



مطالعه تجربی بر روی الکترواسپری مخلوط اتانول-آب با غلظت‌های مختلف با تصویربرداری پرسرعت

مهدی باقریان دهقی، مهرزاد شمس*، پژمان نادری

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۲۱
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸

کلمات کلیدی:

قطر جت
زاویه مخروط
ناحیه پایدار
مخلوط اتانول-آب
الکترواسپری

خلاصه: با توجه به کاربردهای گسترده و گوناگون الکترواسپری در جنبه‌های مختلف زندگی انسان‌ها، این موضوع همواره مورد توجه محققان بوده است. در این مقاله، به بررسی تجربی فرآیند الکترواسپری برای مخلوط اتانول-آب با سه غلظت مختلف ۷۰٪، ۹۶٪ و ۹۹/۹٪ پرداخته شده است. در این مقاله، ابتدا مدهای مختلف الکترواسپری برای اتانول ۷۰٪، براساس تصاویر پرسرعت گرفته شده؛ تعریف و توضیح داده شده‌اند. در قسمت دوم مقاله، به محاسبه دقیق زاویه مخروط و قطر جت مخروط تیلور برای ابتدا و انتهای ناحیه پایدار الکترواسپری مخلوط اتانول-آب برای سه غلظت ۷۰٪، ۹۶٪ و ۹۹/۹٪ پرداخته شده است. برای این منظور، از تصویربرداری پرسرعت و پردازش تصاویر حاصل از آن استفاده شده است. در نهایت، زاویه مخروط و قطر جت خروجی از مخروط برای این سه سیال برای تمامی نقاط شروع و پایان ناحیه پایدار الکترواسپری در دبی‌های ۰/۱ تا ۱ میلی‌لیتر بر ساعت محاسبه شده است. میانگین قطر جت برای تمامی نقاط ناحیه پایدار برای سیالات اتانول ۷۰٪، ۹۶٪ و ۹۹/۹٪، به ترتیب برابر ۳۳/۷۸، ۳۴/۴۳ و ۳۱/۷۰ میکرون می‌باشد. علاوه بر این، میانگین زاویه مخروط برای تمام نقاط ناحیه پایدار نیز برای سیالات اتانول ۷۰٪، ۹۶٪ و ۹۹/۹٪، به ترتیب برابر ۸۷/۲۶°، ۸۵/۸۰° و ۸۴/۱۳° می‌باشد. بنابراین، بیش‌ترین مقادیر زاویه مخروط و قطر جت مربوط به اتانول ۷۰٪ و کم‌ترین آن مربوط به اتانول ۹۹/۹٪ می‌باشند. همچنین، با مقایسه داده‌های تجربی این مقاله با قوانین مقیاس بندی گانن کلو برای حداقل دبی و قطر جت متناظر آن در مود جت مخروطی شکل، صرفاً برای δ_{μ}' ، بین ۰/۱ تا ۱۰۰ قابل قبول است و برای محدوده‌های بالاتر δ_{μ}' ، قوانین مقیاس بندی انحراف قابل توجهی از داده‌های تجربی پیدا میکند.

۱- مقدمه

الکترواسپری^۱ به فرآیند جدا شدن قسمت‌های کوچک سیال بر اثر تنش‌های الکتریکی گفته می‌شود که نام دیگر آن اسپری الکتروهایدرودینامیکی^۲ است [۱]. با توجه به کاربردهای گوناگون و وسیع الکترواسپری، مطالعه بر روی این موضوع مورد توجه محققان در سال‌های اخیر بوده است. از جمله کاربردهای الکترواسپری، می‌توان به کاربرد این وسیله در، اسپکترومتر جرمی^۳ [۲]، رنگ آمیزی [۳، ۴]، پوشش دهی^۴ [۵]، تولید یون^۵ [۶]، اسپری کردن سوخت در سیستم‌های احتراقی [۳]، امولوسیون سازی^۶ [۷]، ریز کپسول سازی^۷ [۸]، شست‌وشوی الکترواستاتیکی^۸

[۹]، سم‌پاشی محصولات^۹ کشاورزی [۱۰]، الگوسازی^{۱۱} [۱۱]، چاپگر جوهر افشان [۳، ۱۱، ۱۲]، رانشگرهای الکترواسپری^{۱۱} [۱۳، ۱۴]، تولید نانوذرات و میکروذرات [۱۵]، تولید فیلم نازک به شدت یکنواخت^{۱۲} [۱۵]، خنک‌سازی [۱۶]، رشته‌های شیمی تجزیه [۴]، بیوشیمی [۴، ۱۱]، زیست فناوری^{۱۳} [۲] و داروسازی [۴] و سایر کاربردهای فناورانه [۱۷-۲۲] اشاره کرد. در ادامه به صورت مختصر به تاریخچه مطالعه بر روی الکترواسپری پرداخته شده است. اولین مطالعه در زمینه تاثیر میدان الکتریکی بر روی جریان هیدرودینامیکی مربوط به چهارصد سال گذشته می‌باشد. در سال ۱۶۰۰ ویلیام گیلبرت اولین بار تفاوت بین نیروهای الکترواستاتیکی و نیروهای مغناطیسی را بیان کرد [۲۳]. اب نولت در سال ۱۷۴۷ برای اولین بار الکترواسپری با ساختار مدرن ساخت [۲۴]. لرد ریلی، در مقاله سال ۱۸۸۲، مطالعه سیستماتیکی بر روی ناپایداری قطرات باردار در فضای بدون میدان الکتریکی انجام داد. ریلی به

- 1 Electrospray
- 2 Electrohydrodynamic spraying
- 3 Mass spectrometry
- 4 Coating
- 5 Ionization
- 6 Emulsification
- 7 Microencapsulation
- 8 Electrostatic scrubbing

- 9 Crop spraying
- 10 Patterning
- 11 Electrospray Thrusters
- 12 Highly uniform thin film deposition
- 13 Biotechnology

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: shams@kntu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



پژوهش‌های گسترده و گوناگونی برای درک و توسعه الکترواسپری به روش‌های مختلف از جمله تجربی، عددی، تحلیلی انجام شده است که در ادامه به تعدادی از موضوعات شاخص در این زمینه اشاره خواهد شد. به دلیل اهمیت تعیین قطر قطرات و کنترل پذیری آن در کاربرد های گوناگون از جمله تولید نانوذرات [۱۵] و پوشش دهی سطوح [۵، ۱۵] کارهای گوناگونی در زمینه تاثیر خواص فیزیکی و الکتریکی سیال اسپری شونده در فرآیند اسپری الکتروهیدرودینامیکی انجام شده است [۱۲، ۳۴]. از جمله این کارها می‌توان به بررسی تاثیر گرانبوی سیال [۳۵-۴۳]، گذردهی الکتریکی^{۱۱} سیال [۴۴، ۴۵]، هدایت الکتریکی^{۱۲} سیال [۳۷، ۴۵-۴۷] و همچنین خواص و فشار سیال محیط [۴۸، ۴۹] بر تعیین قطر قطرات و پارامترهای مختلف الکترواسپری اشاره کرد. بررسی اثر پتانسیل اعمالی بر الکترواسپری [۳۷، ۵۰]، فرکانس اختلاف پتانسیل [۵۱]، قطب پتانسیلها [۱۳، ۴۸]، همچنین جریان الکتریکی عبوری از الکترواسپری [۴۶، ۴۹] و دبی سیال اسپری شونده [۴۹، ۵۱-۵۳] در فرآیند مذکور نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین تاثیر هندسه چیدمان‌های الکترواسپری بر فرآیند الکترواسپری؛ از جمله هندسه نازل [۵، ۱۱، ۵۴، ۵۵]، هندسه الکتروود مقابل [۵۶-۵۸]، تعداد نازل [۵۹، ۶۰]، استفاده از دو نازل هم محور [۳۷، ۵۰]، بررسی تغییر فاصله نازل و الکتروود مقابل [۱۳، ۶۱] از جمله کارهای انجام شده در این زمینه هستند. با توجه به اهمیت بسیار زیاد مودهای الکترواسپری تحقیقات زیادی در تعریف و تعیین مودهای مختلف الکترواسپری انجام شده است که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد.

در فرآیند الکترواسپری، سطح سیال تحت تاثیر تنش های الکتریکی قرار می‌گیرد به همین علت شکل سیال به صورت موضعی به صورت جت تغییر شکل پیدا می‌کند و از بدنه اصلی سیال جدا شده و به قطرات تبدیل می‌شود. شکل هندسی جت و فرآیندی که سیال خروجی (از سوزن) به قطرات تبدیل می‌شود مود^{۱۳} الکترواسپری نام دارد [۶۲]. علت اهمیت تعیین مودها و پرداختن به مطالعه آنها عبارت است از: ۱- تولید قطرات با اندازه ها و بارهای الکتریکی مختلف، که در مود های مختلف ایجاد می‌شوند. ۲- پخش‌های گوناگون آیروسول در فضا، (انگاره و نمای کلی اسپری) که از مودهای مختلف حاصل می‌شوند. تلاش‌های مختلفی برای یافتن معیارهای تعیین مودهای الکترواسپری انجام شده است که بیش تر آنها به مشخصات هندسی جت و هلال سیال می‌پردازند [۶۳]. مودهای

صورت تئوری پیش‌بینی کرد زمانی که نیروی دافعه الکتریکی به اندازه کافی بزرگ باشد که بر نیروی کشش سطحی غلبه کند جت‌های ریز از قطرات خارج می‌شود. بیش‌ترین مقدار باری که قطرات می‌توانند تحمل کنند؛ امروزه به عنوان حد ریلی^۱ شناخته می‌شود. همچنین، شکسته شدن قطرات به عنوان تخلیه ریلی^۲ یا انفجار کلمبی^۳ شناخته می‌شود [۲۵]. ریلی در سال ۱۸۷۹، اثر قطر خارجی اریفیس بر قطر قطرات تولید شده را بررسی کرد [۲۶]. ۳۱ سال بعد، تامسون اولین آزمایش‌های طیف‌سنج جرمی را انجام داد [۲۷]. زلنی، در سال ۱۹۱۴، در تحقیقی پیشگام، به بررسی رفتار قطرات سیال خروجی از انتهای یک نازل شیشه‌ای در دو حالت باردار و بدون بار پرداخت [۲۸]. زلنی اولین بار مشاهدات مرئی مودهای مختلف الکترواسپری، مانند مودهای قطره چکانی^۴، نوسانی^۵ و مود جت مخروطی^۶ را مستند کرد که این مشاهدات همچنان دقیق هستند. علاوه بر این، زلنی دریافت؛ زمانی که مقدار بار به یک نقطه بحرانی برسد که در آن حلال تبخیر شود، قطرات به یک مه^۷ از قطرات کوچک‌تر تبدیل می‌شوند. او متوجه شد که این شکستن همان پدیده‌ی ناپایداری ریلی^۸ است [۲۸]. علاوه بر این، وی در سال ۱۹۱۵، حد ریلی را بر اساس پتانسیل به جای مقدار بار بیان کرد [۲۹]. زلنی در سال ۱۹۱۷، اولین تصاویر گذر زمان^۹ را با استفاده از دوربین پرسرعت با ۸۰۰ فریم بر ثانیه را از تشکیل قطرات باردار در فرآیند الکترواسپری ثبت کرد [۳۰]. در میانه قرن بیستم میلادی، با توجه به کارایی بالا و راحتی استفاده از الکترواسپری و همچنین کاهش هزینه‌ها در استفاده از آن در رنگ آمیزی و پوشش‌دهی، توجهات زیادی به الکترواسپری جلب شد. در سال ۱۹۴۱، هارولد رانزبرگ یک الکترواسپری جهت پوشش‌دهی ثبت اختراع کرد [۳۱]. در سال ۱۹۶۴ جفری تیلور باعث یک پیشرفت عظیم در فهم و درک ناپایداری سطحی سیال در میدان‌های الکتریکی شد و هلالی^{۱۰} مخروطی شکل را مدل کرد که به مخروط تیلور معروف است و زاویه نیم راس مخروط ۴۹/۳ است [۳۲]. در مقاله‌ی مشهور سال ۱۹۶۸ مالکم دول و همکاران اولین تلاش برای کوپل کردن الکترواسپری و طیف‌سنج جرمی انجام شد. کار وی، الهام بخش دیگر محققان در این زمینه بود [۳۳].

- 1 Rayleigh limit
- 2 Rayleigh discharge
- 3 Coulomb fission
- 4 Dripping
- 5 Pulsating
- 6 Cone-jet mode
- 7 Mist
- 8 Rayleigh instability
- 9 Time-lapse
- 10 Meniscus

- 11 Permittivity
- 12 Electrical conductivity
- 13 Mode

مود الکترواسپری شناسایی شده‌اند [۶۳]. اما مودی که بیشترین توجهات را به خود جلب کرده است مود جت مخروطی شکل می باشد که علت اصلی آن امکان تولید پیوسته‌ی یون می باشد [۲]. همچنین این مود، امکان ایجاد قطرات یکنواخت را برای کاربردهای مختلف از جمله داروسازی، پوشش دهی کنترل شده سطوح، تولید مواد آرایشی و بهداشتی و غیره را فراهم می‌آورد. به همین علت این مود و در نتیجه بررسی پایداری الکترواسپری اهمیت ویژه ای بین محققان دارد. در این فرآیند، اختلاف پتانسیل الکتریکی اعمالی بین سوزن نازل^{۱۱} و الکتروود مقابل، باعث اعمال نیروی الکترواستاتیکی بر سیال می‌شود که مولفه مماسی^{۱۲} آن باعث تشکیل مخروط تیلور^{۱۳} می‌شود [۱۲]. الکترواسپری شامل سه فرآیند می‌باشد که این فرآیندها در ادامه بیان شده‌اند. اولین فرآیند، شتاب‌گیری سیال درون مخروط است. این شتاب‌گیری و شکل مخروطی نتیجه توازن بین نیروهای تنش سطحی، تنش‌های الکتریکی، اینرسی، لزجت و جاذبه است. بعد از شتاب‌گیری سیال درون مخروط، سیال به شکل یک جت بسیار نازک از آن خارج می‌شود. دومین فرآیند در مود جت مخروطی^{۱۴}، فروپاشی^{۱۵} جت به قطرات است. فرآیند سوم، توسعه اسپری بعد از تولید قطرات می‌باشد. اندرکنش الکتریکی بین قطرات با بار بسیار زیاد و سایزهای مختلف و در نتیجه اینرسی‌های مختلف باعث تفکیک قطرات بر اساس اندازه می‌شود که قطرات ریزتر در لبه اسپری و قطرات بزرگ‌تر در مرکز اسپری یافت می‌شوند [۶۶].

