



Numerical Simulation of a Non-Newtonian Droplet under an Electric Field

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Delbaznasab L.¹ MSc,
Pournaderi P.*¹ PhD,
Bazrafkan M.A.¹ MSc

How to cite this article

Delbaznasab L, Pournaderi P, Bazrafkan M.A. Numerical Simulation of a Non-Newtonian Droplet under an Electric Field. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(1):157-169.

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Yasouj University, Yasouj, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Yasouj University, Yasouj, Iran
Phone: +98 (74) 31005171
Fax: +98 (74) 31009555
sp.pournaderi@yu.ac.ir

Article History

Received: October 13, 2018
Accepted: May 7, 2019
ePublished: January 01, 2020

ABSTRACT

In this research, the deformation of a non-Newtonian leaky-dielectric droplet suspended in another non-Newtonian fluid under a uniform electric field is simulated. The aim of this research is the studying the effect of the electric field on the hydrodynamic of non-Newtonian droplets and also the comparison between the behavior of Newtonian and non-Newtonian droplets in the presence of an electric field. The power law model is used to describe non-Newtonian fluid behavior. The level set method is employed to determine the location of the interface. Also, the ghost fluid method is used to apply discontinuities at the interface. By applying an electric field, a non-Newtonian droplet deforms similarly to a Newtonian one. This deformation may occur either in the direction of the electric field or perpendicular to it. By increasing the electric Capillary number (ratio of electric force to surface tension force) the deformation of the non-Newtonian droplet with different power law constants increases. In this research, the behavior of different non-Newtonian droplets with different power constants was compared and it was observed that by an increase in the power law constant the drop deformation increases. According to the results, the deformation of a shear-thinning droplet under an electric field is less than the deformation of a Newtonian droplet and the deformation of a Newtonian droplet is less than the deformation of a shear thickening droplet.

Keywords Deformation; Power-Law; Level-Set Method; Ghost Fluid Method; Electric Field

CITATION LINKS

[1] Iterated stretching, extensional rheology and formation of beads-on-a-string ... [2] Droplet deformation of a strongly shear thinning dense suspension of ... [3] Influence of electric field on saturated film ... [4] Sharp-interface simulations of drop deformation in ... [5] Influence of surfactant on drop deformation in an electric ... [6] Electrohydrodynamic instabilities at interfaces subjected to ... [7] A charge-conservative approach for simulating ... [8] Numerical simulation of drop deformations and breakup modes ... [9] Breakup and deformation of a falling droplet under ... [10] 3D phase field modeling of electrohydrodynamic ... [11] Numerical simulation of electrohydrodynamic flows of ... [12] Analysis of deformation and breakup of droplets in high ... [13] The influence of inertia and charge relaxation on ... [14] A hybrid immersed boundary and immersed interface ... [15] Stable deformation of droplets surface subjected to a high-voltage ... [16] Numerical study on transient response of droplet ... [17] Analysis of partial electrocoalescence by Level-Set and finite ... [18] Three-dimensional numerical simulation of bubble dynamics ... [19] Breakup mode transformation of leaky dielectric droplet under ... [20] Electric field effect on the hydrodynamic and ... [21] Dielectrophoretic motion and deformation of a liquid drop in an ... [22] Study on the transient response of water-in-oil droplet interface to ... [23] Breakup modes and criterion of droplet with surfactant under direct current ... [24] Electrohydrodynamics of confined two-dimensional ... [25] Hydrodynamic and electrostatic interactions of water droplet pairs ... [26] Numerical study of droplet dynamics in a steady electric field using a hybrid lattice ... [27] Deformation and breakup of a confined droplet in shear flows with ... [28] Weighted essentially non-oscillatory ... [29] A boundary condition capturing method for multiphase ... [30] Level set methods and dynamic ... [31] A numerical investigation of droplet impact on a heated wall in the film boiling ... [32] The electric field effect on the droplet collision with a heated surface in the Leidenfrost ... [33] The effect of the surface inclination on the hydrodynamics and thermodynamics of leidenfrost droplets [34] A boundary condition capturing method for ... [35] Study of droplet impact on a wall using a sharp interface ... [36] Multiple-relaxation-time lattice Boltzmann model for generalized ... [37] The circulation produced in a drop by an electric ... [38] A note on Taylor's electrohydrodynamic ...

شبیه‌سازی عددی قطره غیرنیوتنی تحت اثر میدان الکتریکی

لیلا دلبازنسب MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

سیدپدرام پورنادری * PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

محمدعلی بذرافکن MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

چکیده

در این پژوهش به شبیه‌سازی عددی قطره نیمه رسانای غیرنیوتنی تحت اثر میدان الکتریکی یکنواخت پرداخته می‌شود. هدف این تحقیق، مطالعه تاثیر میدان الکتریکی بر هیدرودینامیک قطره غیرنیوتنی و مقایسه رفتار قطرات نیوتنی و غیرنیوتنی تحت اثر میدان الکتریکی است. از مدل قانون توانی برای توصیف رفتار سیال غیرنیوتنی استفاده می‌شود. از روش سطح تراز برای تعیین موقعیت سطح مشترک و از روش سیال مجازی برای اعمال ناپیوستگی‌ها در سطح مشترک استفاده می‌شود. قطره غیرنیوتنی مشابه قطره نیوتنی تحت اثر میدان الکتریکی دچار تغییر شکل می‌شود. این تغییر شکل ممکن است به صورت کشیدگی در راستای میدان یا در راستای عمود بر آن باشد. با افزایش عدد مویبندی الکتریکی (نسبت نیروی الکتریکی به نیروی کشش سطحی) برای قطرات غیرنیوتنی با ثابت‌های توانی مختلف، تغییرشکل قطره افزایش می‌یابد. در این پژوهش، رفتار قطرات غیرنیوتنی با ثابت‌های توانی مختلف با یکدیگر مقایسه و مشاهده شد که با افزایش ثابت قانون توانی تغییر شکل قطره افزایش می‌یابد. بر طبق نتایج حاصل، تغییر شکل قطره رقیق‌شونده برشی از تغییرشکل قطره نیوتنی و تغییر شکل قطره نیوتنی از تغییر شکل قطره غلیظ‌شونده برشی کمتر است.

کلیدواژه‌ها: تغییرشکل، قانون توانی، روش سطح تراز، روش سیال مجازی، میدان الکتریکی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۱۷

* نویسنده مسئول: sp.pournaderi@yu.ac.ir

۱- مقدمه

کاربرد میدان الکتریکی در جریان‌های دوفازی در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است و منجر به تولید شاخه جدیدی از علم به نام الکتروهیدرودینامیک شده است. الکتروهیدرودینامیک در واقع شاخه‌ای از علم است که علم هیدرودینامیک و الکترواستاتیک را به هم مربوط می‌کند. به این ترتیب که معادلات حرکت سیال تحت تأثیر میدان الکتریکی بررسی می‌شوند. درک رفتار دینامیکی تغییر شکل و تجزیه قطرات در انواع اسپری، صنایع غذایی، سیستم‌های احتراقی و سنتز مواد حائز اهمیت است. به‌طور نمونه، تجزیه قطره از طریق تأثیر بر تعداد و اندازه قطرات و در نتیجه نرخ اختلاط، نقش اساسی در راندمان سیستم‌های احتراقی ایفا می‌کند.

از میدان الکتریکی می‌توان برای کنترل اندازه، شکل و موقعیت قطرات استفاده کرد. به‌طور ویژه می‌توان به استفاده از میدان‌های

الکتریکی برای کنترل رفتار هیدرودینامیکی مخلوط‌های پلیمری (خصوصاً شکل و جهت‌دهی فاز پراکنده؛ Dispersed Phase) به‌عنوان سیالات غیرنیوتنی [1, 2] اشاره کرد.

محققان زیادی اثر میدان الکتریکی روی جریان سیال را مطالعه کردند. تومار و همکاران [3] با ترکیب روش حجم سیال و سطح تراز نرخ انتقال حرارت و انتقال جرم در ناحیه جوشش فیلمی را تحت اثر میدان الکتریکی یکنواخت شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که با افزایش شدت میدان الکتریکی انتقال جرم و حرارت افزایش می‌یابد. تایگن و مانکجر [4] تغییر شکل قطره عایق را با استفاده از روش سطح تراز به‌صورت عددی مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که فرمول‌بندی نامبرای روش سطح تراز (به کمک روش سیال مجازی) نسبت به فرمول‌بندی میرا از دقت بالاتری برخوردار است. تایگن و مانکجر [5] به شبیه‌سازی عددی تغییر شکل قطره رسانای غوطه‌ور در یک سیال دیگر همراه با افزودنی‌های سطحی تحت اثر میدان الکتریکی پرداختند. آن‌ها برای تعیین موقعیت سطح مشترک از روش سطح تراز استفاده کردند و نشان دادند که حضور ناخالصی‌ها بسته به نحوه تغییر شکل قطره و راستای میدان الکتریکی، می‌تواند در قطره جریان چرخشی ایجاد کند که منجر به افزایش یا کاهش میزان تغییر شکل می‌شود.

گامبیر و دکر [6] نوسانات سطح مشترک دو سیال را تحت اثر میدان الکتریکی غیریکنواخت، با نوسانات آن در حالت میدان الکتریکی یکنواخت برای دو مدل نیمه‌رسانا و رسانا مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که کنترل ناپایداری‌های سطح مشترک برای حالتی که میدان الکتریکی نوسانی باشد، بهتر انجام می‌شود. آن‌ها همچنین نشان دادند که با افزایش فرکانس ولتاژ به‌کاربرده شده، میدان‌های الکتریکی نوسانی می‌توانند ناپایداری‌های موجود در سطح مشترک را برای سیستمی که حالت پایدار آن فرکانس صفر است، کنترل کنند.

هررا و همکاران [7] از روش حجم سیال برای شبیه‌سازی سه‌بعدی قطره نیمه‌رسانا استفاده کردند. آن‌ها با حل معادله بقای بار الکتریکی توانستند مراحل گذر بار از درون به سطح قطره را آنالیز کنند و سیر تکامل زمانی برای توزیع بار را پیش‌بینی کنند. آن‌ها همچنین انحراف از نتایج تحلیلی را برای تغییر شکل‌های بزرگ مشاهده کردند.

