

Laboratory Investigation of the Formation, Shape Change, and Movement of Viscoelastic Droplets of Wormlike Micelles by the Shadowgraphy Method

A. Afzal*¹M. Sefid²M. Norouzi³

Yazd University, Yazd, Iran.

Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran..

(Received: 2024/07/19, Revised: 2024/10/15, Accepted: 2024/11/12, Published: 2024/12/01)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1403.13.2.2.0>

ABSTRACT

In this study, we investigate the experimental influence of wormlike micelles on the formation and deformation of viscoelastic droplets, comparing them with equivalent Newtonian fluids. Employing laboratory methods and advanced equipment, we utilize image processing techniques. Non-Newtonian fluids are formulated using combinations of water, CTAB, and KBr, while equivalent Newtonian fluids comprise water and glycerin in varying concentrations. The experiment employs four needles with four distinct flow rates. Increasing needle diameter and flow rate correspondingly increases parameters such as droplet size and volume. Additionally, the fluid viscosity resembles that of wormlike micelles, displaying unique behavior compared to Newtonian fluids. At a distance of 22 mm from the needle, the average elongation width behind the droplet of the wormlike micelle in different states measures approximately 1.3 mm. Notably, in viscoelastic fluids, trailing droplets form upon complete release, whereas in equivalent Newtonian fluids, no such fluid flow or trailing droplets occur upon release.

Keywords: Laboratory Study, Droplet Formation, Viscoelastic Fluids, Wormlike Micelles

بررسی آزمایشگاهی تشکیل، تغییر شکل و حرکت قطرات ویسکوالاستیک از نوع میسل‌های مارپیچی به روش شدوگرافی

محمود نوروزی

محمد سفید^۱علی افضل*^۱

دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

دانشگاه یزد، یزد، ایران.

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۹، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۲، انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱)

چکیده

در پژوهش حاضر، تأثیر آزمایشگاهی میسل‌های مارپیچی در تشکیل و تغییر شکل قطرات ویسکوالاستیک مورد بررسی قرار گرفته و با سیال نیوتنی معادل مقایسه شده است. به این منظور از روش‌های آزمایشگاهی و تجهیزات آزمایشگاهی پیشرفته به کمک پردازش تصاویر استفاده شده است. برای ساخت سیال غیرنیوتنی از ترکیب آب و CTAB و KBr و از ترکیب آب و گلیسرین در غلظت‌های مختلف برای سیال نیوتنی معادل استفاده شده است. جهت انجام آزمایش از چهار سوزن و چهار دبی مختلف استفاده شده است که با افزایش قطر سوزن و دبی، پارامترهای مختلف همچون قطر کوچک و بزرگ قطره و به تناسب آن حجم قطره افزایش پیدا می‌کند همچنین به خاصیت منبسط‌شوندگی سیال میسل کرم‌مانند پی برده شده است که رفتار متفاوتی نسبت به سیال نیوتنی دارد. در فاصله ۲۲ میلی‌متری از سوزن، میانگین پهنای کشیدگی پشت قطره میسل کرم‌مانند در حالت‌های مختلف حدود ۱/۳ میلی‌متر است که در این سیال در زمان رهایی کامل قطره، قطره پیرو وجود دارد؛ اما در سیال نیوتنی معادل نه تنها هیچ جریان سیالی وجود ندارد؛ بلکه در زمان رهایی کامل آن نیز هیچ قطره پیرو وجود ندارد.

واژه‌های کلیدی: مطالعه آزمایشگاهی، تشکیل قطره، سیالات ویسکوالاستیک، میسل‌های کرمی شکل

۱. دانشجوی دکتری (نویسنده پاسخگو): ali_afzal01@gmail.com

۲. استاد: mhsefid@yazd.ac.ir

۳. دانشیار: mnorouzi@shahroodut.ac.ir

فهرست علائم

علائم انگلیسی

D	قطر بزرگ قطره، mm
d	قطر کوچک قطره، mm
G	مدول برشی، pa
m	جرم، gr
q	دبی حجمی، $\frac{mL}{H}$
T	دما، °C
t	زمان، ms
V	حجم قطره، mm^3

علائم یونانی

$\dot{\gamma}$	نرخ برش، $\frac{1}{s}$
η	ویسکوزیته، mpa.s
λ	ثابت زمانی رهایی از تنش، s
ρ	جرم حجمی، $\frac{kg}{m^3}$
τ	تنش برشی، pa
ω	سرعت زاویه‌ای، $\frac{rad}{s}$

۱- مقدمه

سیالات در زندگی و صنایع مختلف تأثیر بسزایی دارند. به همین دلیل توسط پژوهشگران بسیاری جهت شناخت ویژگی‌ها و خواص این مواد کارهای علمی فراوانی انجام شده است. رابطه خطی بین تنش برشی با گرادیان سرعت و تنش تسلیم صفر، وجه تمایز بین سیال نیوتنی با غیرنیوتنی است. سیال‌های غیرنیوتنی به سه گروه کلی تقسیم‌بندی می‌شوند: سیالات غیرنیوتنی مستقل از زمان، سیالات غیر نیوتنی وابسته به زمان و سیالات ویسکوالاستیک [۱].

پژوهش‌های بسیاری در زمینه بررسی فرآیند تشکیل، رشد، جدایش و تغییر شکل قطره سیال‌های نیوتنی و غیر نیوتنی انجام شده است. ولی اثر سورفاکتنت‌ها در سیالات ویسکوالاستیک بر پارامترهای مختلفی از قبیل زمان تشکیل قطره، قطر و طول ناحیه گلوبی، قطر و طول قطره تشکیل شده و زاویه تماس مورد بررسی قرار نگرفته است. به همین دلیل، پژوهش حاضر در راستای بررسی آزمایشگاهی اثر wormlike micelles در تشکیل قطرات ویسکوالاستیک

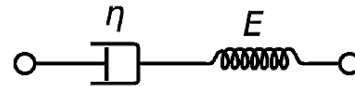
انجام شده است. رژیم تشکیل قطره در دو حالت درپینگ و جتینگ مورد بررسی قرار گرفته که از این لحاظ پژوهش حاضر نسبت به پژوهش‌هایی نظیر اسمولگ و بالمونت (۲۰۰۳) [۲] که تنها در رژیم درپینگ مورد بررسی قرار گرفته دارای نوآوری است. در پژوهش حاضر متغیرهای بیشتری مثل اندازه قطره، شکل قطره، تغییرات ناحیه گلوبی، زمان فرآیند جدایش قطره و همچنین تأثیر میزان میسل‌های گرمی‌شکل بر متغیرهای یاد شده مورد بررسی قرار گرفته شده است که همان تشکیل، حرکت قطره و تغییر شکل آن در طی مسیر است. مرحله تشکیل قطره یکی از مراحل بااهمیت در پژوهش مذکور است. تعیین حجم قطره از پارامترهای مهم دیگر است که به عوامل ثانویه مثل شکل نهایی قطره و سرعت حدی بستگی دارد. شکل قطره نیز اهمیت ویژه‌ای دارد. به همین دلیل برای شناخت کلی فرآیند و پیش‌بینی رفتارهای بعدی سیستم، می‌بایست پیچیدگی‌های رفتار قطره را مورد بررسی قرار داد. بنابراین، در پژوهش حاضر اثر تغییر قطر نازل و مقدار دبی بر پارامترهای مختلف همچون تغییرات قطر و حجم قطره و به‌طور کلی پارامترهای فیزیکی در تشکیل قطره و تغییرات شکل قطره از زمان تشکیل قطره در ابتدای نازل تا زمان رهایی کامل قطره سیال غیرنیوتنی میسل گرم‌مانند و سیال نیوتنی معادل آن مورد بررسی قرار گرفته شده است.

جهت ساخت سیال غیرنیوتنی میسل گرم‌مانند از سه ماده آب، KBr (Potassium bromide) و Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) استفاده شده است. جهت ساخت سیال نیوتنی معادل از ترکیب آب و گلیسرین بهره برده و به کمک همزن مغناطیسی با گرم‌کن برقی با یکدیگر مخلوط شده‌اند. به کمک دستگاه رئومتر، خواص مواد فوق در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفته و بهترین سیال ممکن جهت انجام پژوهش انتخاب شده است. به دلیل اینکه سیال غیرنیوتنی میسل گرم‌مانند و به‌طور کلی سیال ویسکوالاستیک جز سیالات پیچیده هستند، باعث شد که زمان و انرژی بسیار زیادی در ساخت این سیال صرف شود که این به نوبه خود نوآوری محسوب می‌شود. جهت انجام این پژوهش از ۴ نوع سوزن با اندازه مختلف که توسط دستگاه‌های تراش مخصوص، بادقت بالا نوک آنها صاف شده استفاده گردیده است.

۲- مبانی نظری

۲-۱- مدل ماکسول

یکی از بهترین مدل‌هایی که از ترکیب یک فنر و دمپر سری (شکل ۱) تشکیل شده و جهت تفسیر نتایج تست نوسان مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل ماکسول است.



شکل (۱): مدل فنر و دمپر ماکسول

مدل ماکسول به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$\tau + \lambda \dot{\tau} = \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

با قراردادن روابط فوق در رابطه مدل ماکسول خواهیم داشت:

$$\tau_0 \cos wt - \lambda \tau_0 \sin wt = \eta \dot{\gamma} \quad (2)$$

که با توجه به فرضیات خواهیم داشت:

$$\gamma_0 = \frac{\lambda \tau_0}{\eta \cos \theta}, \quad \tan \delta = \frac{1}{\lambda w} \quad (3)$$

هنگامی که سیال ویسکوالاستیک تحت تنش نوسانی قرار می‌گیرد رابطه تنش و نرخ برش به شکل ذیل تعریف می‌شود:

$$\tau^* = G^* \cdot \gamma^* \quad (4)$$

$$\tau^* = \tau \cdot e^{i\omega t} = (G' + iG'') \gamma e^{i(\omega t - \delta)} \quad (5)$$

که بخش G' معرف مدول برشی رفتار جامد الاستیکی است و بخش G'' معرف ویسکوزیته رفتار سیالی است.

مدولهای مادی G' و G'' در نتایج آزمایشگاهی برای نقاطی که دو نمودار همدیگر را قطع می‌کنند برابر هستند.

$$\text{پس از رابطه } \tan \delta = \frac{G''}{G'} \text{ خواهیم داشت:}$$

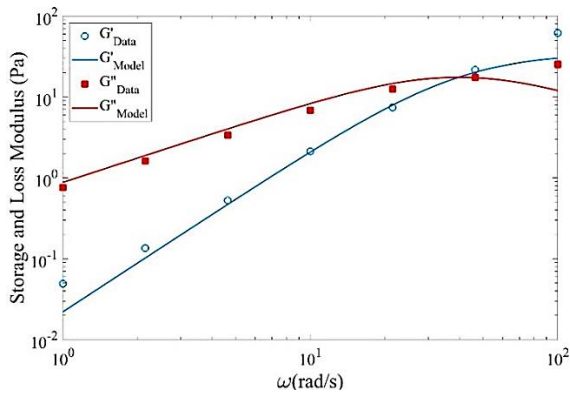
$$\tan \delta = \frac{1}{\lambda w} = 1 \Rightarrow w = \frac{1}{\lambda} \quad (6)$$

و برای حالتی که مدولهای G' و G'' هیچ تلاقی نداشته باشند از روابط (۵) و (۶) استفاده می‌شود:

$$G' = \frac{\lambda \eta \omega^2}{1 + \lambda^2 \omega^2} \quad (7)$$

$$G'' = \frac{\eta \omega}{1 + \lambda^2 \omega^2} \quad (8)$$

در پژوهش حاضر همانطور که از شکل ۲ دیده می‌شود، نمودار G' و G'' برحسب فرکانس زاویه‌ای با هم تلاقی داشته‌اند و همچنین ضرایب مدل ماکسول برابر با s $\lambda(s) = 0.0252$ و $\eta(\text{pa.s}) = 0.8799$ است.



