



مطالعه‌ی تجربی حالت‌های عملکردی پاشش الکتروهیدرودینامیک اتانول

سید رحمان پژمان سرشکه¹، مریم رضوی¹، علیرضا رجبی²، محمدرضا مراد^{3*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

3- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* تهران، صندوق پستی 1458889694، morad@ae.sharif.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 17 مرداد 1395

پذیرش: 20 مهر 1395

ارائه در سایت: 16 آبان 1395

کلید واژگان:

الکترواسپری

حالت‌های پاشش

اتانول

منقاره‌ی مایع

نیروهای اعمالی

چکیده

الکترواسپری به عنوان یکی از روش‌های پاشش مایع به‌علت تولید قطرات با سایز بسیار ریز و توزیع یکسان از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است، لذا شناسایی حالت‌های مختلف ناشی از آن بسیار مفید بوده و نشان دهنده‌ی رفتار مایع در میدان الکتریکی می‌باشد. در این مقاله به‌صورت یک مطالعه‌ی تجربی، حالت‌های مختلف الکترواسپری براساس شکل منقاره‌ی مایع خروجی از نازل و چگونگی ایجاد جت و شکست آن معرفی می‌گردند و به حالت‌های چکیدن، هم‌نژاد، دوکی شکل، دوکی شکل چندگانه، مخروط متناوب، جت نوسانی، جت منحرف، جت مخروطی، جت چندگانه، جت ساده و جت منشعب تقسیم‌بندی می‌گردند و نیروهای وارد بر جت و قطرات در هر حالت بررسی می‌گردند. نهایتاً برای اولین بار در دنیا نمودار دبی برحسب ولتاژ که بیانگر دامنه‌ی عملکردی حالت‌های مختلف الکترواسپری می‌باشد، برای اتانول مایع که به‌عنوان یک سوخت پاک پرکاربرد می‌باشد در دامنه‌ی وسیعی از دبی بین 0 – 80 ml/h و ولتاژ بین 0 – 8.5kV رسم می‌شود. لازم به ذکر است کلیه مطالعات پیش رو شامل بر شناسایی حالت‌های پاشش و دامنه‌ی تغییرات آن‌ها براساس عکس‌برداری به روش سایه‌نگاری توسط یک دوربین سرعت بالا و یک دوربین با وضوح تصویر بالا از پدیده الکترواسپری انجام شده است. در چپ‌نشین حاضر مشاهده شد برای همه‌ی دبی‌ها در ولتاژهای کوچک‌تر از 3kV حالت چکیدن که گاهی به همراه حالت هم‌نژاد است ایجاد می‌گردد، در ولتاژهای بین 3 – 4kV شاهد حالت دوکی شکل خواهیم بود و برای ولتاژهای بزرگتر از 5.5kV حالت جت چندگانه را شاهد هستیم. باقی حالت‌ها در حدفصل ولتاژ 4 – 5.5kV رخ می‌دهد.

An Experimental Study of Electrohydrodynamic Atomization Modes of Ethanol

Seyyed Rahman Pejman Sereshkeh, Maryam Razavi, Alireza Rajabi, Mohammad Reza Morad*

Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 1458889694, Tehran, Iran, morad@ae.sharif.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 07 August 2016
Accepted 11 October 2016
Available Online 06 November 2016

Keywords:

Electrospray
Spraying Modes
Ethanol
Liquid Meniscus
Applied Forces

ABSTRACT

Electrospray is an atomization method which produces monodisperse and fine droplets by applying a high potential difference between a nozzle and a counter electrode. Therefore liquid meniscus shows different behaviors when flow rate or applied voltage varies in the electrospray method. Here we report experimental study of these modes based on observation of the liquid meniscus shape emitted from the nozzle. The formation of different modes is reported and forces acting on the meniscus in each mode is discussed. In this work classification of electrospray modes is reviewed for a wide range of flow rates, between 0 – 80 ml/h, and voltage, between 0–8.5kV. Electrospraying of ethanol is studied as a promising clean fuel for a wide range of voltages and flow rates. Formation of dripping, sibling, spindle, micro spindle, intermittent cone jet, oscillating jet, precession, cone-jet, multi jet, simple jet and ramified jet modes are observed. It should be noted that throughout this study such as identification of mode shapes has been done based on taking photos of electrospray phenomenon using the method of shadowgraphy, and this method has been done by using a high speed and a high resolution camera. In present configuration, for all flow rates, the dripping and sibling mode is utilized for all of voltages which are lower than 3kV, for voltages between 3–4kV the spindle mode will be seen and for the voltages which are more than 5.5kV the multi jet mode will be observed. There are the other mode shapes for voltages between 4–5.5kV.

1- مقدمه

می‌گیرد که این تغییر شکل اساس ایجاد حالت‌های مختلف خواهد بود. مطالعه روی حالت‌های پاشش به‌علت این‌که بیانگر رفتار مایع در میدان الکتریکی تحت شرایط مختلف است، از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود و از پایه‌ای‌ترین و مهم‌ترین مسائل موجود در این علم محسوب می‌شود، تاکنون مطالعات مختلفی روی حالت‌های الکترواسپری انجام شده که در ادامه به

الکترواسپری یکی از روش‌های پاشش مایع است. الکترواسپری با تزریق مایع داخل میدان الکتریکی بین دو الکترود ایجاد می‌شود. حال اگر دامنه‌ی دبی مایع تزریقی و اختلاف پتانسیل بین دو الکترود که نشان‌دهنده‌ی قدرت میدان است تغییر کند منقاره‌ی مایع خروجی اشکال مختلفی به خود

Please cite this article using:

S. R. Pejman Sereshkeh, M. Razavi, A. Rajabi, M. R. Morad, An Experimental Study of Electrohydrodynamic Atomization Modes of Ethanol, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 291-302, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

شامل نیروهای الکتریکی، نیروهای مکانیکی و تنش‌ی را برای هر حالت معرفی و بررسی کردند. همچنین برای اولین بار نمودار دبی برحسب ولتاژ¹⁵ را برای آب با توجه به حالت‌هایی که دسته‌بندی کرده بودند رسم کردند.

در سال 2004 مارجینین و همکاران [12] مطالعاتی در زمینه حالت مخروط متناوب¹⁶ و حالت‌های پالسی که در ولتاژهایی قبل از جت مخروطی رخ می‌دهند انجام دادند و اولین لحظات ایجاد جت را گزارش کردند.

بسیاری از تلاش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی شناسایی حالت‌های الکترواسپری براساس مشاهده‌ی رفتار مایع در خروجی سوزن بوده است. این روش در کارهای آزمایشگاهی با دشواری‌هایی مواجه می‌شود. به‌علاوه کاربرد این روش به تجهیزات اپتیکی و دوربین‌های گران و باکیفیت احتیاج دارد. بنابراین توسعه‌ی روشی برای شناسایی حالت‌های الکترواسپری بر پایه‌ی ابزارهای ارزان و کاربردی بسیار مفید خواهد بود. از این رو جریان الکتریکی عبوری از الکترواسپری و یا بار قطرات تولید شده از گذشته مورد توجه و مطالعه بوده است. از اولین مطالعاتی که در این زمینه انجام شد مربوط به حالت چکیدن و جت مخروطی و جریان اندازه‌گیری شده و روند فرکانس تغییرات آن بود. این کار توسط لویز-هررا و همکارانش انجام گردید [13]. همچنین وردولد و همکارانش [14] در سال 2014 برای شناسایی حالت‌های الکترواسپری از اندازه‌گیری جریان الکتریکی عبوری و مشخصات مختلف حوزه زمانی و فرکانسی آن استفاده کردند. آنها پارامترهای مختلف حوزه زمان و حوزه فرکانس جریان الکترواسپری را بررسی کرده و تلاش کردند تا محدوده‌ی این پارامترها را برای حالت‌های مختلف کاری الکترواسپری مشخص کنند.

کیم و همکاران [15] در سال 2012 با استفاده از یک دوربین سرعت بالا از تمامی حالت‌ها عکس ارائه کردند و برای اولین بار از روند تغییرات در حالت‌های نوسانی و چرخشی تصویر مناسب تهیه کردند ولی مرز این تغییرات را به درستی مشخص نکردند، آنها همچنین تاثیر تغییر قطر نازل بر حالت‌های حاصل را بررسی کردند.

برای پی بردن به این مهم که در چه دامنه‌ای از ولتاژ و دبی شاهد چه حالتی از پاشش خواهیم بود معمولاً از نمودار ولتاژ بر حسب دبی استفاده می‌شود. در سال 1998 جائورک [11] این نمودار را برای آب مقطر رسم کرد و دامنه‌ی تغییرات حالت‌ها و مرز مشترک بین آنها را به طور مشخص ذکر و تفکیک نمود. در سال 2013 لی و همکارانش [16] این نمودار را برای ترکیبی از متانول رسم کردند و با استفاده از این نمودار خصوصیات حالت جت مخروطی را بررسی کردند. در سال 2015 نیز پارک [17] بی بعد شده‌ی این نمودار بر حسب خواص را برای آب رسم کرد.

اتانول به‌علت اینکه می‌تواند به عنوان یک سوخت پاک در مباحث مربوط به احتراق [4] مورد استفاده قرار گیرد، بسیار حائز اهمیت خواهد بود. همچنین پاشش اتانول در صنایع داروسازی [18] به حالت ترکیب با مواد دیگر بسیار پرکاربرد است.

در کار پیش رو با استفاده از عکس‌برداری سرعت بالا و دارای وضوح بالا حالت‌های مختلف الکترواسپری براساس شکل منقاره‌ی مایع و نیروهای وارد بر آن معرفی شده و تصاویر مناسبی از آن ارائه می‌شود. مطالعه‌ای که توسط جائورک [11] انجام شده در ارتباط با تحلیل نیروها در جت ایجاد شده در کار حاضر اصلاح و تکمیل شده است، همچنین در کار حاضر نمودار دبی برحسب ولتاژ برای اتانول در دامنه‌ی وسیعی از دبی و ولتاژ رسم شده که

اختصار به آن اشاره خواهد شد. مهمترین حالت پاشش در الکترواسپری حالت جت مخروطی است که در این حالت، قطرات بسیار ریز در ابعاد میکرو و نانو با توزیع قطر یکسان تولید می‌شود که به این دلایل بسیار مورد توجه قرار گرفته است [1]. الکترواسپری به‌علت تولید قطرات بسیار ریز شامل دامنه‌ی وسیعی از کاربردهای مختلف نظیر تولید توان در پیش‌رانه‌های میکرو¹ [3]، احتراق داخل محفظه احتراق‌های با ابعاد کوچک² [4]، طیف‌نگاری جرمی [5] و رنگ‌آمیزی [6] است.

