

بررسی تجربی پاشش قطره در برخورد با سطح نرم

امیرکریم دوست یاسوری* (استادیار)

حسین حاتمی (استادیار)

مظفر شکری راد (استادیار)

محسن ایزدی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد

مهندسی مکانیک شریف، پاییز ۱۳۹۸
دوری ۳-۳۵، شماره ۲، ص. ۴۹-۵۵yasuri.am@lu.ac.ir
hatami.h@lu.ac.ir
m.shokrirad@yahoo.com
izadi.m@lu.ac.ir

در این تحقیق، پاشش قطره در برخورد با سطوح نرم ویسکوالاستیک پلی‌دیمیتیل سیلوکسان با ضخامت‌های فیلم مختلف با استفاده از دوربین سرعت بالا به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. از مخلوط قطرات آب و اتانول در اندازه میلی‌متر با خواص فیزیکی مختلف برای سرعت برخورد ۳/۵ تا ۵ متر بر ثانیه استفاده شد. زوایای تماس پیشروی و پسروی و زبری سطوح با نرمی و ضخامت‌های مختلف فیلم برای تعیین وضعیت میزان ترشوندگی سطح اندازه‌گیری شد. مشاهده شد که در زمان مشخصی از لحظه‌ی برخورد برای سطح با ضخامت بیشتر فیلم، ارتفاع پاشش بیشتر است. نتایج تجربی نشان داد که افزایش نرمی سطح و ضخامت فیلم، هر دو به افزایش پسماند زاویه‌ی تماس منجر می‌شود. همچنین نرمی و ضخامت سطح اثر کمی بر مرز پاشش/عدم پاشش دارد.

واژگان کلیدی: سطح نرم، برخورد قطره، پاشش، نرم پلی‌دیمیتیل سیلوکسان.

۱. مقدمه

برخورد قطره‌ی مایع روی سطح دارای اهمیت اساسی در بسیاری از فرایندهای صنعتی نظیر چاپ جوهر افشان، پلازما یا پوشش‌دهی از طریق اسپری^۱، پاشش سموم کشاورزی^۲، تزریق مواد سوختی^۳ و غیره است. پارامترهای کنترل‌کننده‌ی پاشش عبارت‌اند از:

۱. خواص قطره‌ی مایع که عبارت است از سرعت، حجم، چگالی، کشش سطحی و لزجت. در این ارتباط مارمانیز^۴ و ترودسن^۵ از مخلوط مایعات مختلف برای تغییر کشش سطحی و لزجت قطره بهره بردند. زانگ و بساران^۶ و برگرون^۳ با افزودن سورفکتانت^۷ پلیمری خواص مایعات را تغییر دادند.
۲. شرایط محیطی نظیر رطوبت و فشار محیط. شو^۸ و همکاران^۴ دریافته‌اند که می‌توان با کاهش فشار گاز محیط، پاشش را متوقف کرد.
۳. ویژگی‌های سطح شامل نوع سطح -- نظیر سطوح فلزی^۹، سطوح غیرفلزی^{۱۰} -- اثر زبری سطح^۹، اثر دمای سطح^{۱۱}، کج کردن سطح^{۱۲} و قابلیت ترشوندگی سطح. همچنین دینامیک برخورد قطره بر سطوح با قابلیت ترشوندگی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.^{۱۳} مطالعات زیادی روی سطوح به شدت آب‌گریز متمرکز شده است.^{۱۴} مطالعات در خصوص اثر نرمی سطح بر ترمودینامیک برخورد قطره و به خصوص وقوع پاشش خیلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. برخورد قطره با سرعت کم بر سطح نرم به تازگی بررسی شده است.^{۱۶}

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۲۷/۹/۱۳۹۶، اصلاحیه ۲۱/۱۳۹۷، پذیرش ۲۹/۲/۱۳۹۷.

DOI:10.24200/J40.2018.10812.1443

پیر^۹ و همکاران^{۱۸} برخورد قطره بر یک غشای الاستیک تحت تنش را گزارش کردند. آنها دریافته‌اند که سرعت برخورد و کشش سطحی غشاء در کنترل پاشش نقش دارد. یک بررسی ساده نشان می‌دهد که مطالعات انجام شده در زمینه‌ی سطوح نرم و انعطاف‌پذیر در مراحل ابتدایی قرار دارد و همچنین فقط تعداد کمی از مطالعات موجود در ادبیات موضوع به اثر سفتی سطوح در آستانه پاشش پرداخته است.^{۱۹} آستانه‌ی پاشش یک قطره‌ی مایع روی غشای^{۱۰} الاستیک تحت سفتی‌های متغیر به وسیله‌ی پیر و همکاران^{۱۸} بررسی شد. آنها نشان دادند که رفتار پاشش به شدت تحت تأثیر سفتی قرار گرفته است؛ به طوری که پاشش با کاهش سفتی می‌تواند متوقف شود. به تازگی تحقیقی توسط وگا و کاسترجان-پیتا^{۱۱} صورت گرفت که نشان داد افزودنی‌های پلیمری در داخل قطرات مایع، پاشش آنی را متوقف می‌کند. تحقیقی در زمینه‌ی برخورد قطره با سطوح نرم کروی نشان داد که زاویه‌ی تماس دینامیکی به شدت تحت تأثیر مدول الاستیسیته‌ی سطح و عدد وبرا است.^{۱۱} ویسنسی و همکاران^{۱۲} نشان دادند که زمان تماس قطره با سطح، در برخورد روی سطح الاستیک به شدت آب‌گریز در مقایسه با سطح صلب مشابه نصف می‌شود. کارپیتشکا^{۱۳} و همکاران^{۱۴} با بررسی حرکت قطره روی سطح ویسکوالاستیک دریافته‌اند که فرایند حرکت قطره با یک حرکت موجی از روی لبه‌ی پیشرو و در یک زاویه‌ی تماس بحرانی صورت می‌گیرد. همچنین تحقیقات در زمینه‌ی دینامیک برخورد قطره روی سطح نرم این حقیقت را آشکار ساخت که با افزایش نرمی سطح، عقب‌نشینی^{۱۴} قطره کاهش می‌یابد.^{۱۴} منگیلی^{۱۵} و همکاران^{۱۵} به صورت تجربی به بررسی دینامیک برخورد قطره روی سطح نرم پلی‌دیمیتیل سیلوکسانه (PDMS)^{۱۶} پرداختند.