شکل ۲: نمودار G' و G'' برحسب فرکانس زاویه‌ای برای سیال ورم لایک میسل

۲-۲- پیشینه پژوهش

در زمینه تشکیل قطره، تصاویر ارائه شده توسط هازر و همکارانش [۳] در سال ۱۹۳۶ یکی از نخستین کارهای علمی ارزشمندی است که پیچیدگی‌های این پدیده را نشان می‌دهد. تشکیل قطره در سیال امتزاج ناپذیر دیگر نیز برای نخستین بار توسط هیور و تری بال [۴] در سال ۱۹۵۰ به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت و تأثیر پارامترهایی همچون شعاع نازل، کشش سطحی، سرعت، چگالی و لزجت بر اندازه قطره در سیستم‌های مایع بررسی شد. با افزایش شعاع نازل و کشش سطحی، شعاع قطره زیادتر می‌شود. همچنین نشان دادند که لزجت سیال تشکیل‌دهنده بی‌تأثیر بوده و کاهش اختلاف چگالی میان دوفاز پخش شونده و پخش‌کننده شعاع قطره را افزایش می‌دهد. از مطالعات دیگر در مورد تشکیل قطره، می‌توان به بررسی‌های چلی و میستر [۵] در سال ۱۹۶۸ و هرتجس و همکاران [۶] در سال ۱۹۷۱ اشاره کرد که تشکیل قطره را به دو مرحله اصلی تقسیم‌بندی کردند. نتایج پیش‌بینی شده پژوهش‌ها با داده‌های تجربی بیشتر از ۲۰ درصد اختلاف دارند. آزمایش‌های انجام شده توسط شی و همکاران [۷] در سال ۱۹۹۴ تأثیر افزایش لزجت قطره در شکل آن را نشان داد. آنها فهمیدند که کشیده‌تر شدن باریکه سیال (که قطره را به مایع درون سوزن متصل می‌کند) در اثر افزایش لزجت است. ژانگ و بساران [۸] در سال ۱۹۹۵ به روش آزمایشگاهی به تحلیل دینامیک تشکیل قطره در هوای

محیط اطراف و دبی اندک پرداختند. راثو و همکاران [۹] در زمینه تشکیل قطره در محلول سورفاکتنت در سال ۲۰۱۴ آزمایش‌هایی را انجام دادند که در حضور سورفاکتنت SDS بود. وقتی که قطر قطره کمتر از یک میلی‌متر بود، شکل قطره را کروی اعلام کردند. در مورد قطره‌های بزرگ‌تر، دیدند که قسمت‌هایی از قطره پهن است و حالت کروی ندارد. پونس تورس و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۷ به دام افتادن مقدار زیادی از سورفاکتنت در داخل قطره پیرو را نشان دادند. آن‌ها با بررسی‌های تئوری و تجربی که انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که لزجت سطح نقش مهمی را در تجمع سورفاکتنت‌ها در قطره پیرو دارد. یلدیریم و باساران [۱۱] با صرف‌نظر کردن اثر الاستیک، مدل‌های دوبعدی و یک‌بعدی سیال‌های نیوتنی و رقیق شونده با برش^۱ را مقایسه کرده‌اند. طی فرایند جدایش قطره، مهم‌ترین دستاورد اضافه‌کردن پلیمر به حلال‌های نیوتنی با لزجت کم، ایجاد پایداری در دینامیک جریان است [۱۱-۱۳]. پس در اکثر مواقع در زمان تشکیل فیلامان اولیه و همچنین در نزدیکی و در داخل ناحیه جدایش، زنجیره‌های پلیمری به دلیل اثر جریان‌های کشسانی کشیده می‌شوند و در نتیجه، تنش لزج به‌صورت قابل‌توجهی افزایش می‌یابد که باعث بیش‌تر شدن پایداری فیلامان می‌شود [۱۲]. مون و همکاران [۱۳] در سال ۱۹۹۸ تعدادی از محلول رقیق و نیمه رقیق پلی‌اتیلن اکسید^۲، جدایش جت‌های ویسکوالاستیک را مورد تحلیل قرار دادند. ترکیب حلال را تغییر دادند تا برای همه سیال‌ها کشش سطحی و لزجت تقریباً ثابت بماند و با زیاد شدن وزن مولکولی، لزجت کشسانی ظاهری^۳ نیز زیاد شده است. کوپروایت^۴ و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۰۲ با به‌کارگرفتن مجموعه‌ای از سیال‌های ایده‌آل الاستیک با لزجت کم و همچنین یک محلول نیوتنی معادل که تشکیل شده است از آب و گلیسرول، تحت اثر گرانش به‌عنوان تابعی از الاستیسیته، دینامیک تشکیل قطره را تحلیل کرده‌اند. در زمینه تشکیل قطره در سیالات ویسکوالاستیک بهات^۵ و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۰۸ برای مایع‌های ویسکوالاستیک با کرنش سختی ضعیف، دینامیک تغییر شکل کشسانی را در فیلامان با رابطه‌های

ساختاری گزیکس، FENE-P، FENE-CR مدل و به روش عددی، اعداد موینگی کوچک بررسی کرده‌اند. نوروزی و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۲۱ به‌صورت تجربی و کار آزمایشگاهی به بررسی اثرات قطرات نیوتنی و ویسکوالاستیک بر روی سطوح پرداختند. قابل‌ذکر است که تأثیر قطرات در صنایع مختلف مثل نفت و گاز، رنگ‌آمیزی و همچنین در فرآیندهای خنک‌سازی سطوح و بسیاری از صنایع و فرآیندهای دیگر کاربرد فراوانی داشته است. به همین دلیل مورد بررسی قرار گرفته است و مدل غیرنیوتنی با مدل نیوتنی مقایسه شده است. اسمولکا^۶ و بلمونته^۷ [۲] در مورد میسل‌های کرمی‌شکل در سال ۲۰۰۳ سقوط قطره در هوا را با توجه به آزمایش‌هایی که بر روی دو محلول آبی استاندارد حاوی میسل‌های کرم‌مانند^۸ بود مشاهده و بررسی کرده‌اند. آنها متوجه شدند که ناپایداری باعث جدایش قطره‌های سیال می‌گردد و علت آن ناشی از پدیده‌ای موضعی است که با ناپایداری‌های محلول‌های پلیمری (از نوع مهره‌های هم‌رشته) و سیالات نیوتنی (از نوع رابلی^۹) به‌شدت متفاوت است. قطره پیرو هم همچنین با جدا شدن سیال‌های عنوان شده به وجود نیامده است. برتولا و وانگ [۱۶] در سال ۲۰۱۵ با بررسی زاویه تماس دینامیکی برای محلول‌های پلیمری دریافتند که با افزایش غلظت پلیمر زاویه تماس دینامیکی افزایش یافته و همچنین زاویه تماس در حالت جمع‌شدن قطره محلول پلیمری کمتر از حالت مشابه برای آب مقطر است. چوی و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۶ با تجزیه بردار سرعت به دو بردار سرعت مماسی و عمودی بر نقطه برخورد تأثیرات هرکدام از سرعت‌ها را بر پخش‌شدن و جمع‌شدن قطره بر روی سطوح آب‌گریز بررسی کردند. اکبرزاده، نوروزی و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۲۲ طی پژوهشی تجربی، برخورد و ورود کره‌های آب‌گریز و آب‌دوست به سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی را بررسی کردند. در این پژوهش با استفاده از دوربین پرسرعت پیشرفته مسیر کره‌ها، از ضربه تا انتهای مسیر حرکت ثبت شده است و نتیجه این شد که کره‌ها در سیالات نیوتنی راحت‌تر و سریع‌تر نسبت به سیالات غیرنیوتنی حرکت می‌کنند. اوراسیا و جوزفیدز [۱۹] در سال ۲۰۱۵ نیز تشکیل

⁶ Smolka

⁷ Belmonte

⁸ Wormlike micelles

⁹ Rayleigh-type

¹ Shear-thinning

² Poly(ethylene oxide)

³ Apparent extensional viscosity

⁴ Cooper-White

⁵ Bhat

پرسرعت، نورافکن‌ها جهت نورپردازی، پمپ سرنگی و ... نشان داده شده است.

قطره را در یک سیال ساکن که حاوی سورفاکتنت بوده و همچنین تحت نیروی شناوری قرار داشت مورد بررسی قرار دادند. برای بررسی قطره، سه نوع هیدروکربن انتخاب شد و در ۴ غلظت از سورفاکتنت سدیم دودسیل سولفات، تغییرات اندازه قطره نسبت به نوع ماده تشکیل‌دهنده آن، مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، غلظت و دبی حجمی سورفاکتنت را نیز ارائه دادند. نتیجه این پژوهش این بود که اندازه قطره در دبی‌های حجمی، پایین است و در حضور سورفاکتنت، به مقدار ناچیزی زیاد می‌شود. زاوالا و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۵ باهدف بررسی اثر جریان خارجی بر روی فرآیند تشکیل قطره از سه نوع سورفاکتنت کاتیونی، آنیونی و غیریونی استفاده کردند و همچنین از دو نوع هیدروکربن برای فاز قطره استفاده کردند. موضوع مورد بررسی در این پژوهش این است که اثر سرعت جریان سیال بیرونی که به‌صورت جریان اعمال شده در راستای عمود بر جهت تشکیل قطره تعریف می‌شود، بررسی شود. در این آزمایش مشخص گردید با افزایش غلظت سورفاکتنت، قطر قطره کاهش می‌یابد. همچنین وجود جریان خارجی باعث می‌شود که قطر قطره تشکیل شده و زمان رشد قطره قبل از جداشدن، کاهش یابد. بیرجندی و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۱۷ به مطالعه عددی در مورد تشکیل قطره ویسکوالاستیک پرداختند. باتوجه به اینکه یکی از مدل‌های مناسب و مورد استفاده در تحلیل قطره‌ها، مدل گزیکس است، در این پژوهش هم این مدل مورد استفاده قرار گرفته است که ویژگی‌های اصلی تشکیل قطره را مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج به این صورت است که افزایش ضریب تحرک در معادله گزیکس، عدد وایزبرگ و نسبت گرانروی باعث افزایش محسوس طول قطره و همچنین باعث کاهش اندک در حجم اولیه می‌شود. از طرف دیگر افزایش عدد گرانوشی بوند باعث افزایش طول قطره می‌گردد، درحالی‌که حجم اولیه کاهش می‌یابد.