اکثر تحقیقات انجام شده در زمینه پایداری الکترواسپری معطوف به بررسی محدوده پایداری ولتاژ-دبی [۱۳، ۵۷]، اثر شکل و فاصله الکتروودها [۱۳، ۵۷، ۵۸، ۶۱]، فرکانس ولتاژ اعمالی [۳۷، ۵۰] و غیره می‌باشد صرفاً تعداد محدودی مقاله در زمینه محاسبه استاتیکی شکل قطره تحت میدان الکتریکی [۳۲، ۶۷-۷۳] و میدان مغناطیسی [۷۴-۷۹] با روش‌های مختلف، عددی، نیمه تحلیلی و تحلیلی انجام شده است. بررسی زاویه مخروط و قطر جت الکترواسپری از مشخصات مهم هندسی در پایداری الکترواسپری می‌باشند. تعداد محدودی از مقالات به این موضوع پرداخته‌اند. در این مقالات نتیجه اصلی ایجاد یک رابطه بین زاویه مخروط به عنوان ورودی برای محاسبه ولتاژ شروع می‌باشد [۴۶، ۸۰-۸۲]. این ارتباط برای تمامی سیالات و شرایط کاری الکترواسپری قابل استفاده نیست و هرکدام برای محدوده‌ای خاص از فیزیک سیالات و مشخصه های هندسی الکترواسپری قابل استفاده

الکترواسپری به اختلاف پتانسیل (قطب، مقدار و فرکانس) اعمالی به دو سر الکتروودها (سوزن و الکتروود مقابل) [۱۳، ۳۷، ۴۸، ۵۰، ۵۱]، دبی سیال [۴۹، ۵۱-۵۳] و همچنین هندسه چیدمان (هندسه نازل، هندسه الکتروود مقابل، فاصله الکتروودها) [۵، ۱۱، ۱۳، ۵۴-۵۸، ۶۱] برای یک سیال با مشخصات معین فیزیکی و الکتریکی بستگی دارند [۶۲]. محدوده‌ی موده‌های مختلف بر اساس دبی و ولتاژ برای سیالات مختلف که خواص فیزیکی و الکتریکی متفاوت دارند تغییر می‌کند. تحقیقات گسترده‌ای در تاثیر این خواص بر روی محدوده موده‌های مختلف الکتروویدرودینامیکی انجام شده است. این خواص شامل، هدایت الکتریکی سیال [۳۷، ۴۵-۴۷]، گذردهی الکتریکی سیال [۴۴، ۴۵]، لزجت سیال [۳۵-۴۳]، چگالی سیال و کنش سطحی سیال می‌باشند. همچنین مود های الکتریکی تابع نوع سیال محیط اطراف اسپری از نظر ضریب هدایت الکتریکی، گذردهی الکتریکی و فشار سیال مذکور هستند [۴۸، ۴۹]. به‌طور کلی موده‌های الکترواسپری به دو گروه تقسیم بندی می‌شوند. گروه اول شامل مودهایی است که تنها قسمتی از سیال از سوزن جدا می‌شوند که شامل موده‌های قطره‌چکانی، ریزقطره‌چکانی^۱، دوکی شکل^۲، دوک چند شاخه‌ای^۳ و هلال منشعب^۴ می‌شود. گروه دوم شامل مودهایی می‌شود که مشخصه آن‌ها این است که سیال خروجی از سوزن به شکل یک جت بلند پیوسته است که این جت در فواصلی به قطرات ریزتر شکسته می‌شود. این گروه شامل موده‌های جت مخروطی، حالت جت نوسانی^۵، جت منشعب^۶ و جت چندشاخه^۷ می‌باشد. هلال سیال و جت آن در گروه دوم می‌تواند پایدار، مرتعش و یا به صورت مارپیچی^۸ به دور محور سوزن گردش کند یا به صورت نامنظم مانند شلاق^۹ حرکت کند. شاید بتوان گفت مود جت مخروطی مهم‌ترین مود در بین موده‌های مذکور است. این مود اولین بار توسط زنی مشاهده شد. مود جت مخروطی در سیالات با هدایت الکتریکی بسیار مختلف قابل حصول است. این مود اجازه تولید آبروسول با گستره زیاد قطر قطرات شامل قطرات با قطر زیر میکرون را می‌دهد. همچنین این مود امکان تولید آبروسول به صورت یکنواخت^{۱۰} را می‌دهد. به دلایل مذکور، پژوهش های گسترده ای در این مود انجام شده است [۶۴، ۶۵]. اگرچه تعداد زیادی

- 1 Microdripping
- 2 Spindle mode
- 3 Multispindle mode
- 4 Ramified minescus
- 5 Oscillating-jet
- 6 Ramified jet
- 7 Multijet
- 8 Spirally
- 9 Whip
- 10 Monodisperse

- 11 Nozzle
- 12 Tangential force
- 13 Taylor cone
- 14 Cone jet mode
- 15 Breakup

تصویربرداری از فرآیند الکترواسپری با توجه به نوع مطالعه، از دو روش پراش نور و سایه‌نگاری استفاده شده است. با توجه به روش مورد استفاده از منابع نور متفاوت و چینش متفاوت آن‌ها استفاده شده است. مشخصات و محدوده کاری تجهیزات مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۲- سیالات مورد استفاده و فرآیند آزمایش‌ها

در مجموع سه سیال، اتانول ۷۰٪، ۹۶٪ و ۹۹/۹٪ حجمی/حجمی در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مشخصات فیزیکی و الکتریکی این سیالات بر اساس داده‌های سازنده در جدول ۲ آورده شده است. اتانول‌های استفاده شده ساخت شرکت سیگما-آلدریج^۱ می‌باشد. علت استفاده از سه غلظت مذکور مخلوط اتانول-آب در این مطالعه در ادامه بیان شده است. اتانول با غلظت‌های ۷۰٪ و ۹۶٪، غلظت‌های رایج و پر کاربرد در صنایع شیمیایی محسوب می‌شوند و بیش‌ترین تولید اتانول مربوط به این غلظت‌ها است و به همین دلیل قیمت مناسبی برای استفاده به عنوان حلال برای الکترواسپری دارند. همچنین علت استفاده از اتانول ۹۹/۹٪ در این تحقیق، کاربرد این سیال به عنوان حلال خالص در دستگاه طیف سنج جرمی (در این دستگاه نقش اصلی را الکترواسپری به عنوان تولید کننده یون بازی می‌کند) و عدم تداخل در طیف سنجی و نتایج آن، به دلیل عدم وجود ناخالصی در این ماده می‌باشد. علت عدم استفاده از اتانول با غلظت‌های کم‌تر از ۷۰٪، افزایش شدید غلظت آب می‌باشد که کاربرد اتانول به عنوان پایدار کننده و حلال برای سایر مواد جهت الکترواسپری را را به دو علت از دست می‌دهد [۱۳]. ۱- افزایش شدید هدایت الکتریکی سیال که باعث بروز ناپایداری در الکترواسپری می‌شود. ۲- با افزایش غلظت آب، امکان تبخیر و جداسازی سیال عامل اصلی برای پوشش دهی، تجزیه، یونیزه شدن و غیره کاهش می‌یابد که در تعارض با هدف استفاده از اتانول به عنوان پایدار کننده می‌باشد.

برای هر سیال روند آزمایش به این صورت است که سیال مورد نظر به داخل سرنگ تمیز و شسته شده با آب و خشک شده به وسیله کمپرسور، منتقل می‌شود. این سرنگ از طریق یک لوله پلاستیکی به سوزن متصل است. حال سرنگ که درون پمپ سرنگی قرار دارد سیال را به طرف نازل پمپ می‌کند و دستگاه منبع تغذیه نیز ولتاژ لازم برای تشکیل الکترواسپری را تامین می‌کند. در این مطالعه بعد از انجام هر تست برای یک دبی و ولتاژ

هستند. اولین و معروف‌ترین تحقیق در زمینه محاسبه زاویه مخروط، مقاله تیلور در سال ۱۹۶۴ می‌باشد که با فرضیات در نظر گرفته شده، به زاویه $49/3^\circ$ درجه برای زاویه نصف مخروط دست یافت [۳۳]. این عدد نیز با ساده سازی‌های بسیاری از جمله عدم وجود افت فشار هیدرودینامیکی در مخروط، در نظر گرفتن سیال به عنوان هادی کامل الکتریکی و غیره انجام شده است. در جدیدترین مقاله نیز، زاویه نصف مخروط برای یک الکترواسپری با جریان متناوب^۱ برای سیالات با نسبت ضریب دی الکتریک بالا، حدود $12/6^\circ$ درجه حاصل شده است که با زاویه نصف مخروط تیلور با جریان مستقیم^۲ کاملاً متفاوت است [۸۲]. همچنین لتا و همکاران در سال ۲۰۱۱، به بررسی پایداری الکترواسپری مخلوط اتانول-آب پرداخته‌اند و تنها ولتاژ شروع برای مخلوط اتانول-آب را برای غلظت‌های ۰٪، ۵٪، ۱۰٪، ۲۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪، ۸۰٪ و ۱۰۰٪ به صورت تجربی به دست آورده‌اند و در نهایت با مقایسه نتایج حاصل شده دریافتند که با افزایش غلظت آب در مخلوط اتانول-آب، ولتاژ شروع افزایش می‌یابد [۱۳].

با توجه به مرور مقالات انجام شده، نوآوری کار حاضر، محاسبه دقیق زاویه و قطر جت مخروط تیلور برای ابتدا و انتهای ناحیه پایدار الکترواسپری مستقیم برای مخلوط اتانول-آب با سه غلظت ۷۰٪، ۹۶٪ و ۹۹/۹٪ با استفاده از تصویربرداری پرسرعت و پردازش تصویر در مود جت مخروطی شکل است که در کارهای گذشته انجام نشده است.

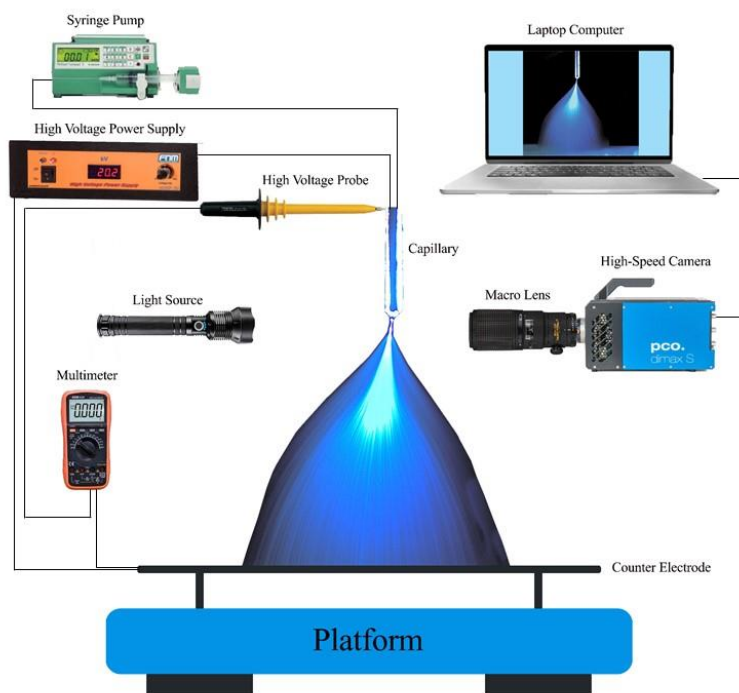
۲-۲- چیدمان آزمایشگاهی

۲-۱- هندسه کلی چیدمان آزمایشگاهی و تجهیزات مورد استفاده

شکل ۱ نشان دهنده طرحواره‌ی چیدمان استفاده شده در این مطالعه می‌باشد. سیال با استفاده از پمپ سرنگی از طریق لوله به نازل می‌رسد. نازل مورد استفاده در این چیدمان سوزن 21G با قطرهای داخلی و خارجی، $0/8$ و $0/51$ میلی‌متر می‌باشد. در مقابل نازل در فاصله $20/45$ میلی‌متری، الکتروود جمع‌کننده به ابعاد $170 \times 160 \times 2$ میلی‌متر قرار دارد. منبع تغذیه ولتاژ بالای مستقیم، از پتانسیل مثبت به نازل و از پتانسیل زمین به الکتروود مقابل متصل می‌باشد. برای اندازه‌گیری دقیق ولتاژ اعمالی به دو سر الکتروود، از یک مولتی‌متر متصل به یک پراب ولتاژ بالا جهت اندازه‌گیری استفاده شده است. برای تصویربرداری پرسرعت از دوربین PCO dimax S به همراه لنز ماکرو ۲۰۰ میلی‌متری نیکون استفاده شده است. دوربین به یک لپ‌تاپ جهت ذخیره‌سازی و پردازش آفلاین تصاویر متصل می‌باشد. برای

1 AC

2 DC



شکل ۱. طرح‌واره‌ای از فرایند آزمایش‌ها

Fig. 1. Schematic view of the laboratory setup and the experiment tests process

جدول ۱. مشخصات تجهیزات استفاده شده در این مطالعه

Table 1. Specifications of equipment used in this study

قسمت‌های اصلی	نام تجهیزات	مدل دستگاه	محدوده عملکردی
سیستم جریان	پمپ سرنگی	B. Braun Perfusor Compact S	دبی حجمی: ۰/۰۱ تا ۹۹ میلی لیتر بر ساعت
	منبع تغذیه ولتاژ بالا	FNM HV35 OV	محدوده ولتاژ: ۰/۱ ± ۳۵ KV
تصویر برداری پرسرعت	دوربین پر سرعت	PCO dimax S	حداکثر نرخ تصویربرداری: ۱۵۲۸۱۱ فریم بر ثانیه
	لنز ماکرو ۲۰۰ میلی متری	Nikon AF 200mm f/4D IF-ED Micro	فاصله کانونی: ۲۰۰ میلی‌متر
	لنز ماکرو ۱۰۵ میلی متری	Nikon AF-S 105mm f/2.8G VR Micro	فاصله کانونی: ۱۰۵ میلی‌متر
چیدمان	الکتروود مقابل	ورق آلومینیم	۲*۱۶۰*۱۷۰ میلی‌متر
	بدنه چیدمان	تفلون PTFE	۶*۳۳*۳۶ سانتی‌متر
سیستم‌های اندازه‌گیری	پرآب ولتاژ بالا	PD-28	0-20 KV ± 1%
	مولتی متر	VICTOR: Digital Multimeter VC-97	-
	هدایت سنج الکتریکی	Jenway 4510	-
	ترازو	Radwag ps510/c/1	۰/۰۰۱ تا ۵۰۰ گرم
تجهیزات ساخت سیال	هات پلیت-استریر	Heidolph Hei-Standard	۱۰۰-۱۴۰۰rpm, ۲۰-۳۰۰ °C
	حمام اولتراسونیک	Bandelin SONOREX TECHNIK Ultrasonic baths	-

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و الکتریکی مایعات مورد استفاده در این مطالعه

Table 2. Physical and electrical properties of fluids used in this study

سیالات استفاده شده	میانگین زاویه مخروط برای نقاط شروع ناحیه پایدار	میانگین زاویه مخروط برای نقاط پایان ناحیه پایدار	میانگین زاویه مخروط برای تمام نقاط ناحیه پایدار
اتانول ۷۰٪	$83/18^\circ \pm 1/44^\circ$	$90/73^\circ \pm 0/92^\circ$	$87/26^\circ \pm 1/17^\circ$
اتانول ۹۶٪	$86/23^\circ \pm 0/86^\circ$	$85/36^\circ \pm 1/36^\circ$	$85/80^\circ \pm 1/11^\circ$
اتانول ۹۹/۹٪	$83/42^\circ \pm 1/44^\circ$	$84/84^\circ \pm 1/30^\circ$	$84/13^\circ \pm 1/37^\circ$

۲-۳- تصویربرداری پرسرعت

برای بررسی مودهای مختلف الکترواسپری و تصویربرداری پرسرعت از هندسه کلی فرآیند الکترواسپری از تصویر برداری به روش پراش نور با استفاده از دو چراغ قوه و لنز ۲۰۰ بر روی دوربین پرسرعت در سرعت های ۱۰۰ و ۱۰۰۰ فریم بر ثانیه استفاده شده است. برای تصویربرداری از هندسه کلی فرآیند الکترواسپری، دوربین در فاصله ای قرار داده شده است که فضای نوک سوزن تا الکتروود جمع کننده به خوبی در تصویر ثبت شده، مشخص باشند. همچنین، در این حالت از دیافراگم با گشودگی F4 بر روی لنز ۲۰۰ استفاده شده است. چپش دوربین، چیدمان و تجهیزات نورپردازی در این حالت، در شکل ۲ به خوبی نمایش داده شده است.

