



مطالعه آزمایشگاهی تاثیر زبری سطح بر برخورد قطرات نیوتنی بر روی سطوح کروی

لاله رزاقی^۱، محمود نوروزی^{۲*}، محمدحسن کیهانی^۲^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.^۲ استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱

چکیده

در این پژوهش، رفتار دینامیکی قطرات نیوتنی حاصل از ترکیبات مختلف گلیسرین-آب در برخورد با سطوح کروی با زبری و قطر مختلف به صورت تجربی با استفاده از تصویربرداری با سرعت بالا و پردازش تصویر مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر ویسکوزیته سیال، سرعت برخورد، زبری سطح، نسبت قطر (D^*) بر گسترش، بازگشت و پاشش قطره ارزیابی گردید. نتایج نشان دادند که ویسکوزیته پایین تر باعث افزایش ضریب بیشینه پخش (β_{max}) و بازگشت دینامیکی می شود، در حالی که ویسکوزیته بالا با اتلاف انرژی بیشتر، گسترشی محدودتر و بازگشتی ضعیف تر دارد. افزایش سرعت برخورد موجب افزایش β_{max} و تأخیر در زمان رسیدن به بیشینه گسترش شد. زبری بالا پاشش و ناپایداری گسترش قطره را افزایش داد، در حالی که انحنای بیشتر سطح گسترش را تسهیل کرد. تعامل زبری و انحنا نشان داد نقش انحنا در زبری کم برجسته تر است و در زبری بالا تأثیر زبری غالب است. این نتایج اهمیت هم زمان پارامترهای رئولوژیکی سیال، هندسه سطح و شرایط برخورد را در توصیف دینامیک قطرات روی سطوح کروی تأکید می کند.

کلمات کلیدی: برخورد قطره؛ زبری سطح؛ قطر گسترش؛ سیال نیوتنی.

An Experimental Study on the Effect of Surface Roughness on the Impact of Newtonian Droplets on Spherical Surfaces

L. Razzaghi¹, M. Norouzi^{2,*}, M. H. Kayhani³¹ M.Eng. Student, Mech. Eng., Shahrood Univ., Shahrood, Iran.² Prof., Mech. Eng. Dept., Shahrood Univ., Shahrood, Iran.

Abstract

In this study, the dynamic behavior of Newtonian droplets composed of various glycerol-water mixtures impacting spherical surfaces with different roughness and diameters was experimentally investigated using high-speed imaging and image processing techniques. The effects of fluid viscosity, impact velocity, surface roughness, and diameter ratio (D^*) on droplet spreading, rebound, and splashing were evaluated. Results showed that lower viscosity led to increased maximum spreading ratio (β_{max}) and enhanced dynamic rebound, whereas higher viscosity caused greater energy dissipation, limited spreading, and weaker rebound. Increasing impact velocity resulted in higher β_{max} and delayed time to reach maximum spread. High surface roughness promoted splashing and instability during spreading, while greater surface curvature facilitated droplet expansion. The interaction between roughness and curvature revealed that curvature plays a more prominent role at low roughness, whereas roughness dominates at high levels. These findings highlight the combined importance of fluid rheology, surface geometry, and impact conditions in characterizing droplet dynamics on spherical surfaces.

Keywords: Droplet impact; Surface roughness; Spreading diameter; Newtonian fluid.

۱- مقدمه

برخورد قطرات مایع بر روی سطوح جامد، پدیده‌ای است که هم در طبیعت و هم در کاربردهای صنعتی نقش بسیار مهمی دارد. این پدیده در زمینه‌هایی مانند چاپ جوهرافشان [۱]، پوشش‌دهی اسپری [۲]، یخ‌زدگی هواپیما [۳]، خنک‌سازی سطوح داغ [۴]، تزریق سوخت در موتورهای احتراق داخلی [۵]، کاربرد گسترده‌ای دارد.

در این بخش، به بررسی دقیق و نظام‌مند رفتار قطرات نیوتنی هنگام برخورد با سطوح جامد پرداخته می‌شود. مطالعات گسترده‌ای در زمینه برخورد قطرات نیوتنی روی سطوح صاف انجام شده است که پارامترهایی همچون سرعت برخورد، کشش سطحی، زاویه تماس و ویسکوزیته (گرانروی) را بررسی می‌کنند. آنتونینی و همکاران [۶] نشان دادند که در بازه عدد وبر متوسط ($30 < We < 200$)، ترشوندگی نقش کلیدی در تعیین بیشینه گسترش و زمان تماس قطره دارد، اما در اعداد وبر بالا اثر ترشوندگی کاهش می‌یابد. زاویه تماس پیش‌رونده به‌عنوان پارامتری مؤثر در کنترل فرآیند پخش معرفی شده است. وادیلو و همکاران [۷] با تأکید بر اهمیت زاویه تماس دینامیکی پیش‌رونده، بهبود دقت مدل‌های مبتنی بر توازن انرژی را با لحاظ این پارامتر نشان دادند.

شیخیان و همکاران [۸] نشان دادند که با افزایش سرعت برخورد (عدد وبر)، حداکثر مقدار و نرخ پخش‌شدگی و جمع‌شدگی قطرات افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش لزجت قطرات، مقدار و نرخ پخش‌شدگی و جمع‌شدگی قطرات کاهش می‌یابد.

کلانت و همکاران [۹] رابطه تجربی $D_{max} \approx D_0 We^{1/4}$ در مایعات با ویسکوزیته پایین، پخش‌شدگی قطره پس از برخورد عمده‌تاً تحت تأثیر نیروهای اینرسی و کشش سطحی است و رابطه تجربی $D_{max} \approx D_0 We^{1/4}$ به‌خوبی برقرار می‌باشد اما در مایعات ویسکوز، بخشی از انرژی جنبشی صرف غلبه بر مقاومت ویسکوزی شده و در نتیجه، میزان پخش‌شدگی کاهش می‌یابد و رابطه فوق دقت خود را از دست می‌دهد. شودوری و همکاران [۱۰] نقاط ضعف مدل‌های پایه انرژی را در عدم در نظر گرفتن تلفات انرژی ناشی از اثرات سطحی و لزجتی بیان کردند و مدل اصلاح شده‌ای ارائه دادند که دقت بهتری داشت.

در مطالعات مرتبط با برخورد قطرات مایع با سطوح جامد، مدل‌های کلاسیک اغلب بر پایه عدد وبر توسعه یافته‌اند و فرض می‌کنند که نیروهای اینرسی و کشش سطحی نقش اصلی را در تعیین گسترده‌ی قطره ایفا می‌کنند. با این حال، در شرایطی که ویسکوزیته سیال قابل توجه باشد، این مدل‌ها دقت خود را از دست می‌دهند. در همین راستا رویسمن [۱۱] مدلی تحلیلی $\xi_{max} = 0.87 \cdot Re^{1/5} - 0.40 \cdot Re^{2/5} \cdot We^{-1/2}$ برای پیش‌بینی بیشینه گسترده‌ی قطره ارائه کرده است که اثر همزمان اینرسی، کشش سطحی و ویسکوزیته را در نظر می‌گیرد.

ریوبو و همکاران [۱۲] مراحل زمانی برخورد قطره را شامل فازهای سینماتیکی، گسترش، آرامش و تعادل تشریح کردند و نشان دادند که در فازهای بعدی، ترشوندگی و زبری سطح تأثیرگذار هستند. پسندیده‌فرد و همکاران [۱۳] نشان دادند که در مرحله‌ی اولیه برخورد، کشش سطحی نقش کمی دارد و اینرسی غالب است. در مرحله‌ی پخش‌شدگی، کشش سطحی و ویسکوزیته باعث توقف گسترش و آغاز بازگشت قطره می‌شوند. افزودن ماده فعال سطحی^۱ قطر بیشینه را افزایش و ارتفاع بازگشت را کاهش می‌دهد. مدل عددی آن‌ها با داده‌های تجربی تطابق خوبی دارد، اما در مرحله‌ی بازگشت قطر تماس را بیش‌برآورد می‌کند. سانچی و لوزه [۱۴] با بهره‌گیری از شبیه‌سازی‌های عددی گسترده، نشان داد که حتی در قطره‌هایی با ویسکوزیته پایین (عدد اهمزورژ کوچک)، اتلاف ویسکوزی نقش قابل توجهی در فرآیند برخورد ایفا می‌کند. این یافته در تضاد با برخی فرضیات پیشین است که نقش ویسکوزیته را در رژیم‌های با Oh کوچک ناچیز در نظر می‌گرفتند.

یانگ و همکاران [۱۵] اثر شیب سطح و ویسکوزیته را در تغییر بیشینه گسترش بررسی کردند و مدل تحلیلی پخش نرمال شده‌ای تا عدد وبر تقریباً ۶۰ ارائه نمودند. لیانگ و همکاران [۱۶] نشان دادند که ویسکوزیته پایین باعث تسریع پاشش تاجی^۲ و ویسکوزیته بالا تأخیر در آن ایجاد می‌کند و کشش سطحی به‌عنوان عامل مقاومت اصلی در برابر پخش تاجی مطرح است.

با توجه به اینکه سطوح مهندسی شده در کاربردهای عملی معمولاً دارای زبری و ساختارهای هندسی متنوعی هستند،

^۱ Surfactant

^۲ Corona splash

علاوه بر زبری کلی، هندسه و ساختار میکروسکوپی سطح نقش حیاتی در دینامیک برخورد قطره ایفا می کنند. این ساختارها می توانند باعث ناپایداری های موضعی شده یا رفتار ترشوندگی را تغییر دهند.

هندسه ی ساختارها موضوعی مهم در دینامیک برخورد قطره است در همین راستا هاو [۲۲] نشان داد که پاشش تاجی در زبری های متوسط رخ می دهد، در حالی که زبری های بسیار کم یا زیاد به پاشش آنی منجر می شوند. شو [۲۳] نیز دو نوع پاشش تاجی و آنی را تفکیک کرده و نشان داد که پاشش تاجی به تأثیرات هوا و ویسکوزیته و پاشش آنی به زبری سطح و ارتفاع ستون های ساختاری وابسته است. رنژ و فویوآ [۲۴] نیز اثبات کردند که زبری های نوک تیز موجب افزایش ناپایداری لبه ای و جدایش سریع تر لایه مایع^۴ از سطح می شوند. همچنین، وانگ و همکاران [۲۵] نشان دادند که لبه های تیز در بسترهای پلیمری (PDMS)^۵ باعث پین شدن^۶ شدید خط تماس^۷ و افزایش زاویه تماس ظاهری^۸ تا حدود ۱۸۰ درجه می شوند.