نخستین بار ریلی [2] در سال 1882 اثر بار الکتریکی بر پایداری یک قطره منفرد را مطالعه و بیشترین باری که یک قطره می‌تواند حمل کند را محاسبه کرد.

زلی [7] در سال 1914 نخستین کسی بود که پدیده‌ی الکترواسپری را به صورت نظام‌مند مورد بررسی و مطالعه قرار داد. او رفتار قطرات سیال را در انتهای سوزن بررسی نمود و در این آزمایش تجربی چندین رژیم مختلف مانند (چکیدن³، متناوب⁴، جت مخروطی⁵ و نوسانی⁶) را برای الکترواسپری گزارش کرد. او در سال 1917 با استفاده از یک سوزن فلزی و مایع اتیل‌گلیکول برای اولین بار با استفاده از یک میکروسکوپ و نور حاصل از جرقه توانست اولین تصاویر از رژیم‌های مختلف الکترواسپری را ثبت کند. دسته‌بندی جامع‌تر از حالت‌های مختلف الکترواسپری بعدها توسط کلویو و پرانت-فاش انجام شد [8].

در سال 1990 [8] و 1994 [9] کلویو و پرانت-فاش توانستند برای نخستین بار با استفاده از عکس‌برداری حالت‌های الکترواسپری را دسته‌بندی کنند. آنها بیان کردند که حالت‌های مختلف و افشانه‌های حاصل می‌توانند خصوصیات مختلفی داشته باشند. بنا به این تفاوت‌ها الکترواسپری را به حالت‌های چکیدن، چکیدن میکرو⁷، جت مخروطی، دوکی شکل⁸، جت ساده⁹ و جت منشعب¹⁰ دسته‌بندی کرده و حالت جت چندانگانه¹¹ را به‌عنوان حالت خاصی از جت مخروطی معرفی کردند. آنها همچنین اعلام کردند که خصوصیات نازل از قبیل شکل ظاهری و حتی میزان ترشوندگی آن می‌تواند در پیدایش و پایداری یک حالت خاص تاثیرگذار باشد.

در سال 1996 جائورک و کروپا [10] حالت جت منحرف¹² را به حالت‌های شناخته شده تا آن زمان افزودند. این حالت به‌علت این که قطرات را در یک فضای مخروطی گسیل می‌کرد شباهت زیادی به حالت جت مخروطی داشت و به همین دلیل مورد توجه قرار گرفت. در سال 1999 جائورک و کروپا [11] براساس شکل منقاره‌ی مایع و نحوه‌ی شکست و جدایش قطرات مطالعات کیفی‌ای را روی حالت‌های مختلف پاشش انجام دادند و در یک تقسیم‌بندی جدید تعدادی از حالت‌های پاشش را به دسته‌بندی‌های قبلی افزودند. این حالت‌های جدید شامل دوکی شکل چندانگانه¹³، جت نوسانی¹⁴ و جت منحرف بودند. آنها همچنین حالت جت چندانگانه را به‌عنوان یک حالت مستقل از جت مخروطی ارائه کردند و تعداد حالت‌های مختلف را به ده رساندند. به‌علاوه نیروهای وارد به منقاره‌ی مایع

¹ Micro Thrusters

² Small-scale combustor

³ Dripping

⁴ Intermittent

⁵ Cone-jet

⁶ Oscillating

⁷ Micro dripping

⁸ Spindle

⁹ Simple Jet

¹⁰ Ramified Jet

¹¹ Multi Jet

¹² Precession

¹³ Multi Spindle

¹⁴ Oscillating Jet

¹⁵ Q-V

¹⁶ Intermittent Cone

جدول 1 خواص اتانول مورد استفاده

Table 1 Properties of ethanol					
خواص	ثابت دی الکتریک	کشش سطحی (N/m)	ضریب لزجت (Pa.s)	رسانایی الکتریکی (S/m)	چگالی (kg/m ³)
مقدار خواص	24.3	0.02238	1.21×10^{-3}	1.07×10^{-6}	800.8

(1) شکل هندسی مایع در خروجی سوزن

(2) نوع رفتار جت در شکسته شدن به قطرات.

به طور کلی حالت‌های اسپری به دو گروه تقسیم‌بندی می‌شوند. گروه اول به حالت‌هایی اطلاق می‌شود که توده‌های مایع از سوزن به صورت ناپیوسته خارج خواهند شد که شامل حالت چکیدن، چکیدن میکرو، دوکی شکل، دوکی شکل چندگانه و منقاره‌ی منشعب هستند. دسته‌ی دوم شامل حالت‌هایی هستند که مایع از نوک سوزن به صورت یک باریکه‌ی پیوسته خارج شده و در فاصله‌ی نزدیک به چند میلی‌متر از آن به قطراتی ریز متلاشی می‌گردد. این گروه شامل حالت‌های جت مخروطی، جت منحرف، جت نوسانی، جت چندگانه و جت منشعب می‌باشند.

حالت‌های مختلف الکترواسپری تابعی از عوامل مختلف زیر هستند [24]:

- ویژگی‌های سیالی (هم سیال و هم محیط اطراف)
 - 0 رسانایی الکتریکی
 - 0 تنش سطحی
 - 0 لزجت
 - 0 ثابت دی الکتریک
- میدان الکتریکی
 - 0 قدرت میدان الکتریکی اعمالی به نوک سوزن
 - 0 خصوصیات میدان در ناحیه‌ی الکترواسپری
- هندسه‌ی سوزن
- دبی سیال
- وجود جریان هوای هم محور.

به‌وسیله‌ی تغییر پارامترهای مختلفی که ذکر شد شکل و محدوده‌ی حالت‌های پاشش دچار تغییراتی می‌شود. دلیل ایجاد حالت‌های مختلف نیروهای مختلفی است که بر مایع الکترواسپری اثر می‌گذارند و باعث تغییر شکل آنها و تبدیل از یک حالت پاشش به شکل دیگر می‌شود. این نیروها عبارتند از:

- نیروی ناشی از بار الکتریکی بین ذرات مختلف F_Q
- نیروی ناشی از اثر میدان الکتریکی F_e
- نیروی گرانش F_g
- نیروی اینرسی F_U
- نیروی درگ استوکس F_{St}
- نیروی کشش سطحی F_σ
- نیروی ناشی از اثرات لزجت F_η
- نیروی گریز از مرکز F_c
- نیروی القایی ناشی از حرکت ذره باردار F_i .

1-3- حالت چکیدن

در حالت چکیدن مطابق "شکل 2" مایع پس از خروج از سوزن به‌علت تأثیرات کشش سطحی به بالا کشیده می‌شود، اما پس از انباشت بیشتر قطره

تابه‌حال در مطالعات قبلی مشاهده نشده است. این نمودار می‌تواند پایه و اساس مطالعات آینده قرار گیرد. در نهایت نیز دسته‌بندی جدیدی از روند تغییر حالت‌های مختلف ارائه می‌شود.

2- چیدمان آزمایشی و روش کار

چیدمان آزمایشی مقاله‌ی حاضر به صورت شماتیک در "شکل 1" آورده شده است. همان‌گونه که از شکل پیداست، الکترواسپری از اعمال اختلاف پتانسیل بین دو الکتروده که یکی از این الکترودها نقش نازل را نیز ایفا می‌کند، ایجاد می‌شود.

دبی مایع مورد نیاز توسط یک پمپ سرنگی کالیبره شده‌ی اف ان ام¹ [19] تامین می‌شود. برای تهیه اختلاف پتانسیل مورد نیاز ولتاژ بالا توسط منبع تغذیه ولتاژ بالا² به نازل اعمال می‌شود و ولتاژ اعمال شده برای افزایش دقت توسط یک پروب ولتاژ بالا³ [20] با دقت 1% و یک مولتی‌متر دیجیتال⁴ [21] با دقت 4.5% اندازه‌گیری و خوانده می‌شود. حالت‌های الکترواسپری توسط یک دوربین CCD سرعت بالا (1000 فریم در ثانیه) متعلق به شرکت ای او اس تکنولوژی⁵ و یک دوربین دیجیتال نیکون⁶ [22] همراه با یک لنز عکس‌برداری ماکرو⁷ [23] و سه لوله‌ی توسعه‌دهنده اتوماتیک⁸ و به روش سایه‌نگاری⁹ آشکارسازی می‌شود.

همچنین از یک آل ایی دی¹⁰ سفید رنگ برای نورپردازی و عکس‌برداری استفاده می‌شود. نازل استفاده شده یک سوزن ضدزنگ از جنس استیل است که دارای قطر خارجی 0.7 میلی‌متر و قطر داخلی 0.5 میلی‌متر و مقطع مسطح دایروی می‌باشد. همچنین الکتروده متصل به زمین یک صفحه‌ی آلومینیومی با ابعاد $100 \times 100 \times 2$ mm است که در فاصله‌ی 3.5 سانتی‌متری نسبت به سوزن قرار گرفته است. مایع مورد استفاده اتانول با درصد خلوص بالا است که خواص آن با دقت بالا اندازه‌گیری شده است. این خواص در جدول 1 آورده می‌شود.

3- حالت‌های الکترواسپری

دسته بندی حالت‌های الکترواسپری براساس دو معیار زیر می باشد [9]:

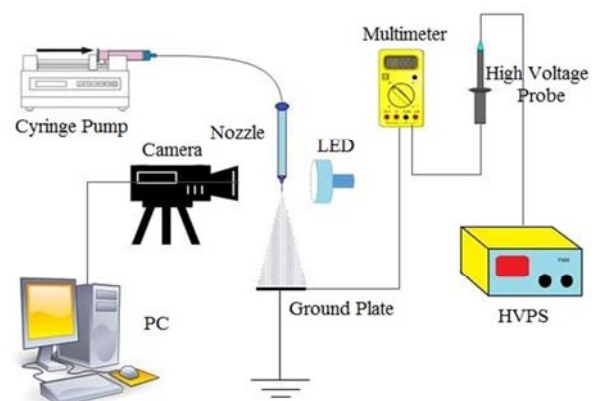


Fig. 1 Scheme of the experimental stand

شکل 1 طرحی از چیدمان آزمایشی

¹ SP2000,FNM

² HV35 FNM

³ HVP-40 Pintek

⁴ 86D Victor

⁵ 1000 FPS, AOS technology

⁶ D7100, Nikon

⁷ AF-S Micro Nikkor 105mm 1: 2.8 G ED Nikon

⁸ Extension Tube, 12,20,36mm, Kenko

⁹ Shadowgraphy

¹⁰ LED

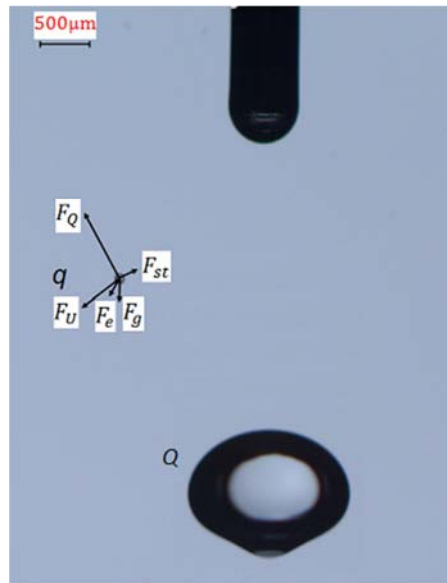


Fig. 3 Schematic representation of forces on the sibling droplet in the dripping mode, Flowrate= 3 ml/h, Voltage= 2.512kV