جدول ۱. خواص فیزیکی ترکیب [۲۸]

وزن اتانول/آب	کشش سطحی	چگالی	لزجت
wt. %	(mN/m)	(kg/m ³)	(mPa.s)
۰	۷۲٫۸	۹۹۷٫۴	۰٫۹۹
۱۰	۴۸٫۱	۹۸۰٫۴	۱٫۰۳
۲۰	۳۸٫۶	۹۶۱٫۴	۱٫۰۶
۳۰	۳۳٫۵	۹۴۰٫۹	۱٫۰۹
۴۰	۳۰٫۷	۹۱۹٫۳	۱٫۱۱
۵۰	۲۸٫۵	۸۹۶٫۹	۱٫۱۳
۶۰	۲۶٫۷	۸۷۴٫۲	۱٫۱۵
۷۰	۲۵٫۵	۸۵۱٫۵	۱٫۱۷
۸۰	۲۴٫۳	۸۲۹٫۴	۱٫۱۸
۹۰	۲۳٫۲	۸۰۸٫۳	۱٫۱۹
۱۰۰	۲۲٫۳	۷۸۸٫۵	۱٫۲۰

جدول ۲. شرایط آماده سازی سطوح.

شرایط پوشش دهی	ضخامت (μm)	پایه سطح	مواد (w : w)
۱۵۰۰ rpm, ۱ min	۴۰ ± ۳	شیشه	۱:۱۰ تا ۱:۴۰ PDMS
۷۰۰۰ rpm, ۱ min	۲۰ ± ۴	شیشه	۱:۱۰ تا ۱:۴۰ PDMS
۱۵۰۰ rpm, ۱ min	۱۰ ± ۲	شیشه	PDMS* : Heptance ۲۵:۱
8000rpm, 1 min	۰/۰۶ ± ۰/۰۰۵	شیشه	PDMS:Hexane ۱:۱۰۰

PDMS 1:40 *

۵gr از محلول PDMS با نسبت‌های وزنی مختلف داخل یک ظرف کوچک ریخته شده و حدود ۴ ساعت در اجاق در دمای ۸۰°C بهبود^{۲۶} داده می‌شود. سپس سطح مربعی با طول ۲۰mm بریده شده و برای آزمایش به کار می‌رود. **سطوح نازک:** اسلایدهای شیشه‌یی ۲۰ × ۲۰mm با اتانول تمیز شده و سپس به وسیله‌ی فشار هوا به طور کامل خشک می‌شوند. محلول PDMS با نسبت‌های مختلف اتصال‌دهنده/مونومر بر اسلایدهای شیشه‌یی با سرعت چرخش بین ۱۵۰۰ - ۸۰۰۰ rpm در مدت زمان بین ۱ تا ۲ دقیقه برای کنترل ضخامت فیلم مورد استفاده قرار می‌گیرد. سپس نمونه‌های ساخته شده در اجاقی با دمای ۸۰°C در یک شبانه‌روز بهبود داده می‌شود. با این روش، فیلم‌های با ضخامت ۲۰ تا ۴۰ میکرون به طور یکنواخت بر روی سطح با انحراف کم‌تر از ۱ درصد ساخته می‌شوند. به منظور ساختن فیلم‌های نازک‌تر، از هپتان و هگزان برای رقیق کردن محلول PDMS استفاده می‌شود.^[۲۹] دو ضخامت ۱۰ میکرون و ۶۰ نانومتر نیز با استفاده از این روش به دست می‌آید.^[۳۰] شرح مختصری از روش آماده‌سازی و داده‌های اندازه‌گیری شده در این تحقیق در جداول ۲ و ۳ آمده است.

آزمایش‌ها در دمای ثابت ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده و از اثر تغییرات جزئی

محدوده‌ی سرعت برخورد آنها از ۱٫۷ تا ۳٫۷ متر بر ثانیه تغییر می‌کرد و آزمایش آنها روی سطح با ضخامت ۳mm صورت گرفت. از جمله یافته‌های آنها این بود که در برخورد قطره روی سطح نرم نسبت به سطوح با نرمی کمتر، زمان نوسان قطره به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

اما با نگاهی به تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی برخورد قطره روی سطوح نرم این حقیقت آشکار می‌شود که اثر ضخامت فیلم در پاشش قطره کمتر مورد توجه قرار گرفته است. مجموعه‌ی اعداد بی‌بعد حاکم در برخورد قطره در تحقیق حاضر در رابطه‌ی ۱ آمده است:

$$We = \frac{\rho V_0^2 d_0}{\sigma}, \quad Re = \frac{\rho V_0 d_0}{\mu}, \quad Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma d_0}} \quad (1)$$

که در آن ρ ، μ و σ به ترتیب چگالی، لزجت و کشش سطحی مایع هستند. d_0 و V_0 به ترتیب قطر و سرعت قطره پیش از برخورد هستند. We ، Re و Oh به ترتیب عدد وبر^{۱۷}، عدد رینولدز و عدد اونزورگ^{۱۸} را نشان می‌دهند.

