

## بررسی تجربی تغییر شکل قطره هسته-پوسته در حضور میدان الکتریکی ولتاژ بالا

مرسل بابایان\*

هادی محمدجعفری صادقی

اسماعیل اسماعیل زاده

محرم جعفری

کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

### چکیده

در پژوهش حاضر، تغییر شکل قطره هسته-پوسته تحت تاثیر میدان الکتریکی ولتاژ بالا مورد بررسی قرار گرفته است. برای تولید این نوع قطره از دو نازل هم محور استفاده شده است. سیالات به کار رفته در این پژوهش روغن ترانسفورمر و آب مقطر به ترتیب به عنوان پوسته و هسته می‌باشند. برای تولید میدان الکتریکی نیز از دو صفحه‌ی مسی موازی متصل به دستگاه تولید کننده‌ی اختلاف پتانسیل بالا استفاده شده است. با افزایش اختلاف پتانسیل الکتریکی و در نتیجه افزایش شدت میدان الکتریکی، زاویه‌ی انحراف قطره افزایش پیدا می‌کند. در اختلاف پتانسیل الکتریکی بیش از ۸ کیلو ولت، هسته تحت تاثیر میدان الکتریکی دچار شکست شده و تغییر شکل متفاوتی خواهد داشت. بعد از جدایش قطره درونی از قطره بیرونی، قطره بیرونی تحت نیروهای کشش سطحی و اینرسی شروع به بازگشت به شکل کره‌ی می‌کند. قطره هسته-پوسته به علت سرعت اولیه به سمت الکترود مثبت، تمایل به حرکت در این جهت دارد. اما مقدار باقی مانده در داخل قطعه بیرونی به سمت مخالف حرکت می‌کند. در نهایت، قطعه بیرونی دوباره دچار تغییر شکل شده و کشیده می‌شود. **واژه‌های کلیدی:** قطره هسته-پوسته، میدان الکتریکی ولتاژ بالا، تغییر شکل قطره، الکتروهایدرودینامیک.

## Experimental study on the deformation of core-shell drop in the presence of high voltage electric field

M. Babayan

H. Mohammadjafari Sadeghi

E. Esmaeilzadeh

M. Jafari

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

### Abstract

In this research, the deformation of a core-shell droplet under the influence of high voltage electric field is studied. In order to produce this kind of droplets two coaxial nozzles are utilized. Here, distilled water and transformer oil are fluids used as the core and shell, respectively. Two parallel copper plates connected to a high voltage supplier are considered so as to produce an electric field. By increasing the electrical potential difference, the intensity of electric field and consequently the drop deviation angle increase. At particular electrical potential difference of 8 kV, the core breaks due to the intense electric field, therefore it has a different deformation. After separation of the inner droplet from the outer one, the outer droplet on the grounds of surface tension and inertia forces begins to return to the spherical form. Due to its initial velocity toward positive electrode, the core-shell droplet tends to move in this direction. However, the remaining piece inside the outer droplet tends to move in opposite direction. Eventually, outer droplet deforms and stretches again.

**Keywords:** Core-shell drop, High voltage D.C. electric field, Drop deformation, Electrohydrodynamic.

استفاده کرد.

### ۱- مقدمه

بررسی تاثیر میدان الکتریکی در دینامیک قطره، موضوع مطالعه‌ی طولانی است که از تحقیقات تجربی اولیه آغاز شده است. در بسیاری از سیستم‌های چند فازی، سه مایع غیر قابل امتزاج بارها به عنوان ترکیب چند فازی قطره یا امولسیون‌های چندگانه معرفی شده‌اند. می‌توان این نوع قطره را از طریق اسپری و یا انتشار یک ستون جت شامل دو مایع غیر قابل امتزاج به دست آورد.

در واقع، قطرات چندگانه امولسیون در فرآیندهای مهم، در همه جا حضور دارند. شناخته شده‌ترین کاربرد امولسیون‌های چندگانه، استفاده از آنها به عنوان غشاء مایع برای حمل جرم انتخابی است. از غشاهای مایع برای جداسازی هیدروکربن‌ها، اکسیژن دهی مصنوعی خون، تصفیه آب، بازیابی فلزات سنگین و کنترل آزادسازی دارو می‌توان

### ۱-۱- پیشینه پژوهش

بررسی جت‌های هم محور یکی از موضوعات جدید اما پرکاربرد می‌باشد و محققان بسیاری در این زمینه تحقیق می‌کنند. یکی از جدیدترین تحقیقات در این زمینه توسط می و چن [1]، در سال ۲۰۰۷ روی الکترواسپری دو جت هم محور انجام شده است. آن‌ها تاثیر تنش سطحی روی کپسول‌های تولید شده را بررسی کردند. برای این منظور از دو سیال خارجی و چهار سیال داخلی استفاده کردند و مشاهده کردند که جریان اسپری رابطی خطی با جریان سیال داخلی دارد. چن و همکاران [2]، در سال ۲۰۰۸ پژوهشی در مورد تولید کپسول‌هایی با چند هسته‌ی مجزا با جنس سیال متفاوت و یک پوسته

