



## Behaviour of Dielectric Fluid Droplet under the Influence of Uniform Magnetic Field

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Hadidi A. <sup>\*1</sup> PhD,  
Ansari M.R. <sup>2</sup> PhD

#### How to cite this article

Hadidi A, Ansari M.R. Behaviour of Dielectric Fluid Droplet under the Influence of Uniform Magnetic Field. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(12):2847-2856.

### ABSTRACT

In this research, the behaviour of a single droplet of the dielectric field under the effect of the applied external uniform magnetic field has been investigated. Previously, it was thought that no force is applied to the dielectric fluids when exposed to the uniform magnetic field. A stagnant droplet in a quiescent fluid column was considered in order to determination of the net effect of the applied uniform magnetic field. Considering that the droplet behaviour has been investigated in the horizontal plane, the net effect of the gravity on the droplet and the surrounding fluid is also zero. Therefore, any change in the condition of the considered droplet will be due to the effect of the applied magnetic field. Numerical analysis has been used to perform this research. The governing equations of the problem are the continuity, momentum, level set equations for interface simulation, re-initialization and re-construction equations of the level set equations to control the mass dissipation of this method. The governing equations have been discretized and solved by developing code in the Fortran programming environment. The behaviour of the considered droplet in various regimes has been investigated under the different magnitudes of the applied magnetic field. The results of the research in various cases show that stagnant droplet deforms under the effect of the applied magnetic field and starts to vibrate which also induces the motion in the surrounding quiescent fluid.

**Keywords** Droplet; Dielectric Fluid; Uniform Magnetic Field; Vibration; Numerical Analysis

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

#### \*Correspondence

Address: 2nd km of Tabriz road, Islamic Azad University, Ahar Branch, Ahar, Iran

Phone: -

Fax: +98 (41) 22448211  
amin.hadidi@iau-ahar.ac.ir

#### Article History

Received: February 27, 2019

Accepted: May 26, 2019

ePublished: December 21, 2019

### CITATION LINKS

[1] Magnetic field effects on a bubble behavior in two-phase flow by using a Level Set method [2] Numerical simulation of effects of externally applied uniform magnetic field on interaction of two bubbles in a viscous fluid column [3] Magnetic Effects of magnetic field on behavior of a single bubble in two-phase flow by using a Level Set method [4] Numerical study of bubbly two-phase flow under magnetic field effect by using a Level Set method [5] effects of magnetic field direction and strength on square lid-driven cavity flow [6] Simulation of oblique coalescence of a pair of bubbles using Level Set method [7] Combustion characteristics of jatropa oil droplet at various oil temperatures [8] Dynamics of deformation of magnetic fluid flat drops in a homogeneous longitudinal magnetic field [9] Instabilities of bubbles and droplets flows in magnetic fluids [10] Nonlinear deformation of a ferrofluid droplet in a uniform magnetic field [11] Numerical simulation of falling droplet under uniform magnetic field, using a hybrid lattice-Boltzmann and finite-volume method [12] Numerical simulation of two-phase flows in the presence of a magnetic field [13] Dynamics of a dielectric droplet suspended in a magnetic fluid in electric and magnetic fields [14] Numerical simulation of dielectric bubbles coalescence under the effects of uniform magnetic field [15] Numerical study of the uniform magnetic field effect on the interaction of bubbles in viscous liquid column [16] Level set method for two-phase incompressible flows under magnetic fields [17] Effects of uniform magnetic field on the interaction of side-by-side rising bubbles in a viscous liquid [18] A level-set method for two-phase flows with soluble surfactant [19] Numerical modeling of three-phase flow with phase change using the level-set method [20] Effect of a uniform magnetic field on dielectric two-phase bubbly flows using the level set method [21] A continuum method for modeling surface tension [22] A stabilized finite element method using a discontinuous level set approach for the computation of bubble dynamics

## رفتار قطره سیال دی‌الکتریک تحت تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت

امین حدیدی \* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

محمدرضا انصاری PhD

دانشکده فنی و مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

### چکیده

در این پژوهش به بررسی رفتار یک قطره سیال دی‌الکتریک تحت اثر میدان مغناطیسی خارجی یکنواخت اعمال شده، پرداخته شده است که پیش از این تصور بر آن بود که میدان مغناطیسی یکنواخت بر سیالات دی‌الکتریک نیروی خالصی وارد نمی‌کند. به منظور مشخص شدن اثر خالص میدان مغناطیسی یکنواخت، قطره ساکن در ستون سیالی که خود ساکن است، در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه رفتار قطره در سطح افقی بررسی شده است، اثر خالص جاذبه گرانشی زمین بر قطره و سیال اطراف آن نیز صفر است. در نتیجه بروز هرگونه تغییری در وضعیت قطره مورد مطالعه ناشی از اثر میدان مغناطیسی اعمال شده خواهد بود. برای انجام این پژوهش از تحلیل عددی استفاده شده است. معادلات اصلی حاکم بر مساله شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم، معادلات لول‌ست برای شبیه‌سازی مرز مشترک فازها و نیز معادلات بازسازی و مقادیری مجدد معادلات لول‌ست برای کنترل خطای جرمی این روش هستند. معادلات حاکم بر مساله با کدنویسی در محیط برنامه‌نویسی فرترن گسسته‌سازی و حل شده است. رفتار قطره مورد مطالعه در رژیم‌های مختلف قطره و نیز تحت تأثیر قدرت‌های مختلف میدان مغناطیسی اعمال شده، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج پژوهش در حالت‌های مختلف بررسی شده، نشان می‌دهد که قطره ساکن در اثر میدان مغناطیسی اعمال شده دچار تغییر شکل شده و شروع به ارتعاش می‌کند که سبب القای حرکت در سیال ساکن اطراف خود نیز می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** قطره، سیال دی‌الکتریک، میدان مغناطیسی یکنواخت، ارتعاش، تحلیل عددی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۵

\* نویسنده مسئول: amin.hadidi@iau-ahar.ac.ir

### ۱- مقدمه

بررسی رفتار قطره شامل حرکت، تغییر شکل، الحاق و شکست در بسیاری از پدیده‌های فیزیکی و طبیعی حائز اهمیت می‌باشد. از جمله کاربردهای بسیار گسترده این پدیده‌ها می‌توان به انژکتور در موتورهای احتراقی اشاره کرد که در آن گسستن جت سیال و تشکیل قطره، اندازه قطره‌ها و شکل آن‌ها در کیفیت احتراق و به تبع آن راندمان ترمودینامیکی موتور و نیز میزان آلاینده‌ها تأثیر بسزایی دارد [1, 2]. زمینه بسیار مهم و پرکاربرد دیگری که در آن رفتار قطره بسیار حائز اهمیت می‌باشد، کندانسورها و تاسیساتی است که در آن بخار تقطیر شده و به قطرات مایع تبدیل می‌شود [3, 4]. از جمله کاربردهای دیگر بررسی رفتار قطره می‌توان به افشانه‌های مختلف مورد استفاده در نیروگاه‌های حرارتی، صنایع داروسازی، رنگ‌پاشی و غیره اشاره کرد. یکی از مباحث نوین در این زمینه، بررسی عوامل خارجی مؤثر بر رفتار قطره از جمله میدان‌های نیروی خارجی از جمله میدان‌های مغناطیسی می‌باشد [5, 6]. بنابراین، محققین مختلف به بررسی موضوع در حالات مختلف و کاربردهای متنوعی پرداخته‌اند که چندی از اهم آن‌ها در ادامه مرور شده است.