تأثیر آرایش و جهت گیری ساختارها نیز مهم است. ابوالقاسمی بیزاکی و محمدی [۲۶] نشان دادند که شیارهای جهت دار می توانند زمان تماس قطره را تا ۷۰٪ کاهش دهند. در همین راستا، ساپکال و همکاران [۲۷] دریافتند که افزایش فاصله بین ستون های میکروسکوپی، آستانه ی پاشش را کاهش می دهد. این رفتار به ناپایداری کلین-هلمهولتز^۹ نسبت داده شد. این ناپایداری یک پدیده ی هیدرودینامیکی است که در مرز بین دو سیال با سرعت متفاوت (مانند لایه مایع و هوای محبوس شده) رخ می دهد و با ایجاد امواج در این مرز، باعث جدایش قطرات کوچک و پاشش می شود. یادا و همکاران [۲۸] نیز نشان دادند که ساختارهای نامتقارن می توانند پخش قطره را کنترل کنند و عدد موئینگی اصطکاک خط تماس^{۱۰} (Ca) را برای توصیف این رفتار معرفی کردند. جونگ و بوشان [۲۹] نیز مدلی برای پیش بینی گذار بین حالت های ترشوندگی کسی و ونزل^{۱۱} توسعه دادند که وابستگی به فاصله ساختارها، سرعت

برخورد قطره با سطوح زبر یک پدیده ی پیچیده است که از برهم کنش همزمان زبری، ویسکوزیته و کشش سطحی تبعیت می کند. پاشش معمولاً به دو نوع اصلی تقسیم می شود: پاشش آنی^۱ و پاشش تاجی^۲ مطالعات متعدد نشان داده اند که این مکانیسم ها به شدت به خواص فیزیکی سیال و سطح وابسته هستند.

تانگ و همکاران [۱۷] رابطه ی $(We/Oh)^{1/2}$ را ارائه کردند و نشان دادند که افزایش عدد وبر و زبری سطح باعث کاهش حداکثر گسترش قطره و افزایش احتمال وقوع پاشش تاجی می شود. این یافته توسط ژانگ و همکاران [۱۸] تکمیل شد؛ آن ها دریافتند که زبری برای سیالات کم ویسکوز پاشش را تشدید، اما برای سیالات با لزجت بالا آن را سرکوب می کند. لیو و همکاران [۱۹] این رفتار را به مکانیسم های رقابتی نسبت می دهند: زبری با تقویت آشفتگی ها پاشش را افزایش می دهد، در حالی که ویسکوزیته با افزایش اتلاف انرژی در لایه لاملا این اثر را تضعیف می کند. این مطالعات به صورت جمعی نشان می دهند که اثر زبری بر پخش شدگی عمدتاً در سیالات با لزجت پایین با $Oh < 0.5$ مشهود است.

زهرابی چکانه و همکاران [۲۰] این نتایج را به صورت تجربی تأیید کردند؛ آن ها با بررسی سطوح فولاد ضدزنگ با زبری های مختلف، نشان دادند که افزایش زبری سطح منجر به کاهش طول و قطر بیشینه پخش شدگی قطره می شود، چرا که اتلاف انرژی جنبشی در سطوح زبر بیشتر است.

مفهوم عدد آنسورگ^۳ اصلاح شده $Oh_r = \mu / \rho R_{rms} \sigma$ برای تمایز این مکانیسم ها معرفی شده است. ژانگ و همکاران [۱۸] مقدار بحرانی $Oh_r \approx 0.3$ را گزارش کرده اند که برای مقادیر کمتر از آن پاشش آنی و برای مقادیر بیشتر از آن پاشش تاجی رخ می دهد. دگوده و همکاران [۲۱] نیز با اصلاح این عدد، نشان دادند که پاشش تاجی تنها زمانی رخ می دهد که زبری سطح به اندازه ای نباشد که حرکت لاملا را مختل کند، و فراتر رفتن از حدود ۴ میکرومتر منجر به پاشش آنی می شود.

⁸ Apparent Contact Angle

⁹ Kelvin-Helmholtz Instability

¹⁰ Line-friction capillary number

¹¹ Wettability-Cassie-Baxter

¹ prompt splashing

² corona splashing

³ Ohnesorge number

⁴ Lamella layer

⁵ Polydimethylsiloxane

⁶ pinning

⁷ Contact Line

برخورد و ناپایداری لایه هوای بین قطره و سطح را در نظر می‌گیرد.

مطالعات نشان می‌دهند که ترشوندگی و زاویه تماس در تعامل با زبری، نقش مهمی در پاشش ایفا می‌کنند. کوئتزری-سانتیاگو و همکاران [۳۰] مشخص کردند که زاویه تماس دینامیک^۱ بیشینه (θ_{max}) و نسبت پاشش (β) معیارهای مؤثرتری برای پیش‌بینی پاشش هستند؛ به‌ویژه، نسبت پاشش (β) در مقدار بحرانی حدود ۰/۱۲ وقوع پاشش را تعیین می‌کند. چودری و همکاران [۳۱] نیز گزارش کردند که زبری سطح بیشترین نقش را در کاهش قطر پخش‌شدگی (β_{max}) دارد، در حالی که زاویه تماس بالا نیز موجب کاهش β_{max} می‌شود. وانگ، چن و ژائو [۳۲] نیز دریافتند که با افزایش تناوب شیار، ابتدا زاویه تماس افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده اثر ناهمسانگردی هندسی سطح است. محققین برای تحلیل رفتار پیچیده قطره، مدل‌های مختلفی را ارائه کرده‌اند. همچنین، عوامل محیطی مانند دما و هوای محبوس شده نیز در این پدیده نقش دارند.

گوئو [۳۳] در تحلیل‌های عددی خود نشان داد که زبری نامنظم سطوح سه‌بعدی علاوه بر تقویت پرش قطره، مقاومت در برابر گسترش را کاهش داده و تسهیل بازگشت قطره را ممکن می‌سازد. گارسیا-گیخو [۳۴] شرط $We < 1$ را پیشنهاد داد که در آن E ارتفاع زبری سطح است. این شرط نشان می‌دهد که در این محدوده، هندسه‌ی سطح نقش اصلی در شکل‌گیری پاشش تاجی دارد. لی و همکاران [۳۵] با تحلیل تأثیر سرعت برخورد و زبری سطح بر زاویه تماس دینامیکی، مدلی مقیاسی جامع برای پیش‌بینی گسترش ارائه دادند. کوبیک و همکاران [۳۶] نیز با بهره‌گیری از مدل ترکیبی ونزل-کسی-باکستر، چارچوبی دقیق‌تر برای تحلیل ترشوندگی سطوح زیر فراهم آوردند.

مایترا و همکاران [۳۷] نشان دادند که در دماهای پایین، تأخیر در تخلیه‌ی هوای فشرده میان بافت‌های زبر منجر به شکل‌گیری حباب‌های پایدار و نفوذ قطره در سطح می‌شود. این یافته تأکید می‌کند که پدیده برخورد قطره به شرایط محیطی نیز وابسته است.

در حالی که بخش زیادی از پژوهش‌ها بر اثر زبری سطوح صاف بر دینامیک برخورد قطره متمرکز بوده‌اند، در بسیاری از

کاربردهای واقعی، سطح برخورد نه تنها زبر بلکه دارای انحنای هندسی قابل توجه است.

این بخش به بررسی مقالاتی می‌پردازد که دینامیک برخورد قطره با سطوح منحنی استوانه‌ای را تحلیل کرده‌اند. این مطالعات عمدتاً بر روی تأثیر انحنای ترشوندگی و سرعت برخورد بر رفتار قطره تمرکز دارند.

لیو و همکاران [۳۸] با ترکیب آزمایش و شبیه‌سازی، نشان دادند که در سطوح محدب، زمان تماس قطره تا ۴۰٪ کاهش می‌یابد و در سطوح مقعر، جمع‌شدگی سریع‌تر و گسترش محوری محدود می‌شود. دنگ و همکاران [۳۹] با آنالیز عددی و تجربی، تأثیر ترشوندگی و انحنای استوانه را بررسی کردند و دریافتند که در سطوح آب‌گریز، حجم مایع باقی‌مانده کاهش می‌یابد و تمایل به بازتاب قطره افزایش پیدا می‌کند. در مقابل، در سطوح آب‌دوست با افزایش قطر قطره، حجم باقی‌مانده افزایش می‌یابد. سیاری و همکاران [۴۰] با استفاده از شبیه‌سازی لئیس بولتزمن، اثر عدد رینولدز و وبر را بر جدایش قطره از سطح استوانه تحلیل کردند و دریافتند که افزایش رینولدز طول جدایش را افزایش و افزایش وبر زمان جدایش را کاهش می‌دهد. وانگ و همکاران [۴۱] نیز با شبیه‌سازی MDPD^۲ مشاهده کردند که در سطوح آب‌دوست، ادغام قطرات رخ می‌دهد، اما در سطوح آب‌گریز، جدایش و گسترش قطرات به صورت جداگانه است. آن‌ها همچنین دریافتند که افزایش سرعت برخورد و قطر استوانه، بیشینه گسترش را افزایش می‌دهد. آروگتی و همکاران [۴۲] آستانه‌های بحرانی برای پاشش تاجی فوری روی استوانه‌های خشک با قطر کم را تعیین کردند و نشان دادند که در سرعت‌های بالا پاشش به صورت لحظه‌ای رخ می‌دهد.

این بخش به مقالاتی اختصاص دارد که به بررسی دینامیک برخورد قطره با سطوح کروئی پرداخته‌اند. این مطالعات به عواملی مانند نسبت ابعادی (قطر کره به قطره) و نیروهای مؤثر بر رفتار قطره می‌پردازند.

لیو و همکاران [۴۳] با استفاده از روش عددی، تأثیر ترشوندگی روی سطح کروئی را بر رفتار دینامیکی قطره بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که زمانی که زاویه تماس ثابت است، افزایش سرعت برخورد منجر به افزایش ضریب پخش بیشینه و کاهش زمان رسیدن به آن می‌شود. بردبار و همکاران [۴۴]

^۲ Multi-Body Dissipative Particle Dynamics

^۱ Dynamic Contact Angle

خورانا و همکاران [۵۴] نقش ترشوندگی را در هیدرودینامیک گسترش قطره بررسی کردند و دریافتند که افزایش ترشوندگی زاویه‌ی پخش بیشینه را افزایش و احتمال بازگشت قطره را کاهش می‌دهد. بینی‌طیایی و امیرفضلی [۵۵] برخورد قطره با ذره کروی را بررسی کردند و مشاهده کردند که در سطوح آب‌گریز، فیلم نازک سریع‌تر تشکیل می‌شود و افزایش عدد وبر باعث افزایش طول و زاویه‌ی مخروطی لاملا شد. چن و برتولا [۵۶] نشان دادند که نرمی و الاستیسیته سطح بر فرایند جمع‌شدن قطره تأثیر دارد. در نهایت، مایترا و همکاران [۵۷] نشان دادند که در دماهای پایین‌تر از دمای اشباع، تماس به صورت خیس‌شونده و در دماهای بالاتر به صورت غیرخیس‌شونده است.

