

## بررسی عددی دینامیک قطرات غیرنیوتنی کارئو تحت پدیده الکترووتینگ

رضا ایزدی، علی موسوی\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۴-۰۱  
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۵-۲۲  
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۸-۱۴  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۹-۰۵

### کلمات کلیدی:

پدیده الکترووتینگ  
یانگ-لیپمان  
سیال نیوتنی  
سیال غیرنیوتنی  
زاویه تماس

**خلاصه:** مطالعه رفتار دینامیکی قطرات از اهمیت بالایی در پدیده‌های الکترووتینگ برخوردار است. باتوجه به کاربرد گسترده سیالات غیرنیوتنی به‌خصوص در کاربردهای زیستی، در مطالعه حاضر دینامیک قطرات غیرنیوتنی کارئو تحت پدیده الکترووتینگ مورد بررسی قرار گرفته است. اثرات ویسکوزیته، اندازه قطره و اختلاف پتانسیل اعمالی در نوسانات و تغییر ارتفاع قطره مشخص شده‌اند. شبیه‌سازی این پدیده به کمک روش المان محدود صورت گرفته و به منظور اعتبارسنجی مدل‌سازی انجام شده، نتایج حاصل با نتایج تجربی و عددی مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند، برای سیال غیرنیوتنی مدل کارئو با افزایش لزجت دامنه نوسانات کاهش می‌یابد اما فرکانس ارتعاشی ثابت است، در صورتی که برای حالت مشابه در سیال نیوتنی دامنه نوسانات بزرگتر و فرکانس آن نسبت به سیال غیرنیوتنی کمتر است. در سیال غیرنیوتنی کارئو با ضریب توان کوچکتر از یک رفتار سیال غیرنیوتنی مشابه سیال نیوتنی می‌باشد اما زمانی که ضریب بزرگتر از یک می‌شود، سیال غیرنیوتنی در زمان کمتری به ارتفاع نهایی خود رسیده و این تغییر ارتفاع به‌صورت یک مرتبه همگرا می‌شود. افزایش ارتفاع در سیال غیرنیوتنی منجر به افزایش دامنه ارتعاشی و کاهش مقدار فرکانس در سیال می‌شود و در مقابل، در سیال غیرنیوتنی دامنه ارتعاشی کمتر ولی مقدار فرکانس آن بیشتر است.

### ۱- مقدمه

خیس می‌کند. از کاربردهای پدیده الکترووتینگ می‌توان به تکنولوژی صفحات نمایش، انتقال قطره، لنزهای هوشمند، کلیدکنترل از راه دور، کاغذ الکترونیکی، تولید انرژی و تراشه‌های آزمایشگاهی اشاره کرد. الکترووتینگ روی دی‌الکتریک<sup>۲</sup> اثر کشش سطحی است که در اثر اعمال ولتاژ به الکترودی که قطره مایع قطبی، در تماس با دی‌الکتریک و سیال دیگر قرار دارد، اعمال می‌شود. قطره بر روی یک سطح هیدروفوب (آب‌گریز) قرار گرفته می‌شود. در اثر اعمال ولتاژ، تعادل کشش سطحی تغییر می‌کند که طبق رابطه یانگ<sup>۳</sup> زاویه تماس تغییر می‌کند. رابطه یانگ-لیپمان تناسبی از مجذور ولتاژ و کشش سطحی بین سیال می‌باشد [۱]:

$$\gamma_{LG} \cos \theta_0 = \gamma_{SG} - \gamma_{SL} \quad (۱-الف)$$

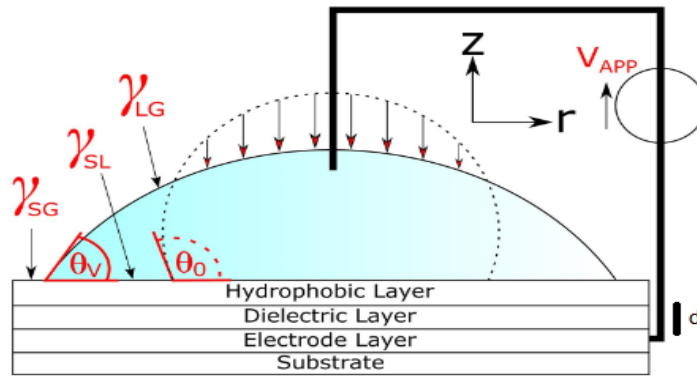
پدیده الکترووتینگ بر اساس خاصیت موئینگی<sup>۱</sup> الکتریکی عمل می‌کند که اولین بار توسط دانشمند فرانسوی گابریل لیپمان معرفی شد. بر همین اساس می‌توان رفتار ترکندگی قطرات مایع را به‌وسیله اعمال میدان پتانسیل الکتریکی تغییر داد. در حالتی که میدان الکتریکی وجود ندارد، قطره روی سطح جامد به صورتی واقع می‌شود که نیروی وارده بر فصل مشترک جامد-مایع-گاز همگی در تعادل هستند و این تعادل باعث به‌وجود آمدن زاویه تماس میان قطره و سطح جامد می‌گردد. در صورت اعمال میدان الکتریکی، زاویه تماس بین قطره و سطح کاهش یافته و به اصطلاح قطره، سطح را

2 Electrowetting On Dielectric  
3 Young's Law

1 Capillarity

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: moosavi@sharif.edu





شکل ۱. طرح یک قطره سیال بر روی سطح دی‌الکتریک در اثر اعمال پتانسیل الکتریکی شامل لایه آب‌گریز، لایه دی‌الکتریک و لایه هادی [۱۸]  
**Fig. 1. Design of a fluid drop on the dielectric surface by the application of electrical potentials including hydrophobic layer, dielectric layer and conductor layer**

را مورد بررسی قرار دادند. شبیه‌سازی پدیده الکترووتینگ به وسیله نرم‌افزار اوپن‌فوم و توسط حلگر اینترفوم، به روش حجم سیال انجام شد. مدل‌سازی دریک میکروکانال سه‌بعدی بوده که در حجم ثابت قطره آب، افزایش ارتفاع میکروکانال باعث افزایش سرعت قطره شده و همچنین با افزایش دمای آب و متناسب با آن کاهش لزجت، کشش سطحی کاهش یافته و باعث افزایش سرعت قطره می‌گردد. چن و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۵ زاویه تماس هیستریزیس<sup>۱</sup> در طی اتصال و یا جدا شدن یک مایع در اثر الکترووتینگ را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که در اثر وجود یا عدم وجود زاویه تماس باقی‌مانده<sup>۲</sup>، نیروی کششی کاهش می‌یابد. بنابراین در اثر کاهش این نیروی کششی حداکثر ارتفاع قطره<sup>۳</sup> افزایش می‌یابد. یولی‌وانگ و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۶ رئولوژی<sup>۴</sup> سیال غیرنیوتنی و معادلات جریان استوک را برای یک مساله دوفازی میکروفلویدی، مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۱۸ حاجی آقایی وفایی و همکاران [۸] پدیده الکترووتینگ روی یک لایه دی‌الکتریک و حرکت یک قطره سیال توسط این پدیده را در ولتاژهای گستره ۵۰-۲۵۰۰ ولت توسط روش امان محدود به‌وسیله نرم‌افزار کامسول<sup>۵</sup> مورد بررسی قرار داده و مقدار سرعت قطره در طی این مراحل محاسبه شد.

پژوهش‌های تجربی و آزمایشگاهی به ترتیب زیر می‌باشد. گروهی از محققان کاربرد پدیده الکترووتینگ در پدیده‌های مختلف از جمله

$$\cos \theta_V = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL} + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{V_{app}^2}{2d}}{\gamma_{SG}} \quad (ب-۱)$$

در شکل ۱ طرح یک قطره سیال بر روی سطح دی‌الکتریک قابل مشاهده می‌باشد که شامل یک زیر لایه، لایه الکتروود، لایه دی‌الکتریک با نفوذپذیری  $\epsilon_r$ ، یک لایه آب‌گریز با کشش سطحی  $\gamma_{SL}$ ،  $\gamma_{SG}$  و  $\gamma_{LG}$  مربوط می‌باشد.  $\epsilon_0$  ثابت دی‌الکتریک در خلا و  $d$  فاصله بین دی‌الکتریک و لایه آب‌گریز می‌باشد. ولتاژ  $V_{app}$  اعمال شده تغییر زاویه قطره از  $\theta_0$  به  $\theta_V$  را نشان می‌دهد [۱]. لازم به ذکر است که رابطه یانگ-لیپمان یک رابطه حدودی بوده که در ولتاژهای پایین‌تر از ولتاژ اشباع قابل استفاده می‌باشد.

کارهای صورت گرفته در زمینه پدیده الکترووتینگ را می‌توان به دو دسته پژوهش‌های عددی و تجربی تقسیم نمود.

در زمینه پژوهش‌های عددی، پی و کیم [۲] در سال ۲۰۰۶ تاثیر فاصله بین الکتروودها بر پدیده الکترووتینگ را بررسی کردند. با افزایش فاصله بین الکتروودها در یک ولتاژ ثابت، زاویه تماس سطح، کاهش کمتری را تجربه می‌کند. یک مدل تحلیلی برای محاسبه و تحلیل دمای متوسط قطره در پدیده الکترووتینگ توسط اوپرنس و همکاران [۳] در سال ۲۰۰۸ ارائه گردید. پدیده الکترووتینگ بین دو شکل الکتروود تخت و هلالی در سال ۲۰۱۰ توسط رجبی و دولت‌آبادی [۴] مورد شبیه‌سازی و مقایسه قرار گرفته شد. با توجه به نتایج آن‌ها در حالت هلالی شکل الکتروودها، سرعت بیشتر و تغییر شکل کمتر قطره مشاهده می‌شود. در سال ۲۰۱۵ ایزدپناهی و همکاران [۵] حرکت قطره آب درون یک میکروکانال تحت پدیده الکترووتینگ

1 Hysteresis

2 Contact Angle Hysteresis

۳ منظور از ارتفاع قطره فاصله نوک قطره تا سطح جامد می‌باشد. به عبارتی دیگر چون شکل قطره متقارن است بنابراین ارتفاع قطره برابر با ارتفاع متناظر با مرکز قطره است که به عنوان مبنا در نظر گرفته شده است.

4 Rheology

5 COMSOL

حرکت قطره سیال غیرنیوتنی بررسی خواهد شد. برای مدل‌سازی سیال غیرنیوتنی از مدل کارنو استفاده شده است. از آنجایی که که هدف بررسی نوع خاصی از سیال غیرنیوتنی نیست، لذا خواص سیال غیرنیوتنی خون به عنوان مبنا در نظر گرفته شده و تنها ضریب توان کارنو تغییر داده خواهد شد.

## ۲- بیان مسأله

در این بخش به بررسی مدل‌سازی به روش المان محدود<sup>۲</sup> برای بررسی تغییرات خاصیت الکترووتینگ پرداخته خواهد شد. برای حل عددی از نرم‌افزار کامسول<sup>۳</sup> و حلگر لول ست<sup>۴</sup> استفاده می‌شود. هندسه مطابق شکل ۲ به صورت دو بعدی تقارن محوری و حل با استفاده از روش المان محدود است. مطابق شکل قطره به صورت یک چهارم دایره با زاویه اولیه ۹۰ درجه و شعاع ۲ است. پس از اعمال ولتاژ و تغییر زاویه متناسب با آن، زاویه تماس قطره شروع به تغییر می‌کند. رابط حل نرم‌افزار روش لول ست است که می‌تواند محل تماس دو فاز را مشخص کند بنابراین الگوریتم حل معادلات ناوراستوکس که با معادلات یانگ لیپمان ترکیب شده‌اند، حلگر لول ست می‌باشد که می‌تواند به خوبی مرز دو سیال را مشخص کند. همانطور که در شکل مشخص است ابتدا قطره در ارتفاع  $h_0$  بوده که پس از تغییر زاویه‌ی تماس و رسیدن به ارتفاع نهایی  $h_v$  متوقف می‌شود.

پارامتر شبیه‌سازی برای کشش سطحی بین سطح مایع و سطح گاز برای آب/هوا برابر ۷۲/۷۵ میلی‌نیوتن بر متر در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد است. بازه زمانی حل برابر با ۰/۰۰۰۱ ثانیه است که پس از گذشت ۰/۰۳ ثانیه از حل، قطره از ارتفاع اولیه آن ( $h_0$ ) به ارتفاع نهایی ( $h_v$ ) می‌رسد.

در شکل ۲ که هندسه بدون مش است و برای استقلال از مش استفاده خواهد شد، شعاع قطره ۱/۲۵ میلی‌متر است. شرایط مرزی آن در دیواره‌های اطراف قطره به صورت خروجی سیال با فشار صفر پاسکال تعریف شده و زاویه تماس قطره در محل تماس با سطح جامد برابر با ۵۰ درجه است.

