مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد 1397، دوره 18، شماره 03، ص‌ص 146-152

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی اثر سرعت برخورد قطره بر ضریب گسترش قطرات غیرنیوتنی و نیوتنی در برخورد با سطح جامد خشک

محمدکاظم شیخیان[1]، محمود نوروزی[2*]، محمد محسن شاه‌مردان[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

* شاهرود، صندوق پستی 3619995161، mnorouzi@shahroodut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 آذر 1396

پذیرش: 30 دی 1396

ارائه در سایت: 04 اسفند 1396

کلید واژگان:

سرعت برخورد

سیال غیرنیوتنی باگر

ضریب گسترش

لزجت

چکیده

برخورد قطرات بر روی سطوح جامد دارای کاربرد گسترده‌ای در صنایع نفت و گاز، رنگ‌آمیزی سطوح، خنک‌کاری سطوح داغ و سم‌پاشی محصولات کشاورزی می‌باشد. در مطالعه حاضر، ضریب گسترش سیال غیرنیوتنی باگر روی سطح جامد خشک از قبیل آکریلیک (پلکسی‌گلس) و ورق استیل ضد زنگ بصورت آزمایشگاهی بررسی شده و با قطرات نیوتنی (آب و گلیسیرین) مقایسه می‌شود. صفحات پلکسی‌گلس و استیل ضد زنگ هر دو دارای سطحی آب‌دوست هستند. در این پژوهش، سقوط قطرات سیالات غیرنیوتنی و نیوتنی در دو ارتفاع 27 و 47 سانتی‌متر از سطح جامد خشک و در محدوده اعداد وبر $245 \leq We \leq 538$ بررسی شده است. هدف از انجام این تحقیق، بررسی اثر سرعت برخورد، بر ضریب گسترش قطرات غیرنیوتنی و نیوتنی در زمان برخورد می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با زیاد شدن عدد وبر (افزایش سرعت برخورد)، حداکثر مقدار و نرخ پخش‌شدگی و جمع‌شدگی قطرات نیوتنی یا غیرنیوتنی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش لزجت قطرات، مقدار و نرخ پخش‌شدگی و جمع‌شدگی قطرات نیوتنی و غیرنیوتنی کاهش می‌یابد. با افزایش 32 درصدی سرعت برخورد بر روی صفحه پلکسی‌گلس (افزایش عدد وبر)، مقدار بیشینه پخش‌شدگی قطرات باگر، آب و گلیسیرین به‌ترتیب به میزان 22، 31 و 20 درصد افزایش می‌یابند.

Experimental study of contact velocity effect on spreading factor of non-Newtonian and Newtonian droplets during collision with dry solid surface

Mohammad Kazem Sheykhian, Mahmood Norouzi*, Mohammad Mohsen Shahmardan

Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

* P.O.B. 3619995161 Shahrood, Iran, mnorouzi@shahroodut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 01 December 2017
Accepted 20 January 2018
Available Online 23 February 20189

Keywords:
Contact velocity
Non-Newtonian fluid of Boger
Spreading factor
Viscosity

ABSTRACT

The collision of droplets on solid surfaces is widely used in oil and gas industry, surface painting, hot surface cooling and spraying of agricultural products. In the present study, the spreading factor of Boger non-Newtonian fluid is experimentally investigated on the dry solid surface such as an acrylic (Plexiglas) and stainless steel sheet and is compared with Newtonian droplets (water and glycerin). The plates of Plexiglas and stainless steel both have a hydrophilic surface. In this research, the Newtonian and non-Newtonian fluids droplets collapse at two heights of 27 and 47 cm from the dry solid surface and are examined in the range of Weber numbers $245 \leq We \leq 538$. The purpose of this study is to investigate the effects of contact velocity on the spreading factor of non-Newtonian and Newtonian droplets during the collision. The results of this study show that with the growth of Weber number (increasing contact velocity), the maximum value and velocity of spreading and receding are increased for the Newtonian or non-Newtonian droplets. Also, with increasing the viscosity of droplets, the value and velocity of spreading and receding are decreased for the Newtonian and non-Newtonian droplets. By increasing the velocity of collision on the Plexiglasas surface (raising the Weber number) up to 32%, the maximum value of droplets spreading is increased 22, 31 and 20 percentage respectively for the fluids of Boger, water and glycerin.

1- مقدمه

برخورد قطره روی صفحات جامد آب‌دوست و آب‌گریز با سطوح صاف و غیرصاف از موضوعات جالب و پیچیده در مکانیک سیالات بوده که موردتوجه بسیاری از محققین می‌باشد. یکی از فاکتورهای مهم در زمینه بررسی برخورد قطرات، تعیین بیشینه مقدار برای طول پخش‌شدگی[1] قطره است. مقدار پخش‌شدگی، یک عامل مهم در تعیین کیفیت سطح پرداخت شده، در عملکرد اسپری خنک‌کننده و پرینتر جوهرافشان می‌باشد. از طرف دیگر، هر چه مقدار طول پخش‌شدگی قطره بیشتر باشد، تمایل آن به جدا شدن از سطح نیز بیشتر است؛ زیرا انرژی لازم برای حالت جمع‌شدگی[2] قطره توسط انرژی برخورد با سطح تأمین می‌شود. به دلیل تأثیر زبری[3] و ترشوندگی[4] سطح، برخورد قطرات روی سطوح خشک نسبت به سطوح خیس دارای

[1] Spreading

[2] Receding
[3] Roughness
[4] Wettability

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. K. Sheykhian, M. Norouzi, M. M. Shahmardan, Experimental study of contact velocity effect on spreading factor of non-Newtonian and Newtonian droplets during collision with dry solid surface, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 03, pp. 146-152, 2018 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.50.1]

الگوی پیچیده‌تری هستند.

ریوبو و همکاران [2,1] با بررسی آزمایشگاهی برخورد قطره روی یک سطح خشک نشان دادند که فرآیند برخورد قطره شامل سه مرحله فروپاشیدگی[1]، پخش‌شدگی و جهش قطره[2] است. آنها شعاع قطره را بدون در نظر گرفتن خواص فیزیکی مایع و سطح محاسبه کردند. شافینو و سونین [3] تغییر شکل قطره جیوه پس از برخورد با یک سطح شیشه‌ای را برای محدوده اعداد وبر $1.81 < We < 2.41$ مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد که در برخورد قطرات روی سطح شیشه برای اعداد وبر کوچک‌تر از 1.88، جهش صورت نمی‌گیرد و قطرات بصورت جمع شدگی روی سطح باقی می‌مانند. پسندیده‌فرد و چاندرا [4] برخورد قطره آب به تنهایی و به همراه سورفکتانت[3] را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که اضافه کردن سورفکتانت باعث افزایش حداکثر قطر پخش‌شدگی قطره می‌شود و ارتفاع جمع شدگی قطره نیز افزایش می‌یابد. سیکالو و همکاران [5] با بررسی برخورد قطرات آب و گلیسیرین روی صفحات شیب‌دار با زوایای مختلف نشان دادند که پدیده جهش قطره در زوایای بزرگ‌تر از 80 درجه روی سطوح نرم و خشک اتفاق می‌افتد و روی سطوح زبر، اثری از جهش مشاهده نمی‌شود.

