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

محمدعلی بذرافکن[۱]، سید پدرام پورنادری [۲و*]

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 ردیابی 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 گذردهی الکتریکی قطره و سیال پیرامون به صورت کشیدگی در راستای میدان (پرولیت) و یا کشیدگی در راستای عمود بر میدان (آبلیت) 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

۱- مقدمه

الکتروهیدرودینامیک شاخه‌ای از علم است که اساساً به تاثیر الکتریسیته 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 تعلیق 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، رسانای 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 رسانا دارای بار 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 رسانای 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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.6.5]

مشترک و نهایتا تغییر شکل قطره به‌صورت پرولیت[1] (کشیدگی در راستای میدان الکتریکی) بود. کونسکی و تاچرا [۲]، ضمن به‌دست آوردن رابطه‌ای برای تغییر شکل یک قطره‌ی مایع معلق در یک سیال عایق دیگر، از تغییر شکل آن به‌صورت کشیدگی در راستای میدان الکتریکی صحبت کردند. با وجود این آزمایش‌های آلن و میسون [۳]، وجود تغییر شکل آبلیت[2] (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، ایجاد تنش مماسی و حرکت سیال در امتداد مرزهای 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 به‌صورت تجربی را مشاهده کرد. تسوکادا و همکاران [۶]، 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 به‌دست آوردند. ژانگ و کواک [۷]، برای اولین بار با استفاده از روش لتیس-بولتزمن[3]، تغییر شکل یک قطره را تحت تاثیر میدان الکتریکی بررسی و نتایج قابل قبولی با توجه به تئوری تیلور ارائه کردند. هم‌چنین لک وهمکاران [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، رسانای 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 سه‌بعدی 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 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 می باشند. 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 وبر الکتریکی به عدد اهنسرج، به خوبی تغییر شکل قطره در محدوده فرکانس‌های پایین را توصیف می‌کند. هی و همکاران [۱۵]، پاسخ گذرای 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 اهنسرج، 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 تسریع 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 قوی‌تر 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 ردیابی 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 نویسندگان، در مطالعاتی که تا کنون در زمینه رفتار قطره نیمه رسانا تحت اثر میدان الکتریکی انجام شده، غالبا لزجت قطره و سیال محیط یکسان در نظر گرفته شده است. همچنین تحقیقات معدودی 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 نیمه رسانا 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:

[1]. Prolate
[2]. Oblate
[3]. Lattice-Boltzmann

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.6.5]

$$\boldsymbol{\nabla}\cdot\boldsymbol{u}=0 \tag{۱}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{\nabla u}=-\frac{1}{\rho}\boldsymbol{\nabla}P+\frac{1}{\rho}\boldsymbol{\nabla}\cdot(\boldsymbol{\tau^H}+\boldsymbol{\tau^E})+\boldsymbol{f_b} \tag{۲}$$

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

$$\boldsymbol{\tau^H}=\mu(\boldsymbol{\nabla u}+\boldsymbol{\nabla u}^T) \tag{۳}$$

$$\boldsymbol{\tau^E}=\varepsilon(\boldsymbol{EE}-\frac{1}{2}\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{EI}) \tag{۴}$$

μ لزجت دینامیکی، T عملگر ترانهاده، $\boldsymbol{I}$ تانسور واحد، $\boldsymbol{E}$ بردار میدان الکتریکی و ε گذردهی الکتریکی می‌باشد. با فرض سیال نیوتنی 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 به‌صورت زیر می‌باشد.

$$\boldsymbol{\nabla}\cdot(\sigma\boldsymbol{\nabla}\psi)=0 \tag{۵}$$

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:

$$[A]_\Gamma=A^+-A^- \tag{۶}$$

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

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

$$[\psi]_\Gamma=0 \tag{۷}$$

$$[\sigma\boldsymbol{\nabla}\psi\cdot\boldsymbol{n}]_\Gamma=0 \tag{۸}$$

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 به‌صورت زیر بیان می‌شود [۱۸]:

$$\left[\binom{\boldsymbol{n}}{\boldsymbol{t}}(P\boldsymbol{I}-\langle\boldsymbol{\tau^H}+\boldsymbol{\tau^E}\rangle)\boldsymbol{n}^T\right]_\Gamma=\binom{\gamma k}{0} \tag{۹}$$