۳- روش تحقیق

پژوهش حاضر به‌صورت تجربی و کار آزمایشگاهی در آزمایشگاه سیالات پیشرفته و آزمایشگاه آشکارسازی انجام شده و به کمک روش‌های پردازش تصویر مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در شکل ۳ چیدمان و محل قرارگیری دستگاههای آزمایشگاهی، دوربین

شکل (۳): چیدمان تجهیزات

جهت ساخت سیال غیرنیوتنی میسل کرم شکل ابتدا مواد CTAB، KBr و آب به‌وسیله همزن مغناطیسی با گرم‌کن برقی در شرایط خاص با هم ترکیب می‌شوند. سپس خواص سیال توسط دستگاه رئومتر که با ترکیبات مختلف به‌دست‌آمده مورد بررسی قرار می‌گیرد تا بهترین حالت سیال غیرنیوتنی برای ادامه روند پژوهش انتخاب شود. سیال نیوتنی معادل از ترکیب آب و گلیسیرین همانند قبل و به کمک دستگاه ویسکومتر انتخاب می‌شود. در مرحله بعد سیال‌های ساخته‌شده انتخابی در دبی‌های مختلف به‌وسیله نازل یا سوزن‌های مختلف که در جدول ۱ اطلاعات مربوط به سوزن‌ها آورده شده است (که در هر کدام ۴ حالت مختلف در نظر گرفته شده است). از فاصله‌ای ثابت و شرایط مکانی یکسان به کمک پمپ سرنگی قطرات سیال را رها کرده و به کمک دوربین پرسرعت جزئیات حرکت و تغییر شکل قطره عکسبرداری می‌گردد. سپس پردازش تصویر بر روی عکس‌های گرفته شده توسط دوربین پرسرعت صورت گرفته و نتایج بدست آمده از آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که کلیه تست‌ها و آزمایش‌های مربوط به عکس‌ها و رئومتری آماری همه سه مرتبه انجام شده است و داده‌های موجود میانگین آنها است. دقت دستگاه ویسکومتر ۱ درصد و تکرارپذیری آن ۰/۵ درصد است. همچنین دقت ترازو مورد استفاده در این پژوهش تا ۰/۰۰۱ گرم است که قابلیت تکرارپذیری تا ۱ mg را دارد.

جدول (۱): مشخصات سوزن

جدول (۲): مقدار و شرایط مواد در حالت‌های مختلف

جهت ساخت سیال غیرنیوتنی مدنظر

ردیف	حجم آب CC	مقدار CTAB (gr)	مقدار KBr (gr)	دمای صفحه داغ (°C)	سرعت همزن صفحه داغ (rpm)	نتیجه
۱	۵۰	۱/۱۸	۰/۹	۳۵	۱۰۰۰	×
۲	۵۰	۳/۶۴	۰/۹۴	۳۵	۱۰۰۰	×
۳	۵۰	۳/۶۲	۱/۰۱	۳۵	۱۰۰۰	×
۴	۵۰	۳/۶۲	۱/۱	۳۵	۱۰۰۰	×
۵	۵۰	۳/۶۲	۱/۲	۳۵	۱۰۰۰	✓

سرعت همزن مغناطیسی با گرمکن برقی، رطوبت، شرایط آب‌وهوایی و حتی شرکت تولیدکننده مواد اولیه جهت تولید سیال موردنظر بسیار مؤثر است. به عبارت دیگر پارامترهای زیادی در به‌دست‌آوردن سیال خاص میسر گرم‌مانند تأثیر دارند. همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود در تکرارهای متفاوت و بررسی‌های انجام شده در مرحله پنجم سیال موردنظر به‌دست‌آمده است. این آزمایش در تاریخ ۱۴۰۱/۳/۷ در آزمایشگاه دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گرفت. به این صورت که ابتدا مقدار ۵۰ cc آب با ۳/۶۲ گرم CTAB به کمک همزن مغناطیسی با گرمکن برقی با دمای ۳۵°C و سرعت ۱۰۰۰rpm (در طی کل مراحل این دما و سرعت ثابت است) مخلوط شدند تا اینکه مخلوط از حالت شیری رنگ به حالت شفاف تغییر رنگ داده، از این زمان به بعد به مدت ۲ ساعت بدون تغییر در حالت همزن مغناطیسی با گرمکن برقی و اضافه کردن ماده‌ای، محلول در حالت هم‌زدن بود (این فرآیند در حدود ساعت ۱۰-۱۲ صبح انجام شد). بعد از ۲ ساعت مخلوط شدن محلول، مقدار ۱/۲ گرم KBr به محلول اضافه شد و با همان شرایط قبلی به مدت ۶/۵ ساعت محلول مخلوط به هم زده می‌شد. پس از گذشت این زمان محلول بدست آمده به مدت ۱۲ ساعت جهت استراحت و تشکیل میسل‌های گرم‌مانند در اجاق با گرمکن و در دمای ۳۵°C نگهداری گردید. مقدار مواد اولیه در جدول ۲ همگی از برند مرک است. در نهایت از بررسی تجربی سیال بوسیله رئومتر خواص شکل ۴ و شکل ۵ به‌دست آمد. در طی آزمایش با

اندازه سوزن	قطر داخلی inch-mm	قطر خارجی inch-mm
G۱۴	۰/۰۶۳ - ۱/۶۰	۰/۰۸۳ - ۲/۱۱
G۱۶	۰/۰۴۷ - ۱/۱۹	۰/۰۶۵ - ۱/۶۵
G۱۷	۰/۰۴۲ - ۱/۰۷	۰/۰۵۸ - ۱/۴۷
G۱۸	۰/۰۳۳ - ۰/۸۳	۰/۰۴۹ - ۱/۲۴

روش تجربی و آزمایشگاهی که به‌عنوان یک روش علمی، صحیح و قابل‌اعتماد در انجام تحلیل و بررسی‌های مهندسی شناخته می‌شود در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته شده است. استفاده از ابزار و وسایلی که دقت نتایج حاصل را تضمین کند نکته مهمی است که در روش آزمایشگاهی و تجربی اهمیت مهم و ویژه‌ای دارد. به همین دلیل انتخاب و استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی، متناسب با نوع کاری که پیشرو قرار دارد با اهمیت است.

جهت بررسی و مطالعات مربوط به تشکیل قطره و بررسی پارامترهای مختلف آن نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی متفاوتی بادقت بالا و خطای کم است. در این پژوهش تصاویر توسط دوربین‌های بسیار قوی گرفته شده و دارای وضوح و کیفیت بالایی است. این موضوع برای تحلیل صحیح و درست قطرات لازم است. جهت دیدن و بررسی جزئیات بیشتر قطره داشتن تصاویری باکیفیت بالا بسیار اهمیت دارد که همواره خطاهای مختلف فردی و محاسباتی و غیره بسیار کمتر خواهد شد. از جمله پارامترهای مهم داشتن دبی جریان و همچنین مقدار حجم تزریق شده به داخل قطره تشکیل‌دهنده است که در ارائه نتایج آزمایش بسیار اهمیت دارد و موردنیاز است. درصد مواد موردنیاز برای تهیه ماده مورد استفاده بر اساس کارهای پیشین و همچنین به‌صورت تجربی انتخاب می‌شود که جز پارامترهای مهم پژوهش‌های آزمایشگاهی است.

۳-۱- سیال غیرنیوتنی

جدول ۲ مقدار و شرایط مختلف CTAB و KBr همراه با آب را نشان می‌دهد که جهت ساخت سیال غیرنیوتنی میسر گرم‌مانند می‌توان از آنها بهره گرفت. این موضوع نهایتاً بعد از تکرارهای زیاد به درصد و مقدار ترکیب آن‌ها در شرایط دمایی و فیزیکی خاص پی برده شد و از آن برای انجام پژوهش استفاده شده است. در ادامه به طور کامل روش ساخت و تولید آن سیال توضیح داده خواهد شد.

گرمکن برقی با هم مخلوط شده استفاده شده که از ۴ سیال معادل با خصوصیتی که در جدول ۳ آمده استفاده شده است. قابل توجه است که ویسکوزیته این سیال‌های معادل با توجه به لزجت سیال غیرنیوتنی میسل کرم‌مانند و به کمک دیاگرام‌های مربوطه (شکل ۴ و شکل ۵) که از دستگاه رئومتر در ناحیه‌ای که رفتار خطی ویسکوزیته نشان داده شده به دست آمده است.

۴- تجزیه و تحلیل داده‌ها

۴-۱- بررسی پارامترهای مختلف در هنگام حرکت

قطره سیال ورم لایک میسل

در این قسمت به بررسی تغییرات پارامترهای مختلف قطره از قبیل قطر بزرگ و کوچک، حجم، محل قرارگیری و پارامترهای مختلف دیگر از لحظه اول تشکیل تا رهایی کامل قطره یا به عبارت دیگر تشکیل قطره پرداخته شده است که به تفکیک در قسمت‌های بعدی به آنها پرداخته خواهد شد. این نکته قابل ذکر است که مرجع سنجش زمان در مقاله حاضر با توجه به توانایی دوربین که در این پژوهش ۶۹۷۷ فریم در ثانیه عکس برداری کرده سنجیده شده است و تمامی تصاویر از لحظه تشکیل قطره در نوک سوزن عکس برداری شده است. در شکل ۶ نمونه تصویر قطره که با استفاده از دوربین پرسرعت گرفته شده است دیده می‌شود.

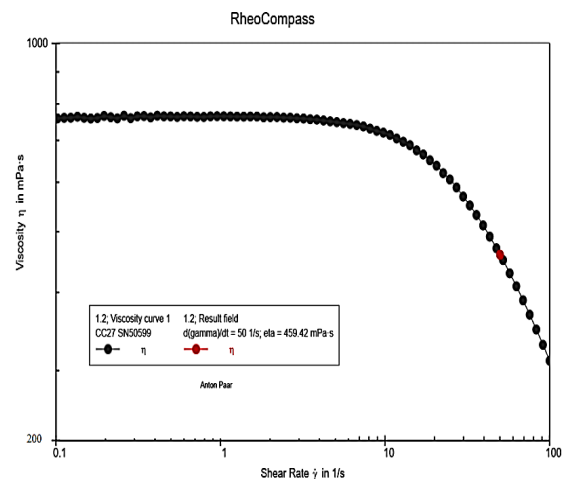


شکل (۶): تصویر قطره با استفاده از دوربین پرسرعت. (الف) قطره سیال نیوتنی (سیال معادل - ترکیب آب و گلیسیرین)، (ب) سیال غیرنیوتنی (ورم لایک میسل - ترکیب آب و CTAB, KBr)

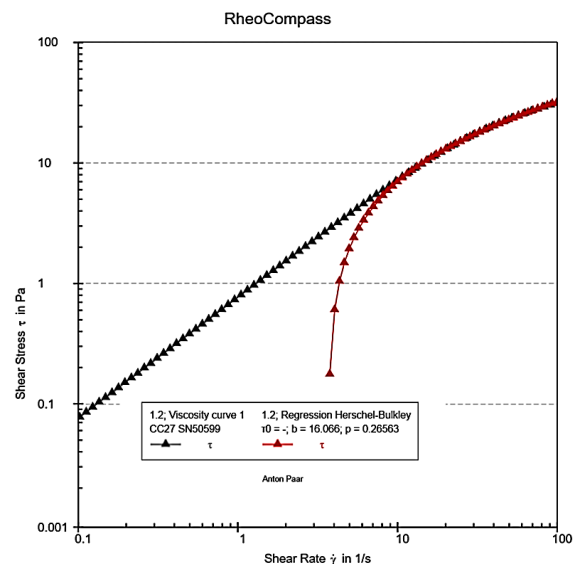
۴-۱-۱- تغییرات قطر قطره

از لحظه تشکیل تا رهاشدن کامل، قطرهای قطره مورد بررسی قرار گرفته است. این قطره دارای دو قطر اصلی کوچک و بزرگ است. بزرگ‌ترین قطر افقی، قطر کوچک بوده و بزرگ‌ترین قطر عمودی، قطر بزرگ است که

دستگاه رئومتر در دوره‌های مختلف، سنجش لزجت و نرخ برش انجام گرفته و با انتقال داده‌های دستگاه به کامپیوتر رسم شکل‌های ۴ و ۵ انجام گرفته است. در شکل ۴ در نرخ‌های برش پایین لزجت ثابت مانده اما با افزایش نرخ برش برای سیال مورد بحث لزجت کاهش یافته است. این آزمایش می‌تواند در سایر دماها تکرار گردد و نمودارهای مشابه به شکل اضافه گردد. در شکل ۵ مشاهده می‌شود در نرخ‌های برش زیاد، تنش و نرخ برش با هم متناسب هستند.