در شکل ۲ محل تماس دو فاز به خوبی قابل مشاهده است. تمامی حل در محیط با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد صورت می‌گیرد. در اینجا

حرکت قطره، کاربردهای جذب تراکمی و محاسبه مدول الاستیک سیالات ژلاتینی را در آزمایشگاه مطالعه کردند [۹-]۱۱. کیو و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۰۳ به بررسی رفتار یک قطره آب در یک محیط مخلوط نشدنی (روغن) پرداختند. در سال ۲۰۱۱ علوی و همکاران [۱۳] طی پژوهشی به صورت تجربی و عددی اثر میدان الکتریکی روی زاویه تماس یک قطره سیال و پدیده جدایش<sup>۱</sup> را بررسی کردند. یک مدل برای تحلیل و شبیه‌سازی رفتار قطره تحت اعمال ولتاژ نیز ایجاد شد. موضوع انتقال حرارت سیال بین دو لایه دی‌الکتریک، انتقال حرارت مبدل لوله حرارتی و بررسی ضخامت لایه روانکار توسط پدیده الکترووتینگ مورد بررسی قرار گرفته شد [۱۴-]۱۶. هونگ و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۳ به بررسی اثر ابعاد قطره و ویسکوزیته آن روی تغییر شکل دینامیکی قطره شامل زمان پاسخ، بیشترین سرعت و الگوی انتقال بر اثر اعمال ولتاژ جریان مستقیم به دو روش تجربی و حل عددی پرداختند. مشاهده می‌شود که بیشترین سرعت قطره به طور غیرخطی وابسته به ابعاد قطره بوده اما به طور خطی به الکترووتینگ وابسته می‌باشد. بررسی‌های تجربی و آزمایشگاهی ترولس و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۸ نشان می‌دهد که فرکانس و دامنه نوسانات قطره مایع تحت پدیده الکترووتینگ وابسته به پارامترهای مربوط به ماده مانند چگالی، ویسکوزیته و جرم ماده می‌باشد. مشاهده می‌شود نوسانات و تغییر ارتفاع سیال کار بسیار دشوار و نیازمند تجهیزات با دقت بالا می‌باشد.

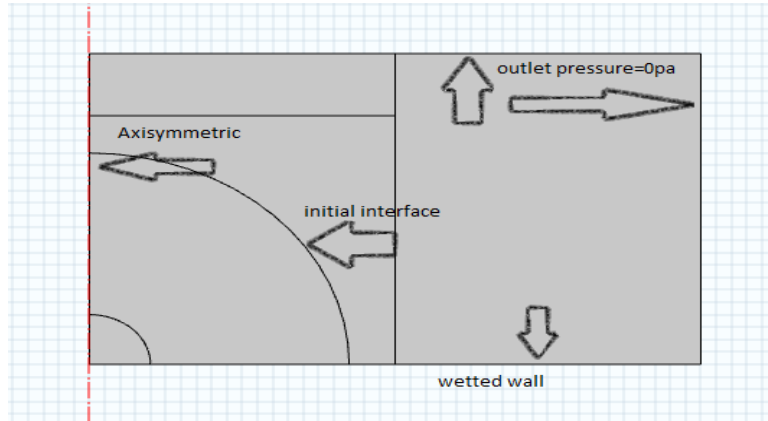
همانطور که بیان شد از گذشته تا به امروز پدیده‌های الکترووتینگ پیشرفت گسترده‌ای در مسائل علمی و صنعتی، به ویژه در زمینه انتقال حرارت و حرکت قطره سیال، داشته‌اند. از این رو رفتار قطره سیال در طی حرکت آن، در اثر تغییر زاویه تماس قطره سیال، با سطح، از اهمیت زیادی برخوردار است. در تحقیق‌های جدیدتر نیاز به این بررسی کاملاً مشهود بوده به گونه‌ای که پژوهش‌های زیادی در زمینه دینامیک و حرکت قطره صورت گرفته است. به طور کلی سیالات به دو دسته نیوتنی و غیرنیوتنی می‌تواند تقسیم شود که سیال نیوتنی را می‌توان نوع خاصی از سیال غیرنیوتنی نیز دانست. کارهای پیشین در این زمینه، برای سیال نیوتنی صورت گرفته است. لذا به دلیل گستردگی سیالات غیرنیوتنی و افزایش کاربردهای این سیال در مجامع علمی و غیرعلمی، در این پژوهش رفتار دینامیکی

2 FEM

3 COMSOL Multiphysics 5.4

4 Level Set

1 Dispense



شکل ۲. هندسه مساله، شرایط مرزی و سطح تماس دو سیال.  
Fig. 2. Geometry, boundary conditions and two-fluid contact surface.

که در آن اندیس‌های  $l$  و  $g$  بیانگر فازهای مایع و گاز می‌باشند. معادلات ناویراستوکس انتقال مومنتم و جرم سیال را برای چگالی ثابت توصیف می‌کند. برای اثربخشی اثر موئینگی، کشش سطحی در مدل قرار می‌گیرد. براین اساس معادلات ناویراستوکس به صورت زیر خواهد شد:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot \left[ -p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right] + \mathbf{F}_s + \rho \mathbf{g} \quad (4)$$

که  $\rho$  چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )،  $\mu$  لزجت دینامیکی ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )،  $u$  سرعت ( $\text{m/s}$ )،  $P$  فشار ( $\text{Pa}$ )،  $g$  شتاب جاذبه ( $\text{m/s}^2$ ) و  $F_s$  کشش سطحی وارد شده بر سطح تماس آب/هوا ( $\text{N}$ ) می‌باشد. در این مدل نیروی کشش سطحی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{F}_s = \sigma \delta \mathbf{n} \quad (5)$$

در اینجا  $\delta$  تابع دلتا و بردار عمود بر سطح تماس به صورت زیر است:

$$\delta = \delta |\varphi(1-\varphi)| |\nabla \varphi| \quad (6)$$

$$n = \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \quad (7)$$

$\sigma$  ضریب کشش سطحی ( $\text{N/m}$ )،  $k = -\nabla \cdot n$  انحنا و  $\delta$  تابع

از خون به عنوان یک سیال غیرنیوتنی پرکاربرد استفاده شده است اما هدف اصلی بررسی رفتار دینامیکی یک سیال غیرنیوتنی فارغ از نوع آن براساس تغییر مقدار پارامتر  $n$  (توان مدل کارئو) است. بنابراین با فرض ثابت ماندن خاصیت سیال غیرنیوتنی براساس خواص خون، تنها مقدار پارامتر  $n$  (توان مدل کارئو) تغییر می‌کند.

### ۳- معادلات حاکم

معادلات لول ست به طور خودکار سطح تماس دو سیال را مشخص می‌کند. محل تماس دو سیال با مقدار  $\varphi = 0.5$  مشخص می‌شود. در سیال گازی  $\varphi = 0$  و در سیال مایع  $\varphi = 1$  است. حرکت سیال دو فازی در محل تماس دو سیال از معادله‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \varphi = \gamma \nabla \cdot \left( \varepsilon \nabla \varphi - \varphi(1-\varphi) \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \right) \quad (2)$$

پارامتر  $\varepsilon$  مقدار ضخامت سطح تماس دو سیال را نشان می‌دهد. به عنوان پیشنهاد و مقدار مناسب اولیه برای  $\varepsilon$  بهتر است این مقدار برابر با  $\varepsilon = h/2$  باشد که  $h$  برابر بزرگترین مقدار مش است. پارامتر  $\gamma$  نیز برابر با ماکزیمم سرعت است که برای شروع مجدد حل از آن استفاده می‌شود.

در ناحیه گذار ( $0 < \varphi < 1$ )، چگالی و ویسکوزیته با توجه به کسر حجمی به صورت زیر به دست می‌آید [۱۳]:

$$\rho = \rho_g + (\rho_l - \rho_g)\varphi \quad (3\text{-الف})$$

$$\mu = \mu_g + (\mu_l - \mu_g)\varphi \quad (3\text{-ب})$$

جدول ۱. خواص سیال آب، خون، جیوه و هوا در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد [۵، ۱۳، ۱۹]  
Table 1. Fluid properties of water, blood, mercury and air at 20°C [5, 13, 20].

سیال	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	ویسکوزیته (میلی‌پاسکال ثانیه)	کشش سطحی در اثر تماس با هوا (نیوتن متر)
آب	۱۰۰۰	۱/۰۰۳	۰/۰۷۲۸
خون	۱۰۵۰	رابطه ۶	۰/۰۵۶
جیوه	۱۳۵۴۵	۱/۵۵	۰/۴۸۰۳
هوا	۱/۲۵	۰/۰۰۱۸۱	-

مدل کارنو<sup>۱</sup> کاربرد وسیعی در توصیف سیالات غیرنیوتنی<sup>۲</sup> لزج خالص دارد. در اینجا ارتباط بین تنش برشی و نرخ برش به صورت خواهد شد [۱۹]:

$$\mu = \mu_{inf} + (\mu_0 - \mu_{inf}) \left[ 1 + (\lambda \gamma)^2 \right]^{\frac{n-1}{2}} \quad (10)$$

معادله مومنتم برای سیال غیرنیوتنی نیز همانند سیال نیوتنی است با این تفاوت که تنش برشی وارد شده بر اثر لزجت سیال به صورت زیر وابسته به ضریب  $n$  در مدل کارنو خواهد شد:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} = \mu \gamma \quad (11)$$

که  $\gamma$  نرخ تنش برشی است. با جایگذاری رابطه (۱۰) در رابطه (۱۱) می‌توان به رابطه زیر رسید [۱۹].

$$\tau = \left[ \mu_{inf} + (\mu_0 - \mu_{inf}) \left[ 1 + (\lambda \gamma)^2 \right]^{\frac{n-1}{2}} \right] \gamma \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)،  $\mu_0$ ،  $\mu_{inf}$ ،  $\lambda$  و  $n$  ثوابتی هستند که با استفاده از خواص خون تعیین می‌گردند که این مقادیر برای خون به ترتیب ۰/۰۵۶ پاسکال.ثانیه، ۰/۰۰۳۵ پاسکال.ثانیه، ۳/۳۱۳ و ۰/۳ می‌باشد. ثابت  $n$  تعیین‌کننده نوع سیال می‌باشد به این صورت که در سیال نیوتنی  $n=1$  باید باشد و اگر  $n>1$  باشد توصیف‌کننده سیال دیلاتانت<sup>۳</sup> و  $n<1$  رفتار سیال شبه‌پلاستیک<sup>۴</sup> را توصیف می‌کند [۲۰]. در جدول ۱ خواص سیالات مورد استفاده در این مقاله، آورده شده است.

دلتای دیراک بوده که تنها در محل تماس دو سیال غیر صفر می‌باشد. در این مدل چون زاویه تماس تغییر می‌کند بنابراین نیاز است که اثر زاویه تماس بر نیروی کششی سطحی اعمال گردد. در صورت اعمال زاویه تماس جدید که در رابطه (۱) در مورد چگونگی اعمال این زاویه بحث شد (رابطه یانگ لیپمان)، نیروی کشش سطحی به صورت زیر خواهد شد که  $\theta_w$  زاویه تماس نهایی قطره است:

$$F_\theta = \sigma \delta (n_{wall} \cdot n - \cos \theta_w) n \quad (8)$$

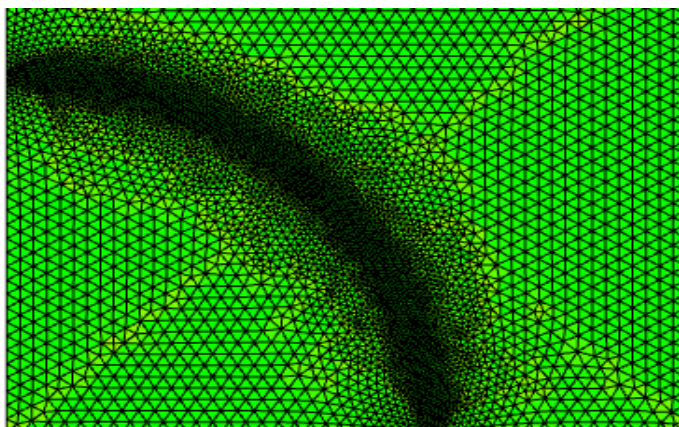
لازم به ذکر است که از فرض عدم لغزش روی دیواره استفاده شده است.