و/ردنا [7] اثر میدان مغناطیسی خارجی را بر احتراق قطرات سوخت، مورد مطالعه قرار داد. او بیان داشت که تأثیر میدان مغناطیسی بر روی شعله سبب بهبود نرخ تبخیر قطرات می‌شود. او در پژوهش خود احتراق سوخت پایه گیاهی متیل‌استرجاتروفا (*Jatropha Methyl Ester*) را مورد مطالعه قرار داد. نتایج پژوهش نشان داد که میدان

مغناطیسی قویاً فرآیندهای احتراقی قطرات متیل‌استرجاتروفا را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ بطوری‌که هر قدر قدرت میدان مغناطیسی بیشتر باشد، مدت زمان تأخیر در اشتعال قطرات نیز بیشتر شده و در نهایت منجر به افزایش نرخ سوختن می‌گردد. همچنین ایشان دریافت که میدان مغناطیسی اعمال شده، سرعت تکامل شعله را با نرخ زیادی تسریع می‌بخشد. او ادعا کرد که اعمال میدان مغناطیسی سبب می‌شود که مشخصات احتراقی سوخت گیاهی متیل‌استرجاتروفا نزدیک به سوخت دیزل پایه نفتی گردد که بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

باشتووی و همکاران [8]، دینامیک تغییر شکل قطرات سیالات رسانای الکتریکی را در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت در بین دو صفحه افقی، به صورت تجربی مطالعه کردند. آن‌ها مشاهده کردند که اعمال میدان مغناطیسی، سبب کشیدگی قطره‌ها می‌شود؛ بطوری‌که میزان کشیدگی آن‌ها، به قدرت میدان مغناطیسی اعمال شده بستگی دارد. *باشتووی* و همکاران [9] در پژوهش دیگری ناپایداری‌های قطره‌ای سیالات مغناطیسی را تحت اثر میدان‌های مغناطیسی یکنواخت، به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. این محققین نشان دادند که قدرت مشخصی از میدان مغناطیسی اعمال شده وجود دارد که به ازای مقادیر بیش از این مقدار بحرانی، جریان قطره‌ای خروجی از نازل ناپایدار شده و جریان قطره‌ها به چند رشته گسسته می‌شود که در نتیجه آن، قطر قطرات کوچکتر می‌شود. هرچه قدرت میدان مغناطیسی اعمال شده بیشتر باشد، گسستگی جریان قطره‌ای هم بیشتر می‌گردد. *ژو* و همکاران [10] بطور آزمایشگاهی و عددی تغییر شکل یک قطره فزوسیال بر یک سطح آب گریز (*Super Hydrophobic*) را تحت تأثیر میدان مغناطیسی یکنواخت مورد مطالعه قرار دادند. در پژوهش ایشان، یک قطره فزوسیال پایه آبی در روغن معدنی غیرقابل اختلاط بررسی شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش قدرت میدان مغناطیسی سبب افزایش عرض قطره و کاهش طول آن می‌گردد.

قادری و همکاران [11] سقوط قطره فزو در سیال غیرمغناطیسی تحت اثر میدان مغناطیسی یکنواخت در جریان دوفازی را به صورت عددی مطالعه کردند. تمرکز پژوهش ایشان بررسی کارایی روش‌های ریاضی در مدل‌سازی مسئله بوده است و به این منظور از روش ترکیبی شبکه بولتزمن مدل‌شان-چن و روش حجم محدود، استفاده کردند. ایشان بیان داشتند اگر راستای میدان مغناطیسی اعمال شده عمودی باشد، قطره سریع‌تر سقوط می‌کند؛ در حالی که میدان مغناطیسی افقی، سقوط قطره را به تأخیر می‌اندازد. *تاگا* و [12]، اثر میدان مغناطیسی غیریکنواخت را به صعود حباب هوا در آب (که سیالات دی‌الکتریک می‌باشند) و نیز اثر میدان مغناطیسی یکنواخت را بر سقوط قطره فلز مذاب به لایه فلز مذاب (سیالات رسانای الکتریکی)، به صورت عددی مطالعه کرده است. او اثر میدان مغناطیسی یکنواخت بر جریان دوفازی سیالات دی‌الکتریک را مطالعه نکرده است. دلیل این امر، می‌تواند این حقیقت باشد که این محقق نیز نظیر پژوهشگران پیشین، تصورش بر این بوده که نظیر جریان‌های تک‌فاز سیالات دی‌الکتریک، جریان‌های دوفازی دی‌الکتریک نیز در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت متأثر از نیروهای مغناطیسی و لورنتز نمی‌باشند.

رفتار یک میکروقطره سیال دی‌الکتریک که در یک سیال مغناطیسی معلق شده و تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی قرار داده شده، توسط *زکینیان* و همکاران [13] بصورت تجربی مطالعه گردید. این محققین بیان داشتند که طراحی و ساخت سیستم‌های کامپوزیت جدید مبتنی بر سیالات مغناطیسی بسیار مورد توجه قرار

اضلاع کانال ۶ برابر شعاع اولیه قطره در نظر گرفته شده است تا بتوان از اثرات دیواره بر دینامیک قطره صرف نظر نمود. میدان مغناطیسی اعمال شده نیز مطابق شکل در امتداد محور  $x$  بر هندسه اعمال شده است. با توجه به اینکه کانال در سطح افقی در نظر گرفته شده است، نیروی خالص گرانشی زمین بر قطره برابر صفر است.

### ۳- شبیه سازی عددی

معادلات حاکم بر جریان دوفازی مورد مطالعه شامل معادلات بقای جرم، بقای مومنتوم، معادله لولست برای مطالعه حرکت مرز مشترک بین دوفاز و معادلات بازسازی لولست می باشند که برای کنترل و کاهش خطای عددی روش لولست مورد استفاده قرار می گیرند.

#### ۱-۳ معادلات حاکم

معادلات حاکم بر میدان جریان سیال در مسئله مورد مطالعه، شامل معادلات پیوستگی و مومنتوم می باشند که به ترتیب بصورت زیر بیان می شوند [16]:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$\rho(\phi) \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla} P + \vec{\nabla} \cdot (2\mu(\phi)\vec{D}) + \vec{F} + \vec{T} + \rho(\phi)\vec{g} \quad (2)$$

در روابط فوق  $\vec{V}$  بردار سرعت،  $\phi$  تابع لولست،  $P$  فشار،  $\rho(\phi)$  چگالی و  $\mu(\phi)$  لزجت سیال می باشند. همچنین  $\vec{F}$  نیروی کشش سطحی،  $\vec{T}$  نیروی میدان مغناطیسی و  $\vec{g}$  بردار شتاب گرانش را نشان می دهند [17]. عبارت  $\vec{D}$  تانسور نرخ تغییر شکل می باشد که بصورت زیر بیان می گردد:

$$\vec{D} = \frac{1}{2} [(\vec{\nabla}\vec{V}) + (\vec{\nabla}\vec{V})^T] \quad (3)$$

در این پژوهش از روش لولست برای مدل سازی حرکت و دینامیک مرز مشترک قطره با سیال اطراف استفاده شده است. مقدار تابع لولست در هر نقطه، با استفاده از معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی زیر قابل تعیین است [18]:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} \phi = 0 \quad (4)$$

مقادیر مختلف تابع لولست در نقاط مختلف میدان جریان، بصورت خلاصه عبارت است از:

$$\phi(x, y, t) \begin{cases} > 0 & \text{گاز} \\ = 0 & \text{مرز مشترک} \\ < 0 & \text{مایع (قطره)} \end{cases} \quad (5)$$

برای کنترل و جلوگیری از انتشار خطای روش لولست، از معادلات بازسازی لولست استفاده می شود. معادله بازسازی لولست به صورت زیر بیان می شود:

$$\phi_t^* + W \cdot \nabla \phi^* = \text{sign}(\phi^*) \quad (6)$$

در رابطه فوق، تابع  $\text{sign}$  تابع علامت بوده و پارامتر  $W$  نیز بصورت زیر تعریف می شود [19]:

$$W = \text{sign}(\phi^*) \cdot \frac{\nabla \phi^*}{|\nabla \phi^*|} \quad (7)$$

معادله میدان مغناطیسی حاکم بر مسئله بصورت زیر بیان می شود [20]:

$$\frac{1}{\eta(\phi)} \vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{A} + \left( \vec{\nabla} \cdot \frac{1}{\eta(\phi)} \right) \times \vec{\nabla} \times \vec{A} = 0 \quad (8)$$

