



مطالعه عددی شکل گیری پروفیل مایع در خروجی روزنه موئین تحت تاثیر پتانسیل الکتریکی

هادی دستورانی¹، محمدرضا جهان نما^{2*}، عبدالله اسلامی مجد³

1- دانشجوی دکتری، پژوهشگاه هوافضا، تهران

2- استادیار، پژوهشکده سامانه های حمل و نقل فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران

3- استادیار، مجتمع برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

*تهران، صندوق پستی 13445-754، mjahannama@eri.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 دی 1394

پذیرش: 06 اردیبهشت 1395

ارائه در سایت: 16 خرداد 1395

کلید واژگان:

الکترواسپری

پتانسیل الکتریکی

دبی حجمی

شبیه سازی عددی

مخروط - جت

چکیده

الکترواسپری شاخه ای از حوزه علمی الکتروهایدرونامیک محسوب می شود که بر باردارسازی الکتریکی مایعات استوار است. معادلات حاکم بر فرآیند الکترواسپری ترکیبی از معادلات هیدرونامیک و الکترواستاتیک است که ورود معادلات گسست مایع به آن مجموعه بر پیچیدگی آن ها می افزاید. در این تحقیق با تدوین یک حل گر الکترواسپری به شبیه سازی فرآیند الکترواسپری در حالت گذرا مبادرت شده است. این شبیه سازی بر روی پیکربندی امیتر (روزنه موئین) - دیسک برای مایع رسانای الکتریکی هپتان در مقادیر مختلف پتانسیل الکتریکی صورت گرفته است. در این راستا، علاوه بر ارزیابی توانایی حل گر ایجاد شده در شبیه سازی فرآیند الکترواسپری (اعتبارسنجی و صحت گذاری نتایج با سایر نتایج تجربی و عددی)، تاثیر پتانسیل الکتریکی بر چگونگی شکل گیری فرآیند الکترواسپری مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق نتایج شبیه سازی، افزایش پتانسیل الکتریکی از سطح کمی 3500V به 6500V به وضوح شکل گیری مودهای مختلفی از الکترواسپری را به نمایش می گذارد. این مودها به ترتیب حالت های میکروچکیدن، دوکی، مخروط - جت تناوبی و مخروط - جت پایدار را در بر می گیرند. نتایج همچنین نشان می دهند که جریانی گردابه ای در داخل مخروط مایع در خروج از امیتر شکل می گیرد که ابعاد آن با افزایش پتانسیل الکتریکی کاهش می یابد. هر چند ازدیاد پتانسیل الکتریکی با تقویت باردارسازی الکتریکی موجب افزایش بیشینه ی مقادیر میدان الکتریکی و سرعت مایع می شود ولی در عین حال تجمع بار الکتریکی در تمامی حالات و مستقل از سطح کمی پتانسیل الکتریکی در سطح محیطی جریان مایع که موید رسانایی الکتریکی آن است، به وقوع می پیوندد.

Numerical Study on Formation of Liquid Flow Emerging from a Capillary Emitter due to Electric Potential Effects

Hadi Dastourani¹, Mohammad Reza Jahannama^{2*}, Abdollah Eslami Majd

1- Aerospace Research Institute, Tehran, Iran

2- Space Transportation Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

3- Electrical and Electronics Department, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

*P.O.B. 13445-754, Tehran, Iran, mjahannama@eri.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 31 December 2015

Accepted 25 April 2016

Available Online 05 June 2016

Keywords:

Cone-Jet mode

Electrospray

Electric potential

Flow rate

Numerical simulation

ABSTRACT

Electrospray is a branch of the scientific area of electrohydrodynamics which is based on electrical charging of liquids. The electrospray governing equations are a combination of hydrodynamic and electrostatic equations to which the addition of liquid breakup process escalates their complexity. This research work aims at developing a numerical solver to simulate the electrospray process in an emitter-disc configuration using Heptane as a working liquid under various electrical potentials. The simulation results in comparison with CFD and experimental data show good agreement both quantitatively and qualitatively. The results clearly have captured the formation of liquid flow profiles at the emitter exit, demonstrating various electrospray modes. These modes initiate a microdripping mode at the lowest voltage, i.e. 3.5kV, prompting consecutively to spindle and pulsating cone-jet modes and ending in a stable cone-jet mode at the highest charging voltage, i.e. 6.5kV. In addition, it is also observed that the liquid cone and the vortex shaped within it would shrink as an increase in the electric potential is imposed. Although the increase in electric potential results in rise of the maximum magnitudes of electric field and velocity, the electric charge accumulation at all electric potential values occurs on the outer surface of the liquid flow, implying its electrical conductivity.

Please cite this article using:

H. Dastourani, M. R. Jahannama, A. Eslami Majd, Numerical Study on Formation of Liquid Flow Emerging from a Capillary Emitter due to Electric Potential Effects, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp. 367-378, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Dastourani, M. R. Jahannama, A. Eslami Majd, Numerical Study on Formation of Liquid Flow Emerging from a Capillary Emitter due to Electric Potential Effects, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp. 367-378, 2016 (in Persian)

1- مقدمه

(مشمول بر معادلات بقا جرم و ممنتوم) می‌باشد. در این راستا، برای بررسی فرآیند الکترواسپری استفاده همزمان از دو مجموعه معادلات حاکم ضروری است. مجموعه‌ی نخست برای تحلیل میدان هیدرودینامیکی جریان دوفازی شامل معادلات پیوستگی و ممنتوم به همراه روشی برای ردگیری سطح مشترک دوفاز می‌باشد. مجموعه‌ی دوم جهت بررسی تأثیرات ناشی از میدان الکتریکی، معادله پواسون برای تعیین توزیع پتانسیل الکتریکی و معادله بقا بار الکتریکی را در بر می‌گیرد. ترکیب این دو مجموعه از معادلات که از دو مبنای فیزیکی مختلف نشات می‌گیرند موجب پیچیدگی زیاد در روش‌های عددی مورد استفاده برای دست یابی به دریافتی جامع از پدیده‌های موجود در فرآیند الکترواسپری گردیده است. از اینرو موضوع شبیه‌سازی عددی فرآیند الکترواسپری هم اکنون به عنوان یک زمینه‌ی فعال در بین محققین این حوزه به حساب می‌آید.

آغاز شبیه‌سازی عددی نظام‌مند در زمینه‌ی جت مایع در شرایط بارداری الکتریکی را می‌توان از اواسط دهه‌ی نود میلادی شاهد بود. مدل‌های عددی اولیه برای شبیه‌سازی جت باردار با الگوگیری از مدل‌های ارائه شده برای جت‌های مایع بدون بار الکتریکی به وجود آمدند [19, 20]. در این راستا، کار پانتانو و همکارانش را می‌توان یکی از اولین مدل‌هایی برشمرد که در حالت متقارن محوری و بر پایه‌ی روش نوسانات کوچک به بررسی شکل‌گیری پروفیل محدب مایع در خروجی از یک روزنه‌ی موئین در ولتاژهای مختلف می‌پردازد [21]. البته این کار مبتنی بر رویکردی الکترواسپری است که حل مساله بوده که خروجی جت از راس پروفیل را در بر نمی‌گیرد.

هارتمن و همکارانش اولین شبیه‌سازی عددی از یک فرآیند مخروط-جت را ارائه کردند. ایشان با فرض جریان متقارن محوری از معادله ناویر-استوکس در حالت یک بعدی برای برقراری تعادل بین نیروها استفاده می‌کنند. این مدل قادر است تخمینی از شکل هندسی مخروط مایع، میدان الکتریکی، چگالی سطحی بار الکتریکی و سرعت مایع در سطح مخروط را به دست دهد [22].

یان و همکارانش مدلی عددی برای شبیه‌سازی پروفیل مخروطی مایع در حالت مخروط-جت ارائه کردند. این مدل را می‌توان در ادامه‌ی توسعه‌ی مدل هارتمن دانست با این تفاوت که در این‌جا معادلات ناویر-استوکس برای جریان مایع و قانون گاوس برای میدان الکتریکی در شرایط متقارن محوری دو بعدی (به جای یک بعدی در کار هارتمن) در دستگاه مختصات استوانه‌ای و به صورت پایا در نظر گرفته شده‌اند. این مدل قادر به محاسبه‌ی شکل مخروط مایع و جت خروجی از آن، میدان سرعت در داخل مایع، میدان الکتریکی داخل و خارج مایع و چگالی بار الکتریکی در سطح مایع است [23]. کارترو و مارتینز-سانچز به شبیه‌سازی عددی فرآیند مخروط-جت در رانشگر الکترواسپری پرداختند. شبیه‌سازی عددی مذکور ناحیه‌ی شکل‌گیری مخروط-جت را شامل شده و فرآیند تولید ریزقطرات را شامل نمی‌شود. ایشان برای توصیف شکل‌گیری مخروط-جت از معادلات متقارن محوری شبه یک بعدی ناویر-استوکس مختصات کروی استفاده کردند [24, 25].

لیم و همکارانش یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی برای بررسی عددی فرآیند امیزاسیون الکترواسپری در این زمینه ارائه نمودند. در این مدل معادلات ناویر-استوکس و پیوستگی برای جریان مایع و پواسون برای میدان الکتریکی در حالت متقارن محوری دو بعدی و در حالت ناپایا حل می‌شوند. در تحقیق ایشان چگالی سطحی بار الکتریکی به عنوان ورودی بوده و مقدار آن به روش تخمین و تصحیح انتخاب می‌گردد. به این ترتیب معادله‌ای برای

الکترواسپری را می‌توان شاخه‌ای از علم مکانیک سیالات دانست که به بارداری مایعات و تأثیر نیروهای الکتریکی بر آن‌ها می‌پردازد [1]. در این زمینه، الکترواسپری انشعابی از حوزه‌ی علمی الکترواسپری است که به حساب می‌آید که بر پایه‌ی بارداری الکتریکی مایع، امکان کشش الکترواستاتیکی آن را از یک روزنه‌ی موئین (امیتر) با شکل‌گیری مخروطی از مایع در نوک روزنه موسوم به مخروط تیلور فراهم می‌سازد. استمرار جریان مایع از روزنه منجر به خروج جتی از مایع از راس این مخروط می‌شود که به دنبال خود، وقوع ناپایداری الکترواسپری در سطح جت و نهایتاً گسست و امیزاسیون جت مایع به ریز قطرات را موجب می‌شود. "شکل 1" ساختاری کلی از فرآیند الکترواسپری مشتمل بر بارداری الکتریکی مایع و امیزاسیون آن به ریز قطرات را نشان می‌دهد. فرآیند الکترواسپری در زمینه‌های مختلفی کاربرد دارد که از جمله می‌توان به طیف‌سنجی جرمی [2-4]، الکتروسیسی [5-7]، لایه‌نشانی [8-11] و تولید نیرو در رانشگرهای الکترواسپری [12] اشاره نمود. فرآیند الکترواسپری حالت‌های مختلفی دارد به طوری که با توجه به نوع و خواص فیزیکی مایع، دبی جریان مایع و اختلاف پتانسیل الکتریکی می‌تواند به شکل‌گیری الگوهای مختلفی از اسپری منتهی شود. این حالت‌های مختلف شامل چکیدن، میکروچکیدن، دوکی، دوکی چندگانه، جت نوسانی، گذار، مخروط-جت و جت چندگانه می‌باشند [13-16]، در شکل 2 سعی شده است تا به‌طور خلاصه این وابستگی نشان داده شود. در فرآیند الکترواسپری در حالت مخروط-جت، مایع از انتهای امیتر خارج شده و تحت تأثیر میدان الکتریکی بین الکترودهای امیتر و کشنده قرار می‌گیرد (شکل 1). بر این اساس مایع تحت تأثیر نیروهای الکتریکی و کشش سطحی (بین مایع و هوای اطراف) در خروجی امیتر پروفیلی مخروطی شکل به خود می‌گیرد. با افزایش نیروهای الکتریکی و نهایتاً غلبه‌ی آن‌ها بر کشش سطحی جتی از نوک مخروط ساطع می‌شود که در مجموع ساختار مخروط-جت را شکل می‌دهد. طبق تحقیقات پیشین، حداقل پتانسیل الکتریکی لازم برای شکل‌گیری مخروط-جت طبق رابطه (1) قابل محاسبه است که تحت عنوان ولتاژ شروع شناخته می‌شود [17].