همچنین رابطه پیوستگی به صورت زیر بیان می‌شود [۱۳]:

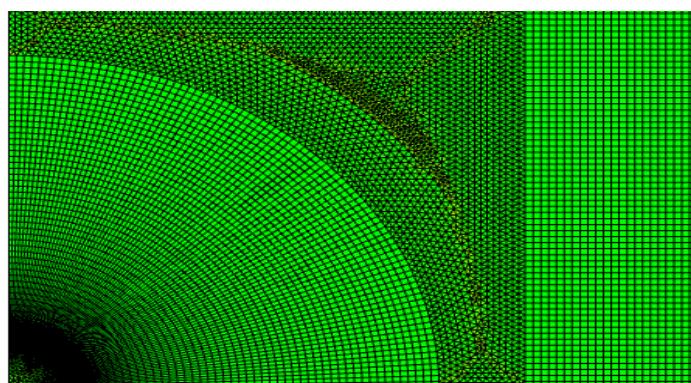
$$\nabla \cdot u = 0 \quad (9)$$

در مباحث قبلی برای سیال نیوتنی معادلات حاکم بیان گردید. اما در این مقاله علاوه بر سیال نیوتنی از سیال غیرنیوتنی خون استفاده شده است. در سیالات نیوتنی رابطه بین تغییرات تنش برشی و نرخ تنش اعمال شده به صورت خطی تغییر می‌کند و ضریب ثابت تبدیل‌کننده تناسب خطی این معادله، همان ویسکوزیته یا گرانروی سیال می‌باشد. در سیالات غیرنیوتنی رابطه میان تغییرات تنش برشی و نرخ تنش اعمال شده خطی نبوده و در این طیف از سیالات مدت زمان اعمال تنش، نقش مهمی در تنش برشی حاصل شده ایجاد می‌کند. از این رو در سیالات غیرنیوتنی ضریبی ثابت مانند لزجت برای توصیف وضعیت تنش برشی معنا نخواهد داشت. بسیاری از سیالات صنعتی رفتار غیرخطی دارند. به عنوان مثال محلول‌ها و پلیمرهای مذاب، مایعات اتمی و موادی که دارای خواص توام لزجت و الاستیک هستند دارای خواص غیرنیوتنی می‌باشند که به طور فزاینده در یک طیف گسترده در فرآیندهای صنعتی کاربرد دارند.

1 Carreau  
2 Non-Newtonian Fluid  
3 Dilatant  
4 Pseduplastic



الف



ب

شکل ۳. نمایی از مش ایجاد شده به دو روش الف) بدون سازمان و ب) سازمان یافته.  
Fig. 3. An overview of the a) unstructured and b) structured mesh.

#### ۴- استقلال از مش

جهت بررسی استقلال از مش، کوچکترین ابعاد مش برای چهار حالت متفاوت بررسی می‌شود. یکی از مشخصه‌های مورد بحث و نتیجه‌گیری در این مقاله تغییر ارتفاع اولیه قطره سیال است که از آن به عنوان دامنه می‌توان نام برد و به اینصورت که اختلاف ارتفاع بین اولین موج و دومین موج به‌عنوان مبنای استقلال از مش در نظر گرفته می‌شود. در اینجا برای سیال آب، قطره‌ای به شعاع  $0/5$  میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود و کوچکترین ابعاد مش به ازای مقادیر  $0/1$ ،  $0/05$ ،  $0/15$  و  $0/2$  میلی‌متر تغییر داده خواهد شد و در هر مرحله مقدار دامنه در جدول ۲ قابل مشاهده است. شکل ۳-الف نیز نمایی از شکل مش بی‌سازمان اطراف قطره سیال است. تراکم مش در اطراف قطره به دلیل بالا بودن اهمیت دقت حل در این ناحیه افزایش داده شده است. در شکل ۴ مشاهده می‌شود که مقدار تغییرات ارتفاع قطره برای مقادیر متفاوت المان‌های مش اختلاف بسیار جزئی است که حتی قابل چشم‌پوشی می‌باشد بنابراین نتایج حل برای تمام مش قابل استفاده است.

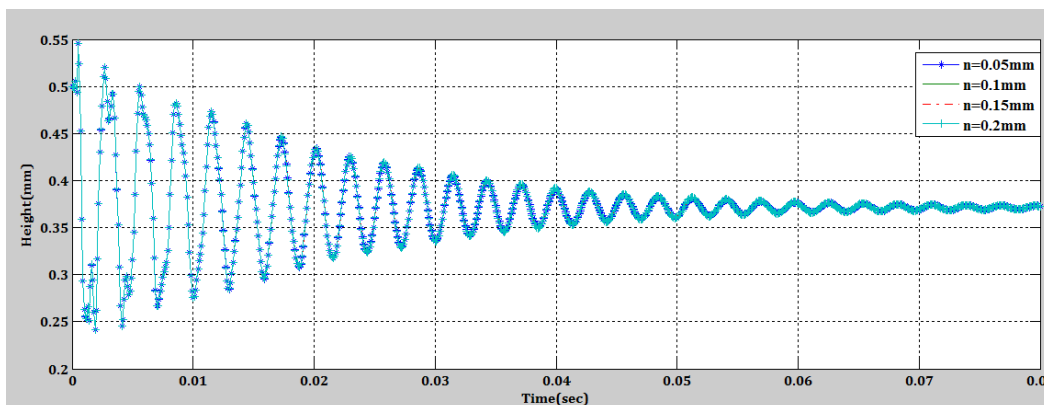
برای مش‌زنی دو نوع مش می‌توان استفاده کرد : ۱-مش سازمان‌یافته ۲-مش بی‌سازمان. در این مقاله هر دو نوع مش بررسی می‌شود. در شکل ۳-ب مشاهده می‌شود که برای مش سازمان‌یافته در اطراف سطح تماس قطره با سیال هوا به دلیل اهمیت ضخامت قطره ابعاد مش استفاده شده، ریزتر و همچنین از مش چهار وجهی برای قطره و محیط اطراف قطره استفاده می‌شود. این مش به صورت چهار وجهی در شکل ۳-ب قابل مشاهده است. یکی از قابلیت‌های نرم‌افزار کامسول ایجاد مش بی‌سازمان می‌باشد که نرم‌افزار با انتخاب این ویژگی مش بی‌سازمان را ایجاد میکند که برای دقت بیشتر حل، ابعاد مش در اطراف قطره ریزتر شده است. در نهایت پس از بررسی نتیجه حل دو مش نتیجه‌ای که حاصل شد این است که، نوع مش در پاسخ نهایی و نتیجه‌گیری تفاوتی ایجاد نمی‌کند بنابراین برای افزایش سرعت حل از مش بی‌سازمان استفاده خواهد شد. در ادامه نیز تاثیر ابعاد مش بر حل بررسی خواهد شد.



جدول ۲. مقایسه دامنه ارتعاشی قطره آب برای ابعاد مختلف مش جهت نشان دادن استقلال از شبکه.

Table 2. Comparison of the vibrational amplitude of water droplets for different mesh dimensions to demonstrate mesh independency.

دامنه	تعداد گره‌ها	کوچکترین ابعاد مش
۰/۰۴۵	۷۷۳۶	۰/۰۵
۰/۰۴۵	۳۲۴۰	۰/۱
۰/۰۴۵	۲۴۸۰	۰/۱۵
۰/۰۴۵	۲۲۲۰	۰/۲



شکل ۴. دینامیک قطره آب با شعاع ۰/۵ میلی‌متر برای مش با ابعاد المان‌های متفاوت جهت استقلال از شبکه.

Fig. 4. Water droplet dynamics with a radius of 0.5 mm for mesh independency in different elements.

جدول ۳. بررسی نتایج جهت اطمینان از صحت نتایج با نتایج بیان شده در مرور ادبیات.

Table 3. Present study results and results that reported in the literature review.

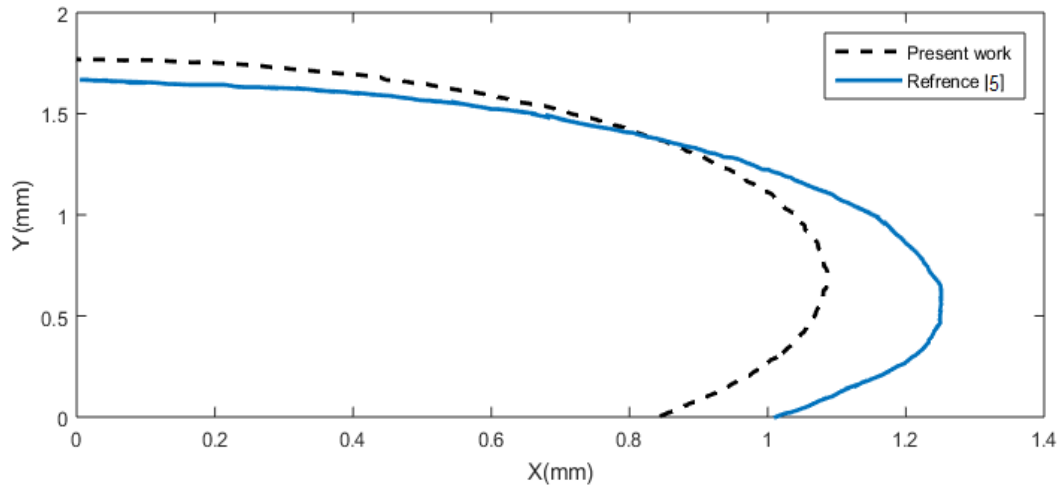
شعاع پایه (میلی‌متر)	بیشینه شعاع (میلی‌متر)	بیشینه ارتفاع (میلی‌متر)	-
۱	۱/۲۵	۱/۶۵	مرجع [۵]
۰/۸۵	۱/۱	۱/۷۵	کار پیش‌رو
۱۵٪	۱۲٪	۶٪	درصد خطا (اختلاف کار پیش‌رو با مرجع [۵] تقسیم بر مقدار حاصل از مرجع [۵])

## ۵- اعتبارسنجی

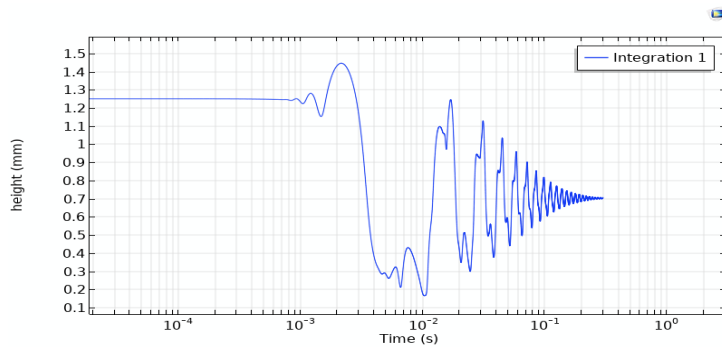
گرفته شد. در این مطالعه در قسمتی از آن سیال جیوه در اثر اعمال ولتاژ ۲۴۰ ولت به زاویه نهایی ۱۳۳ درجه می‌رسد. در اینجا به منظور صحت‌سنجی کار پیش‌رو از این مقاله استفاده خواهیم کرد. مقایسه نتایج در جدول ۳ و شکل ۵ امکان‌پذیر است. می‌توان دید که در دو مورد خطا کمی بالاتر از مقدار مورد انتظار است و دلیل آن می‌تواند عدم مشخص بودن شرایط محیطی از جمله دما باشد که خود بر کشش سطحی بین سیال و محیط موثر بوده و همچنین مشخص نبودن شعاع اولیه قطره که باعث تفاوت در نتایج می‌گردد.

در ادامه راستی‌آزمایی از نتایج ترولس و همکاران [۱۸] که

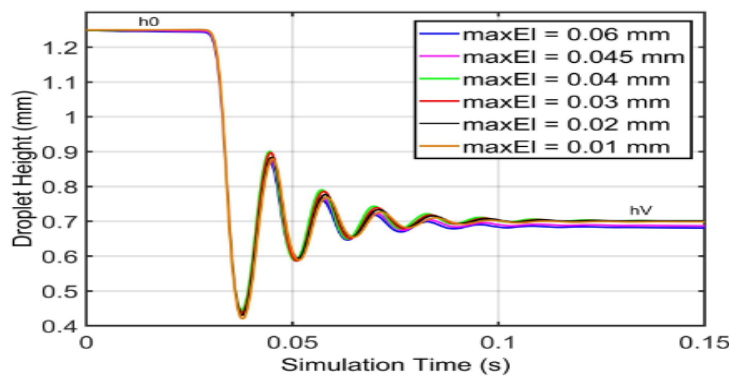
همانطور که در مرور ادبیات بیان شد، بررسی تجربی پدیده الکترووتینگ به‌خصوص برای سیال غیرنیوتنی کاری دشوار و نیازمند تجهیزات با دقت بالا و گران است که به دلیل عدم دسترسی به این تجهیزات از روش عددی استفاده شد. برای راستی‌آزمایی این پژوهش می‌توان از کارهای پیشین که در این موضوع، پژوهش داشته‌اند، استفاده نمود. برای این منظور از موارد بیان شده در مرور ادبیات به دو صورت تجربی و عددی استفاده خواهد شد. با مطالعه روی پدیده الکترووتینگ، حرکت قطره آب درون کانال توسط ایزدپناهی [۵] مورد مطالعه قرار



شکل ۵. نتایج حاصل از حل عددی بیان شده در مرجع [۵] و کار پیش‌رو برای قطره جیوه برای زاویه نهایی ۱۳۳ درجه قطره .  
 Fig. 5. The results of the numerical solution stated in Ref. [5] and the present study on the mercury drop for the final contact angle of 133 degree.