برای بررسی دقیق فرآیند الکترواسپری در ناحیه پایدار، که مهم ترین هدف این تحقیق می باشد از تکنیک تصویربرداری سایه نگاری استفاده شده است. در این حالت، برای تصویر برداری دقیق از مخروط تیلور و سرسوزن، دوربین تا حد امکان به چیدمان نزدیک شده است. این حد، نزدیک ترین مکانی است که لنز ماکرو ۲۰۰ میلیمتری امکان تنظیم فاصله کانونی خود، بر روی سوژه مورد نظر را دارد. لنز ۲۰۰ میلی متری بر روی دیافراگم اف ۳۲ قرار داده شده است تا بیشترین عمق تصویر برای بررسی جزئیات فرآیند الکترواسپری که در عمق های مختلف رخ می دهند؛ حاصل شود. در این حالت، سرعت تصویربرداری از فرآیند الکترواسپری، با ۳۴۰۰۰ فریم بر ثانیه انجام شده است.

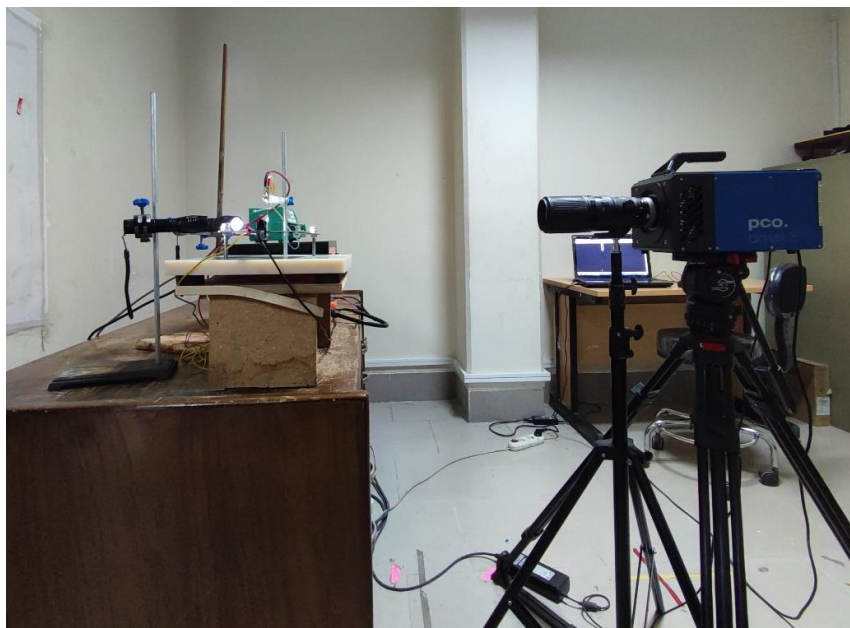
۳- نتایج و بحث

در این پژوهش در بخش اول به تعریف مودهای الکترواسپری برای اتانول ۷۰٪ پرداخته شده است. سپس، ناحیه جت مخروطی شکل بررسی

مشخص سطح الکتروود مقابل و سطح خارجی سوزن به خوبی تمیز و خشک می شود تا از هرگونه تداخل در میدان الکتریکی جلوگیری شود.

به دلیل کشش سطحی بالا اتانول و سیالات مورد استفاده در این مطالعه، سیال از سطح خارجی سوزن به سمت بالا حرکت می کند. افزایش تدریجی ولتاژ اعمالی بر سوزن تمامی قسمت های سیال موجود بر روی بدنه خارجی سوزن به سمت پایین حرکت می کند. بنابراین، در طول انجام آزمایش ها، ولتاژ به تدریج تا ولتاژ مورد نظر، از کم به زیاد، افزایش می یابد. این فرآیند برای هر آزمایش تکرار می شود. همچنین، شرایط تمامی آزمایش های انجام شده، در دما و فشار اتاق می باشد که ذرات معلق کمی نیز با چشم قابل مشاهده است.

در این مطالعه مودهای مختلف الکترواسپری با اتانول ۷۰٪ بررسی شده است. همچنین، در این مطالعه به دقت به بررسی ناحیه پایدار یا جت مخروطی^۱ شکل، پرداخته شده است. در این ناحیه، برای هر سیال، ولتاژ شروع و ولتاژ پایان برای دبی های ۰/۱ تا ۱ میلی لیتر بر ساعت بررسی و حاصل شده است. هر سیال، نیازمند ۲۰ آزمایش برای تصویربرداری از نقاط شروع و پایان، به همراه ۵ بار تکرار جهت اطمینان سنجی از نتایج این ۲۰ آزمایش می باشد. در مجموع، برای هر سیال ۱۰۰ آزمایش تصویربرداری پرسرعت از نمای نزدیک و نوک سوزن به روش سایه نگاری انجام شده است. تعدادی آزمایش نیز جهت تصویربرداری پرسرعت از مودهای مختلف الکترواسپری با اتانول ۷۰٪ انجام شده است. در مجموع، برای داده های مورد مطالعه در این تحقیق، بدون احتساب تست های انجام شده جهت اعتبارسنجی و اندازه گیری دقت وسایل و تجهیزات مورد استفاده، ۳۰۰ آزمایش برای بررسی ناحیه پایدار انجام شده است و چند ده آزمایش برای بررسی مودهای مختلف الکترواسپری با اتانول ۷۰٪ انجام شده است.



شکل ۲. چیدمان دوربین، چیدمان و تجهیزات نورپردازی در تصویر برداری عریض تر از فرآیند الکترواسپری

Fig. 2. Arrangement of camera, setup and lighting equipment for imaging of the electrospay process

شکل ۳ فرآیند های مذکور نمایش داده شده است.

۳-۱-۲- مود ریز قطره چکانی

در این حالت با اعمال میدان الکتریکی و اعمال دبی، توسط پمپ سرنگی، قطرات ایجاد می‌شوند. در این حالت، سیال با خروج از سوزن، به دلیل وجود کشش سطحی سیال به سمت بالا، بر روی جداره خارجی سوزن، حرکت می‌کند. اما به دلیل وجود نیروی الکترواستاتیکی اندازه بالا رفتن کمتر از حالت قبل است. این فرآیند تا زمانی که نیروی وزن سیال و نیروی الکترواستاتیکی با نیروی کشش سطحی سیال که یکدیگر را خنثی کنند ادامه دارد. از این نقطه به بعد، سیال بر اثر نیروهای الکترواستاتیکی و وزن سیال، به سمت پایین حرکت می‌کند و سیال در نوک سوزن جمع می‌شود. این جمع شدن تا آن جایی ادامه پیدا می‌کند تا قطره در آستانه جدا شدن از بدنه اصلی سیال قرار می‌گیرد و حالت گلوئی رخ می‌دهد. برای همین مود، دبی ۱۰ میلی‌لیتر بر ساعت و ولتاژ ۳۷/۰۳ کیلوولت بررسی شده است. در شکل ۴-الف، فرآیند جمع شدن سیال در نوک سوزن نمایش داده شده است. در شکل ۴-ب، این فرآیند تا گلوئی شدن به تصویر کشیده شده است. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است؛ طول سیال خارج شده از سوزن بیش‌تر از حالت قبلی می‌باشد. دلیل این اتفاق، افزایش دبی و ولتاژ اعمالی می‌باشد. در شکل ۵، فرآیند سقوط آزاد قطرات در این مود قابل مشاهده است.

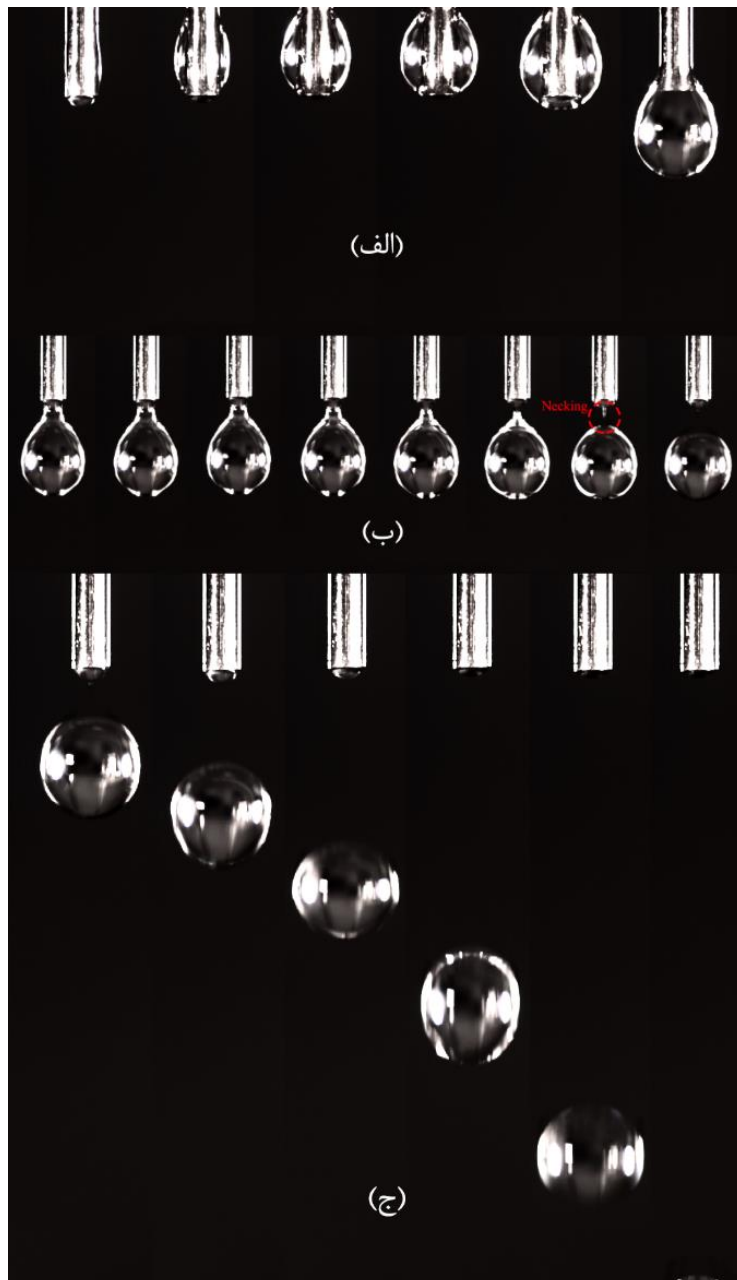
شده است و پارامترهای هندسی ناحیه پایدار جت مخروطی برای سه سیال اتانول ۷۰٪، ۹۶٪ و ۹۹/۹٪ با استفاده از پردازش تصویر مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۳-۱-۳- آشنایی با مود های الکتروهیدرودینامیکی:

۳-۱-۱- مود قطره‌چکانی

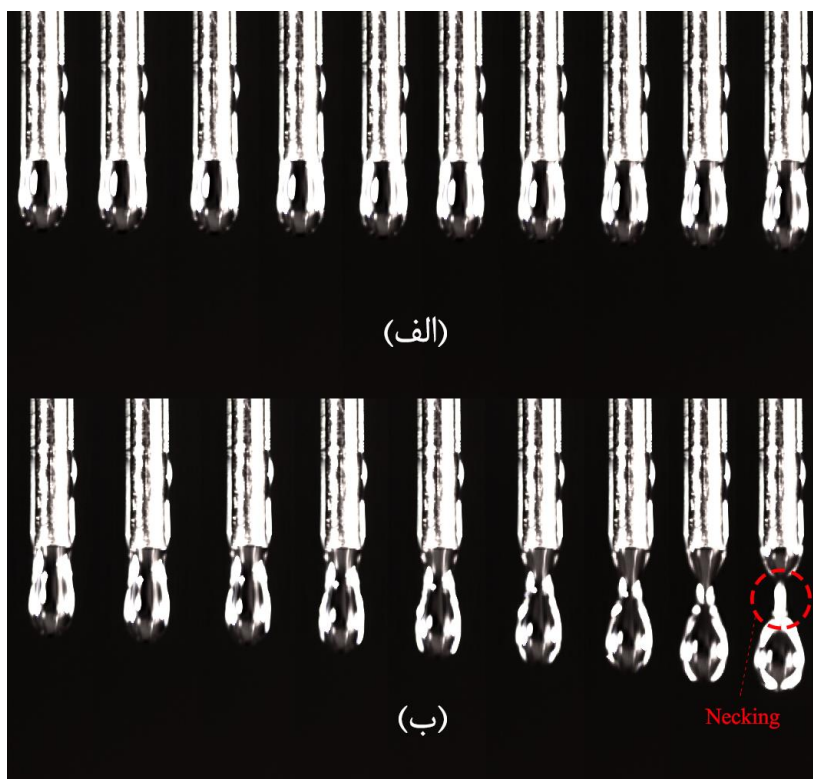
در این حالت بدون اعمال میدان الکتریکی و صرفاً با اعمال دبی توسط پمپ سرنگی، قطرات ایجاد می‌شوند در این حالت، سیال با خروج از سوزن، به دلیل وجود کشش سطحی سیال به سمت بالا بر روی جداره خارجی سوزن حرکت می‌کند. این فرآیند تا زمانی که نیروی وزن سیال با نیروی کشش سطحی سیال که یکدیگر را خنثی کنند؛ ادامه دارد. از این نقطه به بعد، سیال بر اثر وزن به سمت پایین حرکت می‌کند و سیال در سر سوزن جمع می‌شود. جمع شدن سیال تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که قطره در آستانه جدا شدن از بدنه اصلی سیال قرار می‌گیرد. در این حالت که به آن گلوئی شدن^۱ می‌گویند؛ سیال آماده جدا شدن از سیال درون سوزن می‌باشد. بعد از نازک شدن گلوئی سیال به حد کافی، قطره به دلیل نیروی وزن خود، از آن جدا می‌شود. در حین حرکت قطره به سمت پایین تغییر شکل‌های قطره به خوبی قابل مشاهده است. در

1 Necking



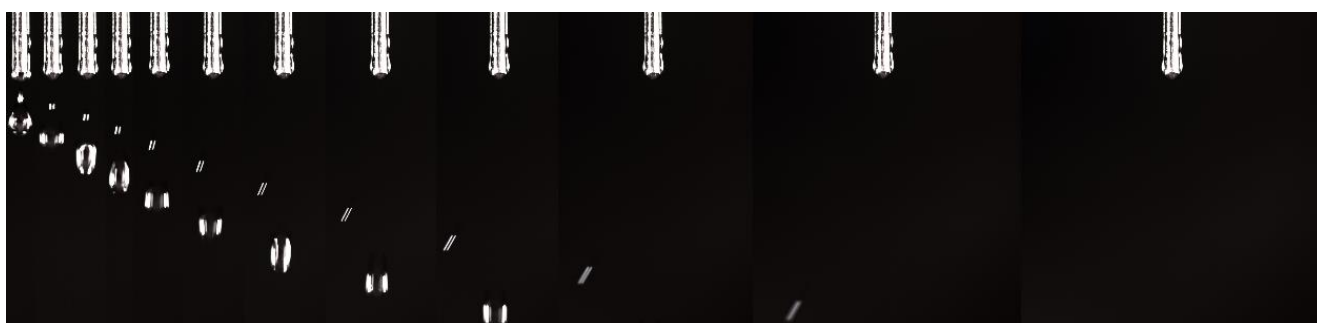
شکل ۳. الف: روند تشکیل قطره در سر سوزن در دبی ۱ میلی لیتر بر ساعت، این روند به ترتیب از تصویر چپ به راست می باشد؛ فاصله فریمها در این تصویر ۳/۵ ثانیه است. این فرآیند در ۱۷/۵ ثانیه اتفاق افتاده است. ب: فرآیند افتادن قطره از سر سوزن تا نقطه گلویی فاصله فریمها در این تصویر ۰/۰۰۱ ثانیه است. این فرآیند تا تشکیل گلویی در ۰/۰۰۶ ثانیه رخ داده است. ج: فرآیند سقوط قطره؛ فاصله فریمها در این تصویر ۰/۰۰۹ ثانیه است. این فرآیند در ۰/۰۴۵ ثانیه رخ داده است.