اگرچه مطالعات متعددی به بررسی اثر انحنای، زاویه تماس و پارامترهای بی‌بعد در برخورد قطره با سطوح کروی پرداخته‌اند، اما اغلب این پژوهش‌ها فرض را بر صاف و همگن بودن سطح کروی گذاشته‌اند. در حالی که در شرایط واقعی، کره‌ها—خواه در فرآیندهای صنعتی مانند پوشش‌دهی ذرات و کاتالیست‌ها، و خواه در سامانه‌های زیستی یا محیطی دارای درجاتی از زبری سطح هستند که می‌تواند به‌طور اساسی دینامیک برخورد را تغییر دهد. زبری، علاوه بر ایجاد ناپیوستگی‌های موضعی در هندسه، می‌تواند مسیرهای جریان، ضخامت فیلم، نرخ پخش و حتی ریباند را دستخوش تغییر کند. با این حال، تاکنون تحلیل هم‌زمان اثر زبری و انحنای کروی به‌ندرت مورد بررسی قرار گرفته است. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ، به بررسی تأثیر زبری سطح کروی بر مراحل مختلف برخورد قطرات سیال نیوتنی خواهد پرداخت و گامی تازه در درک رفتار دینامیکی در هندسه‌های دوگانه پیچیده (انحنای دوبعدی همراه با ریزساختار) برمی‌دارد.

۲- مواد و روش‌ها

یک چیدمان آزمایشی طراحی و ساخته شد تا برخورد قطرات منفرد روی سطوح کروی با زبری مشخص را با دقت بالا بررسی کند. شکل ۱ نمای کلی این چیدمان آزمایشی را نشان می‌دهد.

به بررسی عددی رفتار قطرات کم‌ویسکوز روی سطوح کروی در اعداد وبر پایین پراختند و نشان دادند که قطر پخش‌شدگی بیشینه با افزایش سرعت برخورد و کاهش کشش سطحی افزایش می‌یابد. یون و همکاران [۴۵] زمان پخش‌شدگی قطره روی سطح کروی را در سه رژیم مختلف تحلیل کردند: در رژیم کشش‌سطحی‌محور، زمان پخش‌شدگی با انحنای سطح افزایش می‌یابد. لانگ و همکاران [۴۶] با تحلیل تحلیلی و تجربی نشان دادند که قطره هنگام برخورد با سطح کروی، نسبت به سطح تخت، شعاع بیشتری را پخش می‌کند. ابوت و همکاران [۴۷] با تحلیل برخورد قطره‌ی ویسکوز با هدف کروی، مدلی برای پیش‌بینی ضخامت باقی‌مانده‌ی فیلم پس از برخورد ارائه کردند. ژو و همکاران [۴۸] نشان دادند که تغییر شعاع انحنای سطح کروی تأثیری بر زاویه تماس قطره ندارد، اما هرچه شعاع انحنای کمتر باشد، نیروهای پخش‌شدگی و چسبندگی کاهش می‌یابند.

این بخش به تحلیل عمیق‌تر پدیده‌های فیزیکی مشترک، مدل‌سازی رفتار قطره، و عوامل محیطی می‌پردازد که بر رفتار برخورد در هر دو نوع هندسه تأثیرگذارند.

بکشی و همکاران [۴۹] دینامیک جریان لایه‌ی مایع را در سه مرحله‌ی متمایز (تغییر شکل اولیه، فاز غالب اینرسی، و فاز غالب ویسکوزیته) بررسی کردند. لیو و همکاران [۵۰] تأثیر نسبت قطر کره به قطر قطره (D^*) را بررسی کردند و دریافتند که با افزایش عدد وبر و کاهش زاویه تماس، ضریب پخش بیشینه و زاویه قوس پخش افزایش می‌یابند. خوجسته و همکاران [۵۱] با شبیه‌سازی عددی، نشان دادند که برخورد با سطح کروی نسبت به سطح تخت، منجر به افزایش سطح تماس مایع با زیرلایه می‌شود و نیروی گریز از مرکز نقش اصلی را در افزایش نسبت پخش‌شدگی روی سطوح منحنی ایفا می‌کند. میلاسیچ و همکاران [۵۲] با شبیه‌سازی دقیق، نشان دادند که افزایش انحنای سطح، نه‌تنها باعث کاهش سطح پخش‌شدگی می‌شود، بلکه رفتار دینامیکی نوسانات آن را پیچیده‌تر می‌کند. دالگامونی و یونگ [۵۳] تأثیر عدد وبر، نسبت اندازه‌ی هدف به قطره (R^*) و زاویه تماس تعادلی را بر دینامیک برخورد بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که کاهش R^* و زاویه تماس، ضریب پخش بیشینه و احتمال بازگشت قطره را افزایش می‌دهد.

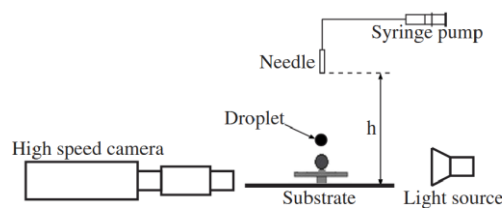
قبل از انجام آزمایش، کره‌ها با استون پاک‌سازی شدند و سپس زبری سطح آن‌ها با استفاده از دستگاه زبری‌سنج تماسی مدل SJ-210 در چندین نقطه از هر نمونه اندازه‌گیری گردید. میانگین زبری به همراه انحراف معیار به صورت زیر گزارش شد: 0.46 ± 0.304 ، 0.132 ± 0.767 ، 0.328 ± 0.1805 ، 1.905 ± 0.6984 میکرومتر، اندازه‌گیری‌ها در نقاط مختلف

نمونه، تغییرات موضعی زبری را نیز بررسی و کنترل می‌کند. برای ثبت رفتار برخورد قطره‌ها، از یک دوربین پرسرعت مدل S-Motion مجهز به لنز Nikon AF Micro-NIKKOR 200mm f/4D IF-ED این دوربین با سرعت ۶۱۶۹ فریم بر ثانیه و رزولوشن 250×300 پیکسل تصاویر را ضبط می‌کرد. طول‌ها در تصاویر با استفاده از قطر کره به عنوان مرجع کالیبراسیون محاسبه شدند که معادل رزولوشن مکانی ۷۶ میکرومتر بر پیکسل بود.

دقت اندازه‌گیری ضریب پخش‌شدگی و زمان بی‌بعد با انجام سه بار تکرار آزمایش برای هر حالت و محاسبه انحراف معیار ارزیابی شد. خطای نسبی اندازه‌گیری‌ها کمتر از ۳ درصد برآورد گردید.

نورپردازی یکنواخت نمای پشت نمونه‌ها توسط یک سیستم نورپردازی پشتی شامل لامپ و پخش‌کننده نور تأمین شد. تصاویر ثبت‌شده توسط دوربین پرسرعت با استفاده از برنامه‌ای سفارشی توسعه‌یافته در نرم‌افزار MATLAB پردازش گردیدند.

شکل ۲ به صورت شماتیک مراحل پردازش را نشان می‌دهد. برای پردازش تصاویر، ابتدا عکس‌هایی که قبل گرفته شده بودند، به تصاویر باینری تبدیل شدند. طول تغییرشکل قطره از طریق کسر کردن تصویر سطح کروئ بدون قطره از تصویر حاوی قطره محاسبه شد. این روش نسبت به سایر روش‌های پردازش تصویر، با حذف دقیق پس‌زمینه و کاهش اثر نویز، امکان شناسایی خودکار و تکرارپذیر مرز قطره را با سرعت و دقت بالاتری فراهم می‌کند.



شکل ۱- شماتیک چیدمان آزمایش

قطراتی با اندازه چند میلی‌متر با استفاده از یک پمپ سرنگی متصل به یک سرنگ و سوزن زیرپوستی (قطر اولیه: $1/19$ میلی‌متر) تولید شدند. مزیت اصلی آن کنترل دقیق نرخ جریان و تکرارپذیری بالا در ابعاد قطره بود. قطرات از طریق روش قطره آویزان^۱ شکل می‌گیرند، به این صورت که مایع به آرامی از طریق سوزن رانده می‌شود تا زمانی که قطره به دلیل تعادل بین وزن خود و کشش سطحی جدا شود. این روش، اندازه قطره‌ها و سرعت برخورد آن‌ها که تحت نیروی گرانش به دست می‌آید را قابل تکرار می‌کند.

کره‌ها با قطرهای ۱۱، ۱۸ و ۲۵ میلی‌متر انتخاب شدند تا اثر نسبت قطر کره به قطر قطره در آزمایش بررسی شود. زبری میانگین حسابی (Ra) سطح نمونه‌ها به چهار مقدار 0.31 ، 0.77 ، 1.87 و 14.7 میکرومتر تقسیم شد که با دو روش مختلف ایجاد گردید. نمونه‌هایی با زبری 0.77 و 1.87 میکرومتر با استفاده از فرآیند سندبلاست تولید شدند. در این روش، پارامترهای کلیدی شامل نوع و اندازه ذرات ساینده (آلومینا)، فشار جریان هوا، فاصله و زاویه نازل نسبت به سطح، و مدت زمان تابش با دقت تنظیم و در طول فرآیند ثابت نگه داشته شدند تا زبری سطح یکنواخت و قابل تکرار حاصل شود. نمونه‌ای با زبری 14.7 میکرومتر با استفاده از خوردگی شیمیایی در محلول سولفوریک اسید رقیق شده (نسبت ۱ به ۳ اسید به آب) تهیه شد. نمونه‌ها به مدت ۵ روز در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد زیر هود آزمایشگاهی قرار گرفتند و پس از پایان فرآیند با آب مقطر شسته و خشک شدند تا واکنش متوقف گردد. این شرایط برای تمامی نمونه‌ها ثابت نگه داشته شد.

^۱ pendant drop

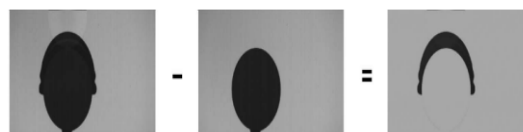
جدول ۱- ویژگی‌های سیالات در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد.