الف



ب

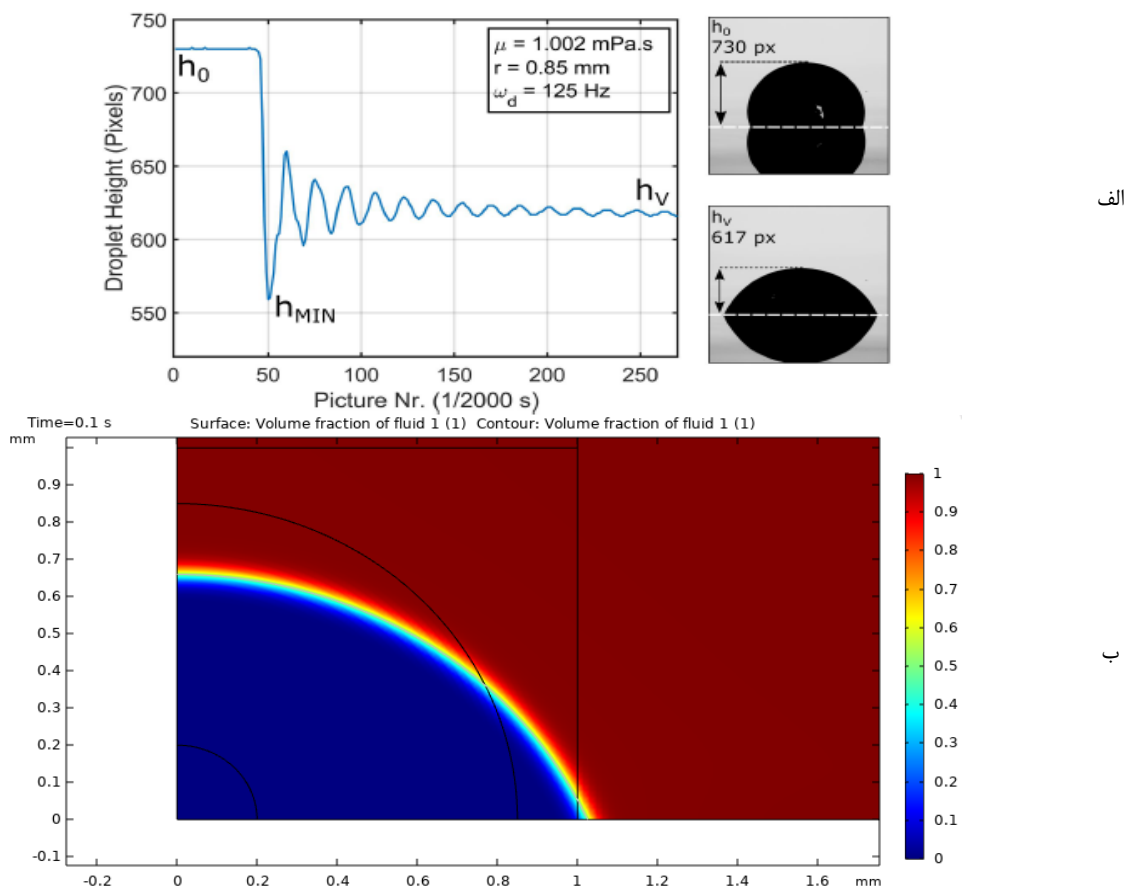
شکل ۶. نتایج کار حاضر برای قطره آب با شعاع ۱/۲۵ میلی‌متر و زاویه تماس نهایی ۵۰ درجه و (ب) نتایج کار مرجع [۱۸] به صورت عددی و صحت‌سنجی شده توسط نتایج آزمایشگاهی در همان مرجع برای قطره آب با شعاع ۱/۲۵ میلی‌متر و زاویه تماس نهایی ۵۰ درجه.

Fig. 6. Results of the present work for a water drop with a radius of 1.25 mm and a final contact angle of 50 degrees; and (b) the results of Ref. [18] numerically and verified by laboratory results at the same reference for a water drop with a radius of 1.25 mm and the final contact angle of 50 degrees.

آزمایشگاه انجام و تغییرات ارتفاع قطره توسط یک دوربین ضبط شده است. در شکل ۶ می‌توان نتایج حل عددی آن‌ها پس از بررسی با نتایج آزمایشگاهی را، که در آن مقاله بیان شده است، با نتایج کار پیش‌رو

به صورت تجربی و عددی این موضوع را برای سیال نیوتنی بررسی کرده است، استفاده خواهد شد. در این پژوهش تغییرات دینامیکی قطره آب دردمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد به روش عددی و تجربی در





شکل ۷. مقایسه ارتفاع نهایی قطره برای الف) پژوهش آزمایشگاهی در مرجع [۱۸] و ب) کارپیش‌رو برای قطره آب به شعاع اولیه ۰/۸۵ میلی‌متر و زاویه نهایی ۶۵ درجه.

Fig. 7. The final drop height for (a) laboratory research in Ref. [18] and (b) the dropper for water drop to an initial radius of 0.85 mm and a final angle of 65 degrees.

در همین مرجع (مرجع [۱۸]) بررسی دینامیک قطره در آزمایشگاه به‌وسیله دوربین ثبت و ضبط شد. در اینجا می‌توان علاوه بر صحت‌سنجی‌های بیان شده بر اساس نتایج آزمایشگاهی نیز، حل عددی موجود در این پژوهش را بررسی نمود. در مرجع [۱۸] برای یک قطره آب به شعاع ۰/۸۵ میلی‌متر در تماس با هوا که در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته است پس از اعمال ولتاژ ۱۴۰ ولت به سطح دی‌الکتریک، بر اساس اطلاعات دی‌الکتریک موجود در مرجع و با استفاده از رابطه یانگ لیپمان به زاویه نهایی ۶۵ درجه خواهد رسید. در شکل ۷ با استفاده از تناسب بین شعاع اولیه قطره و مقدار پیکسلی که از عکس استخراج شده است، ارتفاع نهایی قطره برابر ۰/۷۱ میلی‌متر است. در شکل ۷ نیز نتیجه حل عددی کار پیش‌رو قابل مشاهده است که به ارتفاع نهایی ۰/۶۸ میلی‌متر می‌رسد. اختلاف بسیار اندک بین نتایج نشان می‌دهد که حل انجام شده از دقت خوبی

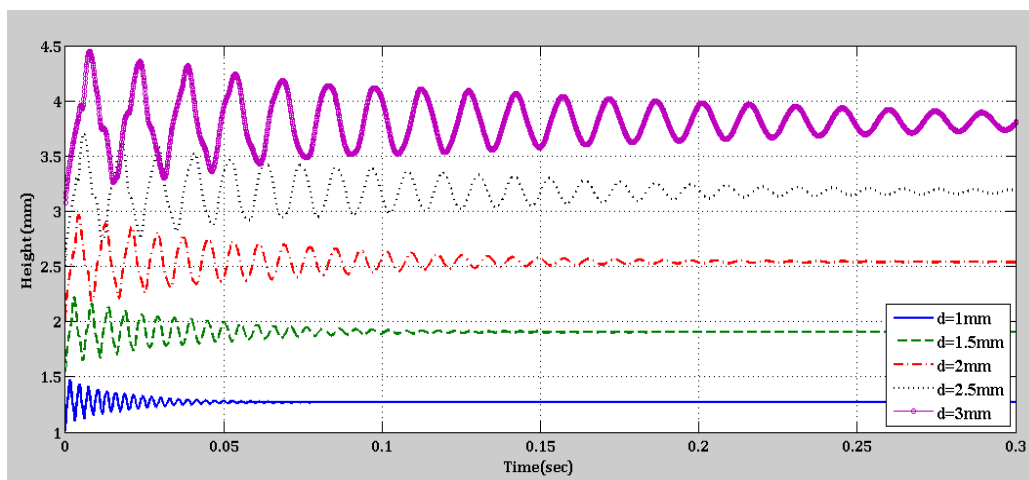
بررسی نمود. قطره آب در ابتدا با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و شعاع ۱/۲۵ میلی‌متر است که در نهایت به زاویه نهایی ۵۰ درجه می‌رسد. ارتفاع نهایی قطره پس از طی نوسانات در مقدار ۰/۷ میلی‌متر به ثبات می‌رسد. همانطور که مشاهده می‌شود، در هر دو شکل ارتفاع نهایی قطره تقریباً به یک مقدار منتج می‌شود که دارای خطای بسیار کمی است.

در شکل ۶-الف نوساناتی که مشاهده می‌شود می‌تواند دلایل زیر باشد. دلیل اول فرض عدم لغزش روی دیواره می‌باشد همچنین به دلیل استفاده از خاصیت لگاریتمی در محور زمان در مقایسه با شکل ۶-ب این نوسانات بیشتر به چشم می‌آیند و زمانی که گام زمانی حل کوچکتر باشد حل دقیق‌تر بوده و جزئیات بیشتری را نشان می‌دهد. در شکل ۷-الف این تغییر نوسانات در نتایج آزمایشگاهی نیز دیده می‌شود.

جدول ۴. تغییرات دامنه و فرکانس قطره سیال نیوتنی (آب) با تغییر شعاع اولیه قطره برای زاویه تماس نهایی ۶۰ درجه.

Table 4. Amplitude and frequency of Newtonian fluid droplet (water) in final contact angle of 60° by changing radius droplet.

شعاع (میلی متر)	حجم (میلی متر مکعب)	دامنه (میلی متر)	فرکانس (نوسان بر ثانیه)
۱	۰/۲۶۲۵	۰/۴	۳۳۳/۳
۱/۵	۰/۸۸۵۹	۰/۵۵	۲۰۰
۲	۲/۱	۰/۸	۱۱۷/۶۴
۲/۵	۴/۱۰۱۵	۱	۸۶/۹۵
۳	۷/۰۸۷۵	۱/۲	۵۷/۱۴



شکل ۸. مقایسه نمودار نوسانات ارتفاع و ارتفاع نهایی قطره سیال نیوتنی (آب) با تغییر شعاع اولیه قطره با زاویه تماس نهایی ۶۰ درجه.  
Fig. 8. Comparison of height and final fluctuation graph of Newtonian fluid drop (water) with change of initial radius of drop with 60° final contact angle.

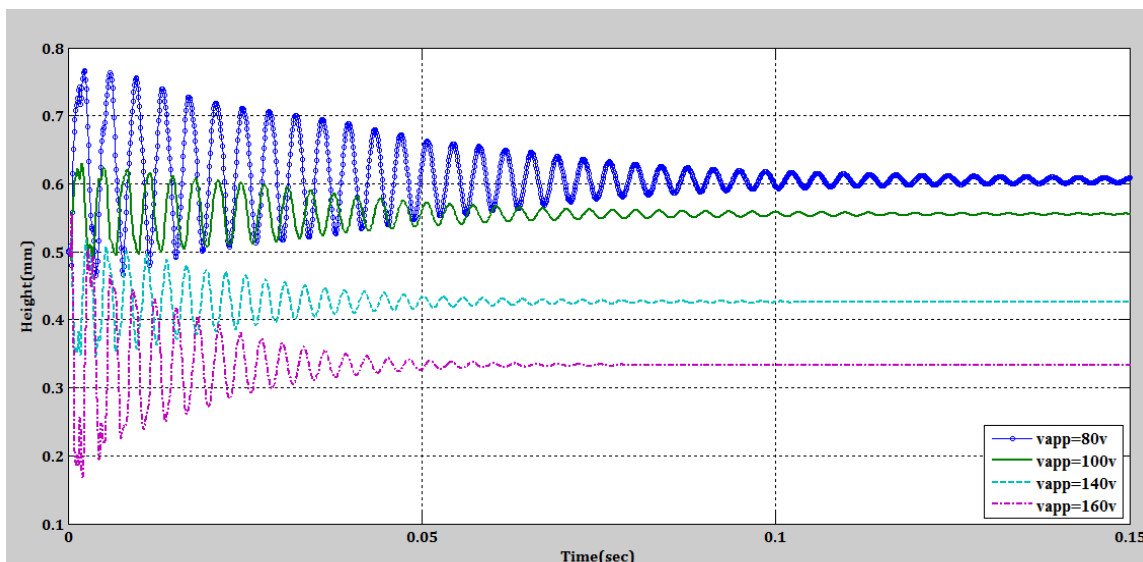
برخوردار است. در ادامه به بررسی این دو پارامتر در حالت‌های مختلف می‌پردازیم.