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: morsal.babaian@gmail.com

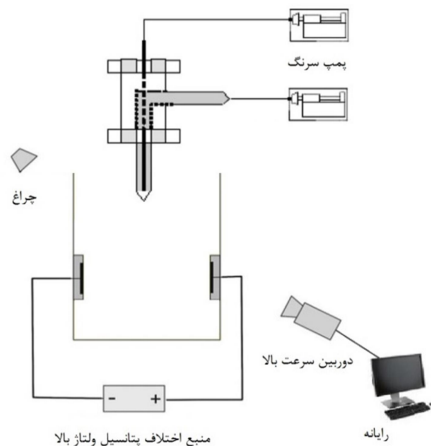
انجام دادند. به این ترتیب آن‌ها روشی تک مرحله‌ای برای تولید امولسیون‌هایی برا چندین هسته ارائه دادند. چنگ و همکاران [3]، در سال ۲۰۱۰ با استفاده از جت‌های هم محور به تولید میکروکپسول‌هایی با پوسته‌ی پروتئینی با ضریب کپسول‌سازی بالا پرداخته است. در این مطالعه آن‌ها مشاهده کردند که مواردی همچون دبی جریان کلی تاثیر فراوانی در اندازه امولسیون‌ها و بازده کپسول‌سازی دارند.

در طول دهه‌های گذشته، تحقیقاتی در زمینه دینامیک سیالات قطرات مرکب چندگانه در معرض میدان جریان خارجی صورت گرفته است. مکانیک سیالات چنین قطرات امولسیونی چندگانه و یا حباب به طور گسترده توسط سادهاال و همکاران [4]، در سال ۱۹۷۷ و جانسون و سادهاال [5]، در سال ۱۹۸۵ مورد بحث قرار گرفته است. راشتون و داویز [6]، در سال ۱۹۸۳ انتقال یک قطره دو امولسیونی کروی متحد المركز را در سیال بینهایت مورد مطالعه قرار داده و برون و رودن [7]، در سال ۱۹۸۵ کار آن‌ها را با در نظر گرفتن تصحیح اینرسی در انتقال قطره گسترش دادند. استون و لیل [8]، در سال ۱۹۹۰ رفتار قطرات دو امولسیونی متحد المركز را در جریان خطی، هم از نظر تحلیلی و هم از نظر عددی برای درجه تغییر شکل دلخواه مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها میدان‌های سرعت داخلی و خارجی، تاثیر لزجت، نحوه شکست قطره و تغییر شکل آن را به صورت تحلیلی و عددی بررسی کرده و در نهایت تاثیر نوع جریان را مورد مطالعه قرار دادند. تحقیقاتی نیز مانند بررسی پایداری یک قطره دو امولسیونی در معرض یک میدان الکتریکی یکنواخت با روش‌های نیمه تحلیلی [9] و محاسبات عددی رفتار یک قطره مرکب تحت میدان الکتریکی یکنواخت [10]، در این زمینه انجام شده است. تورزا و ماسون [11]، در سال ۱۹۷۰ تعاملات قطرات دو مایع غیر قابل امتزاج در مایع غیر قابل امتزاج سوم را در یک میدان الکتریکی در یک میدان جریان برشی بررسی کرده‌اند.

اخیراً سونی و همکاران [12] رفتار یک قطره امولسیونی را در حضور میدان الکتریکی یکنواخت با استفاده از رابطه‌ی انرژی آزاد چان-هیلبارد پیش‌بینی نمودند. آن‌ها تاثیر قطره داخلی روی جریان القا شده توسط میدان و همچنین تغییر شکل قطره خارجی را بررسی و سه نوع مختلف از تغییر شکل قطره خارجی و داخلی را مشاهده نمودند. با استفاده از حل معادلات الکترویدروپدینامیک حاکم برای سیال‌های نیوتونی غیرقابل امتزاج، بهجتیان و اسماعیلی [13] رفتار یک قطره هسته-پوسته‌ی هم مرکز را مورد مطالعه قرار داده و چهار حالت متفاوت برای تغییر شکل این قطره مشاهده نمودند. در مطالعه‌ی دیگری، بهجتیان و اسماعیلی [14] رفتار قطره امولسیونی متحدالمركز را برای حالت گذار الکترویدروپدینامیک بررسی کردند. به تازگی عباسی و همکاران [15] رفتار الکترویدروپدینامیک و ناپایداری‌های سطح مشترک قطرات امولسیون هم مرکز را در حضور میدان الکتریکی قوی به صورت عددی مورد مطالعه قرار داده‌اند. آن‌ها جنس سیال داخلی را با سیال پیرامون یکسان در نظر گرفته و برای نسبت‌های حجمی مختلف قطره داخلی به خارجی، تغییر شکل قطره را بررسی کرده‌اند.

با توجه به آنچه که گفته شد، تغییر شکل قطره هسته-پوسته تحت میدان الکتریکی به صورت‌های مختلف بررسی شده است. اما به دلیل عدم بررسی تغییر شکل این نوع قطرات به هنگام سقوط به درون میدان الکتریکی، تحقیق پیش رو به صورت تجربی انجام گردیده است. وجود محدودیت‌های حل برای این قبیل کارها تمایل به سمت کار

تجربی را باعث می‌شود.



