

## شبیه‌سازی عددی سه بعدی رفتار قطره و عکس العمل قطره و دیوار در میدان الکتریکی

مصطفی اکبری، سعید مرتضوی\*، حامد شاهین

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱ اردیبهشت ۱۳۹۵

بازنگری: ۲۸ اردیبهشت ۱۳۹۵

پذیرش: ۱۹ مرداد ۱۳۹۵

ارائه آنلاین: ۱۸ آبان ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

روش پیشروی جبهه

عدد موینگی الکتریکی

عدد اونسرج

نسبت هدایت‌پذیری/نفوذپذیری الکتریکی

تغییر شکل آبلیت/پرولیت

**چکیده:** در این پژوهش، رفتار قطره و نیز عکس العمل قطره و دیوار در میدان الکتریکی یکنواخت خارجی به صورت کاملاً سه بعدی شبیه‌سازی شده است. میدان الکتریکی با اعمال اختلاف پتانسیل ایجاد و سپس با استفاده از مدل نشت عایق تیلور، نیروی الکتریکی ناشی از این میدان، محاسبه و به معادلات نویر-استوکس اضافه شده است. این نیرو، بسته به خصوصیات الکتریکی قطره و سیال پیرامون، باعث تغییر شکل آن به صورت آبلیت (راستای عمود بر میدان الکتریکی) و یا پرولیت (در راستای میدان الکتریکی) و همچنین ایجاد جریان‌های القایی داخل و خارج قطره می‌شود. ابتدا تغییر شکل یک قطره‌ی تنها در میدان الکتریکی شبیه‌سازی و نتیجه با نتایج تجربی موجود، مقایسه و صحت‌سنجی شده است. سپس رفتار قطره در میدان الکتریکی از نظر نوع تغییر شکل و نوع جریان‌های القایی بررسی شده است. عکس العمل قطره و دیوار، برای قطره‌های آبلیت و پرولیت مورد بررسی قرار گرفته است. اثر عدد موینگی الکتریکی بر چگونگی عکس العمل قطره و دیوار و نیز حالت نهایی آنها، مطالعه شده است. هم‌قطرات آبلیت و هم پرولیت به دیوار جذب می‌شوند. افزایش عدد موینگی الکتریکی این اثر را تقویت می‌کند و تحت شرایطی می‌تواند باعث اعوجاج سطوح قطرات نیز بشود.

### ۱- مقدمه

الکتروهایدرودینامیک<sup>۱</sup> به عنوان یک پدیده‌ی بین رشته‌ای<sup>۲</sup>، در سال‌های اخیر مورد مطالعه‌ی محققین زیادی بوده است. این پدیده، با کوپل کردن هایدرودینامیک و الکترواستاتیک سر و کار دارد. به عبارت دیگر، هم‌جریان‌های الکتریکی شامل هایدرودینامیک و هم‌جریان‌های هایدرودینامیک تحت تأثیر میدان‌های الکتریکی را در بر می‌گیرد. از جمله مهم‌ترین کاربردهای آن می‌توان به طراحی و توصیف وسایل میکروسیالی<sup>۳</sup> اشاره کرد [۱]. در این وسایل، بسیاری از عملکردهای پایه‌ای مثل تولید قطره‌ها، جابه‌جایی، یکی شدن و یا شکست آن‌ها، توسط ایجاد ماهرانه‌ی میدان‌های الکتریکی انجام می‌شود [۲]. استفاده از نیروهای الکتریکی برای کنترل و هدایت سیالات، خصوصاً برای بسیاری از فرایندهای صنعتی که به منابع تغذیه‌ی مایع شامل قطره‌های کوچک احتیاج دارند؛ مثل پرینترهای جوهرافشان و اتمیزه کردن سوخت، از دیگر موارد کاربرد الکتروهایدرودینامیک است [۳]. بسیاری از کاربردهای بیوتکنولوژیکی که درگیر شکست جت‌های باردار هستند نیز از دیگر کاربردهای آن است [۴]. در بسیاری از این کاربردها، عکس العمل قطره‌ها با مجراهای هدایت‌کننده‌ی آن‌ها، امری اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین

درک چگونگی رفتار آن‌ها و نیز بررسی اثر عوامل و مولفه‌های دخیل، می‌تواند کمک شایانی به توسعه و پیشرفت این پدیده ارائه دهد.

به لحاظ فیزیکی هنگامی که یک سیال تحت اثر میدان الکتریکی قرار می‌گیرد؛ دو اثر ممکن است در آن رخ دهد: یکی قطبیده شدن مولکول‌های سیال و دیگری مهاجرت اهمی الکترون‌ها یا یون‌های آزاد در سیال. بنابراین رفتار الکتریکی سیال، به عایق کامل و رسانای کامل، محدود می‌شود. سیال عایق کامل، سیالی بدون یون و یا الکترون آزاد است و فقط اثر قطبش در آن اتفاق می‌افتد. سیال رسانای کامل سیالی است که هدایت‌پذیری آن به حد کافی زیاد است که بتوان تنها عامل انتقال بار را هدایت اهمی در نظر گرفت. مطالعات اولیه‌ی صورت گرفته در مورد تغییر شکل یک قطره‌ی عایق معلق در یک سیال مخلوط نشدنی دیگر، حاکی از وجود نیروهای عمود بر سطح مشترک و نهایتاً تغییر شکل قطره به صورت پرولیت<sup>۴</sup> (کشیدگی در راستای میدان) بود. کونسکی و تاچر<sup>۵</sup> [۵] ضمن به دست آوردن رابطه‌ای برای تغییر شکل یک قطره‌ی آبروسل مایع معلق در یک سیال عایق دیگر، از تغییر شکل آن به صورت کشیده در راستای میدان الکتریکی صحبت کردند. همچنین تیلور<sup>۶</sup> [۶] با بررسی تجزیه‌ی قطرات آب در میدان الکتریکی به صورت تجربی، مخروطی شدن آن‌ها (کشیدگی در راستای میدان الکتریکی)

- 1 Electrohydrodynamics (EHD)
- 2 Interdisciplinary Phenomenon
- 3 Microfluidic Devices

- 4 Prolate
- 5 O'Konski and Thacher
- 6 Taylor
- 7 Disintegration

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: saeedm@cc.iut.ac.ir

الکتريکی، برای تغییر شکل‌های کوچک، با تئوری تیلور انطباق خوبی داشت. در حالی که اکثر مطالعات الکتروهیدرودینامیکی صورت گرفته در مورد رفتار یک قطره‌ی مجزا و معلق در یک سیال دیگر تحت تأثیر میدان الکتريکی، به جریان آزاد (بدون اثرات دیوار) مربوط می‌شود؛ این رفتار در مجاورت دیوار به ندرت مورد توجه بوده است.

فرناندز<sup>۱۴</sup> و همکاران [۱۳]، با استفاده از روش پیشروی جبهه<sup>۱۵</sup> دو بعدی، ضمن بررسی امولسیون قطره‌های آبلیت و نیز عکس‌العمل آن‌ها با یکدیگر، از جذب شدن قطره‌های آبلیت در مجاورت دیوار به دیوار، صحبت کردند. عبدالحمید<sup>۱۶</sup> و اسماعیلی [۱۴]، ضمن مطالعه‌ی محاسباتی حالت گذرای الکتروهیدرودینامیک قطره‌های مایع، اثر دیوار را بر قطره‌های مجاور آن بررسی کردند. جذب شدن قطره‌های آبلیت و پرولیت با جریان‌های مشابه آبلیت، به دیوار و دفع قطره‌های پرولیت با جریان‌های مخالف با آبلیت، نتیجه‌ی کار آن‌ها بود. وانگ و همکاران [۱۵] رفتار یک حباب در حال دور شدن از یک لوله‌ی افقی با سطح مقطع مربعی را در شرایط جاذبه‌ی کوچک<sup>۱۷</sup> تحت تأثیر میدان الکتريکی غیر یکنواخت شبیه‌سازی کردند. آن‌ها با استفاده از روش واست<sup>۱۸</sup> (ترکیب روش کسر حجمی و سطح تراز) که با روش پالایش شبکه‌ی انطباقی<sup>۱۹</sup> همراه است، به صورت سه بعدی شبیه‌سازی را انجام دادند. بررسی اثرات جاذبه، شدت میدان الکتريکی، نفوذپذیری سیال و موقعیت مکانی اولیه‌ی حباب بر روی حرکت حباب صورت گرفت و این نتایج حاصل شد: (۱) جاذبه، دور شدن حباب از سطح را به دلیل نیروی شناوری تقویت می‌کند. (۲) میدان الکتريکی غیر یکنواخت همانند نیروی شناوری، بالا رفتن حباب را تقویت می‌کند. با افزایش شدت میدان الکتريکی و یا نسبت نفوذپذیری الکتريکی سیال به گاز، حباب دچار تغییر شکل بزرگتر شده و سرعت دور شدن آن از سطح افزایش می‌یابد. (۳) وقتی میدان الکتريکی غیر یکنواخت در اطراف حباب نامتقارن باشد؛ سرعت، مؤلفه‌ی افقی پیدا کرده و در نتیجه، مسیر بالا رفتن حباب مستقیم نخواهد بود. هم‌چنین، نیروهای نامتقارن الکتريکی سبب تغییر شکل نامنظم حباب می‌شوند.