کار حاضر یک تحقیق تجربی است که به ارزیابی پاشش قطره بر روی سطوح نرم پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان‌ها می‌پردازد. برای بررسی اثر کشش سطحی و نرمی سطح بر پدیده پاشش و دینامیک برخورد، از مایع با درصد‌های مختلف اتانول/آب روی سطح با ضخامت‌های مختلف فیلم استفاده شد. در حقیقت، تأکید بیشتر این مقاله در بررسی تجربی پاشش قطره در نوع وسیعی از خواص فیزیکی روی ضخامت‌های مختلف سطح PDMS از میلی‌متر تا نانومتر بوده است.

۲. روش تجربی و تجهیزات آزمایش

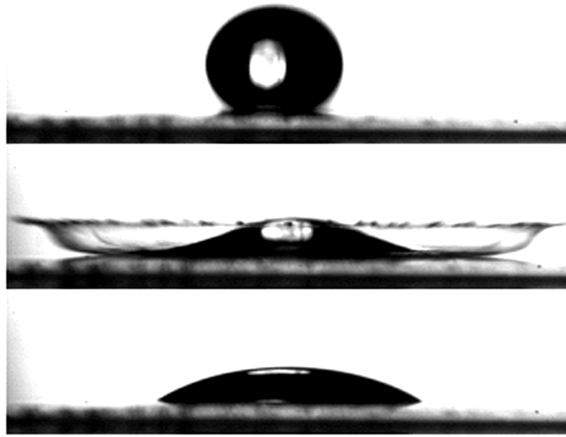
۲.۱. مواد آزمایش

سطوح نرم از ماده‌ی PDMS که محلولی از مونومر^{۱۹} (پایه) و اتصال‌دهنده^{۲۰} (عامل بهبود دهنده) ساخته شد. مدول برشی PDMS را می‌توان با کنترل نسبت جرم مونومر و اتصال‌دهنده تنظیم کرد. در آزمایش‌های این تحقیق از نسبت‌های ۱:۱۰، ۱:۲۰، ۱:۳۰ و ۱:۴۰ (نسبت وزنی، w/w مونومر: اتصال‌دهنده) استفاده شد. مدول برشی $|G|$ سطح مابین ۴۰ تا ۵۱۰ kPa است که ۴۰ kPa به سطح نرم ۱:۴۰ و ۵۱۰ kPa به سطح سخت ۱:۱۰ اختصاص دارد.^[۲۶]

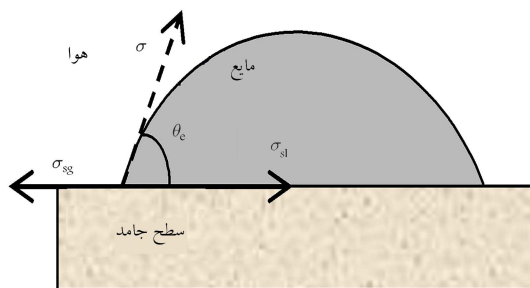
سطوح انعطاف‌پذیر نرم، بیشتر در آزمایش‌های زیست‌شناختی^{۲۲} برای مطالعه‌ی تشکیلات اتصالات مرکزی^{۲۳} سلول‌ها و تحرک سلول به کار می‌رود^[۲۷] PDMS. به علت سازگاری زیست‌شناختی و سهولت تهیه از جمله سطوح نرم ایده‌آل محسوب می‌شود PDMS به ویژه برای تهیه‌ی سطوح با مقادیر مختلف مدول یانگ که از لحاظ فیزیولوژیکی مهم‌اند، کاربرد دارد. در تحقیق حاضر، سطوح نازک نرم با استفاده از یک محلول مونومر (پایه) و اتصال‌دهنده (عامل بهبود دهنده) به وسیله‌ی پوشش‌دهی از طریق چرخش PDMS^{۲۴} ساخته می‌شود. مدول الاستیسیته‌ی PDMS را می‌توان با تغییر نسبت مونومر و اتصال‌دهنده کنترل کرد. برای بررسی جامع‌تر، آزمایش‌ها در محلول‌های متفاوتی از آب/اتانول انجام شد. برای محلول به کار رفته، کشش سطحی در محدوده‌ی ۲۲۸mN/m - ۷۲/۵ و لزجت در محدوده‌ی ۰٫۹۹ تا ۱/۲mPa.s تغییر می‌کند. خواص محلول به کار رفته به طور مفصل در جدول ۱ آمده است.

۲.۲. ساخت سطوح آزمایش

سطوح ضخیم: برای ساختن سطوح ضخیم^{۲۵} (حدود ۲/۵ ± ۰/۰۲mm ضخامت)،



شکل ۲. قطره از بالا به پایین به ترتیب پیش از برخورد با قطر d ، در حالت پخش همراه با پاشش تاجی شکل و در حالت تعادل.



شکل ۳. زاویه‌ی تماس یک قطره در حال تعادل.