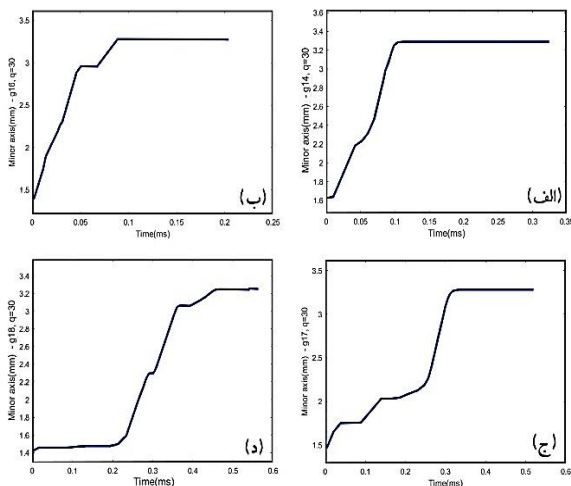
شکل (۴): نمودار ویسکوزیته بر حسب نرخ برش



شکل (۵): نمودار تنش بر حسب نرخ برش

۳-۲- سیال معادل

در قسمت‌های قبل بیان شد جهت ساخت سیال غیرنیوتنی میسل کرم‌مانند از ترکیب آب، KBr و CTAB استفاده شده است و جهت ساخت سیال نیوتنی معادل از ترکیب آب و گلیسیرین که به وسیله همزن مغناطیسی با



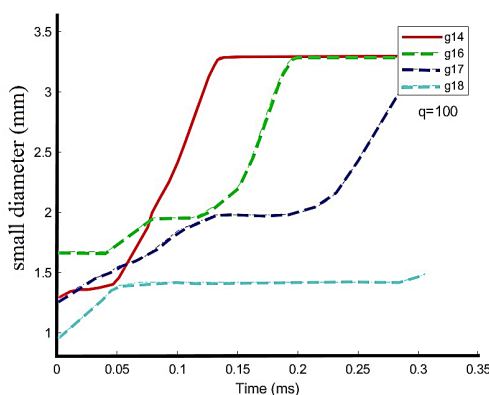
شکل ۷: تغییرات قطر کوچک قطره میسل کرم مانند

نسبت به زمان در سوزنهای مختلف و دبی $30 \frac{mL}{H}$

۴-۱-۱-۲- تغییرات قطر کوچک قطره سیال ورم

لایک میسل در دبی $100 \frac{mL}{H}$

در حالت $q = 100 \frac{mL}{H}$ با توجه به شکل ۸ که تغییرات قطر کوچک قطره میسل کرم مانند را در حالت‌های مختلف سوزن نشان می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت که با گذر زمان قطر کوچک قطره با افزایش روبرو بوده و این تغییرات خطی نمی‌باشد. این تغییرات به دلیل پیوند بین مولکولی و آرایش مولکولی سیال مورد بررسی می‌باشد. همچنین به دلیل وجود نیروی کشسان باعث ایجاد فیلامان پشت قطره (کشیدگی پشت قطره) می‌شود، که می‌تواند بر روی قطر کوچک تأثیر بگذارد. در بعضی موارد به‌طور پیوسته باعث افزایش قطر کوچک قطره شده و اندازه آن را تحت تأثیر قرار دهد.



شکل ۸: تغییرات قطر کوچک قطره میسل کرم مانند

نسبت به زمان در سوزنهای مختلف و دبی $100 \frac{mL}{H}$

تغییرات آنها را در سوزنهای مختلف می‌توان دید. همچنین چهار حالت دبی سیال خروجی از سوزن با مقادیر $30 \frac{mL}{H}$ و $100 \frac{mL}{H}$ و $170 \frac{mL}{H}$ و $240 \frac{mL}{H}$ مورد بررسی قرار داده شده است.

۴-۱-۱-۱- تغییرات قطر کوچک قطره سیال میسل

کرم مانند در دبی $30 \frac{mL}{H}$

در این پژوهش دو قطر کوچک و بزرگ برای هر قطره با توجه به تغییر دبی و اندازه سوزن در نظر گرفته و مورد بررسی قرار داده شده است. منظور از قطر کوچک، بزرگ‌ترین قطر قطره در حالت افقی است. شکل ۷ تغییرات قطر کوچک قطره در دبی $30 \frac{mL}{H}$ در حالت‌های مختلفی سوزن مورد استفاده را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۷ الف دیده می‌شود در سوزن G14 در شروع یعنی در زمانی که قطره در حال تشکیل شدن است قطر کوچک قطره از قطر سوزن بیشتر است و این نشان دهنده این مهم است که سیال ورم لایک میسل در شرایط این پژوهش یک سیال منبسط شونده است که بعد از خروج از سوزن افزایش حجم دارد. پس می‌توان رفتارهای جالبی را از این سیال مشاهده کرد. همچنین تغییرات قطره در این حالت همانطور که در شکل ۷ دیده می‌شود با گذشت زمان و تشکیل شدن قطره و به دنبال آن رها شدن قطره در تمامی حالت‌های سوزن با افزایش قطر کوچک قطره همراه است. افزایش قطر کوچک قطره بعد از گذشت زمان ثابت می‌شود که در واقع رها شدن قطره از سوزن را در این حالت می‌توان متصور شد. این فرایند تغییرات قطر کوچک قطره در حالت‌های دیگر سوزن نیز دیده می‌شود. با توجه به شکل ۷ که تغییرات برای سوزنهای دیگر را نیز نشان می‌دهد، همواره با افزایش قطر کوچک قطره همراه است. همچنین افزایش حجم دادن سیال در این حالت‌های دیگر نیز دیده می‌شود. پس می‌توان تغییرات قطر کوچک در این حالت خاص با گذر زمان را افزایشی دانست.

۴-۱-۱-۴ - تغییرات قطر کوچک قطره سیال میسل

$$\text{کرم مانند در دبی } 240 \frac{mL}{H}$$

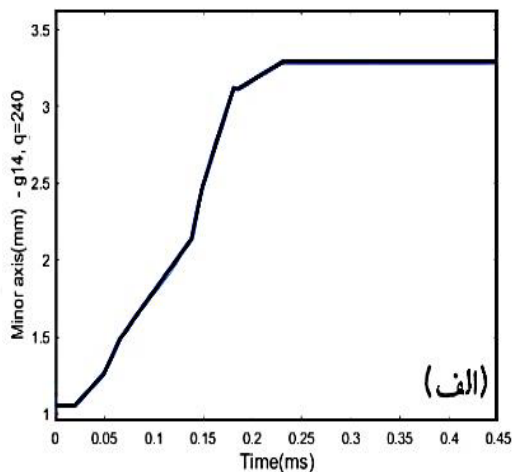
در این حالت نیز باتوجه به شکل ۱۰ که تغییرات قطر کوچک نسبت به زمان در قطره سیال میسل کرم‌مانند در سوزن‌های G14 و G16 و G17 را نشان می‌دهد، افزایش قطر کوچک دیده می‌شود. همچنین در این حالت نیز زیاد شدن حجم سیال میسل کرم‌مانند در هنگام خروج از سوزن دیده می‌شود که این خصوصیت ویژه یک سیال منبسط‌شونده است. در این حالت قطر کوچک قطره پس از رها شدن ثابت می‌ماند.

۴-۱-۱-۵ - تغییرات قطر بزرگ قطره سیال میسل

$$\text{کرم مانند در دبی } 30 \frac{mL}{H}$$

منظور از قطر بزرگ، قطر عمودی قطره است. باتوجه به شکل ۱۱ که تغییرات قطر بزرگ قطره را برای سوزن‌های مختلف نشان می‌دهد، می‌توان با گذر زمان افزایش قطر بزرگ را دید. در طی مسیر تغییرات مختلف در قطر بزرگ قطره دیده می‌شود که این تغییرات در سوزن‌های مختلف متفاوت است. از دلایل اصلی این تفاوت‌ها ساختار مارپیچ و پیچیده سیال میسل کرم‌مانند است. نیروی کشسان نیز تأثیر زیادی در تغییرات قطر بزرگ قطره دارد که می‌توان در رها شدن قطره آن را مشاهده کرد.

به‌طور کلی به این نتیجه می‌توان رسید که با افزایش قطر سوزن، قطر بزرگ قطره نیز بزرگ‌تر می‌شود که این مهم در سوزن G14 رخ داده است



جدول (۳): شرایط سیالهای معادل (سیال نیوتنی معادل)

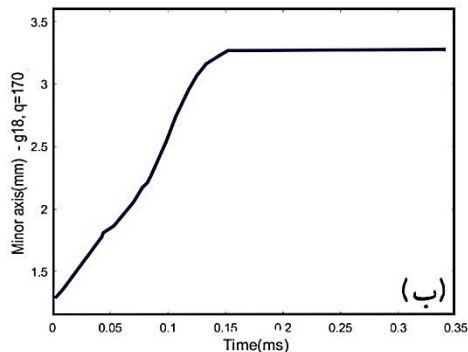
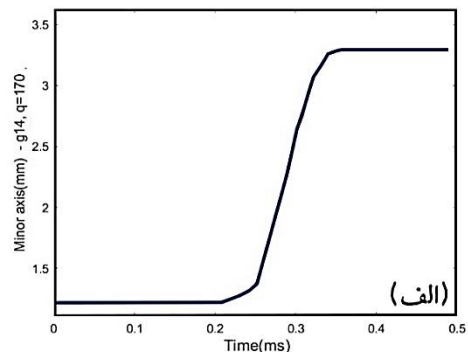
در دمای ۲۵°C - در اندازه‌های مختلف سوزن و دبی حجمی

آب و گلیسرین	آب و گلیسرین	آب و گلیسرین	آب و گلیسرین	خواص فیزیکی	
-۱۷ mm ۳۰ ml/hr	-۱۶ mm ml/hr۳۰	-۱۴ mm ۱۰۰ ml/hr	-۱۴ mm ml/hr۳۰	Lit	آب
۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	gr	
۰/۷۳۸۸	۰/۳۸۲	۰/۹۷۳۹	۰/۹۴۰۰۷	Lit	گلیسرین
۹۳۰/۸۸۸	۱۰۳۶/۹۸	۹۳۲/۲۷۴	۱۱۸۴/۷۸۸۲	gr	
۱۲۵۵/۳	۱۲۵۵/۵	۱۲۵۵/۳	۱۲۵۵/۸	جرم حجمی $\rho (\frac{kg}{m^3})$	
۱/۷۲۶۲۶	۱/۷۴۲۳۶	۱/۷۲۶۶۴۹	۰/۷۶۰۴۹	لزجت $\mu (pa.s)$	
.	.	.	.		