در این مقاله، رفتار کلی قطره در میدان الکتريکی و نیز عکس‌العمل قطره و دیوار فقط در حضور میدان الکتريکی بررسی شده است. همان‌طور که اشاره شد؛ مطالعات صورت گرفته در زمینه رفتار قطره در مجاورت دیوار تحت تأثیر میدان الکتريکی، جامع و مفصل نیست. به عبارت دیگر، پژوهشی که به بررسی عکس‌العمل قطره‌ها با دیوار، با در نظر گرفتن پارامترهای دخیل بپردازد، یافت نشده است. ضمن این‌که مسئله برای اولین بار است که به صورت کاملاً سه بعدی شبیه‌سازی می‌شود. در ادامه به معرفی فیزیک و هندسه‌ی مسئله و همچنین اعداد بدون بعد و معادلات حاکم پرداخته شده و نهایتاً نتایج شبیه‌سازی ارائه شده‌اند.

تا قبل از شکست را گزارش کرد. باساران و اسکریون<sup>۱</sup> شکل نهایی یک قطره‌ی هادی<sup>۲</sup> معلق در یک سیال عایق را با روش المان محدود گالرکین شبیه‌سازی و عنوان کرد که این قطره به صورت مخروطی (کشیدگی در راستای میدان الکتريکی) تغییر شکل می‌دهد.

با این وجود آزمایش‌های آلن و میسون<sup>۳</sup> [۷] وجود تغییر شکل آبلیت<sup>۴</sup> (کشیدگی در راستای عمود بر جهت میدان) را نشان داد. این پدیده توسط تیلور و با معرفی مدل نشت عایق<sup>۵</sup> توضیح داده شد [۸]. به این صورت که سیال کاملاً عایق در طبیعت وجود ندارد و حتی وجود هدایت‌پذیری ناچیز در سیال اصلی هم سبب انتقال بارها به سطح مشترک می‌شود. نتیجه‌ی آن، ایجاد تنش‌های مماسی و حرکت سیال در امتداد مرزهای قطره است که منجر به ایجاد جریان‌های گردشی در داخل و خارج قطره می‌شود. جهت این جریان‌ها به نسبت هدایت‌پذیری و نفوذپذیری الکتريکی قطره و سیال پیرامون و شدت آن‌ها به قدرت میدان الکتريکی بستگی دارد. تیلور یک رابطه‌ی تئوری نیز جهت پیش‌بینی تغییر شکل‌های کوچک قطره‌ها ارائه کرد که در قسمت‌های بعد به تفصیل به آن پرداخته می‌شود. ساویه<sup>۶</sup> [۹]، بررسی جامعی درباره‌ی مدل نشت عایق انجام داده است.

محققین زیادی به شبیه‌سازی عددی و نیز تجربی تغییر شکل قطره در میدان الکتريکی پرداختند و اکثراً از تطابق قابل قبول نتایج خود با تئوری تیلور البته برای تغییر شکل‌های کوچک صحبت کردند. تسوکادا<sup>۷</sup> و همکاران [۱۰]، جریان گردشی القایی داخل و خارج یک قطره معلق تنها را با استفاده از روش المان محدود گالرکین مطالعه کردند و تطابق خوبی، هم بین نتایج آزمایش‌های خود و هم نتایج تحلیلی تیلور به دست آوردند. ژانگ<sup>۸</sup> و همکارش برای اولین بار با استفاده از روش لیس بولتزمن<sup>۹</sup>، تغییر شکل یک قطره را تحت تأثیر میدان الکتريکی بررسی و نتایج قابل قبولی با توجه به تئوری تیلور ارائه کردند. پاک نعمت و همکاران [۱۱]، به مطالعه‌ی رفتار یک قطره‌ی کاملاً عایق و یک قطره با رسانایی ناچیز تحت تأثیر میدان الکتريکی یکنواخت، با استفاده از روش سطح تراز پرداختند و شرایط شکست<sup>۱۰</sup> قطره را در اعداد موینگی الکتريکی<sup>۱۱</sup> بحرانی، بررسی کردند. هو<sup>۱۲</sup> و همکاران [۱۲] با استفاده از روش یک روش ترکیبی مرز شناور و سطح مشترک شناور<sup>۱۳</sup>، دینامیک قطره را تحت تأثیر میدان الکتريکی بررسی کردند. روش آن‌ها در نسبت‌های مختلف هدایت‌پذیری و نفوذپذیری

- 1 Basaran and Scriven
- 2 Conducting Drop
- 3 Allan and Mason
- 4 Oblate
- 5 Leaky Dielectric Model
- 6 Saville
- 7 Tsukada
- 8 Zhang
- 9 Lattice Boltzmann
- 10 Breakup
- 11 Electric Capillary
- 12 Hu
- 13 Hybrid Immersed Boundary and Immersed Interface Method

- 14 Fernandez
- 15 Front-tracking
- 16 Abdul Halim
- 17 Microgravity
- 18 VOSET
- 19 Adaptive Mesh Refinement(ADM)

## ۲- فیزیک و معادلات حاکم

### ۲-۱- هندسه‌ی جریان

در شکل ۱ هندسه‌ی حاکم بر یک قطره‌ی معلق در یک سیال مخلوط نشدنی دیگر تحت تأثیر میدان الکتریکی یکنواخت خارجی نمایش داده شده است. همان طور که مشخص است ناحیه‌ی حل یک ناحیه‌ی کاملاً سه‌بعدی و به شکل مکعب مستطیل است که طول ( $L$ ) و ارتفاع آن ( $H$ )، هم‌اندازه و هشت برابر شعاع قطره ( $a$ ) است و عرض آن ( $W$ )، نصف طول ( $L$ ) است.

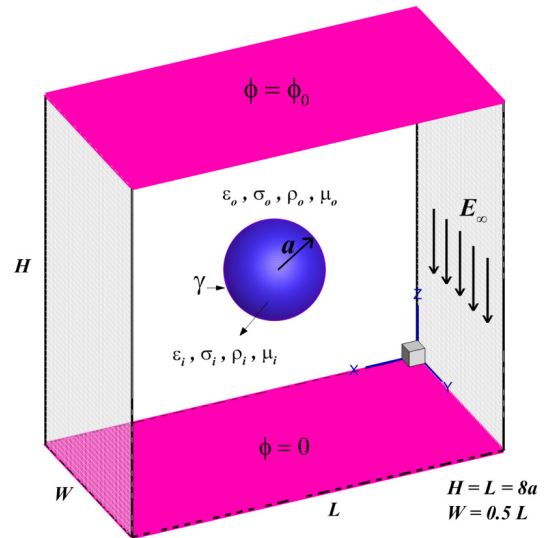


Fig. 1. Schematic of Three Dimensional Domain Influenced by Electric Field for a Drop Suspended in an Immiscible Fluid

شکل ۱: شمای سه‌بعدی ناحیه‌ی حل برای قطره‌ی معلق در سیال مخلوط نشدنی دیگر تحت تأثیر میدان الکتریکی یکنواخت خارجی

قطره در ابتدا بدون تغییر شکل و به صورت کروی بوده و در مرکز ناحیه‌ی حل قرار دارد. میدان الکتریکی ( $E_\infty$ ) به صورت اعمال اختلاف پتانسیل الکتریکی ( $\phi_0$ ) به بالا و پایین ناحیه‌ی حل اعمال شده است. زیرنویس  $i$  به قطره و زیرنویس  $o$  به سیال پیرامون اشاره دارد.  $\sigma$  هدایت‌پذیری الکتریکی،  $\varepsilon$  نفوذپذیری الکتریکی،  $\rho$  چگالی و  $\mu$  چسبندگی هستند.  $\gamma$  نیز کشش سطحی را نشان می‌دهد (این پارامترها در سرتاسر این مقاله و روابط آن، دارای همین تعریف هستند مگر اینکه به صورت صریح اشاره شود). ناحیه‌ی حل در جهت محور  $Z$  دارای شرط مرزی دیوار و در جهت‌های  $X$  و  $Y$  پریودیک است.

### ۲-۲- پارامترهای بدون بعد

مهم‌ترین پارامترهای بدون بعد حاکم بر مسائل الکتروهیدروپدینامیک در جدول ۱ آورده شده‌اند. در این جدول نیز همانند شکل ۱، زیرنویس  $i$  به قطره و زیرنویس  $o$  به سیال پیرامون اشاره دارد. در تمامی شبیه‌سازی‌های انجام شده در این تحقیق، نسبت چگالی و نسبت چسبندگی ثابت و برابر

با یک انتخاب شده‌اند. در محاسبه‌ی زمان بی بعد الکتریکی،  $t_e = \frac{\varepsilon \varepsilon_e}{\sigma}$  زمان استراحت الکتریکی است که عبارت است از زمان انتقال بارهای آزاد

جدول ۱: پارامترهای بدون بعد مورد استفاده در مسائل الکتروهیدروپدینامیک

Table 1. Dimensionless Parameters of Electrohydrodynamics

تعریف	پارامتر بدون بعد
$r = \frac{\rho_i}{\rho_o}$	نسبت چگالی
$\lambda = \frac{\mu_i}{\mu_o}$	نسبت چسبندگی
$\sigma_r = \frac{\sigma_i}{\sigma_o}$	نسبت هدایت‌پذیری الکتریکی
$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_o}$	نسبت نفوذپذیری الکتریکی
$\tau = \frac{t_e}{t_h}$	زمان بی بعد الکتریکی
$Ca_e = \frac{\varepsilon_o E_\infty^2 a}{\gamma}$	عدد موینگی الکتریکی
$Re_E = \frac{\rho \varepsilon_o E_\infty^2 a^2}{\mu^2}$	عدد رینولدز الکتریکی
$Oh = \frac{\mu_o}{\sqrt{\gamma \rho_o a}}$	عدد اونسرج

از توده‌ی سیال به سطح مشترک. ضمن اینکه  $\varepsilon_e = 8/885 \times 10^{-12}$  [F/m] ضریب نفوذپذیری الکتریکی خلأ و  $t_h = \sqrt{\frac{\rho a^3}{\gamma}}$  نیز زمان مشخصه‌ی هیدروپدینامیکی است.