که $\boldsymbol{n}$ بردار عمود بر سطح مشترک، $\boldsymbol{t}$ بردار مماس بر سطح مشترک، و k انحنا 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]:

$$[P]_\Gamma=\gamma k+2[\mu]_\Gamma\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{\nabla u}\cdot\boldsymbol{n^T}+\boldsymbol{n}\cdot\left[\varepsilon(\boldsymbol{EE}-\frac{1}{2}\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{EI})\right]_\Gamma\cdot\boldsymbol{n}^T \tag{۱۰}$$

$$[\mu\boldsymbol{\nabla u}]_\Gamma=[\mu]_\Gamma\boldsymbol{\nabla u}\binom{\boldsymbol{0}}{\boldsymbol{t}}^T\binom{\boldsymbol{n}}{\boldsymbol{t}}+[\mu]_\Gamma+\boldsymbol{n}^T\boldsymbol{n}(\boldsymbol{\nabla u})\boldsymbol{n}^T\boldsymbol{n}-\binom{\boldsymbol{0}}{\boldsymbol{t}}^T\binom{\boldsymbol{0}}{\boldsymbol{t}}\left([\mu]_\Gamma(\boldsymbol{\nabla u})^T+\left[\varepsilon\left(\boldsymbol{EE}-\frac{1}{2}\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{EI}\right)\right]_\Gamma\right)\boldsymbol{n}^T\boldsymbol{n} \tag{۱۱}$$

۳- روش‌های عددی

در این مطالعه، از زبان برنامه‌نویسی فرترن 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 گسسته‌سازی 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 موقعیت سطح مشترک از روش سطح تراز استفاده می‌شود [۱۹]. از روش وینو[۵] با دقت مرتبه پنج برای گسسته‌سازی جملات جابجایی استفاده می‌شود [۱۹]. همچنین، جملات زمانی در معادلات، با روش رانگ کوتا[۶] با دقت مرتبه سوم گسسته‌سازی می‌شوند [۱۹]. برای گسسته‌سازی 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 فرترن می‌باشد، استفاده می‌گردد. این حلگر از روش تجزیه ماتریس برای حل دستگاه معادلات خطی استفاده می‌کند.

۳-۱- روش سطح تراز

در روش سطح تراز با تعریف یک تابع اسکالر مانند $\emptyset$ (تابع سطح تراز) به صورت تابع فاصله علامت‌دار، فضای محاسباتی $\boldsymbol{\Omega}$ 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،

[4] . Projection Method
[5] . Weighted Essentially Non-Oscillatory
[6] . Total Variation Diminishing (TVD) Runge-Kutta
[7] . Parallel Sparse Direct Solver (PARDISO)

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.6.5]

$$\frac{D\emptyset}{Dt}=0 \quad \rightarrow \quad \frac{\partial\emptyset}{\partial t}+u_\Gamma\cdot\nabla\emptyset=0 \tag{۱۲}$$

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[8] 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. معمولاً از معادله (۱۴) برای مقداردهی مجدد تابع فاصله استفاده می‌شود [۱۹]،

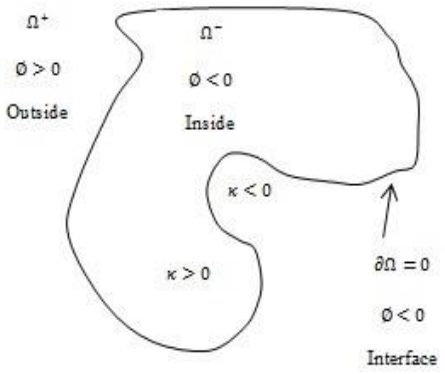
$$\frac{\partial\emptyset}{\partial\tau}=S(\emptyset_0)(1-|\nabla\emptyset|) \tag{۱۳}$$

$$S(\emptyset_0)=\frac{\emptyset_0}{\sqrt{{\emptyset_0}^2+\varepsilon^2}} \tag{۱۴}$$