شکل 3 شکل شماتیک نیروهای وارد بر قطره هم‌نژاد در حالت چکیدن، دبی سیال 3 ml/h، ولتاژ اعمالی 2.512kV

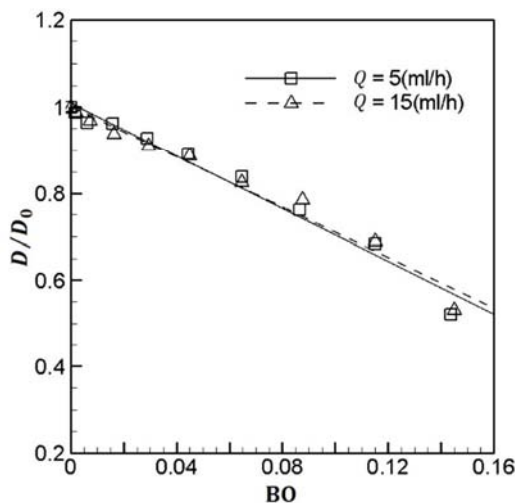


Fig. 4 Dimensionless droplet diameter versus bond number for different flow rate in dripping mode

شکل 4 نمودار قطر قطره بی بعد شده برحسب عدد باند برای دبی های مختلف در مود چکیدن

می‌باشد، به‌علاوه افزایش دبی تأثیری در افزایش یا کاهش قطر قطره نداشته و تنها سبب می‌شود که فرکانس افتادن قطره افزایش یابد. به‌عبارتی در دبی ثابت وقتی ولتاژ افزایش می‌یابد، افزایش فرکانس قطرات به معنی حمل حجم کمتری از مایع توسط هر قطره و کاهش اندازه قطرات است. در صورتی که، در ولتاژ ثابت افزایش دبی سبب می‌شود حجم ثابتی از مایع در زمان کوتاه‌تری در منقاره مایع جمع شود و در نتیجه قطره‌هایی با اندازه یکسان در زمان‌های کوتاه‌تر تشکیل شوند. البته این اتفاق تا وقتی صادق است که مایع خروجی از سوزن به جت یکنواخت تبدیل گردد، لازم به ذکر است در دبی‌های خیلی بالاتر مایع خروجی از سوزن به جت پیوسته تبدیل می‌شود و این جت پیوسته در پایین دست می‌شکند و به قطره‌هایی تبدیل می‌شود.

و برتری نیروی گرانش بر کشش سطح به سمت پایین حرکت می‌کند، به‌علاوه نیروی الکتریکی نیز به نیروی گرانش کمک کرده و قطره را به دلیل اثر قطبی سازی به سمت الکتروود مقابل می‌کشد و نهایتاً سبب جدایش قطره می‌شود. پس می‌توان گفت حالت چکیدن ناشی از برتری نیروی گرانش و الکتریکی بر نیروی کشش سطحی است. در این حالت قطره به سمت پایین آمده، باریکه‌ی نازکی از مایع که قطره را به سوزن متصل می‌کند قطع شده و قطره جدا می‌گردد. لازم به ذکر است که پس از جدایش، منقاره‌ی مایع حالت کروی به خود می‌گیرد. در ولتاژهای پایین باریکه‌ی وصل‌کننده بین قطره و سوزن کشیده شده و بسیار نازک می‌گردد، ولی بعد از جدایش دوباره به سمت بالا رفته و به مایع موجود در نوک آن می‌پیوندد.

رفته رفته با افزایش ولتاژ اعمالی به سوزن باریکه‌ی وصل‌کننده‌ی قطره به سوزن به‌علت افزایش نیروی الکتریکی اعمالی به منقاره‌ی مایع کشیده‌تر شده و این کشیدگی باعث می‌شود هنگام جدایش قطره‌ی اصلی باریکه خود به یک قطره کوچک‌تر تبدیل گردد. این حالت خاص از حالت چکیدن را حالت هم‌نژاد می‌نامند. همان‌گونه که در "شکل 3" دیده می‌شود در حالت هم‌نژاد¹ جهت نیروی گرانش به سمت پایین بوده و نیروی الکتریکی در جهت خطوط میدان می‌باشد. جهت نیروی اینرسی هم در جهت حرکت قطره خواهد بود. نیروی درگ استوکس هم نیروی مخالف حرکت است که در مقایسه با سایر نیروها قابل توجه نیست. اما بزرگ‌ترین نیرو، نیروی ناشی از بار هم نام قطره بزرگ است که سبب انحراف قطره کوچک به سمت بیرون صفحه می‌شود.

در "شکل 4" نمودار قطر قطره در حالت چکیدن برحسب عدد باند الکتریکی برای دو دبی نشان داده شده است. در این نمودار قطر قطره با قطر قطره در حالتی که ولتاژ صفر است و ولتاژ نیز با عدد باند الکتریکی که نشان دهنده‌ی اهمیت نیروهای الکتریکی و کشش سطحی است مطابق رابطه (1) بی‌بعد شده است [25]. در این‌جا میدان الکتریکی بین دو الکتروود سوزن و صفحه‌ی متصل به زمین به شکل ساده $E = V/D$ تخمین زده می‌شود. که در آن V ولتاژ الکتریکی و D فاصله‌ی دو الکتروود می‌باشد [25].

$$BO = \frac{D v_0 \epsilon \epsilon_0 E^2}{\gamma} \quad (1)$$

در رابطه‌ی (1) $D v_0$ قطر قطره برای دبی مشابه و ولتاژ صفر است. همچنین γ کشش سطحی و ϵ ثابت دی‌الکتریک مایع می‌باشند. به‌علاوه ϵ_0 ثابت دی‌الکتریک خلاء و برابر با 8.85×10^{-12} است.

همان‌گونه که در "شکل 4" پیداست، با افزایش ولتاژ اعمالی، قطر قطره به سبب افزایش نیروی الکتریکی که ناشی از افزایش قدرت میدان است کاهش می‌یابد. این کاهش قطر قطره، به‌دلیل افزایش فرکانس سقوط آن



Fig. 2 Formation and separation of droplets in dripping mode, Flow rate= 6 ml/h, Voltage= 0.407kV

شکل 2 تشکیل و جدایش قطره در حالت چکیدن، دبی سیال 6 ml/h، ولتاژ اعمالی 0.407kV

¹ Sibling

می‌دهد که این افزایش طول خود موجب شکسته شدن آن به قطرات ریزتر ولی با تعداد بیشتر خواهد شد. لازم به ذکر است که همراه با افزایش طول، دوک حاصل نازک‌تر خواهد شد. انباشت بارهای الکتریکی روی سطح مایع باعث کشیده شدن منقاره به سمت پایین می‌شود. پس از برتری نیروی گرانش و الکتریکی بر سایر نیروهای موثر دوک حاصل جدا می‌گردد. پس از جدایش تعداد بارهای الکتریکی روی سطح منقاره کاهش می‌یابد و نیروی وزن دوک و نیروی الکتریکی وارد بر آن دیگر بر منقاره وارد نخواهد شد، لذا این کاهش آنی نیرو سبب برتری نیروی کشش سطحی بر سایر نیروها شده و مایع باقی مانده روی سوزن حالت کروی پیدا می‌کند و این چرخه مدام تکرار می‌گردد. حالت دوکی شکل دارای فرکانس ثابتی نیست، یعنی به عبارتی دیگر این رفتار در بازه‌های زمانی یکسانی تکرار نمی‌شود و تنها در برخی شرایط خاص آزمایشی می‌توان یک رفتار متناوب با فرکانس مشخص را در آن شاهد بود [9]. همچنین دوک جدا شده از آن و به تبع قطرات جدا شده از آن سائز یکسانی نخواهند داشت. در "شکل 6" نیروهای اثرگذار بر منقاره‌ی مایع در حالت دوکی شکل مشخص شده است. همان‌طور که دیده می‌شود نیروی ناشی از کشش سطحی و لزجت با کشیده شدن مایع مخالفت می‌کنند. نیروی ناشی از بار هم نام ذره Q که در دور قبلی جدا شده نیرویی مخالف جهت حرکت وارد می‌کند. اما آن چیزی که سبب جدایش توده سیال می‌گردد برتری نیروی گرانش و الکتریکی به نیروهای یاد شده است.

3-3- حالت مخروط متناوب

این حالت پاشش مشابه حالت دوکی شکل بوده، با این تفاوت که به جای گسیل دوک از منقاره‌ی مایع جت‌های نازکی ایجاد می‌گردد. با افزایش ولتاژ اعمالی به سوزن و در دبی‌های نسبتاً پایین که در پژوهش پیش‌رو دبی‌های کمتر از 2 ml/h است، این حالت رخ می‌دهد. در این حالت نیروی الکتریکی تنها مقداری کمتر از این است که یک جت پایدار تشکیل شود. "شکل 7" حاصل مرتب‌سازی عکس‌هایی است که در زمانی طولانی گرفته شده و سپس به نحوی چیده شده که گویای یک تناوب کامل از حالت مخروط نوسانی باشد.

همان‌گونه که در "شکل 7" پیداست، ابتدا منقاره‌ی مایع به سبب افزایش نیروی الکتریکی کشیده می‌شود و در ادامه به شکل مخروطی که از انتهای آن جتی بسیار نازک گسیل می‌شود در می‌آید که این جت خود به روش وریکوز یا ناپایداری کینگ [26] می‌شکند. پس از مدتی به سبب عدم

به‌علاوه رابطه نسبت قطر قطره‌ی اندازه‌گیری شده بی‌بعد با عدد باند الکتریکی فاصله‌ی اندکی از یک خط مستقیم دارد. بدین ترتیب می‌توان گفت که تغییر قطر قطره که ناشی از اثرات کشش سطحی و تنش‌های الکتریکی است، به صورت خطی با مجموع اثرات این دو رخ می‌دهد.