$$\Phi_s = \sqrt{\frac{\gamma d_e}{2\epsilon_0}} \ln\left(\frac{4L}{d_e}\right) \quad (1)$$

در رابطه‌ی اخیر d_e قطر خارجی امیتر، L فاصله نوک امیتر تا الکترودهای کشنده، γ ضریب کشش سطحی در سطح مشترک مایع و گاز و ϵ_0 گذردهی خلاء و برابر با $8.854 \times 10^{-12} \text{ CV}^{-1} \text{ m}^{-1}$ می‌باشد. علاوه بر حداقل پتانسیل الکتریکی لازم برای شکل‌گیری مخروط-جت برای داشتن حالت اسپری مخروط-جت می‌بایستی حداقل دبی لازم نیز مطابق با رابطه (2) تامین گردد [18].

$$Q_{\min} = \frac{\gamma \epsilon_r \epsilon_0}{\rho K} \quad (2)$$

که ρ چگالی، ϵ_r گذردهی نسبی و K هدایت الکتریکی ویژه مایع است. لازم به ذکر است گذردهی نسبی خاصیتی فیزیکی از یک ماده محسوب می‌شود که قابلیت آن ماده را در تمرکز خطوط شار الکتریکی در یک میدان الکتریکی نشان می‌دهد. به عبارت دیگر گذردهی نسبی یک ماده بیانگر نسبت انرژی الکتریکی ذخیره شده در آن ماده در اثر اعمال ولتاژ در مقایسه با حالتی است که به جای آن ماده از خلا استفاده شده باشد. تبیین شکل‌گیری مخروط-جت مایع مستلزم حل معادلات حاکم

الکتریکی در قالب ترم نیروی حجمی به معادله ناویر - استوکس اضافه گردیده است و بنابراین معادله لاپلاس برای تعیین توزیع پتانسیل الکتریکی حل شده است. ذکر این نکته نیز لازم است که در این مدل‌سازی نشانی از به کارگیری بقاء بار الکتریکی مشاهده نمی‌شود [30].

سن و همکارانش شکل‌گیری مخروط - جت برای فرآیند الکترواسپری در طیف‌سنجی جرمی را مورد بررسی قرار دادند و برای این منظور از نرم افزار فلوتری‌دی استفاده کردند [31,32].

وی و همکارانش از نرم‌افزار اپن‌فوم برای شبیه‌سازی فرآیند الکترواسپری در حالت پایا استفاده کردند. ایشان فرآیند الکترواسپری را در حالت مخروط - جت شبیه‌سازی کردند و تاثیر دبی حجمی را روی اندازه‌ی ریزقطرات مورد بررسی قرار دادند. علاوه بر این که در تحقیق ایشان تنها حالت اسپری مخروط - جت شبیه‌سازی شده است، ساده‌سازی‌هایی نیز در معادلات الکتریکی حاکم صورت گرفته است. ایشان نتایج‌شان را با نتایج تجربی مقایسه کردند که حداکثر خطایی در حد 37 درصد گزارش شده است [33].

رحمان‌پور و ابراهیمی شکل‌گیری مخروط - جت را با استفاده از نرم افزار فلونتت شبیه‌سازی نمودند. ایشان شبیه‌سازی را در حالت پایا و متقارن محوری انجام داده و تاثیر دبی مایع را روی قطر جت مورد بررسی قرار دادند [34].

دستورانی و همکارانش از نرم افزار اپن‌فوم برای شبیه‌سازی فرآیند الکترواسپری در حالت گذرا استفاده کردند. ایشان فرآیند الکترواسپری را در حالت مخروط - جت شبیه‌سازی کردند و تاثیر دبی حجمی را روی اندازه‌ی ریزقطرات مورد بررسی قرار دادند. ایشان نتایج‌شان را با نتایج تجربی مقایسه کردند که حداکثر خطایی در حد 7 درصد گزارش شده است [35].

وو و همکارانش شبیه‌سازی سه بعدی برای شکل‌گیری مخروط - جت با استفاده از نرم افزار فلوتری‌دی ارائه کردند. در این کار هدف شبیه‌سازی شکل‌گیری مخروط - جت در پیکربندی روزنه موئین - حلقه با امیتر چند آرایه‌ای (چند روزنه) می‌باشد. آن‌ها برای ساختاری متشکل از دو آرایه و سه آرایه (واقع بر رؤس یک مثلث متوازی الاضلاع) شبیه‌سازی را اجرا کردند. نتایج نشان می‌دهد که مخروط - جت‌ها از محور روزنه منحرف می‌شوند که این انحراف به دلیل وجود دافعه الکتریکی (ناشی از بارداری همانم هر دو جریان مایع) بین آن‌ها به وقوع می‌پیوندد [36].

حیدری‌نژاد و بابایی مشخصه‌های میدان جریان و انتقال جرم در یک کانال مسطح شامل یک حوضچه‌ی آب را در حالت‌های وجود و عدم وجود تاثیر میدان الکتریکی شبیه‌سازی نمودند. ایشان تاثیر اندازه‌ی میدان الکتریکی و عدد رینولدز را بر میزان تبخیر آب بررسی کرده و نتایج حاصل را با نتایج تجربی مقایسه کردند که حاکی از توافق خوب نتایج با یکدیگر و توانایی مناسب روش عددی بکار رفته در پیش‌بینی میدان جریان و انتقال جرم است [37].

در تحقیق حاضر تاثیر پتانسیل الکتریکی در به وجود آمدن حالت‌های مختلف اسپری در حالت گذرا مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور یک حل‌گر در محیط نرم‌افزار متن باز اپن‌فوم توسعه داده شده است. در حل‌گر حاضر ساده‌سازی در معادلات حاکم صورت نگرفته و معادلات به طور کامل حل شده‌اند. پس از ایجاد حل‌گر الکترواسپری از آن برای شبیه‌سازی فرآیند الکترواسپری استفاده شده است و تاثیر پتانسیل الکتریکی در به وجود آمدن حالت‌های مختلف اسپری (نظیر میکروچکیدن، دوکی و مخروط - جت) مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق علاوه بر بررسی تاثیر پتانسیل

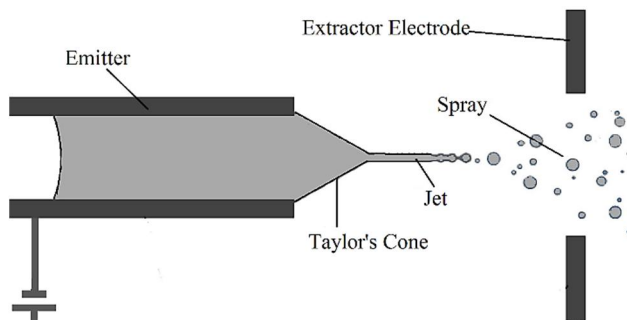


Fig. 1 A general view of electrospay charging and atomization

شکل 1 ساختار کلی باردارسازی و اتمیزاسیون الکترواسپری

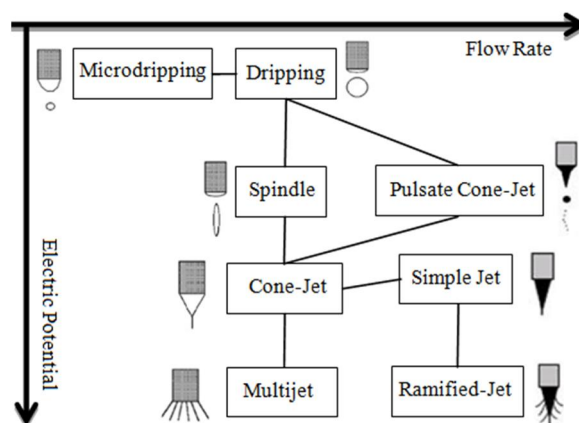


Fig. 2 Formation of various spray modes under the variation of liquid flow rate and electric potential

شکل 2 شکل‌گیری حالت‌های مختلف اسپری در اثر تغییر دبی مایع و پتانسیل الکتریکی

بررسی بقاء بار الکتریکی در بررسی ایشان به کار گرفته نشده است [26]. لویز-هرا و همکارانش یک حل‌گر برای مسائل الکتروهایدرودینامیکی توسعه دادند. این حل‌گر برای استفاده در نرم‌افزار جریس توسعه داده شده است. نرم‌افزار جریس یک نرم‌افزار منبع باز برای شبیه‌سازی جریان‌های دوفازی (با دو سیالی مخلوط نشونده) و تراکم ناپذیر است. بعد از اضافه شدن حل‌گر الکتروهایدرودینامیکی به نرم‌افزار جریس برای ارزیابی آن چندین مسئله که نتایج تحلیلی آن‌ها موجود است به کار گرفته شده است [27]. در ادامه هرادا و همکارانش مدلی عددی برای شبیه‌سازی الکترواسپری در حالت مخروط - جت و در شرایط پایا ارائه نمودند و نتایج‌شان را با نرم‌افزار جریس مقایسه نمودند [28].

به رغم پژوهش‌هایی که مستقیماً به شبیه‌سازی عددی الکترواسپری پرداخته‌اند، فعالیت‌هایی را نیز می‌توان یافت که با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای تجاری به این امر اقدام نموده‌اند. زنگ و همکارانش برای اولین بار شبیه‌سازی از شکل‌گیری مخروط - جت را در شرایط ناپایا در حالت سه بعدی و با استفاده از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی فلوتری‌دی¹ ارائه نمودند. در این تحقیق شکل‌گیری مخروط - جت و وابستگی جریان الکتریکی و شعاع جت به دبی حجمی مورد بررسی قرار گرفته است [29].

لاستاو و بلاچاندرا شکل‌گیری مخروط - جت را با استفاده از نرم افزار تجاری سی اف ایکس² شبیه‌سازی نمودند. در این کار، هدف مدل‌سازی مایع تحت تاثیر میدان الکتریکی بوده است. برای دستیابی به این مقصود، نیروی

¹ FLOW-3D

² CFX

بسیار نازک (به جای منحنی با تغییر ناگهانی) پیرامون سطح مشترک در نظر گرفته می‌شود که خواص فیزیکی به نرمی و به طور پیوسته از یک فاز به فاز دیگر تغییر می‌کند و ضخامت این لایه از مرتبه‌ی شبکه‌بندی محاسباتی (از مرتبه ابعاد سلول) می‌باشد. اگر تابع مشخصه‌ی بیانگر سطح مشترک (در این‌جا لایه نازک سطح مشترک) با پارامتر \tilde{C} مشخص شود، آنگاه بردار عمود بر سطح مشترک به صورت $\vec{n} = \nabla \tilde{C}$ تعریف می‌گردد. به این ترتیب انحنای سطح مشترک و در نتیجه نیروی کشش سطحی قابل محاسبه خواهد بود [39]. تابع مشخصه‌ی مذکور مرتبط با روش ردگیری سطح مشترک می‌باشد که در این تحقیق روش حجم سیال مورد استفاده قرار گرفته است.