τ زمان مجازی، $\emptyset_0$ مقدار قبل از اصلاح و $S(\emptyset_0)$ تابع علامت میرا است. مقدار $\varepsilon=max(\Delta x.\Delta y)$ می‌باشد. با حل معادله مقداردهی مجدد تا حالت دائم، شرط تابع فاصله $(|\nabla\emptyset|=1)$ برای تابع سطح تراز ارضاء می‌شود. اغلب با چند تکرار، حل پایای معادله مقداردهی مجدد بدست می‌آید. با استفاده از تابع $\emptyset$، بردار نرمال واحد $\boldsymbol{n}$ و انحنای سطح مشترک با استفاده از معادلات زیر بدست می‌آیند [۱۹].

$$\boldsymbol{n}=\frac{\boldsymbol{\nabla}\emptyset}{|\boldsymbol{\nabla}\emptyset|} \tag{۱۵}$$

$$\kappa=-\boldsymbol{\nabla}\cdot\boldsymbol{n} \tag{۱۶}$$



شکل ۱- تابع سطح تراز در نواحی مختلف

۳-۲- روش سیال مجازی

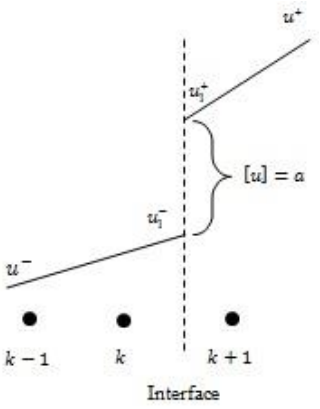
در این روش، اعمال ناپیوستگی‌ها بدون نیاز به در نظر گرفتن ضخامت برای سطح مشترک انجام می‌شود. به عبارتی دیگر کمیت‌ها در سطح مشترک میرا نمی‌شوند. هدف روش سیال مجازی، اعمال شرایط مرزی مناسب و اصلاح گسسته‌سازی نزدیک سطح مشترک می‌باشد. ایده اصلی این روش، محاسبه مشتقات کمیت‌های ناپیوسته به کمک مقادیر کمیت در 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]،

$$u^+(x)-u^-(x)=a(x_\Gamma) \tag{۱۷}$$

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:

$$u_k^+=u_k^-+a_\Gamma \tag{۱۸}$$

$$u_{k+1}^-=u_{k+1}^+-a_\Gamma \tag{۱۹}$$



شکل ۲- پرش کمیت $\boldsymbol{u}$ در سطح مشترک

۴- نتایج و بحث

۴-۱- تعریف مساله

در تحقیق حاضر، قطره نیمه‌رسانای 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[9] در مرزهای تقارن استفاده می‌شود. در مرزهای بالا و سمت راست

[8]. Reinitalization

[9]. Neumann

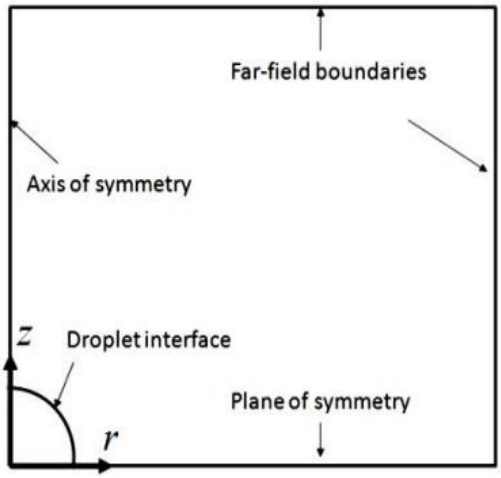
[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.6.5]