در مدل نشت عایق تیلور فرض بر این است که زمان استراحت الکتریکی در مقایسه با زمان مشخصه‌ی هیدروپدینامیکی ناچیز باشد. به عبارت دیگر مقدار  $\tau$  بسیار کوچک باشد. لازم به ذکر است که اعداد بدون بعد رینولدز الکتریکی، موینگی الکتریکی و اونسرج<sup>۱</sup> به هم وابسته بوده و رابطه‌ی  $Oh = \sqrt{\frac{Ca_e}{Re_E}}$  بین آن‌ها برقرار است. در مسائل الکتروهیدروپدینامیک، معمولاً عدد موینگی الکتریکی به همراه یکی از اعداد رینولدز الکتریکی و یا اونسرج مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۲-۳- معادلات حاکم

در جریان‌های چند فازی، نیروی بویانسی برای شرایط کاربردی وسیعی حاکم است. در نیروهای جاذبه‌ی میکرو، نیروی بویانسی ضعیف بوده و نیروی کشش سطحی شاخص‌ترین نیرو خواهد بود. بنابراین نیروهای الکترواستاتیکی، ترموکپیلاری و آکوستیکی می‌توانند باعث جریان یافتن سیال و تغییر شکل سطح مشترک شوند.

است:

$$\nabla u = 0 \quad (۶)$$

#### ۲-۴- روش حل عددی

روش عددی مورد استفاده در این پژوهش، روش پیشروی جبهه/حجم محدود است که توسط اونوردی و تریگواسون<sup>۵</sup> [۱۸] در سال ۱۹۹۲ توسعه یافته است. معادلات نویر-استوکس با استفاده از روش مرتبه دوم تصویرسازی حل شده‌اند. معادله‌ی مومنتوم روی یک شبکه‌ی جابه‌جا شده<sup>۶</sup> و با استفاده از روش مرتبه دوم اختلاف محدود مرکزی، برای جملات جابه‌جایی و چسبندگی، گسسته شده است. از روش پیش‌بینی کننده-تصحیح‌کننده<sup>۷</sup> مرتبه دوم نیز برای انتگرال زمانی، استفاده شده است. از ترکیب معادله‌های پیوستگی و مومنتوم یک معادله‌ی فشار حاصل شده که توسط روش چند شبکه‌ای حل شده است.

معادله‌ی بقای بار (رابطه‌ی (۱)) با روش اختلاف مرکزی استاندارد گسسته شده و به وسیله‌ی همان روش چند شبکه‌ای مورد استفاده در معادله‌ی فشار، حل شده است. پتانسیل الکتریکی در مرکز سلول‌های فشار و نیروهای الکترواستاتیکی در مرز سلول‌ها، جایی که سرعت‌ها ذخیره می‌شوند، محاسبه شده است. نیروهای الکترواستاتیکی مستقیماً به مرحله‌ی پیش‌بینی روش تصویرسازی اضافه شده‌اند. به طور کلی، حل معادلات نویر-استوکس با سطح آزاد و یا سطح مشترک، مسئله ساده‌ای نیست. خصوصاً برای وقتی که اثرات الکترواستاتیکی با دینامیک سیال کوپل می‌شوند. روش پیشروی جبهه که از روش‌های مستقیم حل عددی<sup>۸</sup> است، به دلیل دقت بالاتر در محاسبه‌ی بیشتر جزئیات، توانایی بسیار خوبی در این زمینه دارد. یک مرور جامع از این روش را با چندین مثال و صحت‌سنجی، می‌توان در مرجع [۱۷] یافت.

#### ۲-۵- انواع تغییر شکل و جریان‌های القایی

همان‌طور که اشاره شد؛ در اثر اعمال میدان الکتریکی، قطره تغییر شکل می‌دهد که این تغییر شکل بسته به خصوصیات الکتریکی سیال می‌تواند به صورت ابلیت و یا پرولیت باشد. تیلور با فرض این که هر دو سیال چسبنده و رسانا باشند عبارتی برای تغییر شکل‌های کوچک پیشنهاد کرد [۸]:

$$D = \frac{9}{16} \frac{Ca_e}{(\gamma + \sigma_r)^2} \left[ 1 + \sigma_r^2 - 2\epsilon_r + \frac{3}{5} (\sigma_r - \epsilon_r) \frac{2 + 3\lambda}{1 + \lambda} \right] \quad (۷)$$

او همچنین عبارت کلی زیر را برای پیش‌بینی تغییر شکل ارائه کرد:

$$D = \frac{L - B}{L + B} \quad (۸)$$

فیزیک الکتروهیدرودینامیکی حاکم بر جریان‌های چند فازی، توسط چندین مؤلف شامل ملچر<sup>۱</sup> و تیلور [۱۶] و ساویه [۹] که مدل نشت عایق تیلور را بررسی کرده‌اند، مرور شده است. همان‌طور که اشاره شد، در مدل نشت عایق، مقیاس زمانی استراحت بار الکتریکی<sup>۲</sup> در مقایسه با مقیاس زمانی هیدرودینامیکی کوچک است. بنابراین می‌توان میدان الکتریکی را شبه استاتیکی<sup>۳</sup> فرض کرد. در این شرایط معادله‌ی بقای بار در حالت دائم به صورت زیر خواهد بود:

$$\nabla \cdot \sigma \nabla \phi = 0 \quad (۱)$$

میدان الکتریکی ( $E$ ) نیز از رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$E = -\nabla \phi \quad (۲)$$

یکی از خصوصیات مهم الکتروهیدرودینامیک، طبیعت غیرچرخشی میدان الکتریکی است. در این مسائل، جریان‌های دینامیکی الکتریکی به قدری کوچک هستند که القای مغناطیسی قابل صرف‌نظر است. در نتیجه، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بیان شده توسط قانون القای فارادی، در غیاب میدان مغناطیسی متغیر، جدا می‌شوند و ارتباطی به هم ندارند. بار آزاد توسط قانون گاوس<sup>۴</sup> بدست می‌آید:

$$q = \nabla \cdot \epsilon E \quad (۳)$$

ملچر و تیلور [۱۶] نیروی اعمالی روی مرزهای دو سیال را ناشی از پرش در تنش‌های الکتریکی عنوان کردند. نتیجه‌ی نهایی برای نیروی واحد حجم به صورت زیر است:

$$F_{El} = qE - \frac{1}{4} (E \cdot E) \nabla \epsilon + \nabla \left( \frac{1}{4} (E \cdot E) \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \right) \quad (۴)$$

اگر  $\epsilon$  و  $\sigma$  در هر دو سیال ثابت باشند این نیرو فقط بر سطح مشترک عمل می‌کند. اولین ترم در این رابطه، بیان‌گر اثر حضور بارهای آزاد است و در واقع چگالی نیروی ناشی از بارهای آزاد است. ترم دوم، ناشی از قطبش ملکول‌های سیال است و از تفاوت در ضرایب نفوذپذیری دو سیال ناشی می‌شود و به چگالی نیروی قطبش موسوم است. ترم آخر که عمدتاً از آن صرف‌نظر می‌شود، از تغییر در چگالی مواد ناشی می‌شود و در این مسئله هم از آن صرف‌نظر شده است. میدان جریان از حل معادلات نویر-استوکس حاصل می‌شود [۱۷]:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u u = -\nabla P + \nabla \cdot \mu (\nabla u + \nabla u^T) + \gamma \int \kappa' n' \delta^\beta (x - x') dA + F_{El} \quad (۵)$$

معادله‌ی پیوستگی نیز با فرض هر دو سیال تراکم ناپذیر به صورت زیر

5 Unverdi and Tryggvason

6 Staggered

7 Predictor-Corrector

8 Direct Numerical Simulations (DNS)

1 Melcher

2 Charge Relaxation Time Scale

3 Quasi-Steady

4 Gauss' Law

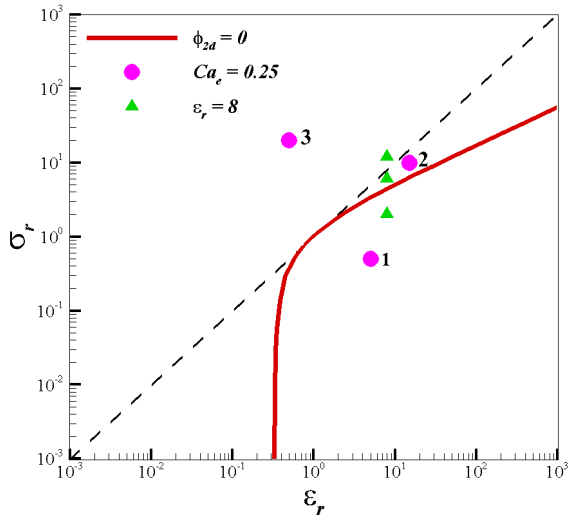


Fig. 3. Behavior Predictor Map of Drops. Solid-Line Indicates Discrimination Function and the Symbols are Present Case Studies.

