نشريه مهندسي مكانيک دانشگاه تبريز، شماره بيايي ٩٨. جلد ٥١، شماره ۴، زمستان، ١٩٠٠ مفحه ٢١-١٠ – بژوهشي كامل - inst

شبیهسازی عددی حرکت قطره آب نمک در میدان الکتریکی یکنواخت

نيلوفر آلاشتى	دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران، niloofaralashti1993@gmail.com
محسن پورفلاح*	استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران، m.pourfallah@ustmb.ac.ir
آتنا قادري	استادیار، مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی روزبهان، ساری، ایران، atena.ghaderi@gmail.com

چکیدہ

در مطالعه حاضر، اثر میدان الکتریکی یکنواخت روی هیدرودینامیک قطره آب نمک در نفت خام مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، از نرم افزار کامسول (COMSOL) که بر اساس روش المان محدود میباشد، استفاده میشود. نتایج حاصل با نتایج در دسترس، مورد اعتبار سنجی قرار گرفته است و توافق خوبی مشاهده شده است. اثر پارامترهای متفاوت از جمله عدد کپیلاری الکتریکی، عدد رینولدز، جهت میدان الکتریکی و نفوذپذیری الکتریکی نسبی سیال روی فرایند حرکت یک قطره منفرد آب نمک در نفت خام تحت میدان الکتریکی بررسی شده است. نتایج نشان میدهد که تنشهای الکتریکی که بر سطح مشترک قطره وارد میشوند، سبب تغییر شکل قطره و کشیدگی آن در راستای میدان الکتریکی می گردند. مقدار این تغییر شکل با افزایش نسبت نیروی الکتریکی به کشش سطحی (عدد کپیلاری الکتریکی) بیشتر میشود. همچنین، فرآیند حرکت قطره تحت میدان الکتریکی در راستای عمود در زمان طولانی تری نسبت به راستای میدان الکتریکی افقی، در شرایط یکسان، اتفاق میافتد. از اینرو، میدان الکتریکی خارجی یکنواخت میتواند برای کنترل غیرتماسی موری طولانی تری نسبت بیر استای میدان الکتریکی افقی، در شرایط یکسان، اتفاق میافتد. از اینرو، میدان الکتریکی خارجی یکنواخت میتواند برای کنترل غیرتماسی حرکت قطره مورد استفاده قرار گیرد.

واژههای کلیدی: جریان دوفازی، کامسول، روش تنظیم سطح، میدان الکتریکی یکنواخت، موئینگی.

Numerical simulation of salt-water drop motion in an Electric field

N. Alashti	Department of Mechanical Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Mazandaran, Iran
M. Pourfallah	Department of Mechanical Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Mazandaran, Iran
A. Ghaderi	Department of Mechanical Engineering, University College of Rouzbahan, Sari, Iran

Abstract

In the present study, the effect of uniform electric field on hydrodynamic of salt-water drops in crude oil is studied. For this approach, COMSOL Multiphysics software is used, which is based on the finite element method. The obtained results are compared and validated with the available results and good agreement is observed. The effect of different parameters including the electric Capillary number, the Reynolds number, direction of the electric field and the relative permittivity of fluid, on the movement of a single drop of saltwater in crude oil under the electric field is investigated. The results reveal that electric stresses at the interface cause drop deformation and elongation in the direction of electric field. The magnitude of this deformation increased with increasing electric field at the same condition. Therefore, a uniform external electric field can be used for non-contact controlling of a drop movement.

Keywords: Two phase flow, COMSOL, Level set method, Uniform electric field, Capillary.

۱– مقدمه

مطالعه رفتار دینامیکی قطره یکی از موضوعات مهم در زمینه جریانهای چند فازی در تحقیقات علمی و کاربردهای صنعتی است. مکانیزم شکست، جدایش و انعقاد قطرات در بسیاری از مسائل صنعتی مانند چاپگرهای جوهرافشان، اسپری رنگها و غیره دیده میشود. پارامترهایی مانند لزجت، کشش سطحی بین دو سیال و چگالی در پدیده فروپاشی، الحاق و تغییر شکل، قطرات موثر میباشند. از اینرو، بررسی حرکت قطرات، جزء گامهای بسیار ارزشمند برای تجزیه و تفسیر مسائل دوفازی و علوم مهندسی است.

روشهای متعددی برای کنترل رفتار قطرات مایع توسط محققین توسعه داده شده است. رفتار قطره را میتوان توسط گرادیان

شیمیایی، موئینگی گرمایی، و نیروهای الکترواستاتیک و مغناطیسی کنترل نمود [۱]. کنترل رفتار قطره در کاربردهای فراوانی نظیر انتقال دارو [۲] و دیگرکاربردهای پزشکی [۳] اهمیت پیدا میکند. در کاربردهای مدرن و مهندسی، مطالعه پدیده اثر میدانهای خارجی نظیر میدانهای مغناطیسی و الکتریکی بر رفتار جریانهای چندفازی بسیار حائز اهمیت است. یکی از شیوههایی که اخیراً مورد توجه ویژه پژوهشگران قرار گرفته است، استفاده ازمیدان الکتریکی میباشد. کنترل قطرات بصورت غیرتماسی و یافتن نیروی محرک مناسب به منظور به حرکت درآوردن آنها با استفاده از میدان الکتریکی، یکی از موضوعات جدید و روشهای نوینی است که بسیار مورد توجه قرار دارد.

[®] نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.pourfallah@ustmb.ac.ir تاریخ دریافت: ۲/۲۷ ۹۹/۰۲

بایجنت و همکاران [۴] با استفاده از روش عددی، برهم کنش دو قطرهی مجاور را بررسی کردند. تغییر شکل قطره بستگی به خواص الكتريكي سيال دارد. اگر سيال كاملاً دى الكتريك فرض شود، آنگاه تنش الكتريكي عمود بر سطح خواهد بود و شكل قطرهى ايزوله شده دوكي مى شود. بر اساس نظريه سيالات دى الكتريك ضعيف ، تنش مماسی روی سطح قطره عمل می کند و باعث چرخش سیال در درون و بيرون آن مي گردد. تنشهاي لزجي اعمال شده ميتواند باعث دوكي شدن و یا پهن ٔ شدن قطره (پهن شده در قطبین) گردد. او و قدیری [۵] رفتار قطرهی آب را در سیال دی الکتریک به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی آنها نشان داد که قطرهی آب تحت میدان الکتریکی ناپایدار شده و تغییر شکل میدهد. این تغییر شكل به خواص فاز پيوسته مانند رسانايي الكتريكي و كشش سطحي وابسته است. به طور کلی قطرات قطبی تغییر شکل بیشتری از خود نشان مىدهند. با افزايش شدت ميدان الكتريكى، ناپايدارى قطرات بیشتر شده تا اینکه در یک شدت میدان الکتریکی بحرانی قطرات بزرگ به قطرات کوچک تبدیل می شوند. آن ها در نتایج خود عنوان کردند که مقدار شدت میدان بحرانی برای شکست قطرات، به قطر اولیهی آن بستگی دارد. ژانگ و کوک [۶] برای اولین بار معادلات مربوط به الکتروهیدرودینامیک را وارد شبکهی بولتزمن کردند. آنها در این مطالعه از نظریه سیالات دی الکتریک ضعیف که توسط تیلور مطرح شده است، استفاده کردهاند و دینامیک سطح مشترک یک قطرهی معلق را در سیال دیگر شبیهسازی نمودهاند. در این نظریه، سیال دارای رسانایی الکتریکی پایینی است. تیلور تابع تمایز را برای تشخیص این که قطره در یک میدان الکتریکی دوکی شکل می شود و یا اینکه به صورت پهن شده در قطبین در میآید بر اساس نسبت رسانایی الکتریکی⁶ و نسبت گذردهی الکتریکی³، برای قطرههای دو بعدی معرفی کرد. در این مطالعه نیز بر اساس همین تابع تمایز حالات مختلف تغيير شكل قطره مطالعه شده است. پاكنعمت و همکاران [۷] بوسیله روش تغییرشکل و شکست قطره تحت میدان الکتریکی را شبیهسازی نمودند. آنها از روش تنظیم سطح^۷ ، برای ردیابی سطح مشترک و از روش سیال مجازی، برای اعمال ناپیوستگی خواص روی سطح مشترک استفاده نمودند. آنها دریافتند در این تحقیق، ابتدا تغییر شکل قطره نیمه رسانای معلق در یک سیال نیمه رسانای دیگر، تحت اثر میدان الکتریکی شبیهسازی می گردد .نیروی الكتريكي با توجه به خصوصيات الكتريكي قطره و سيال پيرامون آن، می تواند سبب تغییر شکل قطره در جهت میدان الکتریکی و یا عمود بر آن شود.