پاک‌نعمت و همکاران [8] با کمک روش تفاضل محدود، تغییر شکل قطره نیوتنی را برای سه مدل رسانا، عایق و نیمه‌رسانا شبیه‌سازی کردند. آن‌ها از روش سطح تراز و سیال مجازی برای مدل‌کردن سطح مشترک استفاده کردند. برای مدل کاملاً رسانا و کاملاً عایق تنها تغییر شکل در راستای میدان الکتریکی اعمالی مشاهده شد. درحالی که برای مدل نیمه‌رسانا، چهار نوع پاسخ دینامیکی (وابسته به ویژگی‌های فیزیکی قطره و سیال) مشاهده شد. این پاسخ‌ها شامل دو نوع تغییر شکل به‌صورت پرولیت (Prolate) و آبلیت (Oblate) و همچنین ایجاد دو نوع جریان القایی چرخشی ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد درون قطره بودند. آن‌ها همچنین عدد

هو و همکاران^[14] با ترکیب روش‌های سطح مشترک غوطه‌ور و مرز غوطه‌ور هیبریدی به مطالعه رفتار هیدرودینامیکی قطره نیمه‌رسانا در حضور میدان الکتریکی پرداختند. برای تغییر شکل‌های کوچک، نتایج با نتایج تئوری‌های پیشین مطابقت داشت. آن‌ها اثر میدان الکتریکی بر قطره در جریان برشی را نیز بررسی کردند و مشاهده نمودند که با افزایش شدت میدان الکتریکی، تغییر شکل قطره افزایش می‌یابد.

گنگ و همکاران^[15] یک مدل دینامیکی برای محاسبه تغییر شکل قطره آب در روغن تحت اثر میدان الکتریکی با در نظر گرفتن نیروی میدان الکتریکی، فشار داخلی قطره و نیروی کشش سطحی ارائه دادند. زمانی که قطره در حالت پایدار قرار داشت مدل ارائه‌شده تغییر شکل قطره را به خوبی پیش‌بینی می‌کرد. ولی برای میدان‌های الکتریکی قوی، اختلاف آشکاری بین نتایج مدل تئوری و نتایج آزمایشگاهی مشاهده شد.

هی و همکاران^[16] فرآیند تغییر شکل یک قطره رسانا در حضور میدان الکتریکی را با استفاده از روش اجزاء محدود شبیه‌سازی کردند. آن‌ها برای دنبال کردن سطح مشترک از روش سطح تراز استفاده کردند. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش شدت میدان الکتریکی و نیز افزایش اندازه قطره تغییر شکل قطره افزایش و با افزایش کشش سطحی، تغییر شکل قطره کاهش می‌یابد. رابطه‌ای نیز بین زمان تغییر شکل در حالت بی‌بعد و عدد موئینگی الکتریکی ارائه شد. ویواکیو و همکاران^[17] ادغام یک قطره آب معلق در روغن با لایه‌ای از آب را در حضور میدان الکتریکی با استفاده از روش اجزاء محدود شبیه‌سازی کردند. برای ردیابی سطح مشترک از روش سطح تراز استفاده شد. آن‌ها دریافتند که عدد وبر (Weber) الکتریکی و عدد اونسرج (Ohnesorge)، اعداد بی‌بعد مؤثر بر این پدیده هستند. آن‌ها همچنین، شرایطی را که در آن ادغام قطره در لایه مایع اتفاق نمی‌افتد را گزارش کردند.

وانگ و همکاران^[18] رفتار یک حباب در یک کانال افقی با سطح مقطع مربعی را در شرایط جاذبه ضعیف تحت تأثیر میدان الکتریکی غیریکنواخت شبیه‌سازی کردند. آن‌ها از ترکیب روش‌های سطح تراز و حجم‌سیال برای مدل‌سازی سطح مشترک استفاده نمودند و دریافتند که میدان الکتریکی غیریکنواخت مانند نیروی شناوری، بالارفتن حباب را تقویت می‌کند و با افزایش شدت میدان الکتریکی یا نسبت گذردهی الکتریکی سیال به گاز، حباب دچار تغییر شکل بزرگ‌تری می‌شود و سرعت دورشدن آن از سطح افزایش می‌یابد.

هو/نگ و همکاران^[19] تجزیه قطرات نیمه‌رسانا را در حضور میدان الکتریکی با ترکیب روش‌های سطح تراز و حجم سیال شبیه‌سازی کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش عدد موئینگی الکتریکی، مود تجزیه قطره از حالت شبیه جت به حالت شبیه دمبل منتقل می‌شود. درحالی که افزایش نسبت لزجت قطره به سیال محیط منجر به انتقال مود تجزیه قطره از حالت شبیه دمبل به حالت شبیه جت می‌شود.

موئینگی الکتریکی بحرانی برای تجزیه قطره را برای هر سه مدل رسانا، نیمه‌رسانا و عایق محاسبه کردند.

برازنیا و گنجی^[9] با استفاده از روش شبکه بولتزمان تجزیه و تغییر شکل قطره نیمه‌رسانای در حال سقوط را تحت اثر میدان الکتریکی و گرانش شبیه‌سازی کردند. آن‌ها نشان دادند که برای قطره با ضریب هدایت الکتریکی بزرگ‌تر از ضریب گذردهی الکتریکی (Permittivity)، قطره به طرف قطب‌ها کشیده می‌شود. درحالی که برای قطره با ضریب هدایت الکتریکی کوچک‌تر از ضریب گذردهی الکتریکی، قطره در راستای عمود بر قطب‌ها کشیده می‌شود. آن‌ها همچنین نشان دادند که با افزایش عدد اتووس (Eotvos؛ نسبت نیروی گرانش به نیروی کشش سطحی) تغییر شکل بیشتری مشاهده خواهد شد. آن‌ها نشان دادند که روش شبکه بولتزمان می‌تواند به خوبی رفتار قطره نیمه‌رسانا را پیش‌بینی کند.

یانگ و همکاران^[10] به کمک روش تفاضل محدود، تغییر شکل قطره را برای مدل نیمه‌رسانا به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که یک قطره نیمه‌رسانا در میدان الکتریکی مراحل مختلفی را طی می‌کند تا به صورت آبلیت تغییر شکل دهد. این مراحل شامل انتقال از حالت کروی اولیه به حالت پرولیت و سپس انتقال به حالت کروی میانی و سرانجام تغییر شکل به صورت آبلیت است.

لیما و داویلا^[11] به شبیه‌سازی تغییر شکل قطرات در حضور میدان الکتریکی پرداختند. آن‌ها به دنبال مقایسه واکنش قطرات نیوتنی و غیرنیوتنی (ویسکوالاستیک) در حضور میدان الکتریکی بودند و شبیه‌سازی‌هایی را برای دو نوع قطره رسانای نیوتنی و ویسکوالاستیک با استفاده از نرم‌افزار اپن‌فوم انجام دادند. از مدل پایداری گیس‌کاس (Giesecus) برای توصیف رفتار ویسکوالاستیک قطرات و از روش حجم سیال برای تعیین موقعیت سطح مشترک استفاده شد. برای مدل ویسکوالاستیک مشاهده شد که با افزایش زمان آرامش و فاکتور پویایی، تغییر شکل‌ها کاهش پیدا می‌کنند. همچنین، برای یک محلول پلیمری ویسکوالاستیک، تغییر شکل‌ها در مقایسه با سیال نیوتنی کمی بیشتر هستند.

تیان‌یو و همکاران^[12] به مطالعه عددی و تجربی تجزیه و تغییر شکل قطرات آب در حضور میدان الکتریکی متناوب پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش شدت میدان الکتریکی، افزایش قطر قطره و کاهش کشش سطحی سبب افزایش زاویه تغییر شکل قطره می‌شود و زمانی که اندازه میدان از مقدار بحرانی فراتر رود تجزیه قطره رخ می‌دهد.

لاناز و همکاران^[13] تغییر شکل آبلیت قطره نیمه‌رسانا را با روش انتگرال مرزی به صورت تقارن محوری شبیه‌سازی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که تغییر شکل اولیه قطره به صورت پرولیت است. دلیل این امر نبود بار کافی در سطح مشترک در زمان‌های اولیه حل، عنوان شد که باعث می‌شود قطره نیمه‌رسانا در ابتدا مشابه قطره کاملاً عایق رفتار کند.

ژیا و ریپود^[25] به صورت آزمایشگاهی سقوط دو قطره آب در روغن و تأثیر متقابل آن‌ها بر هم تا لحظه ادغام را در حضور میدان الکتریکی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که در شروع فرآیند ادغام نیروهای شناوری، کولمب (ناشی از اختلاف بار الکتریکی قطرات) و لزج غالب هستند. دو نیروی اول با تغییر فاصله بین قطرات تغییری نمی‌کنند. مقدار این نیروها به اندازه و بار الکتریکی قطرات بستگی دارد. هنگامی که قطرات به هم نزدیک می‌شوند، نیروی لزج که نزدیک شدن آن‌ها را کند می‌کند، افزایش می‌یابد. نیروی الکترواستاتیکی نیز با فاصله بین دو قطره رابطه عکس دارد و در جهت جذب قطرات به یکدیگر و ادغام آن‌ها عمل می‌کند.

کوی و همکاران^[26] با استفاده از روش‌های حجم محدود و شبکه بولتزمن دینامیک قطره تحت اثر میدان الکتریکی را مطالعه کردند. در حالت تغییر شکل آبلیت قطره، در نسبت‌های رسانایی کم با افزایش عدد موپینگی الکتریکی، تغییر شکل قطره از حالت پایا به ناپایا انتقال می‌یابد و تجزیه قطره رخ می‌دهد. ولی در نسبت‌های رسانایی بالا تجزیه قطره اتفاق نمی‌افتد و قطره صرف نظر از مقدار عدد موپینگی الکتریکی سرانجام به حالت پایا می‌رسد. در حالت تغییر شکل پرولیت قطره، با افزایش عدد موپینگی الکتریکی ممکن است نوسانات متناوب و سرانجام تجزیه قطره اتفاق افتد.

چنانچه ملاحظه می‌شود، مطالعات صورت گرفته در زمینه تأثیر میدان الکتریکی روی قطرات غالباً مربوط به سیالات نیوتنی هستند. تعداد بسیار کمی از مطالعات نیز مربوط به تأثیر میدان الکتریکی روی سیالات ویسکوالاستیک هستند. براساس اطلاع نویسنده، در زمینه تأثیر میدان الکتریکی روی قطرات غیرنیوتنی رقیق شونده برشی (Shear Thinning) و غلیظ شونده برشی (Shear Thickening) تاکنون پژوهشی صورت نگرفته است. این درحالی است که در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند مخلوط‌های پلیمری سیال، رفتارهای غیرنیوتنی نظیر رفتار رقیق شونده برشی از خود نشان می‌دهد. در کار حاضر رفتار هیدرودینامیکی قطره نیمه‌رسانای غیرنیوتنی (قانون توانی) در حضور میدان الکتریکی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. هدف از این تحقیق، مطالعه تأثیر میدان الکتریکی بر قطره غیرنیوتنی و مقایسه رفتار قطرات نیوتنی و غیرنیوتنی تحت اثر میدان الکتریکی است.