سیال آزمایش	آب (%)	گلیسرین (%)	σ (mN/m)	ρ (kg/m ³)	μ (mPa s)	D_0 (mm)
G0	۱۰۰	۰	۷۱,۲	۹۹۸	۱	۳,۷
G70	۳۰	۷۰	۶۵,۹	۱۱۹۰	۲۷	۳,۵
G83.2	۱۶,۸	۸۳,۲	۶۴,۸	۱۲۲۱	۹۵	۳,۵
G84.3	۱۵,۷	۸۴,۳	۶۴,۷	۱۲۲۴	۱۰۸	۳,۵
G85.2	۱۴,۸	۸۵,۲	۶۴,۶	۱۲۲۶	۱۲۶	۳,۵
G90	۱۰	۹۰	۶۴,۲	۱۲۳۶	۲۰۸	۳,۵
G100	۰	۱۰۰	۶۳,۱	۱۲۶۰	۹۱۸	۳,۵

تکرارپذیری بالای روش است. این مقدار با سرعت تئوری حاصل از رابطه سقوط آزاد:

$$U = \sqrt{2g(H - D_0)} \quad (1)$$

که در آن، H فاصله سوزن تا سطح برخورد، g شتاب گرانش زمین است که تقریباً 9.81 m/s^2 و D_0 قطر اولیه قطره است مقایسه گردید و اختلاف حدود 2.6% به‌دست آمد. برای بررسی تأثیر ویسکوزیته، هفت نوع سیال شامل آب خالص، گلیسرین خالص و پنج مخلوط با نسبت‌های حجمی مختلف از این دو تهیه شد. نسبت حجمی گلیسرین در مخلوط‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شد که دامنه‌ای گسترده از ویسکوزیته‌ها ایجاد گردد. تمام مخلوط‌ها به مدت ۱۸ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بر روی همزن هات‌پلیت قرار گرفتند تا کاملاً همگن شوند. نمونه‌ها بر اساس درصد جرمی گلیسرین نام‌گذاری شدند: آب خالص (G0)، گلیسرین خالص (G100) و مخلوط‌ها به ترتیب G70، G83.2، G84.3، G85.2 و G90. ویژگی‌های رئولوژیکی و فیزیکی این سیالات در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۲- شماتیک پردازش تصویر

برای تعیین قطر اولیه قطره (D_0)، تصاویر ثبت‌شده توسط دوربین پرسرعت پس از باینری‌سازی پردازش شدند. ناحیه‌ی قطره با روش اجزای متصل^۱ استخراج و بزرگ‌ترین ناحیه به‌عنوان قطره انتخاب گردید. سپس با استفاده از جعبه محدودکننده^۲ قطر افقی قطره در واحد پیکسل تعیین و با توجه به ضریب تبدیل پیکسل به میلی‌متر، مقدار قطر واقعی محاسبه شد. میانگین‌گیری از چند فریم متوالی پیش از برخورد به‌منظور افزایش دقت انجام گرفت.

برای تعیین سرعت برخورد (U)، موقعیت مرکز جرم و نوک قطره در توالی فریم‌های متوالی استخراج و تغییر مکان عمودی آن‌ها نسبت به زمان محاسبه شد. با تقسیم اختلاف مکان بر بازه‌ی زمانی متناظر، سرعت متوسط سقوط به‌دست آمد. مقدار تجربی سرعت در ارتفاع ۵۵ cm برخورد با میانگین $3/0.975 \text{ ms}$ و انحراف معیار $0/0.08 \text{ ms}$ تعیین شد که نشان‌دهنده

² Bounding Box

¹ Connected Components

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma D_0}} \quad (۴)$$

که در آن p : چگالی مایع، U : سرعت برخورد قطره به سطح جامد، D_0 : قطر اولیه قطره، σ : ضریب کشش سطحی برای فصل مشترک مایع-هوا، و μ : ویسکوزیته دینامیکی مایع است.

در هنگام برخورد قطره به سطح جامد، شکل و موقعیت مرز بین مایع، جامد و هوا به مرور زمان دچار تغییر می‌شود. یکی از شاخص‌های مهم در بررسی این پدیده، اندازه قطر قطره پس از پخش شدن روی سطح است. برای سنجش این موضوع، طول خیس‌شدگی دوبعدی قطره که با $l(t)$ نشان داده می‌شود، اندازه‌گیری شده و با استفاده از قطر اولیه قطره، این مقدار به‌صورت پارامتری بدون‌بعد تحت عنوان ضریب پخش‌شدگی β محاسبه می‌گردد. ضریب پخش‌شدگی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\beta = \frac{l(t)}{D_0} \quad (۵)$$

سرعت اولیه برخورد قطره، بر اساس داده‌های استخراج‌شده از تصاویر پردازش‌شده، به دست آمده است. همچنین برای تحلیل پدیده در مقیاس زمانی بدون‌بعد، از پارامتر t^* استفاده می‌شود، که در آن t پارامتر زمان است. زمان بی‌بعد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$t^* = \frac{t \cdot U}{D_0} \quad (۶)$$

نسبت اندازه کره جامد به قطر قطره نیز به وسیله پارامتر بدون‌بعد D^* بیان می‌شود، که در آن D_s قطر سطح کروی و D_0 قطر اولیه قطره است. این پارامتر از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$D^* = \frac{D_s}{D_0} \quad (۷)$$

عدم قطعیت کل هر پارامتر تجربی ν با ترکیب مؤلفه‌های تجهیزاتی و تکرارپذیری طبق رابطه زیر محاسبه شد:

$$\delta \nu = \sqrt{(\partial \nu_{eqp})^2 + (\partial \nu_{rep})^2} \quad (۸)$$

در اندازه‌گیری‌های تصویری، مقدار فیزیکی از رابطه $V = S \cdot X_{px}$ به‌دست آمد که در آن $s = 76.7 \mu\text{m}/\text{px}$ با عدم قطعیت تقریبی $\delta s = 0.3 \mu\text{m}/\text{px}$ است. با توجه به استفاده از روش

برای بررسی ویژگی‌های رئولوژیکی سیالات مورد مطالعه، از رئومتر Anton Paar MCR 300 استفاده شد. این دستگاه یکی از تجهیزات پیشرفته در تعیین خواص جریان سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی تحت تنش‌های برشی است. برای اندازه‌گیری دقیق خواص رئولوژیکی، هندسه مخروط-صفحه با زاویه مخروط ۱ درجه و قطر ۵۰ میلی‌متر به کار گرفته شد. تمام اندازه‌گیری‌ها در دمای کنترل‌شده ۲۵ درجه سانتی‌گراد و در شرایط محیطی استاندارد انجام شد.

برای تعیین کشش سطحی سیالات، از دستگاه تنسیومتر و روش قطره آویزان استفاده شد. این روش بر پایه تحلیل شکل تعادلی یک قطره آویزان از انتهای یک سوزن یا لوله موئین عمل می‌کند و کشش سطحی را با دقت بالا محاسبه می‌کند. تمامی آزمایش‌ها در شرایط پایدار آزمایشگاهی و در دمای محیطی $25 \pm 2^\circ\text{C}$ انجام شدند. دما در طول آزمایش با دماسنج محیطی پایش شد تا از یکنواختی شرایط حرارتی اطمینان حاصل گردد.

در تحلیل برخورد قطرات، معمولاً از پارامترهای بدون‌بعدی مانند عدد We و بر و عدد رینولدز Re استفاده می‌شود و الگوهای رفتاری آن را تحت تأثیر قرار می‌دهند. عدد We نشان‌دهنده انرژی جنبشی بدون بعد است که میزان غلبه نیروهای اینرسی بر کشش سطحی و پتانسیل پخش یا پاشش قطره را نشان می‌دهد. عدد Re بیانگر نسبت انرژی اینرسی صرف گسترش قطره به اتلاف ناشی از لزجت است. و در مقادیر بزرگ Re ، اثر لزجت ناچیز بوده و انرژی جنبشی بیشتر صرف گسترش قطره می‌شود؛ در مقادیر کوچک، لزجت انرژی جنبشی را سریعاً مستهلک کرده و گسترش محدود می‌شود. تعریف ریاضی این اعداد به شرح زیر است:

$$We = \frac{\rho D_0 U^2}{\sigma} \quad (۲)$$

$$Re = \frac{\rho D_0 U}{\mu} \quad (۳)$$

نسبت لزجت به ترکیب کشش سطحی و اینرسی را مشخص می‌کند و نشان می‌دهد که لزجت تا چه حد بر گسترش و رفتار بازگشت قطره تأثیر دارد. عدد Oh عدد آنسورگ نقش لزجت نسبت به کشش سطحی و اینرسی را مشخص کرده و تعیین‌کننده رژیم دینامیکی قطره است.

تجربی داده‌ها است. در تمامی آزمایش‌ها، مرحله‌ی پخش تنها چند میلی‌ثانیه به طول انجامید، در حالی که مرحله‌ی بازگشت نسبت به آن زمان طولانی‌تری داشت. سیالات مورد استفاده شامل آب، گلیسرین و مخلوط‌های مختلف این دو بودند که به منظور بررسی رفتار مایعات با ویسکوزیته‌های متفاوت انتخاب شدند.

۳-۱- تاثیر ویسکوزیته سیال

شکل ۳ رفتار دینامیکی قطرات ترکیبات مختلف آب-گلیسرین را هنگام برخورد با سطح کروی جامد با قطر ۱۸ میلی‌متر و زبری متوسط ۰/۷۷ میکرومتر نشان می‌دهد. این ترکیبات شامل آب خالص (G0)، گلیسرین خالص (G100) و نمونه‌های بینابینی G70، G83.2، G84.3، G85.2، G90 بودند که طیفی گسترده از ویسکوزیته را پوشش می‌دادند. عدد آنسورگ برای این ترکیبات از ۰/۰۰۲ (G0) تا ۲/۶۷۴ (G100) متغیر بود و امکان بررسی گذار دینامیکی از رژیم

اینرسی-کششی به ویسکوزی-کششی را فراهم کرد. در نمونه‌های با عدد Oh پایین مانند G0 با $Oh = 0/002$ و G70 با $Oh = 0/052$ قطره‌ها بیشترین گسترش شعاعی را تجربه کرده و فاکتور پخش بیشینه (β_{max}) تا حدود $\pm 0/05$ $3/2$ برابر قطر اولیه افزایش یافت. این قطره‌ها پس از گسترش، رفتار بازگشتی نوسانی از خود نشان دادند که بیانگر تبدیل مؤثر انرژی جنبشی به انرژی سطحی و سپس بازیابی شکل اولیه است.

در مقابل، در سیالات با عدد Oh بالا مانند G90 با $Oh = 0/395$ و G100 با $Oh = 2/674$ ، گسترش به‌طور قابل توجهی محدودتر بود و رفتار بازگشتی یا نوسان مشاهده نشد. در این رژیم، تنش‌های برشی ناشی از لزجت منجر به اتلاف شدید انرژی جنبشی شده و مانع از ذخیره‌سازی مؤثر انرژی در سطح آزاد می‌شود. بنابراین، در شرایط ویسکوزیته بالا نقش کشش سطحی ثانویه بوده و سهم اصلی کاهش β_{max} به اتلاف انرژی لزجتی اختصاص می‌یابد.