میدان شاهی و همکاران [۸] روی مدل کردن نمکزداهای الکترواستاتیکی برای جداسازی آب از نفت خام مطالعاتی انجام دادند. آنها یک مدل جدید ریاضی بر اساس معادله دو متغیره جمعیت به

منظور مدل کردن توزیع حالت پایدار اندازه قطرات آب و غلظت نمک در طول یک نمکزدای الکترواستاتیک AC پیشنهاد کردند و یک فرآیند نمکزدایی دو مرحلهای صنعتی بر اساس معادله جمعیت مدل شد. تاثیر پارامترهای مختلف بر روی میزان از دست دادن آب و محتوای نمک نفت خام و همچنین تاثیر نمک زدایی دومرحلهای روی عمده رسوب خروجی و آب و محتوای نمک نفت خام مطالعه شد و پارامترها با استفاده از روش تکامل دیفرانسیلی بهینه شدند. ژانگ [۹] حرکت گروهی از قطرات فاز پراکنده آب در یک امولسیون آب و نفت را به منظور بررسی انعقاد قطرات در یک میدان الکترواستاتیکی یکنواخت DC بررسی نمود. با استفاده از مدلسازی، تغییر شکل قطرات، توزيع مناسب قطرات، توزيع غلظت محلى و رابطه اندازه سرعت قطرات به همراه زمان اعمالی میدان الکتریکی را تعیین کرد. اندازه متوسط قطرات از مقادیر آزمایشگاهی به دست آمد. نوسان تعداد قطرات با زمان، تحت ولتاژهای اعمالی نشان داد که افزایش ولتاژ برای بالا بردن نرخ انعقاد قطرات نسبت به طولانی کردن زمان موثرتر است. اگر چه افزایش بیش از حد ولتاژ، تاثیر آن را در نرخ انعقاد قطرات كاهش زيادى مىدهد. تحت ولتاژهاى بالاتر، قطرات مى توانند سريعتر به سمت الكترود مقابل حركت كنند. اين افزايش، باعث برخورد و تجمع بین قطرات می شود. از سوی دیگر ولتاژ اعمالی بالاتر در داخل قطرات یک نیروی الکتریکی به وجود می آورد که باعث افزایش فعالیت درون قطرات می شود و منجر به اختلاف سرعت بین قطرات می گردد. این مسئله با افزایش احتمال برخورد قطرات منجر به انعقاد مي شود.

حسینی [۱۰] تغییر شکل قطرات آب در روغن آفتاب گردان تحت میدان الکتریکی را مورد مطالعه تجربی قرار داد. او در کار خود ادغام كامل، ادغام ناقص وحالت بدون انعقاد را بررسی نمود. این فرآیند با استفاده از یک جداساز استوانهای با سیستم ولتاژ بالا انجام شد. ماتره [۱۱] رفتار دی الکتروفورتیکی از یک قطره معلق آزاد در سیالی دیگر در حضور میدان الکتریکی متناوب را بطور تجربی مورد مطالعه قرار داد. بکار گرفتن میدان الکتریکی متناوب، فرکانسی را به عنوان یک ویژگی اضافی برای دستکاری ذرات یا قطرات در برنامههای کاربردی ارایه میدهد. اثری از فرکانس میدان سینوسی بکار رفته روی حرکت و شکل تکاملی از یک قطره بررسی شده است. همچنین از نظریه تحلیلی برای پیش بینی حرکت دورهای دی الکتروفورتیکی قطره بین الكترودها استفاده شده است. اسماعیلی و حلیم [۱۲] رفتار یک قطره الكتريكي ساكن را تحت ميدان الكتريكي متغير با زمان بصورت عددي مطالعه نمودند. وانگ و همکاران [۱۳] بصورت عددی به بررسی اثر ميدان الكتريكي روى انعقاد دو قطره ساكن تحت ميدان الكتريكي پرداختند. بررسی های آنها مشخص نمود که شدت میدان الکتریکی تاثیر مهمی روی انعقاد قطرات دارد و اگر از یک حد بحرانی کمتر باشد، انعقاد بصورت موفقیت آمیز انجام می شود. نظری و پورنادری [۱۴] اثر ميدان الكتريكي روى تبخير يك قطره كاملاً رساناي معلق در یک سیال عایق را شبیهسازی نمودند. آنها گزارش نمودند، در صورتی که عدد مویینگی الکتریکی از حد معینی (عدد مویینگی الکتریکی بحرانی تبخیر) تجاوز کند، تبخیر قطره به میزان قابل توجهی افزایش می یابد. موسوی و ایزدی [۱۵] با توجه به کاربرد گسترده سیالات غیرنیوتنی بخصوص در کاربردهای زیستی، دینامیک قطرات

¹ Perfect Dielectric

² Prolate ³ Leaky Dielectric

⁴ Oblate

⁵ Electrical Conductivity

⁶ Electric permittivity

⁷ Level Set

۱۵، شماره ۲. زمستان

صفحه

12-•2 - پژوهشی

کامل

– نيلوفر آلاشتى و همكاران

نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، شماره پیاپی ۹۷، جلد

غيرنيوتني كارئو تحت پديده الكترووتينگ (را مورد بررسي قرار دادند. آنها به مطالعه اثرات لزجت، اندازه قطره و اختلاف پتانسیل اعمالی در نوسانات و تغییر ارتفاع قطره پرداختند. نتایج آنها نشان داد، برای سيال غيرنيوتنى مدل كارئو با افزايش لزجت دامنه نوسانات كاهش می یابد اما فرکانس ارتعاشی ثابت است. در سیال غیرنیوتنی کارئو با ضریب توان کوچکتر از یک، رفتار سیال غیرنیوتنی مشابه سیال نیوتنی است، اما زمانیکه ضریب بزرگتر از یک میشود، سیال غیرنیوتنی در زمان کمتری به ارتفاع نهایی خود رسیده و این تغییر ارتفاع به صورت یک مرتبه همگرا می شود. افزایش ارتفاع در سیال غیرنیوتنی منجر به افزایش دامنه ارتعاشی و کاهش مقدار فرکانس در سیال می شود که رفتاری مشابه سیال نیوتنی داشته با این تقاوت که در سیال غیرنیوتنی دامنه ارتعاشی کمتر ولی مقدار فرکانس آن بیشتر است. ین و همکاران [۱۶] درهمآمیختگی دوقطره تحت میدان الکتریکی را بصورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که رسیدن دوقطره به یکدیگر توسط رابطه Re=60Ca/Oh و گسترش پل مايع ً توسط يک زمان مشخصه ميتواند بيان شود. حسيني و همكاران [1۷] بصورت عددی بوسیله روش حجم سیال سقوط و جدایش یک قطره تحت میدان الکتریکی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده آنها نشان داد که با افزایش میدان الکتریکی، ضريب انتقال حرارت افزايش مييابد.