2-3- حالت دوکی شکل

با افزایش ولتاژ اعمالی به سوزن، میدان الکتریکی بین دو الکترود تقویت شده و نیروی الکتریکی وارد بر منقاره‌ی مایع افزایش می‌یابد. این افزایش نیرو باعث کشیده شدن منقاره به سمت پایین می‌شود. اما این افزایش به حدی نیست که سبب ایجاد یک جت پایدار شود. این منقاره‌ی کشیده شده شکلی مشابه دوک نخ‌ریسی به خود می‌گیرد که از انتهای آن جتی تقریباً نازک شروع به گسیل می‌کند. که روند پیدایش این دوک‌ها در "شکل 5" آورده شده است. توزیع قطره‌های ناشی از این جت کوچک معمولاً دارای توزیع ناهم‌گون می‌باشد.

کلایپو [8] این حالت پاشش را به 10 مرحله تقسیم کرد، اما با اندکی تغییر این مراحل در 11 قسمت مطابق "شکل 5" و به صورت زیر تعریف می‌شود:

- (1) ایجاد منقاره‌ی کروی شکل از مایع
- (2) کشیده شدن منقاره‌ی مایع
- (3) ظهور یک باریکه‌ی نازک از انتهای منقاره و شکستن آن به قطرات ریز
- (4 و 5) افزایش طول منقاره به صورت برجسته و مشخص
- (6) ایجاد گلوگاه در پایه قسمت مخروطی شکل
- (7) جدا شدن یک شکل دوکی شکل از مایع
- (8) جمع شدن توده‌ی دوکی شکل
- (9) جدایش قطره‌ی اصلی از توده سیال جدا شده
- (10 و 11) شکسته شدن باریکه‌ی باقی مانده به قطرات کوچک.

با افزایش دبی مایع در این حالت دوک‌های حاصل حجیم‌تر شده پس از جدایش حالت حجمی از مایع با سطحی مواج به خود می‌گیرند، این دوک‌ها می‌تواند خود به قطرات ریزتری بشکنند که اندازه‌ی قطرات بین 50 تا 500 میکرون متغیر است. با افزایش دبی تعداد این قطرات افزایش می‌یابد. در یک دبی ثابت با افزایش ولتاژ اعمالی، به سبب قوی‌تر شدن میدان و نیروی الکتریکی وارد به توده سیال منقاره‌ی مایع، دوک ایجاد شده افزایش طول

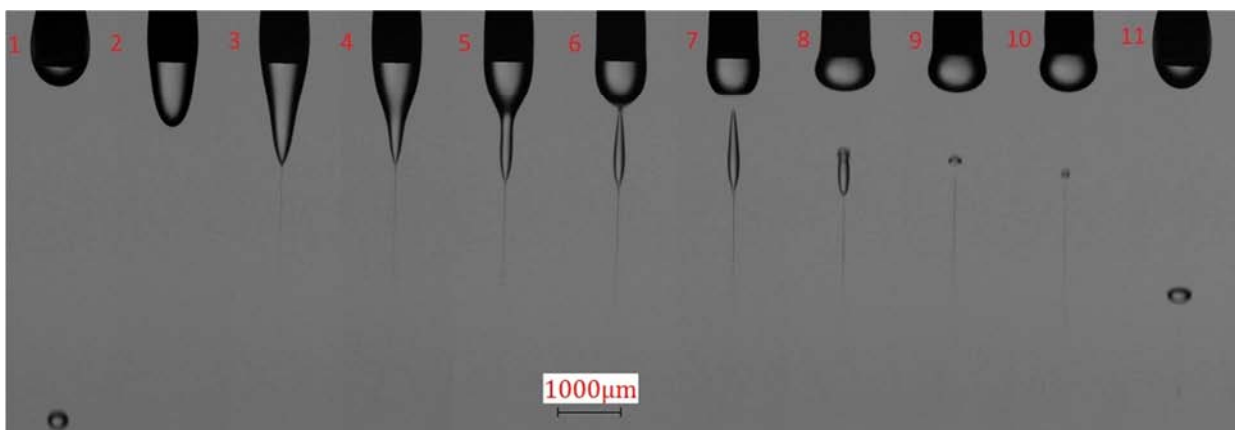


Fig. 5 Different stages of drop formation in spindle mode, Flow rate= 2 ml/h , Voltage= 3.033 kV

شکل 5 مراحل مختلف تشکیل قطره در حالت دوکی شکل، دبی سیال 2 ml/h ، ولتاژ اعمالی 3.033 kV

در "شکل 9" نیروهای وارد بر منقاره‌ی مایع در هنگام جدا شدن از سوزن برای حالت دوکی شکل چندگانه کشیده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، نیروی گرانش به سمت زمین وارد می‌شود. نیروی اینرسی در جهت حرکت توده‌ی مایع بوده و نیروهای ناشی از لزجت و کشش سطحی که سعی بر آن دارند از جدایش توده جلوگیری نمایند نیروی مخالفی را وارد می‌کنند. نیروی الکتریکی هم در راستای میدان الکتریکی می‌باشد. چیزی که باعث انحراف منقاره و دوک گسیل شده می‌شود تاثیر نیروی دافعه‌ی ناشی از بار هم‌نام قطراتی که قبلاً جدا شده‌اند بر سطح مایع موجود در منقاره است که در شکل نشان داده شده است. بنابراین توده سیال به سمت برآیند این نیروها حرکت می‌نماید.

3-5- حالت جت نوسانی

با افزایش ولتاژ در دبی‌های بالاتر از دبی لازم برای تشکیل حالت دوکی شکل چندگانه که در پژوهش پیش‌رو تقریباً 25 ml/h می‌باشد، حالت دوکی شکل به حالت جت نوسانی تبدیل می‌شود. این حالت تشابه بسیار زیادی به حالت دوکی شکل چندگانه دارد، البته با این تفاوت که دوک‌های گسیل شده جای خود را به یک جت پیوسته می‌دهند. در این حالت یک مخروط از مایع در انتهای سوزن ایجاد می‌شود که از این مخروط یک جت نسبتاً طولیل گسیل می‌گردد. این جت با پیشروی در طول نازک شده و خود توسط ناپایداری کینگ و نیروی گریز از مرکز که به واسطه چرخش ناحیه انتهایی ایجاد شده، به قطرات ریزی می‌شکند [11]. در این حالت جت طولیل نام‌برده به سبب نیروهای وارد بر آن و اثرات بارهای الکتریکی موجود در هوا در یک صفحه‌ای که از راستای سوزن می‌گذرد نوسان می‌کند، که البته ممکن است این صفحه خود حول سوزن اندکی بچرخد. این نوسان معمولاً در داخل یک فضای مخروطی شکل که در ولتاژهای بالا از زاویه 90 هم تجاوز می‌کند، انجام می‌شود. روند تغییرات در این حالت به ترتیب و لحظه به لحظه در شکل 10 آورده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود وقتی که جت موجود به بیشینه زاویه‌ی انحراف خود می‌رسد، قطراتی که در هوا معلق هستند کاملاً از منقاره‌ی مایع دور شده‌اند و این اتفاق باعث می‌شود نیروی حاصل از بارهای هم‌نام از روی جت برداشته شود و جت به نقطه‌ی هم راستا با سوزن برگردد. اما در این برگشت جت دچار شکست شده و این شکست مجدداً قطراتی را در هوا پخش می‌کنند که این قطرات با بار هم نام، جت را به طرف مقابل هدایت می‌کنند و این چرخه مدام تکرار می‌شود. همان‌طور که در شکل 10 دیده می‌شود فرکانس یک تناوب کامل این پدیده در شرایط ذکر شده 100 هرتز است که البته با افزایش ولتاژ اعمالی بیشتر هم می‌شود.

در "شکل 11" نیروهای موثر بر نقطه‌ی انتهایی جت نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، نیروی گرانش به سمت زمین بوده و نیروی الکتریکی حاصل از میدان الکتریکی در جهت میدان می‌باشد. نیروی اینرسی هم در جهت حرکت بوده و نیروهای ناشی از لزجت و کشش سطحی نیروی مخالفی را در راستای کشیده شدن جت اعمال می‌نمایند. در انتهای جت نیز نیروی گریز از مرکزی به سبب حرکت نوسانی جت به دور آن وارد می‌شود. اما قطرات معلق در هوا که بار مثبت دارند، به جت با بار هم نام خود نیروی دافعه‌ای وارد می‌کنند که این نیرو همان‌گونه که در بالا اشاره شد، عامل اصلی نوسان و حرکت جت می‌باشد. همچنین به سبب حرکت ذرات باردار در فضا میدان مغناطیسی‌ای به سمت بیرون صفحه القا می‌شود که این میدان نیروی القایی‌ای را در جهت نشان داده شده مطابق قاعده دست راست به انتهای جت وارد می‌کند.

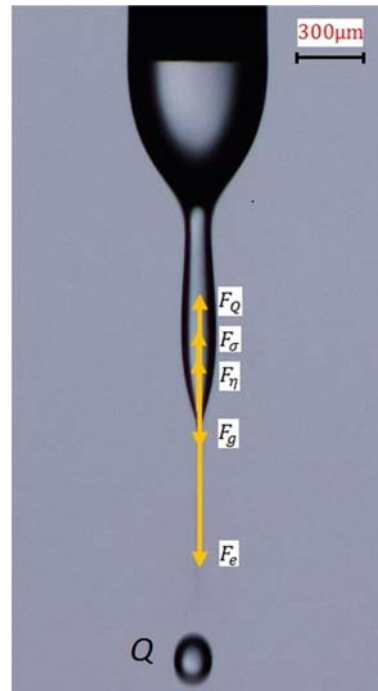


Fig. 6 Schematic representation of forces on liquid meniscus in the spindle mode, Flowrate= 5 ml/h, Voltage= 3.514kV

شکل 6 شکل شماتیک نیروهای وارد بر منقاره‌ی مایع در حالت دوکی شکل، دبی سیال 5 ml/h، ولتاژ اعمالی 3.514kV

توازن نیروها این جت از منقاره کنده می‌شود. بعد از جدایش کشش سطحی مایع باعث می‌شود که منقاره‌ی مایع حالت کروی پیدا کرده و این چرخه مدام تکرار می‌شود. نیروهای موثر در این حالت کاملاً مشابه حالت دوکی شکل خواهد بود. رفتار مایع در این حالت متناوب بوده ولی مشابه حالت دوکی شکل قطر و طول جت جدا شده و همین‌طور ضخامت آن در هر دوره متفاوت می‌باشد.