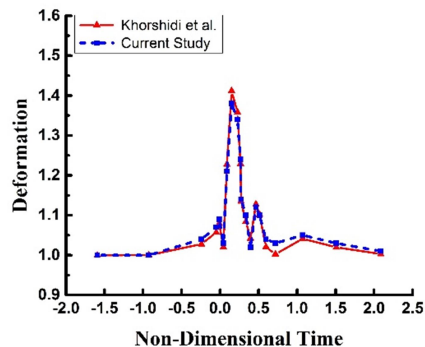
شکل ۱- سکوی آزمایش

## ۲- مبانی و روش‌ها

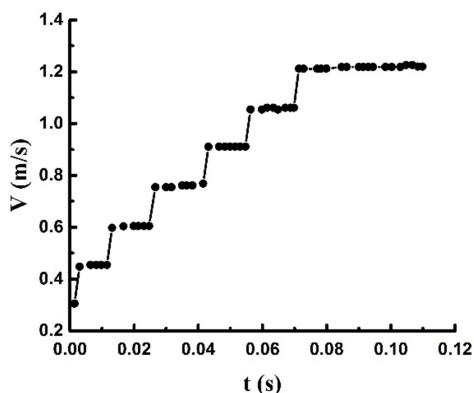
### ۲-۱- سکوی آزمایش

هدف این پژوهش مطالعه‌ی تاثیر میدان الکتریکی بر رفتار قطره هسته-پوسته می‌باشد. در این آزمایش، برای تولید قطرات با ساختار هسته-پوسته یکنواخت از دو نازل هم محور استفاده شده است. قطر داخلی و خارجی نازل داخلی به ترتیب  $0.8/0.52$  و  $0.8/0.52$  میلی‌متر و قطر داخلی نازل خارجی  $1/4$  میلی‌متر می‌باشد. برای داشتن قطرات با اندازه‌های یکنواخت و قابل کنترل نیاز به دبی ثابت و یکنواخت است که برای تامین این دبی، برای هر دو نازل داخلی و خارجی از یک پمپ سرنگ جداگانه استفاده شده است. برای ایجاد میدان الکتریکی مورد نیاز برای تغییر شکل قطره، از یک دستگاه تولید ولتاژ بالا جریان مستقیم با دقت ۴۰ ولت استفاده شده است که به دو صفحه مسی متصل است. اندازه‌ی این صفحات  $6 \times 6$  سانتی‌متر بوده و دقیقاً یکسان بوده و درست در مقابل یکدیگر قرار داده شده‌اند تا میدان الکتریکی یکنواختی ایجاد شود. فاصله‌ی این دو صفحه مسی به گونه‌ای طراحی شده است که قابل تغییر است. به این ترتیب می‌توان با تغییر اختلاف پتانسیل الکتریکی با استفاده از دستگاه تولید ولتاژ بالا و یا با تغییر فاصله‌ی صفحات، شدت میدان الکتریکی بین این دو صفحه را تغییر داد. این صفحات در فاصله‌ی عمودی ۴ سانتی‌متری از نازل‌ها قرار دارند. شکل ۱ سکوی آزمایش ساخته شده برای این آزمایش را نشان می‌دهد.

برای اندازه‌گیری تمامی متغیرها از روش فیلم‌برداری با استفاده از دوربینی با مدل EXF 1 شرکت کاسیو استفاده شده است. این دوربین دارای مشخصاتی از جمله، لنز بسیار قوی و همچنین سرعت فیلم برداری بالا -۱۲۰۰ فریم بر ثانیه- می‌باشد. بعد از هر مرحله فیلم برداری توسط دوربین با سرعت بالا، داده‌ها به رایانه منتقل شده و به کمک نرم‌افزارهای مربوط به پردازش تصویر، پردازش شده‌اند. چون محیط پیرامون این قطرات هوا است، لذا سرعت سقوط قطرات زیاد می‌باشد. با توجه به سرعت بالای این قطرات، برای مشاهده‌ی بهتر



شکل ۲- نمودار تغییر شکل قطره آب مقطر با قطر ۳ میلی متر نسبت به پارامتر زمان بی بعد



شکل ۳- نمودار سرعت سقوط قطره نسبت به زمان برای قطره با قطر ۴/۵ میلی متر

### ۳-۳- زاویه‌ی انحراف قطره

برای نشان دادن تاثیر میدان الکتریکی بر حرکت قطره‌ی در حال سقوط، پارامتری به نام زاویه‌ی انحراف<sup>۱</sup> معرفی شده است. این پارامتر را می‌توان در دو حالت زاویه‌ی انحراف محلی و کلی تعریف کرد که زاویه‌ی انحراف محلی،  $\psi$ ، زاویه‌ی بین خط عمودی (زمانی که قطره در حالت اختلاف پتانسیل صفر سقوط می‌کند) و خطی است که مکان مرکز جرم قطره را در دو لحظه متفاوت به هم متصل می‌کند. زاویه‌ی انحراف کلی،  $\theta$ ، زاویه‌ی بین خط عمودی و خطی می‌باشد که با میان-یابی خطی بین مرکز جرم قطره در حال سقوط در حضور میدان الکتریکی به دست آمده است.

شکل ۴، مسیر حرکت یک قطره به قطر ۴/۵ میلی متر تحت تاثیر میدان الکتریکی با اختلاف پتانسیل ۵ کیلو ولت را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، زاویه‌ی انحراف محلی به دلیل نزدیک شدن قطره به الکترود و افزایش نیروی الکتریکی وارده به قطره، افزایش می‌یابد.