Fig. 3. A. The process of droplet formation in tip of the needle at a flow rate of 1 ml/hour, this process is from left to right in order; The frame interval in this image is 3.5 seconds. This process happened in 17.5 seconds. **B:** The process of the drop falling from the tip of the needle until the neck point, the frame interval in this image is 0.001 seconds. This process has occurred until the neck formation in 0.006 seconds. **C:** Drop falling process; the frame interval in this image is 0.009 seconds. This process occurred in 0.045 seconds.



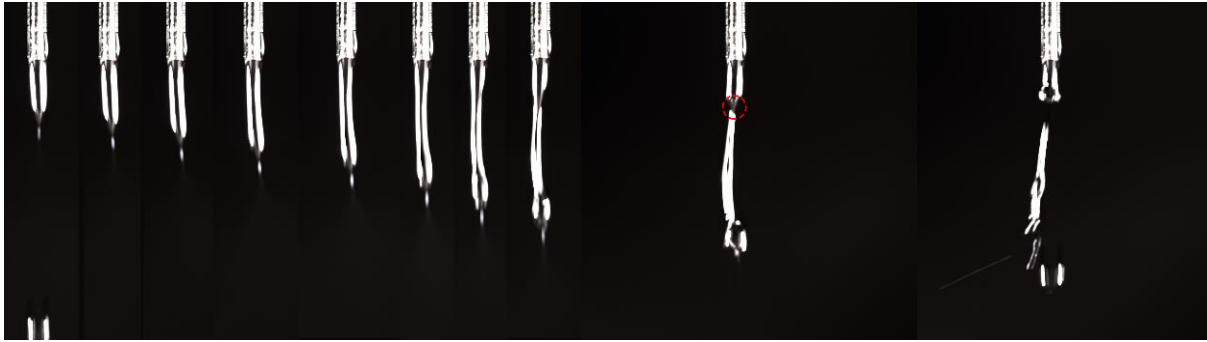
شکل ۴. الف: روند تشکیل قطره در سر سوزن در دبی ۱۰ میلی لیتر بر ساعت و ولتاژ ۳/۰۳۷ کیلوولت، این روند به ترتیب از تصویر چپ به راست می باشد؛ فاصله فریمها در این تصویر ۰/۰۰۱ ثانیه است. این فرآیند در ۰/۰۰۹ ثانیه اتفاق افتاده است. ب: فرآیند افتادن قطره از سر سوزن تا نقطه گلوئی در دبی ۱۰ میلی لیتر بر ساعت و ولتاژ ۳/۰۳۷ کیلوولت، این روند به ترتیب از تصویر چپ به راست می باشد؛ فاصله فریمها در این تصویر ۰/۰۰۱ ثانیه است. این فرآیند تا تشکیل گلوئی در ۰/۰۰۸ ثانیه رخ داده است..

Fig. 4. A. The process of droplet formation in the tip of the needle at a flow rate of 10 ml/h and a voltage of 3.037 kV, this process is from left to right in the image; The frame interval in these images is 0.001 seconds. This process happened in 0.009 seconds. **B:** The process of the drop falling from the tip of the needle until the neck point at a flow rate of 10 ml/hour and a voltage of 3.037 kV, this process is from left to right in the images; the frame interval in these images is 0.001 seconds. This process has occurred until the formation of the neck point in 0.008 seconds.



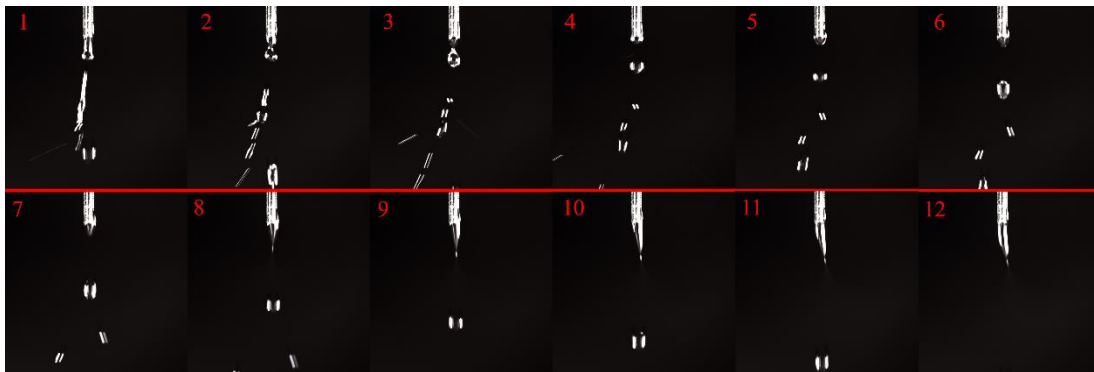
شکل ۵. فرآیند سقوط قطرات از سر سوزن از نقطه گلوئی در دبی ۱۰ میلی لیتر بر ساعت و ولتاژ ۳/۰۳۷ کیلوولت؛ این روند به ترتیب از تصویر چپ به راست می باشد؛ فاصله فریمها در این تصویر ۰/۰۰۲ ثانیه است. این فرآیند در ۰/۰۲۲ ثانیه رخ داده است.

Fig. 5. The process of drops falling from the tip of the needle from the neck point at a flow rate of 10 ml/hour and a voltage of 3.037 kV; This process is from left to right in order; The frame interval in this image is 0.002 seconds. This process occurred in 0.022 seconds.



شکل ۶. مود دوکی شکل در دبی ۹۹ میلی لیتر بر ساعت و ولتاژ ۳/۹۲۶ کیلوولت؛ این روند به ترتیب از تصویر چپ به راست می باشد؛ فاصله فریم‌ها در این تصویر ۰/۰۰۲ ثانیه است. این فرآیند در ۰/۰۱۸ ثانیه رخ داده است.

Fig. 6. Spindle mode at a flow rate of 99 ml/h and a voltage of 3.926 kV; This process is from left to right in order; The frame interval in this image is 0.002 seconds. This process occurred in 0.018 seconds.



شکل ۷. مود دوکی شکل در دبی ۹۹ میلی لیتر بر ساعت و ولتاژ ۳/۹۲۶ کیلوولت؛ این روند به ترتیب از تصویر چپ به راست می باشد؛ فاصله فریم‌ها در این تصویر ۰/۰۰۲ ثانیه است. این فرآیند در ۰/۰۲۲ ثانیه رخ داده است.

Fig. 7. Spindle mode at a flow rate of 99 ml/h and a voltage of 3.926 kV; This process is from left to right in order; The frame interval in this image is 0.002 seconds. This process occurred in 0.022 seconds

۳-۱-۳- مود جت مخروطی^۲

این مود مهم‌ترین مود الکتروهیدرودینامیکی در فرآیند الکترواسپری است. بیش‌ترین تحقیقات در زمینه الکترواسپری در این مود انجام شده است. علت اهمیت این مود، کنترل پذیری قطر قطرات تولید شده، قابلیت تولید قطرات بسیار ریز و امکان تولید قطرات با قطر یکنواخت^۳ می باشد. این مود، شامل سه قسمت اصلی می باشد. اولین قسمت، مخروط تیلور، دومین قسمت جت خارج شده از مخروط و آخرین قسمت قطرات باردار اسپری شده، می باشند این فرآیند برای دبی ۰/۹ میلی لیتر بر ساعت و ولتاژ ۴/۰۴۶ کیلوولت در شکل ۸، نمایش داده شده است.

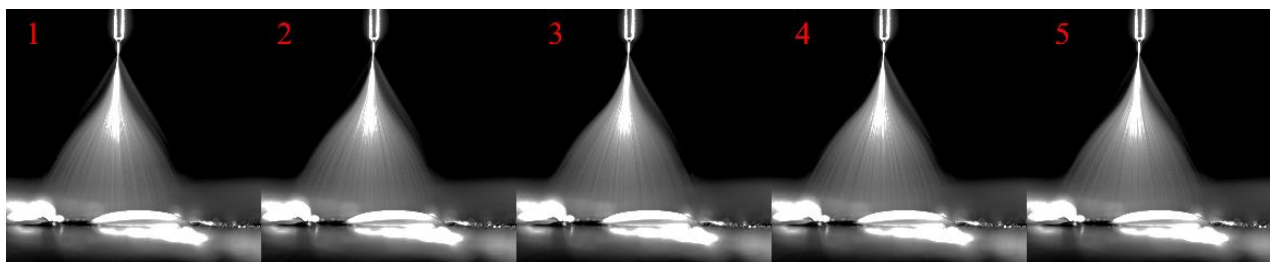
۳-۱-۳- مود دوکی شکل^۱

در این مود الکتروهیدرودینامیکی، قطعات سیال جدا شده از سوزن، شکل دوک مانند دارند. این مود با افزایش اختلاف پتانسیل اعمالی نسبت به مود قطره چکانی ایجاد می شود. در این حالت قسمت ضخیمی از سیال توسط میدان الکتریکی کش آمده و این قطعه از سیال می تواند در فواصل دور تری به قطرات ریزتری تبدیل شود. گاهی اوقات با توجه به نوع سیال (خواص فیزیکی و الکتریکی) این قطعه به یک جت و فوراً به یک یا چند اسپری تبدیل می شود. با افزایش شدید دبی و افزایش ولتاژ اعمالی، طول قطعات سیال در این مود بسیار بلندتر می شود. این موضوع در شکل ۶ قابل مشاهده می باشد. در شکل ۷ فرآیند فروپاشی همین حالت نشان داده شده است.

2 Cone-jet mode

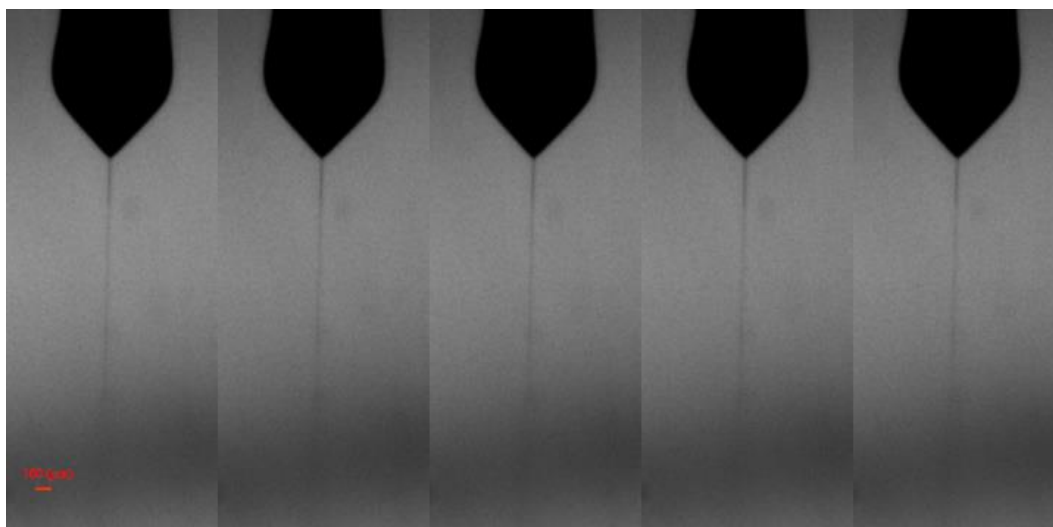
3 Monodisperse

1 Spindle mode



شکل ۸. مود جت مخروطی شکل، در دبی ۰/۹ میلی لیتر بر ساعت و ولتاژ ۴/۰۴۶ کیلوولت؛ پنج فریم پشت سر هم در تصویر برداری با سرعت ۱۰۰ فریم بر ثانیه

Fig. 8. Cone-jet mode, at a flow rate of 0.9 ml/h and a voltage of 4.046 kV; Five frames in a row at 100 frames per second



شکل ۹. مود جت مخروطی شکل، در دبی ۱ میلی لیتر بر ساعت و ولتاژ ۴/۰۶۲ کیلوولت؛ پنج فریم پشت سر هم در تصویر برداری به روش سایه‌نگاری با سرعت ۳۲۶۳۷ فریم بر ثانیه

Fig. 9. Cone jet mode, at a flow rate of 1 ml/h and a voltage of 4.062 kV; Five frames in a row in shadow shooting with a speed of 32637 frames per second

۳-۱-۶- مود جت چندگانه^۳
با افزایش بیش‌تر اختلاف پتانسیل اعمالی نسبت به حالت جت دوگانه، مود جت چندگانه ایجاد می‌شود. که حداکثر تعداد جت‌های خروجی از هلال سیال یک مقدار مشخص، برای یک سیال مشخص، می‌باشد. در این مود چند جت از هلال سیال خارج می‌شود و هر کدام با فروپاشی، به اسپری تبدیل می‌شوند. در شکل ۱۱ این مود، نمایش داده شده است.

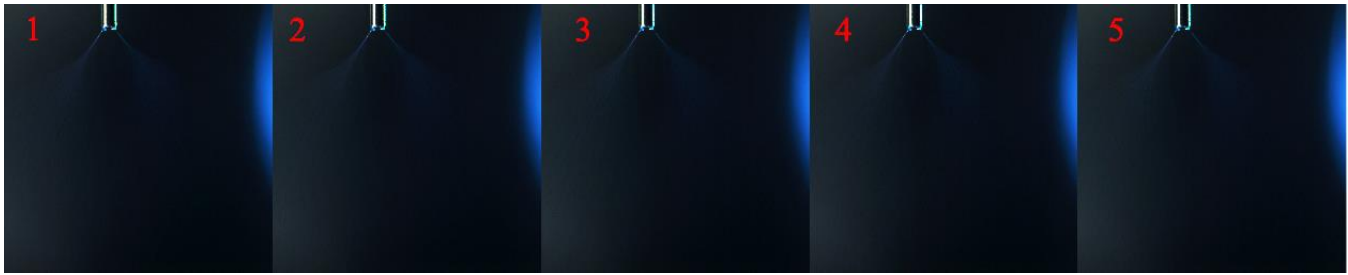
۳-۱-۷- مود جت منشعب شده (حالت انگشتی)^۴
این حالت در دبی‌های بسیار زیاد با ولتاژ اعمالی در حدود مودهای جت

برای مشاهده بهتر قسمت‌های مخروط و جت این مود، تصویر ماکرو از این قسمت‌ها در شکل ۹ آورده شده است.

۳-۱-۵- مود جت دوگانه^۱
با افزایش ولتاژ اعمالی، مود الکتروهایدرودینامیکی از حالت جت مخروطی شکل به جت دوگانه تبدیل می‌شود که در شکل ۱۰، در دبی ۰/۴ میلی لیتر بر ساعت و ولتاژ ۵/۲۱ کیلوولت این مود نمایش داده شده است. در این مود، به جای یک جت و فروپاشی به یک اسپری در حالت جت مخروطی، دو جت از هلال^۲ سر سوزن خارج می‌شود و دو اسپری تشکیل می‌دهد.

