

مطالعه رفتار قطره نیمه‌رسانا در حضور میدان الکتریکی: تاثیر نسبت‌های لزجت و رسانایی الکتریکی

محمدعلی بذرافکن^۱، سید پدرام پورنادری^{۲*}

^۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، mohammadali_b71@yahoo.com

^۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، sp.pournaderi@yu.ac.ir

دریافت: زمستان ۹۸ پذیرش: تابستان ۹۹

چکیده

در این پژوهش، رفتار هیدرودینامیکی قطره نیمه‌رسانا تحت تاثیر میدان الکتریکی شبیه‌سازی می‌شود. از روش سطح تراز برای رדיابی سطح مشترک و از روش سیال مجازی برای مدل کردن کمیت‌های ناپیوسته در سطح مشترک استفاده می‌شود. با استفاده از مدل نشت عایق تیلور، میدان الکتریکی و نیروی الکتریکی اعمالی به سطح مشترک دو سیال به دست می‌آید. نتایج شبیه‌سازی تغییرشکل قطره تحت اثر میدان الکتریکی و ایجاد جریان‌های القایی در داخل و خارج قطره را نشان می‌دهد. نوع تغییر شکل بسته به نسبت رسانایی الکتریکی و گذردگی قطره و سیال پیرامون به صورت کشیدگی در راستای میدان (پرولیت) و یا کشیدگی در راستای عمود بر میدان (آبیت) می‌باشد. اثر پارامترهای نسبت رسانایی الکتریکی و نسبت لزجت روی رفتار هیدرودینامیکی قطره بررسی می‌شود. بر اساس نتایج، با افزایش این کمیت‌ها مقدار تغییر شکل قطره افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت رسانایی الکتریکی و نسبت لزجت، آهنگ افزایش تغییر شکل قطره کاهش می‌یابد.

* عهده‌دار مکاتبات: sp.pournaderi@yu.ac.ir

کلمات کلیدی: میدان الکتریکی، قطره نیمه‌رسانا، روش سطح تراز، روش سیال مجازی

آزاد می‌باشند، این بارها وقتی تحت تاثیر میدان الکتریکی قرار می‌گیرند به سطح سیال منتقل می‌شوند. سیالات نیمه‌رسانا دسته‌ای از سیالات هستند که دارای مقدار کمی بار آزاد حامل هستند. این سیالات نه عایق کامل و نه رسانایی کامل هستند، اما در بین این دو دسته قرار می‌گیرند. وجود رسانایی محدود، امکان انباشته شدن بارهای آزاد روی سطح مشترک دو سیال را در صورت متفاوت بودن نسبت ضرایب نفوذپذیری و رسانایی، افزایش می‌دهد. موقعی که این سیالات در میدان الکتریکی قرار می‌گیرند، بارهای آزاد موجود در این مواد در راستای میدان الکتریکی اعمال شده به سمت سطح مشترک حرکت می‌کنند. تجمع این بارها روی سطح مشترک باعث اعمال تنش‌های الکتریکی مماسی می‌گردد که به توزیع بار بستگی دارد. همچنین به دلیل تفاوت در خواص الکتریکی دو سیال تنش‌های نرمال در سطح مشترک اعمال می‌شود [۱]. مطالعات اولیه صورت گرفته در مورد رفتار هیدرودینامیکی یک قطره عایق معلق در یک سیال مخلوط نشدنی دیگر، حاکی از وجود نیروهای عمود بر سطح

۱- مقدمه

الکتروهیدرودینامیک شاخه‌ای از علم است که اساساً به تاثیر الکتروسیسته بر جریان سیال و ارتباط بین نیروهای هیدرودینامیکی و الکترواستاتیک مربوط می‌شود. به دلیل وجود اثر متقابل نیروهای الکتریکی و جریان سیال در این گونه مسائل انجام تحقیقات تحلیلی بسیار دشوار و محدود به مواردی همراه با ساده‌سازی بوده است. این پیچیدگی ذاتی استفاده از روش‌های عددی برای رسیدن به دیدگاه بهتر و شبیه‌سازی مسائل الکتروهیدرودینامیک را توجیه می‌کند. الکتروهیدرودینامیک در تعیق ذرات مایع در هوا، اسپری سوخت در محفظه احتراق، بالا بردن توانایی انتقال حرارت بین فازها و جداسازی و تفکیک کردن ذرات و یا فازهای موجود در مایعات مانند جدا کردن ناخالصی‌ها از نفت خام اهمیت زیادی دارد.

سیال تحت تاثیر میدان الکتریکی یا قطبیده می‌شود و مولکول‌های سیال به صورت دوقطبی در می‌آیند و یا یون‌های باردار / الکترون‌های آزاد در سیال جریان می‌یابند. لذا سیالات را بر اساس میزان رسانایی الکتریکی می‌توان به عایق کامل، رسانایی کامل و رسانایی ناچیز تقسیم کرد. سیالات عایق فاقد بار آزاد می‌باشند و مولکول‌های آن وقتی تحت تاثیر میدان الکتریکی قرار می‌گیرند، قطبیده می‌شوند. سیالات رسانایی بار

کوچک در نسبت‌های مختلف ضریب رسانش و ضریب گذردهی الکتریکی، با تئوری تیلور انطباق خوبی داشت. حسینی [۱۳]، به صورت تجربی تغییرشکل قطرات آب در روغن آفتابگردان را تحت میدان الکتریکی ضربانی مطالعه و اثر فرکانس و شدت میدان الکتریکی را بررسی نمود. وی نتیجه گرفت که شکل موج و فرکانس دو عامل اساسی در جلوگیری از تشکیل قطرات ثانویه می‌باشند. لی و همکاران [۱۴]، تغییرشکل قطره آب در یک روغن عایق تحت میدان الکتریکی ضربانی را با استفاده از روش اجزاء محدود شبیه‌سازی کردند. آنها دریافتند که نسبت عدد و بر الکتریکی به عدد اهنرسچ، به خوبی تغییر شکل قطره در محدوده فرکانس‌های پابین را توصیف می‌کند. هی و همکاران [۱۵]، پاسخ گذاری قطره آب معلق در روغن تحت تاثیر میدان الکتریکی را به صورت تجربی و تئوری مطالعه کردند. آنها اثر پارامترهای بی بعد حاکم، عدد مویینگی الکتریکی و عدد اهنرسچ، را روی مودهای نوسانی بررسی کردند و دریافتند که افزایش این دو پارامتر منجر به تغییر مود نوسانات در حین فرآیند تغییرشکل می‌گردد. قاسمی و همکاران [۱۶]، تغییرشکل یک قطره در حال سقوط را تحت اثر میدان الکتریکی با استفاده از روش حجم سیال شبیه‌سازی کردند. بر طبق نتایج حاصل، می‌توان از میدان الکتریکی به عنوان یک ابزار کنترلی قدرتمند برای ایجاد تاخیر یا تسريع در فرآیند تجزیه یک قطره در حال سقوط استفاده کرد. همچنین، تغییرشکل قطره با افزایش عدد باند به شدت افزایش می‌یابد. ماتر و همکاران [۱۷]، به صورت تجربی تغییرشکل یک قطره آب معلق در یک محلول ارگانیک حاوی آسفالتین را در حضور میدان الکتریکی بررسی کردند و دریافتند که تاثیر همزمان میدان الکتریکی و جذب آسفالتین در سطح مشترک، شکل قطره را تعیین می‌کند. عدم تقارن قطره در میدان‌های الکتریکی قوی تر و مقادیر بالای غلظت آسفالتین افزایش می‌یابد.