2-2- ردگیری سطح مشترک مایع - گاز

در جریان دوفازی سطح مشترک میان دو فاز در حال حرکت است. روش‌های متفاوتی برای ردگیری این سطح مشترک وجود دارد. در این میان، مهم‌ترین و متداول‌ترین روش‌ها برای ردگیری سطح مشترک دوفاز همراه با کشش سطحی را می‌توان روش حجم سیال [40-42] و روش مجموعه‌ی سطح [43-45] دانست که از آن‌ها بیشتر در تحقیقاتی با قدمت زیاد (همچنین در نرم‌افزارهای تجاری) استفاده شده است.

در تحقیق حاضر از روش حجم سیال برای ردگیری سطح مشترک دو فاز استفاده می‌شود. روش حجم سیال مبتنی بر تابع کسر حجمی C است که برای سلولی از سیال مملو از فاز مایع، معادل یک و برای همان سلول در حالتی که مملو از فاز گاز باشد، صفر در نظر گرفته می‌شود و برای سلول‌های چند سیالی در محدوده‌ی $0 < C < 1$ است. تابع کسر حجمی C یک تابع اسکالر است و در حالی که سیال با بردار سرعت \vec{u} حرکت می‌کند، معادله‌ی جابجایی حاکم بر آن در حالت استاندارد به صورت رابطه (8) است [40].

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}C) = 0 \quad (8)$$

در فرمولاسیون جریان دوفازی تراکم‌ناپذیر، معادله بقاء جرم همان معادله بقاء حجم است که بقاء حجم هر سیال یک مزیت مهم در روش حجم سیال به شمار می‌رود [40]. اگر تابع کسر حجمی به عنوان تابع مشخصه‌ی بیانگر سطح مشترک ($\tilde{C} = C$) تعریف گردد، آنگاه $\vec{n} = \nabla \tilde{C}$ خواهد بود و به این ترتیب نیروی کشش سطحی در معادله (4) به صورت رابطه (9) محاسبه می‌گردد،

$$\vec{F}_{ST} = -\gamma \left(\nabla \cdot \left(\frac{\nabla C}{|\nabla C|} \right) \right) \nabla C \quad (9)$$

در استفاده از روش ردگیری سطح مشترک دوفاز در جریان‌های دوفازی، دو سیال مخلوط نشدنی به عنوان یک سیال موثر در کل دامنه محاسباتی در نظر گرفته می‌شوند و خواص فیزیکی موثر این سیال با استفاده از تابع کسر حجمی به صورت روابط (10) تا (13) محاسبه می‌گردند [27].

$$\rho = C\rho_l + \rho_g(1 - C) \quad (10)$$

$$\mu = C\mu_l + \mu_g(1 - C) \quad (11)$$

$$K = CK_l + K_g(1 - C) \quad (12)$$

$$\varepsilon = C\varepsilon_l + \varepsilon_g(1 - C) \quad (13)$$

که زیرنویس‌های l و g به ترتیب به فازهای مایع و گاز اشاره دارند. به این ترتیب مجموعه معادلات الکتروهایدرودینامیکی حاکم شامل معادلات بقای جرم، ممنتوم و میدان و بار الکتریکی برمنای خواص فیزیکی موثر از دو فاز مایع و گاز در موقعیت مکانی هر سلول مورد ارزیابی و محاسبه قرار می‌گیرند.

الکتریکی بر شکل‌گیری حالت‌های مختلف اسپری، تاثیر آن بر اندازه ریزقطرات حاصل از تجزیه جت نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

2- فرمولاسیون ریاضی معادلات حاکم

2-1- معادلات حاکم بر جریان سیال

فرآیند الکترواسپری یک جریان دو فازی مایع-گاز تراکم‌ناپذیر است که تاثیر نیروهای الکتریکی ناشی از پتانسیل الکتریکی اعمال شده بر مایع را به همراه دارد. به‌منظور شبیه‌سازی چنین جریان‌ها، رویکرد حل معادلات حاکم بر جریان سیال (بقا جرم و ممنتوم) به همراه ردگیری سطح مشترک مایع-گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر این اساس معادله‌ی بقاء جرم برای جریان سیال تراکم‌ناپذیر از رابطه (3) پیروی می‌کند [26].

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (3)$$

که \vec{u} بردار سرعت سیال است. معادله ممنتوم با در نظر گرفتن کشش سطحی روی سطح مشترک مایع-گاز (\vec{F}_{ST})، نیروهای الکتریکی (\vec{F}_{ES}) و نیروی گرانشی وزن به عنوان نیروهای حجمی مطابق رابطه (4) بیان می‌گردد [26].

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{g} + \vec{F}_{ST} + \vec{F}_{ES} \quad (4)$$

که ρ چگالی، μ ویسکوزیته دینامیکی، P فشار و \vec{g} بردار شتاب میدان گرانشی است. نیروی الکتریکی ذکر شده در معادله ممنتوم به صورت رابطه (5) است [38].

$$\vec{F}_{ES} = \rho_e \vec{E} - \frac{1}{2} (\vec{E})^2 \nabla \varepsilon \quad (5)$$

که ρ_e چگالی بار الکتریکی حجمی و ε ضریب گذردهی سیال که $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ مشتمل بر ε_0 به عنوان ضریب گذردهی خلاء و ε_r بیانگر گذردهی نسبی سیال) می‌باشد. جمله‌ی اول در سمت راست معادله‌ی (5) نیروی کولنی است که نتیجه‌ی تقابل بار الکتریکی و میدان الکتریکی می‌باشد و در جهت میدان الکتریکی عمل می‌کند. جمله‌ی دوم در آن معادله، نیروی دی‌الکتریک است که به واسطه‌ی $\nabla \varepsilon$ در جهت عمود بر سطح مشترک عمل می‌کند.

کشش سطحی با استفاده از مدل نیروی سطحی پیوسته¹ قابل محاسبه است که برای اولین بار توسط براکبیل ارائه گردید [39]. در این مدل نیروی ناشی از کشش سطحی به‌عنوان یک نیروی حجمی (نیروی در واحد حجم) معرفی شده و با فرض ثابت بودن ضریب کشش سطحی به صورت رابطه (6) بیان می‌گردد،

$$\vec{F}_{ST} = \gamma \kappa \vec{n} \quad (6)$$

که κ انحنای سطح مایع و \vec{n} بردار عمود بر سطح می‌باشد. طبق رابطه‌ی (6) نیروی ناشی از کشش سطحی (در صورت ثابت بودن ضریب کشش سطحی) در راستای عمود بر سطح مشترک مایع-گاز عمل می‌کند و متناسب با انحنای سطح مشترک و ضریب کشش سطحی است. در مدل مذکور انحنای سطح مشترک مایع-گاز با استفاده از رابطه‌ی $\kappa = -\nabla \cdot \hat{n}$ تعریف می‌گردد که \hat{n} بردار واحد عمود بر سطح مشترک و به صورت $|\hat{n}| = \vec{n}/|\vec{n}|$ می‌باشد. به این ترتیب رابطه‌ی (6) به صورت رابطه (7) بازنویسی می‌گردد [36].

$$\vec{F}_{ST} = -\gamma (\nabla \cdot \hat{n}) \vec{n} \quad (7)$$

در مدل نیروی سطحی پیوسته سطح مشترک دو فاز به عنوان یک لایه

¹ CSF: continuum surface force model

2-3- معادلات الکتریکی حاکم

برای محاسبه نیروی الکتریکی (\vec{F}_{ES}) در معادله (4)، می‌بایستی میدان الکتریکی ناشی از اختلاف پتانسیل الکتریکی بین الکترودها تعیین گردد. در فرآیند الکترویهیدرودینامیک اثرات میدان مغناطیسی القایی قابل نظر است زیرا مشخصه‌ی زمانی برای پدیده‌هایی مغناطیسی $t_m = \mu_m Kl$ نفوذپذیری مغناطیسی و l مشخصه‌ی طولی) بسیار کوچک‌تر از مشخصه‌ی زمانی برای پدیده‌ی الکتریکی $t_e = \epsilon_0 \epsilon_r / K$ (مترادف با زمان آرامش بار الکتریکی) است. بر این اساس پدیده الکتریکی با معادله (14) توصیف می‌شود [46,38].

$$\nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) = \rho_e \quad (14)$$

با توجه به این‌که در فرآیند الکترویهیدرودینامیک اثرات میدان مغناطیسی القایی ناچیز است، پس میدان الکتریکی غیرچرخشی بوده و $\nabla \times \vec{E} = 0$ می‌باشد. از سوی دیگر میدان برداری و غیرچرخشی الکتریکی را می‌توان به صورت گرادیان یک تابع اسکالر $(\vec{E} = -\nabla\Phi)$ که در این‌جا Φ پتانسیل الکتریکی است) بیان نمود. به این ترتیب رابطه‌ی (14) به صورت معادله‌ی پواسون قابل بیان است،

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \Phi) = -\rho_e \quad (15)$$

از طرفی بقای بار الکتریکی منوط به برقراری توازن بار الکتریکی است که این امر مستلزم حل معادله بقای بار الکتریکی مطابق رابطه‌ی (16) است [38].

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{j} = 0 \quad (16)$$

که \vec{j} شار بار الکتریکی است و به صورت رابطه (17) تعریف می‌شود [28].

$$\vec{j} = \rho_e \vec{u} + K \vec{E} \quad (17)$$

با اعمال عملگر برداری دیفرانسیل بر رابطه‌ی (17) و استفاده از $\vec{E} = \nabla\Phi$ و جای‌گذاری آن در معادله‌ی (16) معادله‌ی بقای بار الکتریکی حجمی به صورت رابطه (18) حاصل می‌شود،

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_e \vec{u}) - \nabla \cdot (K \nabla \Phi) = 0 \quad (18)$$

در معادله‌ی اخیر عبارت دوم در سمت چپ تساوی، جریان بار الکتریکی جابجایی و عبارت سوم جریان بار الکتریکی هدایتی هستند.

3- روش حل

برای شبیه‌سازی فرآیند الکترواسپری می‌بایستی معادلات جریان سیال و معادلات الکتریکی بحث شده در بخش قبل به صورت یکپارچه و درگیر (کوپل) با یکدیگر حل شوند. در تحقیق حاضر از نرم افزار متن باز این‌فوم برای شبیه‌سازی فرآیند الکترواسپری استفاده شده است. یک حل‌گر مناسب برای جریان‌های دوفازی تراکم‌ناپذیر در نرم‌افزار این‌فوم حل‌گر اینترفوم¹ است که رویکرد محاسباتی آن، حل معادلات ناویر-استوکس به همراه ردگیری سطح مشترک دوفاز به روش حجم سیال می‌باشد. البته معادله کسر حجمی در این حل‌گر متفاوت از حالت استاندارد و توسعه یافته آن بوده و به صورت رابطه (19) است،

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}C) + \nabla \cdot [\vec{u}_r C(1-C)] = 0 \quad (19)$$

حل‌گر اینترفوم یک حل‌گر جریان دوفازی هیدرودینامیکی است و معادلات الکتریکی را شامل نمی‌شود. در مطالعه‌ی حاضر پس از آماده‌سازی

شرایط پس زمینه، معادلات الکتریکی (معادلات 15 و 18) به حل‌گر مذکور اضافه شده و معادله ناویر-استوکس مطابق با معادله (4) باز سازی شده است. به این ترتیب شرایط برای شبیه‌سازی فرآیند الکترواسپری فراهم گردیده است. روش حل معادلات در شبیه‌سازی حاضر بر اساس نمودار جریان‌ی نشان داده شده در "شکل 3" صورت می‌گیرد که ویژگی‌های اصلی آن عبارتند از:

- 1- شرایط مرزی و اولیه مثل دبی ورودی مایع، پتانسیل الکتریکی و توزیع کسر حجمی اولیه همچنین زمان حل و خواص فیزیکی در دامنه محاسباتی اعمال می‌شوند.
- 2- برای تعیین کسر حجمی و تصحیح خواص فیزیکی موثر معادله کسر حجمی (معادله 19) حل می‌شود.
- 3- نیروی الکتریکی به عنوان یک نیروی حجمی بایستی تعیین گردد. جهت تعیین این نیرو معادلات الکتریکی (روابط 15 و 18) حل می‌شوند.
- 4- برای تعیین میدان سرعت در دامنه محاسباتی، معادلات پیوستگی جرم و ناویر-استوکس شامل جملات مربوط به نیروی‌های کشش سطحی و الکتریکی حل می‌شوند. لازم به ذکر است که کوپل میدان سرعت و فشار با استفاده از الگوریتم پیمپل² صورت می‌گیرد که خود ترکیبی از دو الگوریتم سیمپل و پی‌زو می‌باشد.
- 5- اگر شرایط مرزی و اولیه (مخصوصاً پتانسیل الکتریکی در مرزها و دبی مایع ورودی) صحیح اعمال شده باشند، بایستی مخروط جت پایدار تشکیل شود.