شکل ۵، تغییرات زاویه‌ی انحراف کلی را برای قطره با قطر ۴/۵ میلی متر را برای اختلاف پتانسیل‌های متفاوت نشان می‌دهد. نتایج به

پدیده‌های حاکم بر این قطرات از سرعت ۶۰۰ فریم بر ثانیه برای فیلم برداری استفاده شده است.

در این آزمایش از آب مقطر و روغن ترانسفورمر به عنوان سیال-های تشکیل دهنده‌ی قطره هسته-پوسته استفاده شده است که خواص فیزیکی آنها در جدول ۱ آمده است. در این حالت آب مقطر به عنوان سیال داخلی و روغن ترانسفورمر به عنوان سیال خارجی استفاده شده است. برای مشاهده‌ی بهتر رفتار قطره، اندکی مایع مانومتر به آب مقطر اضافه شده است تا به این ترتیب بدون تغییر خواص آب مقطر، رنگ آن با رنگ روغن ترانسفورمر متفاوت باشد.

جدول ۱- خواص فیزیکی سیالات استفاده شده

خواص سیال	آب مقطر	روغن ترانسفورمر
چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	۹۹۸	۸۴۱/۹
لزجت ( $\text{kg/m.s}$ )	۰/۰۰۰۸۰۲	۰/۰۲۰۲
تنش سطحی ( $\text{N/m}$ )	۰/۰۷۲۸	۰/۰۴۴

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- اعتبار دهی نتایج

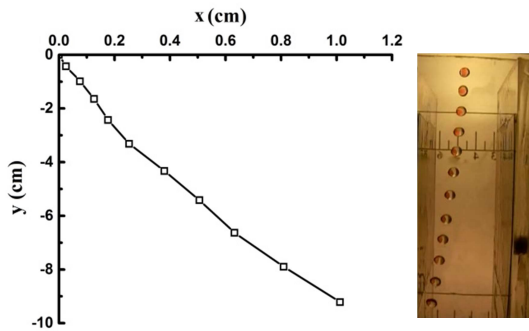
به منظور اطمینان از درستی و دقت نتایج به دست آمده، با استفاده از تحقیق انجام گرفته توسط خورشیدی و همکاران [16]، اعتبار آزمایش‌های انجام گرفته بررسی شده است. با توجه به شکل ۲ که تغییر شکل قطره آب مقطر به قطر ۳ میلی متر را در حضور میدان الکتریکی نشان می‌دهد، میان نتایج به دست آمده توسط مطالعه حاضر و تحقیق انجام گرفته توسط خورشیدی و همکاران [16]، انطباق خوبی قابل مشاهده است.

#### ۳-۲- سرعت سقوط قطره

اولین نکته‌ای که در این آزمایش مطرح شده است، سرعت سقوط قطره می‌باشد. قطره ایجاد شده از دو نازل هم محور، بعد از جدا شدن از نازل‌ها در اثر نیروی گرانشی زمین، به سمت پایین حرکت می‌کند. با توجه به شتاب گرانشی، سرعت قطره رفته رفته افزایش می‌یابد. اما این افزایش سرعت تا مقدار ثابتی ادامه خواهد داشت. در حین سقوط قطره، علاوه بر نیروی گرانشی، نیروی درگ نیز به قطره وارد می‌شود. نیروی پسا بر خلاف نیروی گرانشی عمل کرده و در نتیجه سرعت سقوط قطره در یک مقدار ثابت باقی می‌ماند، که به این سرعت سرعت حدی گفته می‌شود.

شکل ۳، سرعت سقوط یک قطره هسته-پوسته به قطر ۴/۵ میلی-متر را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است، تقریباً بعد از ۰/۷ ثانیه سرعت قطره به مقدار سرعت حدی ۱/۲۱ متر بر ثانیه می-رسد. سرعت حدی قطرات به قطر آن‌ها نیز وابسته است، به طوری که با افزایش قطر قطره و در نتیجه افزایش وزن آن، سرعت حدی نیز افزایش می‌یابد.

1 Deviation Angle

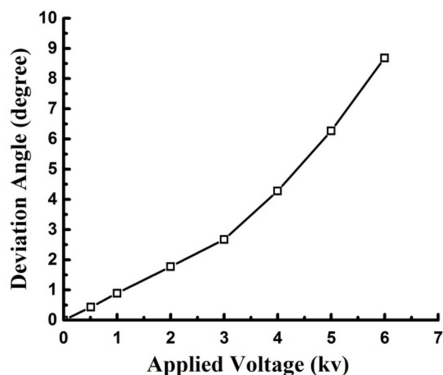


شکل ۴- نمودار مسیر حرکت قطره با قطر ۴/۵ میلی‌متر در حضور اختلاف پتانسیل ۵ Kv

### ۳-۳-۱- تغییر شکل قطره هسته-پوسته قبل از شکست قطره‌ی داخلی

برای بررسی تغییر شکل قطره، پارامتری به نام تغییر شکل به صورت زیر تعریف می‌شود [19]-[17]:

$$\text{Deformation} = d_{\text{Max}} / d_{\text{Min}} \quad (1)$$



شکل ۵- نمودار زاویه‌ی انحراف کلی برای قطره با قطر ۴/۵ میلی‌متر

که  $d_{\text{Max}}$  و  $d_{\text{Min}}$  به ترتیب بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین قطر قطره در یک زمان می‌باشد (شکل ۷ ب). شکل ۶ تغییر شکل ایجاد شده برای یک قطره به قطر ۴/۵ میلی‌متر در حضور میدان الکتریکی ناشی از اختلاف پتانسیل ۶ KV را نمایش می‌دهد. شکل ۶ الف، تغییر شکل قطره‌ی خارجی و شکل ۶ ب، تغییر شکل قطره‌ی داخلی را نشان می‌دهند.