هدف این پژوهش بررسی رفتار هیدرودینامیکی قطره نیمه‌رسانا تحت تاثیر میدان الکتریکی می‌باشد. از روش سطح تراز برای دیابی حرکت سطح مشترک و از روش سیال مجازی برای اعمال ناپیوستگی‌ها در سطح مشترک استفاده می‌شود. بدین ترتیب، سطح مشترک بدون میرا کردن کمیت‌ها در عرض آن و بدون در نظر گرفتن ضخامت برای آن مدل می‌گردد. بر اساس بررسی نویسنده‌گان، در مطالعاتی که تا کنون در زمینه رفتار قطره نیمه‌رسانا تحت اثر میدان الکتریکی انجام شده، غالباً لزجت قطره و سیال محیط یکسان در نظر گرفته شده است. همچنین تحقیقات محدودی به اثر نسبت رسانایی الکتریکی دو سیال اشاره کرده‌اند. در این تحقیق، اثر نسبت لزجت قطره و سیال محیط و نیز اثر نسبت رسانایی الکتریکی این دو سیال روی رفتار هیدرودینامیکی قطره نیمه‌رسانا در حضور میدان الکتریکی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- مدل ریاضی

۲-۱- معادلات حاکم

در جریان سیال‌های غیرقابل اختلاط تحت میدان الکتریکی، معادلات هیدرودینامیکی و الکترواستاتیکی از طریق تنش‌های ماکسول با یکدیگر جفت شده‌اند. معادله حاکم بر جریان سیال، پیوستگی و معادلات ناویر استوکس برای سیال تراکم ناپذیر است:

مشترک و نهایتاً تغییر شکل قطره به صورت پرولیت^۱ (کشیدگی در راستای میدان الکتریکی) بود. کونسکی و تاچرا [۲]، ضمن به دست آوردن رابطه‌ای برای تغییر شکل یک قطره‌ی مایع معلق در یک سیال عایق دیگر، از تغییر شکل آن به صورت کشیدگی در راستای میدان الکتریکی صحبت کردند. با وجود این آزمایش‌های آلن و میسون [۳]، وجود تغییر شکل آبلیت^۲ (کشیدگی در راستای عمود بر جهت میدان الکتریکی) را نشان داد. این پدیده توسط تیلور و با معرفی مدل نیمه‌رسانا توضیح داده شد [۴]. 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 این انتقال بار، ابجات تنفس مماسی و حرکت سیال در امتداد موزهای قطره است که درنهایت منجر به ایجاد جریان‌های گردشی در داخل و خارج قطره می‌شود. جهت این جریان‌ها به نسبت هدایت‌پذیری الکتریکی و نفوذ الکتریکی قطره و سیال پیرامون و شدت آن‌ها به قدرت میدان الکتریکی بستگی دارد. تیلور یک تئوری خطی نیز جهت پیش‌بینی تغییر شکل‌های کوچک قطرات ارائه کرد.

اولین شبیه‌سازی عددی تاثیر میدان الکتریکی بر یک قطره مجزا در سال ۱۹۸۸ توسط شروود انجام شد [۵]. او از روش انتگرال مرزی برای بررسی تغییر شکل و شکست قطرات، در محدوده جریان استوکس استفاده کرد و تقسیم شدن قطرات به دو قسمت به صورت تجربی را مشاهده کرد. توکادا و همکاران [۶]، جریان گردشی القابی 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 آورده‌اند. ژانگ و کواک [۷]، برای اولین بار با استفاده از روش لتیس-بولتزمن، تغییر شکل یک قطره را تحت تاثیر میدان الکتریکی بررسی و نتایج قبلی با توجه به تئوری تیلور ارائه کردند. همچنین لک و همکاران [۸]، با روش انتگرال مرزی، اثرات میدان الکتریکی را بر روی یک قطره‌ی شناور در یک سیال دیگر با استفاده از مدل نیمه‌رسانا و روش تقارن محوری مطالعه کردند. نتیجه‌ی کار آن‌ها تطابق با تئوری تیلور در تغییر شکل‌های کوچک بود. هو و همکاران [۹]، با استفاده از روش پیشروی جبهه/حجم محدود تغییر شکل و حرکت یک قطره را با سه مدل عایق کامل، رسانایی کامل و نیمه‌رسانا بررسی و تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی مشاهده کردند. جورکلاند [۱۰]، با اعمال روش سطح تراز، دینامیک قطره و شکست و یکی شدن قطرات را در حضور میدان الکتریکی شبیه‌سازی کرد. یانگ و همکاران [۱۱]، با استفاده از یک مدل میدان فاز سبعدی و شبیه‌سازی یکچهارم ناحیه حل، تغییر شکل تقارن محوری یک قطره تحت تاثیر میدان الکتریکی را بررسی کردند و دریافتند که تا رسیدن به تغییر شکل نهایی، قطره مراحل مختلف تغییر شکل را طی می‌کند. هو و همکاران [۱۲]، با استفاده از روش ترکیبی مرز شناور و سطح مشترک شناور، دینامیک قطره را تحت تاثیر میدان الکتریکی بررسی کردند. روش آن‌ها برای تغییر شکل‌های

¹. Prolate

². Oblate

³. Lattice-Boltzmann

که \mathbf{n} بردار عمود بر سطح مشترک، \mathbf{t} بردار مماس بر سطح مشترک، و k اتحنا در سطح مشترک می‌باشد. با جایگذاری تانسورهای تنش هیدرودینامیکی و الکتریکی دو شرط پرش درجهت عمود و مماس سطح مشترک بهصورت زیر حاصل می‌شود^[۱۸]:

$$[P]_{\Gamma} = \gamma k + 2[\mu]_{\Gamma} \mathbf{n} \cdot \nabla \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}^T + n \cdot \left[\varepsilon (EE - \frac{1}{2} E \cdot EI) \right]_{\Gamma} \cdot \mathbf{n}^T \quad (10)$$

$$[\mu \nabla \mathbf{u}]_{\Gamma} = [\mu]_{\Gamma} \nabla \mathbf{u} \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{t} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \mathbf{n} \\ \mathbf{t} \end{pmatrix} + [\mu]_{\Gamma} + \mathbf{n}^T \mathbf{n} (\nabla \mathbf{u}) \mathbf{n}^T \mathbf{n} - \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{t} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{t} \end{pmatrix} ([\mu]_{\Gamma} (\nabla \mathbf{u})^T + \left[\varepsilon (EE - \frac{1}{2} E \cdot EI) \right]_{\Gamma}) \mathbf{n}^T \mathbf{n} \quad (11)$$