۴-۱-۱-۳ - تغییرات قطر کوچک قطره سیال میسل

$$\text{کرم مانند در دبی } 170 \frac{mL}{H}$$

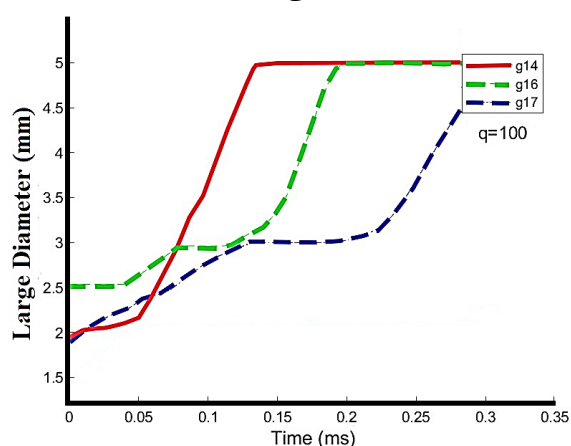
باتوجه به شکل ۹ نیز، با رها شدن قطره سیال مد نظر با افزایش قطر کوچک قطره نسبت به زمان روبرو خواهد بود. در این حالت نیز پس از رها شدن قطره، قطر آن ثابت می‌ماند.



شکل (۹): تغییرات قطر کوچک قطره سیال میسل کرم

مانند نسبت به زمان ($G14, G18, q = 170 \frac{mL}{H}$)

بزرگ برای قطره مدنظر در دبی $100 \frac{mL}{H}$ در سه حالتی که از سوزنهای G14 و G16 و G17 استفاده شده است را نشان می‌دهد. با افزایش گذر زمان قطر بزرگ قطره در حال افزایش است و از نکات دیگر در این حالت این است که هرچه سوزن که در واقع بیانگر سطح مقطع و قطر نازل خروجی است بیشتر باشد، قطر قطره زودتر به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این حالت ابتدا در بزرگترین اندازه سوزن در این پژوهش یعنی G14 و سپس G16 و نهایتاً در G17 به حالت بیان شده رسیده است که با توجه به شرایط موجود و حالات نشان داده شده برای سوزنهای بزرگتر و کوچکتر نیز می‌توان این فرضیه را محتمل دانست که با حرکت قطره در این حالت خاص تغییرات قطر بزرگ قطره را می‌توان حدس زد.



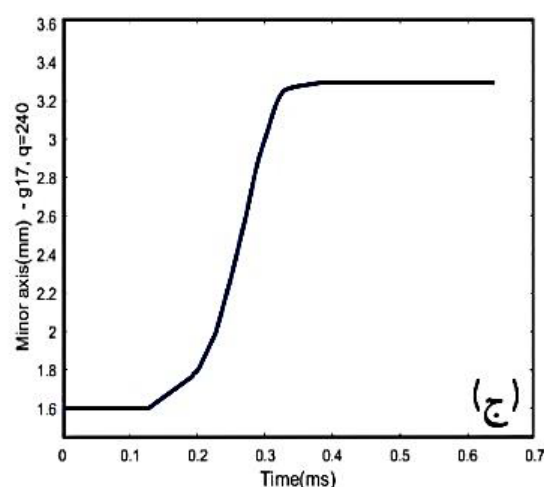
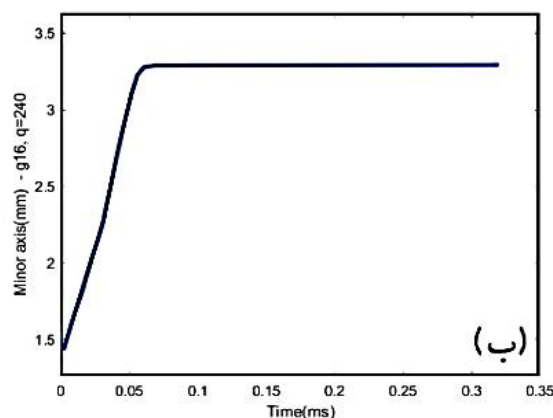
شکل (۱۲): تغییرات قطر بزرگ قطره میسل کرم مانند در

دبی $100 \frac{mL}{H}$ برای سه سوزن G14 و G16 و G17

۴-۱-۱-۷- تغییرات قطر بزرگ قطره سیال میسل

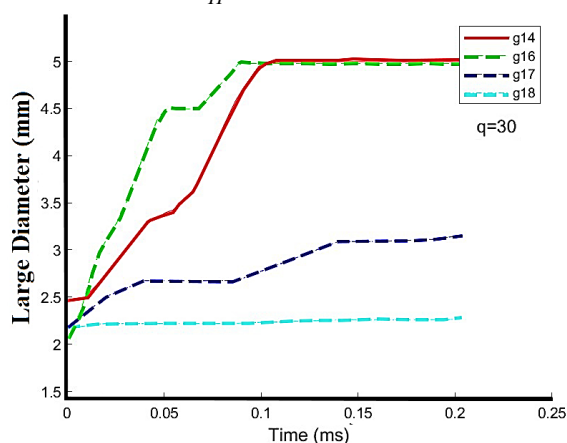
کرم مانند در دبی $170 \frac{mL}{H}$

در شکل ۱۳ تغییرات قطر بزرگ قطره را با استفاده از دو سوزن G14 و G18 که در واقع بزرگترین و کوچکترین سوزنهای مورد آزمایش است را می‌توان دید که با گذشت زمان در هر دو حالت با افزایش قطر بزرگ قطره روبرو هستیم. به این نکته می‌توان اشاره کرد که در حالت G14، یعنی حالتی که قطر نازل و یا سوزن بزرگتر است، قطر ابتدا تغییرات زیادی ندارد و عملاً در حال تکمیل شدن قطره است. در نتیجه، می‌توان گفت تقریباً از زمان 0.2 ms، تغییرات و رشد قطر بزرگ را می‌توان دید. اما در نقطه مقابل؛ یعنی در حالتی که کوچکترین سوزن، یعنی G18 را در نظر بگیریم می‌توان دید تغییرات از ابتدا با سرعت زیادی رخ می‌دهد.



شکل (۱۰): تغییرات قطر کوچک قطره سیال میسل کرم

مانند نسبت به زمان $(q = 24 \frac{mL}{H})$



شکل (۱۱): تغییرات قطر بزرگ قطره سیال میسل کرم

شکل نسبت به زمان $(q = 30 \frac{mL}{H})$

۴-۱-۱-۶- تغییرات قطر بزرگ قطره سیال میسل

کرم مانند در دبی $100 \frac{mL}{H}$

تغییرات قطر بزرگ قطره در این حالت نیز مشابه حالت قبل با گذشت زمان روبه‌افزایش است. شکل ۱۲ تغییرات قطر

۴-۱-۲- حجم قطره میسل کرم مانند در حالات مختلف

باتوجه به داشتن تغییرات قطر کوچک و بزرگ قطره ورم لایک میسل، می‌توان حجم قطره را باتوجه به قطر کوچک و قطر بزرگ عکس‌های گرفته شده‌ای که قطره را در حالت رهایی کامل نشان می‌دهند محاسبه کرد و با تخمین بهتری آن را به دست آورد که در جدول ۴ می‌توان آنها را با هم مقایسه کرد.

جدول (۴): حجم قطره میسل کرم مانند در حالت‌های

مختلف، در زمان رهایی کامل (mm^3)

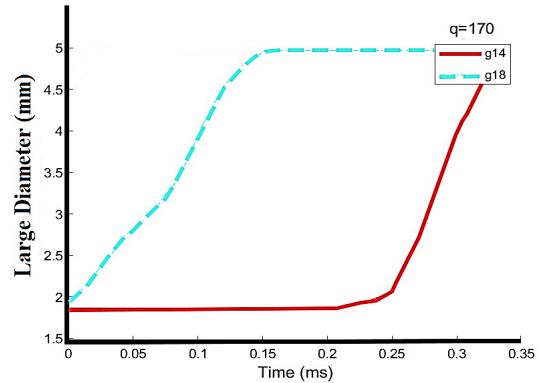
دبی سیال ($\frac{mL}{H}$)				اندازه سوزن
۲۴۰	۱۷۰	۱۰۰	۳۰	
۳۰/۶۴۷۷	۳۱/۲۷۵۶	۲۹/۳۷۲۰	۳۲/۱۰۸۱	G14
۳۳/۳۰۵۱	۲۵/۹۹۴۳	۲۴/۷۰۴۱	۲۳/۳۶۶۶	G16
۳۶/۲۱۱۲	۳۳/۷۴۴۶	۲۵/۴۱۴۹	۲۵/۳۷۴۸	G17
۲۴/۶۶۶۳	۲۲/۹۶۰۶	۲۶/۰۹۷۷	۲۴/۰۳۶۴	G18

با توجه به اعداد جدول ۴ می‌توان به این نتیجه رسید که در اکثر مواقع با افزایش قطر سوزن مورد استفاده، افزایش حجم قطره را نیز می‌توان دید و همچنین با افزایش دبی خروجی از هر سوزن خاص، افزایش حجم قطره را می‌توان مشاهده کرد. به عنوان مثال مقدار دبی در سوزنهای G14 و G18 به ترتیب برابر با $32/1081 mm^3$ و $24/0364 mm^3$ است. همانطور که گفته شد با افزایش قطر سوزن افزایش حجم قطره نیز مشاهده می‌گردد. در سوزن G16 یا G17 نیز می‌توان دید با افزایش دبی، افزایش حجم قطره رخ داده است.

۴-۱-۲-۱- تغییرات حجم قطره میسل کرم مانند در

بعضی از حالات مختلف

باتوجه به تغییر سوزن و همچنین تغییر مقدار دبی در حجم قطره نیز تغییراتی وجود دارد که با افزایش اندازه سوزن و همچنین افزایش مقدار دبی، افزایش حجم قطره مشاهده می‌گردد. باتوجه به شکل‌های ۱۵ الی ۱۸ تغییرات بعضی از حالت‌های یک سوزن خاص در یک دبی خاص از لحظه تشکیل قطره تا رهایی کامل قطره دیده می‌شود. با توجه به شکل‌های ۱۵ الی ۱۸ می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش اندازه سوزن و مقدار دبی، افزایش حجم قطره قطعی

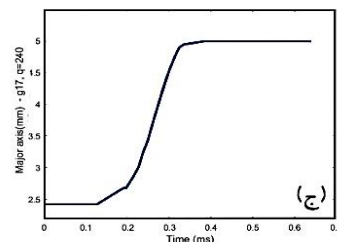
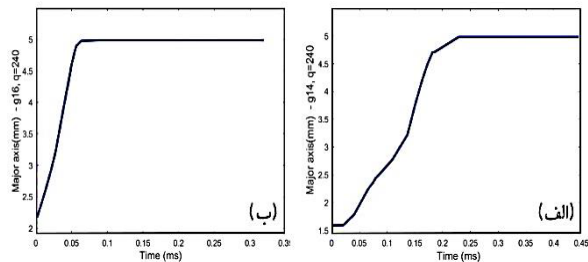


شکل (۱۳): تغییرات قطر بزرگ قطره میسل کرم مانند در دبی $170 \frac{mL}{H}$ برای دو سوزن G14 و G18

۴-۱-۱-۸- تغییرات قطر بزرگ قطره سیال میسل

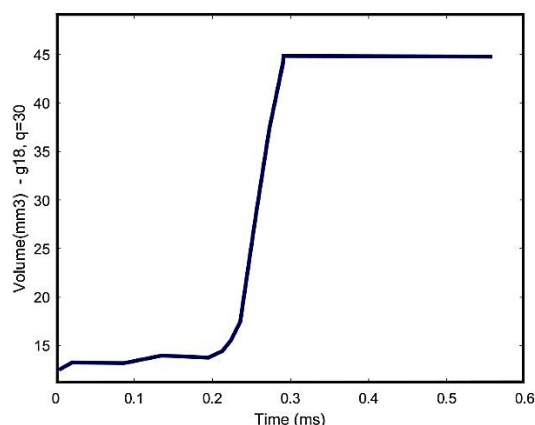
کرم مانند در دبی $240 \frac{mL}{H}$

باتوجه به شکل ۱۴ تغییرات قطر بزرگ قطره را می‌توان در سه سوزن G14, G16 و G17 دید که همواره افزایش قطر بزرگ قطره‌ها در حالات مختلف دیده می‌شود. نکته قابل توجه این است که در لحظه‌های اولیه تشکیل قطره هرچه قطر نازل یا سوزن بزرگ‌تر باشد، قطر بزرگ قطره در ابتدا کوچک‌تر است (اندازه قطر بزرگ در لحظه اولیه تشکیل در سوزن‌های G14, G16, G17 به ترتیب برابر با $1/6$ میلی‌متر، $2/15$ میلی‌متر و $2/4$ میلی‌متر). اما با گذشت زمان فرآیند تشکیل قطره انجام می‌شود و قطر مدنظر بزرگ می‌شود. افزایش قطر بزرگ قطره را در حالات مختلف در شکل ۱۴ می‌توان دید.