۲- معادلات حاکم

۲-۱- معادلات جریان

معادلات اصلی حاکم بر مسئله، معادلات بقای جرم و بقای مومنتوم در حالت تراکم‌ناپذیر هستند. این معادلات به ترتیب به صورت زیر بیان می‌شوند.

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

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) \right) = -\nabla P + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}^H + \boldsymbol{\tau}^E) + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

ρ چگالی سیال، \mathbf{u} بردار سرعت سیال، p فشار، \mathbf{g} بردار گرانش و $\boldsymbol{\tau}^H$ تانسور تنش مربوط به نیروی لزجت است که به صورت زیر

رعیتی‌نژاد و پورنادری^[20] به مطالعه عددی تأثیر میدان الکتریکی یکنواخت بر هیدرودینامیک و تبخیر یک قطره نیوتنی عایق ساکن پرداختند. آن‌ها از ترکیب روش‌های سیال مجازی و سطح تراز برای مدل کردن سطح مشترک استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که وجود تنش الکتریکی ناشی از میدان الکتریکی سبب تغییر شکل قطره در راستای میدان الکتریکی می‌شود. همچنین اعمال میدان الکتریکی منجر به افزایش میزان تبخیر قطره می‌شود.

متر و همکاران^[21] تغییر شکل یک قطره رسانای غوطه‌ور در یک سیال عایق را در یک میدان الکتریکی متناوب به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی بررسی کردند. آن‌ها رفتار قطره رسانای غوطه‌ور در یک سیال عایق در حضور میدان الکتریکی یکنواخت را با رفتار آن در همان سیال و در حضور میدان الکتریکی غیریکنواخت بسیار متفاوت گزارش کردند و مشاهده کردند که در میدان الکتریکی غیریکنواخت قطره با یک حرکت پریودیک به سمت الکتروود با پتانسیل بیشتر حرکت می‌کند که باعث تغییر شکل کمتر قطره نسبت به میدان الکتریکی یکنواخت می‌شود. آن‌ها به صورت تحلیلی حرکت پریودیک قطره را میان دو الکتروود مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که زمان حرکت قطره به سمت الکتروود با پتانسیل بیشتر کمتر از یک چهارم فرکانس به کار برده شده است.

هی و همکاران^[22] پاسخ قطره آب درون روغن به میدان الکتریکی را به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی بررسی کردند. آن‌ها یک مدل ریاضی برای توصیف مکانیزم انتقال قطره ارائه دادند. اثر دو پارامتر مهم عدد موپینگی الکتریکی و عدد اونسرج بررسی شد و مشاهده شد که افزایش عدد موپینگی الکتریکی و افزایش عدد اونسرج منجر به تغییر شکل‌های نوسانی می‌شود. همچنین، زمان بی‌بعد صعود قطره (مدت زمانی که طول می‌کشد تا قطره از حالت پایای کروی به یک شکل پایای دیگر تبدیل شود) با عدد موپینگی الکتریکی در مختصات لگاریتمی، رابطه خطی دارد.

لو و همکاران^[23] فرآیند تجزیه قطرات آب همراه با افزودنی‌های سطحی (Surfactant) در حضور میدان الکتریکی را به صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند که برای قطرات همراه با افزودنی‌های سطحی، قبل از شروع تجزیه سه شکل مخروطی، بیضوی و استوانه‌ای و در هنگام تجزیه قطره، دو مود مختلف جت مخروطی و رشته‌ای قابل مشاهده است. با افزایش غلظت افزودنی‌های سطحی، شکل قطره از حالت استوانه‌ای به بیضوی و سرانجام پیش از شروع تجزیه به مخروطی تغییر می‌کند. همچنین، مود تجزیه قطره از رشته‌ای به مخروطی تبدیل می‌شود.

سانترا و همکاران^[24] رفتار هیدرودینامیکی قطرات عایق و نیمه‌رسانا در فضای بین دو الکتروود با فاصله محدود را به صورت عددی مطالعه کردند. آن‌ها از روش میدان فازی برای ردیابی سطح مشترک استفاده کردند. نتایج حاصل نشان داد که تغییر شکل سیستم‌های کاملاً عایق همواره به صورت پرولیت است. برای سیستم‌های نیمه‌رسانا، بسته به نسبت اندازه قطره به ارتفاع کانال، تغییر شکل قطره می‌تواند به صورت پرولیت یا آبلیت باشد.

معادله لاپلاس حاکم بر میدان پتانسیل الکتریکی استفاده می‌شود. معادله دوم ناپیوستگی جابجایی الکتریکی را نشان می‌دهد و برای اعمال تنش الکتریکی مماسی استفاده می‌شود.

۲-۳-۲- شرایط پرش هیدرودینامیکی

با اعمال معادله مومنتوم در سطح مشترک دو سیال داریم:

$$\left[\begin{pmatrix} n \\ t \end{pmatrix} (pI - (\tau^H + \tau^E)n^T) \right]_r = \begin{pmatrix} \gamma \kappa \\ 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

n بردار عمود یکه، t بردار مماس یکه، γ کشش سطحی و κ انحنا سطح هستند. با جایگذاری تانسورهای تنش در معادله بالا و با توجه به شرط پیوستگی سرعت و مشتقات مماسی آن شرایط پرش فشار و لزجت به صورت زیر حاصل می‌شوند^[8].

$$[p]_r = \gamma \kappa + 2[\mu]_r n \cdot \nabla u \cdot n^T + n \cdot \left[\varepsilon (EE - \frac{1}{2} E \cdot EI) \right]_r \cdot n^T \quad (13)$$

$$[\mu \nabla u]_r = [\mu]_r \nabla u \begin{pmatrix} 0 \\ t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n \\ t \end{pmatrix} + [\mu]_r n^T n (\nabla u) n^T n - \begin{pmatrix} 0 \\ t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ t \end{pmatrix} ([\mu]_r (\nabla u)^T + \left[\varepsilon (EE - \frac{1}{2} E \cdot EI) \right]_r) n^T n \quad (14)$$

۳- روش‌های عددی

در این پژوهش، برای گسسته‌سازی معادلات حاکم از روش تفاسیل محدود روی یک شبکه جابجاشده استفاده می‌شود. جملات پخش با استفاده از تقریب مرکزی مرتبه دو گسسته‌سازی می‌شوند. جملات جابجایی نیز با استفاده از روش وینو (WENO) با دقت مرتبه ۵، گسسته‌سازی می‌شوند^[28]. برای گسسته‌سازی جملات زمانی، از روش رانگ کوتای TVD مرتبه ۳ استفاده می‌شود^[29]. برای حل معادلات جریان از روش تصویرسازی (Projection)، برای محاسبه کمیت‌های ناپیوسته در سطح مشترک از روش سیال مجازی و برای به‌دست آوردن موقعیت سطح مشترک از روش سطح تراز استفاده می‌شود.

۳-۱- روش تصویرسازی

در این پژوهش برای حل معادلات جریان از روش تصویرسازی استفاده می‌شود. با تعریف یک میدان سرعت میانی فرضی u^* معادله مومنتوم به دو بخش مجزا تقسیم می‌شود^[29].

$$\frac{u^* - u^n}{\Delta t} + u \cdot \nabla u = \frac{\tau \cdot \tau}{\rho} + g \quad (15)$$

$$\frac{u^{n+1} - u^*}{\Delta t} + \frac{\nabla p}{\rho} = 0 \quad (16)$$

با اعمال عملگر دیورژانس روی معادله (۱۶) و با توجه به معادله پیوستگی ($\nabla \cdot u^{n+1} = 0$)، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\nabla \cdot \left(\frac{\nabla p^*}{\rho} \right) = \nabla \cdot u^* \quad (17)$$

که در معادله بالا $p^* = p * \Delta t$ است. معادله (۱۶) نیز به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$u^{n+1} - u^* + \frac{\nabla p^*}{\rho} = 0 \quad (18)$$

در واقع ابتدا، با استفاده از معادله (۱۵) و در غیاب گرادیان فشار، شبه‌سرعت‌ها $u^* = (u^*, v^*)$ محاسبه می‌شوند. سپس با استفاده

تعریف می‌شود.

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

که در آن μ لزجت دینامیکی سیال و T عملگر ترانهاده است. مدل‌های مختلفی برای توصیف تنش لزج در سیالات غیرنیوتنی ارائه شده است که از میان آن‌ها، مدل قانون توانی کاربرد بیشتری دارد. در این مدل لزجت سیال به صورت زیر تعریف می‌شود^[27].

$$\mu = \mu_0 |\dot{\gamma}|^{n-1} \quad (4)$$

μ_0 ثابت سازگاری و n ثابت قانون توانی است. اگر $n < 1$ باشد: سیال رقیق‌شونده برشی (شبه‌پلاستیک)، اگر $n = 1$ باشد: سیال نیوتنی و اگر $n > 1$ باشد: سیال غلیظ‌شونده برشی است. $\dot{\gamma}$ نرخ برش است و از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$|\dot{\gamma}| = \left(2u_x^2 + 2v_y^2 + (u_y + v_x)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

تانسور تنش الکتریکی یا تانسور تنش ماکسول نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود^[8].

$$\tau^E = \varepsilon (EE - \frac{1}{2} E^2 I) \quad (6)$$

ε ضریب گزدهی الکتریکی سیال، E میدان الکتریکی و I تانسور یکه است.

۲-۲- معادلات الکترواستاتیک

در سیالات نیمه‌رسانا مقدار کمی بار آزاد وجود دارد. زمانی که این مواد در معرض میدان الکتریکی قرار می‌گیرند بارهای آزاد آن در راستای میدان اعمال شده به سمت سطح مشترک حرکت می‌کنند. با استفاده از معادله پیوستگی جریان الکتریکی در سطح مشترک داریم^[8]:

$$\frac{\partial q^v}{\partial t} + \nabla \cdot (\sigma E) = 0 \quad (7)$$

در رابطه بالا σ ضریب رسانش الکتریکی سیال و q^v چگالی بار خالص در هر نقطه از حجم سیال است. با توجه به اینکه بارهای آزاد در واحد حجم برای مدل نیمه‌رسانا بسیار کم است، معادله (۷) با توجه به رابطه بین میدان الکتریکی E و پتانسیل الکتریکی Ψ ($E = -\nabla \Psi$)، به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \Psi) = 0 \quad (8)$$

۳-۲- شرایط پرش

برخی کمیت‌های فیزیکی مانند چگالی، لزجت و فشار در سطح مشترک دارای ناپیوستگی و به اصطلاح پرش هستند. فرض کنید ناحیه محاسباتی به دو ناحیه Ω^+ و Ω^- تقسیم شود. پرش یک کمیت مانند A در سطح مشترک به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$[A]_r = A^+ - A^- \quad (9)$$

Γ موقعیت سطح مشترک، A^+ مقدار کمیت مورد نظر در ناحیه Ω^+ و A^- مقدار کمیت در ناحیه Ω^- را نشان می‌دهد.