۳- روش‌های عددی

در این مطالعه، از زبان برنامه‌نویسی فرتون برای انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده می‌شود. با توجه به اینکه دامنه حل مستطیلی است، از یک شبکه با سازمان یکنواخت (مربعی) استفاده می‌شود که برای تولید آن نیاز به تکنیک خاصی نمی‌باشد. معادلات حاکم با استفاده از روش تفاضل محدود بر روی شبکه جابجا شده گسته‌سازی می‌شوند. از روش تصویرسازی^۴ برای حل معادلات مومنتوم استفاده می‌شود [۱۸]. برای رفع مشکل ناپیوستگی کمیت‌ها روی سطح مشترک از روش سیال مجازی استفاده می‌شود [۲۰]. برای بهدست آوردن موقیت سطح مشترک از روش سطح تراز استفاده می‌شود [۱۹]. از روش وینو^۵ با دقت مرتبه پنج برای گسته‌سازی جملات جابجایی استفاده می‌شود [۱۹]. همچنین، جملات زمانی در معادلات، با روش رانگ کوتا^۶ با دقت مرتبه سوم گسته‌سازی می‌شوند [۱۹]. برای گسته‌سازی جملات دیفیوژن، از تفاضل مرکزی مرتبه دوم استفاده می‌شود. در این تحقیق برای حل معادله پواسون فشار از حلگر پاردیسو^۷ که مربوط به کتابخانه MKL فرتون می‌باشد، استفاده می‌گردد. این حلگر از روش تجزیه ماتریس برای حل دستگاه معادلات خطی استفاده می‌کند.

۳- روش سطح تراز

در روش سطح تراز با تعریف یکتابع اسکالر مانند \emptyset (تابع سطح تراز) به صورت تابع فاصله علامت‌دار، فضای محاسباتی Ω همانگونه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، به سه ناحیه تقسیم می‌شود. این تابع در فاز داخل با علامت منفی، در فاز بیرون با علامت مثبت و روی سطح مشترک دارای مقدار صفر می‌باشد. بنابراین مقدار صفر این تابع مشخص کننده مکان سطح مشترک است. با توجه به اینکه سطح مشترک همواره سطح تراز صفر تابع \emptyset می‌باشد، رابطه زیر برقرار است،

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\tau^H + \tau^E) + \mathbf{f}_b \quad (2)$$

که در روابط بالا \mathbf{u} بردار سرعت، ρ چگالی، P فشار، \mathbf{f}_b نیروی حجمی، τ^H تانسور تنش لزج و τ^E تانسور تنش الکتریکی می‌باشند. تانسور تنش لزج و الکتریکی برای یک جریان تراکم‌ناپذیر بترتیب بهصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\tau^H = \mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \quad (3)$$

$$\tau^E = \varepsilon (EE - \frac{1}{2} E \cdot EI) \quad (4)$$

μ لزجت دینامیکی، T عملگر ترانهاده، I تانسور واحد، E بردار میدان الکتریکی و ε گزندگی الکتریکی می‌باشد. با فرض سیال نیوتینی با خواص ثابت، لزجت سیال به عنوان یک عدد ثابت در نظر گرفته می‌شود. در مدل سیالات نیمه‌رسانا دیفیوژن یون‌ها نادیده گرفته می‌شود و چگالی بار آزاد صفر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین با استفاده از پیوستگی جریان الکتریکی در سطح مشترک معادله حاکم بر میدان پتانسیل به صورت زیر می‌باشد.

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \psi) = 0 \quad (5)$$

که σ رسانایی الکتریکی و ψ میدان پتانسیل الکتریکی می‌باشد. در جریان‌های دوفازی پارامترهای فیزیکی در هر فاز مقدار متفاوتی دارند و دارای پرش در عرض سطح مشترک می‌باشند. پرش کمیت A در سطح مشترک به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$[A]_{\Gamma} = A^+ - A^- \quad (6)$$

که در آن A^+ مقدار کمیت در فاز بیرونی و A^- مقدار کمیت در فاز داخلی می‌باشد.

رسانایی الکتریکی در هر یک از فازها مقدار ثابتی دارد و معادله ۵ به معادله لاپلاس ($\nabla^2 \psi = 0$) در هر فاز تبدیل می‌شود. در سطح مشترک دو سیال نیز پیوستگی پتانسیل و جریان الکتریکی برقرار است:

$$[\psi]_{\Gamma} = 0 \quad (7)$$

$$[\sigma \nabla \psi \cdot \mathbf{n}]_{\Gamma} = 0 \quad (8)$$

۲-۲- شرط پرش هیدرودینامیک

برای سطح مشترکی که با سرعت موضعی عمود بر سطح مشترک جابه‌جا می‌شود، با اعمال بقاء مومنتوم در سطح مشترک شرایط پرش به صورت زیر بیان می‌شود [۱۸]:

$$\left[\binom{\mathbf{n}}{\mathbf{t}} (PI - (\tau^H + \tau^E)) \mathbf{n}^T \right]_{\Gamma} = \binom{\gamma^k}{0} \quad (9)$$

⁴. Projection Method

⁵. Weighted Essentially Non-Oscillatory

⁶. Total Variation Diminishing (TVD) Runge-Kutta

⁷. Parallel Sparse Direct Solver (PARDISO)

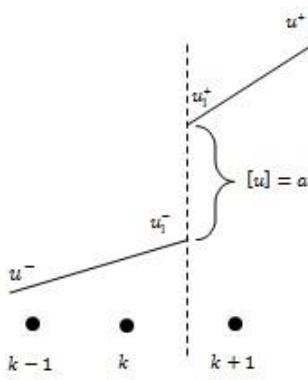
در این روش، اعمال ناپیوستگی‌ها بدون نیاز به در نظر گرفتن ضخامت برای سطح مشترک انجام می‌شود. به عبارتی دیگر کمیت‌ها در سطح مشترک میرا نمی‌شوند. هدف روش سیال مجازی، اعمال شرایط مرزی مناسب و اصلاح گسسته‌سازی نزدیک سطح مشترک می‌باشد. ایده اصلی این روش، محاسبه مشتقات کمیت‌های ناپیوسته به کمک مقادیر کمیت در یک سوی سطح مشترک می‌باشد. با توجه به شکل (۲) در سطح مشترک Γ ، کمیت u به اندازه a پرش دارد که بصورت معادله (۱۸) بیان می‌شود [۲۰].