دامنه، شرط مرز آزاد (فشار صفر و گرادیان صفر برای مولفه‌های سرعت و پتانسیل الکتریکی) اعمال می‌شود. با توجه به هندسه مسأله، از معادلات حاکم در حالت تقارن محوری استفاده می‌شود و مسأله فقط برای یک چهارم دامنه حل می‌شود. پتانسیل الکتریکی مثبت روی مرز بالا و پتانسیل صفر روی مرز پایین اعمال می‌شود. به عنوان شرط اولیه مقدار صفر برای تمام کمیت‌ها در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها شامل شعاع قطره، کشش سطحی، نسبت لزجت دینامیکی، نسبت چگالی، نسبت ضریب رسانایی الکتریکی، نسبت ضریب گذردهی الکتریکی، شدت میدان الکتریکی، طول و ارتفاع دامنه می‌باشند که مقدار آن‌ها برابر با $R = 1\ mm$، $\gamma = 0 \cdot 03\ N/m$، $\mu_r = \frac{\mu_i}{\mu_e} = 1$ ، $\rho_r = \frac{\rho_i}{\rho_e} = 1$ ، $\sigma_r = \frac{\sigma_i}{\sigma_e} = 3$ ، $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_e} = 1$ ، $L = 4R$ و $h = 4R$ می‌باشند. زیرنویس‌های i و j بترتیب به قطره و سیال محیط اشاره دارند. در تمام شبیه‌سازی‌ها از شبکه $R/\Delta x = 48$ استفاده شده است. $E_0 = 300000\frac{V}{m}$

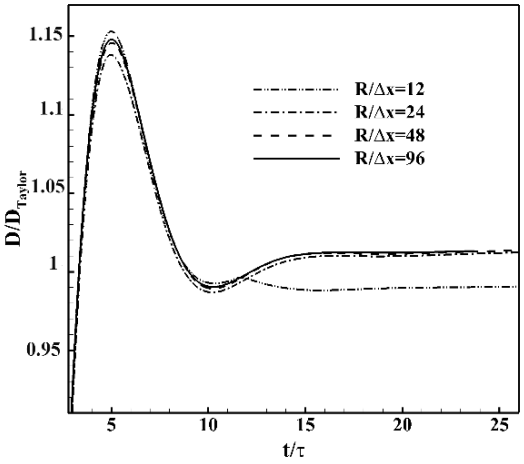
۴-۲- مطالعه شبکه

همگرایی حل گذرا به یک حالت پایدار صحیح را می‌توان از طریق مقایسه با نتایج تحلیلی حالت پایدار برای تغییر شکل‌های کوچک نشان داد. برای این منظور در این قسمت تغییرشکل یک قطره نیمه‌رسانای معلق در یک سیال نیمه‌رسانای دیگر در رژیم تغییر شکل کوچک مورد بررسی قرار می‌گیرد. زمان مشخصه الکتریکی سیال به‌صورت $t_c = \frac{\varepsilon}{\sigma}$ تعریف می‌شود. با توجه به اینکه زمان مشخصه الکتریکی قطره از زمان مشخصه الکتریکی محیط کمتر است، بارهای آزاد در قطره نسبت به محیط اطراف سریع‌تر به سطح مشترک می‌رسند و باعث جهت‌گیری دوقطبی‌های الکتریکی در راستای میدان الکتریکی اعمالی می‌شود. جهت‌گیری دوقطبی‌ها باعث اعمال نیروی نرمال در راستای میدان الکتریکی و منجر به کشیده شدن قطره (تغییر شکل پرولیت) در این راستا می‌شود. نیروهای کشش سطحی و لزجت در برابر تغییر شکل قطره مقاومت می‌کنند و سرانجام قطره به حالت تعادل می‌رسد. شکل (۴) اثر ریز کردن شبکه را بر روی تغییر شکل قطره نیمه‌رسانا نشان می‌دهد. در هر یک از شبکه‌ها، پارامتر تغییر شکل قطره بر حسب زمان رسم می‌شود. پارامتر تغییر شکل $D = (L - B)/(L + B)$ در محور عمودی توسط تغییر شکل تحلیلی، $D_{Analitycal}$، ارائه شده بوسیله تیلور [۴] که از رابطه (۲۰) بدست می‌آید، بی‌بعد شده است:

$$D_{Analytical} = \frac{9}{16}\frac{{\sigma_r}^2}{(2+\sigma_r)^2} \frac{(\sigma_r - 1)^2 + (\sigma_r - \varepsilon_r)\left[2 + \frac{3}{5}\frac{2+3\mu_r}{1+\mu_r}\right]}{{\sigma_r}^2} \qquad (۲۰)$$



شکل ۳- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی



شکل ۴- تغییرات تغییر شکل قطره با زمان برای شبکه‌های مختلف

در رابطه تغییرشکل، L و B طول کشیدگی یا پهن‌شدگی در راستای محور تقارن و محور عرضی می‌باشند. محور عرضی نیز توسط زمان مشخصه $\tau = \sqrt{(2\rho_e + 3\rho_i)R^3/24\gamma}$ بی‌بعد شده است[۲۲]. چنانچه مشاهده می‌شود، اختلاف نتایج عددی برای شبکه های $R/\Delta x = 48$ و $R/\Delta x = 96$ بسیار ناچیز می‌باشد. بنابراین در تمام شبیه‌سازی‌ها از شبکه $R/\Delta x = 48$ استفاده شده است. مشاهده می‌شود که پاسخ دینامیکی عددی به دست آمده در طول زمان به سمت ۱ همگرا می‌شود که صحت نتایج را تایید می‌کند.

۴-۳- تغییرشکل‌های پرولیت و آبلیت قطره

همان‌طور که اشاره شد در اثر اعمال تنش‌های نرمال ناشی از میدان الکتریکی، قطره تغییر شکل می‌دهد که این تغییر شکل بسته به خصوصیات الکتریکی سیال می‌تواند 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)، قطره‌ی پرولیت و تغییر شکل منفی (D<0)، قطره‌ی آبلیت را

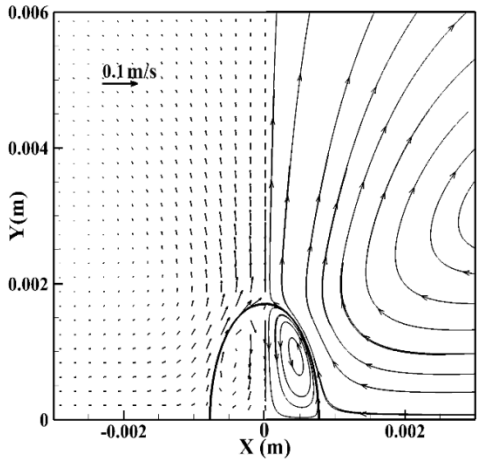
[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.6.5]