۴.۲. خواص سطوح

۱.۴.۲. پسماند زاویه‌ی تماس^{۲۹}

هنگامی که یک قطره‌ی مایع در تماس با سطح جامد قرار می‌گیرد، به دلیل وجود رقابت بین انرژی‌های سطح مشترک مایع، جامد و گاز، روی سطح پخش می‌شود. از آنجا که در پدیده‌ی ترشوندگی، سه فاز مایع، جامد و گاز در مجاورت هم وجود دارد، سه نوع انرژی سطحی مایع/گاز σ ، جامد/گاز σ_{sg} و جامد/مایع σ_{sl} تعریف می‌شود. هنگامی که یک قطره‌ی مایع در تماس با سطح جامد قرار می‌گیرد، سطح مشترک مایع/گاز تشکیل یک کلاهک کروی می‌دهد؛ زاویه‌ی θ_c در آن قطره‌ی مایع به سطح می‌رسد، به زاویه‌ی تماس تعادلی θ_e با زاویه‌ی یانگ^{۳۰} معروف است که به وسیله‌ی رابطه‌ی ۲، معروف به معادله‌ی یانگ^[۳۱]، با انرژی‌های سطحی مرتبط است (شکل ۳):

$$\sigma \cos \theta_e = \sigma_{sg} - \sigma_{sl} \quad (2)$$

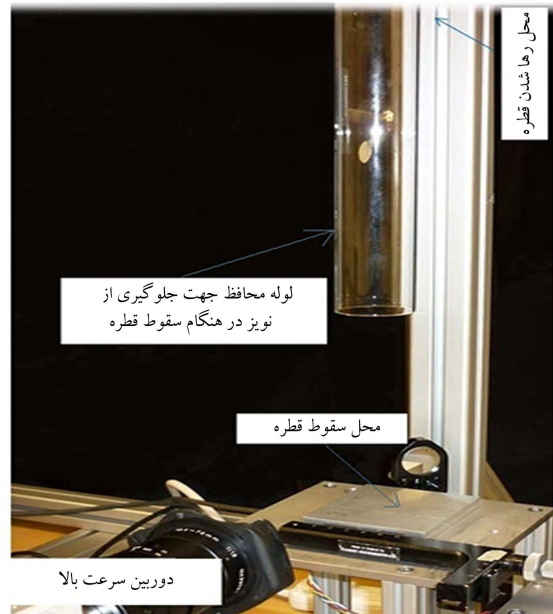
رابطه‌ی یانگ با صرف‌نظر کردن از اثرگرانش روی سطح هموار، صاف و از لحاظ شیمیایی همگن برقرار است.

همچنین می‌توان در حالت دینامیکی زاویه‌ی تماس را اندازه‌گیری کرد که به «زاویه‌ی تماس دینامیکی» معروف است. به علت پسماند زاویه‌ی تماس، خط تماس با زوایای تماس متفاوت پیشرو و پسرو به ترتیب در دو جهت هوا و مایع حرکت می‌کند. مطابق شکل ۴، زاویه‌ی تماس دینامیکی به وجود آمده را حین پخش قطره روی سطح (حرکت خط تماس به سمت هوا) زاویه‌ی تماس پیشروی (θ_a) ، و حین جمع شدن قطره (حرکت خط تماس به سمت فاز مایع)، زاویه‌ی تماس پسروی

جدول ۳. نمونه‌های اندازه‌گیری شده در این تحقیق.

ضخامت فیلم	سرعت برخورد (mk/s)
$2/5mm, 40 \mu m$	$5 \pm 0/05$
$10 \mu m^*, 60 nm$	
$20 \mu m^*, 10 \mu m$	$4/3 \pm 0/05$
$20 \mu m^*, 10 \mu m$	$3/5 \pm 0/04$

* ضخامت فیلم $10 \mu m$ تنها از $40 \mu m$: $1 PDMS$ ساخته شده است.



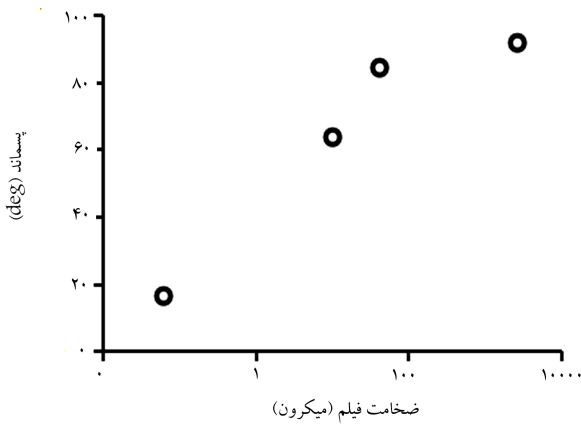
شکل ۱. دستگاه آزمایش.

دما بر پارامترهای دیگر صرف‌نظر شده است. برای بررسی اثر عدد رینولدز بر روی دینامیک برخورد و پدیده پاشش، سرعت‌های برخورد مختلف در نظر گرفته شده است.

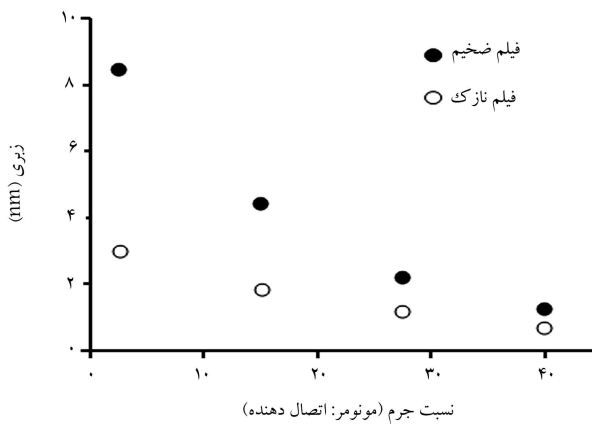
۳.۲. دستگاه آزمایش

دوربین سرعت بالای CCD با 576×240 پیکسل با نرخ 30000 عکس بر ثانیه (fps) برای ضبط فرایند برخورد مورد استفاده قرار گرفت. دوربین در جهت مقابل منبع نور قرار داشته و با زاویه‌ی 15 درجه نسبت به افق از فرایند برخورد عکس می‌گیرد. تصاویر ضبط شده توسط دوربین برای پردازش بیشتر به رایانه ارسال می‌شود. تصویری از دستگاه آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است.