آستانه‌گذاری در قطعه‌بندی تصویر، خطای شمارش پیکسل‌ها به صورت محافظه کارانه برابر با $\delta x_{px} = 1 \text{ px}$ در نظر گرفته شد. بنابراین، مؤلفه تجهیزاتی عدم قطعیت به صورت زیر محاسبه گردید:

$$\partial v_{eqp} = \sqrt{(x_{px} \cdot \delta s)^2 + (s \cdot \delta x_{px})^2} \quad (9)$$

همچنین، مؤلفه تکرارپذیری از انحراف معیار بین سه اجرای مستقل به صورت زیر محاسبه شد:

$$\partial v_{rep} = \frac{S}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

که در آن S انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری شده در سه اجرای آزمایش و $n = 3$ تعداد تکرارهاست. این مؤلفه بیانگر پراکندگی آماری نتایج و میزان پایداری اندازه‌گیری‌ها در شرایط یکسان آزمایشگاهی است.

برای پارامترهایی که به صورت تابعی از چند متغیر مستقل تعریف شده‌اند، عدم قطعیت کل با استفاده از قانون انتشار خطا به صورت زیر محاسبه گردید:

$$\delta R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial v_1} \cdot \delta v_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial v_2} \cdot \delta v_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial v_m} \cdot \delta v_m\right)^2} \quad (11)$$

در این رابطه، δv_i عدم قطعیت هر پارامتر مستقل و $\frac{\partial R}{\partial v_i}$ مشتق جزئی تابع نسبت به آن پارامتر است.

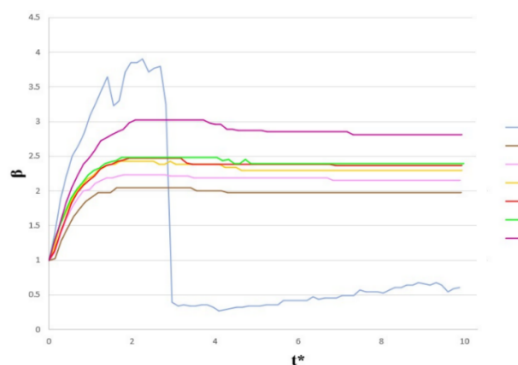
۳- یافته‌ها و تحلیل

رفتار دینامیکی قطرات در دو مرحله‌ی پخش و بازگشت به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفت تا اثر پارامترهای کلیدی بر فرایند برخورد تحلیل شود. این پارامترها شامل عدد وبر، زبری سطح، نسبت قطر کره به قطر (با استفاده از کره‌هایی به قطرهای ۱۱، ۱۸ و ۲۵ میلی‌متر)، و ویسکوزیته سیال بودند. آزمایش‌ها بر روی سطوح کروی با زبری‌های مختلف (۰/۳۱، ۰/۷۷، ۱/۸۷ و ۱۴/۷ میکرومتر) انجام شد.

آزمایش‌ها هر کدام سه بار تکرار شدند و مقادیر گزارش شده میانگین این تکرارها هستند. انحراف معیار نتایج کمتر از ۳٪ بود که نشان‌دهنده تکرارپذیری مناسب و اعتبار

در شکل ۵، تأثیر ویسکوزیته و سرعت برخورد قطرات نیوتنی بر سطح کرومی فلزی با قطر ۲۵ میلی‌متر و زیری متوسط ۰/۳۱ میکرومتر بررسی شده است. سه سیال G83.2، G84.3 و G85.2 با ویسکوزیته‌های متفاوت، در دو سرعت برخورد ۳/۱ و ۴/۱ متر بر ثانیه رها شدند تا نقش این پارامترها در رفتار پخش، زمان رسیدن به بیشینه گسترش و مرحله جمع‌شدگی مطالعه شود.

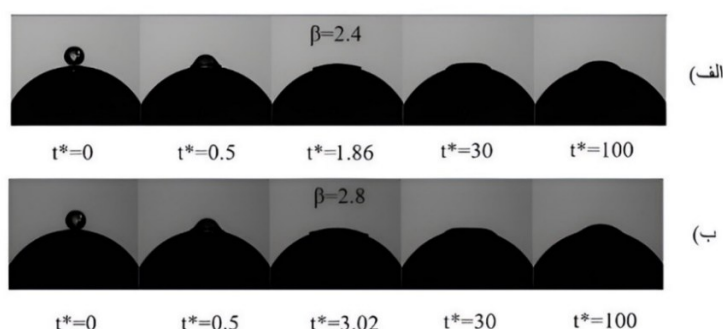
در سرعت برخورد ۳/۱ m/s (شکل ۵-الف)، فاکتور پخش بیشینه β_{max} برابر با $0.03 \pm 2/56$ در زمان بی‌بعد $0.03 \pm 2/58$ به دست آمد. این فاز اولیه گسترش، ناشی از انرژی جنبشی متوسط قطره است که باعث پخش سطحی آن می‌شود. با افزایش ویسکوزیته از ۹۵ میلی‌پاسکال‌ثانیه (G83.2) به ۱۲۶ میلی‌پاسکال‌ثانیه (G85.2)، مقدار β_{max} کمی کاهش یافت؛ زیرا ویسکوزیته بالاتر مقاومت جریان را افزایش داده و مانع گسترش آزادانه قطره می‌شود. در مرحله جمع‌شدگی، مقدار فاکتور پخش به حدود $0.05 \pm 2/1$ کاهش یافت که نشان‌دهنده تثبیت شکل نهایی قطره تحت تأثیر ترکیبی از نیروی کشش سطحی و اثرات لزجی است. این نتایج با یافته‌های پسندیده فرد و همکاران [۱۳] هم‌خوانی دارد که نشان دادند افزایش ویسکوزیته منجر به محدود شدن گستره پخش قطره و کاهش نوسانات پس از برخورد می‌شود.



شکل ۳- تأثیر ویسکوزیته سیال بر فاکتور پخش

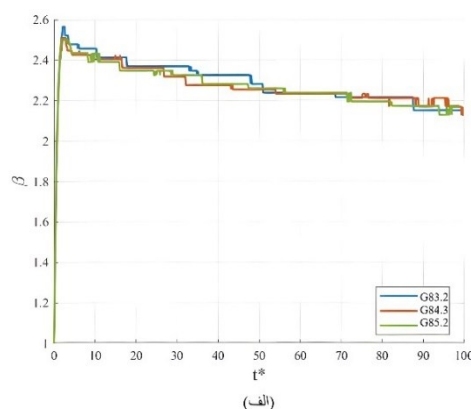
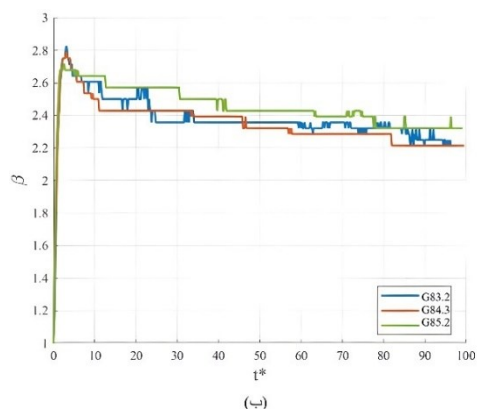
۳-۲- تأثیر سرعت برخورد

در شکل ۴، رفتار دینامیکی قطره‌ی سیال G83.2 هنگام برخورد با سطح کرومی فلزی با قطر ۲۵ میلی‌متر و زیری متوسط ۰/۳۱ میکرومتر، در دو سرعت اولیه‌ی متفاوت بررسی شد. نتایج نشان داد افزایش سرعت برخورد از ۳/۱ به ۴/۱ متر بر ثانیه، که به دنبال آن عدد وبر از ۷۱۱ به ۱۲۴۴ افزایش یافت، موجب رشد قابل توجه بیشینه‌ی فاکتور پخش β_{max} گردید. این پدیده ناشی از افزایش انرژی جنبشی اولیه و غلبه‌ی اینرسی بر نیروهای مقاوم، شامل کشش سطحی و اتلاف لزجی، در مرحله‌ی گسترش است. در سرعت بالاتر، قطره لایه‌ی نازک‌تر تشکیل می‌دهد که با سرعت شعاعی بیشتر روی سطح پخش می‌شود؛ در نتیجه، میزان گسترش شعاعی افزایش یافته و حد گسترش دیرتر متوقف می‌شود.



شکل ۴- برخورد قطرات G83.2 بر کره‌ای با قطر $D_s = 25 \text{ mm}$ و زیری $Ra = 0.31 \mu\text{m}$ (الف) $We = 711$ و $U = 3.1 \text{ m/s}$

(ب) $We = 1244$ و $U = 4.1 \text{ m/s}$



شکل ۵- برخورد قطرات G83.2 و G84.3 و G85.2 به کره با $D_s = 25 \text{ mm}$ و زبری $Ra = 0.31 \text{ }\mu\text{m}$ (الف) و $U = 3/1 \text{ m/s}$ (ب) داده‌ها به صورت میانگین گزارش شده‌اند و انحراف معیار نقاط کمتر از ۰/۰۵ بوده است.

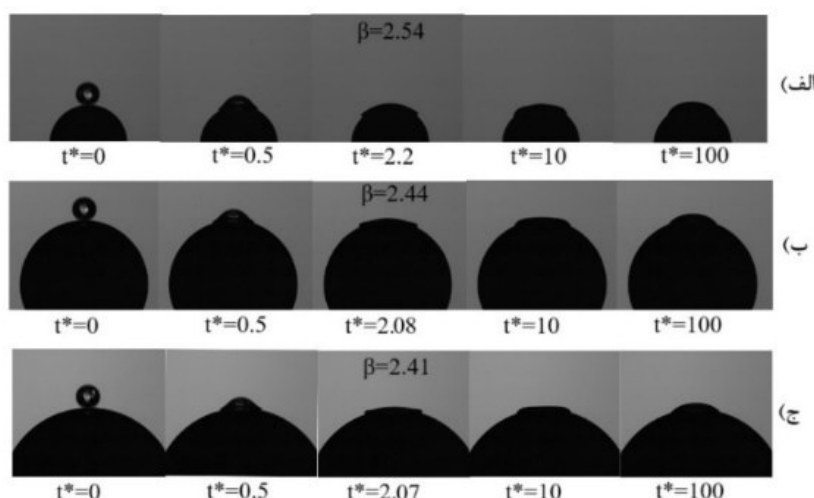
به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که افزایش عدد وبر باعث رشد $\beta_{\max}$ و تأخیر در زمان رسیدن به آن می‌شود، در حالی که افزایش ویسکوزیته این روند را تضعیف کرده و دامنه پخش را محدود می‌کند.

۳-۳- تأثیر نسبت قطر

در شکل ۶، قطرات سیال G84.3 روی سه سطح کروی با قطرهای متفاوت ۱۱، ۱۸ و ۲۵ میلی‌متر رها شدند، به طوری که قطر قطره ثابت و برابر ۳،۵ میلی‌متر بود و زبری سطح نیز در تمام نمونه‌ها یکسان و برابر ۰،۳۱ میکرومتر نگه داشته شد. نسبت قطر کره به قطر قطره ($D^* = D_s/D_0$) به ترتیب برای این سه حالت مقادیر الف) ۳،۱۴، ب) ۵،۱۴ و ج) ۷،۱۴ است. فاکتور پخش $\beta_{\max}$ افزایش می‌یابد؛ به گونه‌ای که $\beta_{\max}$ از ۲/۴۱ در حالت ج) $D^* = 7/14$ به ۲/۵۴ در حالت الف) $D^* = 3/14$ رسید. این افزایش در گسترش قطره به دلیل تأثیر موثرتر نیروی گرانش مماسی در سطوح با انحنای بیشتر تبیین می‌شود.