$$u^+(x) - u^-(x) = a(x_\Gamma) \quad (17)$$

بدین ترتیب، شرایط پرش در هر گره مجاور سطح مشترک ارضا می‌شود. با این روش در نقطه x_k با استفاده از u_k^- در ناحیه Ω^- مقدار u_k^+ و برای نقطه x_{k+1} با استفاده از u_{k+1}^+ در ناحیه Ω^+ مقدار u_{k+1}^- به شکل زیر بدست می‌آید:

$$u_k^+ = u_k^- + a_\Gamma \quad (18)$$

$$u_{k+1}^- = u_{k+1}^+ - a_\Gamma \quad (19)$$



شکل ۲- پرش کمیت u در سطح مشترک

۴- نتایج و بحث

۴-۱- تعریف مساله

در تحقیق حاضر، قطره نیمه‌رسانی معلق در سیال نیمه‌رسانا در حضور میدان الکتریکی شبیه‌سازی می‌شود. قطره در وسط دو صفحه موازی در بالا و پایین (الکترود مثبت و الکترود منفی) قرار می‌گیرد. شکل (۳) دامنه محاسباتی و شرایط مرزی را نشان می‌دهد. از شرط مرزی نیومن^۹ در مرزهای تقارن استفاده می‌شود. در مرزهای بالا و سمت راست

$$\frac{D\phi}{Dt} = 0 \rightarrow \frac{\partial \phi}{\partial t} + u_\Gamma \cdot \nabla \phi = 0 \quad (12)$$

که u_Γ سرعت سطح مشترک می‌باشد. به علت خطاهای عددی، تابع سطح تراز در طول زمان بعد از حرکت سطح مشترک از حالت تابع فاصله خارج می‌شود. مقداردهی مجدد^۸ تابع سطح تراز راه حلی برای رفع این مشکل است. با ثابت نگه داشتن مکان سطح مشترک یا به عبارتی مقدار صفر تابع، کمترین فاصله هر نقطه تا مکان سطح جدید بدست می‌آید. به عبارتی تابع سطح تراز به صورت تابع فاصله اصلاح می‌شود. عموماً از معادله (۱۴) برای مقداردهی مجدد تابع فاصله استفاده می‌شود [۱۹].

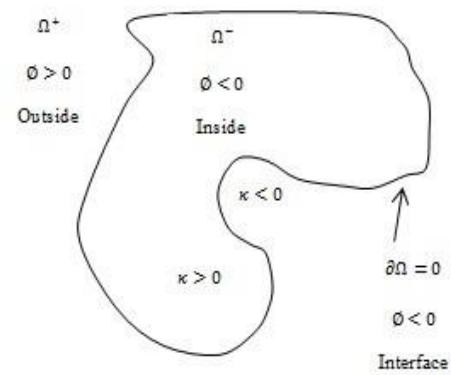
$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = S(\phi_0)(1 - |\nabla \phi|) \quad (13)$$

$$S(\phi_0) = \frac{\phi_0}{\sqrt{\phi_0^2 + \epsilon^2}} \quad (14)$$

τ زمان مجازی، ϕ_0 مقدار قبل از اصلاح و $S(\phi_0)$ تابع علامت میرا است. مقدار $(\Delta x, \Delta y) = \epsilon = \max(\Delta x, \Delta y)$ می‌باشد. با حل معادله مقداردهی مجدد تا حالت دائم، شرط تابع فاصله $(|\nabla \phi| = 1)$ برای تابع سطح تراز ارضاء می‌شود. اغلب با چند تکرار، حل پایای معادله مقداردهی مجدد بدست می‌آید. با استفاده از تابع ϕ ، بردار نرمال واحد n و انحنای سطح مشترک با استفاده از معادلات زیر بدست می‌آیند [۱۹].

$$n = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \quad (15)$$

$$\kappa = -\nabla \cdot n \quad (16)$$

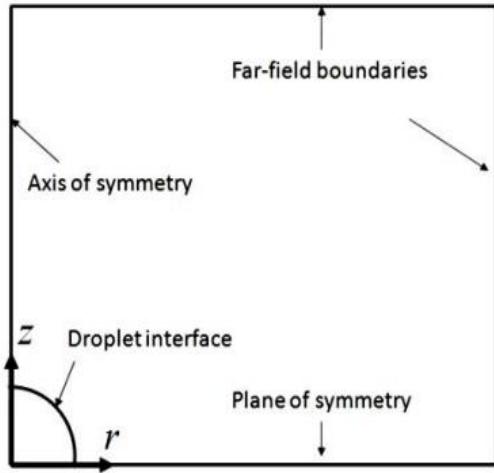


شکل ۱- تابع سطح تراز در نواحی مختلف

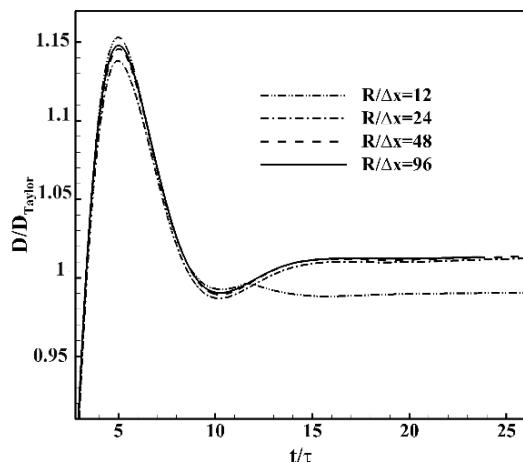
۲-۳- روش سیال مجازی

⁹. Neumann

⁸. Reinitialization



شکل ۳- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی



شکل ۴- تغییرات تغییر شکل قطره با زمان برای شبکه های مختلف

در رابطه تغییر شکل، L و B طول کشیدگی یا پهن شدگی در راستای محور تقارن و محور عرضی می باشند. محور عرضی نیز توسط زمان مشخصه $\tau = \sqrt{(2\rho_e + 3\rho_i)R^3 / 24\gamma}$ بی بعد شده است [۲۲]. چنانچه مشاهده می شود، اختلاف نتایج عددی برای شبکه های $R/\Delta x = 48$ و $R/\Delta x = 96$ بسیار ناچیز می باشد. بنابراین در تمام شبیه سازی ها از شبکه $R/\Delta x = 48$ استفاده شده است. مشاهده می شود که پاسخ دینامیکی عددی به دست آمده در طول زمان به سمت ۱ همگرا می شود که صحت نتایج را تایید می کند.