با توجه به شکل ۶ الف، همانطور که انتظار می‌رفت، با توجه به این که قطره‌ی خارجی از یک ماده‌ی نارسانا تشکیل شده است، لذا میدان الکتریکی تاثیر زیادی در تغییر شکل آن ندارد. تغییر شکل ایجاد شده در قطره‌ی خارجی، ناشی از حرکت و تغییر شکل قطره‌ی داخلی می‌باشد.

تغییر شکل ایجاد شده در شکل ۶ را می‌توان برای بررسی به سه قسمت تقسیم کرد. قسمت اول تغییر شکل از لحظه‌ی جدایش قطره از

دست آمده رابطه‌ی تقریباً مرتبه دوم بین زاویه‌ی انحراف و اختلاف پتانسیل اعمالی را نشان می‌دهد. بنابراین با افزایش اختلاف پتانسیل، مرتبه‌ی تاثیر میدان الکتریکی افزایش خواهد یافت. زاویه‌ی انحراف به قطر قطرات نیز وابسته است، به طوری که هر چه قطره کوچک‌تر باشد زاویه‌ی انحراف بیشتر خواهد بود که یک نتیجه‌ی بدیهی است. با افزایش شدت میدان الکتریکی زاویه‌ی انحراف خیلی بزرگ‌تر شده و قطره به سرعت به سمت الکتروود ولتاژ بالا حرکت می‌کند. در این حالت با افزایش شدت میدان الکتریکی، قطره با الکتروود برخورد خواهد کرد.

### ۳-۴- تغییر شکل قطره هسته-پوسته

وقتی یک قطره رسانا در یک محیط نارسانا وارد یک میدان الکتریکی یکنواخت می‌شود، در اثر میدان الکتریکی، در سمت الکتروود مثبت میدان، بار الکتریکی منفی و در سمت الکتروود دیگر بار الکتریکی مثبت بر روی قطره ایجاد خواهد شد. اندازه‌ی این بارها به گونه‌ای است که در مجموع، قطره خنثی و بدون بار است.

به صورت نظری میدان الکتریکی بعد از ورود قطره همچنان یکنواخت باقی می‌ماند که در این حالت به علت برابر بودن نیروهای الکتریکی در سمت راست و چپ قطره، قطره بدون حرکت افقی به سمت پائین حرکت می‌کند. اما در حالت واقعی، میدان یکنواخت نخواهد بود. در این حالت به خاطر غیریکنواختی میدان الکتریکی، نیروی جاذب به سمت الکتروود مثبت بیشتر از نیروی جاذب به طرف گرانند می‌باشد. بنابراین قطره هنگام سقوط به سمت الکتروود مثبت حرکت خواهد کرد [16].

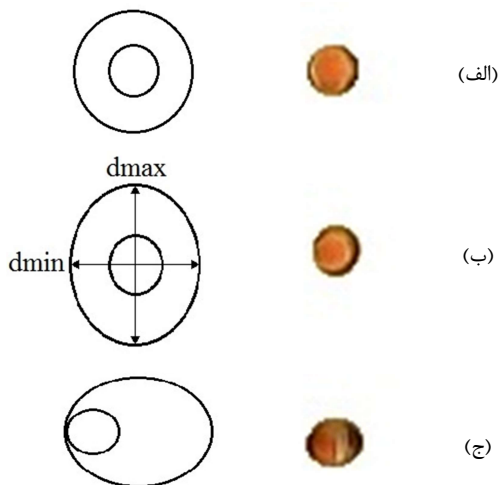
میدان الکتریکی در حالت پایا یکنواخت می‌باشد ولی با سقوط قطره خطوط میدان باید از درون قطره هسته-پوسته عبور کنند. این تغییر در گرادیان شدت میدان باعث ایجاد نیروی دی الکتروفوریتیک می‌شود. جهت این نیرو در جهت خلاف افزایش ضریب گذردهی الکتریکی است. نیروی الکتروفوریتیک به دلیل قطبیت مولکول‌های آب به قطره اعمال می‌شود. به دلیل این واقعیت که آب رفتار دی الکتروفوریتیک مثبت نشان می‌دهد، جریان نیروی الکترو فوریتی بر خلاف جهت میدان الکتریکی و به سمت الکتروود مثبت است [17]. [18]. همچنین عدم یکنواختی میدان در حین حرکت قطره به صورت عددی در مرجع [17] نشان داده شده است.