شکل ۳: نمودار پیش‌بینی تغییر شکل قطره و نوع جریان‌های القایی. خط ممتد نمودار تابع شاخص  $(\Phi_{2d} = +)$  و تعیین‌کننده نوع تغییر شکل و خط‌چین متمایز‌کننده نوع جریان‌های القایی است. نمادهای نشان‌دهنده شامل مثلث و دایره (اعداد) نیز نمونه‌های بررسی شده در این تحقیق هستند.

$$E_{crit}^* = \frac{2\sigma_o\mu_o(\tau + \sigma_r)^2}{3\varepsilon_i\varepsilon_o(1 - \sigma_r/\varepsilon_r)} \quad (11)$$

در تمامی شبیه‌سازی‌های انجام شده در این تحقیق، هدایت‌پذیری الکتریکی قطره از سیال پیرامون آن بیشتر است و بنابراین اساساً شرایط ایجاد چرخش وجود ندارد.

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- صحت‌سنجی

به منظور صحت‌سنجی نتایج، رفتار کلی یک قطره‌ی معلق در یک سیال مخلوط‌نشده دیگر تحت اثر میدان الکتریکی یکنواخت خارجی (شکل ۱)، بررسی شده است. این بررسی، هم برای تغییر شکل کمی و کیفی قطره و هم برای نوع جریان‌های القایی در داخل و خارج قطره انجام شده است.

#### ۳-۱-۱- تغییر شکل قطره

برای بررسی کمی اندازه‌ی تغییر شکل قطره در میدان الکتریکی، از داده‌های آزمایشگاهی تورزا<sup>۳</sup> و همکاران [۲۱] و مشخصاً نمونه‌ی سیستم ۱۶ کلاس C استفاده شده است. در این نمونه، قطره از جنس روغن سیلیکون<sup>۴</sup> و سیال پیرامون آن، روغن کرچک اکسید شده<sup>۵</sup> می‌باشد. مقادیر خصوصیات مکانیکی و الکتریکی آن‌ها در جدول ۲ موجودند.

که در آن قطر قطره در راستای میدان الکتریکی و  $B$  قطر قطره در راستای عمود بر آن است. در هر دو رابطه، تغییر شکل مثبت، قطره‌ی پرولیت و تغییر شکل منفی، قطره‌ی آبلیت را نشان می‌دهد. در شکل ۲ نوع تغییر شکل قطره با توجه به علامت  $D$  و جهت میدان الکتریکی نمایش داده شده است.

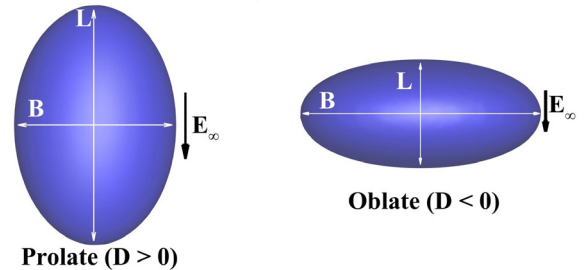


Fig. 2. Deformation Types Based on the Electric Field Direction

شکل ۲: نوع تغییر شکل بر اساس علامت  $D$  و جهت میدان الکتریکی

در ادامه، انواع جریان‌های القایی ناشی از اعمال میدان الکتریکی، توصیف شده است. برای این منظور، یک تابع شاخص<sup>۱</sup> برای تعیین نوع تغییر شکل و همچنین الگوی جریان‌های القایی معرفی شده است. این تابع برای قطره‌های سه‌بعدی، توسط تیلور به صورت زیر بیان شده است:

$$\Phi = \varepsilon_r(\sigma_r^2 + 1) - 2 + \frac{3}{5} \left[ \left( \frac{\sigma_r}{\varepsilon_r} \right) - 1 \right] \frac{2\lambda + 3}{\lambda + 1} \quad (9)$$

که  $\Phi$  مثبت قطره‌های پرولیت و  $\Phi$  منفی قطره‌های آبلیت را نشان می‌دهد. رودز<sup>۲</sup> و همکاران [۱۹] یک تابع شاخص مشابه، برای قطره‌های دو بعدی و  $\lambda=1$  به صورت زیر ارائه کردند:

$$\Phi_{2d} = \sigma_r^2 + \sigma_r + 1 - 2\varepsilon_r \quad (10)$$

در شکل ۳ نمودار این تابع برحسب نسبت هدایت‌پذیری  $(\sigma_r)$  به نسبت نفوذپذیری  $(\varepsilon_r)$  رسم شده است. در این شکل، خط منحنی پررنگ نشان‌دهنده  $\Phi_{2d}=0$  است. زیر این منحنی  $(\Phi_{2d} < 0)$ ، قطره‌ها به شکل آبلیت و بالای آن  $(\Phi_{2d} > 0)$ ، به شکل پرولیت تغییر شکل می‌دهند. خط‌چین  $(\sigma_r = \varepsilon_r)$ ، الگوی جریان‌های القایی را مشخص می‌کند. زیر این خط  $(\sigma_r < \varepsilon_r)$ ، جریان از سمت قطب‌ها به طرف مرکز و بالای آن  $(\sigma_r > \varepsilon_r)$ ، جهت جریان از مرکز به سمت قطب‌ها خواهد بود.

بر اساس مرجع [۲۰] برای شرایطی که هدایت‌پذیری الکتریکی قطره از سیال پیرامون آن کمتر باشد، پدیده‌ای موسوم به چرخش کوئینک - که برای اولین بار توسط کوئینک در سال ۱۸۹۶ کشف شد - می‌تواند اتفاق بیفتد به شرطی که میدان الکتریکی از مقدار بحرانی آن یعنی رابطه‌ی (۱۱) بیشتر باشد. در این صورت قطره‌ی معلق در میدان الکتریکی، شروع به چرخش می‌کند.

3 Torza

4 Silicon Oil

5 Oxidized Castor Oil

1 Discrimination Function

2 Rhodes

۳-۱-۲- بررسی انواع جریان‌های القایی

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، بسته به نسبت هدایت‌پذیری و نفوذپذیری قطره و سیال پیرامون، دو الگوی جریان در داخل و خارج قطره ایجاد می‌شود. برای نشان دادن این الگوها از نقاط ۱، ۲ و ۳ موجود در شکل ۵ استفاده شده است. چون نقاط ۱ و ۲ زیر خط  $\sigma_r = \sigma_r = \epsilon_r$  هستند، الگوی جریان آن‌ها از قطب‌ها به طرف مرکز و برای نقطه‌ی ۳ که بالای خط مذکور قرار دارد، جهت جریان برعکس است. در شکل ۵ این جریان‌ها نشان داده شده‌اند. ضمن این‌که نوع تغییر شکل قطره‌ها از نظر ابلیت و پرولیت نیز قابل مشاهده است.

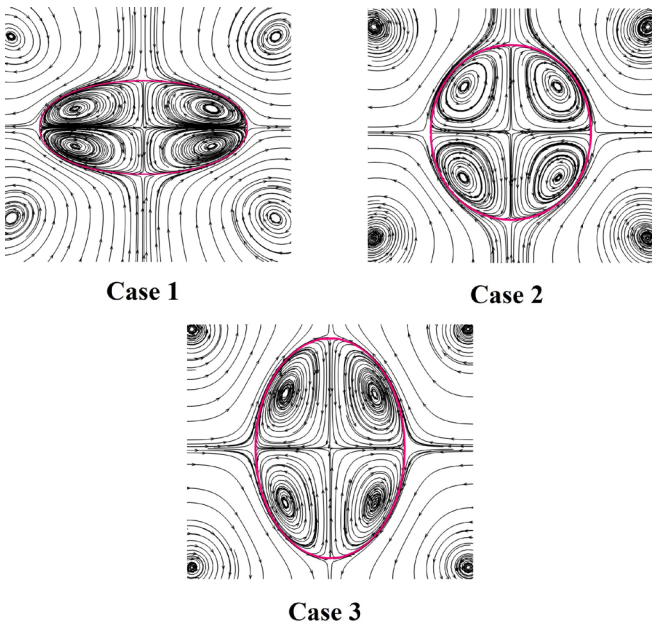


Fig. 5. Induced Electrohydrodynamic Flows Inside and Outside of the Drops for Case Studies of Fig. 3: Case 1 (Top-left), Case 2 (Top-right) and Case 3 (Bottom).

شکل ۵: جریان‌های القایی داخلی و خارج قطره برای نمونه‌های ۱ (سمت چپ)، ۲ (سمت راست) و ۳ (پایین) در شکل ۳

۳-۲- عکس العمل قطره و دیوار

ابتداءً، شبکه‌ی حل برای انتخاب بهترین شبکه از نظر دقت محاسبات، مطالعه شده است. برای این منظور، تغییر شکل یک قطره با شرایط هندسی موجود در شکل ۱ و پارامترهای  $Ca_e = 0.1$ ،  $\sigma_r = 2$  و  $\epsilon_r = 8$  شبیه‌سازی شده است. نمودار تغییر شکل ( $D$ )، نسبت به زمان در شکل ۶ ارائه شده است. شبکه‌ی  $96 \times 48 \times 96$  با توجه به اختلاف ناچیز آن با شبکه‌های ریزتر، به عنوان شبکه‌ی حل انتخاب می‌شود. در این حالت، تعداد ۲۴ گره در سطح قطره وجود دارد.