3-4- حالت دوکی شکل چندگانه

با افزایش ولتاژ در دبی‌های به نسبت کم، بعد از حالت مخروط متناوب، حالت دوکی شکل تبدیل به حالت دوکی شکل چندگانه می‌شود. این حالت همانند آنچه در "شکل 8" دیده می‌شود مشابه حالت دوکی شکل ساده می‌باشد، با این تفاوت که به جای این که دوک‌ها از مرکز سوزن گسیل شوند، به طور متناوب از دو یا چند نقطه اطراف سوزن رها می‌گردند. در این حالت ابتدا منقاره‌ی مایع با زاویه‌ای نسبت به راستای سوزن کشیده می‌شود. سپس این منقاره حالت دوک موربی را پیدا می‌کند که از انتهای آن جت کوچکی پدیدار می‌شود. پس از جدا شدن دوک‌های مورب منقاره‌ی مایع به سبب از دست دادن بارهای مثبت و به سبب اثرات کشش سطحی حالت کروی به خود می‌گیرد، در ادامه همین حالت در نقطه‌ی دیگری از سوزن تکرار می‌شود و این چرخه ادامه پیدا می‌کند.

لازم به ذکر است که طول و حجم دوک‌های مایع مشابه حالت دوکی شکل ساده یکسان نبوده و قطرات حاصل از آن هم به همین دلیل با هم متفاوت هستند. "شکل 8" حاصل عکس‌برداری طولانی مدت 3 دقیقه‌ای از این پدیده بوده که به طور مرتب کنار هم چیده شده است.

در این حالت معمولاً زاویه‌ی گسیل دوک‌ها نسبت به محور سوزن با افزایش ولتاژ افزایش می‌یابد. فرکانس گسیل دوک‌ها نیز در این حالت با افزایش ولتاژ معمولاً افزایش می‌یابد.

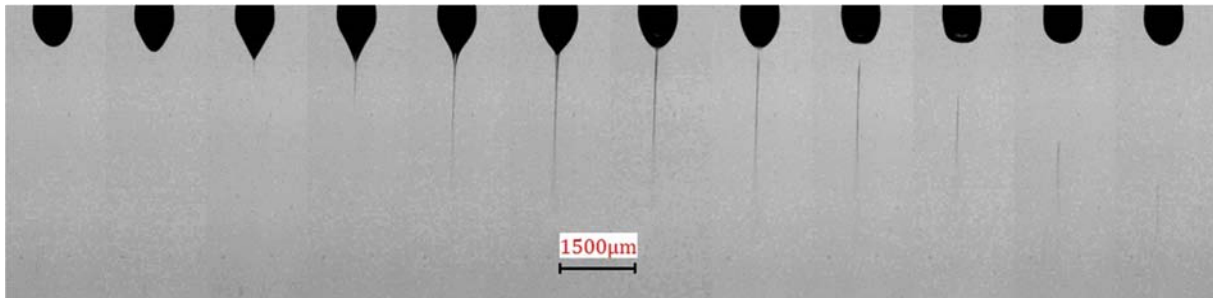


Fig. 7 Different stages of formation of jet in intermittent-cone mode, Flow rate= 1.5 ml/h, Voltage= 3.5kV

شکل 7 مراحل مختلف تشکیل جت در حالت مخروط متناوب، دبی سیال 1.5 ml/h، ولتاژ اعمالی 3.5kV

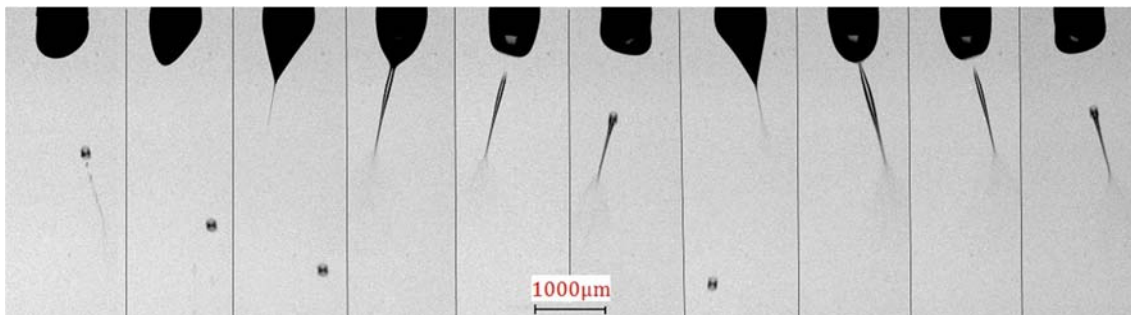


Fig. 8 Different stages of drop formation in multi-spindle mode, Flow rate= 4 ml/h, Voltage= 4.029kV

شکل 8 مراحل مختلف تشکیل قطره در حالت دوکی شکل چندگانه، دبی سیال 4 ml/h، ولتاژ اعمالی 4.029kV

6-3- حالت جت منحرف

این حالت معمولاً در ولتاژهای بالا که در پژوهش حاضر تقریباً بالاتر از 5kV

است، رخ می‌دهد. در این حالت یک مخروطی از مایع ایجاد می‌شود که از انتهای این مخروط جت تقریباً نازکی با قطر تقریبی 20 تا 30 میکرون گسیل می‌گردد. قطر جت با افزایش دبی یا ولتاژ تغییر می‌یابد. این مخروط و جت ایجاد شده هر دو داخل یک فضای مخروط مانند حول راستای سوزن می‌چرخند و این چرخش با سرعت بسیار بالا انجام می‌گیرد. در پژوهش فعلی مشاهده شد که در ولتاژهای بالا سرعت دوران جت در این حالت به 400 هرتز می‌رسد. از قطر جتی که در انتهای مخروط ایجاد می‌گردد با پیشروی در طول کاسته می‌شود. همچنین قطر این جت با افزایش ولتاژ کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که این جت در انتها توسط ناپایداری کینک به قطرات بسیار ریزی می‌شکند. همچنین این جت با تغییر جهت و حرکات دورانی‌ای که دارد به علت اثرات اینرسی بعضاً از مخروط جدا شده و جت جدیدی جایگزین آن می‌گردد. جدایش این جت سبب تبدیل شدن آن به قطرات 100 تا 500 میکرونی می‌شود.

با علم به این که جت گسیل شده از انتهای مخروط منقاره به سمت بیرون صفحه و قطرات به سمت داخل صفحه تمایل دارند به تحلیل "شکل 12" که در فضای سه بعدی نیروهای وارد بر منقاره را به تصویر می‌کشد، پرداخته می‌شود. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، نیروی گرانش به سمت مرکز زمین بوده و نیروی الکتریکی هم جهت خطوط میدان می‌باشد. جهت نیروی ناشی از لزجت هم در مخالفت با کشیده شدن منقاره خواهد بود و نیروی اینرسی همواره در جهت حرکت توده سیال می‌باشد. نیروی القایی ناشی از حرکت ذرات باردار نیز طبق قاعده دست راست مشخص شده است. همچنین به علت چرخش جت حول محول سوزن و انتهای جت حول خود نیروی گریز از مرکزی مطابق جهت نشان داده شده به جت وارد می‌گردد که خود عامل شکست جت به قطرات بسیار ریز می‌گردد. اما دلیل اصلی چرخش جت را می‌توان به نیروی ناشی از بار هم نام ذرات و قطرات موجود در هوا و جهت آن مربوط دانست. در این حالت پاشش قطرات ناشی از شکست جت بسیار زیر

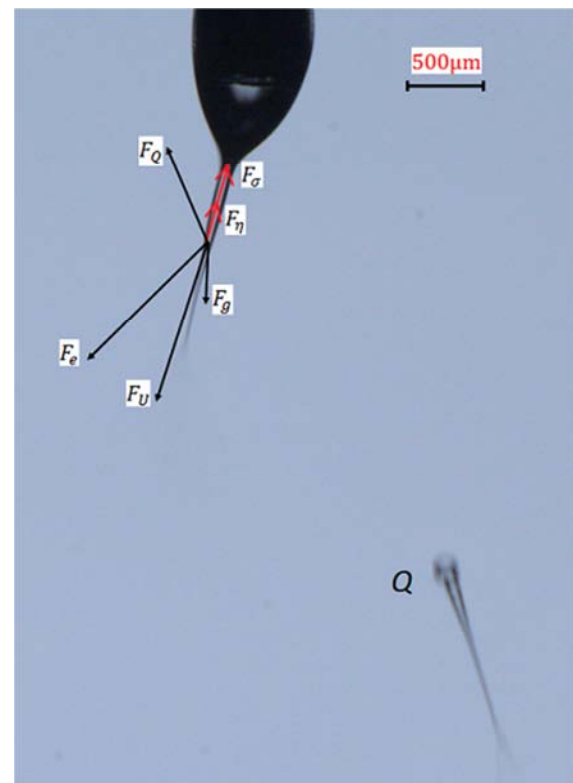


Fig. 9 Schematic representation of forces on liquid meniscus in the multi-spindle mode, Flowrate= 4 ml/h, Voltage= 4.029kV

شکل 9 شماتیک نیروهای وارد بر منقاره‌ی مایع در حالت دوکی شکل چندگانه، دبی سیال 4 ml/h، ولتاژ اعمالی 4.029kV

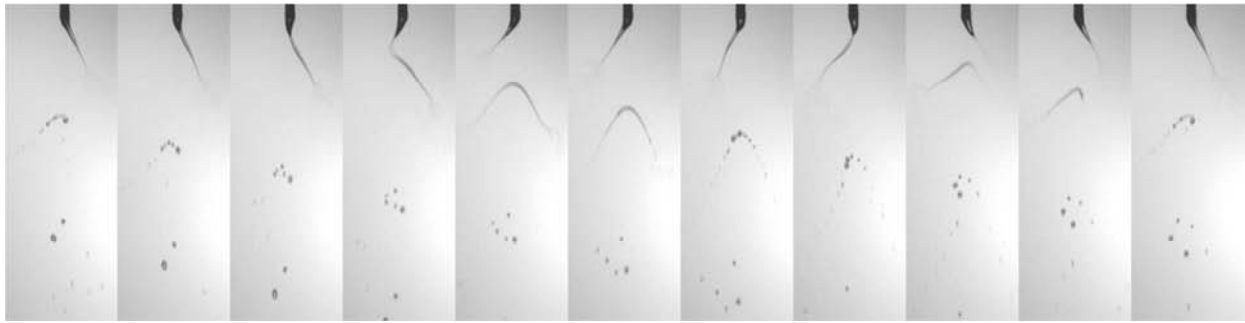


Fig. 10 One period of jet formation in oscillating jet mode, Flow rate= 4 ml/h, Voltage= 4.029kV, Frame Rate=1000, Exposure= 95 μ s

شکل 10 یک دوره از فرآیند تشکیل جت در حالت جت نوسانی، دبی سیال 4 ml/h، ولتاژ اعمالی 4.029kV، تعداد عکس در ثانیه=1000، زمان نوردهی 95 μ s