در این آزمایش می‌توان تغییر شکل ایجاد شده را برای دو حالت بررسی کرد. با افزایش اختلاف پتانسیل و در نتیجه افزایش شدت میدان الکتریکی قطره هسته-پوسته به سمت الکتروود مثبت حرکت می‌کند. در اختلاف پتانسیل‌های بالا، قطره‌ی آب مقطر تحت اثر نیروی کششی ایجاد شده توسط میدان، به دو قسمت تبدیل می‌شود. در این قسمت، تغییر شکل قطره هسته-پوسته، پیش از شکست و همچنین بعد از شکست قطره آب مقطر بررسی شده است.

شکل قطره‌ی داخلی، با توجه به این که قطره‌ی داخلی به سطح مشترک قطره‌ی خارجی چسبیده است، قطره‌ی خارجی نیز تغییر شکل می‌دهد (شکل ۷ ج).

### ۳-۲- تغییر شکل قطره هسته-پوسته بعد از شکست قطره‌ی داخلی

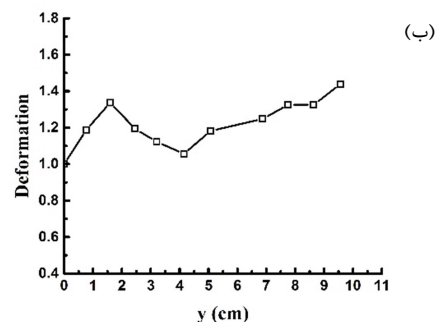
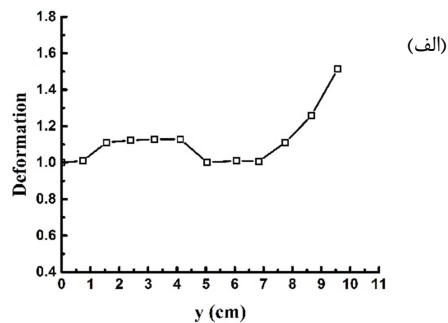
با افزایش اختلاف پتانسیل بین دو الکتروود، نیروی الکتریکی وارده به قطره‌ی داخلی افزایش می‌یابد. با افزایش نیروی الکتریکی وارده، تغییر شکل قطره افزایش می‌یابد و قطره‌ی داخلی کشیده‌تر می‌شود. این تغییر شکل قطره تا جایی ادامه می‌یابد که بعد از آن، تحت اثر نیروی الکتریکی اعمالی، قطره‌ی داخلی به دو قسمت تقسیم می‌شود که هر کدام از این قسمت‌ها دارای بار الکتریکی مخالف یکدیگر هستند. با وجود نیروی جاذبه‌ی حاکم بین این دو قسمت از قطره‌ی داخلی، چون نیروی وارده از طرف الکتروودها به این تکه‌های قطره‌ی داخلی بیشتر است، این قطرات از هم دور می‌شوند و به سمت الکتروودها حرکت می‌کنند. با توجه به غیر یکنواخت بودن میدان الکتریکی، تکه‌ای از قطره‌ی داخلی که دارای بار منفی است با نیروی بیشتری به سمت الکتروود مثبت کشیده می‌شود. با توجه به نیروی وارده از طرف این تکه‌ی با بار منفی به سطح مشترک قطره‌ی خارجی با هوا، کل قطره هسته-پوسته به سمت الکتروود مثبت حرکت می‌کند که این خود باعث افزایش نیروی الکتریکی وارده به تکه‌ی با بار منفی خواهد شد.



شکل ۷- تصاویر واقعی و طرحواره قطره هسته-پوسته در حضور میدان الکتریکی با اختلاف پتانسیل ۶ Kv

در این قسمت با توجه به شکسته شدن قطره‌ی داخلی، فقط تغییر شکل ایجاد شده در قطره‌ی خارجی تحت اثر میدان بررسی شده است. شکل ۸ تغییر شکل ایجاد شده در قطره‌ی خارجی برای یک قطره‌ی هسته-پوسته با قطر ۴/۵ میلی‌متر در حضور میدان الکتریکی ناشی از اختلاف پتانسیل ۸ kV را نشان می‌دهد.

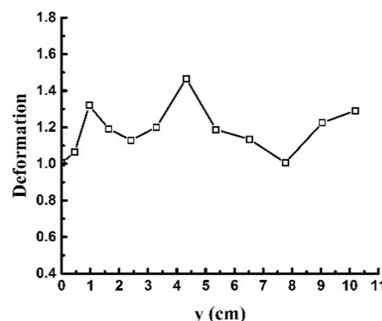
نازل تا ورود آن به میدان الکتریکی می‌باشد. در این قسمت، قطره هسته-پوسته ابتدا به صورت کروی کامل است (شکل ۷ الف)، سپس با سقوط و افزایش سرعت، به دلیل نیروی گرانش، قطره‌ی خارجی دچار تغییر شکل دوکی مانند می‌شود در حالی که قطره‌ی داخلی همچنان کروی باقی می‌ماند (شکل ۷ ب).



شکل ۶- نمودار تغییر شکل قطره در میدان الکتریکی با اختلاف پتانسیل ۶ Kv برای قطره الف) خارجی ب) داخلی

قسمت دوم تغییر شکل، مربوط به زمانی می‌شود که قطره وارد میدان الکتریکی می‌شود. در این قسمت، قطره داخلی با توجه به مطالب ذکر شده، به شکل کشیده شده تغییر شکل می‌دهد و شروع به حرکت به سمت الکتروود مثبت می‌کند. با توجه به حرکت و تغییر شکل ایجاد شده در قطره داخلی، قطره خارجی که دوکی شکل شده بود، شروع به بازگشت به حالت کروی می‌کند که در شکل ۶ الف نیز دیده می‌شود.