در سرعت بالاتر ۴/۱ متر بر ثانیه (شکل ۵-ب)، $\beta_{\max}$ به ۰/۰۴ $\pm 2/82$ افزایش یافت که حدود ۱۰٪ بیشتر از حالت قبل است و در زمان بی‌بعد $0.3 \pm 3/02$ (حدود ۰/۴۴ واحد طولانی‌تر) رخ داد. این افزایش در بیشینه پخش و طولانی‌تر شدن زمان رسیدن به آن ناشی از انرژی جنبشی بالاتر قطره است که موجب گسترش بیشتر و کندتر لایه مایع می‌شود. همچنین، در مرحله جمع‌شدگی، مقدار β به $2/20 \pm 0/05$ رسید که کمی بیشتر از حالت برخورد با سرعت کمتر است؛ این تفاوت نشان‌دهنده باقی‌ماندن انرژی جنبشی بیشتر در سرعت بالاتر و در نتیجه ناپایداری نسبی شکل قطره است. این رفتار با نتایج لیو و همکاران [۴۳] مطابقت دارد که نشان دادند با افزایش سرعت برخورد، $\beta_{\max}$ افزایش یافته ولی زمان رسیدن به آن کوتاه‌تر می‌شود.

برای مقایسه کمی با مدل‌های تئوری، پیش‌بینی مدل برای سیال G83.2 با عدد وبر ۶۳۲/۲ و عدد رینولدز ۱۳۹/۷، مقدار تجربی بیشینه ضریب پخش قطره برابر با ۲/۵۶ ثبت شد. مدل کلانت [۹] مقدار ۵/۵۷ را پیش‌بینی کرد که به دلیل نادیده گرفتن اثر ویسکوزیته، بیش‌برآورد محسوب می‌شود. در مقابل، مدل رویسمن مقدار ۲/۶۳ را ارائه داد که با مقدار تجربی بسیار نزدیک است. از آن‌جا که سیال G83.2 ویسکوزیته بالایی دارد $\mu = 95 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ، مدل رویسمن [۱۱] با در نظر گرفتن همزمان اثر اینرسی و ویسکوزیته، عملکرد دقیق‌تری در پیش‌بینی گسترده‌گی قطره نشان می‌دهد.



شکل ۶- برخورد قطره G84.3 بر کره با $Ra = 0.31 \mu m$ (الف) $D^* = 3/14$ (ب) $D^* = 5/14$ (ج) $D^* = 7/14$

۳-۴- تاثیر زبری سطح

در شکل ۷، رفتار قطره آب روی دو سطح با زبری متفاوت $0.31 \mu m$ و $1.87 \mu m$ می کرومتر بررسی شده است. در هر ردیف، پنج فریم از مراحل برخورد و گسترش قطره در زمان‌های بدون بعد مختلف (t^*) ثبت گردیده است.

الف) در سطح با زبری $0.31 \mu m$ می کرومتر، گسترش قطره یکنواخت و منظم بود و قطره بدون پاشش به حالت تعادل پایدار با بیشینه فاکتور پخش $4/8$ رسید. این رفتار نمایانگر تسلط نیروهای اینرسی و کشش سطحی در فرآیند گسترش است، بدون آنکه ناپایداری‌های موضعی رخ دهد.

ب) در مقابل، در سطح زبرتر با زبری $1.87 \mu m$ می کرومتر، علاوه بر کاهش جزئی مقدار β_{max} به حدود $4/5$ ، پخش قطره با اختلال همراه شد و در مراحل میانی گسترش، پاشش ناگهانی رخ داد. این پدیده ناشی از تمرکز انرژی جنبشی در ناهمواری‌های سطح و افزایش بی‌ثباتی در لبه‌ی نازک لایه‌ی مایع (لاملا) است. ناهمواری‌ها سبب برهم‌کنش‌های پیچیده موضعی می‌شوند که منجر به ایجاد نقاط تمرکز فشار و نیروی برشی بیشتر در لبه‌ی گسترش‌یافته می‌گردد؛ نتیجه این امر وقوع پاشش و اختلال در گسترش یکنواخت قطره است. بنابراین، افزایش زبری سطح نه تنها موجب کاهش یکنواختی گسترش و کاهش جزئی در بیشینه پخش می‌شود، بلکه با ایجاد ناپایداری‌های موضعی، فرآیند پاشش را تسریع می‌کند.

در شکل ۸ الف، مربوط به زبری پایین ($0.31 \mu m$ می کرومتر)، فاکتور پخش بیشینه β_{max} با افزایش نسبت قطر از $3/14$ به $7/14$ کاهش یافته و از 2.02 ± 0.05 به 1.82 ± 0.045 می‌رسد. این روند نشان می‌دهد که کاهش نسبت قطر (نزدیک‌تر شدن ابعاد قطره و هدف) گسترش بیشتری را تسهیل می‌کند، مطابق با نتایج لیو و همکاران [۴۳] که افزایش نسبت قطر را با کاهش β_{max} در سطوح کروی گزارش کردند.

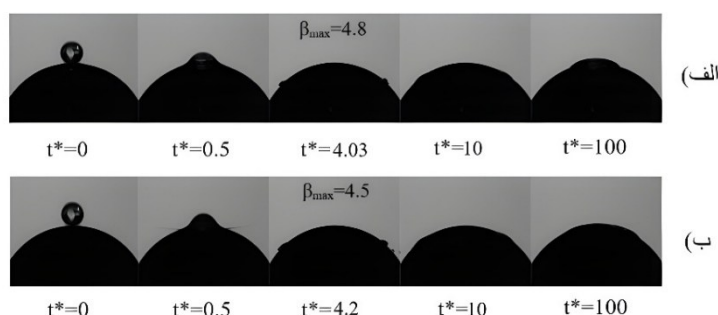
همچنین، زمان بدون بعد رسیدن به بیشینه گسترش از 1.86 ± 0.056 به 1.52 ± 0.046 کاهش می‌یابد که بیانگر آن است که در نسبت‌های قطر پایین‌تر، قطره سریع‌تر به تعادل می‌رسد، مشابه مشاهدات بردبار و همکاران [۴۴] برای قطرات کم‌ویسکوز می‌باشد.

علاوه بر مشاهدات تجربی، یک مدل نیمه تجربی ساده برای توصیف تعامل همزمان زبری سطح و نسبت قطر پیشنهاد شد. نتایج نشان دادند که با افزایش نسبت قطر و زبری، مقدار $\beta_{\max}$ به صورت تقریباً خطی کاهش می‌یابد. براساس داده‌های تجربی، مدل زیر قابل ارائه است:

$$\beta_{\max} \approx 2.2 - 0.09(D^*) - 0.045 \varepsilon \quad (12)$$

این رابطه ساده $\varepsilon = Ra/D_0$ ضریب زبری سطح، کاهش

در شکل ۸ ب مربوط به زبری بالا ($14/7$ میکرومتر)، $\beta_{\max}$ نیز با افزایش نسبت قطر کاهش می‌یابد، اما به صورت ملایم‌تر و از 0.57 ± 0.189 به 0.52 ± 0.175 محدود است. زمان بدون بعد رسیدن به بیشینه گسترش از 0.6 ± 0.079 به 0.3 ± 0.114 کاهش یافته که نشان‌دهنده تسریع قابل توجه فرآیند پخش در نسبت قطرهای بزرگ‌تر است، مشابه یافته‌های زهرابی چکانه و همکاران [۲۰] که افزایش زبری را با کاهش گسترش و تأثیر آن بر زمان رسیدن به بیشینه پخش مرتبط دانستند.



شکل ۷- برخورد قطره آب (G0) روی کره به $D_s = 25$ mm و $U = 3/1$ m/s و $Ra = 0.31 \mu m$ (الف)

(ب) $Ra = 1.87 \mu m$

$\beta_{\max}$ را با افزایش انحنا (کاهش نسبت قطر) و زبری پیش‌بینی کرده و نشان‌دهنده تعامل همزمان این دو پارامتر است. بنابراین، علاوه بر مشاهده کیفی، یک چارچوب کمی نیز برای تحلیل داده‌ها فراهم می‌شود که می‌تواند مبنای توسعه مدل‌های دقیق‌تر عددی در آینده باشد.

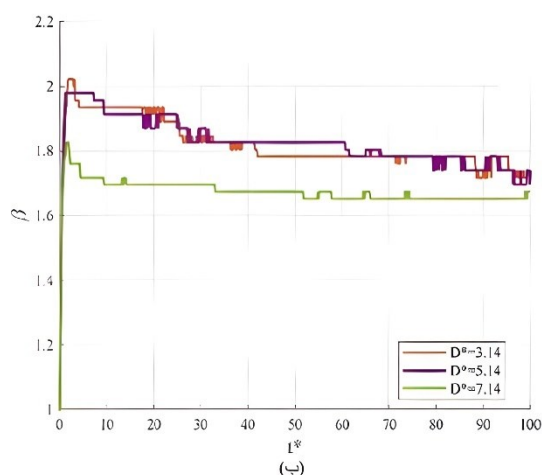
در نتیجه، تعامل متقابل زبری و انحنا نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌دهی رفتار دینامیکی قطره ایفا می‌کند؛ زبری بالاتر می‌تواند اثرات مثبت انحنا در افزایش گسترش و کاهش زمان پخش را تعدیل کند، در حالی که انحنا به عنوان پارامتر اصلی میزان و سرعت پخش قطره را کنترل می‌کند.

در شکل ۹، رفتار سیال G85.2 روی کره فلزی با قطر ۱۸ میلی‌متر در دو زبری سطح (0.31 و $14/7$ میکرومتر) و دو سرعت برخورد متفاوت ($3/1$ و $4/1$ متر بر ثانیه، معادل اعداد وبر مختلف) بررسی شده است تا اثر متقابل زبری و سرعت بر

این نتایج بیانگر اثر توأمان زبری و نسبت قطر هستند. زبری بالاتر به دلیل ایجاد ناهمواری‌های موضعی، گسترش قطره را محدود می‌کند و در نسبت‌های قطر پایین‌تر، زمان رسیدن به بیشینه پخش طولانی‌تر می‌شود. در مقابل، در نسبت‌های قطر بزرگ‌تر، تخلیه انرژی سریع‌تر انجام شده و زمان پخش کاهش می‌یابد. به طور کلی، کاهش نسبت قطر موجب افزایش $\beta_{\max}$ می‌شود، به ویژه در سطوح کم‌زبری که تماس بین قطره و سطح یکنواخت‌تر برقرار می‌شود، همان‌طور که لیو و همکاران [۴۳] و بردبار و همکاران [۴۴] گزارش کردند.