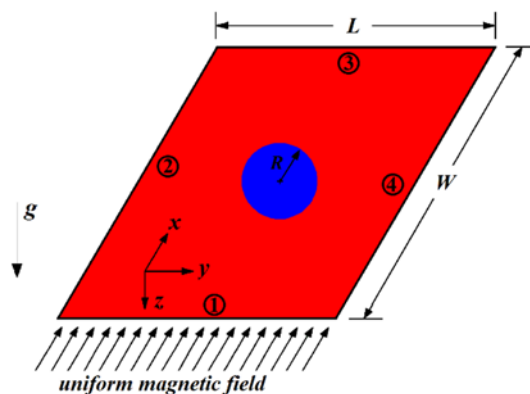
در معادله فوق، قدرت میدان مغناطیسی بصورت زیر برحسب پتانسیل برداری  $A$  تعریف شده است:

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (9)$$

گرفته است. یکی از مواد جدید مبتنی بر سیالات مغناطیسی، امولسیون های مغناطیسی می باشند. فاز پراکنده (گسسته) متشکل از دو فاز مایع می باشد که یکی از آن ها، سیال مغناطیسی است. قطرات چنین امولسیون هایی عمدتاً کروی بوده که تحت میدان مغناطیسی به صورت تجمعات زنجیری ردیف می شوند. از این رو، مطالعه و کنترل تغییر شکل قطرات در چنین مسائلی بسیار حائز اهمیت است. از این رو در پژوهش خود نشان دادند که با افزایش قدرت میدان الکتریکی، شکل قطره به ترتیب به اشکال بیضی پهن (Oblate Ellipsoid)، چنبره ای (Toroid) و چنبره منحنی تغییر پیدا می کند. افزایش بیشتر قدرت میدان الکتریکی، سبب گسیختن میکروقطره می گردد. همچنین ایشان نشان دادند که مسطح شدن قطره توسط میدان الکتریکی کم فرکانس با اعمال میدان مغناطیسی موازی با میدان الکتریکی اعمال شده، قابل جبران است. با توجه به مرور ادبیات فن، مشخص می شود که بررسی رفتار و تغییر شکل قطرات سیالات تحت اثر میدان مغناطیسی در فن آوری های نوین، اهمیت بسزایی دارد. بطور کلی، نیروهای مؤثر بر جریان سیال ناشی از میدان مغناطیسی خارجی اعمال شده را به دو دسته نیروی مغناطیسی و نیروی لورنتز می توان تقسیم بندی نمود [14]. نیروی مغناطیسی توسط میدان مغناطیسی غیر یکنواخت بر همه سیالات اعم از سیالات دی الکتریک و سیالات رسانای الکتریکی وارد می شود. نیروی لورنتز نیز فقط به جریان سیالات رسانای الکتریکی تحت اثر میدان مغناطیسی اعم از یکنواخت و غیر یکنواخت وارد می شود [15]. در نتیجه، در اثر میدان مغناطیسی یکنواخت، نیروی خالصی به سیالات تک فاز دی الکتریک وارد نمی شود. از این رو این زمینه، چندان مورد توجه قرار نگرفته است. بنابراین در پژوهش حاضر به بررسی اثر میدان مغناطیسی یکنواخت خارجی بر یک قطره سیال دی الکتریک، بررسی شده است. برای انجام این مطالعه و نشان دادن اثر خالص میدان مغناطیسی بر قطره دی الکتریک، قطره مورد نظر و نیز سیال اطراف آن هر دو ساکن در نظر گرفته شده است. همچنین هر دوفاز پیوسته و گسسته دی الکتریک در نظر گرفته شده اند. لذا هر تغییر رفتاری در شکل قطره مشاهده گردد، تأثیر میدان مغناطیسی اعمال شده خواهد بود.

### ۲- هندسه مسئله

همان طور که در قسمت قبل بیان شد، رفتار قطره ساکن در سیال مجاور که بصورت گاز بوده و خود نیز ساکن است، در نظر گرفته شده است. شبیه سازی انجام شده بصورت دویعدی می باشد. کانال بصورت مربعی بوده و قطره مورد نظر در لحظه صفر در مرکز کانال قرار گرفته است. هندسه ساده مسئله در شکل ۱ نشان داده شده است.

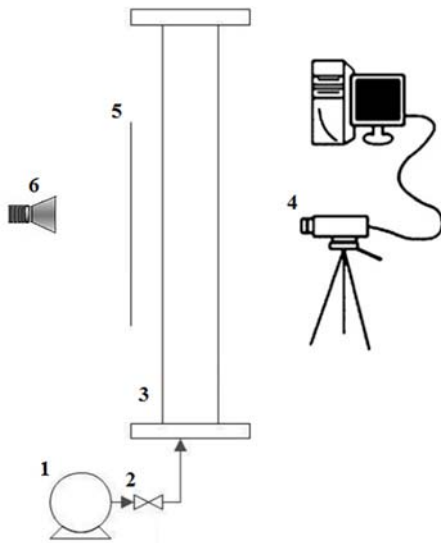


شکل (۱) هندسه مورد مطالعه

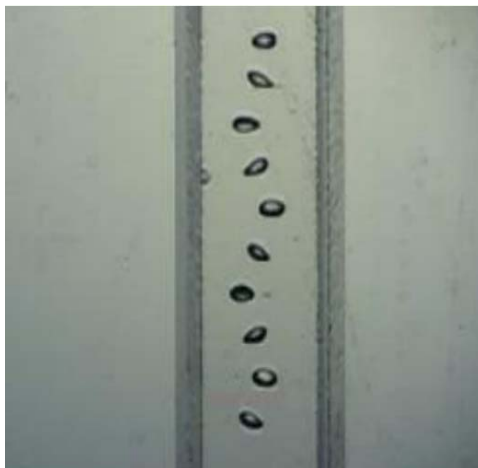
تجربی پرداخته شده و در ادامه به راستی آزمایی تحلیلی پرداخته شده است.

#### ۴-۱- راستی آزمایی تجربی

سازوکار تجربی مورد نظر برای راستی آزمایی و صحنه‌گذاری تجربی نتایج، در شکل ۲ نشان داده شده است. مقطع کانال مورد استفاده مربعی بوده و اندازه هرکدام از اضلاع آن برابر ۳ سانتی‌متر می‌باشد. به منظور انجام این صحنه‌گذاری، حرکت حباب هوا در آب خالص بررسی شده است. حرکت زیگزگی حباب در آب در غیاب میدان مغناطیسی در شرایط ذکر شده در شکل ۳ نشان داده شده است. به منظور بررسی اثر میدان مغناطیسی خارجی، میدان یکنواخت با قدرت ۰/۰۳ تسلا بر کانال اعمال شده و تأثیر آن مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۲) سازوکار تجربی؛ ۱: کمپرسور، ۲: شیر، ۳: کانال، ۴: دوربین، ۵: صفحه مات، ۶: روشنایی



شکل ۳) حرکت حباب هوا در آب خالص در ستون مورد مطالعه

سرعت صعود حباب مورد مطالعه محاسبه شده توسط شبیه‌سازی عددی و نیز سرعت محاسبه شده تجربی در حضور میدان مغناطیسی با قدرت ۰/۰۳ تسلا، در نمودار ۱ مقایسه شده است. محور عمودی نمودار سرعت صعود میانگین حباب در داخل کانال می‌باشد. محور افقی نیز مختصه مربوط به ضلع مقطع کانال است. مطابق نتایج ارائه شده در شکل، ملاحظه می‌شود که سرعت صعودی محاسبه شده توسط شبیه‌سازی عددی تطابق قابل قبولی با سرعت اندازه‌گیری شده

ارتباط بین میدان مغناطیسی اعمال شده و چگالی شار مغناطیسی بصورت زیر بیان می‌گردد<sup>[15]</sup>:

$$\vec{B} = \eta \vec{H} \quad (10)$$

عبارت چشمه مغناطیسی ناشی از میدان مغناطیسی اعمال شده که به معادله مومنوم اضافه می‌شود، به صورت بیان می‌شود:

$$\vec{T} = \left( \frac{1}{\eta_g} - \frac{1}{\eta_{gl}} \right) B_n^2 \delta(\phi) \vec{n} - \frac{1}{2} \left[ (\eta_g - \eta_l) H^2 + \vec{n} \left( \frac{1}{\eta_g^2} - \frac{1}{\eta_l^2} \right) B_n^2 \right] \delta(\phi) \vec{n} \quad (11)$$

در معادله فوق  $\eta_l$  و  $\eta_g$  به ترتیب معرف پرمابلیته مغناطیسی فاز مایع و گاز می‌باشند.