شکل (۱۴): تغییرات قطر بزرگ قطره میسل کرم مانند

نسبت به زمان ($q = 240 \frac{mL}{H}$)



شکل (۱۸): تغییرات حجم قطره میسل کرم مانند

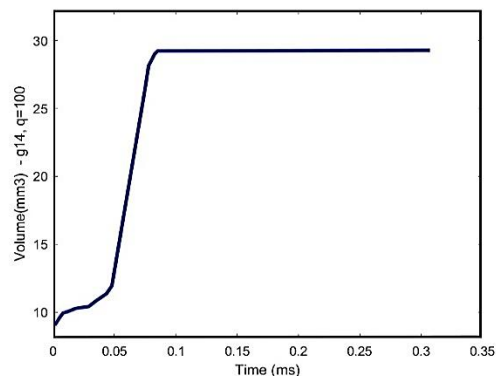
$$(G18, q = 3 \cdot \frac{mL}{H})$$

۴-۱-۳- بررسی موقعیت قطره ورم لایک میسل

در این جا به بررسی موقعیت قطره میسل کرم مانند از سوزن نسبت به زمان پرداخته شده است. باتوجه به اینکه حالت‌های مختلفی را مورد بررسی قرار گرفته، مشاهده گردیده است که در آنها رفتارهای تقریباً مشابهی وجود دارد، در این قسمت به ارائه تعدادی از آنها بسنده می‌کنیم که می‌توان گفت این نمونه‌ها رفتار کلی سیال را نشان می‌دهند.

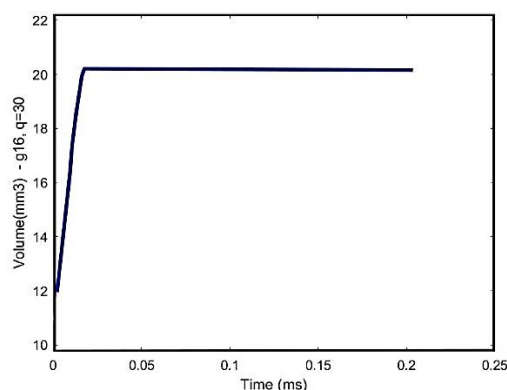
همان‌طور که در شکل ۱۹ دیده می‌شود در شروع تشکیل قطره در همان ابتدا یعنی در مجاورت و چسبیده به سوزن قطره میسل کرم مانند در حال تشکیل است که این فرآیند تقریباً حدود ۰/۱۵ ms برای سوزن G۱۴ در دبیهای $30 \cdot \frac{mL}{H}$ و $10 \cdot \frac{mL}{H}$ به طول می‌انجامد. سپس با کامل شدن قطره و با توجه به نیروی جاذبه و وزن، قطره رها شده و فاصله آن از سوزن همانطور که در شکل دیده می‌شود بیشتر می‌شود. به این نکته می‌توان دقت کرد که بدلیل نیروی کشسانی و همچنین کشیدگی سیال در پشت قطره، قطره اجازه حرکت به صورت رها و آزاد را ندارد که به همین دلیل در بعضی از نقاط نمودار دیده می‌شود، شیب حرکت کمتر یا بیشتر می‌شود که این نشان دهنده کم شدن سرعت به دلیل کشیدگی سیال پشت قطره است که عامل آن نیروی کشسان و خاصیت سیال میسل کرم مانند است.

است؛ اما تأثیر آنها یکسان نیست و تأثیر افزایش دبی در افزایش حجم قطره بسیار بیشتر از اندازه سوزن است، که این مهم را می‌توان با مقایسه شکل‌های زیر قطعی دانست.



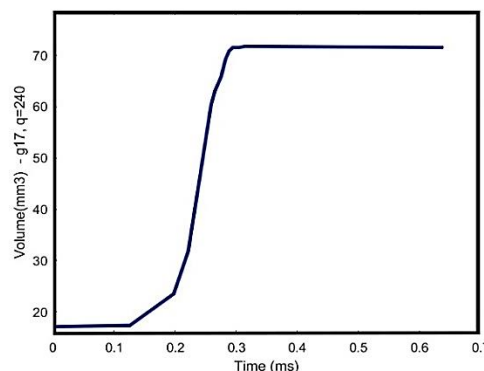
شکل (۱۵): تغییرات حجم قطره میسل کرم مانند

$$(G14, q = 100 \cdot \frac{mL}{H})$$



شکل (۱۶): تغییرات حجم قطره میسل کرم مانند

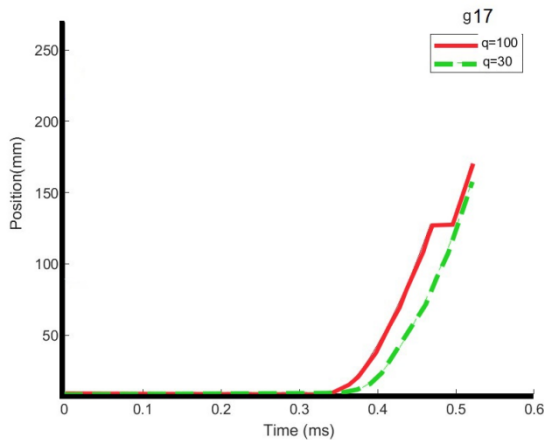
$$(G16, q = 3 \cdot \frac{mL}{H})$$



شکل (۱۷): تغییرات حجم قطره میسل کرم مانند

$$(G17, q = 240 \cdot \frac{mL}{H})$$

چسبیده به سوزن است و سپس با گذشت زمان قطره جدا شده و مانند حالت‌های قبل به حرکت خود ادامه می‌دهد.



شکل (۲۱): موقعیت قطره میسل کرم مانند نسبت به زمان

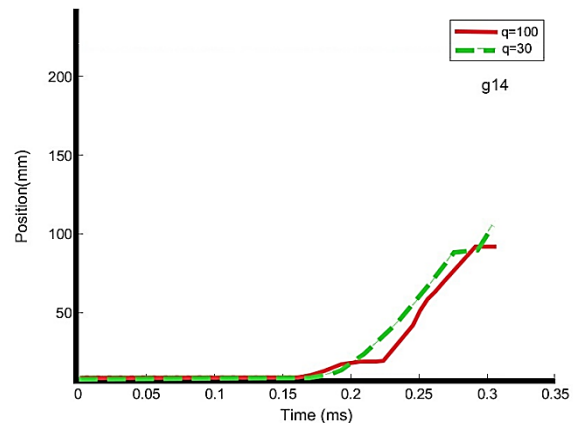
در سوزن G17

باتوجه به مطالب فوق می‌توان نتیجه گرفت که قطره میسل کرم‌مانند در تمامی حالت‌ها در ابتدا و در زمان تشکیل، چسبیده به سوزن بوده و سپس رها می‌شود که تقریباً می‌توان گفت زمان بیشتری جهت تشکیل قطره در ابتدا صرف می‌شود و پارامترهای مختلفی همچون نیروی بین‌مولکولی، چسبندگی سیال، مقاومت سیال، نیروی کشسان و خصوصیات ویژه سیال میسل کرم‌مانند در این مهم تأثیرگذار است.

۴-۱-۴- پهنای کشیدگی سیال میسل کرم مانند در

فاصله ۲۲ میلی متری از سوزن

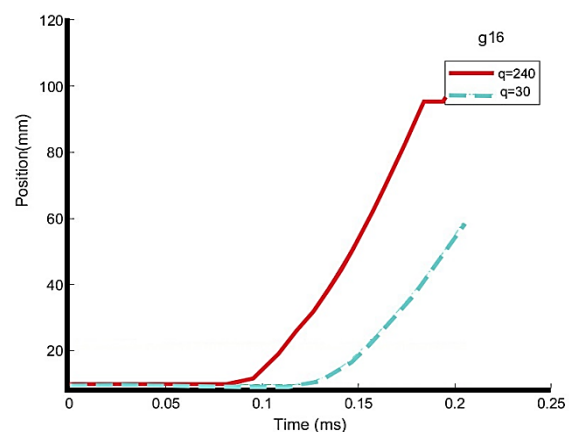
در فاصله ۲۲ میلی متری از سوزن، پهنای کشیدگی سیال میسل کرم مانند در حالت‌های مختلف حدود ۱/۳ میلی‌متر است. در واقع پس از اینکه سیال از سوزن خارج شده است و با توجه به خصوصیت برخی از سیالهای غیرنیوتنی که می‌توانند افزایش حجم دهند، در ابتدا افزایش حجم داده و بعد از رهایی قطره قسمت سیال کشیده شده همراه قطره که از آن جدا شده است (که این خصوصیت نیز دلیل پیوندهای بین مولکولی و شرایط ساخت سیال است) ادامه داشته و سپس باریک و باریک‌تر شده و در نهایت در نقطه‌ای این گسستگی اتفاق افتاده و قطره از جریان سیال جدا می‌شود. البته این نکته را باید متذکر شد که در این بین، یعنی قطره جدا شده و جریان سیال (که به سمت بالا و جهت تشکیل قطره بعد رفته و به آن کمک می‌کند) قطره‌های پیرو وجود دارد که مورد مطالعه‌ی این پژوهش



شکل (۱۹): موقعیت قطره میسل کرم مانند از سوزن

نسبت به زمان در سوزن G14

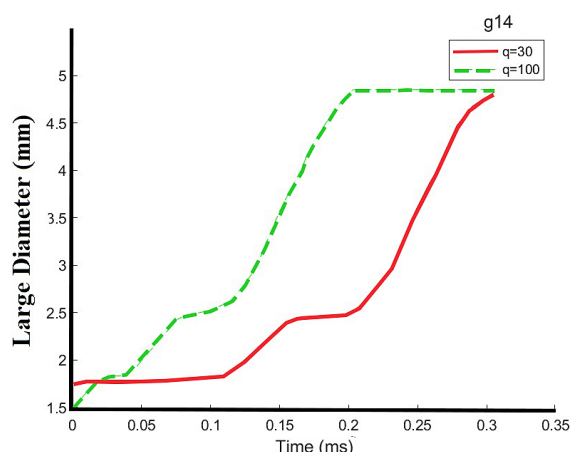
در شکل ۲۰ موقعیت قطره در سوزن G16 در دو حالت $30 \frac{mL}{H}$ و $240 \frac{mL}{H}$ را می‌توان دید که همانند حالت قبل در ابتدا در زمان تشکیل قطره کامل، قطره چسبیده به سوزن بوده و سپس قطره رها شده و به حرکت در می‌آید. نکته قابل توجه این است که در حالتی که دبی بیشتر است یعنی $q = 240 \frac{mL}{H}$ به علت سرعت بالاتر سیال قطره زودتر تشکیل شده و زودتر از سوزن جدا می‌شود ولی در حالت $q = 30 \frac{mL}{H}$ قطره دیرتر از سوزن جدا شده است. معیار جدایی قطره از سوزن دنبال نمودن موقعیت مرکز قطره و ثبت لحظه‌ای است که مرکز قطره در آستانه حرکت قرار می‌گیرد.