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

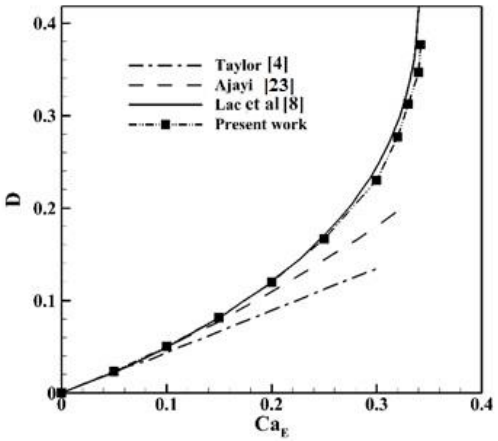
در این بخش، تغییر شکل قطره با افزایش قدرت میدان الکتریکی و درنتیجه افزایش عدد موبینگی الکتریکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامتر بی بعد مهم در این مساله عدد موبینگی الکتریکی $Ca_E = E^2\varepsilon_e R/\gamma$ است که نسبت نیروی الکتریکی به نیروی کشش سطحی را نشان می دهد. طول دامنه، ارتفاع دامنه، نسبت رسانایی الکتریکی و نسبت گذردهی الکتریکی ترتیب $L = 5R$، $h = 10R$، $\sigma_r = 10$ و $\varepsilon_r = 0.1$ می‌باشند. بقیه پارامترها مشابه حالت قبل هستند. شکل (۵) خطوط جریان و بردارهای سرعت را برای تغییر شکل پرولیت در عدد موبینگی الکتریکی ۰/۳۵ بعد از پایا شدن تغییر شکل نشان می‌دهد. نیروی الکتریکی تمایل 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، تغییرشکل قطره به صورت پرولیت و جهت جریان القایی داخل قطره پادساعتگرد می‌باشد. نوع تغییرشکل 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 ($\sigma_r > \varepsilon_r$) ، 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 به‌گونه‌ای می‌باشد که باعث ایجاد یک جریان پادساعتگرد در قطره می‌شود.

شکل (۶) تغییر شکل پرولیت قطره نیمه‌رسانا را در اعداد موبینگی الکتریکی مختلف برای $\sigma_r = 10$ و $\varepsilon_r = 0.1$ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد موبینگی الکتریکی مقدار تغییرشکل قطره افزایش می‌یابد. تطابق خوبی بین نتایج کار حاضر و نتایج لک وهمکاران [۸]، خصوصا در اعداد موبینگی کوچک‌تر مشاهده می‌شود. اختلاف نتایج در اعداد موبینگی 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 شبیه سازی با نتایج تحلیلی تیلور [۴] و آجای [۲۳] که بترتیب از مرتبه اول و دوم می باشند، مقایسه شده است. نتایج این تئوری‌ها برای تغییر شکل‌های کوچک معتبر می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که در اعداد موبینگی الکتریکی کوچک (تغییر شکل‌های کوچک) تطابق خوبی بین نتایج کار حاضر و نتایج تحلیلی تیلور و آجای مشاهده می‌شود.

در شبیه‌سازی بعدی نسبت رسانایی الکتریکی و نسبت گذردهی الکتریکی ترتیب $\sigma_r = 0.1$ و $\varepsilon_r = 2$ می‌باشند. بقیه پارامترها مشابه حالت قبل هستند. شکل (۷) بردارهای سرعت و خطوط جریان را تحت $Ca_E = 0 \cdot 306$ بعد از به تعادل رسیدن قطره نشان می‌دهد. همانطور که قبلا هم اشاره شد، نیروی الکتریکی تمایل 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 $\sigma_r = 10$، $\varepsilon_r = 0.1$ و $Ca_E = 0 \cdot 35$

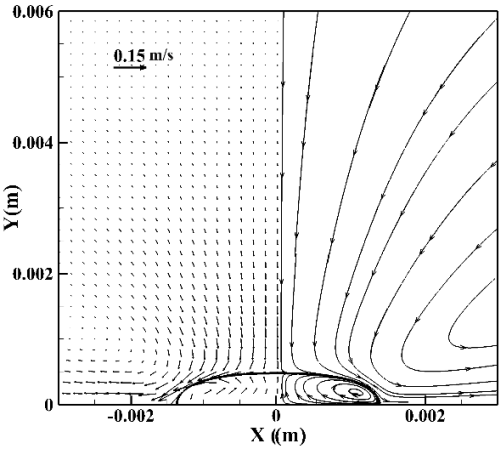


شکل ۶- تغییر شکل پرولیت قطره نیمه‌رسانا در اعداد موبینگی الکتریکی مختلف برای $\sigma_r = 10$ و $\varepsilon_r = 0.1$