با توجه به مطالب بیان شده، در مییابیم که فرآیند حرکت قطره تحت میدان الکتریکی یکنواخت در کانال افقی شبیه سازی نشده است. از اینرو، در پژوهش حاضر با استفاده از نرمافزار مولتی فیزیک کامسول[†]، حرکت قطره در حضور میدان الکتریکی یکنواخت مورد مطالعه قرار گرفته است. پس از پیادهسازی روش و تدوین کد دوفازی مورد نظر، با تحلیل چند مساله استاندارد، صحت نتایج نرمافزاری اعتبارسنجی شده و در نهایت نتایج متعددی از شبیهسازی حرکت قطره در حضور میدان الکتریکی با جزئیات مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۲- معادلات حاکم

برای بررسی عددی مسائل الکتروهیدرودینامیک نیاز به حل معادلات جریان سیال و معادلات الکترواستاتیک است. در ادامه معادلات حاکم توصیف میشوند.

1-1- معادلات جریان

در پژوهش حاضر از روش تنظیم سطح برای شبیه سازی عددی جریان دوفازی مایع- مایع استفاده شده است. در این روش علاوه بر حل معادلات پیوستگی و مومنتوم، یک معادله بقای کسر حجمی نیز در هر سلول محاسباتی حل میشود. معادلات استفاده شده برای جریان دو فازی به ترتیب زیر می باشند.

معادله پیوستگی: برای سیالات غیر قابل تراکم، معادله پیوستگی

به صورت رابطه (۱) می باشد،

$$\nabla . \boldsymbol{u} = 0$$
 (۱)
 $\nabla . \boldsymbol{u} = 0$ (۱)
 $\nabla . \boldsymbol{u} = 0$
 $\nabla b \, c \, \overline{l} \, \boldsymbol{u}$ سرعت مخلوط سیال است.
 $n \, a \, b \, c \, \overline{l} \, \boldsymbol{u}$
 $n \, a \, b \, c \, \overline{l} \, \boldsymbol{u}$
 $\rho \, \frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + \rho(\boldsymbol{u}.\nabla) \boldsymbol{u} = -\nabla p + \nabla . \left[\mu(\nabla \boldsymbol{u} + \nabla \boldsymbol{u}^T)\right] + \boldsymbol{F}$ (۲)

و بالانویس T به ترتیب بیان کننده فشار و علامت ترانهاده pهستند. F در معادله (۲) معرف نیروهای اعمال شده است که بصورت زیر می باشد: $F = F_{\sigma} + F_{g} + F_{e},$ (۳)

که F_{g} F_{g} و F_{g} به ترتیب بیانگر نیروی کشش سطحی، نیروی وزن و نیروی الکتریکی میباشند. F_{σ} بصورت زیر تعریف میشود [۱۸]:

$$\boldsymbol{F}_{\sigma} = \sigma \,\kappa \,\boldsymbol{n} \,\delta_{\epsilon}(\boldsymbol{\emptyset}) \tag{(f)}$$

م و (Ø) و کرف ترتیب انحنای سطح مشترک، بردار نرمال مود برسطح و تابع دیریکله میباشند، که به صورت زیر محاسبه می-شوند [۱۸]:

$$\kappa = \nabla . (n) , \boldsymbol{n} = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \tag{(b)}$$

$$\delta_{\epsilon}(\emptyset) = \begin{cases} 0 & \text{if } |\emptyset/\epsilon| > 1\\ \frac{1}{2\epsilon} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi\alpha}{\epsilon}\right) \right] & \text{if } |\emptyset/\epsilon| \le 1 \end{cases}$$
(\$

که در آن *6* ضخامت سطح تماس است. تانسور تنشهای الکتریکی ماکسول (**t**^e) به صورت معادله زیر میباشد [Y]:

$$\boldsymbol{\tau}^{\mathrm{e}} = \varepsilon \varepsilon_0 \left(\boldsymbol{E} \boldsymbol{E} - \frac{1}{2} \boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{E} \boldsymbol{I} \right) \tag{Y}$$

که در آن I تانسور یکه است. نیروی الکتریکی وارده بر واحد ججم (F_e) در معادله (۳) با اعمال عملگر دیورژانس بر تانسور تنش ماکسول زیر بدست میآید [۷]:

$$\boldsymbol{F}^{\mathrm{e}} = \boldsymbol{\nabla} \boldsymbol{.} \, \boldsymbol{\tau}^{\mathrm{e}} = -\frac{1}{2} \boldsymbol{E} \boldsymbol{.} \, \boldsymbol{E} \boldsymbol{\nabla} \boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{q}^{\mathrm{v}} \boldsymbol{E} \tag{A}$$

که در آن E و q^{ν} بهترتیب بیانگر میدان الکتریکی و چگالی بار آزاد هستند. در معادله (۸)، جزء اول نیروی وارده ناشی از قطبش است و از تفاوت بین ضرایب گذردهی الکتریکی دو سیال، E_a و 3. ایجاد میشود. این نیرو روی سطح مشترک وارد میشود و اگر تنش دیگری وجود نداشته باشد، باعث میشود که قطره در راستای میدان الکتریکی کشیده شود [۱۹]. جزء دوم نیروهای الکتریکی، نیروی حجمی ناشی از غیر صفر بودن چگالی بار خالص در هر نقطه از سیال است. در این پژوهش، این ترم در نظر گرفته نمیشود و تنشوی بستگی به الکتریکی فقط روی سطح مشترک وارد میشود. این نیرو بستگی به

¹ Electrowetting phenomenon

² Liquid Bridge Expansion

³ Volume of Fluid

⁴ Multi-Physics COMSOL

رسانایی سیالات، $\sigma_0 c_3 \sigma_0$ ، دارد و از غیر صفر بودن غلظت حاملهای بارهای آزاد (مثل یونها) در یک یا هر دو سیال ناشی میشود و اجازه تقویت تشکیل بارها در نزدیکی سطح مشترک را میدهد. اگر نسبت رسانایی بالا باشد و یا قطر نسبتاً بزرگ باشد، میتوان فرض کرد که یونها در لایهی نازکی نزدیک سطح مشترک جمع میشوند. این باعث می شود تا تنشهای ماکسول به عنوان شرط مرزی روی سطح مشترک در نظر گرفته شود، که یکی از فرضهای اساسی تیلور است مشترک در نظر گرفته شود، که یکی از فرضهای اساسی تیلور است سطح مشترک نیستند و میتوانند بسته به پارامترهای فیزیکی مسئله، سطح مشترک نیستند و میتوانند بسته به پارامترهای فیزیکی مسئله، سریانهای چرخشی، در داخل و خارج قطره ایجاد نمایند. این تنشها راستای میدان تغییر شکل قطره در میدان الکتریکی، میتواند باعث شوند که قطره به صورت یک بیضیگون پخ شده در راستای میدان تغییر شکل یابد. تغییر شکل قطره در میدان الکتریکی، اینرسی ناشی از هر دو سیال است، که تنشهای الکتریکی باعث ایجاد اینرسی ناشی از هر دو سیال است، که تنشهای الکتریکی باعث ایجاد جریان، کشش سطحی و تنشهای لزج مانع این حرکت میشوند.