برخوردار است.

## ۶- نتایج

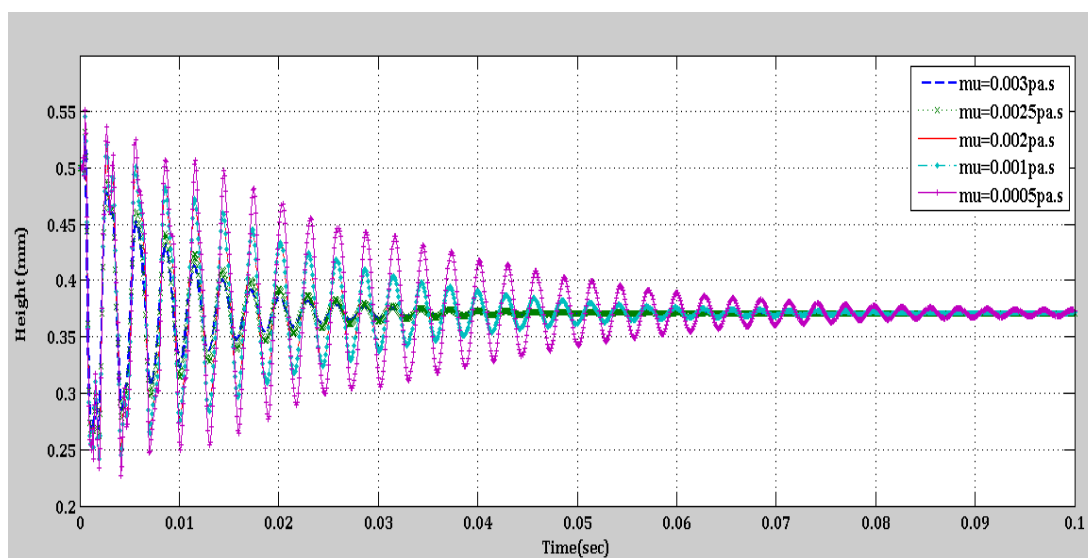
۵-۱- بررسی نوسانات ارتفاع قطره سیال نیوتنی با تغییر حجم سیال  
افزایش حجم سیال و به تبع آن تغییر ارتفاع قطره باعث افزایش دامنه نوسانات می‌شود. از جدول ۴ نتیجه می‌شود که با افزایش ارتفاع اولیه قطره سیال نیوتنی، دامنه نوسانات افزایش می‌یابد اما فرکانس ارتعاشی میرا رو به کاهش است. پارامتر مهم دیگر در ارتعاشات قطره، زمانی است که ارتفاع نهایی قطره ثابت می‌شود که این پارامتر نیز با دقت در شکل ۸ مشاهده می‌شود که هرچه ارتفاع قطره کمتر باشد این زمان نیز کمتر است.

قبل از بررسی نتایج به بیان دو پارامتر مهم در این پژوهش یعنی دامنه اولین موج و فرکانس ارتعاشی میرای قطره می‌پردازیم. دامنه اولین موج از تفاضل موج اول و موج دوم محاسبه می‌شود که این پارامتر می‌تواند سرعت همگرایی به ارتفاع نهایی در قطره را مشخص کند چرا که قطره پس از مدتی ارتعاش در نهایت، در یک ارتفاع معین ثابت خواهد شد. فرکانس ارتعاش میرایی نیز تعداد نوسانات میراشونده در مدت زمان یک ثانیه می‌باشد که با توجه به مشخص بودن زمان میرایی در هر حالتی تعداد نوسانات قابل محاسبه خواهد شد.



شکل ۹. مقایسه نمودار نوسانات ارتفاع و ارتفاع نهایی قطره سیال نیوتنی (آب) با تغییر در ولتاژ نهایی اعمالی (شعاع قطره ثابت اما زاویه تماس نهایی متفاوت است).

Fig. 9. Comparison of the graph of the fluctuations of the height and final height of the Newtonian fluid droplet (water) with the change in the applied final voltage (constant drop radius but the final contact angle is different)



شکل ۱۰. مقایسه نمودار نوسانات ارتفاع و ارتفاع نهایی قطره سیال نیوتنی با تغییر در ویسکوزیته دینامیکی با زاویه تماس نهایی ۶۰ درجه.

Fig. 10. Comparison of height and ultimate fluctuation graph of Newtonian fluid drop with changes in dynamic viscosity with 60° final contact angle.

شده است. ملاحظه می‌شود که برای زوایای بیشتر و کمتر از ۹۰ درجه به علت تفاوت در تغییر زاویه آن‌ها ارتفاع نهایی متفاوت می‌شود.

۵-۳- بررسی نوسانات ارتفاع قطره سیال نیوتنی با تغییر ویسکوزیته دینامیکی

رفتار نوسانات قطره سیال نیوتنی با تغییر ویسکوزیته دینامیکی آن

۵-۲- بررسی نوسانات ارتفاع قطره سیال نیوتنی با تغییر ولتاژ اعمالی طبق رابطه یانگ-لیپمان، که در ابتدا بدان اشاره شد، زاویه تماس قطره تحت پدیده الکتروویتینگ به مقدرا اختلاف پتانسیلی که به سطح دی‌الکتریک اعمال می‌گردد، وابسته است و به تناسب آن ارتفاع قطره نیز در نهایت به مقدار ولتاژ نهایی وابسته خواهد بود. در شکل ۹ تغییر ارتفاع قطره برای مقادیر مختلف اختلاف پتانسیل نشان داده

جدول ۵. تغییرات دامنه و فرکانس قطره سیال نیوتنی (آب) با تغییر در ویسکوزیته دینامیکی برای زاویه تماس نهایی ۶۰ درجه.

Table 5. Amplitude and frequency of Newtonian fluid droplet (water) in final contact angle of 60° by changing dynamic viscosity.

ویسکوزیته دینامیکی (میلی پاسکال ثانیه)	دامنه (میلی متر)	فرکانس (نوسان بر ثانیه)
۰/۵	۰/۳	۵۵۵/۵
۱	۰/۲۹	۵۵۵/۵
۲	۰/۲۷۵	۵۵۵/۵
۲/۵	۰/۲۶۸	۵۵۵/۵
۳	۰/۲۶۳	۵۵۵/۵

جدول ۶. تغییرات دامنه و فرکانس قطره سیال غیر نیوتنی (خون) با تغییر شعاع اولیه قطره برای زاویه تماس نهایی ۶۰ درجه.

Table 6. Amplitude and frequency of non-Newtonian fluid droplet (blood) in final contact angle of 60° by changing radius droplet.

شعاع (میلی متر)	حجم (میلی متر مکعب)	دامنه (میلی متر)	فرکانس (نوسان بر ثانیه)
۱	۰/۲۶۲۵	۰/۳	۵۵۵/۵
۱/۵	۰/۸۸۵۹	۰/۴۵	۲۸۵/۷
۲	۲/۱	۰/۶۵	۲۰۰
۲/۵	۴/۱۰۱۵	۰/۸۵	۱۴۲/۸
۳	۷/۰۸۷۵	۰/۹۵	۱۱۱/۱

بیشتری نسبت به سیال غیر نیوتنی برخوردار است. در مقابل، این سیال غیر نیوتنی بوده که فرکانس بیشتری نسبت به سیال نیوتنی دارد. پارامتر مهم دیگر در ارتعاشات قطره، زمانی است که ارتفاع نهایی قطره ثابت می شود که این پارامتر نیز با دقت در شکل ۱۱ مشاهده می شود که هرچه ارتفاع قطره کمتر باشد این زمان نیز کمتر است.

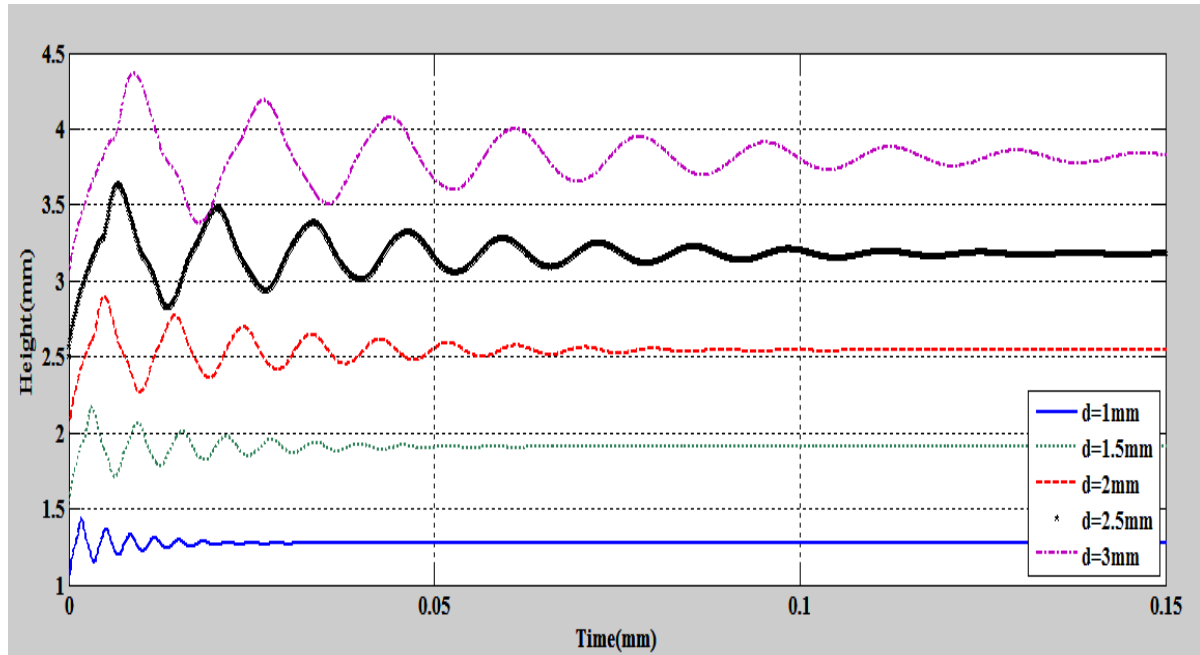
#### ۵-۵- بررسی نوسانات ارتفاع قطره سیال غیر نیوتنی با تغییر ولتاژ اعمالی

همانطور که در بخش قبلی بیان شد تغییر در ولتاژ اعمالی به سطح دی الکتریک، سبب تغییر در زاویه تماس سطح و قطره و در نهایت تغییر ارتفاع در قطره می شود. در شکل ۱۲ نتایج تغییر در اختلاف پتانسیل الکتریکی و به تبع آن زاویه تماس نهایی قطره سیال غیر نیوتنی نشان داده شده است. با مقایسه نتایج بین سیال نیوتنی و غیر نیوتنی این نتیجه حاصل می شود که سیال نیوتنی

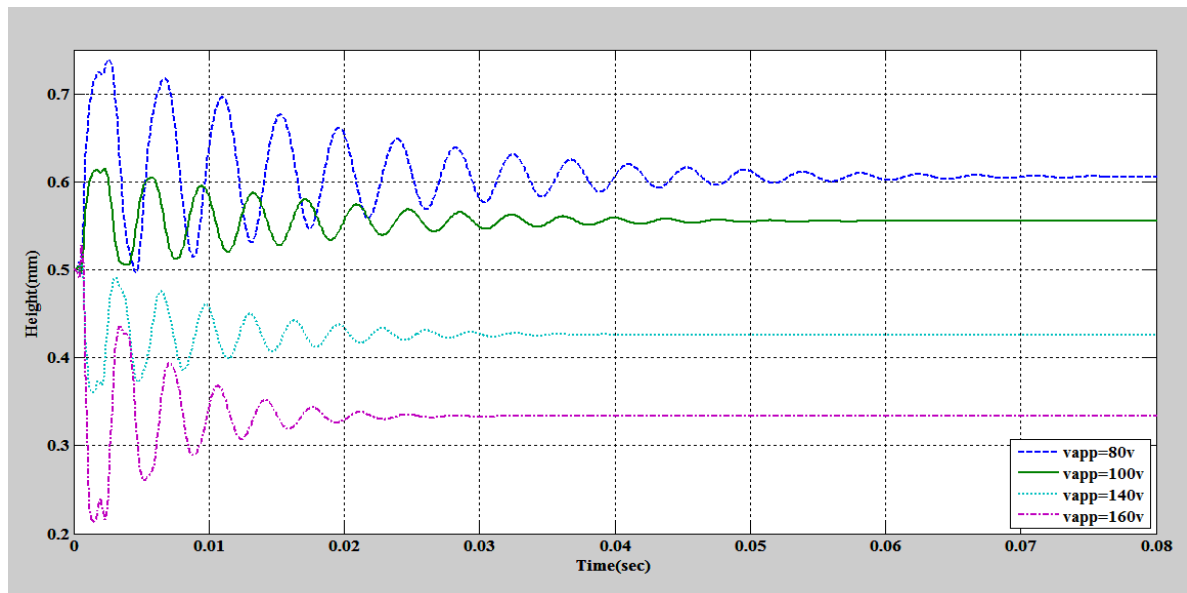
در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. با تغییر ویسکوزیته ارتفاع نهایی قطره همواره ثابت است اما نوسانات آن رفتار متفاوتی دارد. در جدول ۵ دامنه و فرکانس ارتعاشی نشان می دهد که با افزایش ویسکوزیته دینامیکی، فرکانس ارتعاشی میرا کاهش می یابد. به عبارتی سیال با ویسکوزیته بالاتر، دامنه ارتعاشی کمتری خواهد داشت اما فرکانس ارتعاشی میرا وابسته به ویسکوزیته سیال نیست و مقدار آن ثابت است.