نیروی کشش سطحی نیز بصورت عبارت چشمه در معادله مومنوم اعمال شده است که بصورت زیر محاسبه می‌گردد<sup>[21]</sup>:

$$\vec{F} = \kappa \sigma \vec{n} \delta(\phi) \quad (12)$$

در رابطه فوق،  $\sigma$  ضریب کشش سطحی و  $\kappa$  نیز انحنای سطح مشترک دوفاز می‌باشد

#### ۳-۲- شرایط اولیه و مرزی مسئله

با توجه به ماهیت دوفازی مسئله، هندسه از دو فاز مایع و گاز تشکیل شده است. فاز مایع یا پراکنده، مربوط به قطره بوده و فاز پیوسته نیز گاز اطراف قطره می‌باشد. هر دو فاز مایع و گاز در این پژوهش تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده‌اند. هر دو فاز نیز از نظر رسانندگی الکتریکی، دی‌الکتریک در نظر گرفته شده‌اند. همچنین مقطع اولیه قطره نیز بصورت دایره فرض شده است. خلاصه شرایط مرزی مسئله در جدول ۱ ارائه شده است. شرایط اولیه مسئله نیز به این صورت است که سرعت در هر دو فاز مایع و گاز در لحظه صفر، برابر صفر می‌باشد. مشخصات فیزیکی مسئله نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱) شرایط مرزی مسئله

مرز	نوع شرط
<b>شرایط مرزی هیدرودینامیکی</b>	
مرز شماره ۱	$\vec{V} = 0$ شرط مرزی دیوار،
مرز شماره ۲	
مرز شماره ۳	
مرز شماره ۴	
<b>شرایط مرزی مغناطیسی</b>	
مرز شماره ۱	$\vec{B} = B_0$
مرز شماره ۲	$\vec{n} \cdot \vec{B} = 0$
مرز شماره ۳	$\vec{n} \times \vec{B} = 0$
مرز شماره ۴	$\vec{n} \cdot \vec{B} = 0$

جدول ۲) مشخصات فیزیکی مسئله

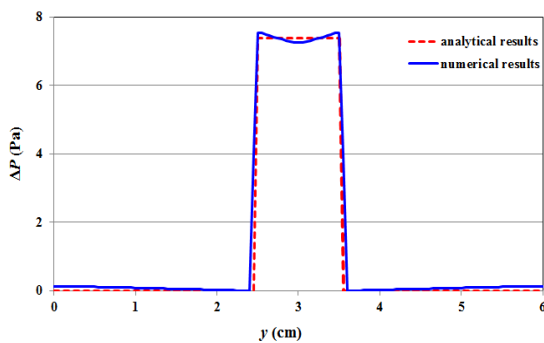
کمیت	مقدار
شعاع اولیه قطره	۱۰mm
پرمابلیته مغناطیسی فاز گاز	$4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$
پرمابلیته مغناطیسی فاز مایع	$4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$
چگالی فاز گاز	$1/2 \text{ kg/m}^3$
چگالی فاز مایع	$1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
ویسکوزیته دینامیکی فاز گاز	$1 \times 10^{-4} \text{ Pa.S}$
ویسکوزیته دینامیکی فاز مایع	$1/8 \times 10^{-2} \text{ Pa.S}$
طول کانال	۶R
عرض کانال	۶R

#### ۴- اعتبارسنجی نتایج

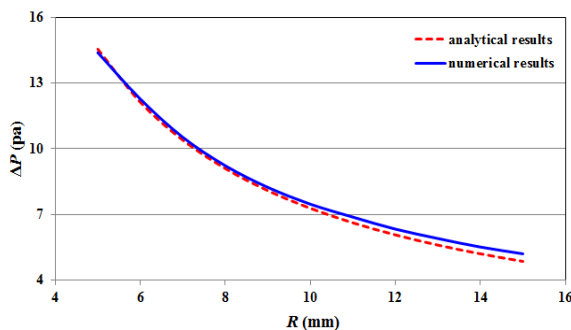
قبل از ارائه نتایج و بحث، نخست به راستی آزمایی نتایج بدست آمده از پژوهش پرداخته شده است. به این منظور نخست به راستی آزمایی

مرز مشترک دوفاز افزایش می‌یابد. کشش سطحی همواره در روش لول‌ست اثر پایدارکننده دارد. هرچه نیروی کشش سطحی غالب‌تر باشد، خطای عددی روش لول‌ست کمتر می‌شود. هر قدر قطر قطره کمتر می‌شود، قطره شکل کروی خود را بیشتر حفظ می‌کند و اعوجاج مرز مشترک کمتر شده و بقای جرم روش لول‌ست نیز بیشتر می‌شود. خطای بقای جرمی روش لول‌ست نیز معمولاً بصورت کسر جرم (از دست رفتن غیرواقعی جرم) ظاهر می‌شود. لذا با افزایش قطر قطره، خطای جرمی روش لول‌ست بیشتر می‌شود. در نتیجه، اندازه قطره بصورت غیرواقعی کوچک‌تر می‌شود. مطابق رابطه (۱۳) ملاحظه می‌شود که اختلاف فشار داخل قطره با سیال اطراف رابطه معکوس با شعاع آن دارد. لذا با کوچک‌تر شدن غیرواقعی شعاع قطره، فشار داخل آن نیز بیشتر از مقدار واقعی محاسبه می‌گردد. از این رو، فشار محاسبه شده در حل عددی بیشتر از فشار واقعی (تحلیلی) قطره می‌باشد. لازم به ذکر است که فشار گزارش شده در نمودار ۳ میانگین فشار در داخل قطره می‌باشد که با میانگین‌گیری از فشار همه نقاط داخل قطره (گره‌های واقع در شبکه محاسباتی داخل قطره) بدست آمده است.

در گام سوم در راستی‌آزمایی نتایج، قطره مایعات مختلف شامل الکل، تربانتین (Turpentine)، آب جوش، گلیسرین، آب در دمای محیط و جیوه با شعاع ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است و فشار داخل این قطرات که بصورت تحلیلی و عددی محاسبه شده با یکدیگر مقایسه شده و نتایج حاصل در جدول ۳ ارائه شده است. با ملاحظه نتایج ارائه شده در جدول، مشخص می‌شود که اختلاف بین نتایج عددی و تحلیلی کم و قابل اغماض می‌باشد. لازم به ذکر است که هر قدر مقدار ضریب کشش سطحی بیشتر می‌شود، درصد اختلاف نتایج عددی و تحلیلی کاهش می‌یابد که در مورد دلیل آن شرح داده شد.

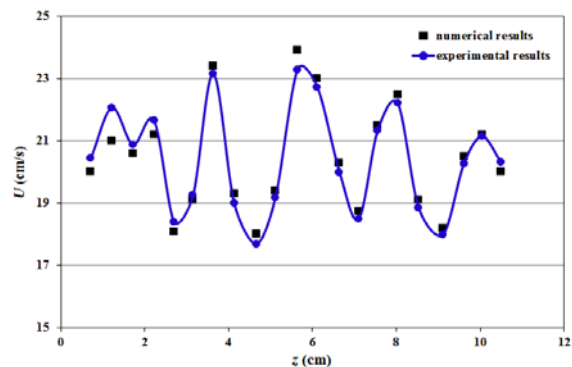


نمودار ۲) مقایسه توزیع فشار داخل قطره و سیال اطراف محاسبه شده در شبیه‌سازی عددی با نتایج تحلیلی



نمودار ۳) مقایسه توزیع فشار داخل قطره و سیال اطراف به‌ازای اندازه‌های مختلف قطره

در نتایج تجربی دارد که با استفاده از پردازش تصاویر ضبط شده، بدست آمده است. بیشترین اختلاف بین نتایج عددی و تجربی در نقاط نزدیک به کف کانال می‌باشد که حباب از حالت سکون در مایع ساکن در اثر نیروی شناوری شروع به صعود می‌کند. به دلیل شکل نگرفتن کامل میدان جریان در این نقاط، اختلاف سرعت عددی با تجربی نیز بیشتر می‌باشد که به تدریج با شکل‌گیری میدان جریان در شبیه‌سازی عددی، اختلاف بین نتایج عددی و تجربی نیز کم می‌شود. در نقاط انتهایی کانال نیز اختلاف سرعت عددی و تجربی کمی زیاد می‌شود که به دلیل اثر سقف کانال در شبیه‌سازی عددی می‌باشد.