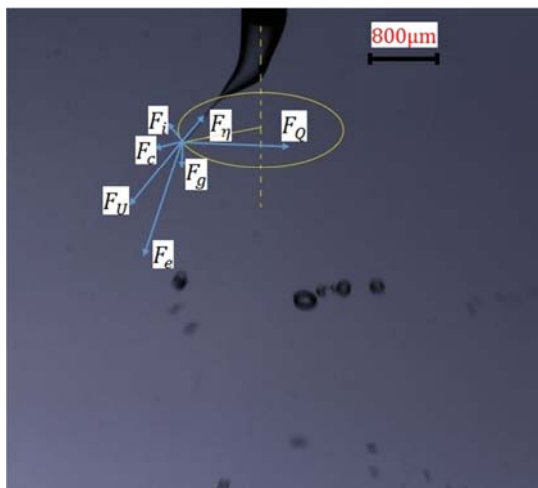


Fig. 12 Schematic representation of forces on liquid meniscus in the precession mode, Flowrate= 50 ml/h, Voltage= 6.07kV

شکل 12 نیروهای وارد بر منقاره‌ی مایع در حالت جت منحرف به صورت شماتیک، دبی سیال 50 ml/h، ولتاژ اعمالی 6.07kV

و عمده‌ی مقالات موجود در این بحث نیز به بررسی ویژگی‌های مختلف این حالت از مایع می‌پردازد. در این حالت که در محدوده‌ی بسیار محدودی از دبی و ولتاژ رخ می‌دهد و معمولاً در دبی‌های خیلی کم نسبت به سایر حالت‌ها ایجاد می‌شود، منقاره‌ی مایع در خروجی سوزن شکل مخروطی مانندی به خود می‌گیرد و از انتهای این مخروط جت بسیار نازکی گسیل می‌شود که قطر آن معمولاً برای مایعات مختلف زیر 100 میکرون می‌باشد. جت حاصل می‌تواند خود به دو روش ریلی یا کینک [26] بشکند که این شکست موجب تولید قطرات بسیار ریزی می‌شوند که معمولاً دارای توزیع یکنواخت می‌باشند که این توزیع باعث پرکاربرد شدن حالت جت مخروطی شده است. لازم به ذکر است که دیواره‌های مخروط حاصل می‌توانند به صورت خط مستقیم، محدب یا مقعر باشند. برای تشکیل این حالت کافیست مایع مورد استفاده دارای رسانایی محدود باشد تا با عبور خطوط میدان از خود، سبب ایجاد تعادل استاتیکی نیروها در سطح منقاره‌ی مایع شده و جت بسیار نازکی را به سمت پایین شتاب دهد. از عوامل تاثیرگذار بر طول جت ایجاد شده در حالت جت مخروطی لزجت، رسانایی ویژه مایع و دبی جریان می‌باشند. در کار حاضر به علت ثابت بودن تمامی پارامترهای مذکور جز دبی مایع، طول جت با افزایش دبی جریان زیاد می‌شود. بعلاوه قطر جت گسیل شده که خود تعیین‌کننده قطر قطره‌های حاصل از شکست می‌باشد تابع رسانایی الکتریکی و دبی سیال است که به علت ثابت بودن مایع افزایش دبی منجر به افزایش قطر جت می‌شود. "شکل 13" این مورد را با دو

بوده و گاهی اوقات به چند ده میکرون می‌رسند و به سبب همین وزن کم دیرتر به الکترود متصل به زمین می‌رسند. این اتفاق باعث شده ابری از قطرات ایجاد شود که با توجه به فاصله خود از جت به آن نیروی دافعه وارد می‌کنند و جت همواره در حال چرخش به سمتی است که نیروی دافعه‌ی بیشتری از آن سمت به جت وارد می‌شود.

7-3- حالت جت مخروطی

پرکاربردترین و جذاب‌ترین حالت در الکترواسپری حالت جت مخروطی است

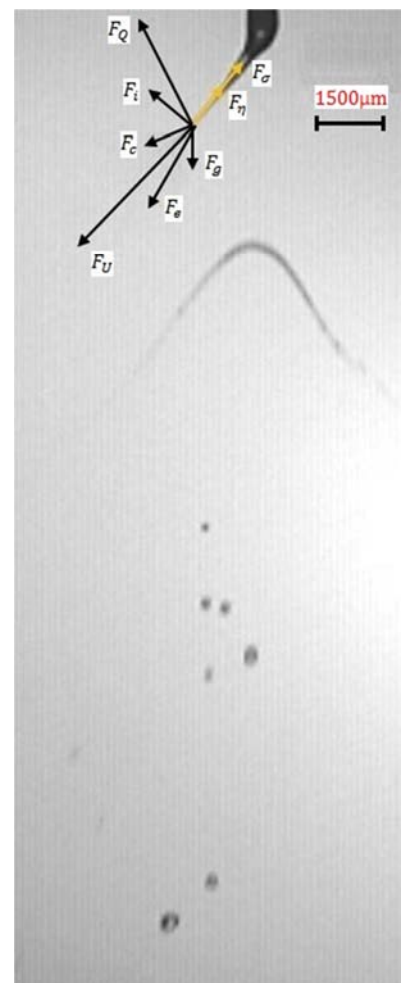


Fig. 11 Schematic representation of forces on liquid meniscus in the oscillating jet mode, Flowrate= 60 ml/h, Voltage= 5.37kV

شکل 11 نیروهای وارد بر منقاره‌ی مایع در حالت جت نوسانی به صورت شماتیک، دبی سیال 60 ml/h، ولتاژ اعمالی 5.37kV

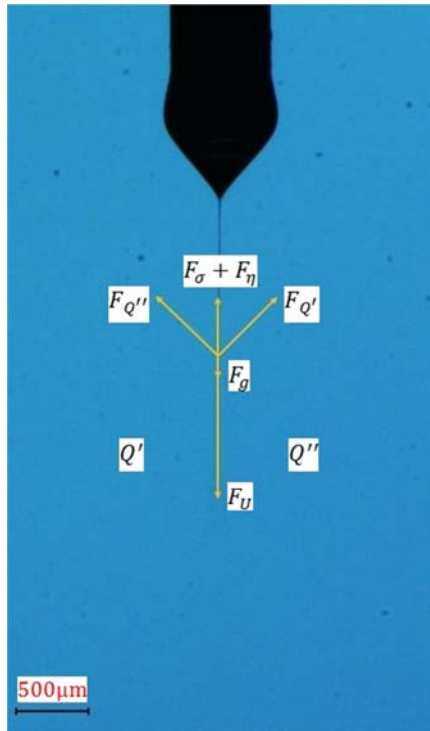


Fig. 14 Schematic representation of forces on the liquid jet in the cone jet mode, Flowrate= 1.6 ml/h, Voltage= 4.53kV

شکل 14 طرحواره‌ی نیروی وارد بر جت مایع در حالت جت مخروطی، دبی سیال 1.6 ml/h، ولتاژ اعمالی 4.53kV

مطلبی که کلایپو [9] ذکر کرد حالت جت چندگانه معمولاً در دبی‌های نسبتاً زیاد نیز با افزایش ولتاژ پدیدار خواهد شد. در این حالت با افزایش ولتاژ تعداد جت‌های گسیل دهنده مایع افزایش می‌یابد و قطر جت‌های گسیل دهنده کاهش می‌یابد. این حالت نیز مانند جت مخروطی دارای توزیع دوگانه قطرات می‌باشد.

در دبی‌هایی که هم حالت جت مخروطی و هم حالت جت چندگانه ایجاد می‌شود، در حالت جت چندگانه قطر قطرات حاصل از شکست جت‌ها کوچک‌تر و همچنین فرکانس شکست قطرات بیشتر از حالت جت مخروطی است که به نوعی نشان دهنده‌ی برتری بازدهی این حالت نسبت به حالت جت مخروطی است [8]. اما به این سبب که عمدتاً ناپایدار می‌باشد مانند حالت جت مخروطی پرکاربرد نمی‌باشد.

"شکل 15" نیروهای وارد بر یکی از جت‌های تشکیل دهنده‌ی این حالت را در یک فضای سه‌بعدی به تصویر می‌کشد، همان‌طور که انتظار می‌رود نیروی گرانش به سمت زمین بوده و نیروی اینرسی در جهت حرکت جت می‌باشد، همچنین مولفه‌ی افقی نیروی ناشی از بار قطرات موجود در محیط اطراف و همین‌طور سایر جت‌های موجود بر روی جت مورد نظر اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند، ولی برآیند مولفه‌ی عمودی این نیرو به سمت بیرون صفحه خواهد بود. بنابراین جت مورد بررسی در جهت برآیند این سه نیرو منحرف می‌شود.

9-3- جت ساده و جت منشعب

هنگامی که سرعت خروج مایع از سوزن که تعیین‌کننده‌ی انرژی جنبشی آن است از انرژی سطحی مایع بیشتر شود به جای آن که سیال به صورت قطره قطره خارج شود، به صورت یک جت پیوسته خارج می‌گردد که در پایین دست به علت ناپایداری‌ها به قطراتی می‌شکند. به کمترین دبی که در آن جت

روش عکس‌برداری سایه نگاری و پراکنش نور به تصویر می‌کشد. لازم به ذکر است برای رویت جت بسیار نازک و افزایش وضوح تصویر روی قسمت a پردازش تصویر انجام شده و دلیل رنگ پشت زمینه‌ی متفاوت نیز همین مساله می‌باشد.

جت مخروطی مطابق "شکل 13" قسمت b دارای توزیع دوگانه قطرات می‌باشد که این دوگانگی به صورت دو لایه با رنگ متفاوت در شکل مشخص شده است. دلیل این پدیده این است که قطرات ریزتر پس از شکست به علت وزن کمتر تحت تاثیر نیروی ناشی از بار هم نام سایر قطرات بیشتر از محور تزریق جت منحرف می‌شوند. بدین ترتیب در لایه‌ی داخلی ذرات درشت‌تر و در لایه‌ی خارجی ذرات ریزتر توزیع می‌شوند. بنابراین لایه داخلی دارای چگالی بیشتری نسبت به لایه خارجی می‌باشد. با زیاد شدن ولتاژ اعمالی به علت افزایش نیروی الکتریکی انتهای مخروط به سمت بالا و نزدیکی به سوزن تمایل پیدا می‌کند. همچنین گاهی اوقات نوک مخروط و جت گسیل شده از آن به علت نیروهای ناشی از ابر قطرات، اندکی از محور تزریق سوزن منحرف می‌شود. دلیل پیدایش این حالت ایجاد تعادل بین نیروهای وارده بر منقاره و جت مایع می‌باشد که در "شکل 14" به تصویر کشیده شده است.