#### ۴-۵- بررسی نوسانات ارتفاع قطره سیال غیر نیوتنی با تغییر حجم سیال

افزایش حجم سیال و به تبع آن تغییر ارتفاع قطره باعث افزایش دامنه نوسانات می شود. از جدول ۶ نتیجه می شود که همانند سیال نیوتنی با افزایش ارتفاع اولیه قطره سیال غیر نیوتنی، دامنه نوسانات افزایش می یابد اما فرکانس ارتعاشی میرا رو به کاهش است. اما مقایسه نتایج برای دو سیال نشان می دهد که برای ارتفاع متناظر در هر قطره، میزان حداکثر دامنه نوسانات در سیال نیوتنی، از مقدار



شکل ۱۱. مقایسه نمودار نوسانات ارتفاع و ارتفاع نهایی قطره سیال غیرنیوتنی (خون) با تغییر شعاع اولیه قطره با زاویه تماس نهایی ۶۰ درجه.  
 Fig. 11. Comparison of the graph of the fluctuations of altitude and final height of non-Newtonian fluid (blood) drop with changing initial radius of drop with final contact angle of 60 degrees.

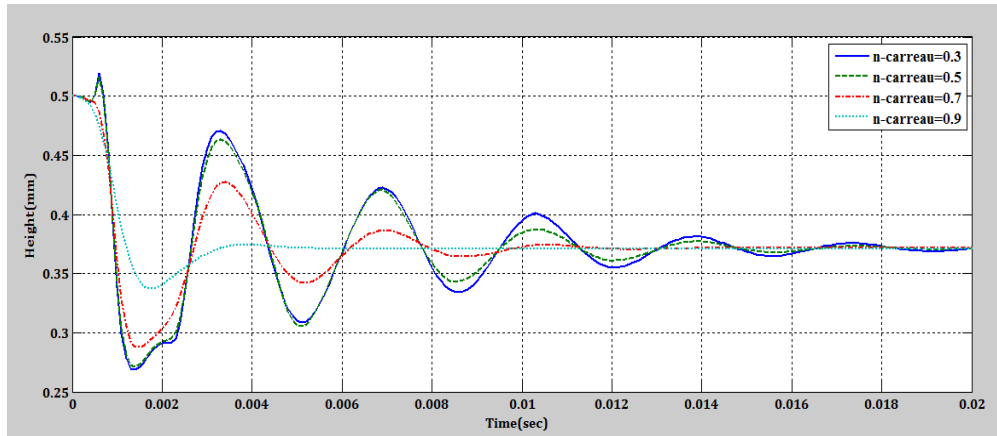


شکل ۱۲. مقایسه نمودار نوسانات ارتفاع و ارتفاع نهایی قطره سیال غیرنیوتنی (خون) با تغییر در ولتاژ نهایی اعمالی (شعاع قطره ثابت اما زاویه تماس نهایی متفاوت است).  
 Fig. 12. Comparison of the graph of the fluctuations of altitude and final height of non-Newtonian fluid droplet (blood) with change in applied final voltage (constant drop radius but final contact angle).

۶-۵- بررسی نوسانات ارتفاع قطره سیال غیرنیوتنی با تغییر ویسکوزیته (تغییر ضریب  $n$  در رابطه کارنو)

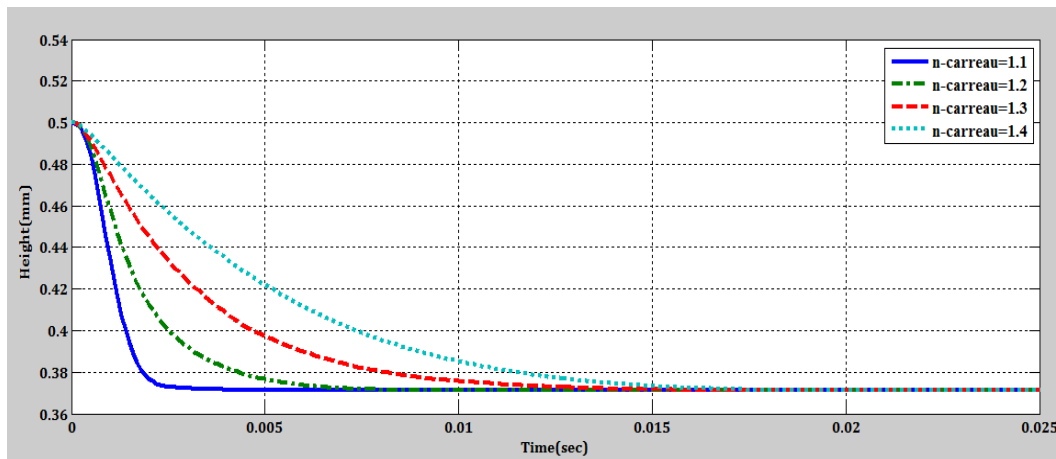
خون نوعی سیال غیرنیوتنی است. همانطور که بیان شد این سیال

دارای دامنه نوسانات ماکزیمم بیشتر و تعداد نوسان بیشتری نسبت به سیال غیرنیوتنی در ولتاژهای اعمالی متفاوت می‌باشد. همچنین زمان نشست در سیال غیرنیوتنی نسبت به سیال نیوتنی کمتر است.



شکل ۱۳. مقایسه نمودار نوسانات ارتفاع و ارتفاع نهایی قطره سیال غیرنیوتنی با تغییر ضریب  $n$  در مدل کارئو برای مقادیر کمتر از یک و با زاویه تماس نهایی ۶۰ درجه.

Fig. 13. Comparison of the graph of the fluctuations of the height and final height of the non-Newtonian fluid droplet by varying the coefficient  $n$  in the Carreau model for values of less than one and with a final contact angle of 60 degrees.



شکل ۱۴. مقایسه نمودار نوسانات ارتفاع و ارتفاع نهایی قطره سیال غیرنیوتنی با تغییر ضریب  $n$  در مدل کارئو برای مقادیر بیشتر از یک و با زاویه تماس نهایی ۶۰ درجه.

Fig. 14. Comparison of the graph of the fluctuations of the height and final height of the non-Newtonian fluid droplet by changing the coefficient  $n$  in the Carreau model for values greater than one and with a final contact angle of 60 degrees.

جدول ۷. تغییرات دامنه و فرکانس ارتعاشی قطره سیال غیرنیوتنی با تغییر ویسکوزیته برای مقادیر کمتر از یک ضریب  $n$

Table 7. Vibration amplitude and frequency of non-Newtonian fluid droplet by viscosity change for  $n$  values less than one.

ضریب $n$	دامنه (میلیمتر)	فرکانس
۰/۳	۰/۲۵	۳۷۰/۳۷
۰/۵	۰/۲۴	۳۷۰/۳۷
۰/۷	۰/۲۱۵	۳۷۰/۳۷
۰/۹	۰/۱۶	۳۷۰/۳۷

دارای ویسکوزیته‌ای متناسب با پارامتر  $n$  در مدل کارئو می‌باشد که تغییر این پارامتر باعث تغییر غیرخطی در ویسکوزیته آن می‌شود. برای خون مقدار این پارامتر برابر با ۰/۳ می‌باشد. در اینجا برای بررسی رفتار دینامیکی قطره سیال غیرنیوتنی تحت پدیده الکترووتینگ تحت مقادیر متفاوت  $n$ ، این ضریب برای مقادیر کمتر و بیشتر از یک بررسی می‌شود. در شکل ۱۳ رفتار این سیال برای مقدار کمتر از یک و شکل ۱۴ برای مقادیر بیشتر از یک ضریب  $n$  نشان داده شده است. از جدول ۷ نتیجه می‌شود که با افزایش مقدار  $n$  تا یک، مقدار دامنه ارتعاشی حداکثر رو به کاهش است. اما مقدار فرکانس ارتعاشات



جدول ۸. تغییرات دامنه و زمان نشست قطره سیال غیرنیوتنی با تغییر ویسکوزیته برای مقادیر ضریب  $n$  بیشتر از یک.

Table 8. Vibration amplitude and frequency of non-Newtonian fluid droplet by viscosity change for  $n$  values greater than one.

ضریب $n$	دامنه (میلی متر)	زمان نشست (میلی ثانیه)
۱/۱	۰/۱۳	۳/۵
۱/۲	۰/۱۳	۸
۱/۳	۰/۱۳	۱۴
۱/۴	۰/۱۳	۱۷

باشد به دلیل منفی شدن توان کارنو مقدار لزجت به صورت غیرخطی با نرخ تنش برشی رابطه عکس خواهد داشت (رابطه (۱۳)). بگونه‌ای که در شکل ۱۵-ب نیز قابل مشاهده است، با افزایش سرعت مقدار لزجت به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد.

$$\frac{\mu - \mu_{inf}}{\mu_0 - \mu_{inf}} = \frac{1}{\left[1 + (\lambda\gamma)^2\right]^{\frac{1-n}{2}}} \quad (13)$$

#### ۸-۵- بررسی رفتار گذرای سیال نیوتنی و غیرنیوتنی

نوسانات ارتفاع قطره پدیده مهمی است که در این مقاله بدان اشاره شده است. این رفتار را می‌توان با تغییرات فشار و تنش برشی سیال در زمان‌های مختلف بررسی کرد. برای اولین بار که زاویه تماس جدید به سطح تماس قطره و دی‌الکترونیک وارد می‌شود، ارتفاع قطره شروع به کم شدن می‌کند تا زمانی که به زاویه تماس نهایی خود برسد. پس از آن به دلیل نیرویی که در اثر تغییر زاویه به قطره وارد می‌شود، شروع به حرکت کرده تا برآیند این نیرو با نیروی حاصل از تنش برشی صفر گردد. همانطور که بیان شد و در شکل‌های قبلی قابل مشاهده است، پس از اعمال زاویه تماس، ارتفاع قطره شروع به کم شدن می‌کند و این کاهش ارتفاع تا زمانی است که قطره به زاویه تماس مطلوب برسد. پس از این زمان به دلیل تنش برشی و نیروی وارد شده در اثر تغییر زاویه و همچنین لزجت سیال، قطره تمایل به برگشت به ارتفاع اولیه خود را دارد که در اثر لزجت سیال قطعاً به ارتفاع اولیه نمی‌رسد. بنابراین در اثر چندین نوسان در نهایت ارتفاع قطره در یک نقطه معین ثابت خواهد شد. برای توجیه این رفتار و توضیح پاسخ گذرای سیال، کانتور فشار و تنش برشی سیال را در زمانی که، قطره برای اولین بار نوسان می‌کند نشان داده خواهد شد.

با تغییر به خصوص مواجه نمی‌شود. با دقت در جدول ۸ این نتیجه حاصل می‌شود که با افزایش این ضریب، دامنه نوسانی ثابت بوده اما زمانی که سیال به ارتفاع نهایی خود می‌رسد افزایش می‌یابد، به عبارتی در مقادیر بیشتر از یک برای  $n$ ، سیال بدون نوسان به ارتفاع نهایی خود می‌رسد.