برای دنبال کردن سطح مشترک در تحقیق حاضر از روش تنظیم سطح استفاده شده است. این روش برای اولین بار توسط اوشر و ستاین [۱۸] معرفی شده است و به علت توانایی مدل کردن سطوح پیچیده و همچنین به علت هموار بودن ذاتی آن روز به روز بیشتر مورد استفاده قرار میگیرد. ایده اصلی این روش استفاده از تابع Ø برای مدل سازی سطح مشترک است. برای این منظور به سطح مشترک عدد صفر، به سیال درون قطره مقدار منفی و به سیال بیرونی، مقادیر مثبت نسبت داده میشود که اندازه این مقادیر متناسب با کمترین فاصله از سطح مشترک است (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت سطح مشترک بین دو سیال.

معادله اساسی روش تنظیم سطح در زیر نمایش داده شده است [۱۸]:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{\nabla} \phi = 0 \tag{9}$$

که در آن **u** سرعت سطح مشترک است.

۲-۲- معادلات الكترواستاتيك

در طبیعت ماده کاملا رسانا وجود ندارد. اما بعضی از مواد در مقایسه با مواد دیگر دارای رسانندگی بالایی هستند. مواد کاملا رسانا

دارای ویژگیهای زیر میباشند [۲۱]: ۱) میدان الکتریکی درون ماده کامال رسانا صفر است، ۲) چگالی بار الکتریکی درون ماده کاملا رسانا صفر است، ٣) سطح مواد کاملا رسانا هم پتانسیل می باشد، ۴) بردار ميدان الكتريكي عمود بر سطح ماده كاملا رسانا مي باشد و ۵) توزيع ميدان الكتريكي فقط در بيرون ماده رسانا مىباشد. توصيف الكتريكي مسئله مورد بررسی (قطره تحت میدان الکتریکی)، در حالت کلی توسط معادلات الكترومغناطيس ماكسول در محيط قابل قطبش انجام مى شود. تشريح پديده الكترومغناطيس، توسط معادلات پيچيده ماکسول انجام میشود که چهار معادله برداری مشتق جزئی میباشد و در حالت دو بعدی شامل شش معادله و در حالت سه بعدی شامل هشت معادله است. اگر مقیاس زمانی مورد نظر مسئله، خیلی بزرگتر از زمان آرامش مغناطیسی (باشد، مسئله میتواند به عنوان یک مسئله شبه استاتیک در نظر گرفته شود که میدان الکتریکی و مغناطیسی به صورت جفت نشده هستند. در تحقیق حاضر فرض می شود، مقیاس زمانی مغناطیسی مسئله خیلی کوچکتر از مقیاس زمانی مورد نظر مسئله است و هیچ تحریک مغناطیسی خارجی وجود ندارد. بنابراین معادلات الكترواستاتيك به شكل زير ساده مى شوند [٧]:

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = 0 \tag{(1.)}$$

$$\nabla . D = 0 \tag{11}$$

که در آن *E* و **D** بهترتیب برداهای میدان الکتریکی وجابجایی الکتریکی هستند و به شکل زیر تعریف می شوند:

$$\boldsymbol{E} = -\boldsymbol{\nabla} \boldsymbol{V} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \boldsymbol{E} \tag{17}$$

که در آن ۶ ضریب نفوذ الکتریکی و ۲ میدان پتانسیل الکتریکی میباشد. با جایگذاری معادله (۱۳) در (۱۱) میتوان نوشت:

$$\nabla . \left(\epsilon \epsilon_0 \nabla V \right) = 0 \tag{14}$$

برای قطره رسانای معلق در سیال عایق، پتانسیل الکتریکی درون قطره ثابت است و معادله (۱۴) تنها برای محاسبه میدان پتانسیل بیرون قطره استفاده می شود.

خواص سیال ها مانند چگالی، لزجت و قابلیت نفوذپذیری الکتریکی در اطراف سطح مشترک به صورت زیر میباشند [۱۸]:

$$\rho = \rho_c + (\rho_d - \rho_c) H_{\epsilon}(\emptyset), \tag{1Y}$$

$$\mu = \mu_c + (\mu_d - \mu_c) H_{\varepsilon}(\emptyset), \tag{1A}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_c + (\varepsilon_d - \varepsilon_c) H_{\varepsilon}(\emptyset), \tag{19}$$

در روابط زیرنویسهای c و b به ترتیب بیان کننده فاز پیوسته و فاز گسسته میباشد. همچنین $H_{\varepsilon}(\emptyset)$ تابع هویساید میباشد که از

¹ Electromagnetic relaxation time

رابطه زیر بدست میآید [۱۸]:

$$H_{\varepsilon}(\phi) = \begin{cases} 0 & if \ \phi < -\epsilon \\ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\phi}{\epsilon} + \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{\pi\phi}{\epsilon}\right) \right] & if \ |\phi| \le \epsilon \\ 1 & if \ \phi > \epsilon \end{cases}$$
(Y ·)

۳- تعريف مسئله

در تحقیق حاضر، مسئله تغییر شکل قطره منفرد آبنمک (فاز گسسته) در نفت (فاز پیوسته) که هر دو فاز نیوتنی و تراکم ناپذیر در نظر گرفته میشوند، تحت میدان الکتریکی در داخل کانال افقی با استفاده از نرم افزار کامسول شبیهسازی میشود.

شکل ۲ طرحوارهای از هندسههای مورد بررسی در این طرح را نشان می دهد که یک قطره منفرد آب نمک به قطر b (*mm*) به مرکز (*mm و mm*۸) در داخل کانال مستطیل به پهنای *W* (*mm*۱) و طول l (*mm*۶) با تزریق نفت خام از سمت چپ کانال، تحت میدان الکتریکی قرار دراد. شرط مرزی عدم لغزش (سرعت صفر) برای دیوارهای بالا و پائین کانال مستطیلی اعمال می شود. شرایط مرزی سرعت معلوم برای ورودی کانال (سمت چپ) و شرایط مرزی فشار خروجی برای خروجی کانال (سمت راست) در نظر گرفته شده است.

شکل ۲- طرحوارهای از هندسههاًی مورد بررسی: حرکت یک قطره منفرد آب نمک در داخل نفت تحت میدان الکتریکی.

مشخصات فیزیکی قطره الکتریکی (آب نمک) و سیال پیرامون (نفت) در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱- خواص سیال پیرامون و قطره الکتریکی مورد استفاده در

شبیه سازی.						
کششسطحی (N/m)	الکتریک پذیری	چگالی (kg/m ³)	ويكسوزيته (Pa.s)			
. (. **)	$\mathbf{\lambda} \boldsymbol{\cdot} \boldsymbol{\varepsilon}_0$	११८/۲	•/••١٣	قطرہ الکتریکی		
- / • 1 1	$r/r \varepsilon_0$	٨٨۴	•/۴٧۴	سيال پيرامون		

 ho_{a} در مسئله حاضر، پارامترهای فیزیکی مهم از جمله دانسیته (ho_{a} ho_{a})، کشش سطحی بین (ho_{c9})، لزجت (μ_{a} μ_{a}) قطر قطرات (1 و d_{1})، کشش سطحی بین دو فاز(σ)، شدت میدان الکتریکی(E_{0}) و ثابت نفوذپذیری الکتریکی فاز گسسته و پیوسته (ϵ_{a} ϵ_{a}) میباشند. با بکارگیری آنالیز ابعادی، اعداد، بدون بعد حاکم بر مسئله حاضر عبارت خواهند بود از: نسبت