نمودار ۴) راستی‌آزمایی نتایج عددی با نتایج تجربی با مقایسه سرعت تسلا میانگین حباب در آب خالص تحت اثر میدان مغناطیسی با قدرت ۰/۰۳ تسلا

#### ۴-۲- راستی‌آزمایی تحلیلی

در گام دوم صحت‌گذاری نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی، فشار محاسبه شده در داخل قطره توسط کد با نتایج تحلیلی مقایسه شده است. فشار در داخل قطره بصورت تحلیلی، از رابطه زیر قابل محاسبه است [22]:

$$\nabla P = \frac{\sigma}{R} \quad (13)$$

مقایسه فشار محاسبه شده از تحلیل عددی حاضر با نتیجه تحلیلی، در نمودار ۲ نشان داده شده و مقایسه شده است. مطابق نمودار مشاهده می‌شود که در نقاط مختلف، اختلاف فشار محاسبه شده با استفاده از شبیه‌سازی عددی انجام شده در این پژوهش با نتایج تحلیلی، اندک و قابل قبول می‌باشد. مقدار فشار محاسبه شده بصورت عددی در مجاورت مرز مشترک دوفاز بیشتر از مقدار تحلیلی آن می‌باشد. این به دلیل تغییرات بیشتر کمیت‌ها از جمله خواص در مرز مشترک دوفاز می‌باشد؛ بطوری‌که خواص در یک مرز باریک دچار جهش می‌شوند. از این رو، خطای موضعی محاسبات در آن ناحیه بیشتر می‌شود. همچنین ملاحظه می‌شود که در مجاورت مرزهای دیواره نیز اختلاف فشار محاسبه شده با استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی اندکی بیشتر می‌شود که دلیل این امر نیز اثرات دیواره در تحلیل عددی می‌باشد.

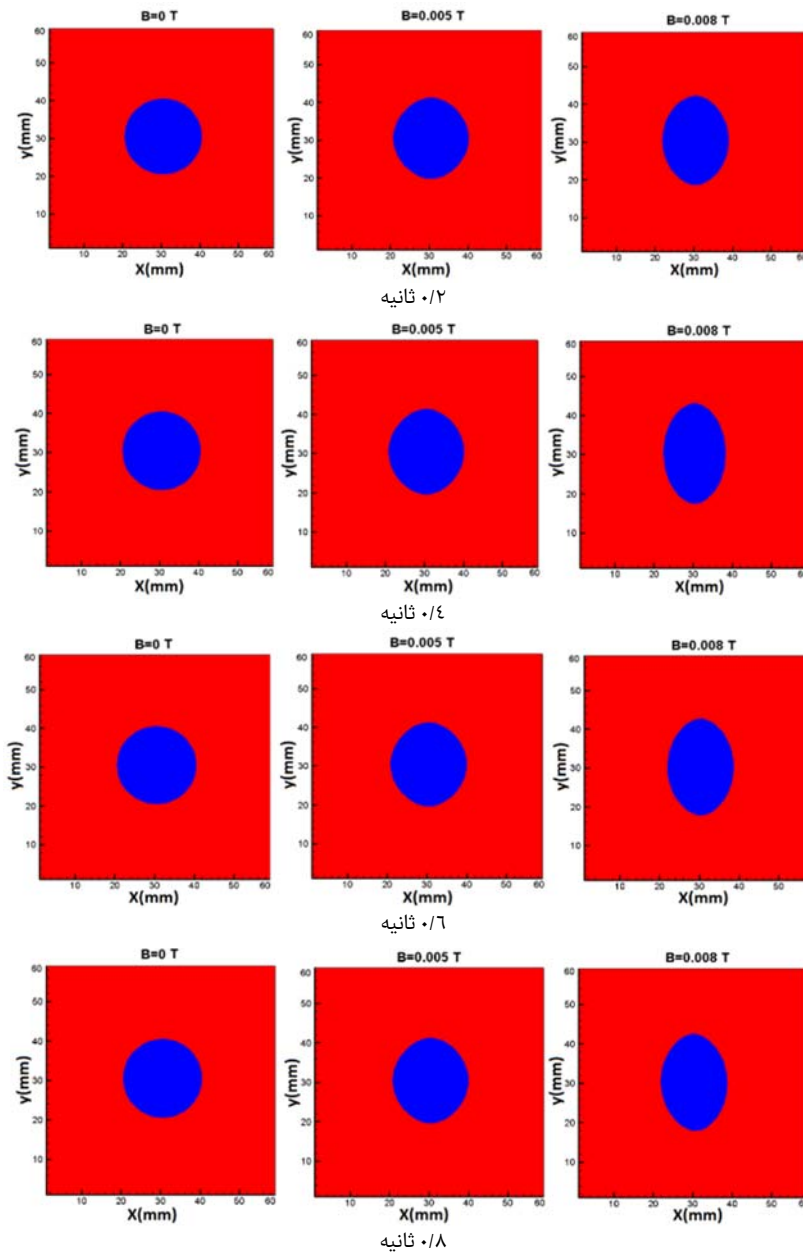
به منظور انجام گام دوم در اعتبارسنجی نتایج، فشار محاسبه شده در شبیه‌سازی عددی با فشار تحلیلی به‌ازای شعاع‌های مختلف قطره مقایسه شده و نتایج در نمودار ۳ ارائه شده است. با ملاحظه نمودار ۳ مشاهده می‌شود که اختلاف کمی بین نتایج وجود دارد؛ در نتیجه، نتایج عددی از دقت قابل قبولی برخوردار است. همچنین با در نظر گرفتن نتایج ارائه شده در نمودار ۳ مشاهده می‌شود که اختلاف بین فشار عددی و تحلیلی با افزایش قطر قطره افزایش می‌یابد. دلیل این پدیده آن است که با افزایش قطر قطره، اثر کشش سطحی در قطره کم می‌شود. در نتیجه خطای عددی روش لول‌ست در مدل‌سازی

نوع ماده	ضریب کشش سطحی (N/m)	فشار تحلیلی (Pa)	فشار عددی (Pa)
الکل	۰/۰۲۲	۴/۴	۴/۴۴
تریانتین	۰/۰۲۷	۵/۴	۵/۴۵
آب جوش	۰/۰۵۹	۱۱/۸	۱۱/۹۱
گلیسرین	۰/۰۶۳	۱۲/۶	۱۲/۷۲
آب در دمای محیط	۰/۰۷۳	۱۴/۶	۱۴/۷۱
جیوه	۰/۵۱۳	۱۰۲/۶	۱۰۲/۵۴

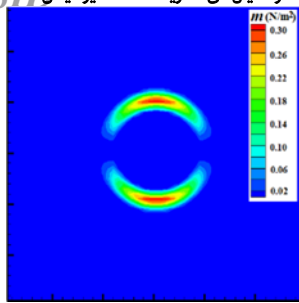
### ۵- نتایج و بحث

پس از انجام اعتبارسنجی، نتایج بدست آمده از پژوهش در این قسمت ارائه شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. به منظور مطالعه اثر میدان مغناطیسی بر رفتار قطره مورد نظر، اثر میدان مغناطیسی با قدرت‌های مختلف بررسی شده و نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است. اثر میدان مغناطیسی با دو قدرت مختلف ۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۸ تسلا بر قطره مورد مطالعه بررسی شده و با رفتار قطره در غیاب میدان مغناطیسی در لحظات مختلف مقایسه شده است.