همچنین لونکاد و همکاران [6] مطالعه آزمایشگاهی سیکالو و همکاران [5] را بصورت عددی شبیه‌سازی کرده و نشان دادند که مدل زاویه تماس استاتیکی[4] قادر به پیش‌بینی رفتار پخش‌شدگی قطره روی سطوح آب‌گریز می‌باشد اما برای سطوح آب‌دوست بایستی از مدل زاویه تماس دینامیکی[5] استفاده شود. رویزمن [7] با اندازه‌گیری دینامیک پخش‌شدگی قطره آب روی سطوح فوق آب‌گریز[6]، قوانین بقای انرژی را استخراج کردند. همچنین قوانین بقای انرژی به دلیل سادگی و ایجاد رابطه‌ای تحلیلی، به‌طور گسترده مورد توجه محققین است. این روش بر این واقعیت استوار است که مجموع انرژی‌های جنبشی (E_{K1})، گرانشی (E_{G1}) و سطحی (E_{S1}) قطره در برخورد، با مجموع انرژی‌های جنبشی (E_{K2})، گرانشی (E_{G2})، سطحی (E_{S2}) و انرژی تلف شده توسط لزجت (E_{D2}) پس از برخورد برای قطره پخش‌شده برابر هستند.

$$E_{K1} + E_{G1} + E_{S1} = E_{K2} + E_{G2} + E_{S2} + E_{D2} \quad (1)$$

آنتونینی و همکاران [8] برخورد قطره روی سطوح آب‌دوست[7] و آب‌گریز شامل پلکسی‌گلس و تفلون را در محدوده وبر بین 30 تا 200 بررسی کردند و نشان دادند که در این محدوده رطوبت‌پذیری، سطح بیشترین تأثیر را بر حداکثر قطر پخش‌شدگی قطره دارد؛ اما برای اعداد وبر بزرگ‌تر، تأثیر نیروهای مویینگی[8] بسیار بیشتر از رطوبت‌پذیری سطح است.

سینگ و داندایات [9] با بکارگیری روش انرژی، رابطه‌ای برای زبری سطح، نرخ پخش‌شدگی و زاویه تماس قطره پیدا کرده و نشان دادند که پخش‌شدگی قطره غیرنیوتنی روی سطح صاف سریع‌تر از سطح زبر است. همچنین نرخ پخش‌شدگی قطره با سیال برشی غلیظ شونده[9] روی سطح زبر بیشتر از قطره با سیال برشی رقیق شونده[10] است. بوسمان و همکاران [10] نیز پدیده پخش‌شدگی قطرات نیوتنی روی سطح استیل ضد زنگ را بصورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. آنها با استفاده از متوسط زاویه دینامیکی دیده شده در آزمایش‌ها، پدیده پخش‌شدگی را در سرعت‌های بالا (بیشتر از 1.5 m/s) بررسی کردند.

علاوه بر این، برگرون و همکاران [11] نشان دادند که با افزودن مقدار کمی از افزودنی‌های پلیمری به سیال نیوتنی، جهش یا پاشش قطره بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد و در نتیجه میزان نشست[11] قطره ویسکوالاستیک[12] روی سطح جامد افزایش می‌یابد. رفعی و بون [12] با تمرکز روی دو پارامتر لزجت و تنش‌های عمودی سیال غیرنیوتنی، به ارزیابی وابستگی نرخ کرنش برشی پرداختند. آنها نشان دادند که به دلیل حضور تنش‌های عمودی، نیرویی ایجاد می‌شود که بر مقاومت لزجت در نزدیکی خط تماس قطره غلبه می‌کند. آنها همچنین نشان دادند که قانون تنر[13] در توصیف رفتار سیالات برشی رقیق شونده بسیار قوی عمل می‌کند. جرمن و برتولا [13] نیز نشان دادند که وجود تنش تسلیم، مانع از پخش‌شدگی یا جمع‌شدگی قطره می‌گردد و این پدیده با افزایش تنش تسلیم شدّت می‌یابد. آنها همچنین ثابت کردند که برای سیالات برشی رقیق شونده، بیشینه قطر پخش‌شدگی بسیار بزرگتر از قطرات نیوتنی می‌باشد. در ادامه، دیکلت و همکاران [14] برای بررسی رفتار دینامیکی قطره سیال غیرنیوتنی در برخورد با سطح صاف، یک مدل محاسباتی یک بعدی بدست آمده از سیال نیوتنی را توسعه دادند.

سپس ان و لی [15] برخورد قطره‌ی برشی رقیق شونده روی سطوح ترشونده را بررسی کرده و رابطه‌ای تجربی برای بیشینه مقدار قطر پخش‌شدگی بدست آوردند. برتولا و وانگ [16] تأثیر عدد وبر و غلظت‌های پلیمری[14] مختلف روی زاویه تماس دینامیکی قطره را برای سطح آب‌گریز بررسی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که با افزایش عدد وبر و غلظت پلیمر، زاویه تماس دینامیکی قطره کاهش می‌یابد. آندراده و همکاران [17] برخورد قطرات با لزجت بالا و پایین شامل آب و محلول آب و گلیسیرین را بوسیله دو دوربین در محدوده اعداد وبر بین 80 و 100 مورد بررسی قرار دادند. آنها با ارزیابی تأثیر لزجت و سرعت برخورد بر حداکثر میزان پخش‌شدگی قطره، مدلی دقیق‌تر از مدل‌های قبلی ارائه دادند. چادهوری و همکاران [18] حداکثر میزان پخش‌شدگی قطره آب در برخورد با سطوح آب‌دوست (شامل پلکسی گلس و شیشه) و آب‌گریز (شامل پارافیلم[15]) را مورد مطالعه قرار داده و نتایج تحقیق خود را با نتایج بدست آمده از مدل‌های پیشین مقایسه کردند. تانگ و همکاران [19] نیز تأثیر افزایش عدد وبر و میزان زبری سطح را بر ضریب گسترش قطرات آب و گلیسیرین در برخورد با سطح استیل ضد زنگ را بررسی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که افزایش عدد وبر باعث شدت بخشیدن به نرخ پخش‌شدگی قطره می‌شود، در حالیکه افزایش زبری سطح تمایل به کاهش نرخ پخش‌شدگی قطره دارد.