شکل ۷ شرایط اولیه را برای بررسی عکس العمل قطره با دیوار نشان می‌دهد. در این شکل،  $d_w$  فاصله‌ی عمودی مرکز قطره از دیوار است. سایر شرایط هندسی و فیزیکی، دقیقاً مشابه شرایط شکل ۱ هستند. این بررسی برای سه قطره که با نماد مثلث در شکل ۳ نشان داده شده‌اند، انجام شده

جدول ۲: خصوصیات مکانیکی و الکتریکی سیالات مورد استفاده توسط تورزا و همکاران (کلاس C سیستم ۱۶) [۲۱].

Table 2. Mechanical and Electrical Properties of the Fluids used by Torza et al. [21]

سیال پیرامون	قطره	خصوصیات
۹۸۰	۹۸۰	چگالی [kg/m <sup>3</sup> ]
۶/۵	۵/۴	چسبندگی [kg/m.s]
$1 \times 10^{-9}$	$3/3 \times 10^{-11}$	هدایت‌پذیری الکتریکی [S/m]
۶/۳	۲/۷۷۲	نفوذپذیری الکتریکی [pF/m]

مقدار کشش سطحی نیز برای روغن سیلیکون  $0.016$  نیوتن بر متر، در نظر گرفته شده است. ناحیه‌ی حل مورد استفاده، دقیقاً مشابه ناحیه‌ی توصیف شده در شکل ۱ است. در شکل ۴ نتایج شبیه‌سازی برای اعداد موینگی  $0.137$ ،  $0.38$  و  $0.745$  به ترتیب از پایین به بالا به صورت کمی و کیفی مقایسه شده‌اند. بین نتایج عددی و آزمایش به ترتیب افزایش عدد موینگی،  $3.5$ ،  $1.6$  و  $5$  درصد خطا وجود دارد که نشان از دقت بالای روش به کار رفته است.

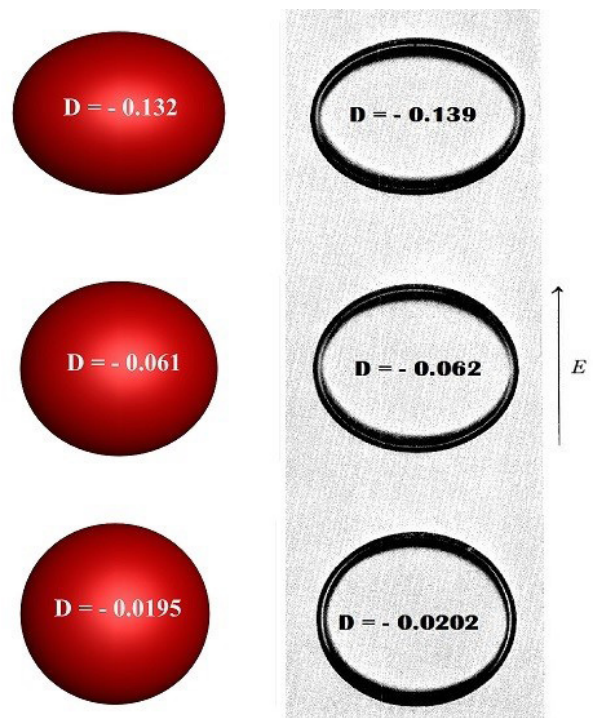


Fig. 4. Comparison of Experimental (right) and Numerical (left) Studies of Drop Deformation performed by Torza et al. [21] and Present Study, Respectively. The Electric Capillary Number is Increased from Bottom to Top.

شکل ۴: مقایسه‌ی مقادیر تجربی و عددی تغییر شکل قطره‌ها به ترتیب افزایش عدد موینگی از پایین به بالا. شکل سمت راست داده‌های تجربی تورزا و همکاران [۲۱] و شکل سمت چپ نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاضر است.

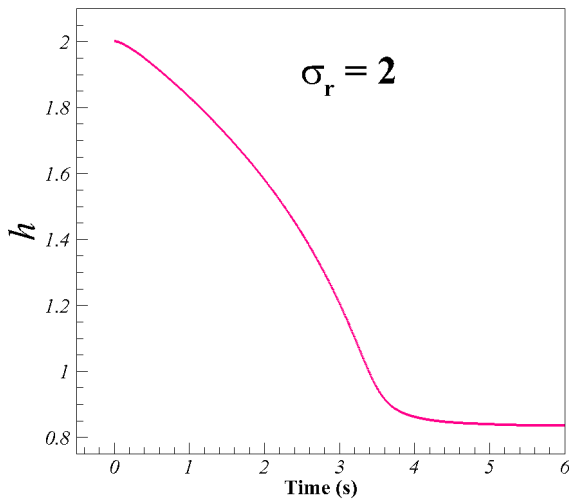


Fig. 8. Variations of Distance per Time between Drop-center and the Wall for Oblate Drops.

شکل ۸: تغییرات فاصله‌ی عمودی مرکز قطره‌ی آبلیت از دیوار نسبت به زمان.

حالت نهایی نشست قطره‌ی آبلیت بر روی دیوار به همراه خطوط جریان اطراف قطره و بردارهای سرعت در داخل قطره، در شکل ۹ نشان داده شده است.

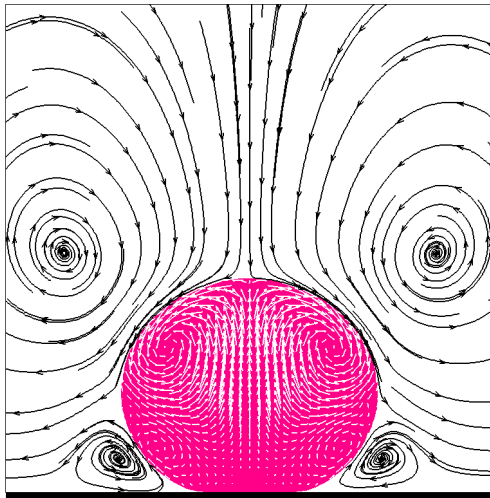


Fig. 9. Final State for Interaction of Oblate Drops with the Wall Including Streamlines.

شکل ۹: حالت نهایی نشست قطره‌ی آبلیت بر روی دیوار به همراه خطوط جریان اطراف قطره و بردارهای سرعت در داخل قطره

در این حالت نیز چهار گردابه‌ی ماریچی<sup>۱</sup> مانند حالت تغییر شکل یک قطره در وسط ناحیه‌ی حل (شکل ۵)، در داخل و خارج قطره وجود دارد. بنابراین جذب شدن قطره‌های آبلیت به دیوار مانند کارهای انجام شده توسط عبدالحلیم و اسماعیلی [۱۴] و همچنین فرناندز و همکاران [۱۳]، قابل مشاهده است.

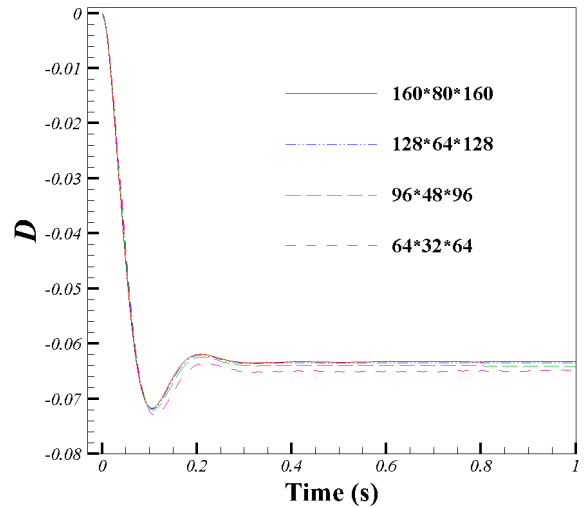


Fig. 6. Grid Study of the present work. Selected Grid size is 96\*48\*96 with Less than 2% Discrepancy with Finer Grid.

شکل ۶: مطالعه‌ی چهار شبکه‌ی مختلف و انتخاب شبکه‌ی ۹۶×۴۸×۹۶ با توجه به اختلاف کمتر از ۲ درصد با ریزترین شبکه

است. برای این نمونه‌ها به ترتیب از بالا به پایین  $\sigma_r=12$  (قطره‌ی پرولیت)  $\sigma_r=6$  (قطره‌ی پرولیت) و  $\sigma_r=2$  (قطره‌ی آبلیت) و برای همه‌ی آنها  $\varepsilon_r=8$  است. با معرفی پارامتر بی بعد  $h=d_w/a$  که شعاع قطره است؛ عکس العمل هر یک از این قطره‌ها با دیوار بررسی شده است.

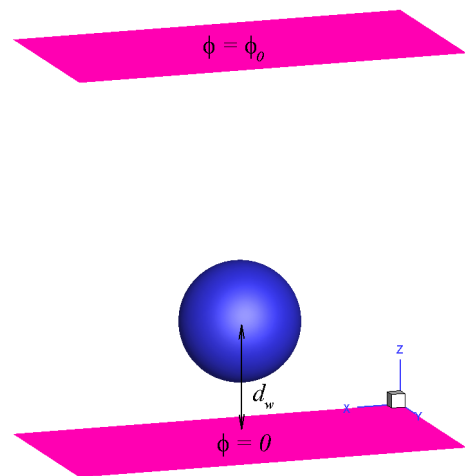


Fig. 7. Initial State for Drop to Wall Interaction

شکل ۷: شرایط اولیه برای عکس العمل قطره و دیوار

۱- ۲- ۳- قطره‌ی آبلیت

عکس العمل قطره‌ی آبلیت با دیوار، به ازای  $h=2$  بررسی شده است. قطره‌ی آبلیت پس از تغییر شکل، به سمت دیوار حرکت کرده و در نهایت روی دیوار می‌نشیند. در شکل ۸ روند تغییرات فاصله‌ی عمودی مرکز قطره از دیوار ( $h$ )، نسبت به زمان برای قطره‌ی آبلیت رسم شده است. همان‌طور که مشخص است، این فاصله به تدریج کم شده و هنگامی که قطره بر روی دیوار ساکن شد، ثابت می‌شود.