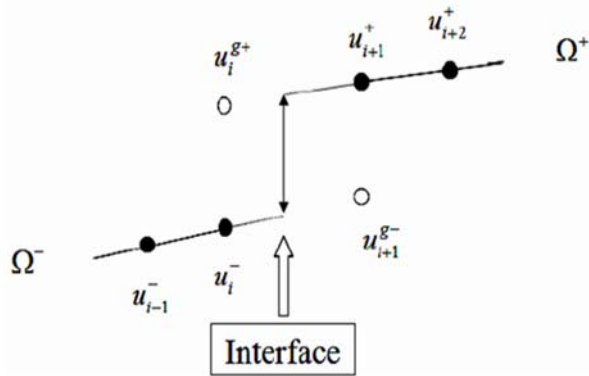
۳-۱-۳- شرایط پرش الکتریکی

شرایط پرش برای مدل نیمه‌رسانا به صورت زیر بیان می‌شود^[8].

$$[\sigma \nabla \Psi \cdot n]_r = 0 \quad (10)$$

$$[\varepsilon \nabla \Psi \cdot n]_r = q_s \quad (11)$$

معادله اول نشان‌دهنده پیوستگی جریان الکتریکی است و برای حل



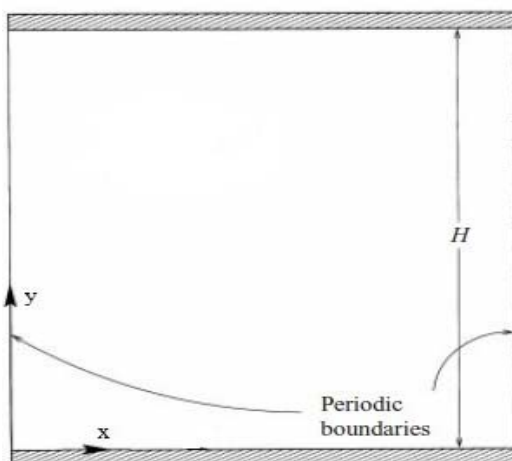
شکل ۱) توصیف روش سیال مجازی

۴- نتایج عددی

در این تحقیق، بررسی اعتبار نتایج عددی در سه مرحله انجام می‌شود. ابتدا به شبیه‌سازی جریان سیال غیرنیوتنی در یک کانال پرداخته می‌شود. سپس در مرحله بعدی قطره نیوتنی ساکن در یک سیال غیرنیوتنی شبیه‌سازی می‌شود. در مرحله سوم تغییر شکل قطره نیوتنی در حضور میدان الکتریکی شبیه‌سازی و نتایج حاصل با نتایج موجود مقایسه می‌شود. پس از تأیید اعتبار نتایج، رفتار هیدرودینامیکی قطره غیرنیوتنی در حضور میدان الکتریکی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۱-۴- شبیه‌سازی عددی جریان پواسل (Poiseuille) سیال قانون توانی در یک کانال

در این قسمت، جریان تک‌فازی سیال غیرنیوتنی بین دو صفحه موازی که به وسیله گرادیان فشار $(\frac{\partial p}{\partial x} = -1.5 \text{ Pa/m})$ در کانال به حرکت در می‌آید، شبیه‌سازی می‌شود. هندسه مسئله به همراه شرایط مرزی در شکل ۲ نشان داده شده است. نسبت طول کانال به ارتفاع آن $(\frac{L}{H} = 15)$ است.



شکل ۲) هندسه جریان در یک کانال

ضریب لزجت سیال $\mu = 0.1 \frac{Ns}{m^2}$ و چگالی آن $\rho = 0.1 \frac{Kg}{m^3}$ است. شرایط مرزی در مرزهای بالا و پایین، شرط عدم لغزش است.

از شبه‌سرعت‌ها، از معادله (۱۷) فشار محاسبه می‌شود. در نهایت با استفاده از معادله (۱۸)، سرعت‌های نهایی به دست می‌آیند.

۲-۳- روش سطح تراز

در این پژوهش، برای ردیابی سطح مشترک از روش سطح تراز [30-33] استفاده می‌شود. در این روش از یک تابع اسکالر ϕ برای تعیین موقعیت سطح مشترک استفاده می‌شود. این تابع به صورت یک تابع فاصله علامت‌دار تعریف می‌شود که فضای محاسباتی Ω را به سه ناحیه تقسیم می‌کند. این تابع در ناحیه درون قطره مقدار منفی، در ناحیه بیرون قطره مقدار مثبت و روی سطح مشترک مقدار صفر را دارد. مکان سطح مشترک Γ با استفاده از رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\Gamma = \{x \in \Omega | \phi(x) = 0\} \quad (19)$$

با توجه به اینکه سطح مشترک همواره سطح تراز صفر تابع ϕ است رابطه زیر برقرار است:

$$D\phi/Dt = 0 \quad (20)$$

رابطه (۲۰) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_{\Gamma} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (21)$$

u_{Γ} سرعت سطح مشترک است. به علت خطاهای عددی، تابع سطح تراز در طول زمان از حالت تابع فاصله خارج می‌شود. برای رفع این مشکل از معادله مقداردهی مجدد تابع سطح تراز استفاده می‌شود.

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = S(\phi_0)(1 - |\nabla \phi|) \quad (22)$$

در رابطه بالا τ زمان مجازی، ϕ_0 مقدار ϕ قبل از اصلاح و $S(\phi_0)$ تابع علامت میرا است که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$s(\phi_0) = \frac{\phi_0}{\sqrt{\phi_0^2 + \varepsilon^2}} \quad (23)$$

در رابطه بالا $\varepsilon = \max(\Delta x, \Delta y)$ است. با حل معادله مقداردهی مجدد تا حالت دائم، خاصیت تابع فاصله یعنی $|\nabla \phi| = 1$ برای تابع سطح تراز حفظ می‌شود.

۳-۳- روش سیال مجازی

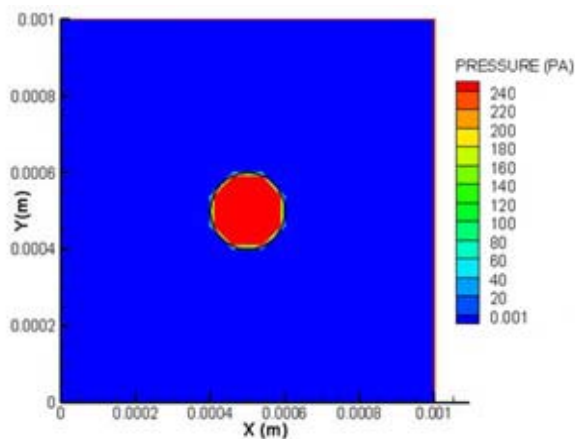
در این پژوهش به منظور اعمال شرایط پرش بر سطح مشترک از روش سیال مجازی استفاده می‌شود. این روش مبتنی بر مدل‌سازی دقیق شرایط مرزی روی سطح مشترک بدون در نظر گرفتن ضخامت برای سطح مشترک و با در نظر گرفتن سلول‌های مجازی اطراف سطح مشترک است [34, 35]. شکل ۱ پرش در کمیت u را نشان می‌دهد. در این شکل گره‌های مجازی مشاهده می‌شوند. ایده اصلی این روش تعمیم مناسب میدان جریان یک سمت سطح مشترک به سمت دیگر آن با استفاده از شرایط پرش است. با توجه به تعریف پرش روی سطح مشترک می‌توان نوشت:

$$[u]_{\Gamma} = u^+(x) - u^-(x) \quad (24)$$

بالانویس \pm اشاره به زیردامنه‌های Ω^{\pm} دارد. اگر مقدار پرش کمیت u در سطح مشترک با a_{Γ} نشان داده شود، برای هر مقدار u_i^- در ناحیه Ω^- یک تعریف به صورت $u_i^{g+} = u_i^-(x) + a_{\Gamma}(x)$ وجود دارد که در شرایط پرش صدق می‌کند و برای هر مقدار از u_i^+ در ناحیه Ω^+ نیز یک تعریف به صورت $u_i^{g-} = u_i^+(x) - a_{\Gamma}(x)$ وجود دارد.

۴-۲- شبیه‌سازی عددی قطره نیوتنی ساکن در یک سیال قانون توانی در این بخش، یک قطره نیوتنی ساکن غوطه‌ور در یک سیال قانون توانی در حالت دوبعدی شبیه‌سازی می‌شود. شرایط مرزی در هر دو جهت به صورت پریودیک اعمال می‌شود. دامنه به صورت مربعی و نسبت ابعاد دامنه به شعاع قطره $\frac{H}{R} = 10$ است. شعاع قطره $R = 0.1 \text{ mm}$ است و قطره در وسط دامنه قرار دارد. در این شبیه‌سازی، از شبکه 128×128 استفاده شده است.

شکل ۳ توزیع فشار در داخل و اطراف قطره را پس از رسیدن سیستم به حالت تعادل برای $n = 0.5$ نمایش می‌دهد. با استفاده از اختلاف فشار داخل و خارج قطره و به کمک معادله لاپلاس ($\Delta P = \frac{\gamma_{Lap}}{R}$) می‌توان کشش سطحی γ_{Lap} را محاسبه و آن را با مقدار تئوری مقایسه کرد. خطای موجود نیز با استفاده از رابطه $E_\gamma = \frac{|\gamma_{Lap} - \gamma_{theory}|}{\gamma_{theory}} * 100\%$ محاسبه می‌شود.