در این تحقیق، برخورد قطره سیال غیرنیوتنی باگر[16] (حاصل از ترکیب پلی‌آکریلامید[17]، آب و گلیسیرین) روی دو سطح جامد، صاف و خشک (شامل پلکسی‌گلس و ورق استیل ضد زنگ) بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرارگرفته و با قطرات سیال نیوتنی (شامل آب و گلیسیرین) مقایسه شده

[1] Splashing
[2] Rebounding
[3] Surfactant
[4] Static contact angle
[5] Dynamic Contact Angle
[6] Super-hydrophobic
[7] Hydrophilic
[8] Capillary
[9] Shear thickening
[10] Shear thinning
[11] Deposit
[12] Viscoelastic
[13] Tanner law
[14] Polymer concentrations
[15] Parafilm
[16] Boger fluid
[17] Polyacrylamide

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.50.1]

است. برای انجام این آزمایش، تجهیزات به‌گونه‌ای تعبیه و جایگذاری شده‌اند که قطرات بر روی سطحی افقی عمود بر راستای سوزن برخورد کرده و دوربین بصورت افقی (بدون هیچ‌گونه زاویه‌ای نسبت به سطح) تصویربرداری را انجام می‌دهد. به دلیل تأثیر قابل ملاحظه دما بر نتایج آزمایش، تمام آزمایش‌ها در محیطی با دمای 25 ℃ انجام شده است. برای تشکیل قطره‌ها، ابتدا سیال موردنظر توسط پمپ به درون سوزن هدایت شده و سپس با قطع کردن قدرت پمپ، این امکان برای قطره فراهم می‌شود که در اثر وزن خود و بدون سرعت اولیه سقوط کند. از نوآوری مطالعه حاضر، بررسی اثر پارامتر سرعت برخورد بر رفتار قطره سیال غیرنیوتنی باگر در حالت‌های پخش‌شدگی و جمع‌شدگی می‌باشد. سیال غیرنیوتنی باگر سیالی است که در آن خاصیت لزجت سیال با نرخ کنش برشی تغییر نمی‌کند و دارای مقداری ثابت است. بنابراین در هنگام آزمایش با سیال غیرنیوتنی باگر می‌توان اثر خاصیت الاستیسیته[1] را کاملاً جدا از تأثیر لزجت سیال در نظر گرفت.

2- تجهیزات و مواد مورد استفاده در آزمایش

در شکل 1، نمای شماتیک از تجهیزات مورد استفاده در آزمایش نشان داده شده است. از یک دوربین پر سرعت مدل سیموس پیکو دیامکث[2] (با فریم[3] 8000 تصویر در ثانیه) و لنز مدل آف- اس نیکون[4] با وضوح تصویر 720×720 پیکسل[5] استفاده شده است. برای نورپردازی در محیط آزمایش از نورافکن 2000 وات استفاده شده و نور به کمک پرده سفید رنگ در پس زمینه[6] کار تابیده می‌شود. همچنین با بکارگیری یک دستگاه پمپ تزریق سرنگی مدل جی ام اس اس پی 500[7]، سیال به داخل سوزن با قطر داخلی 1.19 میلی‌متر تزریق می‌شود. در این تحقیق، از ورق آکریلیک[8] با نام تجاری پلکسی‌گلس با ضخامت 3 میلی‌متر و همچنین ورق استیل ضدزنگ به ضخامت 2 میلی‌متر به عنوان صفحات برخورد قطره استفاده شده که هر دو دارای سطوحی آب‌دوست هستند. ابتدا قطرهای افقی و عمودی قطره با استفاده از برنامه پردازش تصاویر نوشته شده در نرم‌افزار متلب[9] استخراج شده و سپس با قرارگیری در روابط (2) و (3)، قطر معادل (D) و سرعت قطره (U) در لحظه برخورد محاسبه می‌گردد [1].

$$D = \sqrt[3]{d_{\mathrm{h}}{}^{2} d_{\mathrm{v}}} \tag{2}$$

$$U = \sqrt{2g(H - D)} \tag{3}$$

پارامترهای d_{h} و d_{v} به ترتیب قطرهای افقی و عمودی قطره هستند. همچنین پارامترهای H و g به ترتیب ارتفاع نقطه سقوط قطره از نوک سوزن تا سطح صفحه برخورد و شتاب گرانشی زمین ($g = 9.81\ (\mathrm{m/s^2})$) می‌باشند.

برای انجام مقایسه بین رفتار سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی در شرایط آزمایشگاهی یکسان، مایعات مختلفی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در این مطالعه، از آب و گلیسیرین به عنوان سیال نیوتنی و از یک محلول پلیمری با غلظت پایین که حاوی 0.01 درصد جرمی پلی‌آکریلامید است، به عنوان سیال غیرنیوتنی استفاده شده است. X طول پخش‌شدگی قطره بر روی سطح است که در تمام شکل‌ها، با تقسیم بر قطر معادل قطره بدون بعد شده و به عنوان

[1] Elasticity property
[2] CMOS (Pco.dimax)
[3] Frame
[4] AF-S Nikon
[5] Pixel
[6] Backlight
[7] JMS SP-500
[8] Acrylic
[9] MATLAB

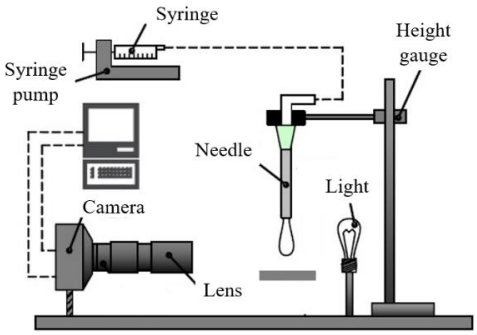

Fig. 1 Schematic plan of the used equipment in this experiment

شکل1 طرح شماتیک تجهیزات مورد استفاده در این آزمایش

ضریب گسترش تعریف می‌شود (X/D) و بر حسب زمان بدون بعد (t^*) که توسط رابطه (4) محاسبه می‌شود، ترسیم شده است [1]:

$$t^* = tU/D \tag{4}$$

با تغییر ارتفاع نوک سوزن از 27 سانتی‌متر تا 47 سانتی‌متر، سرعت قطره نیز از 2.30 تا 3.03 متر بر ثانیه تغییر می‌کند. لازم به ذکر است که ارتفاع سقوط قطره را نمی‌توان از 27 سانتی‌متر کمتر در نظر گرفت؛ زیرا قطره در لحظه‌ی برخورد با سطح صفحه همراه با رشته‌هایی[10] خواهد بود که رفتار قطره را در هنگام برخورد به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. یکی از نکات قابل توجه در جدایش قطرات سیال از نوک سوزن، مربوط به خاصیت الاستیک سیال می‌باشد. به هنگام جدایش قطرات غیرنیوتنی باگر، رشته‌های نازکی تشکیل می‌گردد که با وجود فاصله بین قطره و نوک سوزن، همچنان ارتباط بین قطره و نوک سوزن برقرار می‌ماند و با افزایش بیشتر فاصله، این ارتباط قطع می‌گردد. در حالی‌که این ارتباط بین نوک سوزن و قطره در سیالات نیوتنی بسیار ضعیف بوده و قابل مشاهده نمی‌باشد. چنین پدیده‌هایی بدلیل خاصیت لزجت کششی سیالات غیرنیوتنی می‌باشد که سبب مقاومت سیال در برابر نیروی کشسانی می‌شود. خطای اندازه گیری قطر قطره در حد 2 پیکسل بوده و با توجه به ابعاد تصویر و رزولوشن 720 پیکسلی برای تصویر، هر پیکسل فضایی معادل 0.05 میلی‌متر را شامل می‌شود که با توجه به به ابعاد قطره، خطای محاسبه قطر قطره 3 درصد بوده و دقت اندازه‌گیری آن 97 درصد است.