#### ۷-۵- بررسی لزجت قطره سیال نیوتنی و غیرنیوتنی در مقادیر مختلف

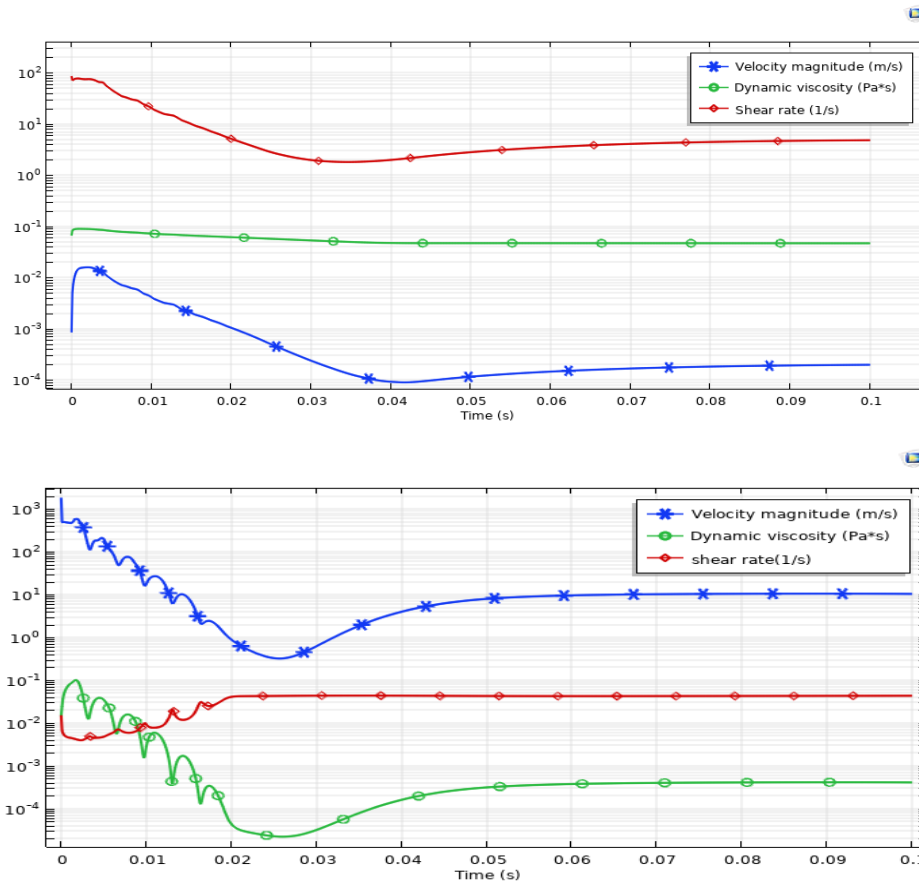
##### ضریب $n$ کارنو با تغییر سرعت قطره

در سیالات نیوتنی لزجت سیال رابطه‌ای کاملاً خطی با تغییرات تنش برشی و نرخ تنش برشی اعمال شده دارد به گونه‌ای که ضریب تبدیل‌کننده این دو مقدار همان لزجت سیال می‌باشد، اما همانطور که در رابطه (۱۰) بیان شد لزجت سیال غیرنیوتنی به صورت خطی با نرخ تنش برشی تغییر نمی‌کند به گونه‌ای که این تغییر وابسته به مقدار توان  $n$  در مدل کارنو می‌باشد. با بررسی رابطه (۱۰) می‌توان نشان داد که تغییر مقدار توان  $n$  مدل کارنو چه اثری را بر مقدار لزجت سیال خواهد داشت.

رابطه (۱۰) را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$\frac{\mu - \mu_{inf}}{\mu_0 - \mu_{inf}} = \left[1 + (\lambda\gamma)^2\right]^{\frac{n-1}{2}}$$

اگر  $n > 1$  باشد توان رابطه کارنو مقدار مثبتی خواهد داشت بنابراین با افزایش نرخ تنش برشی ( $\gamma$ ) میزان لزجت سیال افزایش می‌یابد. از آنجایی که نرخ تنش برشی به مقدار افزایش سرعت سیال در محل تماس سیال با سطح،  $\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) @ y=0$ ، وابسته است، بنابراین با توجه به شکل ۱۵-الف مشاهده می‌شود که این تناسب بین لزجت سیال و سرعت سیال مستقیم است. اما در سیالی که  $n < 1$



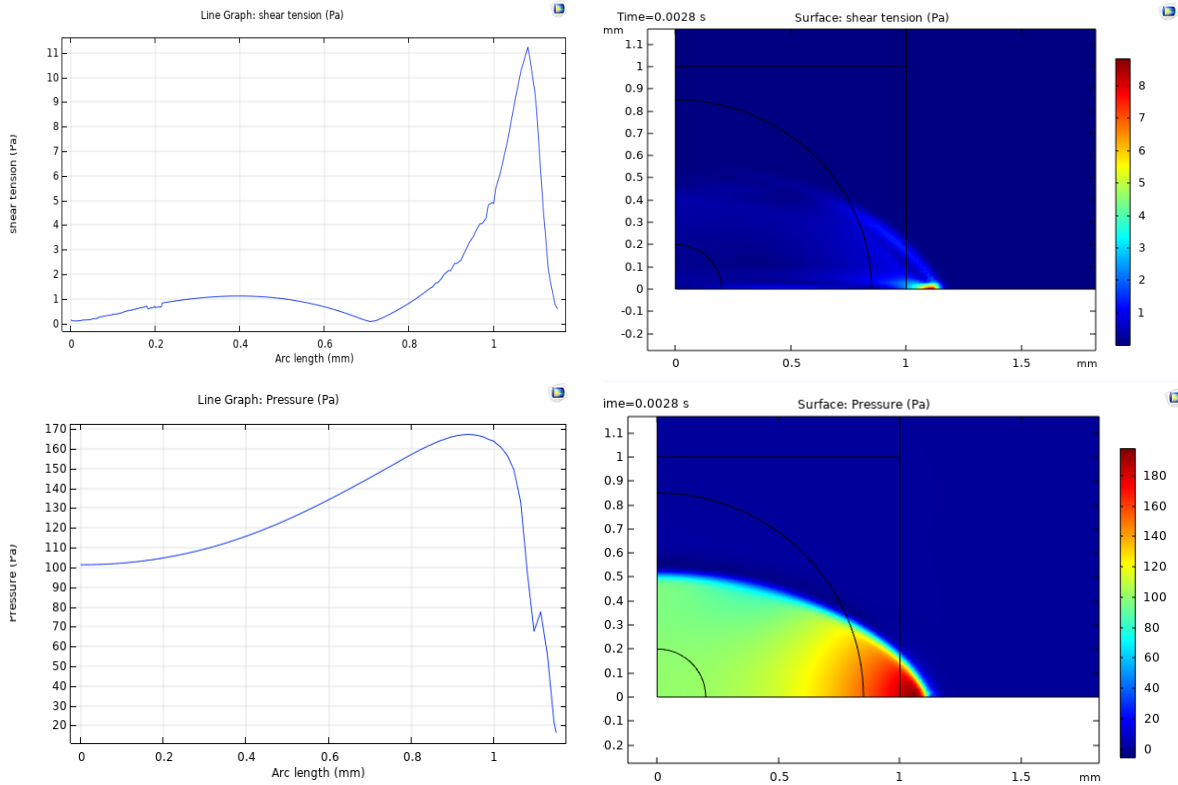
الف

ب

شکل ۱۵. بررسی سرعت، نرخ تنش برشی و ویسکوزیته دینامیکی برای دو حالت الف)  $n > 1$  و ب)  $n < 1$  سیال غیرنیوتنی.  
**Fig. 15. Investigation of velocity, shear stress rate and dynamic viscosity for two modes a)  $n > 1$  and b)  $n < 1$  for non-newtonian fluid.**

در سیال غیرنیوتنی با توان کارنو کمتر از یک مقدار بیشتری دارد لذا نوسانات کمتر و زمان همگرایی آن سریعتر است. در مورد سیال غیرنیوتنی با توان کارنو بالاتر از یک علاوه بر این که فشار کمتری نسبت به بقیه حالات دارد، از تنش برشی بیشتری، که نیروی مقاوم بر حرکت است، برخوردار می‌باشد. لذا از زمان همگرایی کمتری نسبت به بقیه حالات برخوردار است. با این که برای سیال با توان کارنو کمتر از یک کانتور، تنش برشی در تمام قطره یکنواخت نبوده و مشاهده می‌شود که فشار در یک نقطه به طور ناگهانی افزایش می‌یابد اما در سیال با توان کارنو بزرگتر از یک فشار در تمام نقاط ثابت و تنش برشی نیز در تمام قطره ثابت است. به نظر می‌رسد که همین دلیل باعث شود که سیال غیرنیوتنی با توان بیشتر از بدون هیچ نوسانی همگرا شود در صورتی برای سیال با توان کارنو کمتر از یک پس از طی نوساناتی قطره، ثابت می‌شود. همچنین همانگونه که بیان شد مقدار بالای تنش برشی باعث همگرایی سریع‌تر قطره است.

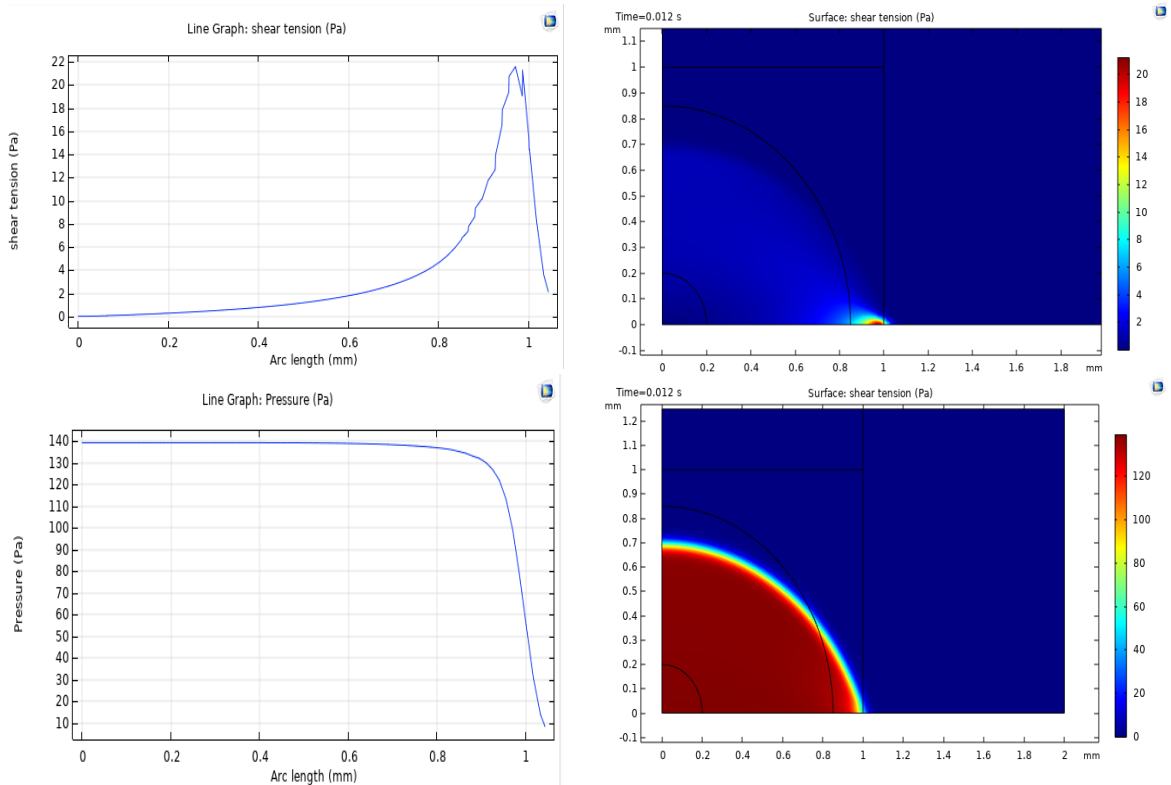
در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ برای تنش برشی و فشار قطره در خط تماس قطره و سطح جامد، کانتور و نمودار هر کدام رسم شده است. از آنجایی که این حالت، زمانی است که قطره شروع به افزایش ارتفاع می‌کند لذا تغییرات فشار و تنش برشی در این نقطه ملاک قرار می‌گیرد. از طرفی در جدول ۹ بیشترین مقدار تنش برشی و فشار برای حالت‌های مختلف سیال نشان داده شده است. از آنجایی که نیروی تغییر زاویه تماس باعث حرکت قطره می‌شود، این نیرو می‌تواند به صورت فشار در سیال ظاهر شود. همچنین تنش برشی مقاوم بر سیال است که هر چه این نیرو بیشتر باشد و فشار وارد بر سیال کمتر باشد باعث می‌شود نوسانات کمتر بوده و در زمان سریعتری قطره از حرکت باز ایستد. با ملاحظه در جدول ۹ مشاهده می‌شود که مقدار فشار در سیال نیوتنی دارای مقدار زیادی است اما از طرفی تنش برشی آن کمترین مقدار است در حالی که در سیال با توان کارنو کمتر از یک مقدار فشار نزدیک به سیال نیوتنی است اما چون تنش برشی