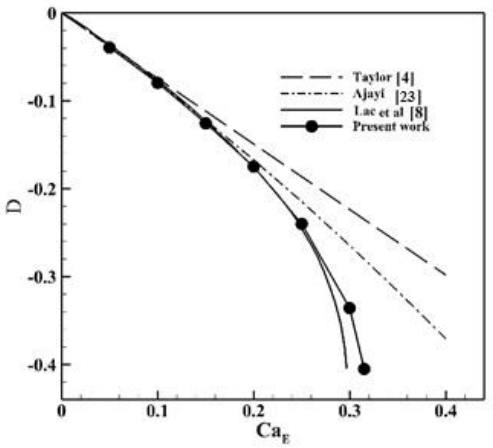
گذردهی الکتریکی است، تغییرشکل قطره به صورت آبلیت و جهت جریان القایی داخل قطره ساعتگرد می‌باشد. با اعمال میدان الکتریکی به دلیل اینکه زمان مشخصه سیال پیرامون از زمان مشخصه قطره کمتر می‌باشد ($\sigma_r < \varepsilon_r$)، بارهای آزاد سیال پیرامون سریع‌تر به سطح مشترک می‌رسند و دوقطبی‌های الکتریکی در راستای عمود بر میدان الکتریکی جهت‌گیری می‌کنند. این جهت‌گیری دوقطبی‌ها باعث اعمال نیروی فشاری در راستای عمود بر میدان اعمالی به قطره می‌شود و باعث می‌گردد قطره در این راستا کشیده شود. جهت تنش‌های مماسی به‌گونه‌ای می‌باشد که باعث ایجاد یک جریان ساعتگرد در قطره می‌شود.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.6.5]

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



شکل ۷- تغییر شکل آبلیت قطره نیمه‌رسانا برای $\sigma_r = 0.1$ ، $\varepsilon_r = 2$ و $Ca_E = 0 \cdot 306$



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

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 وهمکاران [۸]، نشان می‌دهند. روش عددی حاضر در اعداد مویینگی الکتریکی بالاتر نسبت به روش لک و همکاران مقدار تغییرشکل کمتری برای قطره پیش‌بینی می‌نماید. چنانچه پیشتر ذکر شد، آنها در تحقیق خود از جملات اینرسی صرفنظر نمودند. با افزایش عدد مویینگی الکتریکی، اهمیت جملات اینرسی و نقش آنها در تغییرشکل قطره افزایش می‌یابد.

۴-۴- تاثیر نسبت رسانایی الکتریکی بر روی تغییرشکل قطره

برای بررسی تاثیر نسبت نسبت رسانایی در ارتباط با تغییر شکل قطره نیمه‌رسانا تحت اثر میدان الکتریکی، شبیه‌سازی برای حالت ($\sigma_r = 3$ و $\varepsilon_r = 1$) مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نسبت گذردهی ۱، تغییر شکل قطره برای زمانی که نسبت رسانایی الکتریکی بیشتر از یک در نظر گرفته شود به‌صورت پرولیت می‌باشد و زمانی که نسبت رسانایی کمتر از ۱ باشد، به‌صورت آبلیت می‌باشد. در اینجا برای بررسی تاثیر نسبت رسانایی الکتریکی محدوده تغییر شکل پرولیت (نسبت رسانایی بیشتر از یک) درنظر 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، نرخ افزایش تغییر شکل قطره کم می‌شود. اختلاف بیشتر در رسانایی‌های دوسیال منجر به انباشته شدن بیشتر بار الکتریکی در سطح مشترک می‌شود که نتیجه آن افزایش تنش برشی مماسی روی سطح و تغییرشکل بیشتر است.