شکل (۲۰): موقعیت قطره میسل کرم مانند نسبت به

زمان در سوزن G16

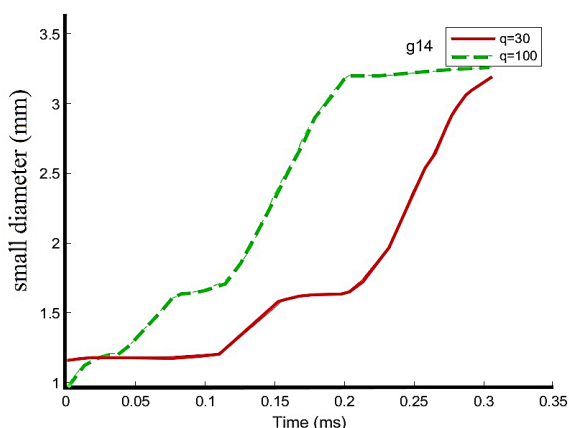
در حالت بعد که در شکل ۲۱ دیده می‌شود همانند حالت‌های قبل رفتار، حرکت و موقعیت قطره میسل کرم مانند را برای سوزن G17 و دبی $30 \frac{mL}{H}$ و $100 \frac{mL}{H}$ را می‌توان دید که در ابتدا و تا زمان تشکیل قطره موقعیت قطره



شکل (۲۲): قطر بزرگ قطره سیال معادل

$$(q = 30, 100 \frac{mL}{H}, G14)$$

شکل ۲۳ تغییرات قطر کوچک قطره سیال معادل در حالت قبل یعنی سوزن G14 و دبی $30 \frac{mL}{H}$ و $100 \frac{mL}{H}$ را نشان می‌دهد. تغییرات قطر کوچک نیز همانند قطر بزرگ است، یعنی با گذشت زمان قطر کوچک نیز افزایش می‌یابد و نهایتاً این قطر تقریباً مقدار ثابتی را پیدا می‌کند. با توجه به شکل ۲۲ و شکل ۲۳ دیده می‌شود که تغییرات قطر بزرگ و کوچک سیال معادل تقریباً مشابه است. در این حالت نیز همانند قبل دیده می‌شود که سیال منبسط شونده نیست. پس با توجه به توضیحات گفته شد میتوان این نتیجه را گرفت که شکل قطره رها شده سیال نیوتنی معادل بیشتر حالت کروی دارد.



شکل (۲۳): تغییرات قطر کوچک قطره سیال معادل

$$\text{نسبت به زمان } (q = 30 \frac{mL}{H}, 100 \frac{mL}{H}, G14)$$

موارد مطرح شده در قسمت قبل برای تمامی حالت‌های مورد بررسی صادق است که می‌توان در شکل ۲۴ و ۲۵ که تغییرات

نبوده است. در فاصله ۲۲ میلی متری از سوزن می‌توان به این نکته اشاره کرد که در سیال نیوتنی معادل که در قسمتهای بعد در مورد آن صحبت خواهد شد، هیچ جریانی وجود ندارد که بتوانیم ضخامت و پهنایی بر آن سیال در نظر بگیریم. این تفاوت می‌تواند شرایط خاص سیال میسل کرم مانند را نشان دهد. البته وجود نیروی کشسان در سیال غیرنیوتنی میسل کرم مانند و همچنین ساختار مولکولی این سیال به شدت بیشتر و متفاوت از حالت سیال نیوتنی است که شکل ۶ در ابتدای مقاله این مهم را نشان می‌دهد.

۲-۴- بررسی پارامترهای مختلف در هنگام حرکت

قطره سیال معادل (آب و گلیسرین)

بعد از بررسی حرکت قطره سیال میسل کرممانند به سراغ سیال معادل که ترکیبی از آب و گلیسرین است که به‌عنوان سیال نیوتنی معادل در نظر گرفته شده پرداخته شده است. سپس به بررسی تغییرات قطرهای کوچک و بزرگ قطره، حجم قطره و دیگر پارامترهای مختلف از لحظه تشکیل تا رهایی کامل پرداخته شده است که البته مورد بسیار خوبی برای مقایسه باحالت قبل یعنی سیال میسل کرممانند است.

۱-۲-۴ تغییرات قطر کوچک و بزرگ قطره سیال معادل

در این حالت نیز با فرض اینکه قطره دارای دو قطر کوچک و بزرگ است، تغییرات این متغیرها باتوجه به گذشت زمان و همچنین تشکیل آن، مورد بررسی قرار گرفته است. در حالتی که از سوزن G14 برای دبی‌های $30 \frac{mL}{H}$ و $100 \frac{mL}{H}$ استفاده گردد تغییرات قطر بزرگ قطره در شکل ۲۲ ارائه شده که با گذر زمان قطره در حال تشکیل و قطر بزرگ در حال افزایش است. بعد از اینکه قطره کامل و رها شد تغییرات بسیار زیادی نخواهد داشت. از دیگر مواردی که می‌توان به آن اشاره کرد، نداشتن خاصیت منبسط شونده سیال معادل برخلاف میسل کرممانند است.

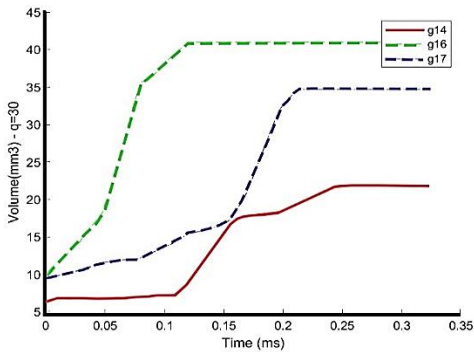
3 mm^3 است با کاهش حجم قطره سیال معادل با قطر ورم لایک مسیل در شرایط یکسان مواجه شده است. باتوجه‌به مطالب بیان شده دیده می‌شود حجم قطره سیال معادل (سیال نیوتنی) نسبت به حجم قطره سیال غیرنیوتنی مسیل کرم شکل کاهش‌یافته (درصد کاهش در جدول ۵ ارائه شده است) و در مابقی حالات نیز این شرایط صادق خواهد بود که در جدول ۵ می‌توان این تغییرات را دید.

جدول (۵): حجم قطره سیال معادل در زمان رهایی کامل (mm^3)

اندازه سوزن	دبی سیال ($\frac{mL}{H}$)	
	۱۰۰	۳۰
G14	۲۸/۳۵۲۳ (-۳/۵۳ %)	۲۹/۲۸۳۵ (-۹/۲ %)
G16	-	۲۳/۱۴۶۴ (-۰/۹۵ %)
G17	-	(-۱۰/۶۵ %) ۲۲/۸۰۸۴

به‌طورکلی تغییرات حجم قطره سیال معادل در دبی

$q = 30 \frac{mL}{H}$ و در سوزن‌های G14 و G16 و G18 در شکل ۲۶ دیده می‌شود که با گذر زمان افزایش حجم رخ می‌دهد و نهایتاً پس از تغییرات به حجم ثابت می‌رسد که می‌توان گفت در این ناحیه رهایی کامل قطره افتاده است.



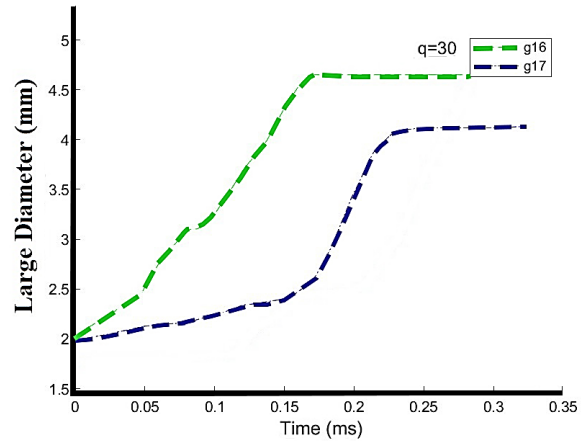
شکل (۲۶): تغییرات حجم قطره سیال معادل

$$q = 30 \frac{mL}{H} \text{ در } G14 \text{ و } G16 \text{ و } G17$$

۴-۲-۳- شرایط قطره نیوتنی معادل در فاصله شاخص ۲۲ میلی متری از سوزن

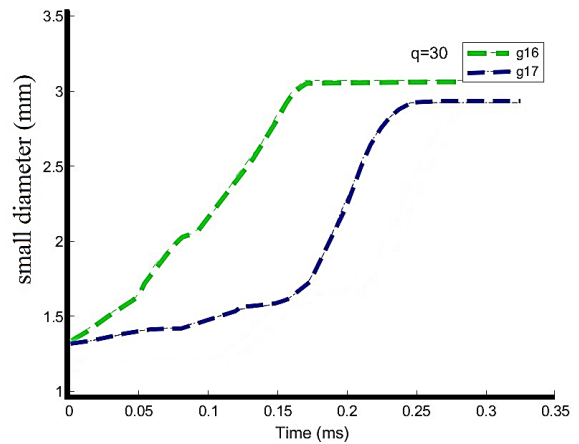
باتوجه‌به اینکه در سیال ورم لایک مسیل در این فاصله محاسبات پهنای کشیدگی سیال مورد تحلیل قرار گرفت، در این حالت نیز این فاصله مدنظر قرار گرفته شده است. اما مشاهده گردید که اصلاً در این فاصله و در سیکل رهاشدن قطره سیالی وجود ندارد و این اتفاق نشان می‌دهد که در

قطر بزرگ و قطر کوچک سیال معادل در دبی $30 \frac{mL}{H}$ با استفاده از سوزنهای G16 و G17 است را مشاهده نمود.



شکل (۲۴): تغییرات قطر بزرگ قطره سیال معادل نسبت

$$\text{به زمان } (q = 30 \frac{mL}{H}, G16, G17)$$



شکل (۲۵): تغییرات قطر کوچک سیال معادل نسبت به

$$\text{زمان } (q = 30 \frac{mL}{H}, G16, G17)$$

۴-۲-۲- حجم قطره سیال معادل در حالت‌های مختلف

در سوزن G14 در دبی $30 \frac{mL}{H}$ مقدار 9.2% کاهش حجم قطره سیال معادل نسبت به سیال میسل کرم مانند داشته که مقدار $29/2835 \text{ mm}^3$ است و همچنین برای دبی $100 \frac{mL}{H}$ با استفاده از سوزن G14 حجم قطره برابر با $28/3523 \text{ mm}^3$ است که با ۳/۵۳% نسبت به سیال ورم لایک مسیل مشابه کاهش حجم دارد. به همین ترتیب برای سوزنهای G16 و G17 در دبی $30 \frac{mL}{H}$ کاهش ۰/۹۵% و ۱۰/۶۵% حجم قطره که برابر با $23/1464 \text{ mm}^3$ و

از مشاهده تصاویر و پردازش آنها در لحظه خروج سیال میسل گرم‌مانند به خاصیت منبسط‌شوندگی سیال ورم لایک میسل پی برده شده است که رفتار متفاوتی نسبت به سیال نیوتنی دارد.