شکل ۳) توزیع فشار داخل و اطراف قطره پس از رسیدن سیستم به حالت تعادل برای $n = 0.5$

جدول ۱) نتایج مطالعه شبکه برای قطره نیوتنی ساکن در یک سیال قانون توانی

شبکه	γ_{Lap}
۶۴×۶۴	۰/۰۲۴۸۱
۱۲۸×۱۲۸	۰/۰۲۳۹۹۰
۲۵۶×۲۵۶	۰/۰۲۳۹۹۱

جدول ۲) مقایسه کشش سطحی حاصل برای قطره نیوتنی غوطه‌ور در سیال غیرنیوتنی با مقدار تئوری برای ثابت‌های توانی مختلف

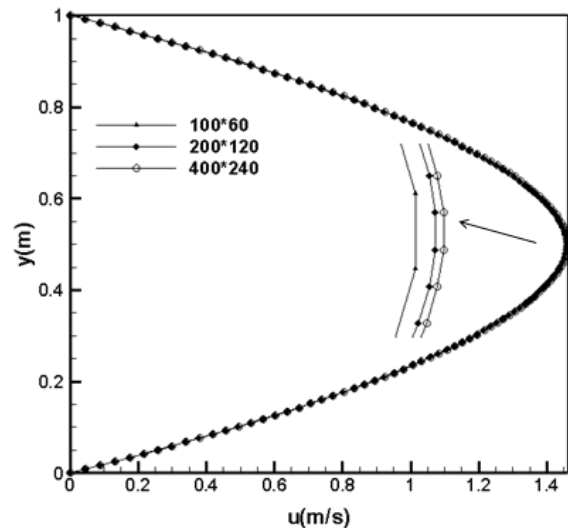
n	γ_{theory}	γ_{Lap}	E_γ	
۰/۵	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴۰۱۹	۰/۰۸	مطالعه حاضر
۰/۵	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴۱۸	۰/۷۳	وانگ و همکاران [27]
۱	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴۰۳	۰/۱۲۵	مطالعه حاضر
۱	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴۱۶	۰/۶۵	وانگ و همکاران [27]
۱/۵	۰/۰۲۴	۰/۰۲۳۹۹	۰/۰۴	مطالعه حاضر
۱/۵	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴۱۶	۰/۶۵	وانگ و همکاران [27]

در راستای جریان نیز به صورت پریودیک است. پس از رسیدن جریان به حالت پایا، مؤلفه افقی سرعت در راستای جریان از رابطه تئوری زیر به دست می‌آید [36].

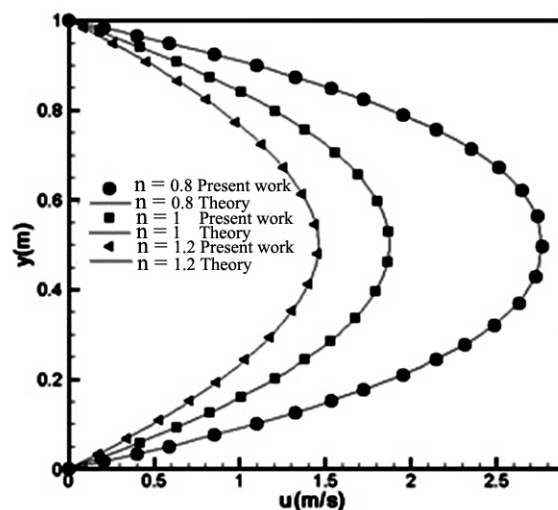
$$u(y) = \frac{n}{n+1} \left(-\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\left(\frac{H}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} - \left| y - \frac{H}{2} \right|^{\frac{n+1}{n}} \right) \quad (25)$$

نمودار ۱ نتایج شبیه‌سازی را برای ۳ شبکه مختلف نمایش می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود، نتایج ۳ شبکه بسیار به یکدیگر نزدیک هستند. اختلاف بین نتایج، در نزدیکی مرکز کانال بیشتر است. با توجه به اختلاف بسیار کم دو شبکه ریزتر در مرکز کانال، شبکه 200×120 به عنوان شبکه مناسب انتخاب شده است.

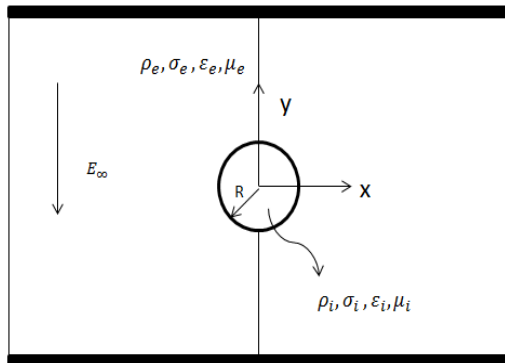
در نمودار ۲ نتایج شبیه‌سازی با نتایج تئوری برای ثابت‌های توانی مختلف مقایسه شده است. تطابق قابل قبولی بین نتایج مشاهده می‌شود. نمودار ۲ نشان می‌دهد که با افزایش ثابت توانی، سرعت متوسط در کانال کاهش می‌یابد.



نمودار ۱) نتایج مطالعه شبکه برای جریان پواسل



نمودار ۲) تغییرات سرعت پایا در عرض کانال

Ψ^+  Ψ^-

شکل ۴) هندسه مسئله تغییر شکل قطره تحت اثر میدان الکتریکی

برای محاسبه تغییر شکل قطره از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$D = \frac{(a-b)}{(a+b)} \quad (26)$$

که در آن a و b به ترتیب قطرهای قطره در راستای محور تقارن و محور عرضی هستند. اگر در معادله (۲۶) مقدار D مثبت باشد، تغییر شکل قطره در راستای میدان الکتریکی (پرولیت) و اگر مقدار D منفی باشد تغییر شکل قطره در راستای عمود بر میدان الکتریکی (آبلیت) خواهد بود.

پارامتر بی‌بعد عدد موینگی الکتریکی که به صورت نسبت نیروی الکتریکی به نیروی کشش سطحی تعریف می‌شود، نقش مهمی در رفتار هیدرودینامیکی قطره تحت اثر میدان الکتریکی دارد. این پارامتر به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Ca_E = E_0^2 \epsilon_e R / \gamma \quad (27)$$

که در آن E_0 شدت میدان الکتریکی اولیه و ϵ_e ضریب گذردگی الکتریکی سیال محیط است. در شبیه‌سازی‌ها از شبکه با اندازه $R/\Delta x = 48$ استفاده می‌شود. برای نمونه a ، قطره نیوتنی در اثر تنش‌های الکتریکی در سطح مشترک در جهت میدان دچار کشیدگی و تغییر شکل می‌شود. بعد از مدتی با ایجاد تعادل بین نیروها تغییر شکل قطره متوقف می‌شود. در نمودار ۳ تغییر شکل قطره نیوتنی برحسب عدد موینگی الکتریکی برای نمونه a با تئوری تیلور [37] و آجای [38] و همچنین کار عددی تایگن و همکاران [5] مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییر شکل قطره در اعداد موینگی الکتریکی کم، با نتایج تئوری خطی تیلور [37] مطابقت دارد. زمانی که شدت میدان الکتریکی زیاد می‌شود، اهمیت اثرات غیرخطی بیشتر می‌شود. در این حالت، تغییر شکل قطره از تئوری تیلور تبعیت نمی‌کند. در اعداد موینگی بزرگ‌تر، نتایج حاصل با تئوری مرتبه دوم آجای [38] و نتایج عددی تایگن و مانکجر [5] تطابق بهتری دارد. با افزایش عدد موینگی الکتریکی، اختلاف نتایج تحقیق حاضر با نتایج عددی تایگن و مانکجر اران بیشتر می‌شود. آن‌ها از فرمول‌بندی میراشده روش سطح تراز استفاده کردند. در این فرمول‌بندی با در نظر گرفتن ضخامت برای سطح مشترک کمیت‌های ناپیوسته در عرض سطح مشترک میرا می‌شوند. نیروی کشش

مقدار کشش سطحی محاسبه شده با استفاده از نتایج شبیه‌سازی برای ۳ شبکه مختلف در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به اختلاف بسیار کم نتایج برای دو شبکه ریزتر می‌توان نتیجه گرفت که شبکه 128×128 ، شبکه مناسبی برای انجام شبیه‌سازی است.

مقدار کشش سطحی حاصل از شبیه‌سازی برای ثابت‌های توانی مختلف در جدول ۲ با مقدار تئوری مقایسه شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، مقادیر کشش سطحی به دست آمده از شبیه‌سازی عددی برای ثابت‌های توانی مختلف تطابق خوبی با مقدار تئوری دارند. در این جدول نتایج عددی وانگ و همکاران [27] نیز ارائه شده است. آن‌ها در شبیه‌سازی‌های خود از روش شبکه بولتزمن استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی حاضر دقت بیشتری را در مقایسه با نتایج وانگ و همکاران نشان می‌دهد.

۳-۴ شبیه‌سازی عددی تغییر شکل قطره ساکن غوطه‌ور در یک سیال دیگر تحت اثر میدان الکتریکی

شبیه‌سازی‌های عددی در این بخش برای دو سیستم نیمه‌رسانای a و b با ویژگی‌های فیزیکی متفاوت انجام می‌شود. پارامترهای فیزیکی دو سیستم a و b مطابق جدول ۳ هستند. کمیت با زیرنویس r معرف نسبت مقدار کمیت در داخل قطره به مقدار آن در خارج قطره است. در این جدول، منظور از نسبت لزجت، نسبت ثابت سازگاری دو سیال است. زمان مشخصه الکتریکی ($t_c = \frac{\epsilon}{\rho}$) مبین زمان لازم برای رسیدن بارهای آزاد به سطح مشترک است [8]. در این بخش، زیرنویس‌های i و e به ترتیب برای نمایش خواص قطره و سیال محیط استفاده می‌شوند. شعاع قطره $10 \mu\text{m}$ است.