یکسان بودن خطوط جریان این نوع قطره‌ی پرولیت با قطره‌های آبلیت به وضوح قابل مشاهده است. به همین دلیل رفتار هر دو نوع قطره در مجاورت دیوار، مشابه است.

### ۳-۲-۳-۳- قطره‌ی پرولیت ( $\sigma_r > \epsilon_r$ )

این نوع قطره‌ها دارای جریان‌های القایی مخالف قطره‌های آبلیت و پرولیت با  $\sigma_r < \epsilon_r$  هستند. برای قطره با  $\sigma_r = 12$  و به ازای  $h = 2$  قطره فقط تغییر شکل می‌دهد و هیچ حرکت جذب یا دفع شونده‌ای نسبت به دیوار ندارد و ساکن می‌ماند. با کم کردن  $h$  و به ازای  $h = 1/667$  قطره به سمت دیوار حرکت کرده و به آن می‌چسبد. این در حالی است که پژوهش عبدالحلیم و اسماعیلی [۱۴]، دفع شدن این نوع قطره‌ها از دیوار را گزارش می‌دهد. در شکل ۱۲ نمودار تغییرات  $h$  نسبت به زمان برای قطره‌ی پرولیت با  $\sigma_r = 12$  رسم شده است.

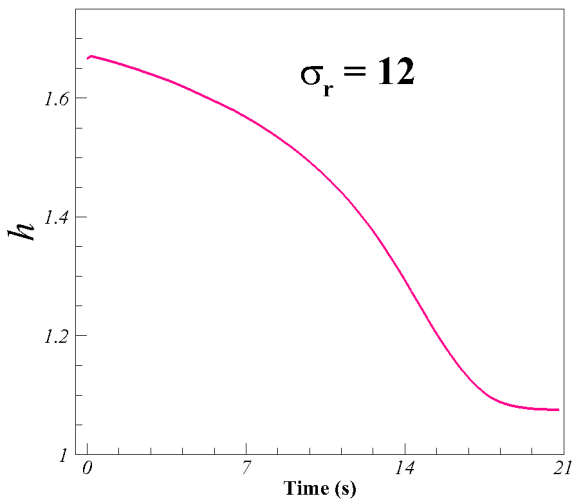


Fig. 12. Variations of Distance per Time between Drop-center and the Wall for Prolate Drops ( $\sigma_r = 12$ ).

شکل ۱۲: تغییرات فاصله‌ی عمودی مرکز قطره‌ی پرولیت ( $\sigma_r = 12$ ) از دیوار نسبت به زمان

در شکل ۱۳ حالت نهایی قطره‌ی پرولیت ( $\sigma_r = 12$ ) به همراه خطوط جریان اطراف قطره و بردارهای سرعت داخل آن نمایش داده شده‌اند. متفاوت بودن الگوی جریان القایی برای این نوع قطره‌ها نسبت به قطره‌های آبلیت و پرولیت با  $\sigma_r < \epsilon_r$  می‌تواند دلیلی بر تفاوت رفتار آن‌ها در عکس‌العمل با دیوار باشد. در شکل‌های ۹ و ۱۱ علاوه بر این که خطوط جریان بالای قطره به سمت دیوار است؛ در نواحی گردابه‌ای مجاور قطره و دیوار، جهت جریان به سمت اطراف قطره است. بنابراین قطره‌ها به سمت دیوار حرکت کرده و جذب آن می‌شوند. ولی در شکل ۱۳ ضمن این که خطوط جریان در بالای قطره از دیوار دور می‌شوند؛ جهت جریان‌های گردابه‌ای مجاور دیوار نیز در جهت دور شدن از دیوار است. به همین دلیل قطره از دیوار دور می‌شود. اما دلیلی که باعث جذب شدن قطره‌های پرولیت با  $\sigma_r > \epsilon_r$  در فواصل

### ۳-۲-۲- قطره‌ی پرولیت ( $\sigma_r < \epsilon_r$ )

برای این نوع قطره‌ی پرولیت ( $\sigma_r = 6$ )، با جریان‌های القایی مشابه قطره‌ی آبلیت، عکس‌العمل قطره و دیوار، به ازای  $h = 6$  بررسی شده است. این نوع قطره نیز مشابه قطره‌ی آبلیت، پس از تغییر شکل به سمت دیوار حرکت کرده و نهایتاً روی دیوار می‌نشیند. در شکل ۱۰ نمودار تغییرات  $h$  نسبت به زمان برای قطره‌ی پرولیت با  $\sigma_r = 6$  رسم شده است.

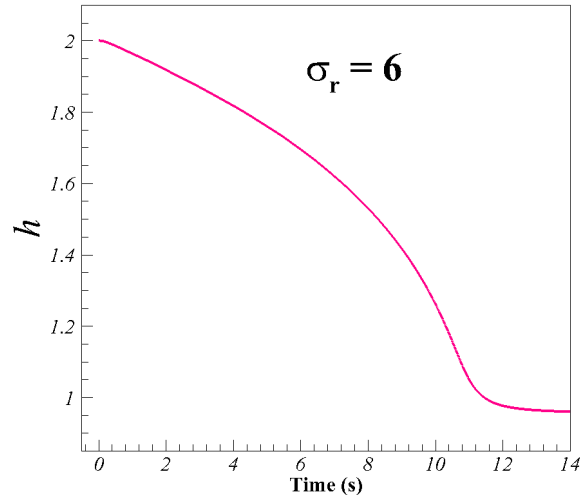


Fig. 10. Variations of Distance per Time between Drop-center and the Wall for Prolate Drops ( $\sigma_r = 6$ ).

شکل ۱۰: تغییرات فاصله‌ی عمودی مرکز قطره‌ی پرولیت ( $\sigma_r = 6$ ) از دیوار نسبت به زمان

در شکل ۱۱، حالت نهایی نشست قطره‌ی پرولیت ( $\sigma_r = 6$ ) بر روی دیوار، به همراه خطوط جریان اطراف قطره و بردارهای سرعت داخل آن، نشان داده شده است.

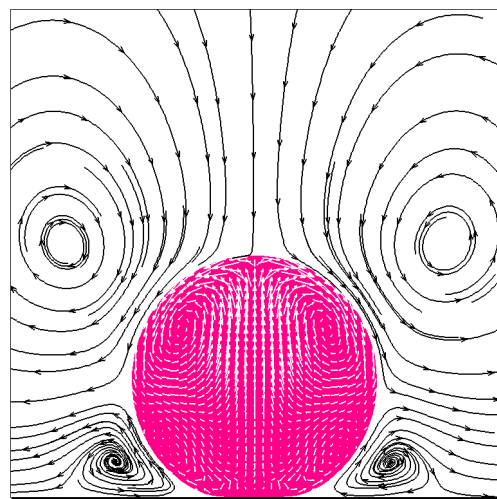


Fig. 11. Final State for Interaction of Prolate Drops with the Wall Including Streamlines.

شکل ۱۱: حالت نهایی نشست قطره‌ی پرولیت بر روی دیوار به همراه خطوط جریان اطراف قطره و بردارهای سرعت در داخل قطره



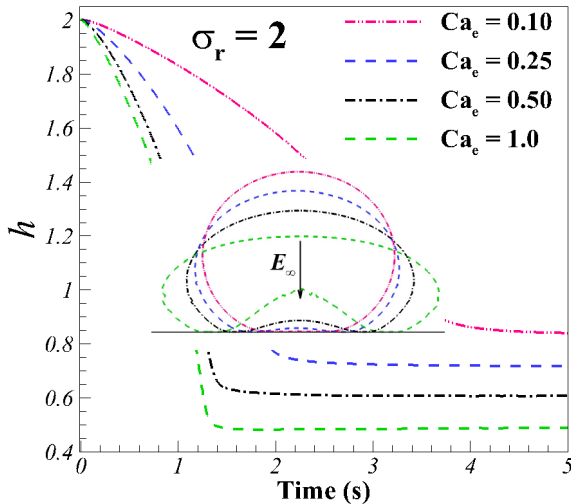


Fig. 14. Electric Capillary Effect on the Final State of Oblate Drops indicating Evolution of Drop Shapes ( $\sigma_r=2$ ,  $\varepsilon_r=8$ ).

شکل ۱۴: اثر عدد موینگی الکتریکی بر چگونگی و حالت نهایی نشست قطره‌های ابلت ( $\sigma_r=2$ ) بر روی دیوار ( $\varepsilon_r=8$ )

( $\sigma_r=2$ )، در اعداد موینگی الکتریکی مختلف، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش عدد موینگی الکتریکی، زمان رسیدن قطره‌های ابلت ( $\sigma_r=2$ ) به دیوار کاهش می‌یابد. فاصله‌ی مرکز قطره از دیوار هم کاهش می‌یابد. همچنین سطح قطره‌ها به دلیل افزایش شدت میدان الکتریکی و تشدید تنش‌های سطحی و در نتیجه تشدید جریان‌های الکتروهایدرودینامیکی، دچار اعوجاج می‌شود.