3 Multijet mode
4 Ramified-jet mode

1 Double jet mode
2 Meniscus



شکل ۱۰. مود جت دوگانه، در دبی 0.4 میلی لیتر بر ساعت و ولتاژ 5.21 کیلوولت؛ پنج فریم پشت سرهم؛ تصویربرداری به روش پراش نور؛ با سرعت 1000 فریم بر ثانیه

Fig. 10. Double jet mode, at a flow rate of 0.4 ml/h and a voltage of 5.21 kV; five consecutive frames; imaging by light scattering method; with a speed of 1000 frames per second



شکل ۱۱. مود جت دوگانه، در دبی 0.7 میلی لیتر بر ساعت و ولتاژ 6.59 کیلوولت؛ یک فریم از تصویربرداری به روش پراش نور؛ با سرعت 1000 فریم بر ثانیه

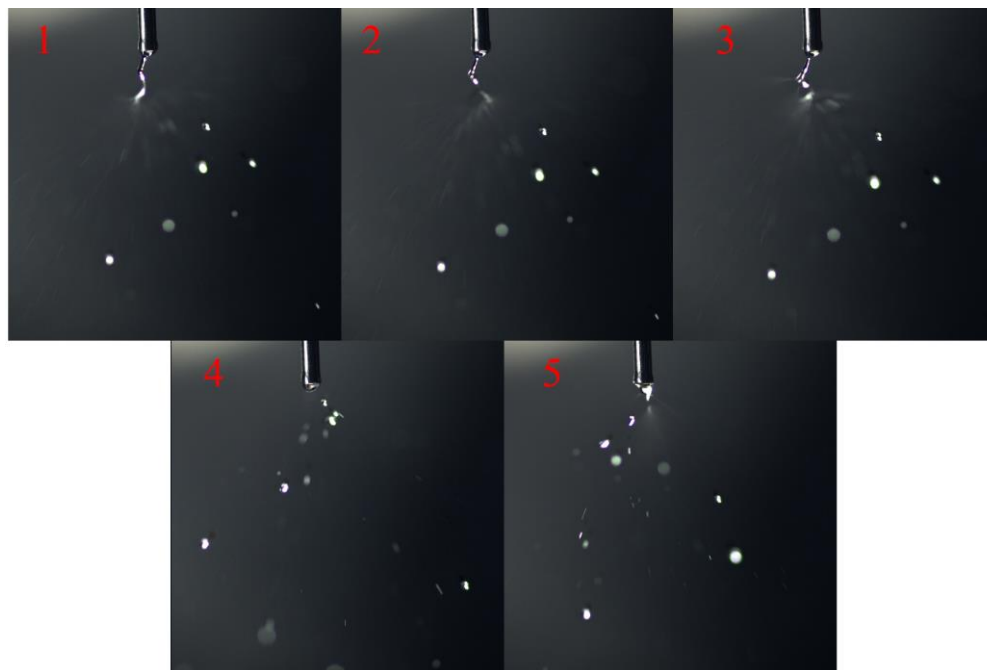
Fig. 11. Double jet mode, at a flow rate of 0.7 ml/h and a voltage of 6.59 kV; A frame of light scattering method; with a speed of 1000 frames per second

۳-۱-۸- مود جت چندگانه منشعب شده

این مود شبیه مود قبلی می باشد و در دبی های بسیار بالا رخ می دهد. تنها تفاوت این مود، بیش تر بودن اختلاف پتانسیل مورد نیاز برای تشکیل آن می باشد. در شکل ۱۳ که در دبی 40 میلی لیتر بر ساعت و اختلاف پتانسیل $10/27$ کیلوولت تصویربرداری شده است. همان طور که در تصویر مذکور قابل مشاهده است؛ در این مود، به جای خروج یک جت اصلی از هلال سر سوزن، که در مود انگشتی رخ می دهد؛ چندین جت از هلال سیال خارج شده است و هرکدام از این جت ها، جت های کوچک تری خارج شده است

دوگانه و چندگانه برای دبی های پایین (بین $0/1$ تا 1 میلی لیتر بر ساعت) ایجاد می شود. در این مود، جت ضخیم خروجی از هلال سیال به دور محور سوزن به صورت مارپیچی^۱ چرخش می کند. از این جت، جت ها و اسپری های کوچک تری به شکل انگشتان دست که از دست بیرون می آیند؛ ایجاد می شود. به همین علت به این مود، مود انگشتی نیز گفته می شود. این مود پدیده های بصری زیبایی ایجاد می کند که در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

1 Spirally



شکل ۱۲. مود انگشتی، در دبی ۴۰ میلی لیتر بر ساعت و ولتاژ ۵/۶۷ کیلوولت؛ پنج فریم پشت سر هم؛ تصویربرداری به روش پراش نور؛ با سرعت ۱۰۰۰ فریم بر ثانیه

Fig. 12. Ramified-jet mode, at a flow rate of 40 ml/h and a voltage of 5.67 kV; five consecutive frames; imaging light scattering method; with a speed of 1000 frames per second

پایدار، در دبی های ۰/۱ تا ۱ میلی لیتر بر ساعت، برای هر یک از سیالات استفاده شده است و در نهایت ۶۰۰ تصویر پردازش شده‌اند. انتخاب این ۱۰ تصویر در بین تصاویر حاصل شده از تصویربرداری پر سرعت به صورت تصادفی^۳ انجام شده است.

تیلور در سال ۱۹۶۴، زاویه نصف مخروط را $49/3$ (زاویه مخروط $98/6$ درجه) توسط مدل سازی ساده‌ای که انجام داد؛ پیش‌بینی کرد. در ادامه این مقدار برای سه سیال مختلف در نقاط شروع و پایان مود جت مخروطی شکل به صورت تجربی آورده شده است. شکل ۱۵، نمودار مقایسه زاویه مخروط بین دبی‌های ۰/۱ تا ۱ میلی لیتر بر ساعت برای سیالات اتانول ۷۰٪، ۹۶٪ و ۹۹٪/۹۹، برای نقاط شروع ناحیه پایدار الکترواسپری، را نشان می‌دهد. همچنین، شکل ۱۶ همان نمودار شکل ۱۵ برای نقاط پایان ناحیه پایدار برای سه سیال مذکور است. لازم به ذکر است، در شکل‌های ۱۵ تا ۱۸، نقاط ۱ تا ۱۰ نقاط متناظر با نقاط شروع یا پایان ناحیه پایدار الکترواسپری برای دبی‌های ۰/۱ تا ۱ میلی لیتر بر ساعت می‌باشد.

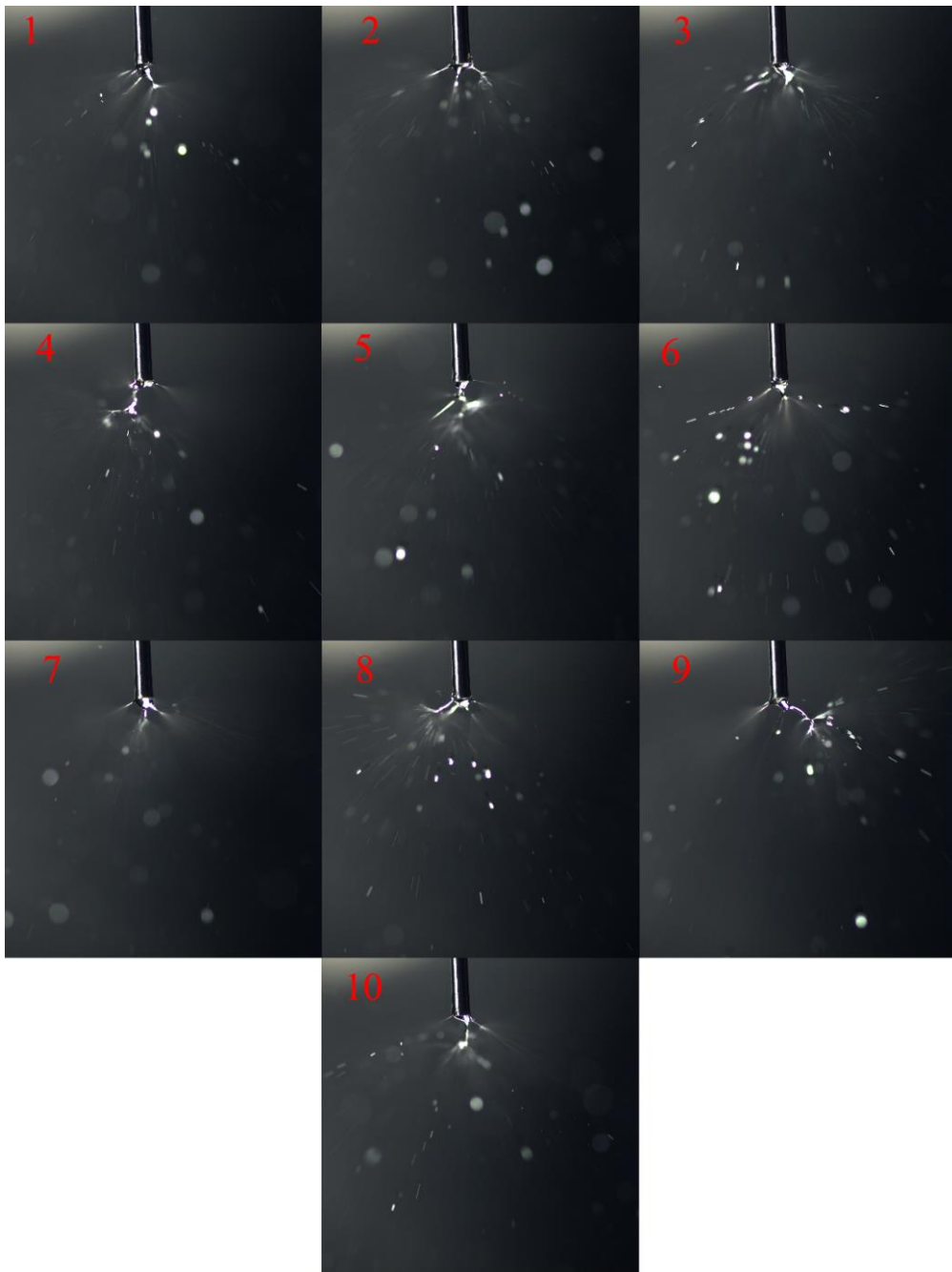
که در نهایت به شکل قطرات و اسپری‌ها، از جت‌های ثانویه، دچار فروپاشی می‌شوند. علاوه بر این، جت‌های اصلی نیز مانند جت اصلی مود انگشتی به حالت شلاقی شکل^۱ حرکت می‌کنند. سرعت، اندازه و ضخامت این جت‌ها به سرعت تغییر می‌کند و این جت‌ها به سرعت دور سوزن چرخش می‌کنند.

۳-۲- بررسی ناحیه پایدار الکترواسپری

به دلیل اهمیت زیاد زاویه مخروط در پایداری الکترواسپری و قطر جت در قطر قطرات تولید شده در فرآیند الکترواسپری، در این قسمت به اندازه‌گیری مشخصات هندسی مذکور پرداخته شده است. برای اندازه‌گیری زاویه مخروط تیلور و قطر جت خروجی از آن، از پردازش تصویر با استفاده از نرم افزار ایمیج‌جی^۲ استفاده شده است. برای پردازش تصویر، از تصاویر حاصل از تصویربرداری پرسرعت در حالت ماکرو از سر سوزن در مود جت مخروطی استفاده شده است که یک فریم از این تصاویر و پارامترهای زاویه مخروط و قطر جت بر روی آن در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. برای این منظور، از پردازش ۱۰ تصویر از هر نقطه برای ۲۰ نقطه شروع و پایان ناحیه

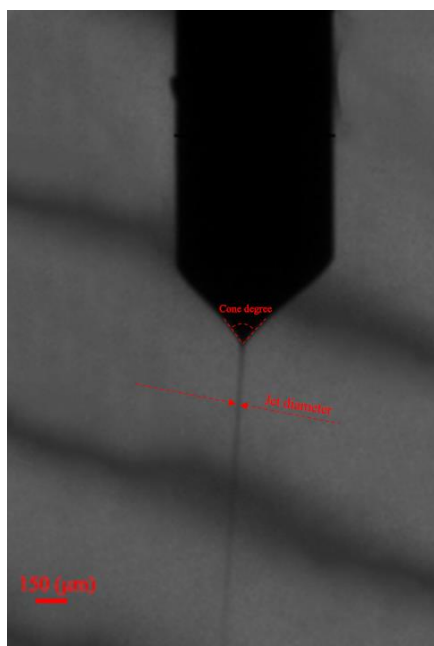
1 Whipping
2 ImageJ

3 Random



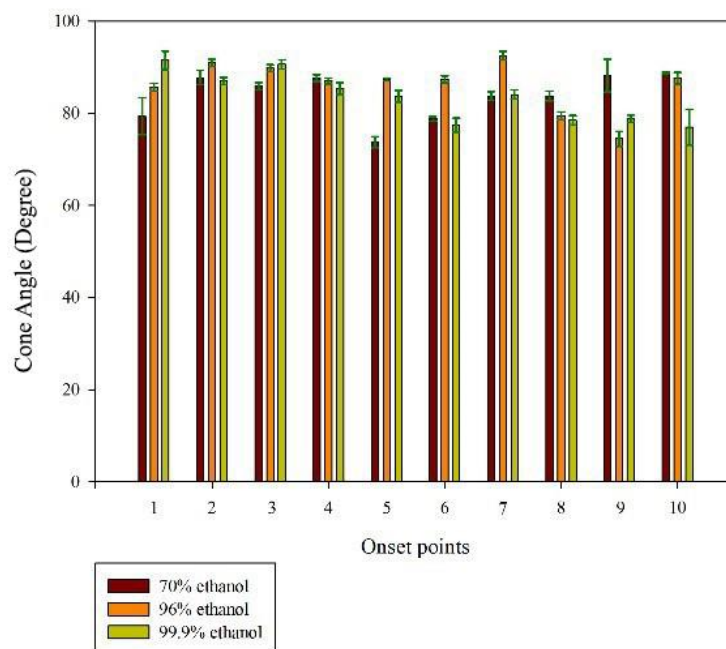
شکل ۱۳. مود جت چندگانه منشعب، در دبی ۴۰ میلی لیتر بر ساعت و ولتاژ ۱۰/۲۷ کیلوولت؛ ده فریم پشت سر هم؛ تصویربرداری به روش پراش نور؛ با سرعت ۱۰۰۰ فریم بر ثانیه

Fig. 13. Multijet mode, at a flow rate of 40 ml/h and a voltage of 10.27 kV; Ten frames in a row; imaging by light scattering method; with a speed of 1000 frames per second



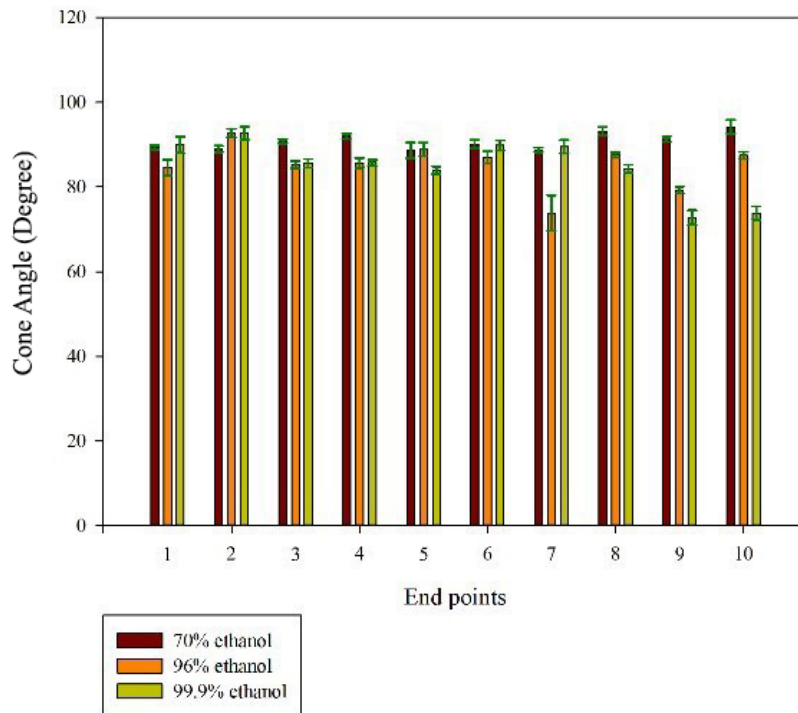
شکل ۱۴. یک فریم تصویر از تصویربرداری پرسرعت در مود جت مخروطی اتانول ۹۶٪ در دبی ۰/۷ میلی لیتر بر ساعت و ولتاژ ۴/۴۵ کیلوولت؛ سرعت تصویربرداری ۳۵۹۸۱ فریم بر ثانیه؛ قطر جت و زاویه مخروطی به خوبی در تصویر نمایش داده شده اند که برای این فریم از تصویربرداری، قطر جت ۲۷ میکرون و زاویه مخروط ۸۱/۳۰۴ درجه است.