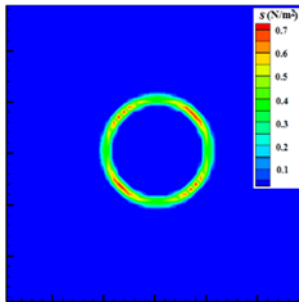
مطابق شکل مشاهده می‌شود که در غیاب میدان مغناطیسی، قطره ساکن مانده و حالت کروی خود را حفظ می‌کند بدون آنکه دچار تغییر شکل شود. دلیل این امر آن است که هر دو فاز مایع و گاز، ساکن در نظر گرفته شده است و در ابتدا هیچ‌گونه حرکتی ندارند. از طرفی با توجه به اینکه حرکت قطره در سطح افقی در نظر گرفته شده است، نیروی گرانشی خالص بر قطره هم وارد نمی‌شود؛ در نتیجه، نیروی شناوری نیز بر قطره اثر نمی‌کند و حالت سکون و نیز شکل کروی اولیه خود را حفظ می‌نماید. اما با اعمال میدان مغناطیسی با قدرت ۰/۰۰۵ تسلا مشاهده می‌شود که قطره در راستای میدان مغناطیسی اعمال شده (محور Y) کشیده می‌شود. با مقایسه نتایج مربوط به میدان مغناطیسی با قدرت‌های ۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۸ نیز مشاهده می‌شود که میزان کشیدگی و تغییر شکل قطره با افزایش قدرت میدان مغناطیسی بیشتر می‌شود؛ بطوری‌که در لحظه ۰/۴ ثانیه به وضوح مشخص است که میزان تغییر شکل قطره تحت اثر میدان با قدرت ۰/۰۰۸ تسلا از حالت میدان با قدرت ۰/۰۰۵ تسلا بیشتر می‌باشد.



شکل ۴) اثر میدان مغناطیسی یکنواخت با قدرت‌های مختلف در لحظات مختلف بر قطره دی‌الکتریک ساکن در غیاب شتاب گرانشی



(الف)



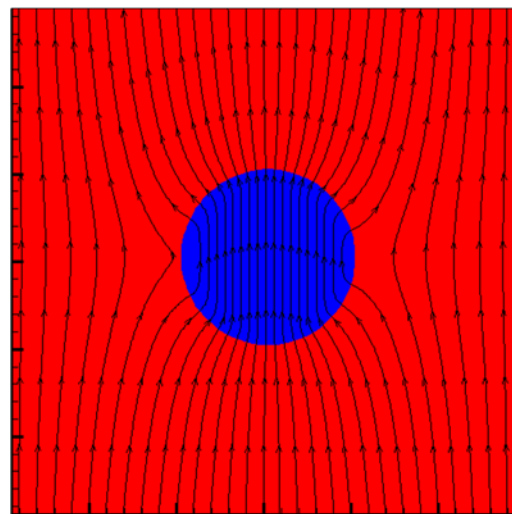
(ب)

**شکل ۶** نیروهای اعمال شده به قطره ساکن تحت اثر میدان مغناطیسی یکنواخت با قدرت ۰/۰۰۸ تسلا؛ الف: کانتورهای نیروی مغناطیسی، ب: کانتورهای نیروی کشش سطحی

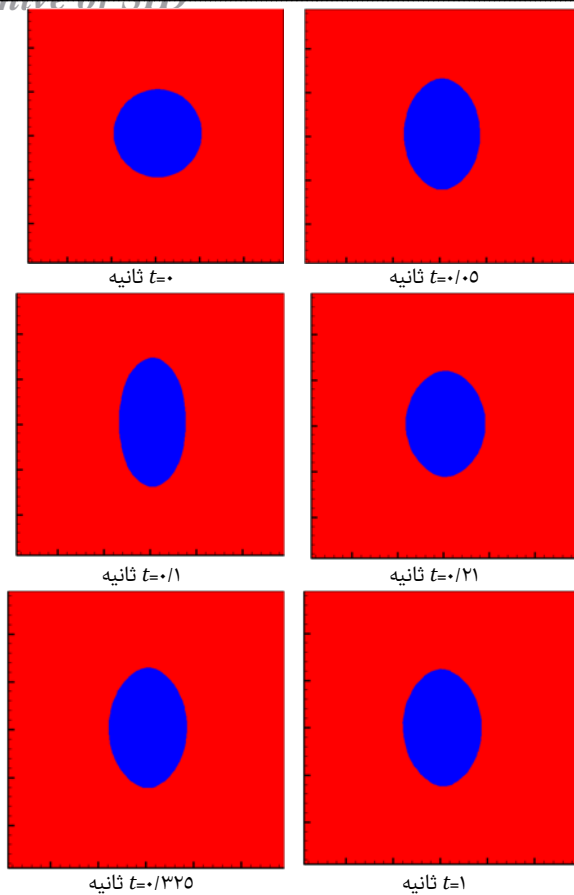
جهت بردار نیروهای مؤثر بر قطره نیز در شکل ۷- الف نشان داده شده است. با توجه به اینکه قدرت میدان مغناطیسی در داخل قطره بیشتر از سیال اطراف می باشد، گرادیان میدان مغناطیسی از داخل قطره به سمت سیال اطراف منفی می باشد و به دلیل آن که جهت نیروی میدان مغناطیسی اعمال شده در جهت گرادیان منفی میدان مغناطیسی می باشد، نیروی اعمال شده از داخل قطره به سمت بیرون می باشد؛ در نتیجه، نیروهای مغناطیسی مؤثر بر قطره که بر سطوح بالایی و پایینی قطره وارد می شود، بصورت کششی خواهد بود. بنابراین، قطره در راستای میدان مغناطیسی کشیده می شود. جهت بردارهای نیروی کشش سطحی نیز از خارج به سمت داخل قطره می باشد که در شکل ۷- ب نشان داده شده است.

به منظور درک بهتر اثر میدان مغناطیسی اعمال شده بر قطره مورد نظر، رفتار قطره در لحظات مختلف تحت اثر میدان مغناطیسی با قدرت ۰/۰۰۸ تسلا بررسی شده و در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق نتایج ارائه شده در شکل ۸ ملاحظه می شود که در لحظه صفر ثانیه، قطره در حالت سکون قرار داشته و شکل آن نیز کروی می باشد. در لحظه ۰/۰۵ ثانیه مشاهده می شود که قطره در راستای میدان مغناطیسی اعمال شده کشیده شده و شکل آن از دایره به حالت بیضی تغییر یافته است. با گذشت زمان، تغییر شکل و نیز کشیدگی قطره افزایش می یابد تا اینکه در لحظه ۰/۱ ثانیه این تغییر شکل و کشیدگی به اوج خود می رسد. با توجه به معادله (۱۳) مشاهده می کنیم که نیروی کشش سطحی تابعی از انحنای مرز مشترک دوفاز می باشد؛ بطوری که هرچه انحنای مرز مشترک بیشتر باشد، مقدار نیروی کشش سطحی نیز افزایش پیدا می کند. بطور کلی نیروی کشش سطحی در جهتی وارد می شود که قطرات شکل کروی خود را حفظ کنند که پایدارترین حالت آن ها می باشد. در نتیجه، از لحظه ۰/۱ ثانیه به بعد نیروهای کشش سطحی بر نیروهای مغناطیسی غلبه کرده و سعی در برگرداندن شکل قطره به شکل کروی دارد. این روند تا زمانی ادامه پیدا می کند که انحنای سطوح بالایی و پایینی قطره کاهش یافته و به تبع آن مقدار نیروی کشش سطحی مؤثر بر آن نیز