للزجت $\left(\frac{\mu_{d}}{\mu_{c}} + \frac{\mu_{d}}{\mu_{c}}\right)$, نسبت په نوذ پذیری $\mu_{c}^{2} = \frac{\rho_{d}}{\rho_{c}}$, نسبت نفوذ پذیری الکتریکی $\left(\frac{\mu_{c}}{\mu_{c}} + \frac{\mu_{c}}{\sigma}\right)$, عدد باند $\left(\frac{\mu_{d}gR^{2}}{\sigma}\right)$, عدد رینولدز $\left(\frac{\mu_{c}gR^{2}}{\sigma}\right)$, عدد موئینگی $\left(\frac{\mu_{c}gR^{2}}{\sigma}\right)$, عدد موئینگی $\left(\frac{\mu_{c}gR^{2}}{\sigma}\right)$, عدد موئینگی $\left(\frac{\mu_{c}gR^{2}}{\sigma}\right)$, عدد موئینگی الکتریکی $\left(\frac{\mu_{c}gR^{2}}{\sigma}\right)$, عدد موئینگی $\left(\frac{\mu_{c}gR^{2}}{\sigma}\right)$, عدد موئینگی $\left(\frac{\mu_{c}gR^{2}}{\sigma}\right)$, عدد موئینگی فاز نفت و فاز آب نمک و همچنین، u_{in} سرعت متوسط ورودی می-باشد. عدد موئینگی الکتریکی بیان کننده نسبت نیروی الکتریکی به نیروی کشش سطحی است. در مسئله حاضر بدلیل اینکه اختلاف نیروی کشش سطحی است. در مسئله حاضر بدلیل اینکه اختلاف بررسی نمی گردد. در تمام نتایج بدست آمده، نسبت چگالی و نسبت بررسی نمی گردد. در تمام نتایج بدست آمده، نسبت چگالی و نسبت الکتریکی هوا و تراوایی الکتریکی قطره متناسب با ضرایبی از تراوایی الکتریکی هوا در نظر گرفته شده است.

۴- اعتبارسنجی

از آنجاییکه مهم ترین و پیچیده ترین بخش تحلیل جریان های دوفازی مربوط به دینامیک سطح مشترک بین دو فاز می باشد، اولین گام برای نشان دادن صحت شبیه سازی جریان بررسی این موضوع است. برای این منظور در این بخش نتایج مربوط به شبیه سازی حاضر در زمینه تغییر شکل قطره تحت میدان الکتریکی در غیاب نیروی گرانش با نتایج محققان قبلی مورد ارزیابی قرار می گیرد.

نتایج تجربی و تحلیلی [۲۲ و ۲۳] نشان میدهد در شرایطی که قطره و سیال اطراف دیالکتریک کامل هستند، قطره در یک میدان الکتریکی مستقیم و یکنواخت به شکل دوکیوار (قطره در راستای میدان کشیده میشود) در میآید. سویل [۲۱] با معرفی یک تابع تمایز، شرایط مختلف تغییر شکل قطره را در اثر میدان الکتریکی محاسبه نموده است. او در تحقیق خود نشان داد که نوع شکل قطره دی الکتریک ضعیف و دوبعدی در میدان الکتریکی فقط وابسته به نسبت ضریب رسانایی الکتریکی دو سیال (b/h/a) و نسبت ثابت گذردهی دو سیال (b/h/a) و نسبت ثابت تابع تمایز کوچکتر از صفر باشد، قطره در جهت میدان فشرده میشود. اگر و اگر مثبت باشد، قطره در جهت میدان فشرده میشود. اگر رابطهی بیعد زیر را برای تغییر شکلهای کوچک (De_{drop}) یک قطره دوبعدی تحت تاثیر میدان الکتریکی بیان نمود:

$$De_{drop} = (de \,\varepsilon_b \, E^2 \, d) / (6 \, S^* \, (1 + R^{*2}) \, \sigma) \tag{(1)}$$

مقدار تغییر شکل قطره تحت اثر میدان الکتریکی را میتوان توسط رابطه De_{drop}=(*L-B*)/(*L*+*B*) محاسبه نمود. *L* و *B* به ترتیب تغییر شکل قطره در راستای میدان الکتریکی و تغییر شکل قطره در راستای عمود بر میدان الکتریکی میباشد.

در شکل ۳ تغییر شکل نهایی قطره استاتیکی برای موئینگی الکتریکی مختلف نتایج عددی حاضر در مقایسه با رابطه تحلیلی (۲۱) نشان داده شده است. در جدول ۲ به ترتیب پارامترهای مورد استفاده

در شبیهسازی حاضر برای اعتبارسنجی ارائه شده است. قطر قطره ۲ میلی متر و دامنه محاسباتی مربعی و به ابعاد ۱۰*mm*×۱۰*m*m در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود، مقادیر تغییر شکل محاسبه شده نتایج عددی حاضر، تطابق خوبی با مقادیر پیش بینی شده تئوری تیلور در تغییر شکلهای کوچک دارد. با افزایش اعداد موئینگی الکتریکی، بر اختلاف نتایج عددی و نتایج تحلیلی افزوده می شود. این موضوع را می توان به ماهیت خطی شده مدل تحلیلی تیلور مرتبط دانست که هماهنگی خود را در اعداد موئینگی الکتریکی بزرگتر به دلیل افزایش رفتار غیرخطی در روند تغییر شکل از دست میدهد.



جدول ۲- پارامترهای شبیه سازی برای اعتبارسنجی. μ^* R* كميت ε* ١ مقدار

شكل ۴ ، تغيير شكل برحسب زمان در مقايسه با نتايج پاكنعمت و همکاران [۷] را نشان میدهد. از $D_{
m T}$ و au که بصورت معادلات (۲۲) و (۲۳) تعریف می شوند، به ترتیب برای بی بعد سازی محورهای تغییر شکل و زمان استفاده شده است.

$$D_T = \frac{9}{16} Ca_e \frac{(\epsilon^* - 1)}{(\epsilon^* + 2)}$$
(YY)

$$\tau = \sqrt{\frac{(2\rho_c + 3\rho_d)R_0^3}{24\sigma}} \tag{(11)}$$

نتایج نشان میدهد، تطابق میان نتایج شبیهسازی با نتایج عددی پاکنعمت و همکاران [۷] وجود دارد. در اثر تنشهای الکتریکی، قطره تغییر شکل میدهد. در ابتدا تنش های الکتریکی غالب هستند و میزان تغییر شکل به یک نرخ بالا افزایش می یابد. نیروی کشش سطحی در برابر این تغییر شکل مقاومت میکند بعد از زمان مشخصی نیروی الكتريكي و كشش سطحي به تعادل ميرسند و تغيير شكل قطره متوقف میگردد و به یک شکل پایا میرسد.



شکل ۴- نتایج حاضر و نتایج عددی پاکنعمت و همکاران [۷] در زمينه تغيير شكل قطره.

۵- نتایج

در این بخش، نتایج بدست آمده از حل عددی مسأله تغییرشکل قطره يا قطرات تحت ميدان الكتريكي الكتريكي ارائه خواهند شد. ابتدا به مطالعه اثر شبکه تولید شده بر پارامترهای مختلف جریان پرداخته می شود. در ادامه نتایج بدست آمده از شبیه سازی عددی، ارائه خواهند شد. اثر تغییر پارامترهای گوناگون از جمله عدد موئینگی الکتریکی، تغییر راستای میدان الکتریکی و نسبت نفوذپذیری الکتریکی با جزئیات ارزیابی می گردد.