3- ساخت سیال غیرنیوتنی باگر

سیال باگر مورد استفاده در این آزمایش، از ترکیب 0.01 درصد جرمی پلی- آکریلامید (5×10^6 گرم بر مول) در مخلوط آب و گلیسیرین با نسبت حجمی 20 به 80 تشکیل شده و در دمای 25℃ بر روی همزن با صفحه گرمایشی مدل آیکا آرسی تی[11] قرار داده شده تا کاملاً بصورت همگن حل شود. بعد از آماده‌سازی سیال، لزجت آن برحسب نرخ کرنش برشی توسط ویسکومتر مدل دی وی ای[12] ساخت شرکت بروکفیلد[13] در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده و نتیجه آن در شکل 2 نشان داده شده است. در نتیجه، لزجت معادل سیال غیرنیوتنی باگر 89 میلی پاسکال ثانیه اندازه‌گیری شده است.

همان‌طور که در شکل 2 مشاهده می‌شود، لزجت سیال باگر تقریباً مستقل از نرخ کرنش برشی بوده و مقداری ثابت است. بنابراین در هنگام

[10] Fillament
[11] IKA RCT Hotplate
[12] DVE Viscometer
[13] Brookfield

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.50.1]

آزمایش با سیال غیرنیوتنی باگر می‌توان اثرات الاستیسیته را کاملاً جدا از اثرات لزجت سیال در نظر گرفت. علاوه بر این برای اطمینان از حاصل شدن خاصیت الاستیک در سیال باگر، خاصیت بالاروندگی (اثر وایزنبرگ[1]) آن نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور، سیال باگر داخل بشر ریخته شده و زیر دریل با سرعت 2700 دور بر دقیقه قرار داده می‌شود و میزان بالاروندگی سیال حدود 10 میلی‌متر می‌باشد. هنگامی که سیال توسط میله‌ای داخل یک ظرف همزده می‌شود، سیال تمایل به بالا رفتن از میله چرخان دارد. این پدیده ناشی از اختلاف تنش‌های نرمال اول و دوم در این مواد است. طبق مطالعات انجام شده در این زمینه، اختلاف تنش‌ها دارای مقادیر غیر صفر و مثبت هستند و می توانند به اثرات نیروی گریز از مرکز غلبه کرده و رفتار متضادی را نسبت به سیال نیوتنی از خود نشان دهند. در جدول 1، مقادیر مختلف برای لزجت سیال باگر اندازه‌گیری شده بر حسب نرخ برش‌های مختلف گزارش شده است.

پارامترهای مختلف قطره از جمله سرعت، قطر معادل، کشش سطحی، چگالی و لزجت در دمای 25°C اندازه‌گیری شده و در جدول 2 گزارش شده است. قطر و سرعت قطره توسط روابط (2) و (3) محاسبه شده و کشش سطحی قطره نیز با دستگاه مدل آی اف تی- ای اس 20[2] و به روش قطره آویزان[3] اندازه‌گیری شده است. روش قطره آویزان یک روش نوری برای تعیین کشش سطح یک قطره با استفاده از منحنی مشخصات قطره است. مزیتی که این روش نسبت به دیگر روش‌ها دارد، این است که بر اساس اندازه‌گیری نیرو عمل کرده و حجم نمونه بسیار کوچکی نیاز است [20]. در شکل 3، یک نمونه از آزمایش کشش سطحی به روش قطره آویزان برای قطره آب نشان داده شده است.

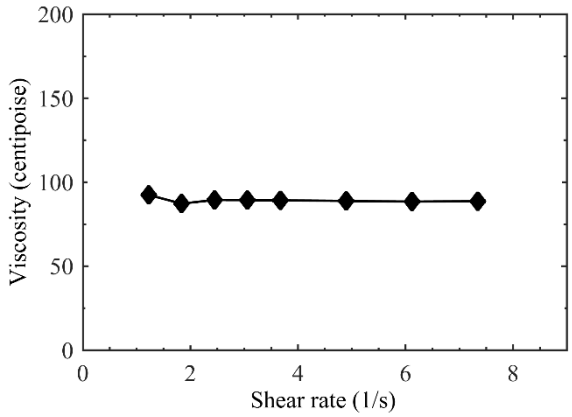

Fig. 2 The Viscosity changes of Boger fluid based on the shear rate

شکل 2 تغییرات لزجت سیال باگر بر حسب نرخ برش

جدول 1 مقادیر لزجت سیال باگر در نرخ برش‌های مختلف

Table 1 The viscosity values of Boger fluid at different shear rates

نرخ برش (1/s)	لزجت (mPa·s)	گشتاور (mN·m)
1.22	92.4	0.010
1.83	87.2	0.015
2.44	89.3	0.019
3.05	89.3	0.024
3.66	89.2	0.030
4.88	88.8	0.038
6.12	88.4	0.047
7.42	88.7	0.059

[1] Weissenberg
[2] IFT-ES20
[3] Pendant drop

جدول 2 پارامترهای اندازه‌گیری شده برای سیالات مختلف در دمای 25°C

Table 2 the measured parameters for different fluids in 25°C

پارامترهای مسئله	آب	گلیسیرین	باگر
سرعت قطره با ارتفاع 27 سانتی‌متر(m/s)	2.30	2.31	2.31
سرعت قطره با ارتفاع 47 سانتی‌متر(m/s)	3.03	3.04	3.04
قطر معادل قطره (mm)	3.27	2.91	2.98
کشش سطحی (dynes/cm)	70.6	63	64.2
چگالی (kg/m^3)	1001	1260	1210
لزجت (mPa.s)	1	1490	89