مایع به کار رفته در آزمایش، غلظت‌های مختلف محلول آب/اتانول بودند ($0-10\%$ اتانول). سرعت‌های برخورد با سطح از طریق تقسیم فاصله‌ی طی شده در دو تصویر متوالی قبل از این که به سطح برخورد کنند بر زمان سپری شده محاسبه شده است. با استفاده از یک الگوریتم MATLAB خودکار^{۲۷} و پردازش تصویر^{۲۸}، قطر پخش و دیگر کمیت‌های مورد نیاز محاسبه می‌شود. قطر قطره برای محاسبه‌ی عدد رینولدز، از طریق تعداد پیکسل تصویر قطره و مقیاس تصویر به دست آمده است. به منظور بررسی تکرارپذیری، هر آزمایش چهار بار انجام می‌شود. تصاویری از مراحل مختلف برخورد قطره بر سطح در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۶. پسماند زاویه‌ی تماس بر حسب ضخامت فیلم سطح.



شکل ۷. زبری میانگین سطح با ضخامت ۲/۵mm و سطح با فیلم نازک ۴۰/۱۰۰۰ برای نسبت‌های وزنی مختلف.

نسبت به سطوح نازک (شکل ۶) توجه می‌کند. دقت در شکل ۷ نشان می‌دهد که برای هر کدام از دو نوع سطح ضخیم و نازک، با افزایش نرمی سطح (افزایش نسبت وزنی)، زبری کاهش می‌یابد. از طرف دیگر طبق نمودار ۵، پسماند با افزایش نرمی سطح، افزایش یافته است. این در حالی است که می‌دانیم با افزایش زبری سطوح صلب، پسماند زاویه‌ی تماس افزایش می‌یابد. بنابراین به نظر می‌رسد که روی سطح نرم عامل دیگری نظیر تغییر شکل سطح باید دلیل افزایش پسماند زاویه‌ی تماس باشد.

۳. نتایج و بحث

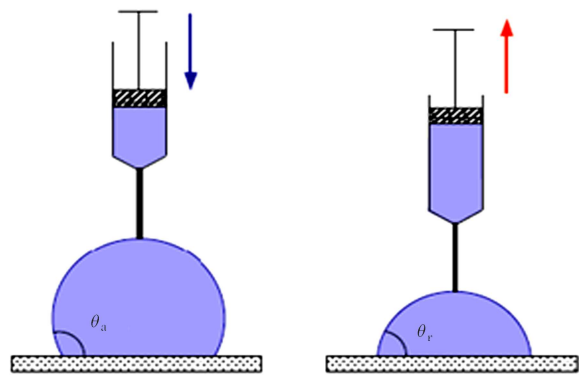
در این بخش، به ارزیابی فرایند ترشوندگی از طریق اندازه‌گیری پارامترهای درگیر در برخورد قطره، در حوزه‌ی وسیعی از اعداد رینولدز و وبر خواهیم پرداخت ($16000 < Re < 26000$ ، $10000 < We < 26000$). محدوده‌ی تغییر قطر d ، سرعت برخورد (V_c)، لزجت (μ)، چگالی (ρ)، کشش سطحی (σ) و قطر و ضخامت فیلم δ عبارت‌اند از:

$$1/7 \leq d_c \leq 3/8 \text{ mm}, 3/5 \leq V_c \leq 5 \text{ m/s},$$

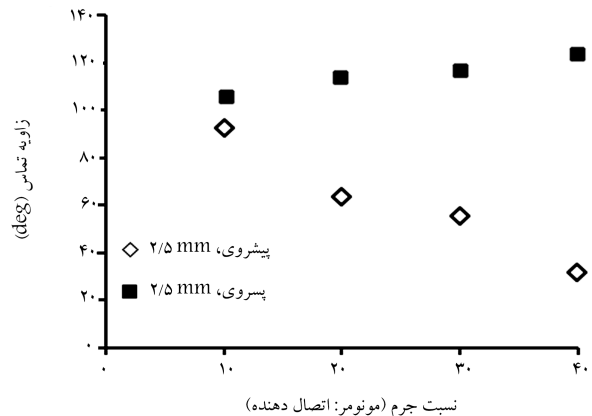
$$0/99 \leq \mu \leq 1/2 \text{ mPa.s}$$

$$22/8 \leq \sigma \leq 72/5 \text{ mN/m}, 788/5 \leq \rho \leq 997/4 \text{ kg/m}^3$$

$$0/060 \leq \delta \leq 40 \text{ } \mu\text{m}, \delta = 2/5 \text{ mm}$$



شکل ۴. شماتیکی از زوایای تماس پیشروی و پسروی.



شکل ۵. زاویه‌ی تماس پیشروی/پسروی قطرات آب بر سطح PDMS با ضخامت ۲/۵mm در نسبت وزنی‌های مختلف.

θ_r می‌نامند. به اختلاف مقادیر زاویه‌ی تماس پیشروی و پسروی ($\theta_a - \theta_r$)، پسماند زاویه‌ی تماس می‌گویند که به علت زبری و غیر یکدست‌بودن سطح به وجود می‌آید. برای یک سطح واقعی سه زاویه‌ی فوق‌الذکر با هم برابر نیستند و همواره رابطه‌ی $\theta_r < \theta_e < \theta_a$ برقرار است.