شبیهسازیهای عددی جریانهای چندفازی، نیازمند شبکههایی به اندازهی کافی کوچک برای حل نمودن الگوهای جریان میباشد. در روشهای عددی، یکی از مباحث مهم تأثیر اندازه شبکه بر نتایج است. شبکه تولید شده و تعداد المانهای بوجود آمده، تأثیر قابل ملاحظهای بر نتایج بدست آمده و مدت زمان اجرای برنامه کامپیوتری دارند. با افزایش تعداد المانها در جهتهای x و y میتوان رفتار جریان را بطور دقیقتر و به همراه جزئیات بیشتر بررسی و مطالعه نمود. به دنبال رسیدن به توصیف رفتار دقیقتر جریان، مدت زمان اجرای برنامه نیز افزایش چشمگیری خواهد داشت. بایستی با ارزیابی صحیح میزان افزایش دقت توصیف رفتار جریان در کنار افزایش مدت زمان اجرای برنامه، به یک حالت بهینه رسید. حالتی که در کمترین مدت زمان اجرای برنامه، بتوان به جوابهای قابل قبولی برای پارامترهای مختلف جریان دست یافت. معاوضه بین دقت عددی و هزینه شبیهسازی، از هر دو دید، علم بنیادی و کاربردهای عملی، یک مسئلهی بسیار مهم مى باشند.

برای شبکهبندی مدل شبیهسازی و بررسی استقلال حل از شبکه، از مشبندی تنطیمات پیشفرض نرمافزار با المان مثلثی برای چهار شبکه محاسباتی متفاوت استفاده شده است و در شکل ۵ نمایش داده شده است. در این حالت، شبیهسازی برای Re=۰/۳۳۶، c==۳۶/۳۷، Ca=1/۷۱۱ و ۳۶/۳۴ انجام شده است. چهار شبکه محاسباتي با تعداد المانهاي ۱۴۶۰۹ (M1)، ۲۳۶۴۹ (M2)، ۳۶۰۳۷ (M3) و ۴۸۷۶۱ (M4) برای شکل قطره در یک زمان مشخص انجام شد و نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است. با (t=1/4s)ارزیابی صحیح میزان افزایش دقت توصیف رفتار جریان در کنار افزایش مدت زمان اجرای برنامه، تعداد المانهای ۳۶۰۳۷ (M3) انتخاب شده است. درنتيجه اين نوع شبكه محاسباتي داراي دقت قابل

قبولی بوده و باعث کاهش هزینه محاسباتی می گردد.



شکل ۵- نحوه مش بندی مسئله حاضر: الف) کل دامنه محاسباتی و ب) بزرگنمایی مش اطراف قطره.



شکل ۶- اسقلال حل از شبکه (تغییر شکل قطره در زمان t=۰/۴s در ۲۳۶ (Cae=۰/۱۹۴ ع)، ۲۶/۳۷ (Cae=۱/۷۱۱). Re=۰/۳۳۶

خصوصیات مش بندی تنطیمات پیش فرض انتخاب شده توسط نرمافزار در جدول ۳ ذکر شده است.

	انتخاب شده.	مورد نظر	شبكه	مشبندى	- المانهای	ندول ۳.
--	-------------	----------	------	--------	------------	---------

خاصيت	مقدار
بيشترين اندازه المان	۰/۳۳۹ <i>mm</i>
كمترين اندازه المان	•/••۴人 <i>mm</i>
ضريب انحنا	1/1
وضوح نواحي باريك	۰/۲۵

در این تحقیق میدان الکتریکی برای هر دو جهت x و y اعمال می شود، بنابراین در شکل ۲-الف و ۲-ب به ترتیب شرایط مرزی پتانسیل الکتریکی بکار گرفته شده و توزیع آن در داخل کانال برای جهات xو y نشان داده شده است.



شکل ۷- شرایط مرزی پتانسیل الکتریکی و توزیع پتانسیل الکتریکی: الف: میدان الکتریکی عمودی و ب: میدان الکتریکی افقی.

شکل ۸ خطوط میدان الکتریکی حول قطره در حال حرکت تحت میدان الکتریکی یکنواخت در یک زمان مشخص برای Re=۰/۲۲۴. ۸-۵ میدان الکتریکی در شکل ۸-۵ میدان الکتریکی در جهت ۲ و در جهت الف و ۸-ب به ترتیب راستای میدان الکتریکی قطره بیشتر از گذردهی الکتریکی سیال اطراف در نظر گرفته شده است. همانگونه که مشاهده می گردد خطوط میدان الکتریکی در مرز مشترک بین دوفاز دچار تغییر شکل میشود اما در نواحی دور از فصل مشترک قطره و داخل آن تغییر نمی کند. همچنین، مشاهده میشود که خمیدگی انحنای قطره در نزدیکی سطح مشترک به سمت قطره میشد.



شکل ۹ سیر تکاملی حرکت قطره برای ۲۲۴، Re=۰/۲۲۴ ، Ca=۱/۱۴۱ ، Re=۰/۲۲۴ و و ۳۶/۳۷ =*۵ در حالتهای بدون حضور میدان الکتریکی (-a_e-ca)، تحت میدان الکتریکی عمودی (Ca_e-۱۹۴) و افقی (۲۹۴)-ca_e) را نشان میدهد. همانطور که در شکل ۹-الف دیده میشود، شکل قطره در حالت بدون میدان به دلیل تعادل بین نیروهای لزجت، اختلاف فشار و کشش سطحی به صورت دایره باقی میماند. زمانی که قطره در معرض میدان الکتریکی قرار می گیرد، علاوه بر نیروهای فوق، نیروی الکتریکی به سطح مشترک دو فاز وارد میشود و باعث کشیدهشدن قطره در جهت میدان میشود. تحت تاثیر میدان الکتریکی در راستای معمودی (شکل ۹-ب)، سطح قطره عمود بر راستای افق حرکت آن افزایش یافته و حرکت قطره کندتر میشود. اما در حالتیکه قطره تحت تاثیر میدان الکتریکی در راستای افقی (شکل ۹-پ) قرار می گیرد،

¹ Resolution of Narrow Region

قطره شتاب میگیرد و سریعتر حرکت میکند. همانطور که ملاحظه میشود، در لحظه شروع حرکت قطره، چون میدان سرعت صفر است نیروهای لزجت وجود ندارند. قطره بر اثر سرعت جریان فاز پیوسته، شتاب گرفته و سرعت آن افزایش مییابد. در ادامه گرادیانهای سرعت سبب ایجاد نیروهای لزجت میشوند که مانع از افزایش شتاب قطره شده و با حرکت قطره مخالفت میکند. همچنین، نیروی الکتریکی سبب کشیده شدن قطره در راستای میدان میگردد. تقابل این نیروها همراه با اثرات کشش سطحی در نهایت به ایجاد یک حالت پایا میانجامد که در آن سرعت قطره ثابت بوده و هیچ تغییر شکلی برای قطره مشاهده نمیشود.



شکل ۹- سیر تکاملی حرکت قطره برای Ca=1/1۴۱ ،Re=+/۲۲۴ و Ca=1/۱۴۱ ،Re=+ و ۳۶/۳۷ : الف: بدون میدان الکتریکی (Ca_e=+3)، ب: میدان الکتریکی افقی الکتریکی افقی (Ca_e=+/1۹۴) (Ca_e=-/1۹۴) (Ca_e=-/1۹۴)

برای درک بهتر مطلب، توزیع نیروی الکتریکی برای میدان الکتریکی در راستای $y \in x$ در زمان ۱ ثانیه به ترتیب در شکل ۱۰-الف و ب رسم شده است. همانطوری که از شکل پیداست، در حالتیکه میدان عمودی میباشد، بردار نیروی بزرگتر میباشد (ضریب مقیاس برای نمایش بردار نیرو در راستای yبابر ۵–۲/۵ میباشد ولی در راستای xضریب مقیاس ۳–۲/۵ میباشد). بادلیل اینکه نیروی الکتریکی تابعی از گرادیان ضریب نفوذپذیری الکتریکی میباشد (عواز تغییری میکند، نفوذپذیری الکتریکی فقط در سطح مشترک دوفاز تغییری میکند، نیروی الکتریکی بر سطح مشترک قطره عمل میکند.