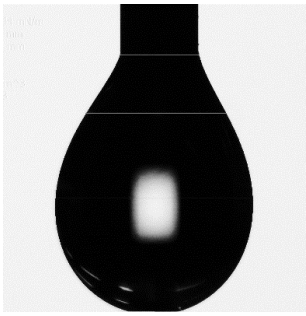

Fig. 3 Test of surface tension for the water droplet

شکل 3 تست کشش سطحی برای قطره آب

مدول هدر رفته[4] (G'') معرف بخش سیال ماده (لزجت) بوده و مدول ذخیره شده[5] (G') بیانگر بخش جامد ماده (الاستیک) است. برای حالتی که مدول‌های G', G'' هیچ نقطه تلاقی نداشته باشند از روابط (5) و (6) برای محاسبه آنها استفاده می‌شود [21]:

$$G' = \sum_{i=1}^{n} \frac{\eta_i \lambda_i \omega^2}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \tag{5}$$

$$G'' = \eta_s \omega + \sum_{i=1}^{n} \frac{\eta_i \omega^2}{1 + \lambda_i^2 \omega^2} \tag{6}$$

در روابط (5) و (6)، η_i و λ_i به‌ترتیب لزجت و زمان رهایی از تنش سیال هستند و ω فرکانس زاویه‌ای را نشان می‌دهد. در جدول 3 روند تغییرات مدول ذخیره شده و مدول هدر رفته برای فرکانس‌های زاویه‌ای مختلف ترسیم شده و گزارش شده است. یکی از پارامترهای مؤثر بر سقوط قطره سیال غیرنیوتنی، زمان رهایی از تنش[6] است. زمان رهایی از تنش معرف مدت زمان لازم برای صفر شدن تنش برشی بعد از برداشتن تغییر شکل از روی المان سیال است. معمولاً برای یک سیال غیرنیوتنی، گستره‌ای از مدهای نوسانی وجود دارد که برای هر مد یک زمان رهایی از تنش بدست می‌آید.

در این تحقیق، برای اندازه‌گیری خواص سیال غیرنیوتنی باگر، از یک دستگاه رئومتر از شرکت آنتون پار با مدل ام سی آر 300[7] استفاده شده است. همچنین مقادیر G'' و G' بر حسب سرعت زاویه‌های مختلف به وسیله دستگاه رئومتر اندازه‌گیری شده است. با استفاده از مدل ماکسول تعمیم‌یافته چهار شاخه (هر شاخه دارای یک فنر و دمپر به عنوان خاصیت لزجت و خاصیت الاستیک است) و کد آماده شده در نرم افزار متلب، مقادیر لزجت و زمان رهایی از تنش برای هر شاخه محاسبه می‌شود. در انتها، مقادیر لزجت کل و متوسط زمان رهایی از تنش کل به ترتیب توسط روابط (6) و (7) محاسبه می‌شود. مدل ماکسول تعمیم‌یافته از طریق موازی قرار گرفتن

[4] Loss module
[5] Storage module
[6] Relaxation time
[7] Anton Paar Rheometer (MCR300)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.50.1]

جدول3 مقادیر مدول ذخیره شده و مدول هدر رفته برای فرکانس‌های زاویه‌ای مختلف

Table 3 The values of storage modulus and loss modulus for different angular frequencies

ω(1/s) فرکانس زاویه‌ای	G'(Pa) مدول ذخیره شده	G''(Pa) مدول هدر رفته
3.26	0.099	0.372
2.82	0.093	0.367
2.44	0.080	0.350
2.11	0.082	0.322
1.83	0.082	0.297
1.58	0.072	0.277
1.37	0.075	0.257
1.19	0.065	0.2393
1.03	0.065	0.219
0.887	0.061	0.205
0.768	0.053	0.193
0.664	0.050	0.172
0.575	0.056	0.168
0.497	0.046	0.158
0.43	0.028	0.148

تعـداد متنـاهی از شاخه‌های دارای فنر و دمپر بدسـت می‌آید. در سیالات ویسکوالاستیک، یک مدل می‌تواند بینهایت شاخه به صورت سری، موازی یا ترکیبی از این دو داشته باشد. زیرا یک ماده پلیمری از تعـداد زیـادی از مولکول‌هـای رشـته‌ای بـا طول‌هـای مختلـف و ساختارهای فضایی متنوع تشکیل شده است؛ در نتیجه، طیف وسیعی از لزجت‌ها و زمان‌های رهایی از تنش وجود دارد. در شکل 4، شماتیک مدل ماکسول تعمیم‌یافته با بی‌نهایت شاخه نشان داده شده است.

بنابراین در تحقیق حاضر، چهار شاخه برای سیال در نظر گرفته شده است که هر شاخه با یک زمان رهایی از تنش (λ_i) و یک لزجت سیال (η_i) همراه است. با توجه به جدول 4 و با استفاده از رابطه (7) مقدار زمان رهایی از تنش کل محاسبه می‌شود و برای سیال باگر ساخته شده، دارای مقداری برابر با 1.9 ثانیه می‌باشد [21].

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum \eta_i \lambda_i}{\sum \eta_i} \tag{7}$$

مقیاس زمان مشخصه برای یک سیال غیرنیوتنی، همان زمان رهایی از تنش است. این زمان برای گازها و مایعات نیوتنی بسیار کوچکتر از 10^{-6} تا 10^{-4} ثانیه بوده و برای جامدات الاستیک بزرگتر از 100 ثانیه می‌باشد. از زمان رهایی از تنش برای بدست آوردن عدد وایزنبرگ استفاده می‌شود. عدد

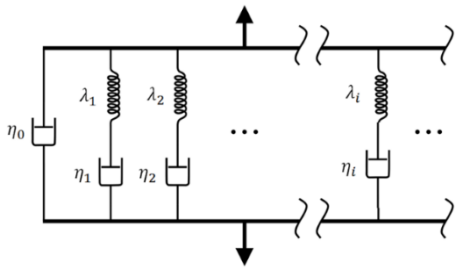

Fig. 4 The schematic of the generalized Maxwell model for viscoelastic fluid

شکل 4 شماتیک مدل ماکسول تعمیم‌یافته برای سیال ویسکوالاستیک

جدول 4 مقادیر زمان رهایی از تنش و لزجت برای شاخه‌های مختلف

Table 4 The values of relaxation time and viscosity for different modes

η_i (Pas)	λ_i (s)	Mode No (i)
1.73	0.0001	1
2.76	0.0148	2
6.02	0.0280	3
8.69	4.18	4

وایزنبرگ بر اساس نسبت نیروی ناشی از خاصیت الاستیک به نیروی حاصل از لزجت تعریف می‌شود. بنابراین برای یک سیال غیرنیوتنی، بالا بودن عدد وایزنبرگ به معنای زیاد بودن خاصیت الاستیک آن می‌باشد. اعداد بدون بعد مورد استفاده در این تحقیق، اعداد وبر و وایزنبرگ می‌باشد که توسط رابطه (8) تعریف شده و مقادیر آنها در جدول 5 گزارش شده است.

$$\mathrm{We} = \frac{\rho D U^2}{\sigma} \qquad \text{(8- الف)}$$

$$\mathrm{Wi} = \lambda \dot{\gamma} \qquad \text{(8- ب)}$$

پارامترهای ρ، σ و $\dot{\gamma}$ به‌ترتیب چگالی، کشش سطحی و نرخ کرنش برشی سیال هستند.