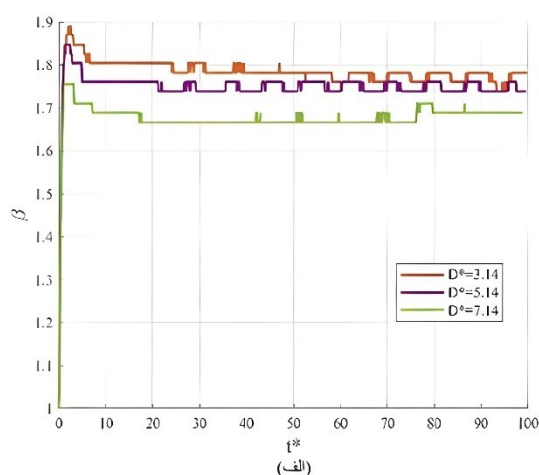
در نتیجه، تعامل میان زبری سطح و نسبت قطر نقش کلیدی در تعیین رفتار دینامیکی قطره دارد؛ زبری بالاتر اثر افزایش پخش ناشی از نسبت قطر پایین را تعدیل می‌کند، در حالی که نسبت قطر، عامل اصلی تعیین‌کننده میزان و سرعت گسترش قطره است.

در نتیجه، افزایش عدد وبر و سرعت برخورد به طور قابل توجهی β_{max} را افزایش می‌دهد و زمان رسیدن به بیشینه پخش را تحت تأثیر زبری سطح تنظیم می‌کند؛ زبری بالاتر نیز با محدود کردن گسترش و تثبیت شکل قطره، نقش مهمی در کنترل پایداری و زمان‌بندی فرآیند برخورد ایفا می‌کند.



فاکتور پخش بیشینه (β_{max}) و زمان بدون‌بعد رسیدن به آن تحلیل شود.

نتایج نشان می‌دهند که با افزایش سرعت برخورد (عدد وبر بالاتر)، β_{max} برای هر دو زبری افزایش یافته و به ترتیب $2/77 \pm 0/08$ در زبری $0/31$ و $2/71 \pm 0/07$ در زبری $14/7$



شکل ۸- برخورد قطره G100 برکره‌هایی با نسبت قطر مختلف و زبری سطح (الف) $Ra = 0/31 \mu m$ (ب) $Ra = 14/7 \mu m$ داده‌ها به صورت میانگین گزارش شده‌اند و انحراف معیار نقاط کمتر از $0/06$ بوده است.

۴- نتیجه‌گیری

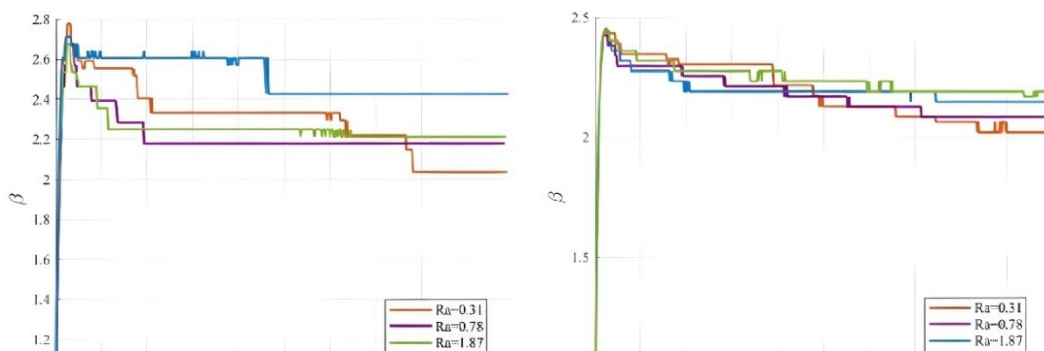
بررسی آزمایش‌ها نشان داد که دینامیک قطرات در برخورد با سطوح کروئی تحت تأثیر همزمان خواص سیال، شرایط برخورد و ویژگی‌های سطح است. آزمایش‌ها در بازه‌ی گسترده‌ای از ویسکوزیته (۱ تا ۹۱۸ mPa.s متناظر با $2/674 \leq Oh \leq 0/02$)، سرعت برخورد $3/1$ و $4/1$ ms معادل با $(1244 \leq We \leq 498)$ ، چهار سطح با زبری مختلف $0/31$ ، $5/14$ ، $7/14$ و $14/7 \mu m$ و سه نسبت قطر $3/14$ ، $5/14$ ، $7/14$ انجام شد. تکرار سه‌باره‌ی هر آزمایش و انحراف معیار کمتر از ۳ درصد، صحت و دقت نتایج را تأیید می‌کند.

نتایج نشان دادند که افزایش ویسکوزیته، بیشینه فاکتور پخش (β_{max}) را کاهش می‌دهد و از بازگشت نوسانی قطره جلوگیری می‌کند. در رژیم‌های با عدد Oh پایین (مانند آب و محلول‌های رقیق گلیسرین)، β_{max} تا $3/2$ برابر افزایش یافت و قطره پس از رسیدن به بیشینه پهنای بازگشت آشکاری داشت. در حالی که برای سیالات با ویسکوزیته بالا مانند G100 با $Oh = 2/674$ ، β_{max} محدود به حدود ۲ شد و بازگشت یا نوسان مشاهده نگردید. این تغییر رفتار نشان‌دهنده‌ی گذار از رژیم

میکرومتر ثبت شد، در حالی که در سرعت پایین‌تر، مقادیر β_{max} به $2/45 \pm 0/07$ و $2/43 \pm 0/068$ کاهش می‌یابند. این افزایش ناشی از غلبه نیروی اینرسی بر مقاومت‌های ویسکوز و کشش سطحی در سرعت‌های بالاتر است.

زمان بدون‌بعد رسیدن به بیشینه پخش نیز به سرعت وابسته است و تحت تأثیر زبری سطح قرار می‌گیرد. در زبری پایین، زمان بدون‌بعد از $2/21 \pm 0/066$ در سرعت $3/1$ به $2/85 \pm 0/085$ در سرعت $4/1$ افزایش یافت، در حالی که در زبری بالاتر این زمان از $1/94 \pm 0/058$ به $2/21 \pm 0/066$ رسید. این نتایج نشان می‌دهند که زبری بالاتر، فرآیند گسترش را تعدیل کرده و صرف زمان برای پخش یکنواخت و کامل‌تر سیال را تحت تأثیر قرار می‌دهد، همان‌طور که زهرابی‌چکانه و همکاران [۲۰] نیز گزارش کردند.

تفاوت β_{max} بین دو زبری در هر سرعت اندک است (حدود $0/02$ در سرعت پایین و $0/06$ در سرعت بالا)، که نشان می‌دهد در محدوده شرایط آزمایش، سرعت برخورد نقش غالب در تعیین میزان گسترش دارد و اثر زبری بیشتر نقش تعدیل‌کننده و کنترل‌کننده پایداری فرآیند را ایفا می‌کند.



شکل ۹ - برخورد قطرات G85.2 روی کره فلزی با قطر ۱۸ میلی‌متر در زبری‌های ۰/۳۱ تا ۱۴/۷ میکرومتر با دو سرعت :
الف) $U = 3/1$ m/s ب) $U = 4/1$ m/s داده‌ها به صورت میانگین گزارش شده‌اند و انحراف معیار نقاط کمتر از ۰/۰۸ بوده است.

مؤلفه‌ی مماسی جریان و هدایت بهتر سیال بر روی سطح کروی است.

نتایج همچنین بیانگر آن است که اثر زبری و انحنا با یکدیگر در تعامل هستند. در سطوح صاف‌تر، نسبت قطر (D^*) عامل اصلی تعیین‌کننده‌ی بیشینه پخش و زمان آن محسوب می‌شود. اما با افزایش زبری، اثر محدودکننده ناهمواری‌ها بر پخش غالب شده و تأثیر انحنا کاهش می‌یابد. بر اساس داده‌های تجربی، یک رابطه‌ی نیمه‌تجربی نیز برای پیش‌بینی β_{max} به‌دست آمد که کاهش خطی این پارامتر را با افزایش D^* و Ra توصیف می‌کند.

به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که اعداد بدون‌بعد کلیدی نظیر We و Oh در تعامل با پارامترهای هندسی D^* و Ra دینامیک برخورد قطرات بر سطوح کروی را کنترل می‌کنند. این مطالعه با پوشش بازه‌ی وسیعی از شرایط، تصویر جامعی از رفتار قطرات ارائه می‌دهد و می‌تواند به‌عنوان مرجع مناسبی برای توسعه مدل‌های عددی و طراحی فرآیندهای صنعتی مرتبط با پاشش قطرات مورد استفاده قرار گیرد. تحقیقات آتی می‌توانند با بررسی اثرات دما و تبخیر بر رفتار دینامیکی قطرات، به ویژه در شرایط صنعتی و رژیم‌های حرارتی بالا، این پژوهش را تکمیل کنند.

مراجع

- [1] Lohse, D., (2022) Fundamental fluid dynamics challenges in inkjet printing. Annu. Rev. Fluid Mech. 54(1): p. 349-382.
- [2] Chen, W., et al., (2017) Trajectory optimization of electrostatic spray painting robots on curved surface. Coatings. 7(10): p. 155.

اینرسی-کششی به رژیم ویسکوزی-کششی است که در آن اتلاف انرژی ناشی از تنش‌های لزجی نقش اصلی را ایفا می‌کند.

سرعت برخورد نیز اثر قابل توجهی بر گسترش و بازگشت قطره داشت. افزایش سرعت از ۳/۱ به ۴/۱ m/s منجر به رشد حدود ۱۰ درصدی β_{max} شد و زمان رسیدن به آن را نیز افزایش داد. در این شرایط، قطره لایه‌ای نازک‌تر تشکیل داد و بازگشت دیرتری داشت. مقایسه‌ی شرایط مختلف نشان داد که در سرعت پایین ($We \approx 711$) اثر محدودکننده ویسکوزیته بسیار محسوس است، در حالی که در سرعت بالاتر ($We \approx 1244$)، سهم انرژی جنبشی افزایش یافته و نقش ویسکوزیته در کاهش گسترش تضعیف می‌شود.

ویژگی‌های سطح نیز به‌طور معناداری بر رفتار قطره تأثیرگذار بودند. در زبری پایین ($Ra = 0.31 \mu m$)، پخش قطره یکنواخت‌تر بود و β_{max} مقادیر بالاتری به خود اختصاص داد. با افزایش زبری به ($Ra = 1.87 \mu m$)، β_{max} کمی کاهش یافت و در عین حال ناپایداری لبه لملا و پاشش ثانویه مشاهده شد. در زبری‌های بیشتر، این روند تشدید گردید که نشان می‌دهد ناهمواری سطح علاوه بر محدود کردن پهنای پخش، محرک اصلی بی‌ثباتی و پاشش است.