همان‌طور که در "شکل 14" دیده می‌شود، نیروی گرانش به سمت پایین بوده و نیروی اینرسی نیز در جهت حرکت جت و مشابه‌ی آن به سمت پایین می‌باشد. نیروهای ناشی از کشش سطحی و لزجت نیز با کشیده شدن مایع به سمت پایین مخالفت می‌کنند. اما آن نیرویی که ناشی از عدم تعادل منقاره‌ی مایع در حالت‌های قبلی بود، یعنی نیروی ناشی از بار هم نام قطرات قبلی جدا شده، این بار به علت تقارن ابر قطرات کاملاً اثر یکدیگر را خنثی کرده و با هم در تعادل می‌باشند. پس به بیان ساده‌تر می‌توان گفت که در حالت جت مخروطی تمامی نیروها با یکدیگر در تعادل استاتیکی بوده و باعث پایداری کامل این حالت از پاشش می‌شوند.

8-3- حالت جت چندگانه

با افزایش ولتاژ اعمالی حالت جت مخروطی تبدیل به حالت جت چندگانه می‌شود. بدین طریق که مخروط موجود در حالت جت مخروطی که به سبب افزایش ولتاژ منحرف شده بود به دو یا سه جت متقارن ناپایدار تبدیل می‌شود. در این حالت منقاره‌ی مایع کاملاً هم سطح سوزن شده و فقط مخروط‌های بسیار کوچکی روی لبه‌های خروجی سوزن ایجاد می‌شود که جت‌های نازکی از آن گسیل پیدا می‌کنند. حالت جت چندگانه در ابتدا ناپایدار بوده و رفته رفته با افزایش ولتاژ شکل پایداری به خود می‌گیرد. این حالت محدود به دبی‌هایی که در آن جت مخروطی داریم نبوده و بر خلاف



Fig. 13 Cone jet mode, (a): from shadowgraph, (b): from light scattering, Flowrate= 2 ml/h, Voltage= 4.63kV

شکل 13 حالت جت مخروطی، (a): حاصل سایه نگاری، (b): حاصل عکس برداری به روش پخش نور، دبی سیال 2 ml/h، ولتاژ اعمالی 4.63kV

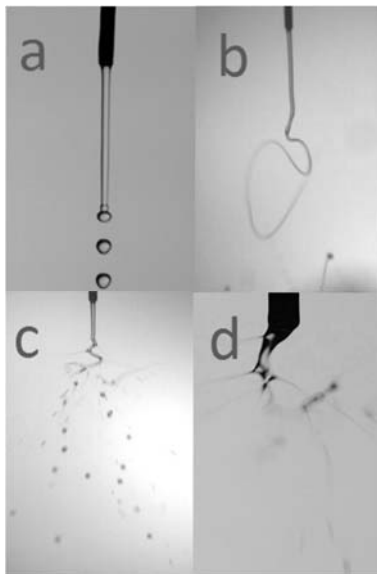


Fig. 16 The other modes, Flowrate= 250 ml/h, (a): Simple jet, Voltage= 3.92kV, (2): Oscillating simple jet, Voltage= 6.01kV, (c) Ramified jet, Voltage= 9.66kV, Random spray, Voltage= 12.81kV.

شکل 16 سایر حالت‌های پاشش، دبی سیال 250 ml/h، ولتاژ اعمالی 3.92kV، (b): جت ساده نوسانی، ولتاژ اعمالی 6.01kV، (c): جت منشعب، ولتاژ اعمالی 9.66kV، (d): پاشش تصادفی، ولتاژ اعمالی 12.81kV.

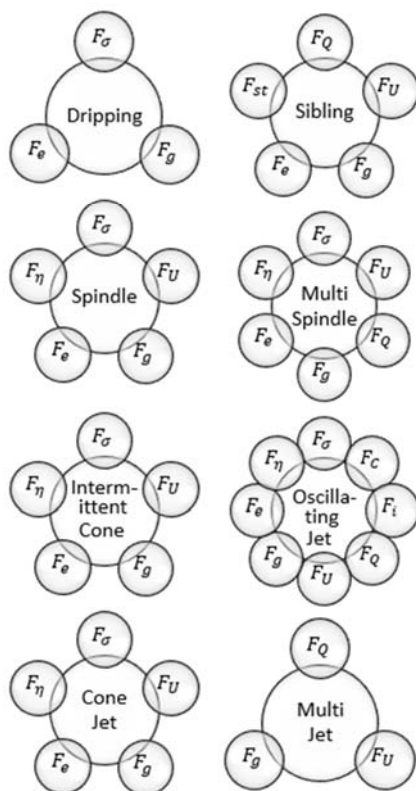


Fig. 17 Schematic representation of the most important forces for each mode shapes

شکل 17 شماتیک مهمترین نیروهای وارد بر هر حالت پاشش الکترواسپری

مفصل اشاره شد، مطابق شکل در تمامی دبی‌ها قبل از رسیدن به دبی‌های نزدیک به دبی بحرانی و تقریباً تا ولتاژ 2.5kV شاهد حالت چکیدن ساده خواهیم بود. رفته رفته با افزایش ولتاژ حالت چکیدن با باریکه‌ای همراه می‌شود که این باریکه تبدیل به قطره یا قطرات ریزی شده که حالت چکیدن

پیوسته مایع از نازل خارج می‌شود دبی بحرانی می‌گویند. در پژوهش حاضر دبی بحرانی 280 ml/h اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است عدد 21.6 ml/h برای نازلی با قطر 0.12mm به عنوان دبی بحرانی برای اتانول گزارش شده [9] که با توجه به قطر 5 برابری نازل مورد استفاده در مقاله حاضر عدد معقولی است. گاهی اوقات در دبی‌هایی کمتر از دبی بحرانی مایع هم مانند "شکل 16" در دبی 250 ml/h برای پژوهش حاضر با افزایش ولتاژ می‌توان یک جت پیوسته را در خروجی مشاهده کرد. شکست جت مایع در این حالت سبب تولید قطره‌های اصلی و قطره‌های ماهواره‌ای می‌شود. به این حالت مطابق "شکل 16" قسمت a جت ساده نامیده می‌شود. رفته رفته با افزایش ولتاژ اعمالی، انتهای جت قبل از شکست شروع به حرکت شلاقی می‌نماید که سازوکار شکست مایع را تغییر می‌دهد. این حالت که در "شکل 16" قسمت b آمده است نیز در مجموعه‌ی حالت جت ساده قرار می‌گیرد و می‌توان آن را جت ساده نوسانی نامید. در ادامه با افزایش ولتاژ اعمالی طول جت کاهش پیدا کرده و به حالتی تبدیل می‌گردد که از انتهای آن چندین جت کوچک منشعب می‌شوند و از هر یک از جت‌های منشعب قطرات به نسبت ریزتری گسیل می‌شود. این حالت از پاشش را که حالت جت منشعب می‌نامند در "شکل 16" قسمت c آورده شده است. گاهی اوقات نیز مطابق "شکل 16" قسمت d در ولتاژهای بسیار بالا ممکن است جت در خروجی سوزن تحت تاثیر نیروهای مختلف ناپایدار شود و به اشکال کاملاً تصادفی‌ای بشکند که از قاعده‌ی خاصی پیروی نمی‌کند.

در پیدایش حالت‌های مختلف الکترواسپری نیروهای متفاوتی درگیرند که به طور مفصل مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی می‌توان گفت غلبه‌ی نیروهایی به سایر نیروهای تاثیرگذار و یا تعادل نیروها عامل پیدایش و ایجاد حالت‌های مختلف هستند. بنابراین با توجه به اهمیت نیروها در "شکل 17" مهمترین نیروهای وارد بر هر حالت به صورت شماتیک آورده شده است.

4- نمودار ولتاژ بر حسب دبی

در "شکل 18" محدوده‌ی ایجاد حالت‌های مختلف معرفی شده در این مقاله در صفحه دبی-ولتاژ نشان داده شده است. این نمودار برای تغییرات دبی در بازه 0 تا 80 میلی‌لیتر بر ساعت رسم گردیده است. همان‌طور که قبلاً به طور

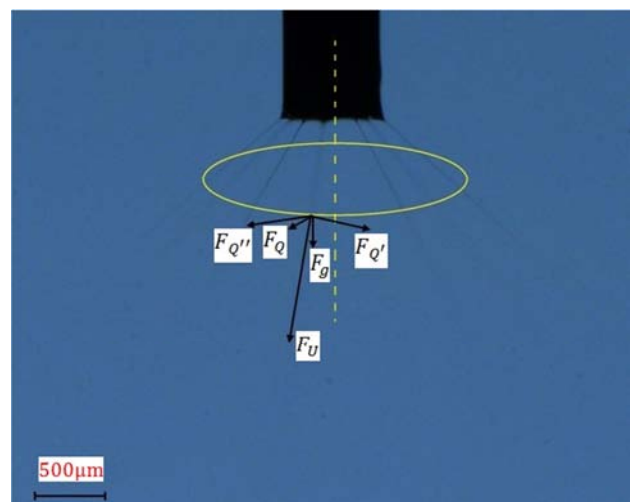


Fig. 15 Schematic representation of forces on the one liquid jet in the multi-jet mode, Flowrate= 1.6 ml/h, Voltage= 4.53kV

شکل 15 نیروهای وارد بر یک جت مایع در حالت جت چندگانه به صورت شماتیک، دبی سیال 1.6 ml/h، ولتاژ اعمالی 4.53kV

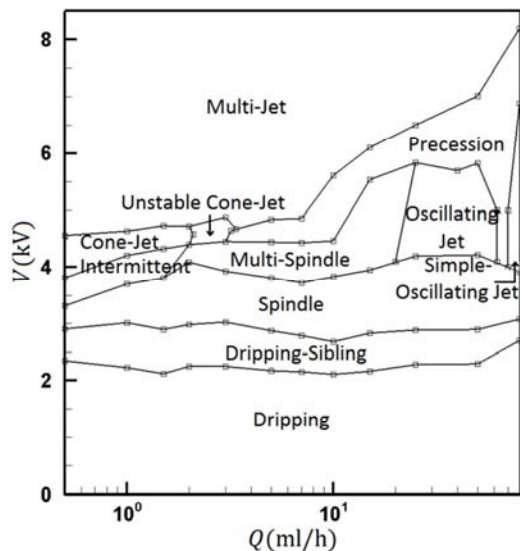


Fig. 18 The operating ranges of different spraying modes for ethanol
 شکل 18 دامنه‌ی عملیاتی مدهای مختلف الکترواسپری برای اتانول

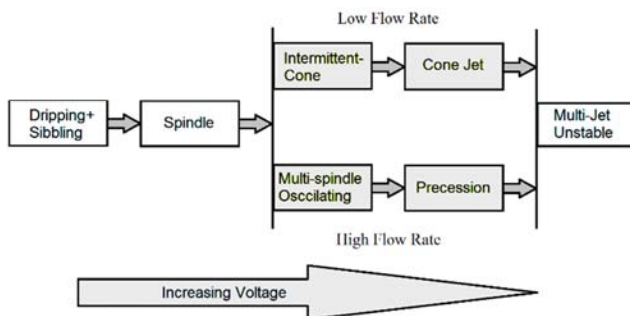


Fig. 19 Flow chart of spray mode in electric field
 شکل 19 چارت تغییرات حالت‌های الکترواسپری داخل میدان الکتریکی

شد. حالت دوکی شکل در دبی‌های کوچکتر از دو میلی‌لیتر بر ساعت با افزایش ولتاژ حالت جت متناوب و جت مخروطی و در دبی‌های بزرگتر از آن به حالت‌های جت نوسانی و انحراف از مسیر تبدیل می‌شود و نهایتاً تمامی حالت‌ها به حالت جت چندگانه ختم می‌گردند که کلیه‌ی این روند مطابق با انتظارات می‌باشد.