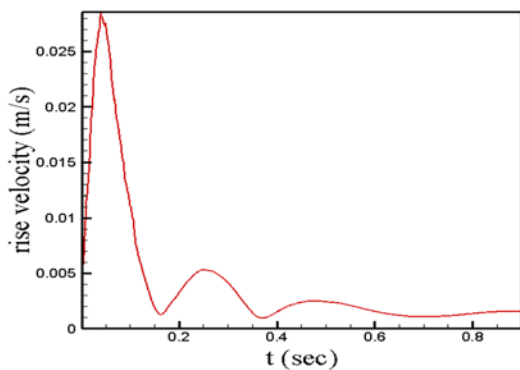
به منظور روشن شدن دلیل کشیدگی قطره در راستای میدان مغناطیسی اعمال شده، خطوط میدان مغناطیسی در میدان جریان در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق شکل ملاحظه می شود که خطوط میدان مغناطیسی گرایش بیشتری برای عبور از داخل قطره به جای عبور از فاز گاز اطراف قطره دارند. علت این پدیده آن است که پرمابلیته مغناطیسی فاز مایع بیشتر از پرمابلیته مغناطیسی فاز گازی است. پرمابلیته مغناطیسی یک ماده نیز قابلیت گذر در میدان مغناطیسی از آن ماده را نشان می دهد؛ به این معنی که هر قدر پرمابلیته مغناطیسی یک ماده بیشتر باشد، مقاومت آن ماده در برابر عبور میدان مغناطیسی نیز کمتر است. در نتیجه مقاومت قطره در برابر عبور میدان مغناطیسی از فاز گاز اطراف کمتر است. لذا، خطوط مغناطیسی تمایل بیشتری به عبور از داخل قطره داشته و به این ترتیب، تراکم خطوط میدان مغناطیسی در داخل قطره بیشتر می شود. از طرفی، تراکم خطوط میدان مغناطیسی، بیانگر قدرت میدان مغناطیسی است. هرچه تراکم خطوط میدان مغناطیسی بیشتر شود، قدرت میدان مغناطیسی نیز در آن ناحیه بیشتر خواهد بود. لذا در مرز مشترک قطره با فاز گازی اطراف به دلیل تغییر در پرمابلیته مغناطیسی در آن نواحی، گرادیان میدان مغناطیسی اعمال می شود. گرادیان میدان مغناطیسی نیز سبب اعمال نیروی مغناطیسی می گردد. با توجه به اینکه گرادیان میدان مغناطیسی محدود به مرز مشترک دوفاز می باشد، نیروی مغناطیسی ایجاد شده نیز محدود به مرز مشترک قطره با فاز گازی اطراف می باشد. کانتور نیروی مغناطیسی اعمال شده به قطره در اثر گرادیان میدان اعمال شده، در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به اینکه تغییرات خطوط میدان مغناطیسی در بالا و پایین قطره بیشتر از لبه های جانبی می باشد، نیروی اعمال شده به قطره در لبه های بالایی و پایینی بیشتر از لبه های جانبی می باشد. در نتیجه همان طور که در شکل ۶- الف نیز دیده می شود، کانتورهای نیروی مغناطیسی محدود به مرز مشترک دوفاز و در لبه های بالایی و پایینی قطره می باشد. کانتورهای نیروی کشش سطحی مؤثر بر قطره نیز در شکل ۶- ب نشان داده شده است. همان طور که در شکل نیز مشاهده می شود، نیروی کشش سطحی بصورت یکنواخت و بر کل مرز مشترک وارد می شود. در نتیجه با توجه به برآیند نیروهای کشش سطحی و نیروی مغناطیسی مؤثر بر قطره، نیروی خالص مؤثر بر قطره در راستای میدان مغناطیسی اعمال شده خواهد بود.



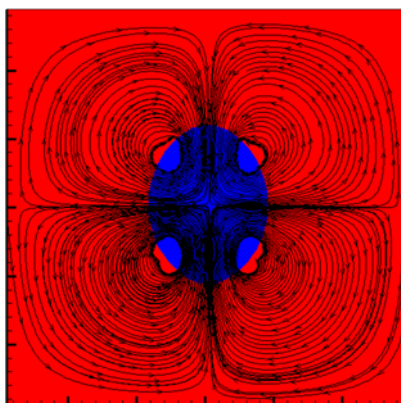
**شکل ۵** خطوط میدان مغناطیسی در میدان جریان تحت اثر میدان مغناطیسی با قدرت ۰/۰۰۸ تسلا



شکل ۸ ارتعاش قطره در زمان‌های مختلف تحت اثر میدان مغناطیسی با قدرت ۰/۰۰۸ تسلا



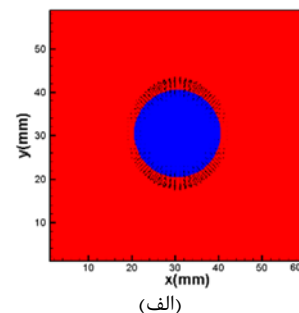
نمودار ۴ میراشدن ارتعاش قطره تحت اثر میدان مغناطیسی در اثر توازن نیروهای کشش سطحی و مغناطیسی



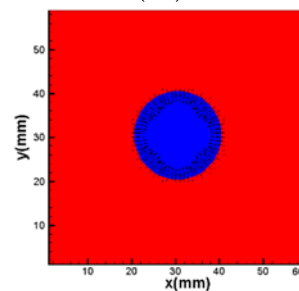
شکل ۹ خطوط جریان القاشده به فاز گازی ساکن در اثر ارتعاش قطره تحت تأثیر میدان مغناطیسی

کمتز شود. به این ترتیب، مجدد مقطع قطره در مقابل میدان مغناطیسی افزایش یافته و نیروی مغناطیسی بر نیروی کشش سطحی غلبه می‌کند و قطره مجدداً شروع به کشیدگی در امتداد میدان مغناطیسی می‌کند که از لحظه ۰/۲۱ ثانیه به بعد، این پدیده مشهود است. با توجه به برهم‌کنش متضاد دو نیروی مغناطیسی و کشش سطحی در سطوح بالایی و پایینی قطره به طریقی که شرح داده شد، قطره شروع به ارتعاش می‌کند تا زمانی که بین نیروهای کشش سطحی و نیروی مغناطیسی توازن برقرار شود. از آن لحظه به بعد شکل قطره ثابت مانده و دچار تغییر نمی‌شود. میراشدن ارتعاشات قطره در این فرآیند، در نمودار ۴ نشان داده شده است. در این نمودار، سرعت میانگین نقاط داخل قطره در لحظات مختلف نشان داده شده است. مطابق نمودار، مشاهده می‌شود که نخست در اثر میدان مغناطیسی اعمال شده سرعت افزایش پیدا می‌کند که در نتیجه اثر معکوس نیروی کشش سطحی، این سرعت کاهش پیدا می‌کند. تغییر جهت سرعت نیز به دلیل همین اثر متضاد دو نیرو می‌باشد؛ بطوری‌که در نهایت موازنه بین این دو نیرو برقرار می‌شود. بطور خلاصه، تفاوت در پرمابلیته مغناطیسی دوفاز که در مرز مشترک دوفاز اثر خود را نشان می‌دهد، سبب ایجاد گرادیان میدان مغناطیسی می‌گردد. لذا در صورتی که پرمابلیته مغناطیسی دوفاز بایکدیگر برابر باشد، محیط نظیر یک سیال تک‌فاز بوده و نیروی خالص مؤثر بر آن از میدان مغناطیسی یکنواخت اعمال شده، برابر صفر بوده و قطره دچار تغییر شکل و حرکتی نمی‌شود.

قطره در حین ارتعاش خود در اثر میدان مغناطیسی اعمال شده به سیال ساکن اطراف خود ضربه وارد می‌کند که در اثر آن فاز گاز ساکن نیز به حرکت در می‌آید. خطوط جریان ایجاد شده در فاز گازی نیز در لحظه دلخواه ۰/۲۱ ثانیه در شکل ۹ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به فاز گازی که در ابتدا در حالت سکون قرار داشت، در اثر ارتعاش قطره جریانی القا شده است که خطوط آن جریان در شکل مشاهده می‌شود. همان‌طور که ملاحظه شد، کشیده شدن و ارتعاش قطره در راستای میدان مغناطیسی اعمال شده به وقوع می‌پیوندد. بنابراین با تغییر راستای میدان مغناطیسی، راستای ارتعاش قطره نیز دچار تغییر می‌گردد.