4-بحث و بررسی نتایج

در این بخش، نتایج مربوط به اثر پارامتر سرعت برخورد قطره سیال غیرنیوتنی باگر با سطح صفحات پلکسی‌گلس و استیل برای حالت‌های پخش‌شدگی و جمع‌شدگی بررسی شده و با نتایج سیالات نیوتنی مقایسه شده است. در شکل‌های 5 و 6، ضریب گسترش قطره باگر روی صفحه پلکسی‌گلس برای دو سرعت برخورد مختلف ترسیم شده و با قطرات آب و گلیسیرین مقایسه شده است. وقتی قطره باگر با سرعت زیاد به سطح صفحه پلکسی‌گلس برخورد می‌کند (در عدد We بزرگتر)؛ به دلیل انرژی جنبشی زیاد قطره در هنگام برخورد، قطره بیشتر پخش شده و این پخش‌شدگی در مدت زمان بیشتری (در t^* بزرگتر) انجام می‌پذیرد. همچنین با افزایش سرعت برخورد، نرخ پخش‌شدگی و جمع‌شدگی قطره نیز افزایش می‌یابد. برای قطرات آب و گلیسیرین نیز همین روند البته به‌ترتیب با شدت‌های بیشتر و کمتر برقرار است.

همان‌طور که در شکل‌های 5 و 6 مشاهده می‌شود، حداکثر مقدار ضریب گسترش قطره باگر روی پلکسی‌گلس با سرعت برخورد 2.30 متر برثانیه، دارای مقدار 2.41 است؛ در حالیکه با سرعت برخورد 3.03 متر بر ثانیه، مقدار ضریب گسترش آن برابر با 2.94 است. بنابراین با افزایش 32 درصدی سرعت برخورد قطره باگر، میزان پخش‌شدگی آن 22 درصد است. این پدیده تأثیر قابل توجه سرعت برخورد بر افزایش میزان ضریب گسترش را نشان می‌دهد. در حالیکه برای سیال آب، رشد 31 درصدی و برای سیال گلیسیرین، افزایش 20 درصدی ضریب گسترش به هنگام افزایش 32 درصدی سرعت برخورد مشاهده می‌شود. علت افزایش بیشتر ضریب گسترش قطره آب، کم بودن لزجت آب نسبت به سیال باگر است.

برای مشاهده بهتر تغییرات پخش‌شدگی قطرات باگر، آب و گلیسیرین، تصاویر پخش‌شدگی قطرات آنها روی سطح پلکسی‌گلس برای زمان‌های مختلف در شکل‌های 7 تا 9، نمایش داده شده‌اند. با توجه به شکل 5، قطره باگر بعد از برخورد با سطح پلکسی‌گلس به میزان 4 درصد از حداکثر قطر پخش‌شدگی آن جمع می‌شود و با افزایش سرعت برخورد (با توجه به شکل 6)، این جمع‌شدگی تا 5 درصد از حداکثر قطر پخش‌شدگی افزایش می‌یابد. این امر نشان دهنده تأثیر کم سرعت برخورد قطره بر میزان جمع‌شدگی آن

جدول 5 مقادیر اعداد بدون بعد برای قطرات نیوتنی و غیرنیوتنی

Table 5 The values of dimentionless numbers for Newtonian and non-Newtonian droplets

اعداد بدون بعد	سیال آب	سیال گلیسیرین	سیال باگر
We_1	245	310	300
We_2	425	545	520
Wi_1	0	0	1467
Wi_2	0	0	1932

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.50.1]

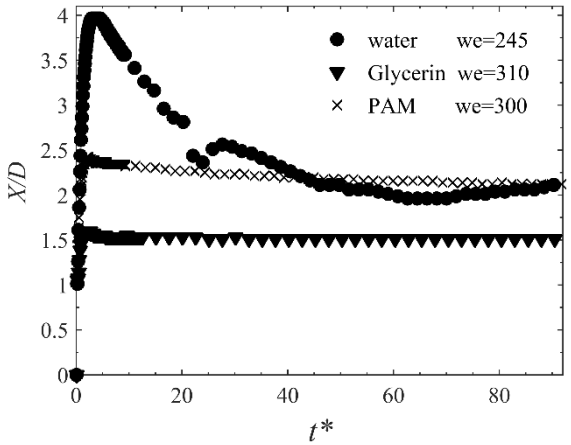

Fig. 5 spreading factor of droplets on the Plexiglas plate with the velocity of 2.30 m/s.

شکل 5 ضریب گسترش قطرات روی صفحه پلکسی‌گلس با سرعت 2.30 متر بر ثانیه

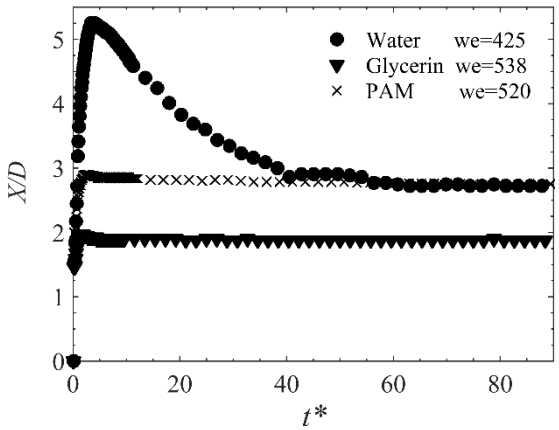

Fig. 6 spreading factor of droplets on the Plexiglas plate with the velocity of 3.03 m/s

شکل 6 ضریب گسترش قطرات روی صفحه پلکسی‌گلس با سرعت 3.03 متر بر ثانیه

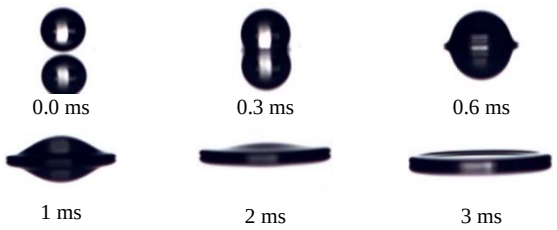

Fig. 7 The Boger droplet collision with a Plexiglas plane (We = 530)

شکل 7 برخورد قطره باگر با یک صفحه پلکسی‌گلس (We = 520)