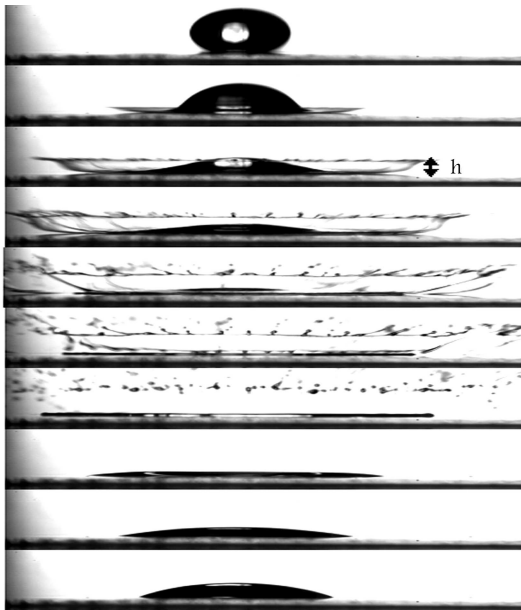
با استفاده از دستگاه کشش‌سنج^{۳۱}، زوایای تماس پیشروی و پسروی برای سطوح با نرمی و ضخامت‌های مختلف فیلم اندازه‌گیری شده است. شکل ۵ تغییرات زاویه‌ی تماس (پیشروی و پسروی) سطح با ضخامت ۲/۵mm را نسبت به نسبت‌های وزنی w/w ، مونومر: اتصال دهنده) نشان می‌دهد. عدم قطعیت اندازه‌گیری زاویه‌ی تماس با این دستگاه کم‌تر از ۱۵ درصد است.

چنان‌که مشاهده می‌شود پسماند زاویه‌ی تماس برای سطوح نرم‌تر (نسبت وزنی بیشتر)، بالاتر است. همچنین پسماند زاویه‌ی تماس بر حسب ضخامت فیلم سطح در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت فیلم پسماند زاویه‌ی تماس افزایش یافته است.

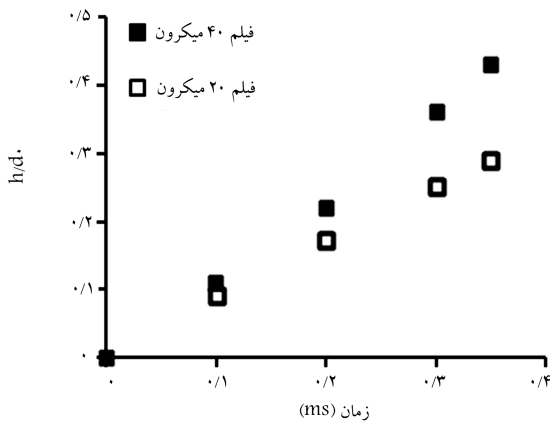
۲.۴.۲. زبری سطوح

زبری میانگین سطح R_a به وسیله میکروسکوپ نیروی اتمی اندازه‌گیری شده و برای نسبت‌های وزنی مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. عدم قطعیت دستگاه اندازه‌گیری ۰.۵٪، ضخامت سطح ضخیم ۲/۵mm و ضخامت فیلم سطح نازک $40 \text{ } \mu\text{m}$ است.

چنان‌که مشاهده می‌شود، در یک نسبت وزنی برابر، زبری سطوح ضخیم بیشتر از زبری فیلم نازک است. این نتیجه، پسماند زاویه‌ی تماس بالاتر سطوح ضخیم را



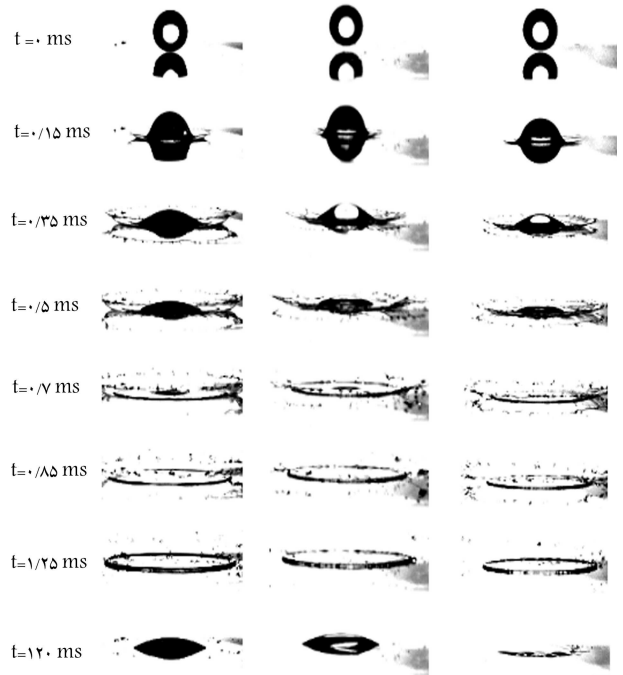
شکل ۹. تصاویر برخورد قطره‌ی اتانول با $V_0 = 5 \text{ m/s}$ روی $1:10$ PDMS با ضخامت فیلم $20 \mu\text{m}$.



شکل ۱۰. ارتفاع تاج پاشش برای قطره‌ی اتانول بر روی $1:10$ PDMS برای سرعت برخورد قطره 5 m/s .