باتوجه به تغییر قطرهای کوچک و بزرگ قطره با تغییر حجم قطره روبرو خواهیم بود که این پارامتر نیز با افزایش قطر سوزن (اندازه سوزن) افزایش حجم قطره را نیز به همراه دارد.

با افزایش دبی (در پژوهش حاضر از دبی‌های $30 \frac{mL}{H}$ ، $100 \frac{mL}{H}$ ، $170 \frac{mL}{H}$ ، $240 \frac{mL}{H}$ برای انجام آزمایش استفاده شده است) افزایش قطر کوچک و قطر بزرگ قطره رخ داده است.

باتوجه به اینکه ارتباط مستقیم بین قطرهای قطره و حجم قطره وجود دارد، با افزایش دبی، افزایش حجم قطره خواهیم داشت.

به دلیل پیوند بین مولکولی و ساختار تشکیل سیال ورم لایک میسل از زمان تشکیل قطره تا رهایی کامل، زمان و فاصله‌ای وجود دارد که نسبت به حالت سیال نیوتنی معادل بسیار متفاوت است. در فاصله ۲۲ میلی‌متری از سوزن در حالت‌های مختلف در سیال نیوتنی معادل هیچ گونه جریان سیال و یا دنباله‌ای از قطره وجود نداشته است. در صورتی که در زمان استفاده از سیال ورم لایک میسل، کشیدگی از سیال در هر سیکل و چرخه تشکیل قطره وجود دارد و بصورت میانگین پهنای این کشیدگی در حالت‌های مختلف حدود ۱/۳ mm است.

شکل قطره رها شده در سیال غیرنیوتنی میسل گرم‌مانند کروی نیست و در اندازه قطر کوچک و بزرگ آن اختلاف زیادی وجود دارد، ولی در سیال نیوتنی معادل پس از رها شدن قطره، قطر کوچک و بزرگ تقریباً در یک بازه هستند و شکل کروی‌تر نسبت به سیال غیرنیوتنی میسل گرم‌مانند دارد.

در زمان رها شدن قطره ورم لایک میسل از قسمت کشیدگی یا فیلامان، قطرات پیرو وجود دارد که این قطرات پیرو در سیال نیوتنی معادل وجود ندارد که به‌عنوان پیشنهاد برای انجام پژوهش‌های بعدی می‌توان بر روی قطرات پیرو این سیال، مطالعه و کار پژوهشی انجام داد.

در حالت مشابه بین سیال نیوتنی معادل و سیال میسل گرم‌مانند به این مهم پی برده شده است که حجم قطره سیال معادل در شرایط یکسان آزمایش نسبت به سیال ورم لایک میسل کمتر است که این تغییرات به ترتیب برای سیال

سیال ورم لایک میسل کشش و پیوند بین مولکول‌ها و حالت زنجیروار بین آنها بسیار بیشتر از سیال نیوتنی معادل است. پس به همین دلیل در سیال نیوتنی معادل وجود قطرات پیرو اهمیت چندانی ندارد. ولی در سیال ورم لایک میسل وجود قطرات پیرو قطعی بوده و می‌بایست مورد توجه ویژه قرار گیرد که این موضوع هم می‌تواند پیشنهادی جهت انجام پژوهش‌های بعدی باشد.

۶- نتیجه گیری

این پژوهش، به کمک پردازش تصاویر به‌دست‌آمده از حرکت قطره سیال غیرنیوتنی (ورم لایک میسل) و سیال نیوتنی معادل (ترکیب آب و گلیسرین) از لحظه تشکیل تا رها شدن کامل قطره یا به‌عبارت‌دیگر فرآیند تشکیل قطره از ابتدا تا انتها مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. از پارامترهای مؤثر بر روی فرآیند تشکیل قطره در پژوهش مذکور، می‌توان به اندازه و مدل سوزن و همچنین دبی سیال اشاره کرد که به کمک پردازش تصاویر دریافتی در زمان آزمایش به اطلاعات خوبی همچون افزایش و یا کاهش مقادیر مختلف دست‌یافت. مطالعه بر روی سیال میسل گرم‌مانند و پس از آن بر روی سیال نیوتنی معادل مقایسه خوبی برای متغیرهای مختلف بوده که رفتارهای قطره را در حالات مختلف مورد بررسی قرار داده است. در نهایت به پارامترهای مؤثر دیگری در طی انجام تحقیق و مطالعه دست‌یافته و مواردی مثل بررسی قطره پیرو در سیال مورد بررسی این پژوهش به‌عنوان پیشنهاد برای کارهای بعدی ارائه شده است.

تغییر شکل قطره ورم لایک میسل به پارامترهای مختلفی همچون اندازه سوزن و دبی سیال بستگی دارد. باتوجه به اینکه از سوزن‌های G14 و G16 و G17 و G18 استفاده شده است. در هر یک از حالت‌های استفاده از سوزن‌ها، قطرهای مربوط به قطره سیال تشکیل شده در حال افزایش است. البته با افزایش اندازه سوزن قطرهای قطره بزرگ‌تر می‌شود، یعنی در سوزن G14 قطر کوچک و قطر بزرگ قطره بزرگ‌تر از زمانی است که از سوزن G16 استفاده شده است به همین ترتیب قطرهای کوچک و بزرگ در سوزن G16 از سوزن G17 و در سوزن G17 از سوزن G18 بزرگ‌تر است (در استاندارد نام‌گذاری سوزن‌ها هر چه عدد بعد حرف انگلیسی G کوچک‌تر باشد، نشان از بزرگ‌تر بودن قطر سوزن است).

- [10] Ponce-Torres, A., Montenegro, J., Herrada, M., Vega, E., and Vega, J., "Influence of the surface viscosity on the breakup of a surfactant-laden drop". *Physical Review Letters*, 2017. 118(2): p. 1-5. DOI:10.1103/PhysRevLett.118.02450
- [11] Eggers, J. (1997), "Nonlinear dynamics and breakup of free-surface flows", *Reviews of Modern Physics*, 69, pp. 865. doi.org/10.1103/RevModPhys.69.865
- [12] Cooper-White, J., et al. (2002), "Drop formation dynamics of constant low-viscosity, elastic fluids", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 106, pp. 29-59. doi.org/10.1016/S0377-0257(02)00084-8.
- [13] Mun, R. P., et al. (1998), "The effects of polymer concentration and molecular weight on the breakup of laminar capillary jets", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 74, pp. 285-297. doi.org/10.1016/S0377-0257(97)00074-8
- [14] Bhat, P. P., et al. (2008), "Dynamics of viscoelastic liquid filaments: Low capillary number flows", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 150, pp. 211-225. doi.org/10.1016/j.jnnfm.2007.10.021
- [15] Norouzi, M., Sheykhan, M.K., Shahmardan, M.M. A. Shahbani-Zahiri. "Experimental investigation of spreading and receding behaviors of Newtonian and viscoelastic droplet impacts on inclined dry surfaces". *Meccanica* 56, 125-145 (2021). doi.org/10.1007/s11012-020-01285-0.
- [16] Bertola, V. and M. Wang, "Dynamic contact angle of dilute polymer solution drops impacting on a hydrophobic surface". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015. 481: p. 600-608. doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.05.052.
- [17] Choi, W., et al. "Drop impact on inclined superhydrophobic surfaces". *APS March Meeting Abstracts*. 2016.
- [18] P. Akbarzadeh., M. Norouzi, R. Ghasemi, S. Z. Daghighi. "Experimental study on the entry of solid spheres into Newtonian and non-Newtonian fluids". *Physics of Fluids*, 2022. 34(3): p. 033111.
- [19] Chaurasia, A.S., D.N. Josephides, and S. Sajjadi, "Buoyancy-driven drop generation via microchannel revisited". *Microfluidics and Nano Fluidics*, 2015. 18(5-6): p. 943-953. doi.org/10.1007/s10404-014-1484-x.
- [20] Zavala, J., K. Szczepanowicz, and P. Warszynski, "Theoretical and experimental studies of drop size in membrane emulsification—single pore studies of the hydrodynamic detachment of droplets". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015. 470: p. 297-305. doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.01.030.
- [21] Birjandi, A.K. & Norouzi, Mahmood & Kayhani, Mohammad Hassan. (2017). "A numerical study on drop formation of viscoelastic liquids using a nonlinear constitutive equation". *Meccanica*. 52. 1-21. 10.1007/s11012-017-0669-2. doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.01.030

نیوتنی معادل در سوزن G14 در دبی $30 \frac{mL}{H}$ و $100 \frac{mL}{H}$ نسبت به همین حالت در سیال ورم لایک مسیل $9/2\%$ و $3/53\%$ کمتر است. همچنین برای سوزن G16 و G17 در دبی $30 \frac{mL}{H}$ به ترتیب $0/95\%$ و $10/65\%$ حجم قطره سیال نیوتنی معادل کمتر از سیال ورم لایک مسیل است.

۷- منابع

- [1] White, F. M. (2010). "Fluid mechanics", McGraw-Hill.
- [2] Smolka, L. B. and A. Belmonte (2003), "Drop pinch-off and filament dynamics of wormlike micellar fluids", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 115, pp. 1-25. doi.org/10.1016/S0377-0257(03)00116-2.
- [3] Hauser, E.A., Edgerton, H.E., Holt, B.M. and Cox Jr, J.T., "The Application of the High-speed Motion Picture Camera to Research on the Surface Tension of Liquids". *The Journal of Physical Chemistry*, 1936. 40(8): p. 973-988. doi.org/10.1021/j150377a003
- [4] Hayworth, C.B., and R.E. Treybal, "Drop formation in two-liquid-phase systems". *Industrial & Engineering Chemistry*, 1950. 42(6): p. 1174-1181. doi.org/10.1021/ie50486a030
- [5] Scheele, G.F. and B.J. Meister, "Drop formation at low velocities in liquid-liquid systems: Part I. Prediction of drop volume". *AIChE Journal*, 1968. 14(1): p. 9-15. doi.org/10.1002/aic.690140105
- [6] Heertjes, P., L. De Nij, and H. "De Vries, Drop formation in liquid-liquid systems—I prediction of drop volumes at a moderate speed of formation". *Chemical Engineering Science*, 1971. 26(3): p. 441-449. doi.org/10.1016/0009-2509(71)83017-8.
- [7] Shi, X., M.P. Brenner, and S.R. Nagel, "A cascade of structure in a drop falling from a faucet". *Science*, 1994. 265(5169): p. 219-222. DOI: 10.1126/science.265.5169.219.
- [8] Zhang, X. and O.A. Basaran, "An experimental study of dynamics of drop formation". *Physics of Fluids*, 1995. 7(6): p. 1184-1203.
- [9] Rao, A., Reddy, R.K., Ehrenhauser, F., Nandakumar, K., Thibodeaux, L.J., Rao, D. Valsaraj, K.T., "Effect of surfactant on the dynamics of a crude oil droplet in the water column: Experimental and numerical investigation". *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2014. 92(12): p. 2098-2114. doi.org/10.1002/cjce.22074.