### ۳-۳-۲- قطره‌ی پرولیت ( $\sigma_r < \varepsilon_r$ )

تغییرات  $h$  نسبت به زمان برای قطره‌ی پرولیت ( $\sigma_r=6$ ) در اعداد موینگی الکتریکی مختلف، در شکل ۱۵ نشان داده شده است. برای این قطره نیز افزایش عدد موینگی الکتریکی سبب کاهش زمان رسیدن قطره به دیوار و فاصله‌ی مرکز قطره از دیوار می‌شود. ضمن اینکه باعث اعوجاج سطح هم می‌شود.

### ۳-۳-۳- قطره‌ی پرولیت ( $\sigma_r > \varepsilon_r$ )

برای قطره‌ی پرولیت ( $\sigma_r=12$ )، به علت تغییر شکل بسیار زیاد در اعداد موینگی ۰/۵ و ۱، نتایج فقط برای اعداد موینگی ۰/۱ و ۰/۲۵ ارائه شده است. در نمودار تغییرات  $h$  نسبت به زمان برای این قطره نشان داده شده است.

در اینجا هم با افزایش عدد موینگی الکتریکی، زمان رسیدن قطره به دیوار به صورت چشم‌گیری کاهش می‌یابد. ولی مرکز قطره از دیوار فاصله می‌گیرد. دلیل این امر، افزایش تغییر شکل قطره و در نتیجه کشیدگی بیشتر آن در راستای میدان الکتریکی در اثر افزایش عدد موینگی الکتریکی است. به علاوه، سطح قطره هم بر خلاف قطره‌های با  $\sigma_r < \varepsilon_r$  دچار اعوجاج نمی‌شود. این امر به دلیل این است که با افزایش عدد موینگی الکتریکی،

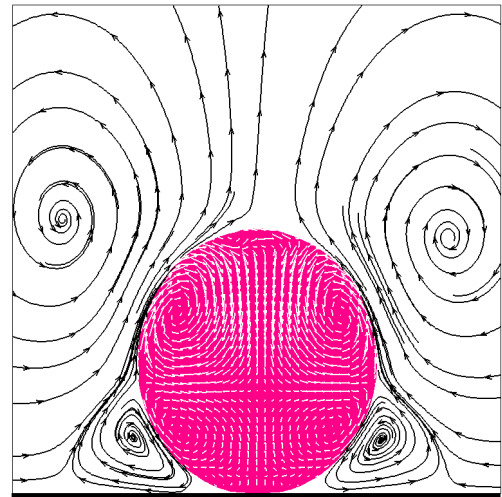


Fig. 13. Final State for Interaction of Prolate Drops ( $\sigma_r=12$ ) with the Wall Including Streamlines.

شکل ۱۳: حالت نهایی نشست قطره‌ی پرولیت ( $\sigma_r=12$ ) بر روی دیوار به همراه خطوط جریان اطراف قطره و نیز بردارهای سرعت در داخل قطره

کمتر به سمت دیوار می‌شود، تفاوت در جهت قطبیده شدن آن‌ها نسبت به قطره‌های با  $\sigma_r < \varepsilon_r$  است. در فواصل کمتر، نیروهای ناشی از جذب دی الکتریک (دوقطبی‌ها)، باعث حرکت قطره به سمت دیوار می‌شوند. یعنی قطره و دیوار تشکیل یک دوقطبی می‌دهند و هرچه فاصله‌ی بین آن‌ها کمتر باشد، نیروی بین آن‌ها قوی‌تر است.

برای قطره‌های با شرایط  $\sigma_r < \varepsilon_r$  این نیرو با نیروی جریان‌های القایی هم جهت است. ولی برای قطره‌های پرولیت با شرط  $\sigma_r > \varepsilon_r$  این نیروها خلاف هم عمل می‌کنند. به همین دلیل است که قطره‌های با  $\sigma_r < \varepsilon_r$  در زمان کمتری (علی‌رغم فاصله‌ی بیشتر) نسبت به قطره‌های با  $\sigma_r > \varepsilon_r$  جذب دیوار می‌شوند (شکل‌های ۸ و ۱۰ و ۱۲). اما دلیل کمتر بودن زمان جذب قطره‌های ابلت نسبت به قطره‌های پرولیت با  $\sigma_r < \varepsilon_r$  در شکل‌های ۸ و ۱۰ کمتر بودن فاصله‌ی قطره‌های ابلت نسبت به پرولیت است. دلیل این امر نیز نوع تغییر شکل قطره‌های ابلت و پرولیت است که باعث می‌شود قطره از نظر حجمی به دیوار نزدیک و یا دور باشد. در همه‌ی شبیه‌سازی‌های انجام شده برای عکس العمل قطره و دیوار،  $Ca_e=0/1$  و  $Oh=0/2$  است.

### ۳-۳-۳- اثر عدد موینگی بر عکس العمل قطره و دیوار

اثر عدد موینگی الکتریکی بر عکس العمل قطره و دیوار با در نظر گرفتن اعداد موینگی ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ بررسی شده است. چگونگی نشست قطره‌های ابلت ( $\sigma_r=2$ )، پرولیت ( $\sigma_r=6$ ) و پرولیت ( $\sigma_r=12$ ) بر روی دیوار و نیز حالت نهایی آن‌ها، به ازای اعداد موینگی الکتریکی مختلف، نمایش داده شده است.

### ۳-۳-۱- قطره‌ی ابلت

در شکل ۱۴ نمودار تغییرات  $h$  نسبت به زمان برای قطره‌های ابلت

قطره، صحت‌سنجی شد. انواع تغییر شکل و الگوی جریان القایی در مدل نیست عایق، معرفی و با نتایج حاصل از تحقیق مطابقت داده شد. برای سه نوع قطره‌ی آبلیت، پرولیت با خطوط جریان مشابه آبلیت ( $\sigma_r < \epsilon_r$ ) و پرولیت با خطوط جریان مخالف با آبلیت ( $\sigma_r > \epsilon_r$ )، عکس العمل قطره‌ها با دیوار شبیه‌سازی و اثر عدد موینگی الکتریکی، بررسی شد. برای قطره‌های پرولیت ( $\sigma_r > \epsilon_r$ )، عکس العمل قطره با دیوار، بسیار ضعیف‌تر از عکس العمل قطره‌های آبلیت و پرولیت ( $\sigma_r < \epsilon_r$ ) است. قطره‌های آبلیت و پرولیت ( $\sigma_r > \epsilon_r$ ) کاملاً روی دیوار می‌نشینند و افزایش عدد موینگی الکتریکی این اثر را تقویت می‌کند. ولی قطره‌های پرولیت ( $\sigma_r > \epsilon_r$ )، در فاصله‌ی کمتری نسبت به قطره‌های با  $\sigma_r < \epsilon_r$ ، جذب دیوار می‌شود و فاصله‌ی مرکز آن‌ها از دیوار، حتی با افزایش عدد موینگی الکتریکی، بیشتر می‌شود. همچنین، افزایش عدد موینگی الکتریکی، زمان نشست قطره‌ها بر روی دیوارها را کاهش می‌دهد و برای قطره‌های آبلیت و پرولیت ( $\sigma_r < \epsilon_r$ )، باعث اعوجاج سطح قطره‌ها در اعداد موینگی الکتریکی بالاتر و کاهش فاصله‌ی مرکز قطره‌ها از دیوار می‌شود. اما برای قطره‌های پرولیت ( $\sigma_r > \epsilon_r$ )، تأثیری در حالت نهایی سطح قطره و دیوار ندارد ولی باعث افزایش فاصله‌ی مرکز قطره از دیوار می‌شود. در حالی که شبیه‌سازی دوبعدی انجام شده توسط عبدالحمید و اسماعیلی [۱۴] با روش مشابه، حاکی از دفع قطره‌های پرولیت با  $\sigma_r > \epsilon_r$  از دیوار است؛ در پژوهش سه بعدی حاضر، در فاصله‌ی بیشتر از نزدیکترین فاصله‌ی بررسی شده توسط آن‌ها ( $h=1/25$ )، این نوع قطره‌ها نیز جذب دیوار می‌شوند.

### تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب تقدیر و تشکر صمیمانه خود از استفاده از امکانات پردازشی مرکز ابررایانش ملی شیخ‌بهایی را اعلام می‌نمایند. این مرکز تحت حمایت معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری و دانشگاه صنعتی اصفهان می‌باشد.