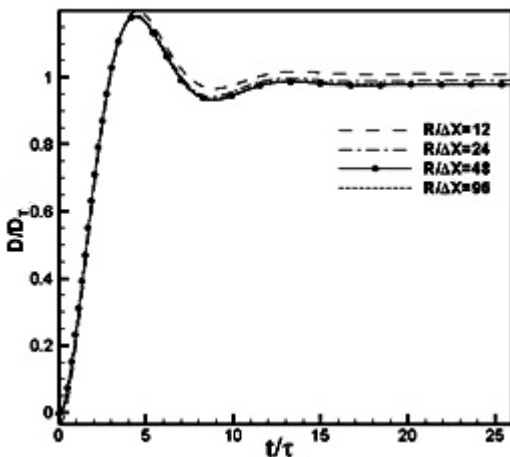
جدول ۳) پارامترهای شبیه‌سازی سیستم‌های نیمه‌رسانا

سیستم	σ_r	ϵ_r	μ_r	ρ_r	زمان مشخصه الکتریکی
a	۳۳	۱۱	۱۱	۱۱	$t_{ci} < t_{ce}$
b	۱۱	۲۲	۱۱	۱۱	$t_{ci} > t_{ce}$

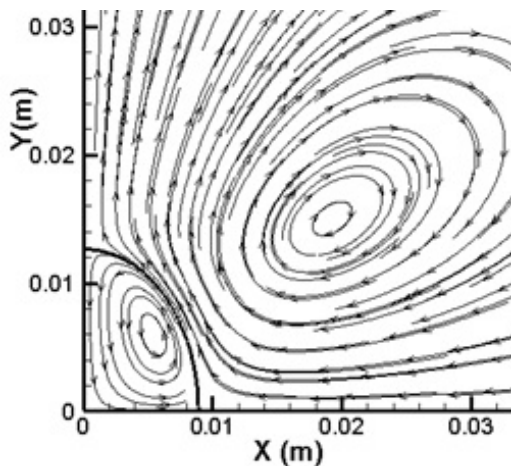
۱-۳-۴ قطره نیوتنی

در این بخش، برای اطمینان از درستی محاسبات میدان الکتریکی، رفتار هیدرودینامیکی قطره نیمه‌رسانای نیوتنی غوطه‌ور در یک سیال نیوتنی دیگر، تحت اثر میدان الکتریکی مطالعه می‌شود. در شکل ۴ هندسه مسئله نمایش داده شده است. برای ایجاد میدان الکتریکی از دو الکترود در بالا و پایین قطره استفاده می‌شود. مرکز قطره در وسط دو الکترود قرار دارد. بنابراین تأثیر میدان الکتریکی در بالا و پایین قطره یکسان است. با توجه به هندسه مسئله و تقارن حول محور y ، از شکل تقارن محوری معادلات استفاده می‌شود. علاوه بر این تأثیر میدان الکتریکی بر قطره به گونه‌ای است که مسئله نسبت به صفحه افقی که از مرکز قطره می‌گذرد نیز دارای تقارن است. بنابراین می‌توان محاسبات را برای یک چهارم دامنه انجام داد. در مرز بالا و سمت راست دامنه، از شرط مرز دور و در مرزهای تقارن از شرط مرزی نیومن استفاده می‌شود. ابعاد دامنه $5R \times 5R$ است. که در آن R شعاع قطره است.

قطره نیوتنی تحت اثر تنش‌های الکتریکی دچار تغییر شکل در راستای میدان (تغییر شکل پرولیت) می‌شود. نیروی کشش سطحی در برابر تغییر شکل مقاومت می‌کند. سرانجام با برقراری تعادل بین نیروهای الکتریکی و کشش سطحی، حالت پایا ایجاد شده و قطره به شکل ثابتی می‌رسد. چنانچه ملاحظه می‌شود، تغییر شکل قطره به صورت کشیدگی در راستای میدان (پرولیت) است. در این حالت، زمان مشخصه قطره ($t_c = \frac{R}{\sigma}$) کوچکتر از زمان مشخصه سیال محیط است. بنابراین بارهای آزاد در آن نسبت به سیال محیط سریعتر به سطح مشترک رسیده و توزیع می‌شوند. این توزیع بار بر دوقطبی‌های قطره نیمه‌رسانا اثر گذاشته و باعث می‌شود که این دوقطبی‌ها در راستای میدان الکتریکی جهت‌گیری کنند. در این حالت تنش نرمال ناشی از میدان الکتریکی منجر به کشیدگی قطره در راستای میدان الکتریکی اعمالی می‌شود. همچنین وجود بارهای آزاد روی سطح مشترک باعث ایجاد تنش مماسی می‌شود. جهت این تنش مماسی به گونه‌ای است که باعث می‌شود یک جریان چرخشی پادساعت‌گرد در قطره و یک جریان چرخشی ساعت‌گرد در سیال محیط ایجاد شود.

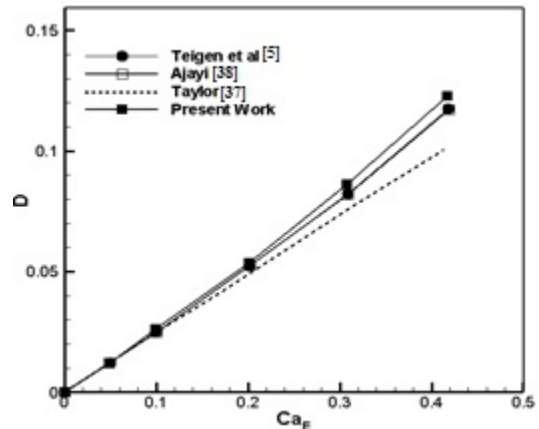


نمودار ۴) تغییرات پاسخ دینامیکی قطره با افزایش گره‌های شبکه در عدد موینگی الکتریکی $Ca_E = 0.05$ و ثابت توانی



شکل ۵) الگوی جریان چرخشی القایی در تغییر شکل قطره نیمه‌رسانا برای سیستم $a(n=1/2, Ca_E=0.05)$

سطحی نیز به صورت یک نیروی حجمی اعمال می‌شود. در تحقیق حاضر، بدون در نظر گرفتن ضخامت برای سطح مشترک و با استفاده از تکنیک سیال مجازی ناپیوستگی کمیت‌ها در سطح مشترک حفظ می‌شود.



نمودار ۳) تغییر شکل پرولیت قطره نیمه‌رسانای نیوتنی در اعداد موینگی الکتریکی مختلف برای نمونه a

۲-۳-۴- قطره غیرنیوتنی

در این بخش، رفتار هیدرودینامیکی یک قطره غیرنیوتنی ساکن غوطه‌ور در یک سیال غیرنیوتنی دیگر در حضور میدان الکتریکی مطالعه می‌شود. برای مطالعه اثر شبکه از چهار شبکه مختلف استفاده می‌شود که نسبت $R / \Delta x$ آن‌ها به ترتیب ۱۲، ۲۴، ۴۸ و ۹۶ است. نتایج مطالعه شبکه (تغییرات تغییر شکل بی‌بعد قطره بر حسب زمان بی‌بعد) برای قطره نمونه a و عدد موینگی الکتریکی ۰/۰۵ و ثابت توانی ۱/۲ در نمودار ۴ مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که در نمودار ۴ محور افقی توسط پارامتر زمان مشخصه که به صورت زیر تعریف می‌شود بی‌بعد شده است:

$$\tau = \sqrt{(2\rho_e + 3\rho_i)R^3/24\gamma} \quad (28)$$

که ρ_e و ρ_i به ترتیب چگالی قطره و سیال محیط هستند. همچنین محور افقی نیز نسبت $(\frac{D}{D_r})$ را نشان می‌دهد که در آن تغییر شکل تیلور D_T به صورت زیر تعریف می‌شود [37].

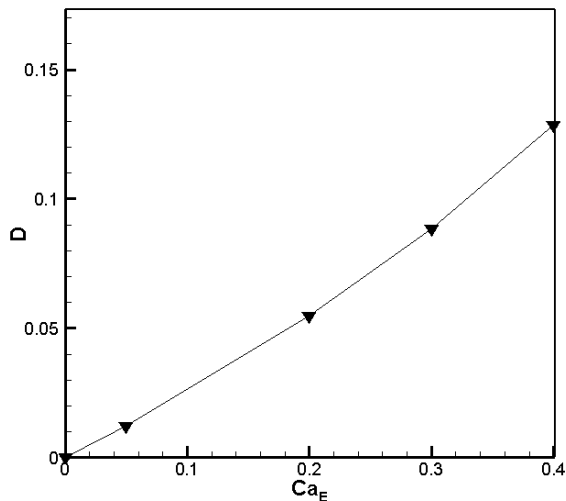
$$D_T = k_1 Ca_E \quad (29)$$

k_1 نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

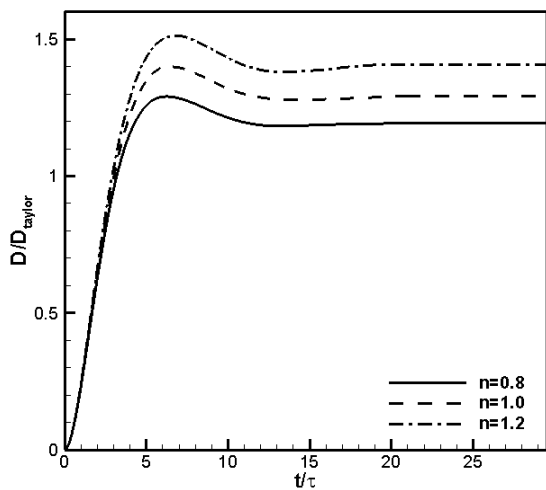
$$k_1 = \frac{9}{16(2+\sigma_r)^2} \left[\sigma_r^2 - 2\sigma_r + 1 + (\sigma_r - \varepsilon_r) \left(2 + \frac{3}{5} \frac{2+3\mu_r}{1+\mu_r} \right) \right] \quad (30)$$

در این حالت نیز قطره در راستای میدان دچار تغییر شکل شده و سرانجام به حالت پایا می‌رسد. نتایج حاصل از شبکه‌های $R/\Delta x = 48$ و $R/\Delta x = 96$ تقریباً بر هم منطبق هستند. بنابراین در تمام شبهه‌سازی‌ها از شبکه $R/\Delta x = 48$ استفاده می‌شود.