4- بحث و بررسی نتایج

نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرآیند الکترواسپری در این بخش ارائه می‌شوند. در این تحقیق هندسه‌ی پیکربندی و خواص فیزیکی مایع مورد استفاده مطابق با کار تجربی تانگ و گومز³ می‌باشد [47]. در "شکل 4" شماتیکی از دامنه فیزیکی نشان داده شده است. امیتر از جنس استیل ضدزنگ بوده و ابعاد هندسی پیکربندی مطابق جدول 1 می‌باشد. مایع مورد استفاده هپتان و گاز اطراف آن هوا می‌باشد که خواص فیزیکی آن‌ها در جدول 2 درج شده‌اند. در "شکل 5" به طور شماتیک دامنه محاسباتی نشان داده شده است.

در تحقیق حاضر شبیه‌سازی‌ها در حالت متقارن محوری انجام شده‌اند. دامنه محاسباتی به صورت غیر یکنواخت و با سازمان شبکه‌بندی شده است به طوری که شبکه‌بندی در ناحیه خروجی امیتر کوچک‌ترین اندازه‌ی خود را دارد. در بررسی استقلال حل از شبکه‌بندی دامنه محاسباتی چهار شبکه به طوری که کوچک‌ترین اندازه سلول 1، 2، 3 و 5 میکرومتر در ناحیه خروجی امیتر بود، در نظر گرفته شد و برای خواص سیالات مطابق با جدول 2 و دبی 3 mlith^{-1} و پتانسیل الکتریکی 3500V شبیه‌سازی‌ها انجام گرفت. تغییرات اندازه‌ی بیشینه میدان الکتریکی روی خطوط $z = 1.51 \text{ mm}$ ، $z = 1.55 \text{ mm}$ و $z = 3.0 \text{ mm}$ برحسب اندازه‌ی کوچک‌ترین سلول در "شکل 6" رسم شده است. با توجه به این شکل، شبکه‌بندی به ازای $2 \mu\text{m}$ به عنوان کوچکترین ابعاد سلول برای شبیه‌سازی انتخاب گردید. در این حالت تعداد سلول‌ها بالغ بر 339900 است و اختیار سلولی بزرگتر از این سلول به روندی غیریکنواخت در بیشینه‌ی میدان الکتریکی می‌انجامد.

با اعمال پتانسیل الکتریکی به امیتر، شرایط مرزی بر روی دامنه محاسباتی به صورت زیر خواهد بود که در "شکل 5 ب" نیز قابل مشاهده است:

² Pimple³ Tang and Gomez¹ interFoam

- مرزهای (2-3)، (3-4) و (4-5) دیوار امیتر بوده و شرط مرزی لغزش صفر ($u_t = u_z = 0$) برقرار می باشد. در مورد پتانسیل الکتریکی مرزهای (2-3) و (3-4) دارای پتانسیل الکتریکی ثابت $\Phi = \Phi_0$ است که Φ_0 پتانسیل الکتریکی اعمال شده به امیتر است و مرز (4-5) عایق الکتریکی فرض شده است.
- در مرزهای (5-6) و (6-7) شرط مرزی اتمسفر برقرار است که در آن گرادیان سرعت و پتانسیل الکتریکی صفر است.
- مرز (7-8) دیوار بوده و شرط مرزی بدون لغزش می باشد. همچنین این مرز به عنوان الکترود کشنده در نظر گرفته شده و پتانسیل الکتریکی در آن صفر ($\Phi = 0$) است.
- مرز (1-8) محور تقارن است.

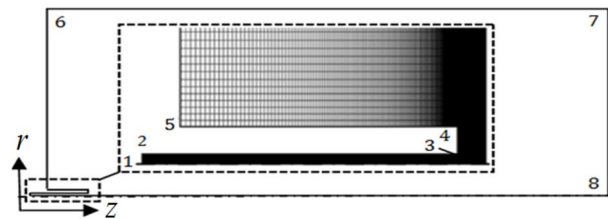


Fig. 5 A schematic of computational domain

شکل 5 شماتیکی از دامنه محاسباتی

جدول 1 ابعاد هندسی پیکربندی

Table 1 Dimensions of geometrical configuration

| متغیرها | قطر داخلی امیتر (mm) | قطر خارجی امیتر (mm) | طول امیتر (mm) | فاصله نوک امیتر از الکترود کشنده (mm) |
|---------|----------------------------|----------------------------|-------------------|---|
| مقادیر | 0.12 | 0.45 | 1.5 | 30 |

جدول 2 خواص فیزیکی مورد استفاده در شبیه سازی

Table 2 Physical properties used in simulation

| خاصیت فیزیکی | چگالی (kgm^{-3}) | ویسکوزیته (mPa s) | هدایت الکتریکی ویژه (Sm^{-1}) | گذردهی نسبی | ضریب کشش سطحی (Nm^{-1}) |
|--------------|--------------------------------|----------------------|--|----------------|--|
| هیتان | 684 | 0.61 | 1.15×10^{-6} | 1.93 | 0.0186 |
| هوا | 1.2 | 0.0183 | 1.05×10^{-15} | 1 | |

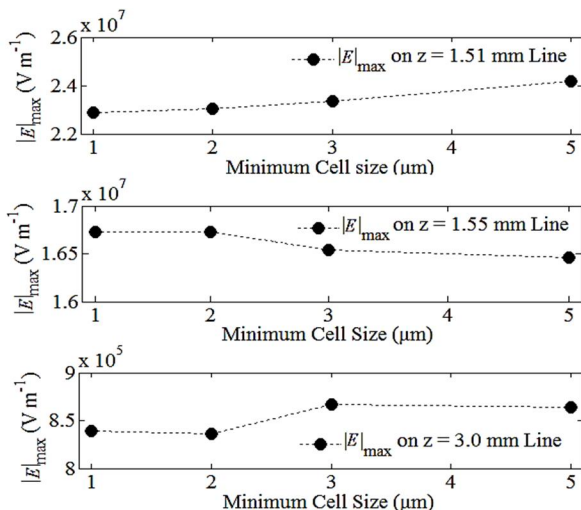


Fig. 6 Variation of maximum magnitude of electric field against minimum cell size at different z lines

شکل 6 تغییرات اندازه ی بیشینه ی میدان الکتریکی بر حسب کوچکترین اندازه ی سلول بر روی خطوط مختلف z

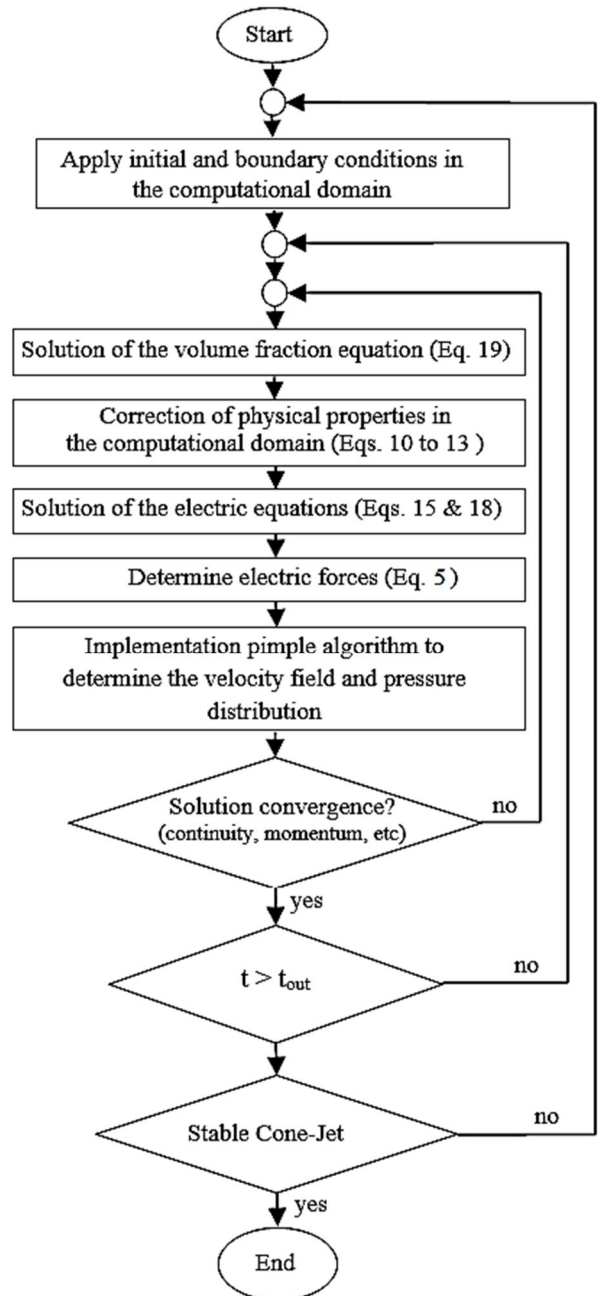


Fig. 3 Flow chart of solution approach

شکل 3 نمودار جریان ی روش حل

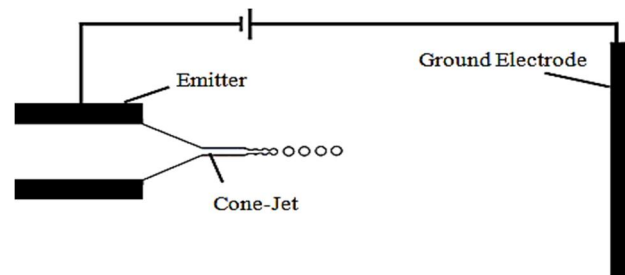


Fig. 4 Physical domain

شکل 4 دامنه فیزیکی

- مرز (1-2) ورودی سرعت با $\vec{E} = 4Q/(\pi d_e^2)$ ، $u_t = 0$ و کسر حجمی $C=1$ می باشد.