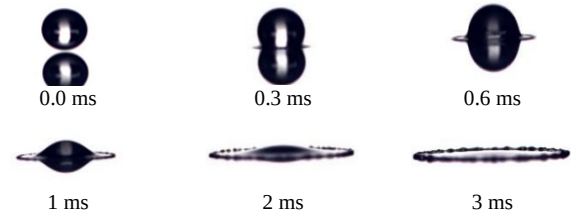

Fig. 8 The water droplet collision with a Plexiglas plane (We = 430)

شکل 8 برخورد قطره آب با یک صفحه پلکسی‌گلس (We = 425)

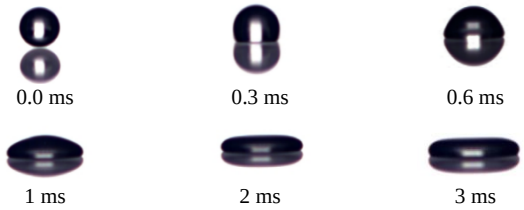

Fig. 9 The glycerin droplet collision with a Plexiglas plane (We = 545)

شکل 9 برخورد قطره گلیسیرین با یک صفحه پلکسی‌گلس (We = 538)

است. در حالیکه، سرعت برخورد قطره نقش بسزایی در حداکثر مقدار ضریب گسترش آن دارد.

همچنین سیال باگر به دلیل داشتن مقدار لزجت 89 برابری نسبت به آب، به میزان 9 درصد حداکثر قطر پخش‌شدگی قطره جمع می‌شود. در حالیکه مقدار جمع‌شدگی برای قطره گلیسیرین برابر با 3 درصد حداکثر قطر پخش‌شدگی آن می‌باشد که در مقایسه با جمع‌شدگی 51 درصدی آب، بسیار کمتر است و این به دلیل دارا بودن مقدار لزجت 1490 برابری نسبت به آب می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌های 10 و 11 مشاهده می‌شود، حداکثر مقدار بدون بعد ضریب گسترش برای قطره باگر روی سطح استیل با سرعت 2.30متر برثانیه در حدود 2.27 است که با افزایش 32 درصدی سرعت برخورد، به میزان 18 درصد افزایش یافته و به مقدار 2.67 می‌رسد. با زیاد شدن سرعت برخورد برای قطرات آب و گلیسیرین، مقدار ضریب گسترش به‌ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد و این به دلیل لزجت‌های کم و زیاد آب و گلیسیرین نسبت به سیال باگر است. همچنین نرخ جمع‌شدگی قطرات آزمایش شده در سرعت برخورد بالاتر نیز بیشتر بوده و این به دلیل انرژی جنبشی بیشتر آنها است.

ولی برای قطره گلیسیرین روی سطح صفحات پلکسی‌گلس و استیل، مقدار نرخ جمع‌شدگی مستقل از سرعت برخورد آن است و این به دلیل لزجت بالای آن می‌باشد. در صورت یکسان بودن سرعت برخورد، مقایسه مدت زمان لازم برای حاصل شدن حداکثر مقدار پخش‌شدگی برای هر دو صفحه نشان می‌دهد که این زمان برای قطره آب نسبت به قطرات باگر و گلیسیرین بیشتر است. از طرف دیگر، نرخ جمع‌شدگی قطره آب زیاد است ولی بدلیل بیشتر بودن مقدار جمع‌شدگی آن نسبت به قطرات باگر و

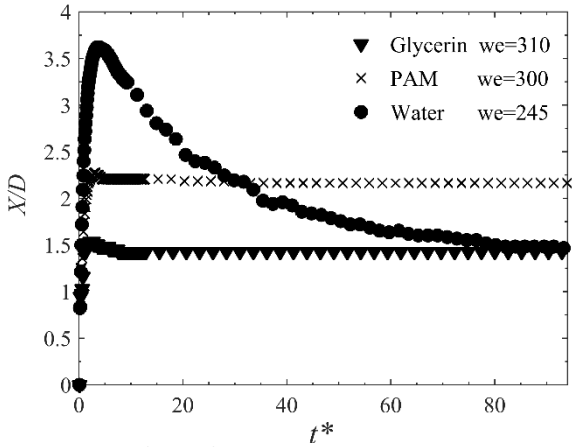

Fig. 10 Spreading factor of droplets on the steel plane with the velocity of 2.30 m/s

شکل 10 ضریب گسترش قطرات روی صفحه استیل با سرعت 2.30 متر بر ثانیه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.50.1]

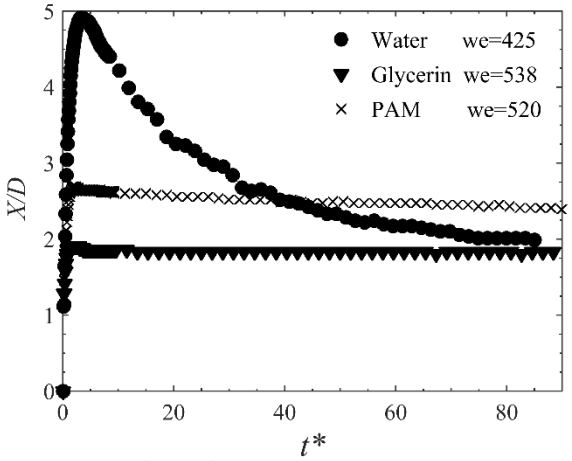

Fig. 11 Spreading factor of droplets on the steel plane with the velocity of 3.03 m/s

شکل 11 ضریب گسترش قطرات روی صفحه استیل با سرعت 3.03 متر بر ثانیه

گلیسیرین، مدت زمان لازم برای رسیدن به کمینه مقدار قطر جمع‌شدگی نیز بیشتر است. مقادیر بیشتر جمع‌شدگی و پخش‌شدگی برای قطره آب (نسبت به قطرات باگر و گلیسیرین) بدلیل لزجت بسیار کم آن در مقایسه با سیالات باگر و گلیسیرین می‌باشد. همان‌طور که در جدول 2 قبلاً اشاره گردید، مقدار لزجت سیال گیلیسرین 1490 برابر مقدار لزجت آب است. در شکل 16، با افزایش 32 درصدی سرعت برخورد روی صفحه استیل ضد زنگ، حداکثر مقدار ضریب گسترش برای قطره باگر به میزان 18 درصد افزایش داشته و برای قطرات آب و گلیسیرین رشدی به‌ترتیب به میزان 15 و 30 درصد را نشان می‌دهند.

5- نتیجه‌گیری

در این مطالعه آزمایشگاهی، اثر پارامتر سرعت برخورد بر تغییرات ضریب گسترش قطره غیرنیوتنی باگر روی سطوح پلکسی‌گلس و استیل ضد زنگ در دو ارتفاع 27 و 47 سانتی‌متری از سطح برخورد و برای محدوده اعداد وبر $245 \leq We \leq 538$ بررسی شده و با قطرات نیوتنی آب و گلیسیرین مقایسه شده‌اند. نتایج این تحقیق بطور خلاصه عبارتند از:

- با افزایش 32 درصدی سرعت برخورد (افزایش عدد We)، مقدار بیشینه پخش‌شدگی قطرات باگر، آب و گلیسیرین به‌ترتیب به میزان 22، 31 و 20 درصد افزایش می‌یابد.