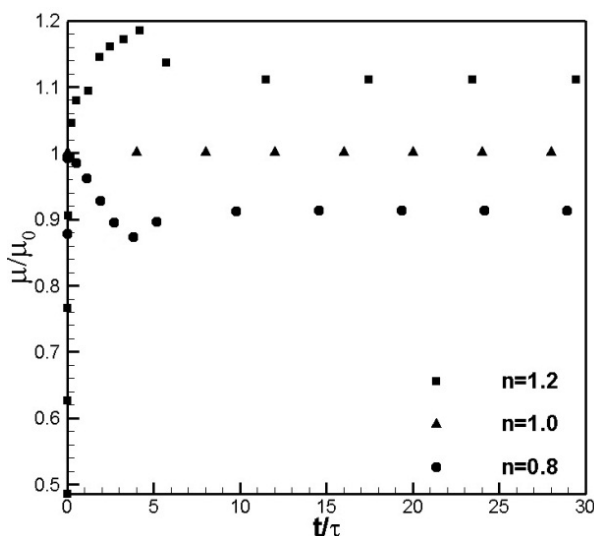
در شکل ۵ قطره و خطوط جریان اطراف آن پس از رسیدن به حالت پایا نشان داده شده است. لازم به ذکر است که تنها بخشی از دامنه حل نمایش داده شده است. قطره غیرنیوتنی (نمونه a) نیز شبیه



نمودار ۶) تغییر شکل قطره برحسب عدد موپینگی الکتریکی برای نمونه $a(n=1/2)$



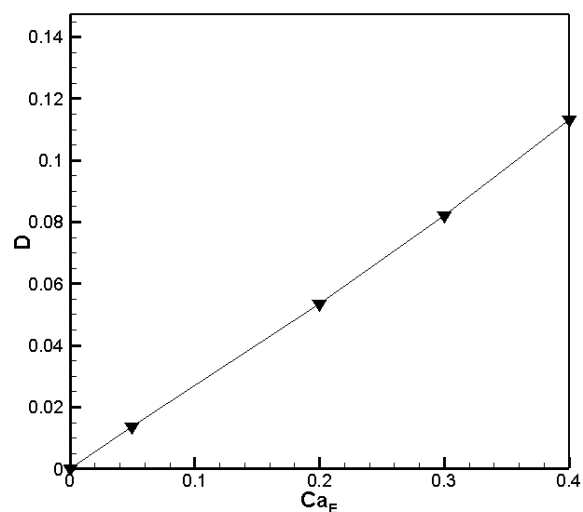
نمودار ۷) تغییرات زمانی تغییر شکل بی بعد قطره نیمه رسانا با ثابت های توانی مختلف برای نمونه $a(Ca_E=0/0)$



نمودار ۸) تغییرات ضریب لزجت با زمان در یک نقطه مجاور سطح مشترک برای سیالات با ثابت های توانی مختلف برای نمونه $a(Ca_E=0/0)$

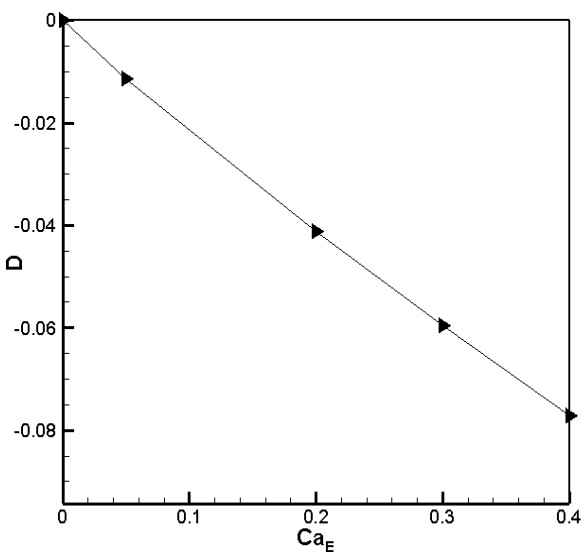
در نمودارهای ۵ و ۶ به ترتیب نمودار تغییر شکل قطره غیرنیوتنی (نمونه a) برحسب عدد موپینگی الکتریکی، برای ثابت های توانی $n=1/2$ و $n=0/8$ رسم شده است. برای قطره غیرنیوتنی نیز مشابه قطره نیوتنی با افزایش عدد موپینگی الکتریکی تغییر شکل قطره افزایش می یابد. در واقع تنش های الکتریکی در سطح مشترک، عامل محرک برای ایجاد تغییر شکل قطره هستند. از سوی دیگر، نیروی کشش سطحی در مقابل تغییر شکل قطره مقاومت می کند. افزایش عدد موپینگی الکتریکی منجر به افزایش نیروی الکتریکی در مقایسه با نیروی کشش سطحی و در نتیجه منجر به تغییر شکل بیشتر قطره می شود. همچنین با توجه به نمودارهای ۵ و ۶، مقدار تغییر شکل برای سیال با ثابت توانی بزرگ تر، بیشتر است. در نمودار ۷ تغییر شکل بی بعد قطره نیمه رسانا با ثابت های توانی مختلف، برای نمونه a در عدد موپینگی الکتریکی $Ca_E=0/0$ رسم شده است. چنانچه در این نمودار نیز مشاهده می شود با افزایش ثابت قانون توانی، تغییر شکل قطره افزایش می یابد. علت این امر، تفاوت مقدار ضریب لزجت برای سیالات با ثابت های توانی مختلف است.

نمودار ۸ تغییرات ضریب لزجت با زمان را برای سیالات با ثابت های توانی مختلف در نقطه ای مجاور سطح مشترک و در امتداد مرز پایین (محور تقارن افقی قطره) نمایش می دهد. چنانچه پیشتر ذکر شد، نسبت لزجت قطره و فاز پیوسته در شبیه سازی ها برابر با ۱ است. با توجه به نمودار ۸، با افزایش ثابت توانی ضریب لزجت سیال افزایش می یابد. این روند در نقاط دیگر نیز مشاهده می شود. ابتدا تحت اثر تنش های الکتریکی، جریان در قطره و سیال اطراف ایجاد شده و تغییر شکل قطره آغاز می شود. با ایجاد تغییرات سرعت، تنش های برشی نیز در افزایش تغییر شکل حاصل نقش ایفا می کنند. با افزایش ضریب لزجت سیال، مقدار تنش های برشی و در نتیجه تغییر شکل حاصل افزایش می یابد. بنابراین، افزایش ثابت توانی سیال به دلیل افزایش ضریب لزجت سیال منجر به افزایش تغییر شکل قطره می شود.

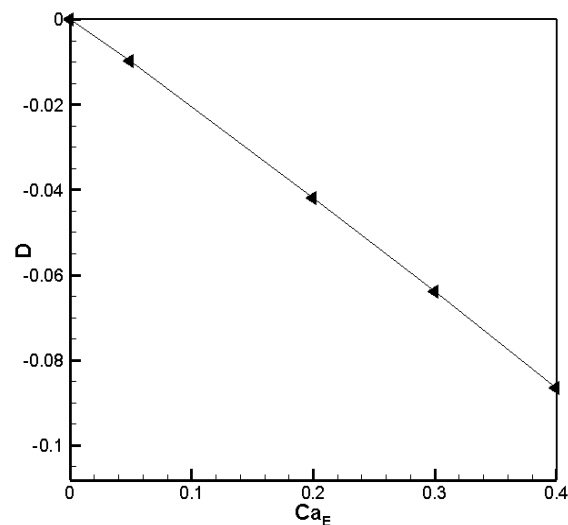


نمودار ۹) تغییر شکل قطره برحسب عدد موپینگی الکتریکی برای نمونه $a(n=0/8)$

به نمودارهای ۹ و ۱۰، مقدار تغییر شکل برای سیال با ثابت توانی بزرگ‌تر، بیشتر است. در نمودار ۱۱ تغییر شکل بی‌بعد قطره نیمه‌رسانا با ثابت‌های توانی مختلف، برای نمونه b در عدد موینگی الکتریکی $Ca_E=0/0$ رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت نیز با افزایش ثابت توانی، تغییر شکل قطره افزایش می‌یابد. چنانچه قبلاً نیز بیان شد، علت این امر، تفاوت مقدار ضریب لزجت برای سیالات با ثابت‌های توانی مختلف است. با ایجاد تغییرات سرعت ناشی از تنش‌های الکتریکی، تنش‌های برشی نیز در افزایش تغییر شکل حاصل نقش ایفا می‌کنند. با افزایش ثابت توانی، ضریب لزجت سیال افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب لزجت سیال، مقدار تنش‌های برشی و در نتیجه تغییر شکل حاصل افزایش می‌یابد.

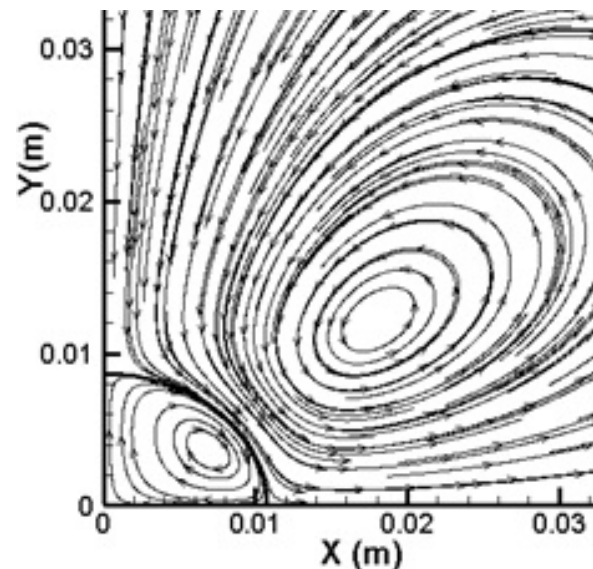


نمودار ۹) تغییر شکل قطره برحسب عدد موینگی الکتریکی برای نمونه b در $n=0/8$



نمودار ۱۰) تغییر شکل قطره برحسب عدد موینگی الکتریکی برای نمونه b در $n=1/2$

در شکل ۶ قطره و خطوط جریان اطراف آن پس از رسیدن به حالت پایا برای قطره غیرنیوتنی با خواص فیزیکی نمونه b نمایش داده شده است. در این شکل، کشیدگی قطره در راستای عمود بر میدان الکتریکی (تغییر شکل آبلیت) است. هرگاه زمان مشخصه الکتریکی سیال محیط از زمان مشخصه الکتریکی قطره کمتر باشد، بارهای آزاد سیال محیط سریع‌تر به سطح مشترک منتقل شده و روی سطح مشترک توزیع می‌شوند. وجود بارهای آزاد روی سطح مشترک باعث ایجاد تنش‌های مماسی می‌شود. با توجه به نحوه توزیع بارها، جهت تنش‌های مماسی به گونه‌ای است که باعث می‌شود یک جریان چرخشی ساعت‌گرد در قطره و یک جریان چرخشی پادساعت‌گرد در سیال محیط، ایجاد شود. در این حالت، دوقطبی‌های سیال خارجی در راستای عمود بر میدان الکتریکی جهت‌گیری کرده و یک نیروی نرمال بر سطح مشترک وارد می‌کنند. این نیرو باعث کشیدگی قطره در جهت عمود بر میدان الکتریکی می‌شود.



شکل ۶) الگوی جریان چرخشی القایی در تغییر شکل قطره نیمه‌رسانا برای نمونه $b(n=1/2, Ca_E=0/0)$

در نمودارهای ۹ و ۱۰، به ترتیب نمودارهای تغییر شکل قطره غیرنیوتنی (نمونه b) برحسب عدد موینگی الکتریکی، برای قطره با ثابت‌های توانی $n=0/8$ و $n=1/2$ رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت نیز با افزایش عدد موینگی الکتریکی، تغییر شکل قطره غیرنیوتنی افزایش می‌یابد. مقادیر منفی تغییر شکل نشان‌دهنده کشیدگی قطره در راستای عمود بر میدان الکتریکی هستند. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، تنش‌های الکتریکی در سطح مشترک، عامل محرک برای ایجاد تغییر شکل هستند. از سوی دیگر، نیروی کشش سطحی در مقابل تغییر شکل قطره مقاومت می‌کند. افزایش عدد موینگی الکتریکی منجر به افزایش نیروی الکتریکی در مقایسه با نیروی کشش سطحی و در نتیجه منجر به تغییر شکل بیشتر قطره می‌شود. همچنین با توجه

عهده نویسندگان است.