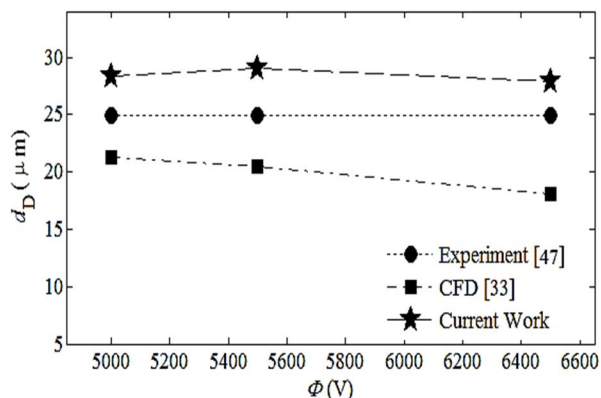


Fig. 7 A comparison between the present simulation data with other experimental and CFD results

شکل 7 مقایسه نتایج شبیه‌سازی در این تحقیق با نتایج تجربی و CFD

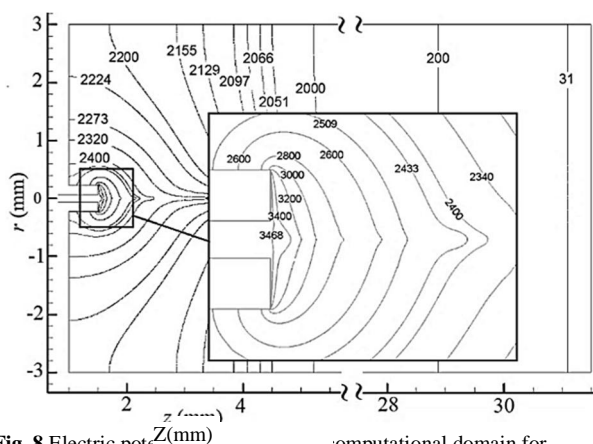


Fig. 8 Electric potential distribution in the computational domain for \$Q = 3\text{mlith}^{-1}\$ and \$\Phi = 3500\text{V}\$

شکل 8 توزیع پتانسیل الکتریکی در دامنه محاسباتی در دبی \$3\text{mlith}^{-1}\$ و پتانسیل الکتریکی \$3500\text{V}\$

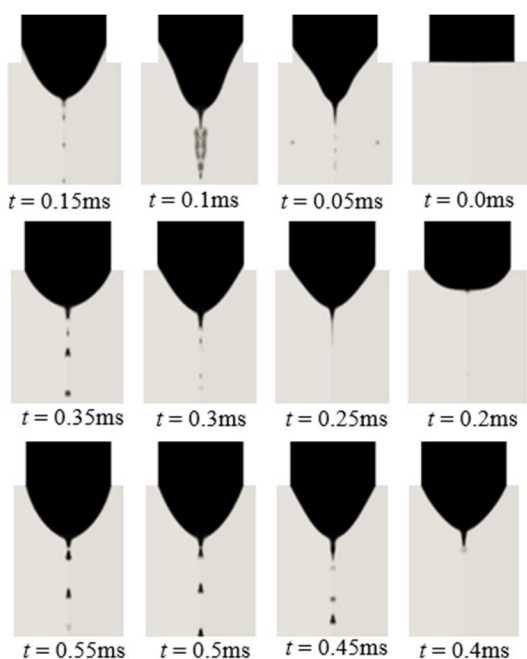


Fig. 9 Transient formation process of Heptane droplet at emitter exit for \$Q = 3\text{mlith}^{-1}\$ and \$\Phi = 3500\text{V}\$

شکل 9 روند شکل‌گیری گذرای قطره‌ی هپتان در خروجی امیتر در دبی \$3\text{mlith}^{-1}\$ و پتانسیل الکتریکی \$3500\text{V}\$

از آن جایی که شبیه‌سازی‌ها در حالت گذرا (وابسته به زمان) انجام می‌گیرد بنابراین در لحظه‌ی اول (\$t = 0\$) سرعت، فشار، چگالی بار الکتریکی، پتانسیل الکتریکی در کل دامنه محاسباتی صفر در نظر گرفته می‌شود و پارامتر کسر حجمی (\$C\$) برای امیتر، که پر از مایع هپتان است، یک و برای غیر از آن صفر فرض می‌شود.

1-4 - مقایسه نتایج

در این قسمت نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرآیند الکترواسپری با نتایج تجربی در کار تانگ و گومز [47] مقایسه شده‌اند. بدین منظور قطر میانگین ریزقطرات حاصل از شبیه‌سازی فرآیند الکترواسپری در سه پتانسیل الکتریکی \$5000\text{V}\$، \$5500\text{V}\$ و \$6500\text{V}\$ محاسبه شده است. لازم به ذکر است قطر ریزقطرات در این تحقیق، متوسط قطر ریزقطرات تولید شده از نوک مخروط جت در هر پتانسیل الکتریکی است. تانگ و گومز [47] بر مبنای نتایج آزمایش‌های تجربی، برای قطر متوسط ریزقطرات تولید شده از نوک مخروط - جت برای مایع هپتان، رابطه‌ای به صورت رابطه (20) ارائه نمودند،

$$d_D = 159Q^{0.62} \quad (20)$$

که در این رابطه \$Q\$ دبی ورودی مایع و \$d_D\$ قطر متوسط ریزقطره است. برای مقایسه نتایج به دست آمده با داده‌های عددی نیز از نتایج CFD براساس کار وی و همکارانش [33] استفاده شده است. "شکل 7" قطر ریزقطرات حاصل از شبیه‌سازی‌ها در این تحقیق را در مقایسه با نتایج تجربی و CFD نشان می‌دهد. حداکثر خطای نتایج حاصل از شبیه‌سازی در این تحقیق در مقایسه با نتایج تجربی 14% است. در مقابل، حداکثر خطای نتایج CFD استخراج شده از مرجع [33] در مقایسه با نتایج تجربی 37% است. همچنین در "شکل 7" مشاهده می‌شود که نتایج شبیه‌سازی حاضر برای قطر ریزقطرات به مقادیری بیشتر از نتایج تجربی منجر شده است. در مقابل نتایج CFD در مرجع [33] مقدار کمتری از نتایج تجربی را نشان می‌دهند.

2-4 - تاثیر پتانسیل الکتریکی بر پروفیل جریان مایع

اگر معادلات (1) و (2) برای هندسه و خواص سیالات مورد نظر در تحقیق حاضر به کار گرفته شوند، ولتاژ شروع \$4081\text{V}\$ و دبی کمینه \$1.42\text{mlith}^{-1}\$ به دست می‌آیند. نتایج ارائه شده در این مقاله در دبی ورودی \$3\text{mlith}^{-1}\$ و پتانسیل‌های الکتریکی \$3500\text{V}\$، \$5500\text{V}\$، \$5000\text{V}\$ و \$6500\text{V}\$ به بررسی شکل‌گیری پروفیل مایع خروجی از روزنه موئین می‌پردازد.

در مرحله اول پتانسیل الکتریکی \$3500\text{V}\$ (کمتر از ولتاژ شروع محاسبه شده‌ی \$4081\text{V}\$) در نظر گرفته شده است. در این حالت انتظار می‌رود پروفیل کامل مخروط - جت تشکیل نشود که نتایج شبیه‌سازی در ادامه نیز این مسئله را تایید می‌کنند. در "شکل 8" خطوط همتراز پتانسیل الکتریکی در دامنه محاسباتی برای ولتاژ \$3500\text{V}\$ در پیکربندی امیتر - دیسک با امیتری به قطر داخلی \$0.12\text{mm}\$، قطر خارجی \$0.45\text{mm}\$ و فاصله امیتر - دیسک \$30\text{mm}\$ ارائه شده است. بر این اساس و بر پایه‌ی ناحیه بزرگ‌نمایی شده در شکل 8 می‌توان شکل‌گیری زمانی پروفیل مایع را در خروجی روزنه - ی موئین مطابق "شکل 9" مشاهده نمود. این شکل نشان می‌دهد که ساختار هندسی پروفیل مایع از لحظه‌ی \$0.45\text{ms}\$ به بعد از شرایطی پایدار به شکلی شبه بیضی تبدیل می‌شود که از راس آن ریزقطره تولید می‌شود. شرایط مذکور معادل با اسپری در حالت میکروچکیدن است و لذا در دبی \$3\text{mlith}^{-1}\$ و پتانسیل الکتریکی \$3500\text{V}\$ که مقداری کمتر از ولتاژ شروع را به خود اختصاص می‌دهد، نمی‌توان شکل‌گیری پروفیل مخروط - جت را شاهد بود.

و در زمان 0.3ms پروفیل مخروطی مایع مشابه با لحظه‌ی زمانی 0.06ms می‌شود و دوباره فرآیند شکل‌گیری جت و تجزیه آن تکرار می‌شود. این شرایط با حالت اسپری مخروط-جت تناوبی مطابقت دارد و بنابراین در دبی ورودی 3mlith^{-1} و پتانسیل الکتریکی 5500V حالت اسپری مخروط-جت تناوبی به وجود آمده است.

در مرحله آخر پتانسیل الکتریکی 6500V در نظر گرفته می‌شود. در "شکل 12" پروفیل مایع در خروجی امیتر در زمان‌های مختلف ارائه شده است. چنان که در این شکل مشاهده می‌شود با گذشت زمان مخروط تیلور شکل گرفته و سپس جت از آن خارج می‌شود. در ادامه از جت ریزقطراتی تقریباً هم اندازه تولید می‌شوند. همچنین مشاهده می‌شود که با گذشت زمان شکل مخروط-جت پایدار باقی می‌ماند. بنابراین در دبی حجمی ورودی 3mlith^{-1} و پتانسیل الکتریکی 6500V حالت اسپری مخروط-جت پایدار پدید آمده است. جهت مقایسه‌ی بهتر تاثیر پتانسیل الکتریکی روی پروفیل مایع، در "شکل 13" پروفیل مایع در خروجی امیتر در دبی

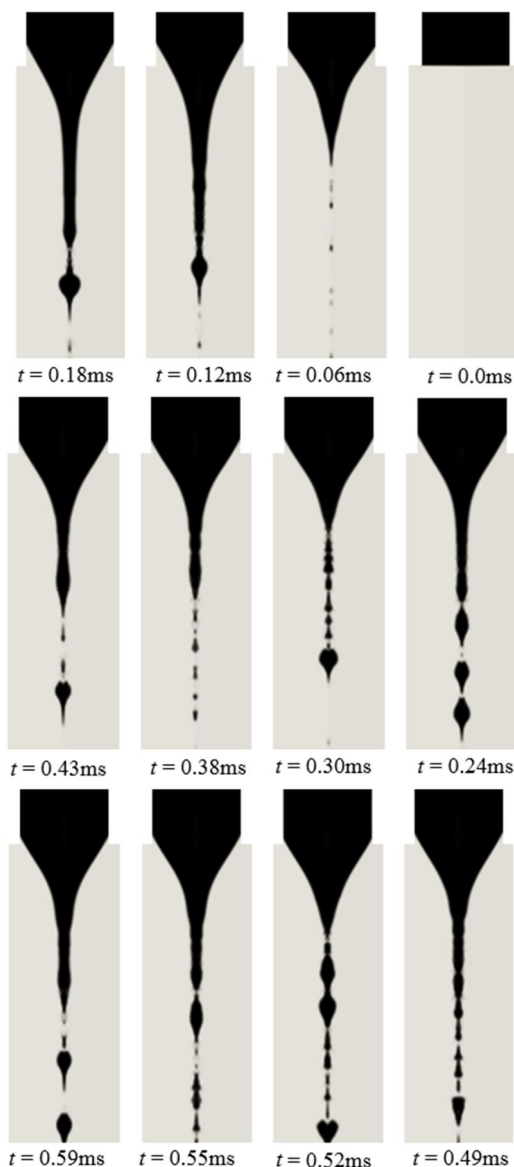


Fig. 11 Transient formation process of Heptane droplet at emitter exit for $Q = 3\text{mlith}^{-1}$ and $\Phi = 5500\text{V}$

شکل 11 روند شکل‌گیری گذرای قطره‌ی هپتان در خروجی امیتر در دبی 3mlith^{-1} و پتانسیل الکتریکی 5500V

در مرحله دوم پتانسیل الکتریکی به مقدار 5000V افزایش می‌یابد. در "شکل 10" پروفیل مایع در خروجی امیتر در زمان‌های مختلف ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با گذشت زمان مخروط تیلور شکل گرفته و سپس جت از آن خارج می‌شود. در ادامه از جت، ریزقطره و تکه‌های مایع تولید می‌شوند. همچنین مشاهده می‌شود که با گذشت زمان جت از بین می‌رود (در زمان 0.36ms شرایطی مشابه 0.04ms به وجود آمده است) و فرآیند شکل‌گیری جت و تجزیه آن دو باره تکرار می‌گردد. این شرایط بر حالت اسپری دوکی‌وار منطبق است. بنابراین در دبی ورودی 3mlith^{-1} و پتانسیل الکتریکی 5000V حالت اسپری دوکی‌وار به وجود آمده است و در این حالت نیز نمی‌توان شکل‌گیری مخروط-جت را مشاهده نمود.