۴- تغییر شکل های پرولیت و آبلیت قطره

همان طور که اشاره شد در اثر اعمال تنש های نرمال ناشی از میدان الکتریکی، قطره تغییر شکل می تواند به صورت پرولیت (کشیدگی در راستای میدان) و یا آبلیت (کشیدگی در راستای عمود بر میدان) باشد. با توجه به رابطه پیشنهادی توسط تیلور (رابطه ۲۰) تغییر شکل مثبت ($D > 0$)، قطره پرولیت و تغییر شکل منفی ($D < 0$)، قطره آبلیت را

دامنه، شرط مرز آزاد (فشار صفر و گرادیان صفر برای مولفه های سرعت و پتانسیل الکتریکی) اعمال می شود. با توجه به هندسه مسئله، از معادلات حاکم در حالت تقارن محوری استفاده می شود و مسئله فقط برای یک چهارم دامنه حل می شود. پتانسیل الکتریکی مثبت روی مرز بالا و پتانسیل صفر روی مرز پایین اعمال می شود. به عنوان شرط اولیه مقدار صفر برای تمام کمیت ها در نظر گرفته می شود. پارامتر های مورد استفاده در شبیه سازی ها شامل شاعع قطره، کشش سطحی، نسبت ضربی گذردهی الکتریکی، شدت میدان الکتریکی، طول و ارتفاع دامنه می باشند که مقدار آن ها برابر با $\gamma = 0.03 N/m$ ، $R = 1 mm$ ، $\varepsilon_r = \varepsilon_e = 1$ ، $\sigma_r = \sigma_e = 3$ ، $\rho_r = \rho_e = 1$ ، $\mu_r = \mu_e = 1$ می باشند. زیرنویس های α و β بر ترتیب به قطره و سیال محیط اشاره دارند. در تمام شبیه سازی ها از شبکه $R/\Delta x = 48$ استفاده شده است.

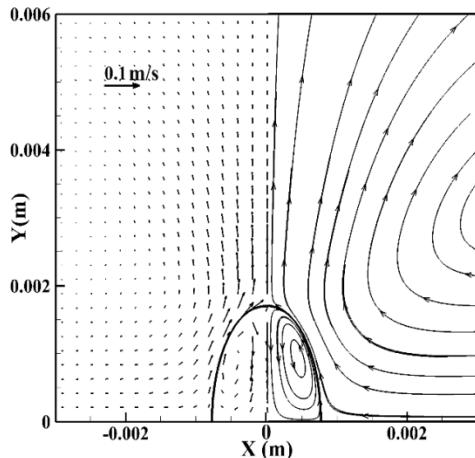
۴-۱- مطالعه شبکه

همگرایی حل گذرا به یک حالت پایدار صحیح را می توان از طریق مقایسه با نتایج تحلیلی حالت پایدار برای تغییر شکل های کوچک نشان داد. برای این منظور در این قسمت تغییر شکل یک قطره نیمه رسانای معلق در یک سیال نیمه رسانای دیگر در رژیم تغییر شکل کوچک مورد بررسی قرار

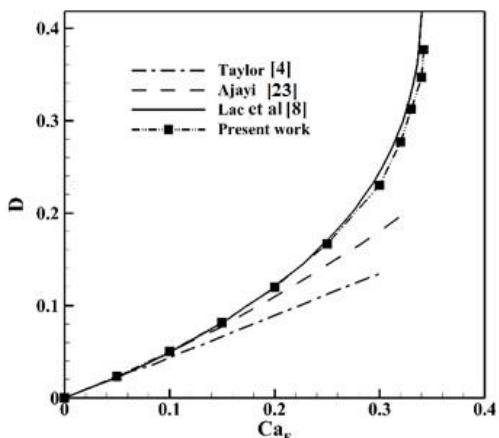
می گیرد. زمان مشخصه الکتریکی سیال به صورت $t_c = \frac{\varepsilon}{\sigma}$ تعریف می شود. با توجه به اینکه زمان مشخصه الکتریکی قطره از زمان مشخصه الکتریکی محیط کمتر است، بارهای آزاد در قطره نسبت به محیط اطراف سریع تر به سطح مشترک می رسند و باعث جهت گیری دوقطبی های الکتریکی در راستای میدان الکتریکی اعمالی می شود. جهت گیری دوقطبی ها باعث اعمال نیروی نرمال در راستای میدان الکتریکی و منجر به کشیده شدن قطره (تغییر شکل پرولیت) در این راستا می شود. نیروهای کشش سطحی و لزجت در برابر تغییر شکل قطره مقاومت می کنند و سرانجام قطره به حالت تعادل می رسد. شکل (۴) اثر ریز کردن شبکه را بر روی تغییر شکل قطره نیمه رسانا نشان می دهد. در هر یک از شبکه ها، پارامتر تغییر شکل قطره بر حسب زمان رسم می شود. پارامتر تغییر شکل $D = (L - B)/(L + B)$ در محور عمودی توسط تغییر شکل تحلیلی، $D_{Analytical}$ ، ارائه شده بوسیله تیلور [۴] که از رابطه (۲۰) بدست می آید، بی بعد شده است:

$$D_{Analytical} = \frac{9}{16} \frac{\sigma_r^2}{(2 + \sigma_r)^2} \frac{(\sigma_r - 1)^2 + (\sigma_r - \varepsilon_r) \left[2 + \frac{3}{5} \frac{2 + 3\mu_r}{1 + \mu_r} \right]}{\sigma_r^2} \quad (20)$$

حالت قبل هستند. شکل (۷) بردارهای سرعت و خطوط جریان را تحت $Ca_E = 0.306$ بعد از به تعادل رسیدن قطره نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً هم اشاره شد، نیروی الکتریکی تمايل به تغییر شکل قطره دارد. در حالی که نیروی کشش سطحی در برابر این تغییر شکل مقاومت می‌کند. تحت اثر میدان الکتریکی قطره تغییر شکل می‌دهد و سرانجام با تعادل نیروی الکتریکی و نیروی کشش سطحی قطره به شکل ثابتی می‌رسد. چنانچه انتظار می‌رود با توجه به اینکه نسبت رسانایی الکتریکی کمتر از نسبت



شکل ۵- تغییر شکل پرولیت قطره نیمه‌رسانا برای $10 \sigma_r = 0.1$ و $Ca_E = 0.35$



شکل ۶- تغییر شکل پرولیت قطره نیمه‌رسانا در اعداد موینگی الکتریکی مختلف برای $10 \sigma_r = 0.1$ و $Ca_E = 0.35$

گذردهی الکتریکی است، تغییر شکل قطره به صورت آبلیت و جهت جریان القایی داخل قطره ساعتگرد می‌باشد. با اعمال میدان الکتریکی به دلیل اینکه زمان مشخصه سیال پیرامون از زمان مشخصه قطره کمتر می‌باشد ($\sigma_r < 0.1$ ، بارهای آزاد سیال پیرامون سریع‌تر به سطح مشترک می‌رسند و دوقطبی‌های الکتریکی در راستای میدان الکتریکی جهت‌گیری می‌کنند. این جهت‌گیری دوقطبی‌ها باعث اعمال نیروی نرمال کششی به قطره در راستای میدان اعمالی می‌شود. این امر، باعث می‌شود قطره در راستای میدان کشیده شود. جهت تنش‌های مماسی به گونه‌ای می‌باشد که باعث ایجاد یک جریان پادساعتگرد در قطره می‌شود.