Fig. 14. A frame of high-speed imaging for electrospray of 96% ethanol in cone-jet mode at a flow rate of 0.7 ml/hour and the applied voltage of 4.45 kV; Speed of imaging: 35981 frames per second; This image clearly shows the jet diameter and cone angle, which are 27 microns and 81.304 degrees for this frame.



شکل ۱۵. نمودار مقایسه زاویه مخروط تیلور برای سه مایع اتانول ۷۰٪، ۹۶٪ و ۹۹/۹٪؛ نقاط ۱ تا ۱۰ به ترتیب مربوط به نقاط شروع ناحیه پایدار الکترواسپری برای دبی‌های ۰/۱ تا ۱ میلی لیتر بر ساعت می‌باشند.

Fig. 15. Taylor cone angle comparison chart for three ethanol liquids: 70%, 96% and 99.9%; Points 1 to 10 respectively correspond to the onset points of the electrospray stable area for flow rates of 0.1 to 1 ml/h.



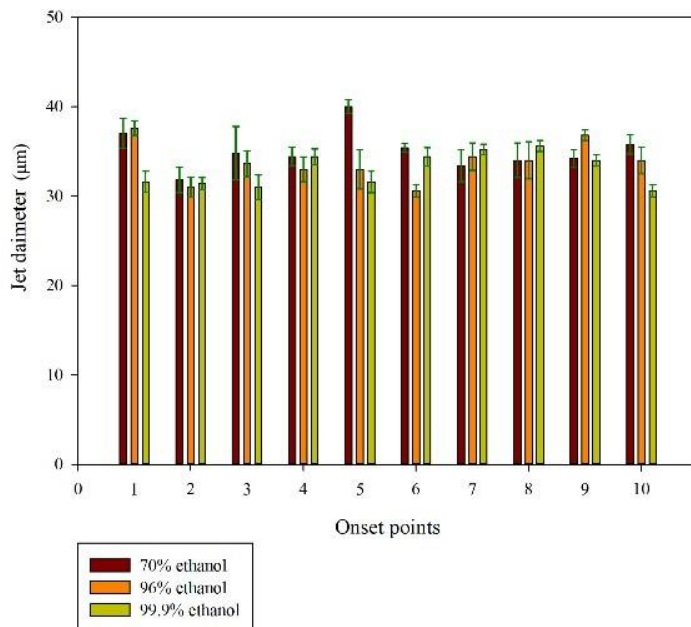
شکل ۱۶. نمودار مقایسه زاویه مخروط تیلور برای سه مایع اتانول ۷۰٪، ۹۶٪ و ۹۹/۹٪؛ نقاط ۱ تا ۱۰ به ترتیب مربوط به نقاط پایان ناحیه پایدار الکترواسپری برای دبی‌های ۰/۱ تا ۱ میلی‌لیتر بر ساعت می‌باشد.

Fig. 16. Taylor cone angle comparison chart for three ethanol liquids: 70%, 96% and 99.9%; Points 1 to 10 respectively correspond to the end points of the stable electrospay zone for flow rates of 0.1 to 1 ml/h.

در شکل ۱۷ و شکل ۱۸، نمودارهای مقایسه قطر جت خارج شده از مخروط برای تمامی دبی‌های ۰/۱ تا ۱ میلی‌لیتر بر ساعت برای سیالات اتانول ۷۰٪، ۹۶٪ و ۹۹/۹٪ آورده شده است که شکل ۱۷ مربوط به نقاط شروع ناحیه پایدار الکترواسپری و شکل ۱۸ مربوط به نقاط پایان آن برای هر سه سیال مذکور می‌باشد. مطابق شکل ۱۷، قطر جت به صورت میانگین برای اتانول ۷۰٪ در نقاط شروع بین ۳۱/۸ تا ۴۰ میکرون، برای اتانول ۹۶٪ به صورت میانگین بین ۳۰/۶ تا ۳۷/۶ میکرون و برای اتانول خالص، بین ۳۰/۶ تا ۳۵/۶ میکرون می‌باشد. همان طور که در شکل ۱۸ قابل مشاهده است؛ قطر جت به صورت میانگین برای اتانول ۷۰٪ در نقاط پایان بین ۳۰/۸ تا ۳۷/۲ میکرون، برای اتانول ۹۶٪، به صورت میانگین بین ۳۱/۸ تا ۳۶/۲ میکرون و برای اتانول خالص، بین ۲۷/۸ تا ۳۳/۴ میکرون می‌باشد.

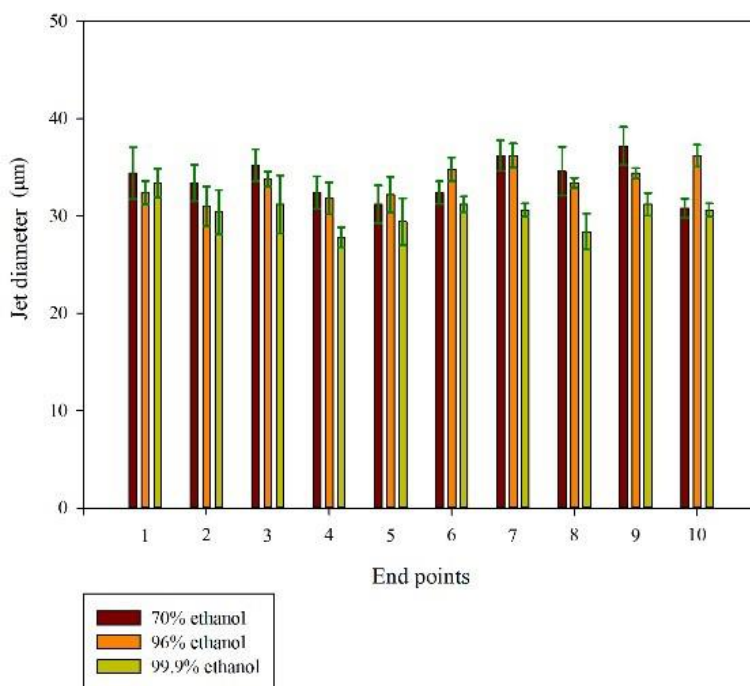
جدول ۳، میانگین زاویه مخروط تیلور در نقاط شروع، پایان و تمامی نقاط محدوده پایدار، در مود جت مخروطی برای سه سیال ۷۰٪، ۹۶٪ و ۹۹/۹٪ را نمایش می‌دهد. داده‌های ستون دوم جدول، از میانگین‌گیری مقادیر حاصل شده برای نقاط شروع ناحیه پایدار برای هر سیال می‌باشد.

همانطور که در شکل ۱۵ نمایش داده شده است؛ زاویه مخروط برای تمامی سیالات مقداری در حدود ۷۴ تا ۹۵ درجه می‌باشد. زاویه مخروط الکترواسپری اتانول ۷۰٪ برای نقاط شروع ناحیه پایدار از دبی ۰/۱ تا ۰/۴ میلی‌لیتر بر ساعت یک روند افزایشی را طی کرده و پس از یک کاهش قابل توجه در دبی ۰/۵ میلی‌لیتر بر ساعت، تا دبی ۱ میلی‌لیتر بر ساعت دوباره زاویه مخروط افزایش پیدا کرده است. زاویه مخروط برای اتانول ۹۶٪ برای نقاط شروع نیز، در تمامی دبی‌ها در یک محدوده مشخص نوسان کرده است و تنها در دبی‌ها ۰/۸ و ۰/۹ میلی‌لیتر بر ساعت تغییر محسوسی را تجربه کرده است. زاویه مخروط اتانول خالص برای نقاط شروع از دبی ۰/۱ تا ۱ میلی‌لیتر بر ساعت یک روند کاهشی بسیار جزئی را تجربه کرده است. با توجه به شکل ۱۶، زاویه مخروط اتانول ۷۰٪ برای نقاط پایان در یک محدوده قرار دارند و زاویه برای نقاط پایان برای اتانول ۹۶٪ بدون روند خاصی در یک محدوده مشخص نوساناتی را تجربه کرده است. اما زاویه مخروط الکترواسپری اتانول خالص در همین بازه (دبی ۰/۱ تا ۱ میلی‌لیتر بر ساعت) روند کاهشی جزئی داشته است.



شکل ۱۷. نمودار مقایسه قطر جت مخروط تیلور برای سه مایع اتانول ۷۰٪، ۹۶٪ و ۹۹/۹٪؛ نقاط ۱ تا ۱۰ به ترتیب مربوط به نقاط شروع ناحیه پایدار الکترواسپری برای دبی‌های ۰/۱ تا ۱ میلی‌لیتر بر ساعت می‌باشد.

Fig. 17. comparison diagram of Taylor cone jet diameter for three ethanol liquids: 70%, 96% and 99.9%; Points 1 to 10 are respectively corresponds to the onset points at the stable region for flow rates of 0.1 to 1 ml/hour.



شکل ۱۸. نمودار مقایسه قطر جت مخروط تیلور برای سه مایع اتانول ۷۰٪، ۹۶٪ و ۹۹/۹٪؛ نقاط ۱ تا ۱۰ به ترتیب مربوط به نقاط پایان ناحیه پایدار الکترواسپری برای دبی‌های ۰/۱ تا ۱ میلی‌لیتر بر ساعت می‌باشد.

Fig. 18. Comparison diagram of Taylor cone jet diameter for three ethanol liquids 70%, 96% and 99.9%; Points 1 to 10 are respectively corresponds to the end points of the stable region of the electro spray for flow rates of 0.1 to 1 ml/hour.

جدول ۳. میانگین زاویه مخروط تیلور برای نقاط شروع، پایان و تمام نقاط ناحیه پایدار الکترواسپری

Table 3. Average Taylor cone angle for the onset, end and all points of the electrospray stable region

سیالات استفاده شده	میانگین قطر جت خروجی برای نقاط شروع ناحیه پایدار [μm]	میانگین قطر جت خروجی برای نقاط پایان ناحیه پایدار [μm]	میانگین قطر جت خروجی برای تمام نقاط ناحیه پایدار [μm]
اتانول ۷۰٪	$35/08 \pm 1/41$	$33/78 \pm 1/79$	$34/43 \pm 1/60$
اتانول ۹۶٪	$33/80 \pm 1/33$	$34/22 \pm 1/19$	$33/78 \pm 1/26$
اتانول ۹۹/۹٪	$32/98 \pm 0/88$	$30/42 \pm 1/53$	$31/70 \pm 1/21$

جدول ۴. میانگین قطر جت خروجی از مخروط تیلور برای نقاط شروع، پایان و تمام نقاط ناحیه پایدار الکترواسپری

Table 4. The average diameter of the jet emerging from the Taylor cone at the onset, end and all points of the electrospray stable region

سیالات	$Q_0 (mL/h)$	$Q^* (mL/h)$	$d^* (\mu m)$	$d_0 (m)$	$\varepsilon' \delta_\mu$	δ_μ
اتانول ۷۰٪	$4/975 * 10^{-3}$	۰/۲۱۳۸۸۷	۲/۴۶	$3/7529 * 10^{-7}$	۱۱۷/۴۱	۲/۷۳
اتانول ۹۶٪	$1/266 * 10^{-2}$	۰/۳۴۶۸۱۷	۲/۹۳۸۸۸	$5/61 * 10^{-7}$	۱۱۵/۳۹	۴/۲۱۱
اتانول ۹۹/۹٪	۲۲/۷۲	۵۶۸/۹۷۹۱	۳۷۷/۶۶	$7/55 * 10^{-5}$	۱۳۶۹/۹۳	۵۴/۷۱

با توجه به این ستون، میانگین زاویه مخروط تیلور برای سیالات ۷۰٪، ۹۶٪ و ۹۹/۹٪ به ترتیب ۸۳/۱۸، ۸۶/۲۳ و ۸۳/۴۲ درجه می‌باشد. بیشترین زاویه مربوط به اتانول ۹۶٪ می‌باشد و به‌طور کلی، تمامی سیالات در محدود ۸۵ درجه قرار دارند. داده‌های ستون سوم جدول، مقایسه بین زاویه مخروط تیلور در نقاط پایان مود جت مخروطی برای سه سیال ۷۰٪، ۹۶٪ و ۹۹/۹٪ را نمایش می‌دهد. این داده‌ها حاصل از میانگین‌گیری بین مقادیر حاصل شده برای نقاط پایان ناحیه پایدار برای هر سیال می‌باشند با توجه به این داده‌ها، بیشترین زاویه مخروط مربوط به اتانول ۷۰٪ می‌باشد و به‌طور کلی این زوایا برای سه سیال مذکور، بین ۸۴ تا ۹۲ درجه قرار دارند. داده‌های ستون چهارم جدول، مقایسه بین زاویه مخروط تیلور در تمامی نقاط مود جت مخروطی برای سه سیال ۷۰٪، ۹۶٪ و ۹۹/۹٪ است. این داده‌ها حاصل از میانگین‌گیری بین مقادیر حاصل شده برای تمام نقاط شروع و پایان ناحیه پایدار برای هر سیال می‌باشد با توجه به این داده‌ها، بیشترین زاویه مخروط به‌ترتیب مربوط به اتانول ۷۰٪ و سپس اتانول ۹۶٪ می‌باشد و کمترین زاویه مربوط به اتانول ۹۹/۹٪ است. به‌طور کلی زوایای مخروط تیلور برای این سه

غلظت بین ۸۳ تا ۸۸ درجه می‌باشند.

جدول ۴، میانگین قطر جت مخروط تیلور در نقاط شروع، پایان و تمامی نقاط محدوده پایدار، در مود جت مخروطی برای سه سیال ۷۰٪، ۹۶٪ و ۹۹/۹٪ را نمایش می‌دهد. ستون دوم این جدول، داده‌های حاصل از میانگین‌گیری بین مقادیر حاصل شده برای نقاط شروع ناحیه پایدار هر سیال می‌باشد با توجه به این داده‌ها قطر جت برای سیالات مذکور بین ۳۲ تا ۳۵ میکرون می‌باشد که بیشترین قطر مربوط به اتانول ۷۰٪ می‌باشد. ستون سوم این جدول، قطر جت در نقاط پایان مود جت مخروطی برای سه سیال ۷۰٪، ۹۶٪ و ۹۹/۹٪ می‌باشد. این داده‌ها حاصل از میانگین‌گیری بین مقادیر حاصل شده برای نقاط پایان ناحیه پایدار برای هر سیال می‌باشند. با توجه به این داده‌ها، قطر جت برای سیالات مذکور بین ۳۰ تا ۳۵ میکرون می‌باشد و مانند قطر جت برای نقاط شروع، بیشترین قطر مربوط به اتانول ۷۰٪ می‌باشد. درنهایت ستون چهارم جدول مذکور، قطر جت در نقاط شروع و پایان مود جت مخروطی برای سه سیال ۷۰٪، ۹۶٪ و ۹۹/۹٪ را نمایش می‌دهد. این داده‌ها حاصل از میانگین‌گیری بین مقادیر حاصل شده برای

افزایش یابد. اولین مورد نیروی ویسکوزیته است که در آغاز جت ایجاد می شود. با کاهش دبی، این نیرو ممکن است با اینرسی قابل مقایسه باشد. هنگامی که این اتفاق می افتد، اتلاف ویسکوز از تشکیل جت در دبی به اندازه کافی کم جلوگیری می کند، حتی قبل از اینکه کشش سطحی مانع تولید جت شود [۸۸].