۳.۳. مرز پاشش/عدم پاشش

در شکل ۱۱ نمودار $Oh - Re$ برای اندازه‌گیری‌های انجام شده ارائه شده است. نقاط مرتبط به پاشش و عدم پاشش به ترتیب با علائم ستاره و دایره‌ی توپر نشان داده شده است. علائم به سطوح با نرمی‌ها و ضخامت‌های مختلف اشاره دارد. مرز تجربی بین پاشش و عدم پاشش آزمایش‌های تحقیق حاضر با دو مدل واندروال [۲۲] و مدل مندو [۹] که وقوع پاشش را از طریق روابط به ترتیب $Oh Re^{0.5} > 0.35$ و $Oh(Re)^{1/25} > 57/7$ برای سطوح صلب پیش‌بینی می‌کند، مقایسه می‌شود. مدل مندو مرز پاشش را برای همه‌ی داده‌ها کمتر تخمین می‌زند در حالی که مدل واندروال این مرز را با تقریب نسبتاً بالایی به خوبی پیش‌بینی کرده است (مگر روی دو فیلم نازک $1 \mu\text{m}$). روی شکل ۱۱ به برخی از نقاط بحرانی نیز اشاره شده که در مرز تجربی بین پاشش و لایه‌نشانی قرار دارند. به نظر می‌رسد که برای سطوح در نظر گرفته شده در این تحقیق، اثر نرمی و ضخامت سطوح تأثیر ناچیزی بر مرز بین پاشش/لایه‌نشانی دارد و بنابراین می‌توان رابطه‌ی واندروال را با تقریب نسبتاً خوبی



شکل ۸. مراحل مختلف برخورد قطره 40% اتانول/آب بر روی سطح $1:40$ PDMS با ضخامت‌های فیلم.

۱.۳. بررسی کیفی

ابتدا برای نمونه، برخورد قطره‌ی 40% اتانول/آب روی سطوح با ضخامت‌های مختلف بررسی می‌شود. با مقایسه این برخورد با اینرسی یکسان می‌توان به طور کیفی جنبه‌های مختلف اتلاف انرژی در طی برخورد قطره را مورد توجه قرار داد. عکس‌های برخورد قطره بر روی سطح $1:40$ PDMS با ضخامت‌های فیلم (δ) $2/5$ میلی‌متر، 40 میکرون و 60 نانومتر در شکل ۸ نشان داده شده است (عدد رینولدز 2834 ، عدد وبر 1507 و عدد اونزورگ 0.70049).

چنان که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، برای هر سه مورد یک پاشش تاجی تشکیل می‌شود و در مراحل اولیه‌ی پخش، اینرسی غالب است. در حالی که فرایند جمع شدن قطره در برگشت 32 به طور قابل توجهی تحت تأثیر ضخامت فیلم قرار می‌گیرد؛ به طوری که با کاهش ضخامت فیلم، قابلیت برگشت قطره نیز کاهش می‌یابد. در دو حالت ب و ج در حالی که خط تماس از حرکت می‌ایستد، خط تماس در حالت الف مربوط به ضخامت کمتر همچنان در حال حرکت است. بنابراین قطره بر روی سطح با فیلم نازکتر آهسته‌تر برمی‌گردد 33 و سطح پخش نهایی آن بزرگ‌تر است.

۲.۳. ارتفاع تاج پاشش

در شکل ۹ تصاویر برخورد قطره‌ی اتانول با سرعت اولیه‌ی 5 m/s بر روی سطح $1:10$ PDMS با ضخامت فیلم $20 \mu\text{m}$ را نشان می‌دهد. ارتفاع تاج پاشش اتانول (h) که نسبت به قطر اولیه‌ی قطره‌ی (d_0) بی‌بعد شده با سرعت برخورد 5 m/s برای دو ضخامت فیلم $20 \mu\text{m}$ و $40 \mu\text{m}$ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، در یک زمان مشخص از لحظه‌ی برخورد برای سطح با ضخامت بیشتر فیلم، ارتفاع پاشش بیشتر است. همچنین سطوح ضخیم‌تر، زمان پخش طولانی‌تری را تجربه می‌کنند، قبل از آن که دچار شکست شوند.

اندازه‌گیری با سطوح ضخیم نشان می‌دهد که در وضعیت مدول برشی، زبری سطح ضخیم نسبت به سطوح نازک بیشتر است و در نتیجه پسماند زاویه‌ی تماس آنها بالاتر است. مرز تجربی بین پاشش/لایه‌نشانی تحت تأثیر نرمی سطح یا ضخامت فیلم قرار نمی‌گیرد و کماکان با رابطه‌ی واندروال که برای سطوح صلب ارائه شده قابل پیش‌بینی است.

فهرست علائم

- d : قطر پخش (mm)؛
- d_c : قطر قطره پیش از برخورد (mm)؛
- $|G|$: مدول برشی (Pa)؛
- h : ارتفاع پاشش کرونا (mm)؛
- Oh : عدد اونزورگ؛
- Ra : زبری میانگین (mm)؛
- Re : عدد رینولدز؛
- t : زمان پخش (ms)؛
- We : عدد وبر؛

علائم یونانی

- δ : ضخامت فیلم (μm)؛
- ρ : چگالی (kg/m^3)؛
- σ : کش سطحی (mN/m)؛
- θ_a : زاویه‌ی تماس پیشرو ($^\circ$)؛
- θ_e : زاویه‌ی تماس تعادلی ($^\circ$)؛
- θ_r : زاویه‌ی تماس پسرو ($^\circ$)؛
- μ : ضریب لزجت ($mPa.s$).