نشان می‌دهد. بر اساس این رابطه، زمانی که ($\sigma_r > \sigma_r$)، تغییر شکل منفی ($D < 0$) و جهت جریان داخل قطره ساعتگرد می‌باشد. زمانی که ($\sigma_r < \sigma_r$)، تغییر شکل مثبت ($D > 0$) و جهت جریان داخل قطره پادساعتگرد می‌باشد. جریان القایی در اثر تنش برشی مماسی روی سطح مشترک ایجاد می‌شود.

در این بخش، تغییر شکل قطره با افزایش قدرت میدان الکتریکی و درنتیجه افزایش عدد موینگی الکتریکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامتر بی بعد مهم در این مساله عدد موینگی الکتریکی $Ca_E = E^2 \epsilon_e R / \gamma$ است که نسبت نیروی الکتریکی به نیروی کشش سطحی را نشان می‌دهد. طول دامنه، ارتفاع دامنه، نسبت رسانایی الکتریکی و نسبت گذردهی الکتریکی ترتیب $L = 5R$ ، $h = 10R$ ، $\sigma_r = 0.1$ و $\sigma_r = 0.1$ می‌باشند. بقیه پارامترها مشابه حالت قبل هستند. شکل (۵) خطوط جریان و بردارهای سرعت را برای تغییر شکل پرولیت در عدد موینگی الکتریکی 0.35 بعد از پایان شدن تغییر شکل نشان می‌دهد. نیروی الکتریکی تمايل به تغییر شکل قطره دارد. در حالی که نیروی کشش سطحی در برابر این تغییر شکل مقاومت می‌کند. تحت اثر میدان الکتریکی قطره تغییر شکل می‌دهد و سرانجام با تعادل نیروی الکتریکی و نیروی کشش سطحی قطره به شکل ثابتی می‌رسد. چنانچه انتظار می‌رود با توجه به اینکه نسبت رسانایی الکتریکی بیشتر از نسبت گذردهی الکتریکی است، تغییر شکل قطره به صورت پرولیت و جهت جریان القایی داخل قطره پادساعتگرد می‌باشد. نوع تغییر شکل و جهت جریان القایی را با توجه به زمان مشخصه سیال پیرامون و قطره نیز می‌توان پیش‌بینی نمود. با اعمال میدان الکتریکی به دلیل اینکه زمان مشخصه قطره از زمان مشخصه سیال پیرامون کمتر می‌باشد ($\sigma_r < \sigma_r$)، بارهای آزاد قطره نسبت به بارهای آزاد سیال پیرامون، سریع‌تر به سطح مشترک می‌رسند و دوقطبی‌های الکتریکی در راستای میدان الکتریکی جهت‌گیری می‌کنند. این جهت‌گیری دوقطبی‌ها باعث اعمال نیروی نرمال کششی به قطره در راستای میدان اعمالی می‌شود. این امر، باعث می‌شود قطره در راستای میدان کشیده شود. جهت تنش‌های مماسی به گونه‌ای می‌باشد که باعث ایجاد یک جریان پادساعتگرد در قطره می‌شود.

شکل (۶) تغییر شکل پرولیت قطره نیمه‌رسانا را در اعداد موینگی الکتریکی مختلف برای $10 \sigma_r = 0.1$ و $\sigma_r = 0.1$ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد موینگی الکتریکی مقدار تغییر شکل قطره افزایش می‌یابد. تطابق خوبی بین نتایج کار حاضر و نتایج لک و همکاران [۸]، خصوصاً در اعداد موینگی کوچک‌تر مشاهده می‌شود. اختلاف نتایج در اعداد موینگی بالاتر ناشی از اختلاف روش عددی تحقیق حاضر و تحقیق لک و همکاران می‌باشد. آنها از روش انتگرال مرزی در شبیه‌سازی خود استفاده نمودند. همچنین در شبیه‌سازی خود از جملات اینرسی صرفنظر کردند. در شکل (۶)، نتایج شبیه‌سازی با نتایج تحلیلی تیلور [۴] و آجائی [۲۳] که بترتیب از مرتبه اول و دوم می‌باشند، مقایسه شده است. نتایج این تئوری‌ها برای تغییر شکل‌های کوچک معابر می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که در اعداد موینگی الکتریکی کوچک (تغییر شکل‌های کوچک) تطابق خوبی بین نتایج کار حاضر و نتایج تحلیلی تیلور و آجائی مشاهده می‌شود.

در شبیه‌سازی بعدی نسبت رسانایی الکتریکی و نسبت گذردهی الکتریکی ترتیب $0.1 = \sigma_r$ و $2 = \sigma_r$ می‌باشند. بقیه پارامترها مشابه

قطره برای زمانی که نسبت رسانایی الکتریکی بیشتر از یک در نظر گرفته شود به صورت پرولیت می‌باشد و زمانی که نسبت رسانایی کمتر از ۱ باشد، به صورت آبلیت می‌باشد. در اینجا برای بررسی تاثیر نسبت رسانایی الکتریکی محدوده تغییر شکل پرولیت (نسبت رسانایی بیشتر از یک) در نظر گرفته شده است. شکل (۹) افزایش تغییر شکل به صورت کشیدگی در راستای میدان الکتریکی با افزایش نسبت رسانایی (نسبت رسانایی قطره به سیال پیرامون)، را نشان می‌دهد. با افزایش بیشتر نسبت رسانایی الکتریکی، نزخ افزایش تغییر شکل قطره کم می‌شود. اختلاف رسانایی الکتریکی‌های دو سیال منجر به انبساطه شدن بیشتر بار الکتریکی در سطح مشترک می‌شود که نتیجه آن افزایش تنش برشی مماسی روی سطح و تغییر شکل بیشتر است.

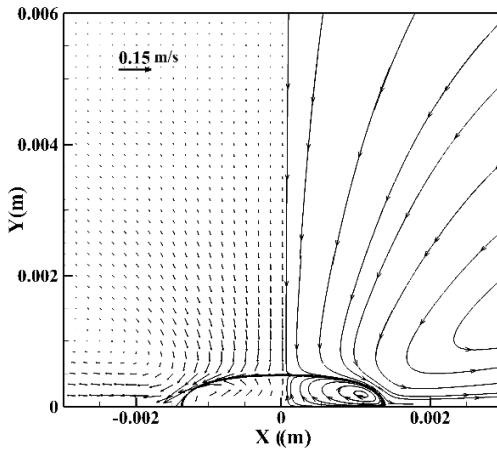
۴- تاثیر نسبت رسانایی الکتریکی بر روی تغییر شکل قطره

برای بررسی تاثیر نسبت لزجت بر تغییر شکل قطره نیمه‌رسانا در میدان الکتریکی، شبیه‌سازی برای قطره با نسبت رسانایی الکتریکی، نسبت گزندرهی و عدد مویینگی الکتریکی بترتیب ۳، ۱ و $0.4/0$ انجام می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای تغییر شکل قطره بر حسب زمان در نسبت‌های لزجت مختلف در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت لزجت، تنش‌های برشی در سطح مشترک نیز افزایش یافته و باعث افزایش تغییر شکل قطره می‌گردد. با افزایش بیشتر نسبت لزجت، آهنگ افزایش تغییر شکل قطره کاهش می‌یابد.

