعی که دارای پیوند یونی است سبب ایجاد خاصیت هدایت الکتریکی در محلول می‌گردد [۳]. با توجه به شکل (۴)، میدان الکتریکی سبب کشیده شدن یون‌های هم‌نام به سطح مایع می‌شود. تجمع یون‌ها با بار یکسان در سطح مایع و نیروی دافعه بین آنها منجر به کاهش اثر نیروی کشش سطحی می‌شود و سطح مایع آسان‌تر تحت تأثیر نیروی وزن قرار گرفته، قطرات کوچکتری شکل می‌گیرند.



شکل ۴- تأثیر هدایت الکتریکی مایع و تأثیر میدان الکتریکی بر ایجاد قطرات

۴-۲-۴ گرانی

نتایج مطالعات انجام گرفته نشان می‌دهد که افزایش گرانی تأثیر بسزایی بر حالت پاشش الکتریکی دارد و سبب افزایش اندازه و همچنین توزیع اندازه قطرات تولید شده می‌گردد [۲]. اعمال میدان الکتریکی قوی سبب افزایش چگالی بار در سطح مایع در نوک نازل

۴-۱-۳ قطر افشانک

قطر افشانک در یک محدوده مشخص رابطه‌ای مستقیم با اندازه قطرات تولید شده دارد [۱۲]، به این ترتیب که افزایش و یا کاهش در قطر افشانک خارج از این محدوده تأثیری بر اندازه قطرات نخواهد داشت. البته در مورد مایعاتی که سطح افشانک را خیس می‌کنند قطر خارجی افشانک و در مورد مایعاتی که سطح آنرا خیس نمی‌کنند قطر داخلی افشانک دارای اهمیت می‌باشد.

۴-۲-۲ خصوصیات مایع

در مورد خصوصیات از مایع که بر فرایند پاشش الکتریکی تأثیرگذار هستند می‌توان به چگالی، هدایت الکتریکی، گرانی و کشش سطحی اشاره کرد [۱۶، ۱۷]. این خصوصیات نقش تعیین کننده‌ای در حالت کلی پاشش داشته و بخصوص در حالت جت، تأثیر عمده‌ای بر نحوه ایجاد قطرات از جت مایع دارند. در قسمت زیر به طور جداگانه به بررسی تأثیر هر یک از این پارامترها بر اندازه قطرات پرداخته‌ایم.

۴-۲-۱ کشش سطحی

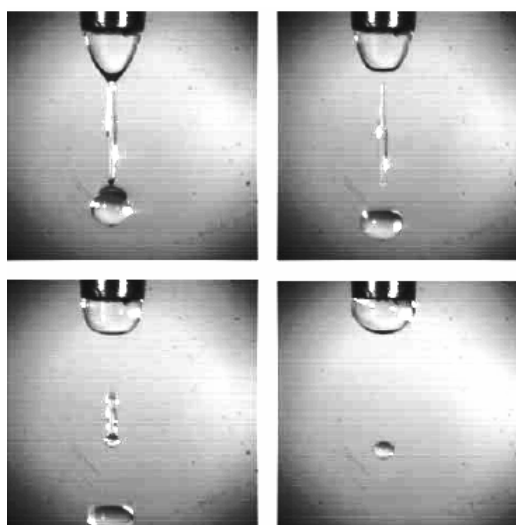
مهم‌ترین عامل در ایجاد قطرات، کشش سطحی مایع است. نیروی جاذبه قویتری، بین مولکول‌هایی که در سطح مایع قرار دارند، عامل اصلی این خاصیت است. در حالتی که هیچ‌گونه میدان الکتریکی موجود نباشد، هر چه کشش سطحی مایع بزرگتر باشد، وزن بیشتری از مایع متصل به افشانک برای غلبه بر کشش سطحی لازم است و قطرات بزرگتری تولید خواهند شد. بنابراین رابطه مستقیمی بین کشش سطحی و اندازه قطرات تولید شده وجود دارد. با توجه به این رابطه، برای ایجاد قطرات یک اندازه با استفاده از روش پاشش الکتریکی از دو محلول که کشش سطحی متفاوت دارند، محلولی که کشش سطحی بزرگتری دارد نیاز به اعمال اختلاف پتانسیل بیشتری خواهد داشت.

۴-۲-۴ چگالی

خصوصیتی از مایع که در مقابل کشش سطحی وجود دارد، چگالی است. با وجود میدان الکتریکی یکسان و همچنین شتاب گرانش ثابت، افزایش چگالی مایع منجر به افزایش نیروی وزن بر قطره

گشته و نیروی کشش سطحی در این حالت خنثی می‌شود. در این شرایط اثر گرانشی بر نحوه تولید قطرات بسیار تعیین کننده است و افزایش آن سبب ایجاد قطرات دوکی شکل و بیضی شکل می‌شود. علاوه بر این، افزایش گرانشی باعث ایجاد یک رشته باریک از مایع بین افشانک و قطره آویخته به آن مطابق شکل (۵) می‌گردد. پس از جدا شدن قطره، این رشته نیز در برخی از موارد قطرات ریزتری را تولید می‌کند که به قمر^۱ (یا ریزقطره) معروف می‌باشند [۱۸]. شکل زیر به روشنی بیانگر حالتی است که در آن قطره اصلی و همچنین یک ریزقطره تشکیل می‌شود. ذکر این مطلب نیز ضروری است که در این حالت، تعداد ریزقطراتی که بین دو قطره اصلی تولید می‌شوند با افزایش شدت جریان حجمی، افزایش می‌یابند [۱۹].