شکل ۱۰- توزیع نیروی میدان الکتریکی برای Ca=۱/۱۴۱ ،Re=۰/۲۲۴ و ب: و ۳۶/۳۷=*۲ الف: میدان الکتریکی عمودی (Ca_c=۰/۱۹۴) و ب: میدان الکتریکی افقی (۲۹۴-۵.Ca_c=۰/۱۹۴).

شکل ۱۱ اثر تغییر سرعت ورودی کانال روی حرکت قطره در زمانهای مختلف در میدان الکتریکی ثابت در راستای عمودی برای Cae=•/۱۹۴ و ۳۶/۳۷ E*=۳۶/۳۷ نشان میدهد. همانطور که ملاحظه می-شود، با افزایش سرعت ورودی کانال، شکل قطره تغییر میکند. برای u_{in}=۱۵mm/s (شكل ۱۱-الف)، سطح جلو و عقب قطره تقريبا صاف می باشد و قطره به شکل تقریبا صفحه در می آید. در جریان با سرعت كم، نيروى الكتريكي كه بر سطح قطره وارد مى شود ترم غالب بوده و باعث می شود که قطره در راستای میدان که در جهت y می باشد، کشیده شود. برای uin=۲۵*mm/s* (شکل ۱۱–ب) قطره دارای شکل کلاه-بیضوی کشیده میباشد. در واقع توازن بین نیروهای وارد بر قطره به گونهای عمل می کند که سطح جلویی قطره دارای انحنا و سطح عقبی آن صاف باشد. برای uin=۳۵mm/s (شکل ۱۱-پ) قطره بصورت کلاه بیضوی می باشد. با افزایش بیشتر سرعت (شکل ۱۱-ت) برای u_{in}=۴۵*mm/s تغ*ییر شکل قطره بسیار ناچیز است. بدلیل اینکه با افزایش سرعت جریان ورودی، نیروی برشی وارد بر سطوح جانبی بیشتر شده و مانع از کشیده شدن قطره در راستای میدان می گردد. قطره در این حالت، تقریبا دارای شکل دایروی است که قسمت تحتانی آن تا حدودی از حالت دایروی خارج می شود.



شکل ۱۱- سیر تکاملی حرکت قطره در سرعتهای ورودی کانال مختلف تحت میدان الکتریکی ثابت در راستای y برای ۲۹۴/۱۹۴ و ۳۶/۳۷=*3 (فواصل زمانی بین دو قطره ۱/۱۶ میباشد).

الکتریکی وابسته می باشد. هر چه اختلاف بین نفوذ پذیری دو سیال بیشتر باشد، نیروی الکتریکی که به سطح مشترک وارد می شود، بیشتر میباشد. با توجه به اینکه در این حالت، راستای میدان الکتریکی در جهت y میباشد، قطره در راستای میدان بیشتر کشیده می شود و چون سطح عمود بر حرکت قطره افزایش می یابد، باعث كندشدن حركت قطره مى گردد. الف 1=1.28 Ļ ç ت

شکل ۱۳- سیر تکاملی حرکت قطره در نسبت گذردهی مختلف تحت میدان الکتریکی ثابت در راستای y برای Ca=1/۱۴۱ ،Re=+/۲۲۴ و Ca_e=•/۱۶۸: الف) Ca_e=•/۱۶۸: (به:=°=۹/۱) دالف: Ca_e=•/۱۶۸) دالغ £*=۳۶/۳۶ (فواصل زمانی بین دو قطره ۱۶/۰ میباشد).

0 0

0

1=1.2

1=12=

OOOO

1-0.61

1=0.61

-0.2 s

())

 (\mathbf{I})

1-0.2 \$

۶- نتیجهگیری

در این پژوهش، حرکت یک قطره آب نمک در نفت تحت میدان الکتریکی در یک کانال افقی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، از نرم افزار کامسول مدل تنظیم سطح استفاده شد. نتایج نشان داد که با استفاده از اعمال میدان الکتریکی میتوان حرکت قطرات آب نمک را بصورت غیرتماسی کنترل نمود. نتایج عددی به دست آمده با نتایج تحلیلی و عددی محققان پیشین مورد صحت سنجی قرار گرفت و تطابق خوبی را نشان داد. اثر پارامترهای مختلف، از جمله شدت ميدان الكتريكي، نسبت گذردهي الكتريكي دوفاز، شدت ميدان الکتریکی و سرعت جریان ورودی کانال مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر استخراج شد:

- -۱ خطوط میدان الکتریکی در نواحی دور از فصل مشترک قطره و داخل آن تغییر نمی کند اما در مرز مشترک بین دوفاز دچار تغییر شکل می شود. همچنین، مشاهده می شود که خمیدگی انحنای قطره در نزدیکی سطح مشترک به سمت قطره مىباشد.
- ۲- با اعمال میدان الکتریکی، بدلیل اینکه نیروی الکتریکی بر فصل مشترک دو فاز وارد می شود، باعث تغییر شکل قطره و کشیده شدن آن در راستای میدان میشود و قطره در راستای میدان کشیده میشود.
- ۳- زمانی که قطره تحت تاثیر میدان الکتریکی در راستای افقی قرار می گیرد، قطره شتاب می گیرد و سریعتر حرکت میکند. در صورتی که وقتی قطره تحت میدان الکتریکی

در شکل ۱۲ سیر تکاملی حرکت قطره در ۳۳۶/Re=۰، Ca=1/۷۱۱ و ۳۶/۳۷ ∈ *=۳۶/۳۷ والمنابع الكتريكي مختلف تحت میدان الکتریکی در راستای y را نشان میدهد. در حالتی که میدان الكتريكي اعمال نمي شود (١٢-الف)، قطره به صورت كروى باقي مي-ماند. با افزایش موئینگی الکتریکی، تغییر شکل قطره در راستای میدان بیشتر میشود. همانطور که قبلا بیان شد، موئینگی الکتریکی نشان دهنده نسبت نيروى الكتريكي به نيروى كشش سطحي مي-باشد، که با افزایش آن، نیروی الکتریکی که بر سطح مشترک قطره عمل میکند، بیشتر میشود و باعث کشیدگی بیشتر قطره در راستای میدان که در جهت y میباشد، می گردد و نسبت سطح عمود بر راستای حرکت قطره افزایش می یابد و باعث کند شدن حرکت قطره می شود. همانطور که در شکل ۱۲-ث مشاهده می شود، تحت میدان الکتریکی زیاد، قطره بعد از آنکه به حالت پایا میرسد شکلی شبیه بومرنگ پيدا مي کند.