الف

ب

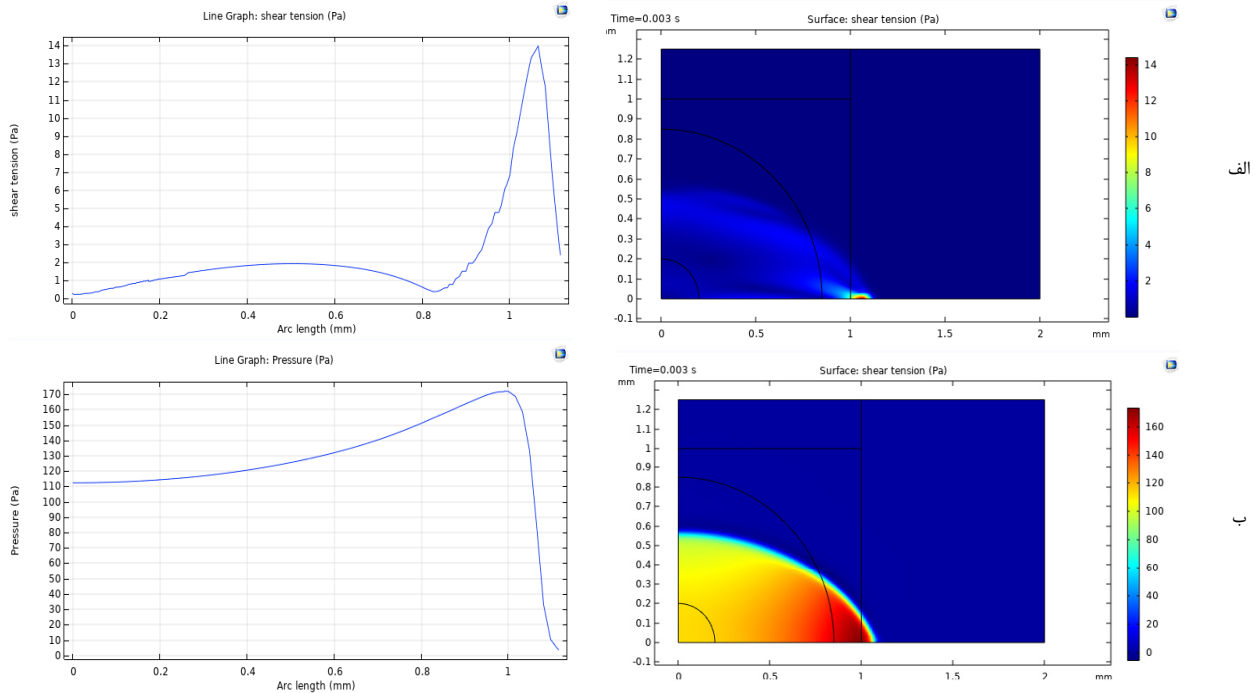
شکل ۱۶. کانتور و نمودار (به ترتیب الف) تنش برشی روی سطح و (ب) فشار روی سطح برای حالتی که  $n=1$  است.  
 Fig. 16. Contour and plot (a) shear stress on the surface and (b) pressure on the surface for  $n = 1$



الف

ب

شکل ۱۷. کانتور و نمودار (به ترتیب الف) تنش برشی روی سطح و (ب) فشار روی سطح برای حالتی که  $n > 1$  است.  
 Fig. 17. Contour and plot (a) shear stress on the surface and (b) pressure on the surface for  $n > 1$ .



شکل ۱۸. کانتور و نمودار (به ترتیب الف) تنش برشی روی سطح و (ب) فشار روی سطح برای حالتی که  $n < 1$  است.  
**Fig 18. Contour and plot (a) shear stress on the surface and (b) pressure on the surface for  $n < 1$ .**

باره همگرا می‌شود.

- نتایج شبیه‌سازی سیال نیوتنی و غیرنیوتنی نشان می‌دهد که نوسانات تغییر ارتفاع برای ارتفاع اولیه متناظر در هر نوع سیال شکل کاملاً متفاوتی دارد. در سیال نیوتنی، نوسان حداکثر دامنه و مقدار فرکانس نسبت به سیال غیرنیوتنی بیشتر است که این اثر کاملاً وابسته به خواص سیال می‌باشد. به گونه‌ای که در سیالات لزج‌تر دامنه نوسانات کاهش می‌یابد اما فرکانس ارتعاشی ثابت است.

- زمان همگرایی در سیالات نیوتنی در مقایسه با سیال غیرنیوتنی بسیار کمتر است. این پدیده به معنای کمتر بودن میزان نوسانات در سیال غیرنیوتنی نیز است.

- رفتار سیالات غیرنیوتنی کاملاً وابسته به ضریب  $n$  در معادله کارئو است. در مقادیر بیشتر از یک برای این ضریب، سیال بسیار سریع و بدون هیچ نوسانی همگرا می‌شود که این زمان نیز به مقدار  $n$  وابسته است.

- برای مقادیر کمتر از یک ضریب  $n$ ، نوسانات سیال غیرنیوتنی مشابه سیال نیوتنی رفتار می‌کند ولی زمان همگرایی و تعداد نوسانات تا رسیدن سیال به حالت تعادل خود، در سیال غیرنیوتنی کمتر است - تغییر در زاویه تماس قطره با تغییر در اختلاف پتانسیل اعمالی

جدول ۹. مقدار تنش برشی و فشار حداکثر قطره قبل از اولین نوسان (شروع اولین افزایش ارتفاع) برای حالت‌های متفاوت مقدار  $n$   
**Table 9. Shear stress and maximum drop pressure before the first oscillation (start of the first increasing in height) for the different states of the value  $n$ .**

تنش برشی (پاسکال)	فشار (پاسکال)	
۱۱/۵	۱۶۸	$n = 1$
۱۴	۱۷۵	$n < 1$
۲۲	۱۴۰	$n > 1$

## ۷- نتیجه‌گیری

در کار پیش‌رو دینامیک یک قطره سیال نیوتنی و غیرنیوتنی کارئو، تحت پدیده الکترووتینگ مدل‌سازی و با نتایج تجربی موجود در مرور ادبیات راستی‌آزمایی گردید. نتایج کلی به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

- رفتار گذرای سیال نیوتنی و غیرنیوتنی مورد بحث و بررسی قرار گرفته شد. علت همگرایی سریعتر سیال غیرنیوتنی با توان کارئو کمتر از یک زیاد بودن مقدار تنش برشی در قطره است. در حالی که در سیال غیرنیوتنی با توان کارئو بزرگتر از یک به دلیل ثابت بودن فشار سیال در تمام نقاط قطره نوسانی ایجاد نشده و سیال به یک

### مراجع

- [1] G. Lippmann, Relations entre les phénomènes électriques et capillaires, Gauthier-Villars Paris, France, 1875.
- [2] U.-C. Yi, C.-J. Kim, Characterization of electrowetting actuation on addressable single-side coplanar electrodes, Journal of Micromechanics and Microengineering, 16(10) (2006) 2053.
- [3] H. Oprins, J. Danneels, B. Van Ham, B. Vandeveldel, M. Baelmans, Convection heat transfer in electrostatic actuated liquid droplets for electronics cooling, Microelectronics Journal, 39(7) (2008) 966-974.
- [4] N. Rajabi, A. Dolatabadi, A novel electrode shape for electrowetting-based microfluidics, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 365(1-3) (2010) 230-236.
- [5] O. Izadpanahi, A. Naji Meidani, G. Jian Abed, M. Passandideh-fard, Numerical investigation of water drop movement within a microchannel under electrowetting phenomenon, in: 2015 2nd International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI) , 2015, pp. 950-955.
- [6] H. Chen, T. Tang, A. Amirfazli, Effect of contact angle hysteresis on breakage of a liquid bridge, The European Physical Journal Special Topics, 224(2) (2015) 277-288.
- [7] Y. Wang, M. Do-Quang, G. Amberg, Viscoelastic droplet dynamics in a Y-shaped capillary channel, Physics of fluids, 28(3) (2016) 033103.
- [8] R.H. Vafaie, B.S. Dudkanlu, N. Fatehi, Theoretical and Simulational Study of Electrowetting on Dielectric (EWOD) Effect, in: Electrical Engineering (ICEE), Iranian Conference on, IEEE, 2018, pp. 48-52.
- [9] A. Banpurkar, M.H. Duits, D.v.d. Ende, F. Mugele, Electrowetting of complex fluids: perspectives for rheometry on chip, Langmuir, 25(2) (2008) 1245-1252.
- [10] H. Zeng, A.D. Feinerman, Z. Wan, P.R. Patel, Piston-motion micromirror based on electrowetting of liquid metals, Journal of Microelectromechanical Systems, 14(2) (2005) 285-294.
- [11] R. Yan, T.S. McClure, I.H. Jasim, A.K.R. Koppula, S. Wang, M. Almasri, C.-L. Chen, Enhanced water capture

آن رفتار مشابهی در هر دو نوع سیال ایجاد می‌کند با این تفاوت که در اینجا نیز، زمان نشست و دامنه نوسان کمتری برای سیال غیرنیوتنی نسبت به سیال نیوتنی وجود دارد.

- افزایش لزجت در هر نوع از سیال، منجر به کاهش دامنه نوسانات سیال به صورت مجزا می‌شود اما فرکانس ارتعاشی هر کدام ثابت می‌ماند.

- نشان داده شد که برای سیال غیرنیوتنی در  $n > 1$  سرعت سیال و لزجت آن دارای رابطه مستقیم است. این در حالی است که برای  $n < 1$  سرعت سیال و لزجت آن به طور غیرمستقیم تغییر می‌کند.

### علائم انگلیسی

$d$	فاصله بین دی‌الکترونیک و لایه آب‌گریز
$V_{app}$	پتانسیل الکتریکی اعمالی
$n$	ضریب قدرت

### علائم یونانی

$\epsilon_0$	ثابت دی‌الکترونیک در هوا
$\epsilon_r$	ضریب گذردهی الکتریکی دی‌الکترونیک
$\mu_0$	ویسکوزیته نرخ برش صفر
$\mu_{inf}$	ویسکوزیته مطلق برشی
$\lambda$	زمان نشست
$\alpha$	کسر حجمی
$\theta_0$	زاویه تماس اولیه سطح و قطره
$\theta_V$	زاویه تماس سطح و قطره پس از اعمال پتانسیل الکتریکی
$\gamma_{SG}$	کشش سطحی سیال ۱- جامد
$\gamma_{SL}$	کشش سطحی سیال ۲- جامد
$\gamma_{LG}$	کشش سطحی سیال ۱- سیال ۲

- Mechanical Systems, IEEE, 2008, pp. 848-851.
- [16] G. McHale, B.V. Orme, G.G. Wells, R.A. Ledesma-Aguilar, Apparent Contact Angles on Lubricant Impregnated Surfaces/SLIPS: From Superhydrophobicity to Electrowetting, *Langmuir*, (2019).
- [17] J. Hong, Y.K. Kim, K.H. Kang, J.M. Oh, I.S. Kang, Effects of drop size and viscosity on spreading dynamics in DC electrowetting, *Langmuir*, 29(29) (2013) 9118-9125.
- [18] A. Tröls, E.K. Reichel, B. Jakoby, FEM modeling and capillary wave analysis of electrowetting induced droplet oscillations, in: 2018 IEEE SENSORS, IEEE, 2018, pp. 1-4.
- [19] Chhabra RP. Non-Newtonian fluids: an introduction. In *Rheology of complex fluids 2010* (pp. 3-34). Springer, New York, NY.
- [20] M. Ramezanpour, M. Maerefat, M. Mokhtari-Dizaji, The effects of compliance mismatch on the End to Side bypass graft, *Modares Mechanical Engineering*, 15(5) (2015) 279-286.
- induced with electrowetting-on-dielectric (EWOD) approach, *Applied Physics Letters*, 113(20) (2018) 204101.
- [12] J.S. Kuo, P. Spicar-Mihalic, I. Rodriguez, D.T. Chiu, Electrowetting-induced droplet movement in an immiscible medium, *Langmuir*, 19(2) (2003) 250-255.
- [13] S. Alavi, M. Passandideh-Fard, M.H. Tafteh, Electrowetting actuation for a sessile liquid drop: experiments and simulations, in: ASME 2011 9th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, American Society of Mechanical Engineers, 2011, pp. 609-618.
- [14] R.S. Hale, V. Bahadur, Electrowetting heat pipes for heat transport over extended distances, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 5(10) (2015) 1441-1450.
- [15] J. Gong, G. Cha, Y.S. Ju, Thermal switches based on coplanar EWOD for satellite thermal control, in: 2008 IEEE 21st International Conference on Micro Electro

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Izadi, A. Moosavi, *Numerical Study of the Dynamics of Non-Newtonian Carreau Droplets under Electrowetting phenomenon*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(Special Issue 1) (2021) 319-338.

DOI: 10.22060/mej.2019.16624.6401