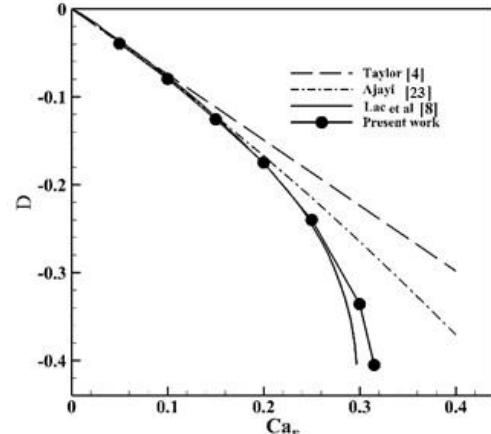
۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از روش سطح تراز به همراه روش سیال مجازی برای شبیه‌سازی رفتار هیدرودینامیکی قطره نیمه‌رسانا در حضور میدان الکتریکی استفاده گردید. در سیال با رسانایی ناچیز، به دلیل وجود خاصیت رسانایی کم، امکان تجمع بارها در لایه نازکی در محدوده سطح سیال وجود دارد. تجمع این بارها روی سطح مشترک باعث اعمال تنش الکتریکی مماسی علاوه بر تنش‌های الکتریکی عمودی می‌گردد. این تنش‌های مماسی منجر به ایجاد جریان‌های چرخشی می‌شود که بسته به خواص سیال می‌تواند تغییر شکل در راستای میدان الکتریکی و یا تغییر شکل در جهت عمود بر میدان الکتریکی ایجاد کند. اگر نسبت رسانایی الکتریکی قطره و سیال پیرامون از نسبت گزندرهی الکتریکی آنها بزرگ‌تر باشد، قطره در راستای میدان الکتریکی کشیده می‌شود و جریان چرخشی در جهت پاد ساعتگرد در قطره ایجاد می‌شود. زمانی که نسبت رسانایی الکتریکی قطره و سیال پیرامون از نسبت گزندرهی الکتریکی آنها کوچک‌تر باشد، قطره در راستای عمود بر میدان الکتریکی اعمالی کشیده می‌شود و جریان چرخشی در جهت ساعتگرد در قطره ایجاد می‌گردد. تطابق خوبی بین نتایج حاصل و تئوری‌های موجود در الکتروهیدرودینامیک از جمله تئوری‌های خطی و نیز نتایج عددی موجود مشاهده گردید.

شکل (۸) تغییر شکل آبلیت قطره نیمه‌رسانا را در عده‌های مویینگی مختلف برای $\sigma_r = 0.1$ و $\epsilon_r = 2$ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد مویینگی الکتریکی مقدار تغییر شکل قطره افزایش می‌یابد. مشابه حالت قبل، در اعداد



شکل ۷- تغییر شکل آبلیت قطره نیمه‌رسانا برای $\sigma_r = 2$ و $\epsilon_r = 0.1$ و $Ca_E = 0.306$



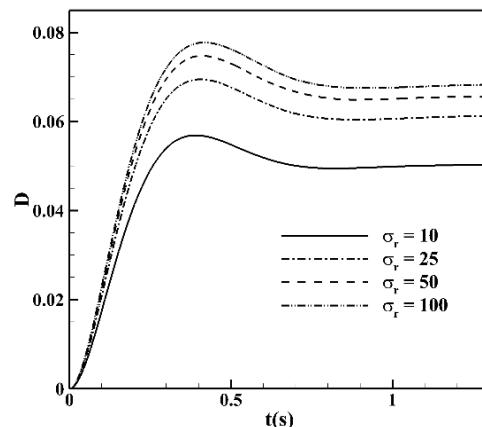
شکل ۸- تغییر شکل آبلیت قطره نیمه‌رسانا در اعداد مویینگی الکتریکی مختلف برای $\sigma_r = 0.1$ و $\epsilon_r = 2$

مویینگی الکتریکی کوچک (تغییر شکل‌های کوچک) تطابق خوبی بین نتایج کار حاضر و نتایج تحلیلی تیلور [۴] و آجای [۲۳] مشاهده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی تطابق بهتری با نتایج لک و همکاران [۸] نشان می‌دهند. روش عددی حاضر در اعداد مویینگی الکتریکی بالاتر نسبت به روش لک و همکاران مقدار تغییر شکل کمتری برای قطره پیش‌بینی می‌نماید. چنانچه پیشتر ذکر شد، آنها در تحقیق خود از جملات اینترسی صرف‌نظر نمودند. با افزایش عدد مویینگی الکتریکی، اهمیت جملات اینترسی و نقش آنها در تغییر شکل قطره افزایش می‌یابد.

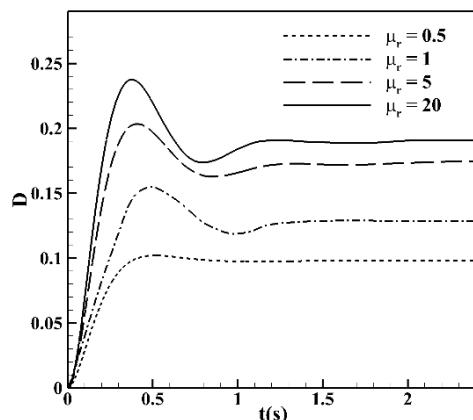
۴- تاثیر نسبت رسانایی الکتریکی بر روی تغییر شکل قطره

برای بررسی تاثیر نسبت رسانایی در ارتباط با تغییر شکل قطره نیمه‌رسانا تحت اثر میدان الکتریکی، شبیه‌سازی برای حالت (۳) $\sigma_r = 3$ و $\epsilon_r = 1$ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نسبت گزندرهی ۱، تغییر شکل

<i>I</i>	تансور همانی
<i>n</i>	بردار یکه عمود بر سطح مشترک
P	N / m ² , فشار,
R	m, شعاع قطره,
<i>t</i>	بردار یکه مماس بر سطح مشترک
<i>u</i>	m/s, بردار سرعت,
علامی یونانی	
ε	ضریب گزندگی F/m, الکتریکی,
φ	m,تابع سطح تراز,
Γ	سطح مشترک
γ	کشش سطحی, N/m
κ	m ⁻¹ , انحنای,
μ	ضریب لزجت, N.s/m ²
μ_r	نسبت ضریب لزجت قطره به محیط
ρ	kg/m ³ , چگالی,
ψ	پتانسیل الکتریکی, V
σ	رسانش الکتریکی, S/m
σ_r	نسبت رسانش الکتریکی قطره به محیط
τ^E	تنش الکتریکی, N/m ²
τ^H	تنش هیدرودینامیکی, N/m ²