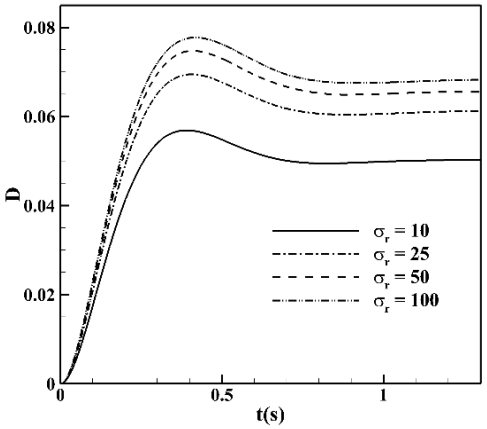
۴-۵- تاثیر نسبت رسانایی الکتریکی بر روی تغییرشکل قطره

برای بررسی تاثیر نسبت لزجت بر تغییرشکل قطره نیمه‌رسانا در میدان الکتریکی، شبیه‌سازی برای قطره با نسبت رسانایی الکتریکی، نسبت گذردهی و عدد مویینگی الکتریکی بترتیب ۳، ۱ و ۰/۴ 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.

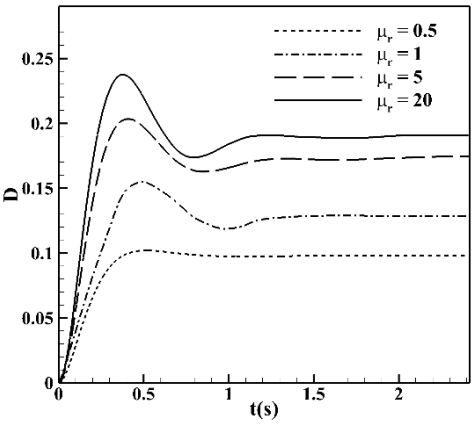
۵- نتیجه‌گیری

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 گذردهی الکتریکی آنها بزرگ‌تر باشد، قطره در راستای میدان الکتریکی کشیده می‌شود و جریان چرخشی در جهت پادساعتگرد در قطره ایجاد می‌شود. زمانی که نسبت رسانایی الکتریکی قطره و سیال پیرامون از نسبت گذردهی 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.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.6.5]



شکل ۹- بررسی تغییرشکل 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 $\sigma_r = 3$، $Ca_E = 0 \cdot 4$ و $\varepsilon_r = 1$

اثر پارامترهای تاثیر گذار 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 افزیش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت رسانایی الکتریکی و نسبت لزجت، آهنگ افزایش تغییر شکل قطره کاهش می‌یابد.

۶- فهرست علامت‌ها

علائم انگلیسی	
عدد موییننگی الکتریکی	Ca_E
تغییرشکل، m	D
بردار میدان الکتریکی، V/m	$\boldsymbol{E}$
نیروی حجمی بر واحد جرم، N/kg	$\boldsymbol{f_b}$
تانسور همانی	$\boldsymbol{I}$
بردار یکه عمود بر سطح مشترک	$\boldsymbol{n}$
فشار، N/m^2	P
شعاع قطره، m	R
بردار یکه مماس بر سطح مشترک	$\boldsymbol{t}$
بردار سرعت، m/s	$\boldsymbol{u}$
علائم یونانی	
ضریب گذردهی الکتریکی، F/m	ε
تابع سطح تراز، m	φ
سطح مشترک	Γ
کشش سطحی، N/m	γ
انحناء، m^{-1}	κ
ضریب لزجت، $N.s/m^2$	μ
نسبت ضریب لزجت قطره به محیط	μ_r
چگالی، kg/m^3	ρ
پتانسیل الکتریکی، V	ψ
رسانش الکتریکی، S/m	σ
نسبت رسانش الکتریکی قطره به محیط	σ_r
تنش الکتریکی، N/m^2	τ^E
تنش هیدرودینامیکی، N/m^2	τ^H

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 distorsion 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.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.6.5]

[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., Sjoblom, 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 Bazrafkan[1], Pedram Pournaderi[2*]

[1,2]Department of Mechanical Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

Received: summer 2019 Accepted: summer 2019

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.6.5]

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.6.5]