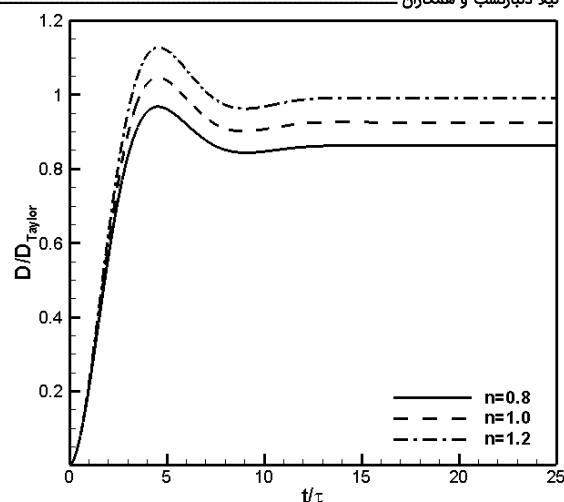
تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ‌گونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: لیلا دلپازنسب (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ سیدپدرام پورنادری (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۴۰٪)؛ محمدعلی بذرافکن (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۲۰٪)

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- Oliveira MSN, Yeh R, McKinley GH. Iterated stretching, extensional rheology and formation of beads-on-a-string structures in polymer solutions. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2006;137(1-3):137-148.
- Boufarguine M, Renou F, Nicolai T, Benyahia L. Droplet deformation of a strongly shear thinning dense suspension of polymeric micelles. *Rheologica Acta*. 2010;49(6):647-655.
- Tomar G, Biswas G, Sharma A, Welch SWJ. Influence of electric field on saturated film boiling. *Physics of Fluids*. 2009;21(3):032107.
- Teigen KE, Munkejord ST. Sharp-interface simulations of drop deformation in electric fields. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2009;16(2):475-482.
- Teigen KE, Munkejord ST. Influence of surfactant on drop deformation in an electric field. *Physics of Fluids*. 2010;22(11):112104.
- Gambhire P, Thaokar RM. Electrohydrodynamic instabilities at interfaces subjected to alternating electric field. *Physics of Fluids*. 2010;22(6):064103.
- López-Herrera JM, Popinet S, Herrada MA. A charge-conservative approach for simulating electrohydrodynamic two-phase flows using volume-of-fluid. *Journal of Computational Physics*. 2011;230(5):1939-1955.
- Paknemat H, Pishevar AR, Pournaderi P. Numerical simulation of drop deformations and breakup modes caused by direct current electric fields. *Physics of Fluids*. 2012;24(10):102101.
- Bararnia H, Ganji DD. Breakup and deformation of a falling droplet under high voltage electric field. *Advanced Powder Technology*. 2013;24(6):992-998.
- Yang Q, Li BQ, Ding Y. 3D phase field modeling of electrohydrodynamic multiphase flows. *International Journal of Multiphase Flow*. 2013;57:1-9.
- Lima NC, D'Avila MA. Numerical simulation of electrohydrodynamic flows of Newtonian and viscoelastic droplets. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2014;213:1-14.
- Tian-yu Z, Qing-guo Ch, Wen L, Chun-hui S, Xin-tao W. Analysis of deformation and breakup of droplets in high voltage AC electric field. 9th International Forum on Strategic Technology (IFOST), 2014 October 21-23, Cox's Bazar, Bangladesh. Piscataway: IEEE; 2014.
- Lanauze JA, Walker LM, Khair AS. The influence of inertia and charge relaxation on electrohydrodynamic drop deformation. *Physics of Fluids*. 2013;25(11):112101.



نمودار ۱۱ تغییر شکل بی‌بعد قطره نیمه‌رسانا برای ثابت‌های توانی مختلف برای نمونه $b(Ca_E=0)$

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تغییر شکل قطره نیمه‌رسانای غیرنیوتنی غوطه‌ور در یک سیال نیمه‌رسانای غیرنیوتنی تحت تأثیر میدان الکتریکی، به صورت عددی شبیه‌سازی شد. از ترکیب روش‌های سطح تراز و سیال مجازی برای مدل‌سازی سطح مشترک (بدون میرا کردن کمیت‌ها در عرض سطح مشترک و حفظ ناپیوستگی آن‌ها) استفاده شد. نتایج حاصل به شرح زیر هستند:

۱- قطره نیمه‌رسانای غیرنیوتنی مشابه قطره نیوتنی تحت اثر تنش‌های الکتریکی عمودی در سطح مشترک دچار تغییر شکل می‌شود. در این حالت به دلیل وجود تنش‌های الکتریکی مماسی در سطح مشترک، جریان‌های چرخشی القایی در داخل قطره شکل می‌گیرد. با توجه به خواص الکتریکی سیال، این تغییر شکل می‌تواند به صورت کشیدگی در راستای میدان (پرولیت) یا کشیدگی در راستای عمود بر میدان (آبلیت) باشد. همچنین، الگوی جریان القایی درون قطره نیز می‌تواند به صورت پادساعت‌گرد یا ساعت‌گرد باشد.

۲- برای هر سه نوع سیال نیوتنی، رقیق‌شونده برشی و غلیظ‌شونده برشی با افزایش عدد موبینگی الکتریکی میزان تغییر شکل قطره افزایش می‌یابد.

۳- با افزایش ثابت قانون توانی تغییر شکل قطره افزایش می‌یابد. این بدین معناست که تغییر شکل قطره رقیق‌شونده برشی از تغییر شکل قطره نیوتنی کمتر و تغییر شکل قطره غلیظ‌شونده برشی از تغییر شکل قطره نیوتنی بیشتر است.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تا کنون در نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج، بر

- electrocoalescence. *Chemical Engineering Research and Design*. 2019;144:472-482.
- 26- Cui Y, Wang N, Liu H. Numerical study of droplet dynamics in a steady electric field using a hybrid lattice Boltzmann and finite volume method. *Physics of Fluids*. 2019;31(2):022105.
- 27- Wang N, Liu H, Zhang Ch. Deformation and breakup of a confined droplet in shear flows with power-law rheology. *Journal of Rheology*. 2017;61(4):741-758.
- 28- Liu XD, Osher S, Chan T. Weighted essentially non-oscillatory schemes. *Journal of Computational Physics*. 1994;115(1):200-212.
- 29- Kang M, Fedkiw RP, Liu XD. A boundary condition capturing method for multiphase incompressible flow. *Journal of Scientific Computing*. 2000;15(3):323-360.
- 30- Osher SJ, Fedkiw R. *Level set methods and dynamic implicit surfaces*. New York: Springer-Verlag; 2003.
- 31- Pournaderi P, Pishavar AR. A numerical investigation of droplet impact on a heated wall in the film boiling regime. *Heat and Mass Transfer*. 2012;48(9):1525-1538.
- 32- Nazari H, Pournaderi P. The electric field effect on the droplet collision with a heated surface in the Leidenfrost regime. *Acta Mechanica*. 2019;230(3):787-804.
- 33- Pournaderi P, Pishavar AR. The effect of the surface inclination on the hydrodynamics and thermodynamics of leidenfrost droplets. *Journal of Mechanics*. 2014;30(2):145-151.
- 34- Liu XD, Fedkiw RP, Kang M. A boundary condition capturing method for Poisson's equation on irregular domains. *Journal of Computational Physics*. 2000;160(1):151-178.
- 35- Emdadi M, Pournaderi P. Study of droplet impact on a wall using a sharp interface method and different contact line models. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2019;12(4):1001-1012.
- 36- Chai Z, Shi B, Guo Z, Rong F. Multiple-relaxation-time lattice Boltzmann model for generalized Newtonian fluid flows. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2011;166(5-6):332-342.
- 37- Taylor GI. Studies in electrohydrodynamics. I. The circulation produced in a drop by an electric field. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1966;291(1425):159-166.
- 38- Ajayi OO. A note on Taylor's electrohydrodynamic theory. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1978;364(1719):499-507.
- 14- Hu WF, Lai MC, Young YN. A hybrid immersed boundary and immersed interface method for electrohydrodynamic simulations. *Journal of Computational Physics*. 2015;282:47-61.
- 15- Gong H, Peng Y, Yang Z, Shang H, Zhang X. Stable deformation of droplets surface subjected to a high-voltage electric field in oil. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2015;468:315-321.
- 16- He L, Huang X, Luo X, Yan H, Lü Y, Yang D, et al. Numerical study on transient response of droplet deformation in a steady electric field. *Journal of Electrostatics*. 2016;82:29-37.
- 17- Vivacqua V, Ghadiri M, Abdullah AM, Hassanpour A, Al-Marri MJ, Azzopardi B, et al. Analysis of partial electrocoalescence by Level-Set and finite element methods. *Chemical Engineering Research and Design*. 2016;114:180-189.
- 18- Wang T, Li HX, Zhao JF. Three-dimensional numerical simulation of bubble dynamics in microgravity under the influence of nonuniform electric fields. *Microgravity Science and Technology*. 2016;28(2):133-142.
- 19- Huang X, He L, Luo X, Yang D, Shi K, Yan H. Breakup mode transformation of leaky dielectric droplet under direct current electric field. *International Journal of Multiphase Flow*. 2017;96:123-133.
- 20- Rayatinezhad M, Pournaderi P. Electric field effect on the hydrodynamic and evaporation of a dielectric drop. *Journal of Mechanical Engineering*. 2017;47(1):113-122. [Persian]
- 21- Mhatre S. Dielectrophoretic motion and deformation of a liquid drop in an axisymmetric non-uniform AC electric field. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2017;239:1098-1108.
- 22- He L, Yan H, Luo X, Cao J, Wang J, Yang D. Study on the transient response of water-in-oil droplet interface to electric field. *Chemical Engineering Research and Design*. 2017;118:71-80.
- 23- Luo X, Huang X, Yan H, Yang D, Wang J, He L. Breakup modes and criterion of droplet with surfactant under direct current electric field. *Chemical Engineering Research and Design*. 2018;132:822-830.
- 24- Santra S, Mandal Sh, Chakraborty S. Electrohydrodynamics of confined two-dimensional liquid droplets in uniform electric field. *Physics of Fluids*. 2018;30(6):062003.
- 25- Xia Y, Reboud JL. Hydrodynamic and electrostatic interactions of water droplet pairs in oil and