از سوی دیگر، نسبت قطر سطح کروی به قطر قطره (D^*) نیز بر دینامیک اثرگذار بود. کاهش D^* موجب افزایش β_{max} و کاهش زمان رسیدن به آن گردید. به عنوان نمونه، در سطح صاف با ($Ra = 0.31 \mu m$)، مقدار β_{max} از ۰/۲ در $D^* = 7/14$ به ۲/۴۱ در $D^* = 3/14$ افزایش یافت. این تغییر ناشی از تقویت

- [19] Liu, L., et al., (2025) Viscous droplet impact on rough surfaces. *Int. J. Multiphase Flow*: p. 105345.
 - [20] Chakaneh, J.Z., S. Javid, and M. Passandideh-Fard, (2019) Surface roughness effect on droplet impact characterization: Experimental and theoretical study. *J. Mech. Eng. Sci.* 13(2): p. 5104-5125.
 - [21] de Goede, T., et al., (2021) Droplet splashing on rough surfaces. *Phys. Rev. Fluids*. 6(4): p. 043604.
 - [22] Hao, J., (2017) Effect of surface roughness on droplet splashing. *Phys. Fluids*. 29(12).
 - [23] Xu, L., (2007) Liquid drop splashing on smooth, rough, and textured surfaces. *Phys. Rev. E*. 75(5): p. 056316.
 - [24] Range, K. and F. Feuillebois, (1998) Influence of surface roughness on liquid drop impact. *J. Colloid Interface Sci.* 203(1): p. 16-30.
 - [25] Wang, Z., K. Lin, and Y.-P. Zhao, (2019) The effect of sharp solid edges on the droplet wettability. *J. Colloid Interface Sci.* 552: p. 563-571.
 - [26] Abolghasemibizaki, M. and R. Mohammadi, (2018) Droplet impact on superhydrophobic surfaces fully decorated with cylindrical macrotextures. *J. Colloid Interface Sci.* 509: p. 422-431.
 - [27] Sapkal, N.P., et al., (2021) Experimental study of droplet splashing phenomena on hydrophobic micro-and micro/nano-textured surfaces. *J. Mech. Sci. Technol.* 35(11): p. 5061-5070.
 - [28] Yada, S., et al., (2021) Droplet impact on surfaces with asymmetric microscopic features. *Langmuir*. 37(36): p. 10849-10858.
 - [29] Jung, Y.C. and B. Bhushan, (2008) Dynamic effects of bouncing water droplets on superhydrophobic surfaces. *Langmuir*. 24(12): p. 6262-6269.
 - [30] Quetzeri-Santiago, M.A., A.A. (2019) Castrejón-Pita, and J.R. Castrejón-Pita, The effect of surface roughness on the contact line and splashing dynamics of impacting droplets. *Sci. Rep.*. 9(1): p. 15030.
 - [31] Choudhury, R., et al., (2023) Uncovering the effect of physical conditions and surface roughness on the maximum spreading factor of impinging droplets using a supervised artificial neural network model. *Ind. Eng. Chem. Res.* 62(49): p. 21208-21221.
 - [32] Wang, Z., E. Chen, and Y. Zhao, (2018) The effect of surface anisotropy on contact angles and the characterization of elliptical cap droplets. *Sci. China Technol. Sci.* 61: p. 309-316.
 - [33] Guo, C., et al., (2018) Droplet impact on anisotropic superhydrophobic surfaces. *Langmuir*. 34(11): p. 3533-3540.
 - [34] García-Geijo, P., et al., (2021) Spreading and splashing of drops impacting rough substrates. *J. Fluid Mech.* 917: p. A50.
 - [3] Wu, Z., Drop (2018) "impact" on an airfoil surface. *Adv. Colloid Interface Sci.* 256: p. 23-47.
 - [4] Shen, S., et al., (2013) Heat transfer performance and bundle-depth effect in horizontal-tube falling film evaporators. *Desalin. Water Treat.*. 51(4-6): p. 830-836.
 - [5] Moreira, A., A. Moita, and M. Panao, (2010) Advances and challenges in explaining fuel spray impingement: How much of single droplet impact research is useful? *Prog. Energy Combust. Sci.*. 36(5): p. 554-580.
 - [6] Antonini, C., A. Amirfazli, and M. Marengo, (2012) Drop impact and wettability: From hydrophilic to superhydrophobic surfaces. *Phys. Fluids*. 24(10).
 - [7] Vadiello, D., et al., (2009) Dynamic contact angle effects onto the maximum drop impact spreading on solid surfaces. *Phys. Fluids*. 21(12).
- [۸] شیخیان، م.، م. نوروزی، و م. ش. مردان، (۲۰۱۸) بررسی آزمایشگاهی اثر سرعت برخورد قطره بر ضریب گسترش قطرات غیرنیوتنی و نیوتنی در برخورد با سطح جامد خشک، نشریه مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۸، شماره ۳، ص. ۱۴۶-۱۵۲.
- [9] Clanet, C., et al., (2004) Maximal deformation of an impacting drop. *J. Fluid Mech.* 517: p. 199-208.
 - [10] Choudhury, R., et al., (2017) Maximum spreading of liquid drop on various substrates with different wettabilities. *Appl. Surf. Sci.* 415: p. 149-154.
 - [11] Roisman, I.V., E. Berberović, and C. Tropea, (2009) Inertia dominated drop collisions. I. On the universal flow in the lamella. *Phys. Fluids*. 21(5).
 - [12] Rioboo, R., M. Marengo, and C. Tropea, (2002) Time evolution of liquid drop impact onto solid, dry surfaces. *Exp. Fluids*. 33(1): p. 112-124.
 - [13] Pasandideh-Fard, M., et al., (1996) Capillary effects during droplet impact on a solid surface. *Phys. Fluids*. 8(3): p. 650-659.
 - [14] Sanjay, V. and D. Lohse, (2025) Unifying theory of scaling in drop impact: forces and maximum spreading diameter. *Phys. Rev. Lett.* 134(10): p. 104003.
 - [15] Yeong, Y.H., et al., (2014) Drop impact and rebound dynamics on an inclined superhydrophobic surface. *Langmuir*. 30(40): p. 12027-12038.
 - [16] Liang, G., et al., (2014) A study of a single liquid drop impact on inclined wetted surfaces. *Acta Mech.* 225: p. 3353-3363.
 - [17] Tang, C., et al., (2017) Dynamics of droplet impact on solid surface with different roughness. *Int. J. Multiphase Flow*. 96: p. 56-69.
 - [18] Zhang, H., et al., (2022) How surface roughness promotes or suppresses drop splash. *Phys. Fluids*. 34(2).

- [46] Long, M., J. Hasanyan, and S. Jung, (2022) Spreading dynamics of a droplet impacting a sphere. *Phys. Fluids*. 34(10).
- [47] Abbot, M., et al., (2024) Spreading of a viscous drop after impact onto a spherical target. *J. Fluid Mech.* 996: p. A10.
- [48] Zhu, Z., Y. Jiang, and J.W. Drelich, (2022) Droplet spreading and adhesion on spherical surfaces. *Langmuir*. 38(27): p. 8456-8461.
- [49] Bakshi, S., I.V. Roisman, and C. Tropea, (2007) Investigations on the impact of a drop onto a small spherical target. *Phys. Fluids*. 19(3).
- [50] Liu, X., X. Zhang, and J. Min, (2019) Maximum spreading of droplets impacting spherical surfaces. *Phys. Fluids*. 31(9).
- [51] Khojasteh, D., et al., (2017) Curvature effect on droplet impacting onto hydrophobic and superhydrophobic spheres. *Int. J. Comput. Fluid Dyn.* 31(6-8): p. 310-323.
- [52] Milacic, E., M. Baltussen, and J. Kuipers, (2019) Direct numerical simulation study of droplet spreading on spherical particles. *Powder Technol.* 354: p. 11-18.
- [53] Dalgamoni, H.N. and X. Yong, (2021) Numerical and theoretical modeling of droplet impact on spherical surfaces. *Phys. Fluids*. 33(5).
- [54] Khurana, G., N. Sahoo, and P. Dhar, (2019) Phenomenology of droplet collision hydrodynamics on wetting and non-wetting spheres. *Phys. Fluids*. 31(7).
- [55] Banitabaei, S. and A. Amirfazli, (2017) Droplet impact onto a solid sphere: Effect of wettability and impact velocity. *Phys. Fluids*. 29(6).
- [56] Chen, S. and V. Bertola, (2017) Drop impact on spherical soft surfaces. *Phys. Fluids*. 29(8).
- [57] Mitra, S., et al., (2013) Droplet impact dynamics on a spherical particle. *Chem. Eng. Sci.* 100: p. 105-119.
- [35] Lee, J.B., et al., (2016) Universal rescaling of drop impact on smooth and rough surfaces. *J. Fluid Mech.* 786: p. R4.
- [36] Kubiak, K., et al., (2011) Wettability versus roughness of engineering surfaces. *Wear*. 271(3-4): p. 523-528.
- [37] Maitra, T., et al., (2014) On the nanoengineering of superhydrophobic and impalement resistant surface textures below the freezing temperature. *Nano Lett.* 14(1): p. 172-182.
- [38] Liu, Y., et al., (2015) Symmetry breaking in drop bouncing on curved surfaces. *Nat. Commun.* 6(1): p. 10034.
- [39] Deng, L., et al., (2018) Numerical study of water droplets impacting on cylindrical heat transfer pipes. *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.* 12(1): p. 598-610.
- [40] Sayyari, M.J., S.A. Naghedifar, and J.A. Esfahani, (2020) Pinch-off location and time during 2D droplet impact onto a wetted stationary cylinder using the lattice Boltzmann method. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 42: p. 1-13.
- [41] Wang, Y., Y. Wang, and S. Wang, (2020) Droplet impact on cylindrical surfaces: Effects of surface wettability, initial impact velocity, and cylinder size. *J. Colloid Interface Sci.* 578: p. 207-217.
- [42] Arogeti, M., E. Sher, and T. Bar-Kohany, (2024) An experimental study of the events that follow a drop hitting a small surface. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 150: p. 111067.
- [43] Liu, X., et al., (2020) Study of the effect of surface wettability on droplet impact on spherical surfaces. *Int. J. Low-Carbon Technol.* 15(3): p. 414-420.
- [44] Bordbar, A., et al., (2018) Maximum spreading and rebound of a droplet impacting onto a spherical surface at low Weber numbers. *Langmuir*, 2018. 34(17): p. 5149-5158.
- [45] Yoon, I., et al., (2024) Numerical investigation of spreading time in droplet impact with a large spherical surface: from physical analysis to data-driven prediction model. *Theor. Comput. Fluid Dyn.* 38(2): p. 225-250.