قسمت سوم تغییر شکل مربوط به زمانی می‌شود که قطره‌ی داخلی که به سمت الکتروود مثبت حرکت کرده است، به سطح مشترک قطره خارجی با هوا می‌رسد. در این حالت با توجه به تنش سطحی موجود در سطح مشترک قطره‌ی خارجی با هوا و کم بودن نیروی ناشی از میدان، قطره‌ی داخلی، هم چنان در داخل قطره‌ی خارجی باقی می‌ماند. با برخورد قطره‌ی داخلی به سطح مشترک قطره‌ی خارجی، از کشیدگی قطره‌ی داخلی کاسته شده و در نتیجه تغییر شکل آن کاهش می‌یابد تا جایی که قطره‌ی داخلی به شکل کروی تبدیل می‌شود. این در حالی است که قطره‌ی خارجی تحت اثر نیروی وارد شده از طرف قطره‌ی داخلی، شروع به تغییر شکل کرده و کشیده می‌شود. با کاهش فاصله بین قطره و الکتروود، شدت میدان الکتریکی افزایش می‌یابد و در نتیجه نیروی الکتریکی وارد بر قطره افزایش می‌یابد که باعث می‌شود قطره‌ی داخلی دوباره کشیده شده و تغییر شکل دهد. در اثر تغییر



شکل ۸- نمودار تغییر شکل قطره‌ی خارجی برای اختلاف پتانسیل  $\Delta K_v$

این نمودار دارای سه تغییر شکل بیشینه نسبی می‌باشد. بعد از جدایش قطره از نازل، قطره دارای شکل کروی کامل می‌باشد. در هنگام سقوط، قطره شکل کروی خود را از دست داده و شکل دوکی به خود می‌گیرد که رفته رفته تغییر شکل آن افزایش می‌یابد، تا زمانی که به میدان الکتریکی وارد شود. نقطه‌ی بیشینه نسبی اول، نشان دهنده‌ی این تغییر شکل است.

بعد از ورود قطره به میدان الکتریکی، با توجه به شدت میدان الکتریکی، قطره‌ی داخلی شروع به تغییر شکل می‌کند و کشیده می‌شود. در اثر کشیده شدن قطره‌ی داخلی، قطره‌ی خارجی شروع به بازگشت به حالت کروی می‌کند که اولین کمینه نسبی در نمودار، این تغییر شکل را نشان می‌دهد.

با ادامه‌ی کشیده شدن قطره‌ی داخلی و در نهایت شکسته شدن آن، قطره‌ی خارجی نیز به سرعت شروع به تغییر شکل و کشیده شدن می‌کند. این کشیده شدن قطره‌ی خارجی تا زمانی ادامه می‌یابد که تکه‌ای از قطره‌ی داخلی که دارای بار منفی است، از قطره‌ی خارجی جدا شود. در این حالت، به خاطر کشش سطحی موجود بین قطره‌ی خارجی و تکه‌ی خارج شونده‌ی قطره‌ی داخلی، قطره‌ی خارجی دچار بیشترین تغییر شکل خود می‌شود. نقطه‌ی بیشینه نسبی دوم (بیشینه مطلق) نشان دهنده‌ی این تغییر شکل می‌باشد.

بعد از جدا شدن تکه‌ی قطره‌ی داخلی از قطره‌ی خارجی، قطره‌ی خارجی تحت اثر نیروهای کشش سطحی و اینرسی وارد شده، شروع به بازگشت به حالت کروی می‌کند. با توجه به نمودار، قطره به حالت کروی کامل باز می‌گردد. این در حالی است که تکه‌ی باقی مانده از قطره‌ی داخلی در داخل قطره‌ی خارجی چون دارای بار الکتریکی مثبت است، تمایل به دوری از الکتروود مثبت دارد.

کل قطره‌ی هسته-پوسته، با توجه به سرعت اولیه‌ای که بعد از جدا شدن تکه‌ی قطره‌ی داخلی، به سمت الکتروود مثبت داشت، تمایل به حرکت در این جهت را دارد. این در حالی است که تکه‌ی باقی مانده در داخل قطره‌ی خارجی، تمایل به حرکت در جهت مخالف دارد. به این ترتیب، قطره‌ی خارجی دوباره دچار تغییر شکل شده و کشیده می‌شود. این تغییر شکل با نزدیک شدن به الکتروود افزایش می‌یابد تا جایی که قطره از میدان الکتریکی خارج می‌شود. سومین بیشینه نسبی، نشان دهنده‌ی این امر می‌باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