توانایی و قابلیت الکتریک پذیری ماده در پاسخ به میدان الکتریکی اعمال شده را نفوذپذیری الکتریکی گویند. از آنجایی که نفوذپذیری الکتریکی نقش بسیار مهمی در شکل تعادلی قطره الکتریکی دارد، به منظور بررسی تاثیر این پارامتر شبیه سازی های مختلفی با مقادیر مختلف نفوذپذیری الکتریکی برای Re=1/1۴۱، Re=1/ Ca_e=۰/۱۶۸ انجام شده و در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این حالت، جهت میدان الکتریکی در راستای y است. همانطور که در شکل مشاهده می شود، با افزایش نفوذ پذیری، قطره از حالت بیضوی خارج می شود و سرعت حرکت قطره نیز کاهش مییابد. با توجه به رابطه نيروى الكتريكي، نيروى الكتريكي به گراديان نفوذپذيري Considering Demulsifier: Modification of Collision Frequency Function Based on Thermodynamic Model. International Journal of Engineering, Vol. 30, No. 10, pp. 1434-1442, 2017.

- [9] Zhang J., Movement of dispersed droplets of W/O emulsion in a uniform DC electrostatic field: Simulation on droplet coalescence. Chinese Journal of Chemical Engineering, Vol. 23, No. 9, pp. 1453-1459, 2015.
- [10] Hosseini M., Coalescence behaviour of water droplets in water-oil interface under pulsatile electric fields. Chinese Journal of Chemical Engineering, Vol. 24, No. 9, pp. 1147-1153, 2016.
- [11] Mhatre S., Dielectrophoretic motion and deformation of a liquid drop in an axisymmetric non-uniform AC electric field. Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 239, pp. 1098-1108, 2017.
- [12] Esmaeeli A., and Abdul Halim Md., Electrohydrodynamics of a liquid drop in AC electric fields. Acta Mech., Vol. 229, pp. 3943–3962, 2018.
- [13] Wang Z., Dong, K., Tian L., Wang J., and Tu J., Numerical study on coalescence behavior of suspended drop pair in viscous liquid under uniform electric field. AIP Advances, Vol. 8, No. 8, pp. 085215, 2018.
- [14] Nazari H., and Pournaderi P., Simulation of Hydrodynamic Behavior of a Conductive Drop Under an Electric Field. Amirkabir journal of mechanical engineering, Vol. 51, No. 2, pp. 297-312, 2019.
- [15] Moosavi A., and Izadi R., Numerical Study of the Dynamics of Non-Newtonian Carreau Droplets under Electrowetting phenomenon. Amirkabir journal of mechanical engineering, Vol. 53, 2021.
- [16] Yin H., Luo X., Xu K., Yan H., and He L., Electrocoalescence Kinetics of Binary Droplets in a Viscous Fluid. Chemical Engineering Science, Vol. 224, No. 12, pp. 5-19, 2020.
- [17] Hosseini M., Arasteh H., HassanzadehAfrouzi, H., and Toghraie, D., Numerical Simulation of a Falling Droplet Surrounding by Air under Electric Field Using VOF Method: A CFD study. Chinese Journal of Chemical Engineering, Vol. 28, No. 12, pp. 2977-2984, 2020.
- [18] Osher S., and Sethian J. A., Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations. Journal of computational physics, Vol. 79, No. 1, pp. 12-49, 1988.
- [19] Baygents J. C., Rivette N. J., and Stone H. A., Electrohydrodynamic deformation and interaction of drop pairs. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 368, pp. 359-375, 1998.
- [20] Taylor G.I., Disintegration of water drops in an electric field. Proc. Roy. Soc. Lond. AMath. Phys. Sci., Vol. 280, pp. 383-391, 1964.
- [21] Tomar G., Gerlach D., Biswas G., Alleborn N. and Sharma, A., Two-phase electrohydrodynamic simulations using a volume-of-fluid approach. Journal of Computational Physics, Vol. 227, pp. 1267–1285, 2007.
- [22] Hua J.-S., Lim L.-K. and Wang C.-H., Numerical simulation of deformation/motion of a droplet suspended in viscous liquids under influence of steady electric field. Phys. Fluid, Vol. 20, pp. 11302–11317, 2008.
- [23] Saville D.A. Electrohydrodynamics: the Taylor-Melcher Leaky Dielectric Model, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 29, No. 1, pp. 27-64, 1997.
- [24] Taylor G., Study in Electrohydrodynamics. I. The Circulation Produced in a Drop by Electric Field, Mathematical, Physical & Engineering Science, Vol. 291 No. 9, pp. 159-167, 1996.

عمودی قرار دارد، سطح قطره عمود بر راستای حرکت قطره افزایش یافته و حرکت قطره کندتر میشود.

- ۴۰ با افزایش سرعت ورودی کانال، شکل قطره تغییر می کند. در جریان با سرعت کم، نیروی الکتریکی که بر سطح قطره وارد می شود ترم غالب بوده و باعث می شود که قطره در راستای میدان که در جهت ۷ می باشد، کشیده شود. در سرعتهای بالا، تغییر شکل قطره بسیار ناچیز می باشد. بدلیل اینکه با افزایش سرعت جریان ورودی، نیروی برشی وارد بر سطوح جانبی بیشتر شده و مانع از کشیده شدن قطره توسط نیروی الکتریکی می گردد. همچنین با افزایش سرعت ورودی، قطره در زمان کوتاه تری مسیر کانال را طی می کند.
- ۵- عدد موئینگی الکتریکی بیان کننده نسبت نیروی الکتریکی به نیروی کشش سطحی است. هر چه عدد موئینگی الکتریکی بیشتر باشد، اندازه نیروی الکتریکی که بر فصل مشترک بین دو فاز اعمال میگردد ، بیشتر شده و سبب میشود که قطره در راستای میدان، بیشتر کشیده شود و در نتیجه نسبت سطح عمود بر راستای حرکت آب نمک افزایش مییابد و باعث کند شدن حرکت قطره می-شود.
- ۶- توانایی و قابلیت الکتریکپذیری ماده در پاسخ به میدان الکتریکی اعمال شده را نفوذپذیری الکتریکی گویند. با افزایشنفوذپذیری الکتریکی برای جهت میدان الکتریکی در راستای به سرعت حرکت قطره نیز کاهش مییابد.

۷- مراجع

- [1] Yang C. G., Xu Z. R., and Wang, J. H., Manipulation of droplets in microfluidic systems. TrAC Trends in Analytical Chemistry, Vol. 29, No. 2, pp. 141-157, 2010.
- [2] Giani G., Fedi, S., and Barbucci, R., Hybrid magnetic hydrogel: A potential system for controlled drug delivery by means of alternating magnetic fields. Polymers, Vol. 4, No. 2, pp. 1157-1169, 2012.
- [3] Guduru R., Liang P., Runowicz C., Nair M., Atluri V., and Khizroev, S., Magneto-electric nanoparticles to enable fieldcontrolled high-specificity drug delivery to eradicate ovarian cancer cells. Scientific reports, Vol. 3, No. 1, pp. 1-8, 2013.
- [4] Baygents J. C., Rivette N. J., and Stone H. A., Electrohydrodynamic deformation and interaction of drop pairs. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 368, pp. 359-375, 1998.
- [5] Eow J. S., and Ghadiri M., Motion, deformation and breakup of aqueous drops in oils under high electric field strengths. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Vol. 42, No. 4, pp. 259-272, 2003.
- [6] Zhang J., and Kwok D. Y., A 2D lattice Boltzmann study on electrohydrodynamic drop deformation with the leaky dielectric theory. Journal of Computational Physics, Vol. 206, No. 1, pp.150-161,2005.
- [7] Paknemat H., Pishevar A.R., Pournaderi P., Numerical Simulation of Drop Deformations and Breakup Modes Caused by Direct Current Electric Fields. Physics of Fluids Vol. 24, 102101, 2012.
- [8] Rahimpour M. R.,and Roshan, N., Population Balance Equation Modeling of Crude Oil Demulsification