سطحی بر اندازه، توزیع اندازه و در نهایت، حالت تولید قطرات، تأثیر گذار می‌باشند. ترکیب هر کدام از این پارامترها و تغییر مقادیر آنها سبب پیدایش حالت‌هایی گوناگون در فرایند پاشش الکتریکی خواهد شد. از آنجا که در هر حالت، قطرات تولید شده دارای اندازه و توزیع اندازه مختلف هستند دسته‌بندی فرایند سبب سهولت در انتخاب هر حالت، بسته به نیاز مورد نظر، می‌شود. این در حالی است که تعیین محدوده کمی تمامی متغیرها در هر حالت، ممکن نخواهد بود. در بین حالات مختلف این فرایند، تنها در حالت قطره‌ای، ریز قطره‌ای و جت مخروطی، قطرات کروی با توزیع اندازه یکسان تولید می‌شوند. قطرات تولید شده در حالت جت مخروطی به مراتب کوچکتر از دو حالت دیگر می‌باشند و بنابراین دارای کاربردهای وسیع تری نیز هستند. در انتها، مروری بر تأثیر شدت جریان حجمی مایع، شدت میدان الکتریکی و قطر افشانک به عنوان شرایط عملیاتی و کشش سطحی، چگالی، هدایت الکتریکی و گرانشی به عنوان خصوصیات مایع بر فرایند پاشش الکتریکی به صورت جداگانه انجام گرفته است.



شکل ۵- تشکیل ریز قطره در فرایند پاشش الکتریکی [۱۴]

مراجع

- [1] Speranza, A. "Effect of electrostatic field on dripping of highly conductive and viscous liquids". J. Powder Technology, 135, 361-375, (2003).
- [2] Xie, J. "Electrohydrodynamic atomization for biodegradable polymeric particle production". J. Colloid and Interface Science, 302, 103-111, (2006).
- [3] Jayasinghe, S. N. "Effect of viscosity on the size of relics produced by electrostatic atomization". J. Aerosol Science 33, 1379-1386 (2002).
- [4] Watanabe, H. "Experimental study on electrostatic atomization of highly viscous liquids", Electrostatics, 57, 183-197, (2007).
- [5] Lenggoro, I. W. "Sizing of colloidal nanoparticle by electrospray and differential mobility analyzer methods", Sizing of colloidal solutions, 18, 4585-4593, (2002).
- [6] Jaworek, A. "Electrospraying route to nanotechnology: An overview", Electrostatic, article in press.
- [7] Okuda, H. "Electrostatic atomization-Experiment, theory and industrial application", plasma physics, 3, 2191-2209, (1996).
- [8] Shin, W. T. "Electric-field effect on interface: electrospray and electrocoalescence", Colloid and interface science, 9, 249-261, (2004).

۵- نتیجه‌گیری

پاشش الکتریکی روشی است که با اعمال میدان الکتریکی، به عنوان یک عامل خارجی، اندازه قطرات را در پاشش مایعات کنترل می‌کند. در این روش، میدان الکتریکی، اصلی‌ترین عامل برای اعمال نیرو در جهت شتاب گرانش بر سطح مایع چسبیده به دهانه افشانک و غلبه بر نیروی کشش سطحی و تولید قطرات در اندازه‌های مختلف می‌باشد. در فرایند پاشش الکتریکی، شرایط عملیاتی شامل شدت جریان حجمی، شدت میدان الکتریکی و قطر افشانک و همچنین خواص مایع مانند چگالی، هدایت الکتریکی، گرانشی و کشش

1. Satellite

- [9] M. Sato, H. Takahashi, M. Awazu, T. Ohshima, "Production of ultra-uniformly-sized silica particles by applying ac superimposed on dc voltage", *Electrostatic*, 46, 171-182, (1999).
- [10] J.C. Ijsebaert, K.B. Geerse, J.C.M. Marijnissen, B. Scarlett, "Electrohydrodynamic spraying of inhalation medicine", *Aerosol Science*, 30, 825-830, (1999).
- [11] Watanabe H. "Preparation of immobilized enzyme gel particle using an electrostatic atomization technique", *Biochemical Engineering*, 8, 171-180, (2001).
- [12] C.H. Chen, M.H.J. Emond, E.M. Kelder, B. Meester, J. Schoonman, "Electrostatic sol-spray deposition of nanostructured ceramic thin films", *Aerosol Science*, 30, 959-966- (1999).
- [13] Jaworek A. "Classification of the modes of EHD spraying", *Aerosol Science*, 30, 893-906, (1999).
- [14] A. Speranza, M. Ghadiri, M. Newman, L. S. Osseo, G. Ferrari, "Electro-Spraying of highly conductive and viscous liquid", *Electrostatics*, 51, 494-503, (2001).
- [15] B. K. Ku, S. S. Kim, "Electrospray characteristics of highly viscous liquids", *Aerosol Science*, 33, 1361-1371, (2002).
- [16] B. Dudout; J.C.M. Marijnissen; B. Scarlett, "Use of EHDA for the production of nanoparticle", *Aerosol Science*, 30, 687-699, (1999).
- [17] D.M.A. Camelot, D. Brunner, R.P.M. Hartman, J.C.M. Marijnissen, B. Scarlett, "Mechanism of jet break-up for EHDA in the cone-jet mode". *J. Aerosol Science*, 29, 841-855, (1998).
- [18] J. Xie, C.Wang, "Electrospray in the dripping mode for cell microencapsulation", *Colloid and interface science*, 312, 247-250, (2007).
- [19] D.M.A. Camelot, D. Brunner, R.P.M. Hartman, J.C.M. Marijnissen, B. Scarlett, "Experimental study of the jet break up for EHDA of liquids in the cone-jet mode", *Aerosol science*, 30, 347-356, (1998).