تغییر شکل ایجاد شده در یک قطره‌ی هسته-پوسته تحت تاثیر

میدان الکتریکی مورد مطالعه قرار گرفته است. تا تاثیر میدان الکتریکی بر سطح مشترک مایع-مایع و مایع-گاز بررسی شود. بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده، نشان دهنده‌ی این حقیقت است که با افزایش اختلاف پتانسیل الکتریکی بین الکتروودها و در نتیجه افزایش شدت میدان الکتریکی، زاویه‌ی انحراف قطره‌ی در حال سقوط افزایش می‌یابد. این در حالی است که با افزایش شدت میدان، تغییر شکل‌های قطره و پدیده‌های رخ داده در حین سقوط افزایش می‌یابد. در اختلاف پتانسیل‌های پایین، قطره‌ی داخلی فقط دچار تغییر شکل می‌شود، در حالی که در اختلاف پتانسیل‌های بالا، تحت اثر میدان، قطره‌ی داخلی دچار شکست می‌شود. جدا شدن قطره‌ی داخلی در بسیاری از موضوعات همچون تولید پلیمرهای ترکیبی، محافظت از محیط پیرامون، دارورسانی در محل و غیره کاربرد دارد. با این روش می‌توان در هر محلی که لازم باشد، قطره‌ی داخلی را از قطره‌ی بیرونی خارج کرد.

#### ۵- سپاسگزاری

لازم است از آقایان دکتر بهنام صدری و دکتر بابک وجدی به دلیل راهنمایی‌های بسیار مفید و موثرشان در این تحقیق، تقدیر و تشکر گردد.

#### ۶- نمادها

d	قطر قطره (mm)
t	زمان (s)
V	سرعت (m/s)
	علامه یونانی
$\psi$	زاویه انحراف (°)
	زیرنویس‌ها
min	کمترین
max	بیشترین

#### ۷- مراجع

- [1] Mei F., & Chen D. R., Investigation of compound jet electrospray: Particle encapsulation. *Physics of Fluids*, Vol. 19, No. 10, 103303, 2007.
- [2] Chen H., Zhao Y., Song Y., & Jiang L., One-step multicomponent encapsulation by compound-fluidic electrospray. *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 130, No. 25, pp. 7800-7801, 2008.
- [3] Cheng X., Liu R., & He Y., A simple method for the preparation of monodisperse protein-loaded microspheres with high encapsulation efficiencies. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, Vol. 76, No. 3, pp. 336-341, 2010.
- [4] Sadhal S. S., Ayyaswamy P. S., & Chung J. N., *Transport phenomena with drops and bubbles*. Springer-Verlag New York, 1996.
- [5] Johnson R. E., & Sadhal S. S., Fluid mechanics of compound multiphase drops and bubbles. *Annual review of fluid mechanics*. Vol. 17, No. 1, pp. 289-320, 1985.
- [6] Rushton E., & Davies G. A., Settling of encapsulated droplets at low Reynolds numbers. *International Journal of Multiphase Flow*. Vol. 9, No. 3, pp. 337-342, 1983.
- [7] Brunn P. O., & Roden T., On the deformation and drag of a type-A multiple drop at low Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 160, pp. 211-234, 1985.
- [8] Stone H. A., & Leal L. G., Breakup of concentric double

- emulsion droplets in linear flows. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 211, pp. 123-156, 1990.
- [9] Gouz H. N., & Sadhal S. S., Fluid dynamics and stability analysis of a compound droplet in an electric field. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, Vol. 42, No. 1, pp. 65-83, 1989.
- [10] Tsukada T., Mayama J., Sato M., & Hozawa M., Theoretical and experimental studies on the behavior of a compound drop under a uniform DC electric field. *Journal of chemical engineering of Japan*, Vol. 30, No. 2, pp. 215-222, 1997.
- [11] Torza S., & Mason S. G., Three-phase interactions in shear and electrical fields. *Journal of colloid and interface science*, Vol. 33, No. 1, pp. 67-83, 1970.
- [12] Soni P., Juvekar V. A., & Naik V. M., Investigation on dynamics of double emulsion droplet in a uniform electric field. *Journal of Electrostatics*, Vol. 71, No. 3, pp. 471-477, 2013.
- [13] Behjatian A., & Esmaceli A., Electrohydrodynamics of a compound drop. *Physical Review E*, Vol. 88, No. 3, pp. 033012, 2013.
- [14] Behjatian A., & Esmaceli, A., Transient electrohydrodynamics of compound drops. *Acta Mechanica*, Vol. 226, No. 8, pp. 2581-2606, 2015.
- [15] Abbasi M. S., Song R., Kim J., & Lee J., Electrohydrodynamic behavior and interface instability of double emulsion droplets under high electric field. *Journal of Electrostatics*, Vol. 85, pp. 11-22, 2017.
- [16] Khorshidi, B., Jalaal, M., Esmacelzadeh, E., & Mohammadi, F., Characteristics of deformation and electrical charging of large water drops immersed in an insulating liquid on the electrode surface. *Journal of colloid and interface science*, vol. 352, no. 1, pp. 211-220, 2010.
- [17] Sadeghi H. M., Sadri B., Kazemi M. A., & Jafari M., Coalescence of charged droplets in outer fluids. *Journal of colloid and interface science*, Vol. 532, pp. 363-374, 2018.
- [18] Hokmabad B. V., Sadri B., Charan M. R., & Esmacelzadeh E., An experimental investigation on hydrodynamics of charged water droplets in dielectric liquid medium in the presence of electric field. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 401, pp. 17-28, 2012.
- [19] Andalib S., Hokmabad B. V., & Esmacelzadeh E., Study of a single coarse bubble behavior in the presence of DC electric field. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 436, pp. 604-617, 2013.