مکانیسم دوم ناپایداری به نیروی قطبی مرتبط است که در ناحیه انتقالی از حالت جت مخروطی به مود بعدی ظاهر می شود. برای دبی های به اندازه کافی کم، این نیرو ممکن است در آن ناحیه منفی شود. هنگامی که شرایط خاصی برآورده می شود، محرک جریان قادر به غلبه بر نیروی پلاریزاسیون واکنشی نیست که منجر به انتشار ناپایدار جت می شود. تاکید بر این نکته مهم است که در مواردی که دبی بسیار نزدیک به مقدار حداقل خود است، نیروی الکترواستاتیک نیز ممکن است به عنوان یک نیروی مقاوم در ناحیه ولتاژ حداکثری در ناحیه مود جت مخروطی شکل عمل کند [۸۹].

حداقل دبی و قطر جت متناظر با آن با دو قانون مختلف مشخص شده است. معادله ۴ حداقل دبی و قطر جت را هنگامی که ناپایداری از نیروی ویسکوزیته ناشی می شود را بیان می کند، در حالی که معادله ۵ حداقل سرعت جریان و قطر جت را هنگامی که نیروی پلاریزاسیون حالت جت مخروطی را بی ثبات می کند، توصیف می کند [۸۳].

$$Q^* = Q_0 \delta_\mu^{-1} \text{ and } d^* = d_0 \delta_\mu^{-1/2} \text{ for } \varepsilon' \delta_\mu < 1 \quad [۸۳] \quad (۴)$$

$$Q^* = Q_0 \varepsilon' \text{ and } d^* = d_0 \varepsilon'^{1/2} \text{ for } \varepsilon' \delta_\mu > 1 \quad [۸۳] \quad (۵)$$

گن کلودر سال ۲۰۱۳ خود صراحتاً دامنه اعتبار معادلات فوق را مشخص نکرده است. با این حال، آن ها با استفاده از مجموع ۱۵ مجموعه داده شامل داده های موجود در مقالات گذشته و داده های تجربی خود نویسنده به دست آمده بودند، تأیید شدند که همه داده های ذکر شده فقط در محدوده محدودی از مقادیر $\varepsilon' \delta_\mu$ را که از ۰/۱ تا ۱۰۰ را می باشند. با این حال، با استفاده از معادلات مذکور حداقل دبی برای اتانول ۹۹/۹٪، ۵۶۸/۹۷ میلی لیتر در ساعت حاصل می شود که بسیار بالاتر از حداقل دبی استفاده شده در آزمایش ها است. علاوه بر این، قطر جت مربوط به آن ۳۷۷/۶۶ میکرون حاصل می شود که بسیار کوچکتر از میانگین مقدار تجربی

نقاط شروع و پایان ناحیه پایدار برای هر سیال می باشند با توجه به این داده ها قطر جت برای اتانول ۷۰٪، ۹۶٪ و ۹۹/۹٪ به صورت میانگین، به ترتیب، ۳۴/۴۳، ۳۳/۷۸ و ۳۱/۷ میکرون می باشد و مانند قطر جت برای نقاط شروع و پایان، بیشترین قطر مربوط به اتانول ۷۰٪ می باشد.

۴- قوانین مقیاس بندی^۱

دبی جریان که در آن حالت جت مخروطی به دست می آید به عوامل مختلفی از جمله شرایط مرزی، ولتاژ اعمالی و از همه مهم تر خواص مایع بستگی دارد. همچنین، حالت جت مخروطی پایا نمی تواند با اعمال دبی کمتر از نرخ طبیعی به دست آید. در نتیجه، سرعت دبی طبیعی نقش مهمی در تعیین حداقل نرخ جریان و حداقل اندازه قطراتی که می تواند از طریق الکترواسپری تولید شود، ایفا می کند [۸۳].

در سال ۲۰۱۳، گانن کلو^۲ مقاله ای را ارائه کرد که در آن حداقل نرخ جریان مورد نیاز برای حالت جت مخروطی تیلور و قطر متناظر آن بیان شده است [۸۳]. روابط آن به شرح زیر توضیح داده شده است:

دبی مشخصه عبارت است از:

$$Q_0 = \frac{\gamma \varepsilon_0}{\rho K} \quad [۵۲, ۶۴, ۸۴-۸۷] \quad (۱)$$

قطر مشخصه عبارت است از:

$$d_0 = \left[\frac{\gamma \varepsilon_0^2}{(\rho K^2)} \right]^{1/3} \quad (۲)$$

رینولدز الکتروهدرودینامیکی عبارت است از:

$$\delta_\mu = \left[\frac{\gamma^2 \rho \varepsilon_0}{\mu^3 K} \right]^{1/3} \quad (۳)$$

همانطور که سیستم به مرز پایداری خود نزدیک به حداقل دبی نزدیک می شود، انتظار می رود دو نیروی متضاد در برابر نیروی مماسی الکتریکی

1 Scaling Laws
2 A M Ganan-Calvo

جدول ۵. " حداقل دبی جریان و قطر جت الکترواسپری مربوط به آن بر اساس قوانین مقیاس بندی گنن کلوو " تغییر کند.

Table 5. " Minimum flow rate and its corresponding diameter of the electrospray jet based on Gan-an-Calvo's scaling laws"

δ_μ	$\varepsilon'\delta_\mu$	d_0 (m)	d^* (μm)	Q_0 (mL / h)	Q^* (mL / h)	سیالات
۲/۷۳	۱۱۷/۴۱	$۳/۷۵۲۹ \times ۱۰^{-۷}$	۲/۴۶	$۴/۹۷۵ \times ۱۰^{-۲}$	۰/۲۱۳۸۸۷	اتانول ۷۰٪
۴/۲۱۱	۱۱۵/۳۹	$۵/۶۱ \times ۱۰^{-۷}$	۲/۹۳۸۸۸	$۱/۲۶۶ \times ۱۰^{-۲}$	۰/۳۴۶۸۱۷	اتانول ۹۶٪
۵۴/۷۱	۱۳۶۹/۹۳	$۷/۵۵ \times ۱۰^{-۵}$	۳۷۷/۶۶	۲۲/۷۲	۵۶۸/۹۷۹۱	اتانول ۹۹/۹٪

• قطر جت برای اتانول ۹۹/۹٪ این قطریین ۳۰/۶ تا ۳۵/۶ است. و قطر جت خروجی از مخروط تیلور برای نقاط پایانی ناحیه پایدار:

• برای اتانول ۷۰٪ بین ۳۰/۸ تا ۳۷/۲ میکرون است.

• برای اتانول ۹۶٪ بین ۳۱/۸ تا ۳۶/۲ میکرون است.

• برای اتانول ۹۹/۹٪ بین ۲۷/۸ تا ۳۳/۴ میکرون است.

با میانگین گیری مقادیر قطر جت برای نقاط شروع ناحیه پایدار برای سه سیال مذکور می توان دریافت که بیشترین قطر جت برای شروع ناحیه پایدار الکترواسپری مربوط به اتانول ۷۰٪ و بعد از آن اتانول ۹۶٪ و پس از آن اتانول ۹۹/۹٪ می باشد که این مقادیر بین ۳۲ تا ۳۵ میکرون است. برای نقاط پایانی نیز بیشترین قطر جت خارج شده از مخروط تیلور مربوط به اتانول ۷۰٪ و کمترین آن مربوط به اتانول ۹۹/۹٪ می باشد و میانگین قطر جت اتانول ۹۶٪ نیز تنها کمی کم تر از میانگین قطر جت اتانول ۷۰٪ می باشد که این قطرها بین ۳۰ تا ۳۵ میکرون می باشند. در نهایت، از میانگین گیری قطر جت در تمام نقاط شروع و پایان ناحیه پایدار الکترواسپری برای هر یک از سیالات مذکور می توان دریافت که میانگین قطر جت خروجی از مخروط تیلور:

- برای اتانول ۷۰٪، ۳۴/۴۳ میکرون است.
- برای اتانول ۹۶٪، ۳۳/۷۸ میکرون است.
- برای اتانول ۹۹/۹٪، ۳۱/۷ میکرون می باشد.

همچنین زاویه مخروط تیلور برای هر یک از نقاط شروع و پایان ناحیه پایدار الکترواسپری جداگانه محاسبه شده است. که از میانگین داده های حاصل شده می توان دریافت:

برای نقاط شروع ناحیه پایدار الکترواسپری، زاویه مخروط تیلور برای اتانول ۷۰٪، ۹۶٪ و خالص به ترتیب ۸۳/۷۷، ۸۶/۲۲ و ۸۳/۴۱ درجه می باشند و برای نقاط پایانی ناحیه پایدار الکترواسپری، برای سه سیال مذکور

(۳۲/۹۸ میکرون) می باشد. این اختلاف را می توان به این واقعیت نسبت داد که مقدار $\varepsilon'\delta_\mu$ برای اتانول ۹۹/۹٪، ۱۳۶۹/۹۳ حاصل می شود که به طور قابل توجهی بالاتر از محدوده تأیید شده ۰/۰۱ تا ۱۰۰ برای قوانین مقیاس بندی پیشنهاد شده توسط گنن کلوواست. در حالی که مقادیر $\varepsilon'\delta_\mu$ برای اتانول ۷۰٪ و ۹۶٪ به ترتیب ۱۱۷/۴۱ و ۱۱۵/۳۹ حاصل می شود که در نزدیکی حد بالایی محدوده تأیید شده هستند. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که قوانین مقیاس بندی توسعه یافته توسط گنن کلوو بالاتر از محدوده مقدار ۱۰۰ برای $\varepsilon'\delta_\mu$ به شکل قابل توجهی انحراف پیدا می کنند.

۵- نتیجه گیری

در قسمت ابتدایی مطالعه حاضر، مودهای مختلف الکترواسپری برای اتانول ۷۰٪ با استفاده از تصویربرداری پرسرعت، تعریف و تصاویر حاصل شده در بخش آشنایی با مودهای مختلف الکترواسپری نمایش داده شده اند که این مودها عبارتند از: مود قطره چکانی، مود ریزقطره چکانی، مود دوکی شکل، مود جت مخروطی، مود جت دوگانه، مود جت چندگانه و مود جت چندگانه منشعب شده است

در قسمت دوم نیز، به محاسبه زاویه و قطر جت مخروط تیلور برای ابتدا و انتهای ناحیه پایدار الکترواسپری با جریان مستقیم برای مخلوط اتانول-آب با سه غلظت ۷۰٪، ۹۶٪ و ۹۹/۹٪ با استفاده از تصویربرداری پرسرعت و پردازش تصویر در مود جت مخروطی شکل پرداخته شده است. در نهایت، مشخصات هندسی مود جت مخروطی در دبی های ۰/۱ تا ۱ میلی لیتر بر ساعت به دست آمده است. از این داده ها می توان دریافت که قطر جت خارج شده از مخروط تیلور در دبی های مذکور برای نقاط شروع ناحیه پایدار:

- قطر جت برای اتانول ۷۰٪ بین ۳۱/۸ تا ۴۰ میکرون است.
- قطر جت برای اتانول ۹۶٪ بین ۳۰/۶ تا ۳۷/۶ میکرون است.

۶- فهرست علائم

منابع

- [1] J. Rosell-Llompart, J. Grifoll, I.G. Loscertales, Electrosprays in the cone-jet mode: from Taylor cone formation to spray development, *Journal of Aerosol Science*, 125 (2018) 2-31.
- [2] J.B. Fenn, M. Mann, C.K. Meng, S.F. Wong, C.M. Whitehouse, Electrospray ionization for mass spectrometry of large biomolecules, *Science*, 246(4926) (1989) 64-71.
- [3] V.A.G. Bailey, *Electrostatic Spraying of Liquids*, Research Studies Press LTD Taunton, Somerset/John Wiley & Sons Inc, New York 1988, *Physik in unserer Zeit*, 20(5) (1989) 160-160.
- [4] A.M. Gañán-Calvo, J.M. Montanero, Revision of capillary cone-jet physics: Electrospray and flow focusing, *Physical review E*, 79(6) (2009) 066305.
- [5] H. Ueda, K. Takeuchi, A. Kikuchi, Effect of the nozzle tip's geometrical shape on electrospray deposition of organic thin films, *Japanese Journal of Applied Physics*, 56(4S) (2017) 04CL05.
- [6] J.B. Fenn, M. Mann, C.K. Meng, S.F. Wong, C.M. Whitehouse, Electrospray ionization—principles and practice, *Mass Spectrometry Reviews*, 9(1) (1990) 37-70.
- [7] A.F. Mejia, P. He, D. Luo, M. Marquez, Z. Cheng, Uniform discotic wax particles via electrospray emulsification, *Journal of colloid and interface science*, 334(1) (2009) 22-28.
- [8] T. Si, L. Zhang, G. Li, C.J. Roberts, X. Yin, R.X. Xu, Experimental design and instability analysis of coaxial electrospray process for microencapsulation of drugs and imaging agents, *Journal of biomedical optics*, 18(7) (2013) 075003.
- [9] L. D'Addio, C. Carotenuto, W. Balachandran, A. Lancia, F. Di Natale, Experimental analysis on the capture of submicron particles (PM0. 5) by wet electrostatic

میانگین این زاویه بین ۸۴ تا ۹۱ درجه می‌باشد که بیش‌ترین آن مربوط به اتانول ۷۰٪ و کم‌ترین آن مربوط به اتانول خالص می‌باشد. به‌طور کلی، میانگین نقاط شروع و پایان ناحیه پایدار برای هر یک از این سیالات به بین ۸۳ تا ۸۸ درجه است که اتانول ۷۰٪ بیش‌ترین زاویه مخروط را دارا می‌باشد و بعد از آن اتانول ۹۶٪ بیش‌ترین زاویه را دارا می‌باشد و در نهایت، کم‌ترین آن مربوط به اتانول خالص می‌باشد. که به‌طور میانگین برای تمامی نقاط شروع و پایان ناحیه پایدار الکترواسپری، اتانول ۷۰٪ دارای مخروطی با میانگین زاویه ۸۸ درجه می‌باشد و اتانول خالص نیز دارای مخروطی با میانگین زاویه ۸۳ درجه است.

ما داده‌های تجربی خود را که شامل حداقل نرخ جریان و قطر جت متناظر با آن است را در برابر قوانین مقیاس‌بندی پیشنهادی توسط گانان-کالوو صحت‌سنجی کردیم و دریافتیم که قوانین مقیاس‌بندی برای مقادیر $\epsilon'\delta_{\mu}$ بسیار بیشتر از ۱۰۰ نامعتبر هستند.