(الف)



(ب)

شکل ۷ بردار نیروهای مؤثر بر قطره ساکن تحت اثر میدان مغناطیسی با قدرت ۰/۰۰۸ تسلا؛ الف: بردارهای نیروی مغناطیسی، ب: بردارهای نیروی کشش سطحی



$\sigma$	ضریب کشش سطحی (N/m)
$\phi$	تابع لول ست (m)
زیرنویس‌ها	
$g$	گاز
$l$	مایع

## ۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثر میدان مغناطیسی یکنواخت خارجی بر قطره ساکن در یک محفظه پراز گاز بررسی شد. هر دو فاز گاز و مایع تراکم ناپذیر و دی‌الکتریک فرض شدند. برای نشان دادن اثر خالص میدان مغناطیسی یکنواخت اعمال شده، هندسه در سطح افقی در نظر گرفته شد. در نتیجه نیروی خالص گرانشی مؤثر بر قطره صفر بوده و قطره تحت تأثیر نیروی شناوری نمی‌باشد. در نتیجه هر تغییری که در رفتار قطره ظاهر شود، ناشی از اثر میدان مغناطیسی اعمال شده خواهد بود که پیشتر تصور بر این بود که میدان مغناطیسی یکنواخت تأثیری بر سیالات دی‌الکتریک ندارد. عمده نتایج حاصل از این پژوهش به قرار زیر است:

- در اثر میدان مغناطیسی یکنواخت اعمال شده، به مرز مشترک قطره با فاز اطراف، نیرویی وارد می‌شود که این نیرو ناشی از گرادیان میدان مغناطیسی است که به دلیل تغییر در پرمابلیته مغناطیسی دوفاز در مرز مشترک به وجود می‌آید. این نیرو محدود به مرز مشترک دوفاز می‌باشد.
- اثر خالص میدان مغناطیسی اعمال شده و نیروی مغناطیسی ظاهر شده در مرز مشترک دوفاز، سبب کشیدگی قطره در راستای میدان مغناطیسی اعمال شده می‌گردد. چرا که جهت بردارهای نیروی مغناطیسی اعمال شده به قطره از داخل قطره به سمت بیرون می‌باشد.
- هرقدر قدرت میدان مغناطیسی اعمال شده بیشتر باشد، میزان نیروی مغناطیسی ایجاد شده در مرز مشترک دوفاز بیشتر شده و میزان کشیدگی قطره در راستای میدان نیز بیشتر می‌گردد.
- قطره ساکن در گاز در اثر میدان مغناطیسی اعمال شده در اثر تقابل نیروهای مغناطیسی ایجاد شده و کشش سطحی، ارتعاش می‌کند که سرانجام با توازن بین این نیروها، قطره به حالت تعادل رسیده و شکل آن متعادل می‌شود. شکل نهایی قطره بستگی به قدرت میدان مغناطیسی اعمال شده دارد؛ بطوری که هرقدر قدرت میدان مغناطیسی اعمال شده بیشتر باشد، فرم متعادل نهایی قطره دارای کشیدگی بیشتری در راستای میدان مغناطیسی اعمال شده خواهد بود.
- در اثر ارتعاش قطره، به فاز ساکن اطراف قطره نیز جریان سیال القا می‌شود که ناشی از حرکت مرز مشترک دوفاز در اثر ارتعاش قطره می‌باشد.

## ۶- پی نوشت:

### علایم

$B$	میدان مغناطیسی (T)
$F$	نیروی کشش سطحی (N)
$g$	شتاب گرانشی زمین ( $m/s^2$ )
$H$	چگالی شارمغناطیسی (A/m)
$m$	نیروی مغناطیسی (N)
$P$	فشار (Pa)
$R$	شعاع (m)
$s$	نیروی کشش سطحی (N)
$t$	زمان (Sec)
$V$	سرعت (m/s)
علایم یونانی	
$\eta$	پرمابلیته مغناطیسی (T.m/A)
$\kappa$	انحنای مرز مشترک دوفاز (1/m)
$\mu$	لزجت دینامیکی (Pa.s)
$\rho$	چگالی ( $kg/m^3$ )

**تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.  
**تأییدیه اخلاقی:** این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به‌طور 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 عهده نویسندگان است.

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

**سهم نویسندگان:** امین حدیدی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ محمدرضا انصاری (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۵۰٪)  
**منابع مالی:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

## منابع

- Hadidi A, Ansari MR. Magnetic field effects on a bubble behavior in two-phase flow by using a Level Set method. Modares Mechanical Engineering. 2012;12(1):1-10. [Persian]
- Hadidi A. Numerical simulation of effects of externally applied uniform magnetic field on interaction of two bubbles in a viscous fluid column [Dissertation]. Tabriz: Sahand University of Technology; 2015. [Persian]
- Hadidi A. Magnetic Effects of magnetic field on behavior of a single bubble in two-phase flow by using a Level Set method [Dissertation]. Tehran: Tarbiat Modares University; 2011. [Persian]
- Hadidi A, Ansari MR. Numerical study of bubbly two-phase flow under magnetic field effect by using a Level Set method. The 3<sup>rd</sup> International Conference on Thermal Power Plants; 2011 Oct 18-19; Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. IEEE; 2013.
- Hadidi A, Ansari MR. effects of magnetic field direction and strength on square lid-driven cavity flow. Fluid Mechanics and Aerodynamics Journal. 2013;1(2):85-98. [Persian]
- Hadidi A, Eshagh Nimvari M, Ansari MR. Simulation of oblique coalescence of a pair of bubbles using Level Set method. Modares Mechanical Engineering. 2018;18(2):331-341. [Persian]
- Wardana ING. Combustion characteristics of jatropa oil droplet at various oil temperatures. Fuel. 2010;89(3):659-664.
- Bashtovoi V, Pogirnikskaya S, Reks A. Dynamics of deformation of magnetic fluid flat drops in a homogeneous longitudinal magnetic field. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1999;201(1-3):300-302.
- Bashtovoi V, Kovalev M, Reks A. Instabilities of bubbles and droplets flows in magnetic fluids. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2005;289:350-352.
- Zhu GP, Nguyen NT, Ramanujan RV, Huang XY. Nonlinear deformation of a ferrofluid droplet in a uniform magnetic field. Langmuir. 2011;27(24):14834-14841.
- Ghaderi A, Nazari M, Kayhani MH. Numerical simulation of falling droplet under uniform magnetic

interaction of side-by-side rising bubbles in a viscous liquid. Korean Journal of Chemical Engineering. 2016;33(3):795-805.

18- Xu JJ, Shi W, Lai MC. A level-set method for two-phase flows with soluble surfactant. Journal of Computational Physics. 2018;353:336-355.

19- Yap YF, Li HY, Lou J, Pan LS, Shang Z. Numerical modeling of three-phase flow with phase change using the level-set method. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017;115(Part B):730-740.

20- Ansari MR, Hadidi A, Nimvari ME. Effect of a uniform magnetic field on dielectric two-phase bubbly flows using the level set method. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2012;324(23):4094-4101.

21- Brackbill JU, Kothe DB, Zemach C. A continuum method for modeling surface tension. Journal of Computational Physics. 1992;100(2):335-354.

22- Marchandise E, Geuzaine P, Chevaugeon N, Remacle JF. A stabilized finite element method using a discontinuous level set approach for the computation of bubble dynamics. Journal of Computational Physics. 2007;225(1):949-974.

field, using a hybrid lattice-Boltzmann and finite-volume method. Modares Mechanical Engineering. 2016;16(9):65-76. [Persian]

12- Tagawa T. Numerical simulation of two-phase flows in the presence of a magnetic field. Mathematics and Computers in Simulation. 2006;72(2-6):212-219.

13- Zakinyan A, Tkacheva E, Dikansky Y. Dynamics of a dielectric droplet suspended in a magnetic fluid in electric and magnetic fields. Journal of Electrostatics. 2012;70(2):225-232.

14- Hadidi A, Jalili-Vahid D. Numerical simulation of dielectric bubbles coalescence under the effects of uniform magnetic field. Theoretical and Computational Fluid Dynamics. 2016;30(3):165-184.

15- Hadidi A, Jalili-Vahid D. Numerical study of the uniform magnetic field effect on the interaction of bubbles in viscous liquid column. Modares Mechanical Engineering. 2016;15(11):293-302. [Persian]

16- Ki H. Level set method for two-phase incompressible flows under magnetic fields. Computer Physics Communications. 2010;181(6):999-1007.

17- Hadidi A. Effects of uniform magnetic field on the