6- مراجع

- [1] D. Chen, D. Y. H. Pui, S. L. Kaufman, Electro spraying of conducting liquids for monodisperse aerosol generation in the 4 nm to 1.8 μm diameter range, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 26, No. 6, pp. 963-977, 1995.
- [2] F. R. S. Rayleigh, On the equilibrium of liquid conducting masses charged with electricity, *Philosophical Magazine Series 5*, Vol. 14, No. 87, pp. 184-186, 1882.
- [3] M. Agathou, J. Powell, C. Lee, D. Kyritsis, Preliminary experimental study of butanol electro sprays for power generation, *SAE Technical Paper*, Capri, Italy, September 16-20, No. 2007-24-0020, 2007.
- [4] Y. Gan, Z. Luo, Y. Cheng, J. Xu, The electro-spraying characteristics of ethanol for application in a small-scale combustor under combined electric field, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 87, pp. 595-604, 2015.
- [5] P. Kebarle, A brief overview of the present status of the mechanisms involved in electrospray mass spectrometry, *Journal of Mass Spectrometry*, Vol. 35, No. 7, pp. 804-817, 2000.
- [6] M. Yu, K. H. Ahn, S. J. Lee, Design optimization of ink in electrohydrodynamic jet printing: Effect of viscoelasticity on the formation of Taylor cone jet, *Materials and Design*, Vol. 89, pp. 109-115, 2016.
- [7] J. Zeleny, Electrical discharge from liquid points, *The Physical Review*, Vol. 3, No. 2, pp. 69-91, 1914.
- [8] M. Cloupeau, B. Prunet-Foch, Electrostatic spraying of liquids: main functioning modes, *Journal of Electrostatics*, Vol. 25, No. 2, pp. 165-184,

ساده را تبدیل به حالت خاصی از آن یعنی سیلینگ می‌کند و تقریباً تا ولتاژ 3kV ادامه می‌یابد. با افزایش ولتاژ اعمالی تا 4kV حالت دوکی شکل ساده پدیدار می‌شود. سپس با افزایش ولتاژ در دبی‌های کمتر از 2 ml/h، حالت دوکی شکل تبدیل به حالت مخروط متناوب و سپس جت مخروطی می‌شود. گاهی اوقات به علت عدم تعادل لحظه‌ای نیروها ممکن است در ولتاژها و دبی‌های اطراف ناحیه‌ی جت مخروطی حالت جت مخروطی ناپایدار را شاهد باشیم. در دبی‌های به نسبت بالاتر از 2 ml/h با افزایش ولتاژ حالت دوکی شکل تبدیل به حالت‌های نوسانی نظیر دوکی شکل چندگانه و یا جت نوسانی می‌شود که معمولاً این دو حالت در برخی نواحی با هم هم‌پوشانی دارند. با افزایش ولتاژ اعمالی یعنی تقریباً تا 5kV، این دو حالت به حالت جت منحرف تبدیل می‌گردند. در نهایت نیز همه‌ی حالت‌های الکترواسپری تبدیل به حالت جت چندگانه ناپایدار یا پایدار شده که این حالت نیز خود توسط تخلیه‌ی الکتریکی گاز اطراف محدود می‌شود. در دبی‌های خیلی بالا که در پژوهش حاضر 70 ml/h است نیز به سبب افزایش انرژی جنبشی مایع عمدتاً اشکال جت ساده را خواهیم داشت که گاهی اوقات تبدیل به رفتار تصادفی و غیرقابل پیش‌بینی می‌گردد که در بخش‌های پیش به آن پرداخته شد.

نمودار "شکل 18" برای اولین بار برای مایع اتانول، به عنوان یک سوخت پرکاربرد و پاک، رسم گردید. محدوده‌ی پایداری حالت‌های مختلف الکترواسپری پیش از این برای مایعات دیگر گزارش شده است [16,11] که الگوی کیفی مشابهی را نشان می‌دهند. در پژوهش حاضر نخستین بار حالت‌های تزریق الکترواستاتیکی اتانول در محدوده وسیعی از دبی و ولتاژ بررسی و گزارش شده است.

5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در کار حاضر حالت‌های مختلف الکترواسپری براساس شکل منقاره‌ی مایع و نوع شکست جت گسیل شده از آن در داخل میدان الکتریکی تعریف گردید. همچنین حالت‌های مختلف از جهت نیروهای وارد بر منقاره‌ی مایع مورد بررسی قرار گرفتند و کمبودهای مقالات مختلف در توضیح چگونگی اعمال نیروها اصلاح گردید و تصاویر هر یک از حالت‌های پاشش ارائه شد. در نهایت نیز نمودار دبی برحسب ولتاژ برای مایع اتانول در دامنه‌ی وسیعی از دبی و ولتاژ اعمالی رسم گردید که در ادبیات منتشر شده پیشین موجود نبود. براساس این نمودار روند شکل‌گیری حالت‌های مختلف الکترواسپری در دبی‌های کمتر از دبی بحرانی را می‌توان به صورت "شکل 19" نشان داد.

در این پژوهش دریافت می‌شود نیروهای مختلفی بر ایجاد حالت‌های مختلف ناشی از الکترواسپری دخیل هستند که با غلبه بر یکدیگر حالت‌های مختلف را ایجاد می‌کنند، این حالت‌ها عبارت از چکیدن ساده، هم‌نژاد، دوکی شکل ساده و چندگانه، مخروط متناوب، جت نوسانی، انحراف از مسیر، جت مخروطی، و جت چندگانه هستند. لازم به ذکر است که تمامی نیروها در حالت جت مخروطی به تعادل رسیده و قطرات بسیار ریز با توزیع قطر یکسان را ایجاد می‌کنند. به علاوه در یک دبی ثابت، افزایش ولتاژ باعث تولید قطرات با قطر کمتر می‌شود.

لازم به ذکر است در حالت چکیدن نشان داده می‌شود که قطر قطره ناشی از اثرات کشش سطحی و تنش‌های الکتریکی است و به صورت خطی با مجموع اثرات این دو رخ می‌دهد.

برای شرایط آزمایشی مقاله‌ی حاضر در تمامی دبی‌ها قبل از رسیدن به دبی بحرانی برای ولتاژهای صفر و نزدیک به آن حالت چکیدن ساده و هم‌نژاد دیده می‌شود که با افزایش ولتاژ تبدیل به حالت دوکی شکل ساده خواهد

- electrohydrodynamic spraying modes of water in air at atmospheric pressure, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 89, No. 11, pp. 26–30, 2015.
- [18] A. D. Duong, S. Sharma, K. J. Peine, G. Gupta, A. R. Satoskar, E. M. Bachelder, B. E. Wyslouzil, K. M. Ainslie, Electrospray encapsulation of toll-like receptor agonist resiquimod in polymer microparticles for the treatment of visceral leishmaniasis, *American Chemical Society*, Vol. 10, No. 3, pp. 1045–1055, 2013.
- [19] *Syringe Pump SP1000*, Accessed on 25 October 2016; <http://www.fnm.ir/sp1000.htm>. (in Persian فارسی)
- [20] *DC High Voltage Probe HVP-40*, Accessed on 25 October 2016; www.pintek.com.tw/files/pintek/HVP-40.pdf.
- [21] *Digital Multimeter Victor 86d*, Accessed on 25 October 2016; <http://www.china-victor.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=42&id=28>.
- [22] *Digital camera Nikon D7100*, Accessed on 25 October 2016; <http://imaging.nikon.com/lineup/dslr/d7100/>.
- [23] *Macro lens AF-S Micro Nikkor 105mm 1: 2.8 Nikon*, Accessed on 25 October 2016; http://imaging.nikon.com/lineup/lens/specialpurpose/micro/af-s_vr_micro-nikkor_105mmf_28_if/.
- [24] N. Ashgriz, *Handbook of Atomization and Sprays*, pp. 727-754, New York: Springer, 2011.
- [25] J. M. López-Herrera, P. Riesco-Chueca, A. M. Gañán-Calvoc, Linear stability analysis of axisymmetric perturbations in imperfectly conducting liquid jets, *Physics of Fluids*, Vol. 17, No. 3, 2005.
- [26] R. P. A. Hartman, D. J. Brunner, D. M. A. Camelot, J. C. M. Marijnissen, B. Scarlett, Jet break-up in electro hydrodynamic atomization in the cone-jet mode, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 31, No. 1, pp. 65-95, 2000.
- 1990.
- [9] M. Cloupeau B. Prunet-Foch, Electrohydrodynamic spraying functioning modes: A critical review, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 25, No. 6, pp. 1021-1036, 1994.
- [10] A. Jaworek, A. Krupa, Generation and characteristics of the precession mode of EHD spraying, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 27, No. 1, pp. 75-82, 1996.
- [11] A. Jaworek, Jet and drops formation in electrohydrodynamic spraying of liquids: A systematic approach, *Experiments in Fluids*, Vol. 27, No.1, pp. 43–52, 1999.
- [12] I. Marginean, L. Parvin, L. Heffernan, A. Vertes, Flexing the electrified meniscus: The birth of a jet in electrosprays, *Analytical Chemistry*, Vol. 76, No. 14, pp. 4202-4207, 2004.
- [13] J. M. Lo'pez-Herrera, A. Barrero, A. Boucard, An experimental study of the electrospraying of water in air at atmospheric pressure, *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, Vol. 15, No. 2, pp. 253–259, 2004.
- [14] S. Verdoold a, L. L. F. Agostinho, C. U. Yurteri, J. C. M. Marijnissen, A generic electrospray classification, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 67, No. 5, pp. 87–103, 2014.
- [15] H. H. Kim, J. HoKim, A. Ogata, Time-resolved high-speed camera observation of electrospray, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 42, No. 4, pp. 249-263, 2011.
- [16] 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, *American Chemical Society*, Vol. 29, No. 44, pp. 13630–13639, 2013.
- [17] I. Park, S. B. Kim, W. S. Hong, S. S. Kim, Classification of