در مرحله سوم پتانسیل الکتریکی 5500V در نظر گرفته شده است. در "شکل 11" پروفیل مایع در خروجی امیتر در زمان‌های مختلف ارائه شده است. در این شکل با گذشت زمان، مخروط شکل گرفته و سپس جت از آن خارج می‌شود و در ادامه از جت ریزقطراتی تقریباً هم اندازه تولید می‌شوند. همچنین در این شکل مشاهده می‌شود که با گذشت زمان جت از بین می‌رود

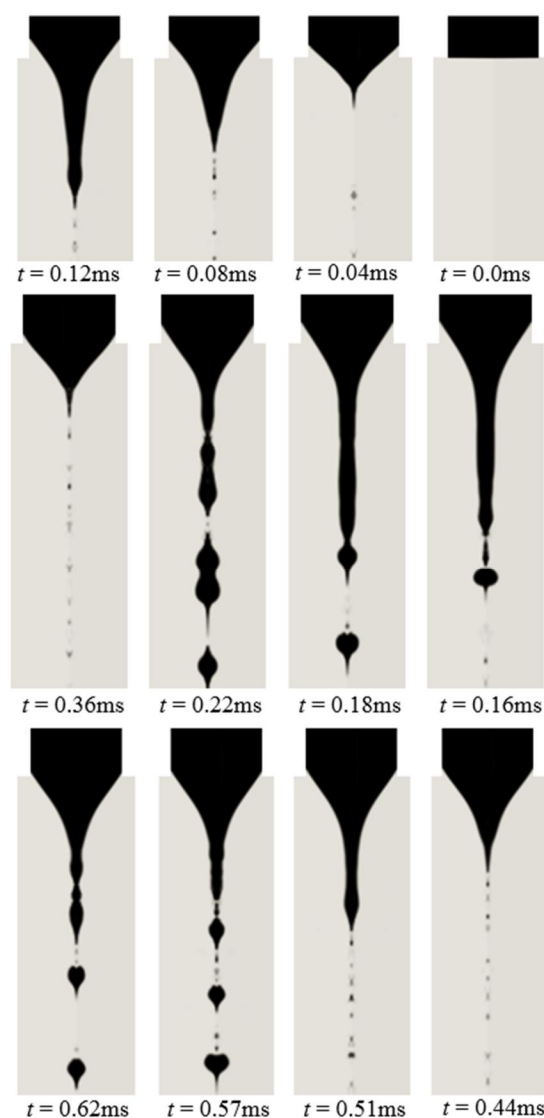


Fig. 10 Transient formation process of Heptane droplet at emitter exit for $Q = 3\text{mlith}^{-1}$ and $\Phi = 5000\text{V}$

شکل 10 روند شکل‌گیری گذرای قطره‌ی هپتان در خروجی امیتر در دبی 3mlith^{-1} و پتانسیل الکتریکی 5000V

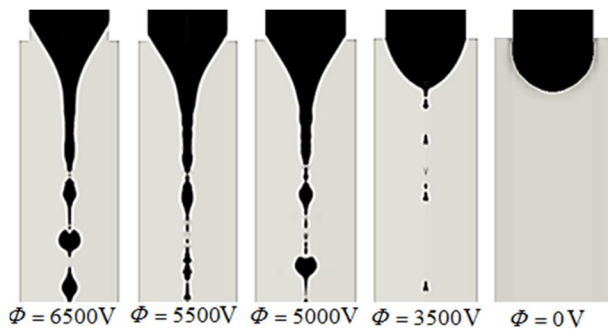


Fig. 13 Liquid meniscus formation at emitter exit for $Q = 3\text{mlith}^{-1}$, $t = 0.55\text{ms}$ and various electric potentials

شکل 13 شکل‌گیری پروفیل مایع در خروجی امیتر در دبی 3mlith^{-1} زمان 0.55ms و پتانسیل‌های الکتریکی مختلف

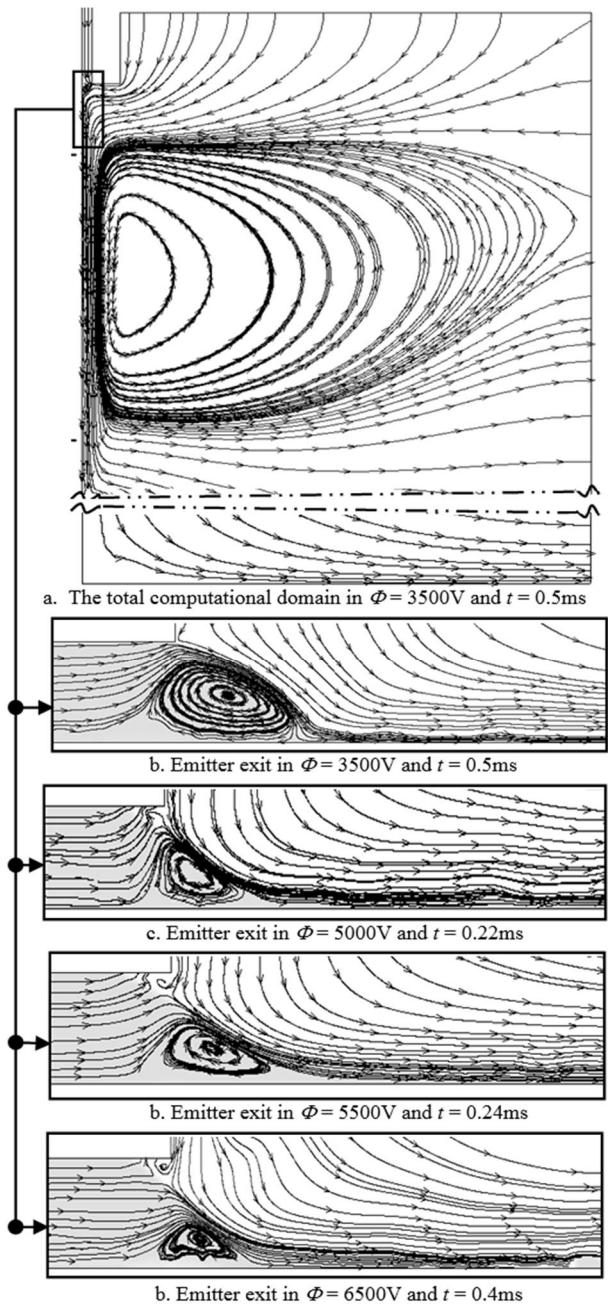


Fig. 14 Stream lines for $Q = 3\text{mlith}^{-1}$ and various electric potentials

شکل 14 خطوط جریان سیال در دبی 3mlith^{-1} و پتانسیل‌های الکتریکی مختلف

ورودی 3mlith^{-1} ، زمان 0.55ms و در پتانسیل‌های الکتریکی مختلف در کنار هم رسم شده‌اند.

در "شکل 14" الگوهای شکل گرفته از خطوط جریان سیال در دامنه محاسباتی و در مقادیر مختلف پتانسیل الکتریکی و در دو حالت رسم شده است. در شکل (14، a) خطوط جریان در کل دامنه محاسباتی رسم شده است و شکل بزرگ‌نمایی شده‌ای از ناحیه خروجی امیتر در شکل (14، b تا e) ارائه شده است. وقتی بارهای الکتریکی در سطح مشترک مایع-گاز تجمع می‌کنند، این بارها تحت میدان الکتریکی شتاب می‌گیرند. این امر سبب ایجاد سرعت بیشتر در سطح مایع شده و به پیدایش دو گردابه با جهت گردش مخالف یکدیگر در دو طرف سطح مشترک میان دو فاز مایع و گاز منتهی می‌شود. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود یک گردابه ساعت‌گرد در داخل پروفیل جریان مایع (به عنوان یک فاز) و یک گردابه پادساعت‌گرد در محیط هوای پیرامونی (به عنوان فاز دیگر) آن ایجاد شده است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش پتانسیل الکتریکی گردابه داخل

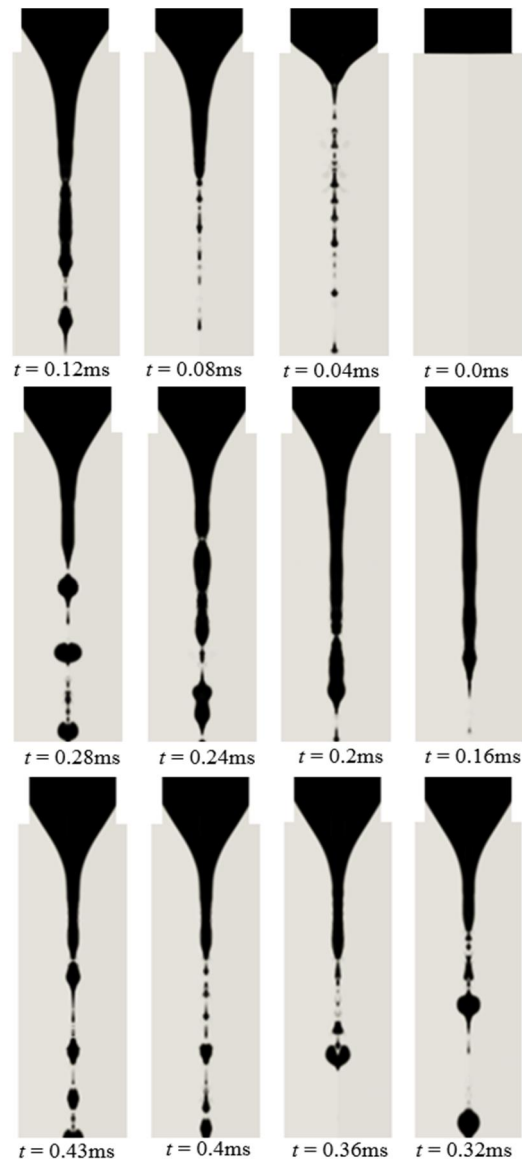


Fig. 12 Transient formation process of Heptane droplet at emitter exit for $Q = 3\text{mlith}^{-1}$ and $\Phi = 6500\text{V}$

شکل 12 روند شکل‌گیری قطره‌ی هپتان در خروجی امیتر در دبی 3mlith^{-1} و پتانسیل الکتریکی 6500V

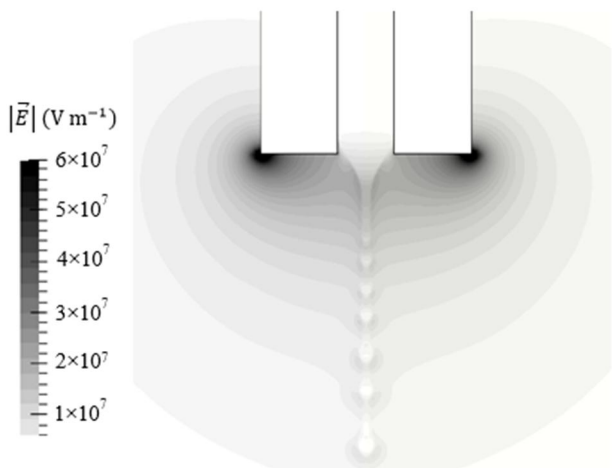


Fig. 17 Distribution of electric field magnitude in emitter exit for $Q = 3\text{mlith}^{-1}$, $\Phi = 5500\text{V}$ at $t = 0.24\text{ms}$