### فهرست علائم

$a$	شعاع قطره، m
$d_w$	فاصله‌ی عمودی مرکز قطره از دیوار، m
$D$	تغییر شکل بی بعد قطره
$E_\infty$	میدان الکتریکی، V/m
$F_{EL}$	نیروی الکتریکی بر واحد حجم، N/m <sup>3</sup>
$h$	فاصله‌ی بی بعد از دیوار
$H$	ارتفاع ناحیه‌ی حل، m
$L$	طول ناحیه‌ی حل، m
$q$	بار الکتریکی بر واحد سطح، C/m <sup>2</sup>
$r$	نسبت چگالی
$t_e$	زمان مشخصه‌ی الکتریکی، s

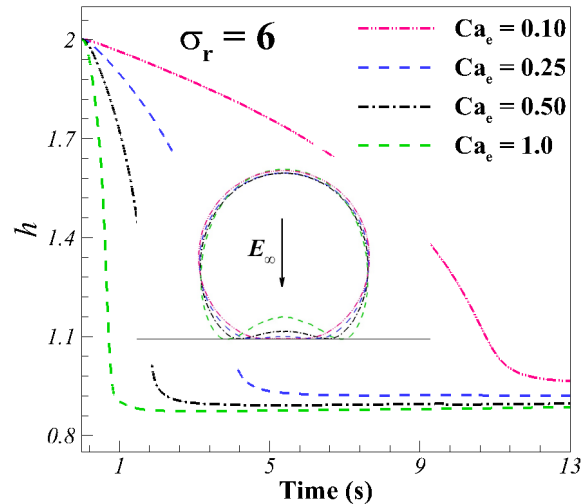


Fig. 15. Electric Capillary Effect on the Final State of Oblate Drops indicating Evolution of Drop Shapes ( $\sigma_r=6$ ,  $\epsilon_r=8$ ).  
شکل ۱۵: اثر عدد موینگی الکتریکی بر چگونگی و حالت نهایی نشست قطره‌های پرولیت ( $\sigma_r=6$ ) بر روی دیوار ( $\epsilon_r=8$ )

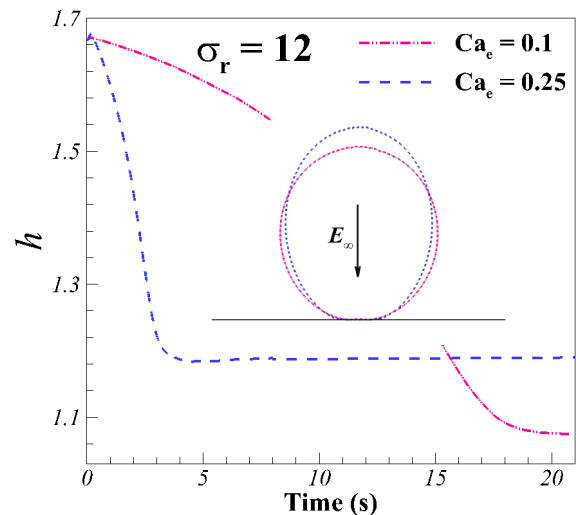


Fig. 16. Electric Capillary Effect on the Final State of Oblate Drops indicating Evolution of Drop Shapes ( $\sigma_r=12$ ,  $\epsilon_r=8$ ).  
شکل ۱۶: اثر عدد موینگی الکتریکی بر چگونگی و حالت نهایی نشست قطره‌های پرولیت ( $\sigma_r=12$ ) بر روی دیوار ( $\epsilon_r=8$ )

گردابه‌ها در مجاورت دیوار (شکل ۱۳) قوی‌تر شده و مانع از نشست بیشتر قطره بر روی دیوار می‌شود.

در شبیه‌سازی‌های انجام شده برای بررسی اثر عدد موینگی الکتریکی، برای قطره‌های پرولیت با  $\sigma_r > \epsilon_r$ ،  $h=1/667$  و برای قطره‌های با  $\sigma_r > \epsilon_r$ ،  $h=2$  و برای همه‌ی شبیه‌سازی‌ها،  $Oh=0.2$  است.

### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ابتدا میدان الکتریکی با دینامیک سیال به صورت کاملاً سه بعدی کوپل و با نتایج آزمایشگاهی موجود برای اندازه‌ی تغییر شکل

- [5] C.T. O'Konski, H.C. Thacher Jr, The distortion of aerosol droplets by an electric field, *The Journal of Physical Chemistry*, 57(9) (1953) 955-958.
- [6] G. Taylor, Disintegration of water drops in an electric field, Proceedings of the Royal Society of London. Series A. *Mathematical and Physical Sciences*, 280(1382) (1964) 383-397.
- [7] R. Allan, S. Mason, Particle behaviour in shear and electric fields. I. Deformation and burst of fluid drops, Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, *Physical and Engineering Sciences*, 267(1328) (1962) 45-61.
- [8] G. Taylor, Studies in electrohydrodynamics. I. The circulation produced in a drop by electrical field, Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, *Physical and Engineering Sciences*, 291(1425) (1966) 159-166.
- [9] D. Saville, Electrohydrodynamics: the Taylor-Melcher leaky dielectric model, *Annual review of fluid mechanics*, 29(1) (1997) 27-64.
- [10] T. Tsukada, T. Katayama, Y. Ito, M. Hozawa, Theoretical and Experimental Studies of Circulations Inside and Outside a Deformed Drop under a Uniform Electric Field, *Journal of chemical engineering of Japan*, 26(6) (1993) 698-703.
- [11] H. Paknemat, A. Pischevar, P. Pournaderi, Numerical simulation of drop deformations and breakup modes caused by direct current electric fields, *Physics of Fluids* (1994-present), 24(10) (2012) 102101.
- [12] W.-F. Hu, M.-C. Lai, Y.-N. Young, A hybrid immersed boundary and immersed interface method for electrohydrodynamic simulations, *Journal of Computational Physics*, 282 (2015) 47-61.
- [13] A. Fernández, G. Tryggvason, J. Che, S.L. Ceccio, The effects of electrostatic forces on the distribution of drops in a channel flow: Two-dimensional oblate drops, *Physics of Fluids* (1994-present), 17(9) (2005) 093302.
- [14] M.A. Halim, A. Esmaceli, Computational studies on the transient electrohydrodynamics of a liquid drop, *FDMP: Fluid Dynamics & Materials Processing*, 9(4) (2013) 435-460.
- [15] T. Wang, H.-X. Li, J.-F. Zhao, Three-Dimensional Numerical Simulation of Bubble Dynamics in Microgravity under the Influence of Nonuniform Electric Fields, *Microgravity Science and Technology*, (2016) 1-10.
- [16] J. Melcher, G. Taylor, Electrohydrodynamics: a review of the role of interfacial shear stresses, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1(1) (1969) 111-146.

$t_h$  زمان مشخصه‌ی هیدرودینامیکی، s  
 $W$  عرض ناحیه‌ی حل، m

#### علامت یونانی

$\gamma$  کشش سطحی، N/m  
 $\varepsilon$  نفوذپذیدی الکتریکی، pF/m  
 $\varepsilon_r$  نسبت نفوذپذیری الکتریکی  
 $\varepsilon_0$  نفوذپذیدی الکتریکی فضای آزاد، pF/m  
 $\lambda$  نسبت چسبندگی  
 $\mu$  چسبندگی، kg/m.s  
 $\rho$  چگالی، kg/m<sup>3</sup>  
 $\sigma$  هدایت پذیری الکتریکی، S/m  
 $\sigma_r$  نسبت هدایت پذیری الکتریکی  
 $\tau$  زمان بی بعد  
 $\phi$  پتانسیل الکتریکی، V  
 $\Phi$  تابع مشخصه

**زیر نویس**

$e$  الکتریکی  
 $EL$  الکتریکی  
 $h$  هیدرودینامیکی  
 $i$  قطره  
 $o$  سیال پیرامون  
 $r$  نسبت قطره به سیال پیرامون  
 $w$  دیوار  
 $0$  فضای آزاد

#### منابع

- [1] J. Zeng, T. Korsmeyer, Principles of droplet electrohydrodynamics for lab-on-a-chip, *Lab on a Chip*, 4(4) (2004) 265-277.
- [2] S.K. Cho, H. Moon, C.-J. Kim, Creating, transporting, cutting, and merging liquid droplets by electrowetting-based actuation for digital microfluidic circuits, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 12(1) (2003) 70-80.
- [3] H.T. Yudistira, V.D. Nguyen, P. Dutta, D. Byun, Flight behavior of charged droplets in electrohydrodynamic inkjet printing, *Applied Physics Letters*, 96(2) (2010) 023503.
- [4] J. Shrimpton, A. Yule, Characterisation of charged hydrocarbon sprays for application in combustion systems, *Experiments in fluids*, 26(5) (1999) 460-469.

- continuous flow electrophoresis, *Journal of Colloid and interface Science*, 129(1) (1989) 78-90.
- [20] P.F. Salipante, P.M. Vlahovska, Electrohydrodynamics of drops in strong uniform dc electric fields, *Physics of Fluids* (1994-present), 22(11) (2010) 112110.
- [21] S. Torza, R. Cox, S. Mason, Electrohydrodynamic deformation and burst of liquid drops, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 269(1198) (1971) 295-319.
- [17] G. Tryggvason, B. Bunner, A. Esmaeeli, D. Juric, N. Al-Rawahi, W. Tauber, J. Han, S. Nas, Y.-J. Jan, A front-tracking method for the computations of multiphase flow, *Journal of Computational Physics*, 169(2) (2001) 708-759.
- [18] S.O. Unverdi, G. Tryggvason, A front-tracking method for viscous, incompressible, multi-fluid flows, *Journal of computational physics*, 100(1) (1992) 25-37.
- [19] P.H. Rhodes, R.S. Snyder, G.O. Roberts, Electrohydrodynamic distortion of sample streams in

Please cite this article using:

M. Akbari, S. Mortazavi, H. Shahin, Three Dimensional Numerical Simulation of a Drop and Drop-to-Wall Interaction under Uniform Electric Field, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(4) (2018) 755-766.  
DOI: 10.22060/mej.2016.750

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