D	قطر خارجی نازل، m
K	هدایت ویژه الکتریکی سیال، S/m
L	فاصله بین دو الکتروود، m
Q	دبی حجمی سیال، m ³ /s
V	ولتاژ اعمالی، v
γ	کشش سطحی سیال، N/m
ϵ_0	ضریب گذردهی الکتریکی خلأ، 8.854*10 ⁻¹² F/m
ϵ	ضریب نسبی گذردهی الکتریکی سیال، بی‌بعد
μ	لزجت دینامیکی سیال، Pa.s
ρ	چگالی سیال، kg/m ³

- science, 58(3-6) (2003) 537-547.
- [21] J. Xie, J. Jiang, P. Davoodi, M.P. Srinivasan, C.-H. Wang, Electrohydrodynamic atomization: A two-decade effort to produce and process micro-/nanoparticulate materials, *Chemical engineering science*, 125 (2015) 32-57.
- [22] C.U. Yurteri, R.P. Hartman, J.C. Marijnissen, Producing pharmaceutical particles via electrospraying with an emphasis on nano and nano structured particles-A review, *KONA Powder and Particle Journal*, 28 (2010) 91-115.
- [23] F. Mottelay, On the loadstone and magnetic bodies, and on the great magnet the earth; a new physiology, demonstrated with many arguments and experiments—translation of Gilbert W, *De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure*, in, New York, NY: Wiley, 1893.
- [24] J.A. Nollet, X. Part of a letter from Abbè Nollet, of the Royal Academy of Science at Paris, and FRS to Martin Folkes Esq; President of the same, concerning electricity, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 45(486) (1748) 187-194.
- [25] L. Rayleigh, XX. On the equilibrium of liquid conducting masses charged with electricity, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 14(87) (1882) 184-186.
- [26] J.W. Strutt, I. The influence of electricity on colliding water drops, *Proceedings of the royal society of London*, 28(190-195) (1879) 405-409.
- [27] J.J. Thomson, XXVI. Rays of positive electricity, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 21(122) (1911) 225-249.
- [28] J. Zeleny, The electrical discharge from liquid points, and a hydrostatic method of measuring the electric intensity at their surfaces, *Physical Review*, 3(2) (1914) 69.
- [29] J. Zeleny, On the condition of instability of electrified drops, with applications to electrical discharge from liquid points, in: *Proc. Camb. Phil. Soc.*, 1915, pp. 71-
scrubbing, *Chemical Engineering Science*, 106 (2014) 222-230.
- [10] R. Coffee, Electrodynamic crop spraying, *Outlook on Agriculture*, 10(7) (1981) 350-356.
- [11] M.R. Morad, A. Rajabi, M. Razavi, S.P. Sereshkeh, A very stable high throughput Taylor cone-jet in electrohydrodynamics, *Scientific reports*, 6(1) (2016) 1-10.
- [12] A. Lee, H. Jin, H.-W. Dang, K.-H. Choi, K.H. Ahn, Optimization of experimental parameters to determine the jetting regimes in electrohydrodynamic printing, *Langmuir*, 29(44) (2013) 13630-13639.
- [13] A. Ieta, J. Primrose, D. Quill, M. Chirita, Characterization of water-ethanol electrosprays, *Journal of electrostatics*, 69(5) (2011) 461-465.
- [14] L.F. Velásquez-García, A.I. Akinwande, M. Martinez-Sanchez, A planar array of micro-fabricated electrospray emitters for thruster applications, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 15(5) (2006) 1272-1280.
- [15] A. Jaworek, Micro-and nanoparticle production by electrospraying, *Powder technology*, 176(1) (2007) 18-35.
- [16] H. Xu, J. Wang, B. Li, K. Yu, J. Tian, D. Wang, W. Zhang, Effect of spray modes on electrospray cooling heat transfer of ethanol, *Applied Thermal Engineering*, 189 (2021) 116757.
- [17] N. Bock, T.R. Dargaville, M.A. Woodruff, Electrospraying of polymers with therapeutic molecules: state of the art, *Progress in polymer science*, 37(11) (2012) 1510-1551.
- [18] A. Jaworek, A.T. Sobczyk, Electrospraying route to nanotechnology: An overview, *Journal of electrostatics*, 66(3-4) (2008) 197-219.
- [19] D.N. Nguyen, C. Clasen, G. Van den Mooter, Pharmaceutical applications of electrospraying, *Journal of pharmaceutical sciences*, 105(9) (2016) 2601-2620.
- [20] K. Okuyama, I.W. Lenggoro, Preparation of nanoparticles via spray route, *Chemical engineering*

- [42] M. Mutoh, S. Kaieda, K. Kamimura, Convergence and disintegration of liquid jets induced by an electrostatic field, *Journal of Applied Physics*, 50(5) (1979) 3174-3179.
- [43] G.I. Taylor, Electrically driven jets, *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 313(1515) (1969) 453-475.
- [44] D.-R. Chen, D.Y. Pui, Experimental investigation of scaling laws for electro spraying: dielectric constant effect, *Aerosol science and technology*, 27(3) (1997) 367-380.
- [45] J.-U. Park, M. Hardy, S.J. Kang, K. Barton, K. Adair, D. Kishore Mukhopadhyay, C.Y. Lee, M.S. Strano, A.G. Alleyne, J.G. Georgiadis, High-resolution electrohydrodynamic jet printing, *Nature materials*, 6(10) (2007) 782-789.
- [46] D.P. Smith, The electrohydrodynamic atomization of liquids, *IEEE transactions on industry applications*, (3) (1986) 527-535.
- [47] A. Yazdekhesti, A. Pishavar, A. Valipouri, Investigating the effect of electrical conductivity on electro spray modes, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 100 (2019) 328-336.
- [48] I. Hayati, A. Bailey, T.F. Tadros, Investigations into the mechanisms of electrohydrodynamic spraying of liquids: I. Effect of electric field and the environment on pendant drops and factors affecting the formation of stable jets and atomization, *Journal of Colloid and Interface Science*, 117(1) (1987) 205-221.
- [49] B.K. Ku, S.S. Kim, Electrohydrodynamic spraying characteristics of glycerol solutions in vacuum, *Journal of Electrostatics*, 57(2) (2003) 109-128.
- [50] Z. Wang, L. Xia, S. Zhan, Experimental study on electrohydrodynamics (EHD) spraying of ethanol with double-capillary, *Applied Thermal Engineering*, 120 (2017) 474-483.
- [51] K. Sung, C.S. Lee, Factors influencing liquid breakup in electrohydrodynamic atomization, *Journal of Applied Physics*, 96(7) (2004) 3956-3961.
- 83.
- [30] J. Zeleny, Instability of electrified liquid surfaces, *Physical review*, 10(1) (1917) 1.
- [31] Ransburg HP, Green HJ, inventors; Harper J Ransburg Co Inc, assignee. Apparatus for spray coating articles. United States patent US 2,247,963. 1941 Jul 1.
- [32] G.I. Taylor, Disintegration of water drops in an electric field, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 280(1382) (1964) 383-397.
- [33] M. Dole, L.L. Mack, R.L. Hines, R.C. Mobley, L.D. Ferguson, M.B. Alice, Molecular beams of macroions, *The Journal of chemical physics*, 49(5) (1968) 2240-2249.
- [34] A. Ganán-Calvo, J. Davila, A. Barrero, Current and droplet size in the electro spraying of liquids. Scaling laws, *Journal of aerosol science*, 28(2) (1997) 249-275.
- [35] A. Bailey, W. Balachandran, The disruption of electrically charged jets of viscous liquid, *Journal of Electrostatics*, 10 (1981) 99-105.
- [36] A.G. Bailey, Electrostatic atomization of liquids, *Science Progress (1933-)*, (1974) 555-581.
- [37] X. Chen, L. Jia, X. Yin, J. Cheng, J. Lu, Spraying modes in coaxial jet electro spray with outer driving liquid, *Physics of fluids*, 17(3) (2005) 032101.
- [38] M. Cloupeau, B. Prunet-Foch, Electrostatic spraying of liquids in cone-jet mode, *Journal of electrostatics*, 22(2) (1989) 135-159.
- [39] S. Jayasinghe, M. Edirisinghe, Effect of viscosity on the size of relics produced by electrostatic atomization, *Journal of Aerosol Science*, 33(10) (2002) 1379-1388.
- [40] S. Jayasinghe, M. Edirisinghe, Obtaining fine droplet relics by electrostatic atomization of viscous liquids, *Journal of materials science letters*, 21(5) (2002) 371-373.
- [41] B.K. Ku, S.S. Kim, Electro spray characteristics of highly viscous liquids, *Journal of Aerosol Science*, 33(10) (2002) 1361-1378.

- electrohydrodynamic spraying of liquids, in: Third International Conference on multiphase Flow, 1998, pp. 8-12.
- [63] A. Jaworek, A. Krupa, Classification of the modes of EHD spraying, *Journal of aerosol science*, 30(7) (1999) 873-893.
- [64] J.F. De La Mora, I.G. Loscertales, The current emitted by highly conducting Taylor cones, *Journal of Fluid Mechanics*, 260 (1994) 155-184.
- [65] A. Gomez, K. Tang, Charge and fission of droplets in electrostatic sprays, *Physics of Fluids*, 6(1) (1994) 404-414.
- [66] R. Hartman, D. Brunner, D. Camelot, J. Marijnissen, B. Scarlett, Electrohydrodynamic atomization in the cone-jet mode physical modeling of the liquid cone and jet, *Journal of Aerosol science*, 30(7) (1999) 823-849.
- [67] C. Rosenkilde, A dielectric fluid drop in an electric field, *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 312(1511) (1969) 473-494.
- [68] P. Brazier-Smith, Stability and shape of isolated and pairs of water drops in an electric field, *The physics of Fluids*, 14(1) (1971) 1-6.
- [69] M.J. Miksis, Shape of a drop in an electric field, *The Physics of Fluids*, 24(11) (1981) 1967-1972.
- [70] N. Dodgson, C. Sozou, The deformation of a liquid drop by an electric field, *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP*, 38(3) (1987) 424-432.
- [71] J. Sherwood, Breakup of fluid droplets in electric and magnetic fields, *Journal of Fluid Mechanics*, 188 (1988) 133-146.
- [72] J. Sherwood, The deformation of a fluid drop in an electric field: a slender-body analysis, *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 24(17) (1991) 4047.
- [73] F.K. Wohlhuter, O.A. Basaran, Shapes and stability of pendant and sessile dielectric drops in an electric field, *Journal of Fluid Mechanics*, 235 (1992) 481-510.
- [74] J. Bacri, D. Salin, Instability of ferrofluid magnetic
- [52] A.M. Gañán-Calvo, The surface charge in electro-spraying: its nature and its universal scaling laws, *Journal of Aerosol Science*, 30(7) (1999) 863-872.
- [53] D. Grigoriev, M. Edirisinghe, X. Bao, Deposition of fine silicon carbide relics by electrostatic atomization of a polymeric precursor, *Journal of materials research*, 17(2) (2002) 487-491.
- [54] C. Li, M. Chang, W. Yang, A. Madden, W. Deng, Ballpoint pen tips as robust cone-jet electro-spray emitters, *Journal of aerosol science*, 77 (2014) 10-15.
- [55] C. Ryan, K. Smith, M. Alexander, J. Stark, Effect of emitter geometry on flow rate sensitivity to voltage in cone jet mode electro-spray, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(15) (2009) 155504.
- [56] S. Martin, A. Perea, P.L. Garcia-Ybarra, J.L. Castillo, Effect of the collector voltage on the stability of the cone-jet mode in electrohydrodynamic spraying, *Journal of Aerosol Science*, 46 (2012) 53-63.
- [57] P. Naderi, M. Shams, H. Ghassemi, Investigation on the onset voltage and stability island of electro-spray in the cone-jet mode using curved counter electrode, *Journal of Electrostatics*, 98 (2019) 1-10.
- [58] M. Shams, P. Naderi, N. Ashgriz, Effect Of Semicylindrical Counter Electrodes On The Cone-Jetmode Of Electro-spray, *Atomization and Sprays*, 30(1) (2020).
- [59] R. Bocanegra, D. Galán, M. Márquez, I. Loscertales, A. Barrero, Multiple electro-sprays emitted from an array of holes, *Journal of Aerosol Science*, 36(12) (2005) 1387-1399.
- [60] J. Regele, M. Papac, M. Rickard, D. Dunn-Rankin, Effects of capillary spacing on EHD spraying from an array of cone jets, *Journal of Aerosol Science*, 33(11) (2002) 1471-1479.
- [61] A. Ieta, D. Quill, T.E. Doyle, Onset characteristics of aqueous large gap electro-sprays, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(4) (2010) 1601-1605.
- [62] A. Jaworek, A. Krupa, Main modes of

- spacecraft propulsion, EPFL, 2009.
- [83] A.M. Gañán-Calvo, N. Rebollo-Muñoz, J. Montanero, The minimum or natural rate of flow and droplet size ejected by Taylor cone-jets: physical symmetries and scaling laws, *New Journal of Physics*, 15(3) (2013) 033035.
- [84] Gañán-Calvo, Alfonso M. “Cone-jet analytical extension of Taylor’s electrostatic solution and the asymptotic universal scaling laws in electrospraying.” *Physical review letters* 79, no. 2 (1997): 217.
- [85] Gañán-Calvo, A. M., J. C. Lasheras, J. Dávila, and A. Barrero. “The electrostatic spray emitted from an electrified conical meniscus.” *Journal of aerosol science* 25, no. 6 (1994): 1121-1142.
- [86] Higuera, F. J. “Flow rate and electric current emitted by a Taylor cone.” *Journal of Fluid Mechanics* 484 (2003): 303-327.
- [87] Ganán-Calvo, Alfonso M. “On the general scaling theory for electrospraying.” *Journal of fluid mechanics* 507 (2004): 203-212a.
- [88] Gañán-Calvo AM, Montanero JM. Revision of capillary cone-jet physics: Electro spray and flow focusing. *Physical review E*. 2009 Jun 15;79(6):066305.
- [89] Gañán-Calvo AM. The surface charge in electrospraying: its nature and its universal scaling laws. *Journal of Aerosol Science*. 1999 Aug 1;30(7):863-72.
- drops under magnetic field, *Journal de Physique Lettres*, 43(17) (1982) 649-654.
- [75] J.-C. Bacri, D. Salin, Dynamics of the shape transition of a magnetic ferrofluid drop, *Journal de Physique Lettres*, 44(11) (1983) 415-420.
- [76] A. Boudouvis, J. Puchalla, L. Scriven, Magneto hydrostatic equilibria of ferrofluid drops in external magnetic fields, *Chemical Engineering Communications*, 67(1) (1988) 129-144.
- [77] O.A. Basaran, F.K. Wohlhuter, Effect of nonlinear polarization on shapes and stability of pendant and sessile drops in an electric (magnetic) field, *Journal of Fluid Mechanics*, 244 (1992) 1-16.
- [78] O. Sero-Guillaume, D. Zouaoui, D. Bernardin, J. Brancher, The shape of a magnetic liquid drop, *Journal of Fluid Mechanics*, 241 (1992) 215-232.
- [79] H. Li, T.C. Halsey, A. Lobkovsky, Singular shape of a fluid drop in an electric or magnetic field, *EPL (Europhysics Letters)*, 27(8) (1994) 575.
- [80] A. Jones, K. Thong, The production of charged monodisperse fuel droplets by electrical dispersion, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4(8) (1971) 1159.
- [81] R. Krpoun, H.R. Shea, A method to determine the onset voltage of single and arrays of electrospray emitters, *Journal of Applied Physics*, 104(6) (2008) 064511.
- [82] R. Krpoun, Micromachined electrospray thrusters for

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Bagherian Dehaghi, M. Shams, P. Naderi, Experimental investigation on the geometrical characterization of the cone-jet mode of electrospray of ethanol-water mixtures with different concentrations by high-speed imaging, Amirkabir J. Mech Eng., 55(5) (2023) 617-642.

DOI: [10.22060/mej.2023.21382.7440](https://doi.org/10.22060/mej.2023.21382.7440)