شکل ۹- بررسی تغییر شکل پرولیت قطره با تغییر نسبت رسانایی الکتریکی برای $Ca_E = 0 \cdot 1$ و $\varepsilon_r = 1$



شکل ۱۰- بررسی تغییر شکل پرولیت قطره با تغییر نسبت لزجت برای $\sigma_r = 3$, $\sigma_r = 1$, $Ca_E = 0 \cdot 1$ و $\varepsilon_r = 1$

اثر پارامترهای تاثیرگذار بر تغییر شکل قطره نظیر نسبت رسانایی الکتریکی و نسبت لزجت بررسی گردید. مشاهده شد که با افزایش نسبت رسانایی الکتریکی و نسبت لزجت تغییر شکل قطره افزایش افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت رسانایی الکتریکی و نسبت لزجت، آهنگ افزایش تغییر شکل قطره کاهش می‌یابد.

۶- فهرست علامت‌ها

علامی انگلیسی	
Ca_E	عدد موینینگی الکتریکی
D	m, تغییر شکل،
E	بردار میدان الکتریکی, V/m
f_b	نیروی حجمی بر واحد جرم, N/kg

۷- مراجع

- [1] J. A. Lanauze, L. M., Walker, A. S., Khair, The influence of inertia and charge relaxation on electrohydrodynamic drop deformation, Physics of Fluids, 25 (2013) 112101.
- [2] T. C. O'konski, H. C., Thacher, The distortion of aerosol droplets by an electric field, The Journal of Physical Chemistry, 57 (1953) 955-958.
- [3] R. S. Allan, S. G., Mason, Particle Behaviour in Shear and Electric Fields. II. Rigid Rods and Spherical Doublets, Proceedings of The Royal Society A Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 267 (1962) 62-67.

- [14]B. Li, V., Vivacqua, M., Ghadiri, Z., Sun, Z., Wang, X., Li, Droplet deformation under pulsatile electric fields, *Chemical Engineering Research and Design*, 127 (2017) 180-188.
- [15]L. He, H., Yan, X., Luo, J., Cao, J., Wang, D., Yang, Study on the transient response of water-in-oil droplet interface to electric field, *Chemical Engineering Research and Design*, 118 (2017) 71-80.
- [16]E. Ghasemi, H., Bararnia, S., Soleimanikutanaei, C. X., Lin, , Simulation of deformation and fragmentation of a falling drop under electric field, *Powder Technology*, 325 (2018) 301-308.
- [17]S. Mhatre, S., Simon, J., Sjöblom, Shape evolution of a water drop in asphaltene solution under weak DC electric fields, *Chemical Engineering Research and Design*, 141 (2019) 540-549.
- [18]D. Q. Nguyen, R. P., Fedkiw, M., Kang, A Boundary Condition Capturing Method for Incompressible Flame Discontinuities, *Journal of Computational Physics*, 172 (2001) 71-98.
- [19]S. J. Osher, R. P., Fedkiw, Level Set Methods and Dynamic Implicit Surfaces, Springer (2004).
- [20]X. D. Liu, R. P., Fedkiw, M., Kang, A Boundary Condition Capturing Method for Poisson's Equation on Irregular Domains, *Journal of Computational Physics*, 160 (2000) 151-178.
- [21]J. J. Ravnanger, Electrohydrodynamic Structuring of Colloidal Particles on Leaky Dielectric Drops, Norwegian University of Science and Technology (2013).
- [22]D. L. Whitaker, C., Kim, C. L., Vicente, M., Weilert, H. J., Maris, G. M., Seidel, Shape Oscillations in Levitated {He II} Drops, *Journal of Low Temperature Physics*, 113 (1998) 491-499.
- [23]O. O. Ajayi, A note on Taylor's electrohydrodynamic theory, *Proceedings of the Royal Society A*, 364 (1966) 499-507.
- [4] G. Taylor, Studies in Electrohydrodynamics. I. The Circulation Produced in a Drop by Electrical Field, *Proceedings of The Royal Society A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 291 (1966) 159-166.
- [5] J. D. Sherwood, Breakup of fluid droplets in electric and magnetic fields, *Journal of Fluid Mechanic*, 188 (1988) 133.
- [6]T. Tsukada, Y., Katayama, M., Hozawa, Theoretical and experimental studies of circulations inside and outside a deformed drop under a uniform field, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 26 (1993) 698-703.
- [7]J. Zhang, D. Y., Kwok, A 2D lattice Boltzmann study on electrohydrodynamic drop deformation with the leaky dielectric theory, *Journal of Computational Physics*, 206 (2005) 150-161.
- [8]E. Lac, G. M., Homsy, Axisymmetric deformation and stability of a viscous drop in a steady electric field, *Journal of Fluid Mechanic*, 590 (2007) 239-264.
- [9] J. Hua, L. K., Lim, C. H., Wang, Numerical simulation of deformation/motion of a drop suspended in viscous liquids under influence of steady electric fields, *Physics of Fluids*, 20 (2008) 113302.
- [10] E. Bjørklund, The level-set method applied to droplet dynamics in the presence of an electric field, *Journal of Computational Physics*, 38, pp 358-369, (2009).
- [11] Q. Yang, B. Q., Li, Y., Ding, 3D phase field modeling of electrohydrodynamic multiphase flows, *International Journal of Multiphase Flow*, 57 (2013) 1-9.
- [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] M. Hosseini, Coalescence behaviour of water droplets in water-oil interface under pulsatile electric fields, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 24 (2016) 1147-1153.

Study of leaky dielectric droplet behavior under an electric field: effect of viscosity and electric conductivity ratios

Mohammad Ali Bazrafkan¹, Pedram Pournaderi^{2*}

^{1,2}Department of Mechanical Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

Received: summer 2019 Accepted: summer 2019

Abstract

In this research, hydrodynamic behavior of a leaky dielectric droplet under an electric field is simulated. The level set method is used for interface tracking and the ghost fluid method is used for modeling discontinuous quantities at interface. Using Taylor's leaky dielectric model, electric field and electric force at the interface is calculated. Simulation results show the droplet deformation and induced flows inside and outside the droplet under an electric field. Droplet deformation dependent on the electric conductivity and electric permittivity ratio of droplet and surrounding fluid can be as elongation in electric field direction or perpendicular to it. The effect of electric conductivity ratio and viscosity ratio on hydrodynamic behavior of droplet is studied. According to the results, increase in these quantities increases the

deformation of droplet. Also, the enhancement rate of droplet deformation is decreased by enhancement of electric conductivity ratio and viscosity ratio.

Key words: Electric field, Leaky dielectric droplet, Level-set method, Ghost fluid method

*corresponding author: sp.pournaderi@yu.ac.ir