شکل 17 توزیع اندازه‌ی میدان الکتریکی در خروجی امیتر در دبی 3mlith^{-1} پتانسیل الکتریکی 5500V در زمان 0.24ms

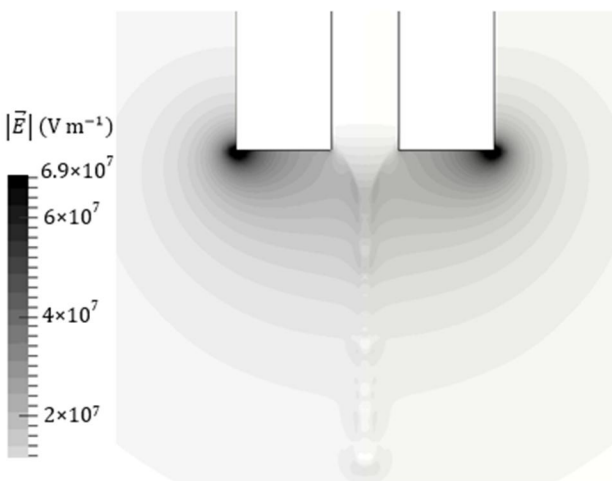


Fig. 18 Distribution of electric field magnitude in emitter exit for $Q = 3\text{mlith}^{-1}$, $\Phi = 6500\text{V}$ at $t = 0.5\text{ms}$

شکل 18 توزیع اندازه‌ی میدان الکتریکی در خروجی امیتر در دبی 3mlith^{-1} پتانسیل الکتریکی 6500V در زمان 0.40ms

می‌شود بارهای الکتریکی به سطح مشترک دو فاز مهاجرت کرده و در آن موقعیت انباشته شده‌اند و با جدایش ریزقطرات از جت مایع، بخشی از بار الکتریکی همراه با ریزقطرات حمل می‌شود. مهاجرت بار الکتریکی به سطح مشترک مایع و گاز حاکی از رسانایی الکتریکی مایع است که در عمل سطحی هم پتانسیل را برای جریان مایع پدید می‌آورد. چگالی بار الکتریکی علاوه بر پتانسیل الکتریکی به میدان سرعت نیز وابسته است و در نقاط نوک تیز (مانند نوک مخروط یا نوک جت مایع) به دلیل تمرکز میدان الکتریکی از مقادیر بیشتری برخوردار است. به عبارت دیگر چگالی بار الکتریکی به پروفیل مایع نیز وابسته است که این امر در "شکل 19" مشاهده می‌شود.

5- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر شبیه‌سازی فرآیند الکترواسپری مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا، رویکردی محاسباتی مبتنی بر حل معادلات جریان سیال (معادلات ناویر-استوکس به همراه ردگیری سطح مشترک دوفاز به روش حجم سیال) و معادلات الکتریکی (پواسون و بقاء بار الکتریکی) برای تعیین

مایع کوچک‌تر شده است. در این حالت، افزایش پتانسیل الکتریکی با تقویت میدان الکتریکی وارد بر سطح خارجی مخروط مایع موجب جمع شدگی بیشتر مخروط می‌شود که به شکل‌گیری گردابه‌ی کوچک‌تر منجر می‌شود. در "شکل‌های 15 تا 18" توزیع اندازه‌ی میدان الکتریکی برای پتانسیل‌های الکتریکی مختلف رسم شده است. اندازه‌ی میدان الکتریکی متأثر از پتانسیل الکتریکی است و با افزایش پتانسیل الکتریکی اعمال شده بر امیتر میدان الکتریکی نیز افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل‌های 15 تا 18 مشاهده می‌شود در پتانسیل‌های الکتریکی 3500V ، 5000V و 5500V و 6500V بیشینه‌ی اندازه میدان الکتریکی به ترتیب $5.3 \times 10^7 \text{Vm}^{-1}$ ، $6.0 \times 10^7 \text{Vm}^{-1}$ و $6.9 \times 10^7 \text{Vm}^{-1}$ است که حاکی از افزایش اندازه میدان الکتریکی با افزایش پتانسیل الکتریکی است. همچنین مشاهده می‌شود که در گوشه‌ی تیز امیتر، میدان الکتریکی بیشترین مقدار را دارد که ناشی از تمرکز بار الکتریکی (مستتر در مقادیر بالاتر چگالی بار الکتریکی) در این نقطه است.

در "شکل 19" توزیع چگالی بار الکتریکی برای پتانسیل‌های الکتریکی مختلف در خروجی امیتر رسم شده است. چنان که در این شکل مشاهده

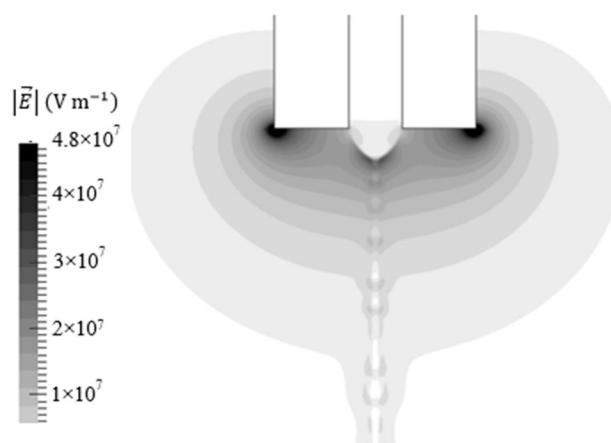


Fig.15 Distribution of electric field magnitude in emitter exit for $Q = 3\text{mlith}^{-1}$, $\Phi = 3500\text{V}$ at $t = 0.5\text{ms}$

شکل 15 توزیع اندازه‌ی میدان الکتریکی در خروجی امیتر در دبی 3mlith^{-1} پتانسیل الکتریکی 3500V در زمان 0.50ms

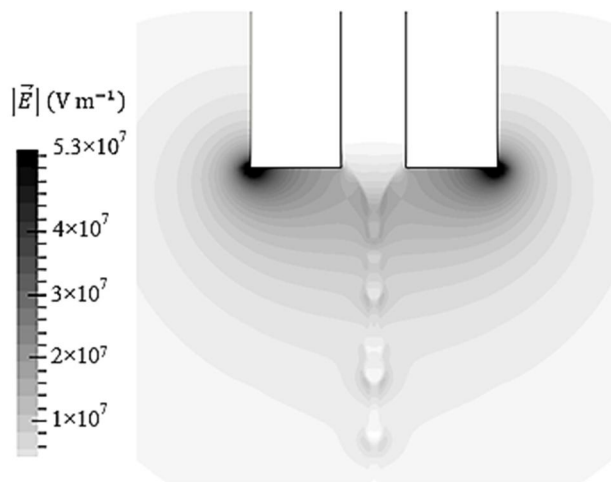


Fig. 16 Distribution of electric field magnitude in emitter exit for $Q = 3\text{mlith}^{-1}$, $\Phi = 5000\text{V}$ at $t = 0.22\text{ms}$

شکل 16 توزیع اندازه‌ی میدان الکتریکی در خروجی امیتر در دبی 3mlith^{-1} پتانسیل الکتریکی 5000V در زمان 0.22ms

اثر تقویت میدان الکتریکی وارد بر سطح هلال کوچکتر می شود. بررسی توزیع چگالی بار الکتریکی نیز ضمن ارائه تصویر از تجمع بار الکتریکی در سطح مشترک جریان مایع و جریان گاز (هوای) پیرامونی حاکی از رسانایی الکتریکی مایع است که به ایجاد سطحی هم پتانسیل در آن منجر می شود.

6- فهرست علائم

| | |
|----------------|--------------------------------------|
| C | تابع کسر حجمی |
| d_D | قطر ریزقطره (m) |
| \vec{E} | بردار میدان الکتریکی (Vm^{-1}) |
| \vec{F}_{ES} | بردار نیروی الکتریکی (N) |
| \vec{F}_{ST} | بردار نیروی کشش سطحی (N) |
| \vec{g} | بردار شتاب گرانش (ms^{-2}) |
| \vec{j} | شار بار الکتریکی ($Cm^{-2}s^{-1}$) |
| K | هدایت الکتریکی ویژه (Sm^{-1}) |
| \vec{n} | بردار عمود بر سطح |
| P | فشار (Nm^{-2}) |
| Q | دبی (m^3h^{-1}) |
| \vec{u} | بردار سرعت (ms^{-1}) |
| t_e | زمان آرامش بار الکتریکی (s) |
| t_m | مشخصه زمانی مغناطیسی (s) |

علائم یونانی

| | |
|--------------|--------------------------------------|
| γ | ضریب کشش سطحی (Nm^{-1}) |
| ϵ_0 | ضریب گذردهی خلاء ($Cv^{-1}m^{-1}$) |
| ϵ_r | گذردهی نسبی |
| κ | انحنای سطح (m) |
| μ | ویسکوزیته دینامیکی (Pa s) |
| μ_m | نفوذپذیری مغناطیسی (Hm^{-1}) |
| ρ | چگالی (kgm^{-3}) |
| ρ_e | چگالی بار الکتریکی (Cm^{-3}) |
| Φ | پتانسیل الکتریکی (V) |

زیرنویسها

| | |
|-----|------|
| l | مایع |
| g | گاز |

7- مراجع

[1] A. Castellanos, *Electrohydrodynamics*, Second Edition, pp. 1-11, New York: Springer-Verlag Wein, 1998.

[2] J. B. Fenn, M. Mann, C. K. Meng, S. F. Wong, C. M. Whitehouse, Electro spray ionization for mass spectrometry of large biomolecules, *Science*, Vol. 246, No. 4926, pp. 64-71, 1989.

[3] N. Chetwani, C. A. Cassou, D. B. Go, H. C. Chang, High-frequency AC electro spray ionization source for mass spectrometry of biomolecules, *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, Vol. 21, No. 11, pp. 1852-1856, 2010.

[4] S. Banerjee, S. Mazumdar, Electro spray ionization mass spectrometry: a technique to access the information beyond the molecular weight of the analyte, *International journal of analytical chemistry*, Vol. 2012, No. 1, pp. 1-40, 2012.

[5] J. Yu, Y. Qiu, X. Zha, M. Yu, J. Rafique, J. Yin, Production of aligned helical polymer nanofibers by electro spinning, *European Polymer Journal*, Vol. 44, No. 9, pp. 2838-2844, 2008.

[6] S. Agarwal, A. Greiner, J. H. Wendorff, Functional materials by electro spinning of polymers, *Progress in Polymer Science*, Vol. 38, No. 6, pp. 963-991, 2013.

[7] X. Wang, B. Ding, G. Sun, M. Wang, j. Yu, Electro spinning/netting: a strategy for the fabrication of three-dimensional polymer nano-fiber/nets. *Progress in Materials Science*, Vol. 58, No. 8, pp. 1173-1243, 2013.

[8] O. V. Salata, Tools of nanotechnology; Electro spray, *Current Nanoscience*, Vol. 1, No. 1, pp. 25-33, 2005.

[9] A. Jaworek, A. T. Sobczyk, Electro spraying route to nanotechnology; An overview, *Journal of Electrostatics*, Vol. 66, No. 3, pp. 197-219, 2008.