- قطره باگر بعد از برخورد با سطح پلکسی‌گلس به میزان 4 درصد از حداکثر قطر پخش‌شدگی آن جمع می‌شود و با افزایش 32 درصدی سرعت برخورد، این جمع‌شدگی تا 5 درصد از حداکثر قطر پخش‌شدگی افزایش می‌یابد. بنابراین سرعت برخورد قطره بر میزان جمع‌شدگی آن تأثیر بسیار کمی دارد؛ ولی سرعت برخورد قطره نقش بسزایی در حداکثر مقدار ضریب گسترش آن دارد.

- قطره باگر بعد از برخورد با سطح استیل به میزان 9 درصد حداکثر قطر پخش‌شدگی آن جمع می‌شود. در حالی‌که، مقدار جمع‌شدگی برای قطرات آب و گلیسیرین به‌ترتیب برابر با 51 و 3 درصد حداکثر قطر پخش‌شدگی آنها است.

- برای قطره گلیسیرین روی سطح صفحات پلکسی‌گلس و استیل، مقدار نرخ جمع‌شدگی مستقل از سرعت برخورد آن است و این به‌دلیل لزجت بالای آن می‌باشد.

- لزجت قطرات نقش عمده‌ای در سرعت و حداکثر مقدار پخش‌شدگی و جمع‌شدگی آنها ایفا می‌کند. قطره آب به‌دلیل لزجت کمتر آن از قطره باگر دارای مقادیر بیشتری از پخش‌شدگی و جمع‌شدگی است؛ ولی مدت زمان لازم برای رسیدن به بیشینه مقدار پخش‌شدگی و کمینه مقدار جمع‌شدگی نیز افزایش قابل توجهی دارد.

- با زیاد شدن 32 درصدی سرعت برخورد روی سطح صفحه استیل ضد زنگ، حداکثر مقدار ضریب گسترش برای قطره باگر به میزان 18 درصد افزایش داشته و برای قطرات آب و گلیسیرین رشدی به‌ترتیب به میزان 15 و 30 درصد را نشان می‌دهند.

6- مراجع

[1] R. Rioboo, M. Marengo, C. Tropea, Time evolution of liquid drop impact onto solid, dry surfaces, *Experiments in Fluids*, Vol. 33, No. 1, pp. 112-124, 2002.

[2] R. Rioboo, C. Tropea, M. Marengo, Outcomes from a drop impact on solid surfaces, *Atomization and Sprays*, Vol. 11, No. 2, pp. 155-165, 2001.

[3] S. Schiaffino, A. A. Sonin, Molten droplet deposition and solidification at low Weber numbers, *Physics of Fluids*, Vol. 9, No. 11, pp. 3172-3187, 1997.

[4] M. Pasandideh-Fard, Y. Qiao, S. Chandra, J. Mostaghimi, Capillary effects during droplet impact on a solid surface, *Physics of Fluids*, Vol. 8, No. 3, pp. 650-659, 1996.

[5] Š. Šikalo, C. Tropea, E. Ganić, Impact of droplets onto inclined surfaces, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 286, No. 2, pp. 661-669, 2005.

[6] S. F. Lunkad, V. V. Buwa, K. Nigam, Numerical simulations of drop impact and spreading on horizontal and inclined surfaces, *Chemical Engineering Science*, Vol. 62, No. 24, pp. 7214-7224, 2007.

[7] I. V. Roisman, Inertia dominated drop collisions. II. An analytical solution of the Navier–Stokes equations for a spreading viscous film, *Physics of Fluids*, Vol. 21, No. 5, pp. 1-11, 2009.

[8] C. Antonini, A. Amirfazli, M. Marengo, Drop impact and wettability: From hydrophilic to superhydrophobic surfaces, *Physics of Fluids*, Vol. 24, No. 10, pp. 1-13, 2012.

[9] S. Singh, B. Dandapat, Spreading of a non-Newtonian liquid drop over a homogeneous rough surface, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 419, No. 4, pp. 228-232, 2013.

[10] M. Bussmann, S. Chandra, J. Mostaghimi, Modeling the splash of a droplet impacting a solid surface, *Physics of Fluids*, Vol. 12, No. 12, pp. 3121-3132, 2000.

[11] V. Bergeron, D. Bonn, J. Y. Martin, L. Vovelle, Controlling droplet deposition with polymer additives, *Nature*, Vol. 405, No. 6788, pp. 772-775, 2000.

[12] S. Rafaı¨, D. Bonn, Spreading of non-Newtonian fluids and surfactant solutions on solid surfaces, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 358, No. 1, pp. 58-67, 2005.

[13] G. German, V. Bertola, Impact of shear-thinning and yield-stress drops on solid substrates, *Journal of Physics: Condensed Matter*, Vol. 21, No. 37, pp. 1-16, 2009.

[14] A. Dechelette, P. Sojka, C. Wassgren, Non-Newtonian drops spreading on a flat surface, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 132, No. 10, pp. 101302-101309, 2010.

[15] S. M. An, S. Y. Lee, Observation of the spreading and receding behavior of a shear-thinning liquid drop impacting on dry solid surfaces, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 37, No. 2, pp. 37-45, 2012.

[16] V. Bertola, M. Wang, Dynamic contact angle of dilute polymer solution drops impacting on a hydrophobic surface, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 481, No. 1, pp. 600-608, 2015.

[17] R. Andrade, O. Skurtys, F. Osorio, Experimental study of drop impacts and spreading on epicarps: effect of fluid properties, *Journal of Food Engineering*, Vol. 109, No. 3, pp. 430-437, 2012.

[18] R. Choudhury, J. Choi, S. Yang, Y.-J. Kim, D. Lee, Maximum spreading of liquid drop on various substrates with different wettabilities, *Applied Surface Science*, Vol. 415, No. 5, pp. 149-154, 2017.

[19] C. Tang, M. Qin, X. Weng, X. Zhang, P. Zhang, J. Li, Z. Huang, Dynamics of droplet impact on solid surface with different roughness, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 96, No. 6, pp. 56-69, 2017.

[20] E. Y. Arashiro, N. R. Demarquette, Use of the pendant drop method to measure interfacial tension between molten polymers, *Materials Research*, Vol. 2, No. 1, pp. 23-32, 1999.

[21] K. P. Jackson, K. Walters, R. W. Williams, A rheometrical study of boger fluids, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 14, No. 1, pp. 173-188, 1984.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-17]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.50.1]