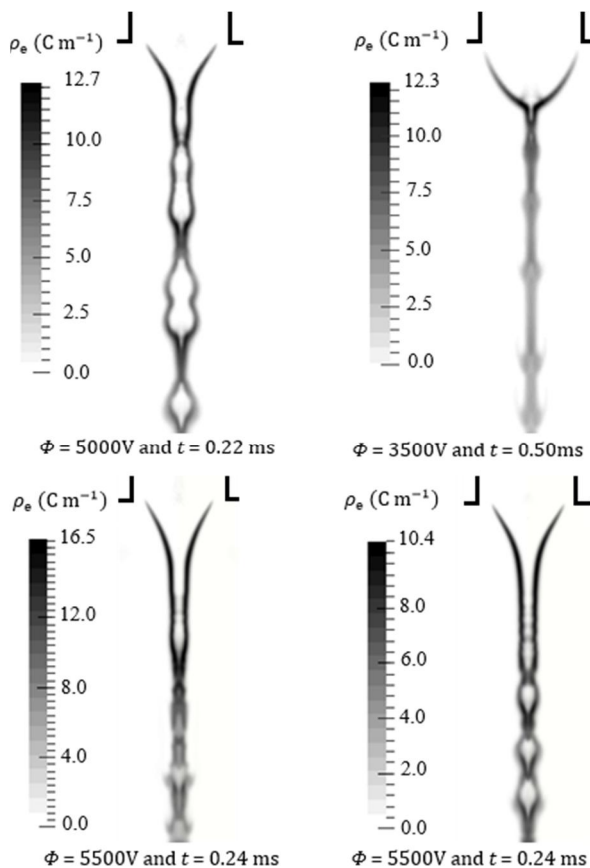


Fig. 19 Distribution of electric charge density in emitter exit for $Q = 3\text{mlith}^{-1}$ and various electric potentials

شکل 19 توزیع چگالی بار الکتریکی در خروجی امیتر در دبی 3mlith^{-1} و پتانسیل های الکتریکی مختلف

نیروهای الکتریکی با استفاده از نرم افزار متن باز اوپن فوم مد نظر قرار گرفته است. استفاده از این نرم افزار مستلزم توسعهی حل گری است که توانایی شبیه سازی فرآیند الکترواسپری را داشته باشد. از این رو، با تدوین و اضافه نمودن مجموعه معادلات الکتریکی به همراه معادلات ردگیری سطح مشترک جریان دو فازی ضمن اصلاح و تکمیل معادلات ناور- استوکس در ارتباط با آن معادلات، بستر لازم برای شبیه سازی فرآیند الکترواسپری فراهم شده است. ارزیابی روند حل از منظر پایداری روش حل و وابستگی و کوبل بودن معادلات به یکدیگر حاکی از توانایی مناسب آن در حل گذرا و همگرایی مجموعه معادلات است. در مرحلهی نخست، مقایسهی میان نتایج حاصل از این حل با مقادیر تجربی و عددی دیگر محققان ضمن صحت گذاری بر نتایج، معتبر بودن روش حل را نیز مورد تایید قرار می دهد. این نتایج همچنین ضمن ارائه تصویر زمانی از چگونگی توسعه و شکل گیری جریان مایع در فرآیند الکترواسپری امکان شناسایی و تمایز میان مودهای مختلف گسست و تولید ریز قطرات را در مقادیر مختلف پتانسیل های الکتریکی به وضوح میسر می سازد. این مودها به ترتیب و با افزایش پتانسیل الکتریکی به وقوع می سازد. این مودها، دوکی وار، مخروط - جت تناوبی و مخروط - جت پایدار می انجامد. نتایج این مطالعه همچنین امکان بررسی همزمان خطوط جریان دو فازی را فراهم می سازد. در این راستا، شکل گیری دو جریان گردابه ای مماس بر یکدیگر در سطح مشترک میان فازهای مایع و گاز در خروجی روزنه ی موئین قابل مشاهده است. در این میان جریان گردابه ای در داخل پروفیل هلالی (شبه مخروطی) مایع با افزایش پتانسیل الکتریکی و در

- electrospray ionization: CAD for a μ fluidic device mass spectrometer interface, In *12th International Conference IEEE*, Vol. 2, No. 1, pp. 1275-1278, 2003.
- [30] O. Lastow, W. Balachandran, Numerical simulation of electrohydrodynamic (EHD) atomization, *Journal of Electrostatics*, Vol. 64, No. 12, pp. 850-859, 2006.
- [31] A. K. Sen, J. Darabi, D. R. Knapp, J. Liu, Modeling and characterization of a carbon fiber emitter for electrospray ionization, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 620-630, 2006.
- [32] A. K. Sen, J. Darabi, D. R. Knapp, Simulation and parametric study of a novel multi-spray emitter for ESI-MS applications, *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 3, No. 3, pp. 283-298, 2007.
- [33] W. Wei, Z. Gu, S. Wang, Y. Zhang, K. Lei, K. Kase, Numerical simulation of the cone-jet formation and current generation in electrostatic spray—modeling as regards space charged droplet effect, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 23, No. 1, pp. 1-11, 2013.
- [34] M. Rahmanpour, R. Ebrahimi, Numerical simulation of electrohydrodynamic spray with stable Taylor cone-jet, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-9, 2015.
- [35] H. Dastourani, M. R. Jahannama, A. Eshami Majd, Numerical investigation of influence of liquid flow rate on the size of droplets in electrospray process, *15th International Conference of Iranian Aerospace Society*, Tehran, Iran, February 4-6, 2016. (in Persian فارسی)
- [36] X. Wu, R. D. Oleschuk, N. M. Cann, Characterization of microstructured fibre emitters: in pursuit of improved nano electrospray ionization performance, *Analyst*, Vol. 137, No. 18, pp. 4150-4161, 2012.
- [37] G. Heidarinejad, R. Babaei, Numerical investigation of the electric field effect on the flow field and enhancement of the water evaporation rate, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 101-110, 2016. (in Persian فارسی)
- [38] G. Tomar, D. Gerlach, G. Biswas, N. Alleborn, A. Sharma, F. Durst, S. W. J. Welch, A. Delgado, Two-phase electrohydrodynamic simulations using a volume-of-fluid approach, *Journal of Computational Physics*, Vol. 227, No. 2, pp. 1267-1285, 2007.
- [39] J. U. Brackbill, D. B. Kothe, C. Zemach, A continuum method for modeling surface tension, *Journal of Computational Physics*, Vol. 100, No. 2, pp. 335-354, 1992.
- [40] C. W. Hirt, B. D. Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, No. 1, pp. 201-225, 1981.
- [41] D. L. Youngs "Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion, *Numerical Methods for Fluid Dynamics*, Vol. 24, No. 1, pp. 273-285, 1982.
- [42] D. Gueyffier, J. Li, A. Nadim, R. Scardovelli, S. Zaleski, Volume-of-fluid interface tracking with smoothed surface stress methods for three-dimensional flows, *Journal of Computational Physics*, Vol. 152, No. 2, pp. 423-456, 1999.
- [43] S. Osher, J. A. Sethian, Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations, *Journal of Computational Physics*, Vol. 79, No. 1, pp. 12-49, 1988.
- [44] M. Sussman, P. Smereka, S. Osher, A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow, *Journal of Computational physics*, Vol. 114, No. 1, pp. 146-159, 1994.
- [45] M. Sussman, A. S. Almgren, J. B. Bell, P. Colella, L. H. Howell, M. L. Welcome, An adaptive level set approach for incompressible two-phase flows, *Journal of Computational Physics*, Vol. 148, No. 1, pp. 81-124, 1999.
- [46] D. A. Saville, Electrohydrodynamics: the Taylor-Melcher leaky dielectric model, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 29, No. 1, pp. 27-64, 1997.
- [47] K. Tang, A. Gomez, On the structure of an electrostatic spray of monodisperse droplets, *Physics of Fluids*, Vol. 6, No. 7, pp. 2317-2332, 1994.
- [10] H. Yoon, J. H. Woo, Y. M. Ra, S. S. Yoon, H. Y. Kim, S. Ahn, J. H. Yun, J. Gwak, K. Yoon, S. C. James, Electrostatic spray deposition of copper-indium thin films, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 45, No. 12, pp. 1448-1455, 2011.
- [11] M. L. Sweet, D. Pestov, G. C. Tepper, J. T. McLeskey, Electrospray aerosol deposition of water soluble polymer thin films, *Applied Surface Science*, Vol. 289, No. 1, pp. 150-154, 2014.
- [12] Busek Company Incorporated, Electrospray thrusters, Accessed 17 August 2015, http://www.busek.com/technologies_espray.htm.
- [13] A. Jaworek, A. Krupa, Jet and drops formation in electrohydrodynamic spraying of liquids; A systematic approach, *Experiments in Fluids*, Vol. 27, No. 1, pp. 43-52, 1999.
- [14] A. Jaworek, A. Krupa, Classification of the modes of EHD spraying, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 30, No. 7, pp. 873-893, 1999.
- [15] M. Cloupeau B. Prunet-Foch, Electrostatic spraying of liquids; main functioning modes, *Journal of Electrostatics*, Vol. 25, No. 2, pp. 165-184, 1990.
- [16] A. Jaworek, A. Krupa, Main modes of electrohydrodynamic spraying of liquids, *Third International Conference on multiphase Flow*, Lyon, France, June 8-12, 1998.
- [17] R. Krpoun, H. R. Shea, A method to determine the onset voltage of single and arrays of electrospray emitters, *Journal of Applied Physics*, Vol. 104, No. 6, pp. 1-8, 2008.
- [18] J. F. De La Mora, The effect of charge emission from electrified liquid cones, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 243, No. 1, pp. 561-574, 1992.
- [19] J. Eggers, T. F. Dupont, Drop formation in a one-dimensional approximation of the navier-stokes equations, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 262, No. 1, pp. 205-221, 1994.
- [20] M. P. Brenner, J. Eggers, K. Joseph, S. R. Nagel X. Shi, Breakdown of scaling in droplet fission at high reynolds number, *Physics of Fluids*, Vol. 9, No. 6, pp. 1573-1590, 1997.
- [21] C. Pantano, A. M. Ganan-Calvo, A. Barrero, Zeroth-order electrohydrostatic solution for electrospraying in cone-jet mode, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 25, No. 6, pp. 1065-1077, 1994.
- [22] R. P. A. Hartman, J. P. Borra, D. J. Brunner, J. C. M. Marijnissen, B. Scarlett, The evolution of electrohydrodynamic sprays produced in the cone-jet mode; a physical model, *Journal of Electrostatics*, Vol. 47, No. 3, pp. 143-170, 1999.
- [23] F. Yan, B. Farouk, F. Ko, Numerical modeling of an electrostatically driven liquid meniscus in the cone-jet mode, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 34, No. 1, pp. 99-116, 2003.
- [24] J. Carretero, M. Martinez-Sanchez, Quasi-one-dimensional numerical simulation of a single-emitter colloidal jet, *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Indianapolis, Indiana, July 7-10, 2002.
- [25] J. Carretero, M. Martinez-Sanchez, Numerical simulation of a colloidal thruster in the droplet regime, *Computer physics communications*, Vol. 164, No. 1, pp. 202-208, 2004.
- [26] L. K. Lim, J. Hua, C. H. Wang, K. A. Smith, Numerical simulation of cone-jet formation in electrohydrodynamic atomization, *AIChE Journal*, Vol. 57, No. 1, pp. 57-78, 2011.
- [27] J. M. Lopez-Herrera, S. Popinet, M. A. Herrada, A charge-conservative approach for simulating electrohydrodynamic two phase flows using volume-of-fluid, *Journal of Computational Physics*, Vol. 230, No. 5, pp. 1939-1955, 2011.
- [28] M. A. Herrada, J. M. Lopez-Herrera, A. M. Ganan-Calvo, E. J. Vega, J. M. Montanero, S. Popinet, Numerical simulation of electrospray in the cone-jet mode, *Physical Review*, Vol. 86, No. 2, pp. 1-8, 2012.
- [29] J. Zeng, D. Sobek, T. Korsmeyer, Electrohydrodynamic modeling of