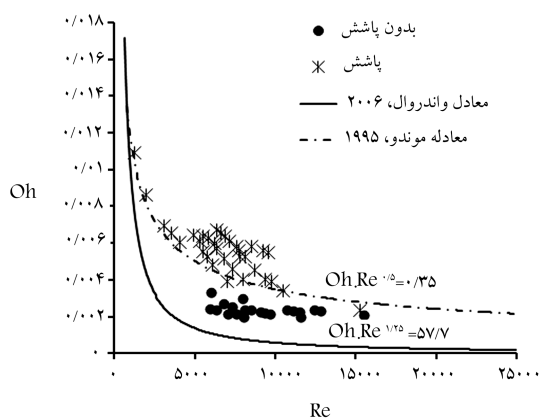
پانوشتها

1. plasma or spray coating
2. insecticides sprinkling
3. fuel material injection
4. Marmanis
5. Thoroddsen
6. Zhang and Basaran
7. surfactant
8. Xu
9. Pepper
10. membrane
11. Vega and Castrejón-Pita
12. Weisensee
13. Karpitschka
14. retraction
15. Mangili
16. polydimethylsiloxane (PDMS)
17. weber number
18. Ohnesorge number
19. monomer (base)

20. cross-linker (curing agent)
21. shear moduli
22. biological
23. focal adhesions
24. Spin-coating
25. thick
26. cured
27. self-programmed MATLAB
28. image processing
29. contact angle hysteresis (CAH)
30. Young
31. profile analysis tensiometer PAT-01
32. dewetting phase
33. recede

منابع (References)

1. Marmanis, H. and Thoroddsen, S.T. "Scaling of the fingering pattern of an impacting drop", *Phys. Fluids*, **8**(6), pp. 1344-1346 (1996).



شکل ۱۱. مرز بین پاشش/عدم پاشش برای داده‌های تحقیق حاضر نسبت به عدد اونزورگ و رینولدز.

برای سطوح نرم نیز معتبر دانست. این نتیجه، یافته‌های پیر و همکاران^[۱۸]، که نرمی را عامل محدودکننده‌ی پاشش دانستند، تأیید نمی‌کند. به طور قطع تحقیقات بیشتری برای ارائه‌ی پاسخ به این سؤال که «آیا نرمی سطح می‌تواند پاشش را به تعویق بیاورد یا خیر» لازم است.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق به اثر نرمی و ضخامت فیلم در پاشش قطره حین برخورد آن روی سطح پرداخته شد. مشاهده شد که روی سطوح نرم، برخلاف سطوح صلب، با افزایش زبری سطح به‌طور حتم پسماند زاویه‌ی تماس افزایش نمی‌یابد. حتی مشاهده شد که با افزایش نرمی سطح، زبری کاهش و پسماند زاویه‌ی تماس افزایش پیدا کرد. یک دلیل محتمل برای این موضوع این است که زاویه‌ی تماس پیشروی و پسروی تحت تأثیر تغییر شکل سطح قرار گرفته است. مقایسه‌ی زبری سطوح نازک فیلم

2. Zhang, X. and Basaran, O.A. "Dynamic surface tension effects in impact of a drop with a solid surface", *J. Colloid Interf. Sci*, **187**, pp. 166-178 (1997).
3. Bergeron, V., Bonn, D., Martin, J.Y. and Vovelle, L. "Controlling droplet deposition with polymer additives", *Nature*, **405**, pp. 772-775 (2000).
4. Xu, L., Zahang, W.W. and Nagel, S.R. "Drop splashing onto a dry smooth surface", *Phys. Rev. Lett*, **94**, pp. 184505(1-4) (2005).
5. Mehdizadeh, N.Z., Chandra, S. and Mostaghimi, J. "Formation of fingers around the edges of a drop hitting a metal plate with high velocity", *J. Fluid Mech*, **510**, pp. 353-373 (2004).
6. Range, K. and Feuillebois, F. "Influence of surface roughness on liquid drop impact", *J. Colloid Interf. Sci*, **203**, pp. 16-30 (1998).
7. Bassette, C. and Bussi re, F. "Partitioning of splash and storage during rain drop impacts on banana leaves", *Agr. Forest Meteorol*, **148**, pp. 991-1004 (2008).
8. Kim, H.Y. and Chun, J.H. "The recoiling of liquid droplets upon collision with solid surfaces", *Phys. Fluids*, **13**(3), pp. 643-659 (2001).
9. Mundo, C., Sommerfeld, M. and Tropea, C. "Droplet-wall collisions: experimental studies of the deformation and breakup process", *Int. J. Multiphas Flow*, **21**, pp. 151-173 (1995).
10. Moita, A.S. and Moreira, A.L.N. "Drop impacts onto cold and heated rigid surfaces: Morphological comparisons, disintegration limits and secondary atomization", *Int. J. Heat Fluid Fl*, **28**, pp. 735-752 (2007).
11. Wang, A.B., Lin, C.H. and Chen, C.C. "The critical temperature of dry impact for tiny droplet impinging on a heated surface", *Phys. Fluids*, **12**(6), pp. 1622-1625 (2000).
12.  ikalov, S., Tropea, C. and Gani , E.N. "Impact of Droplets onto inclined surfaces", *J. Colloid Interf. Sci*, **286**, pp. 661-669 (2005).
13. Clanet, C., B guin, C., Richard, D. and et al. "Maximal deformation of an impacting drop", *J. Fluid Mech*, **517**, pp. 199-208 (2004).
14. Renardy, Y., Popinet, S., Duchemin, L. and et al. "Pyramidal and toroidal water drops after impact on a solid surface", *J. Fluid Mech*, **484**, pp. 69-83 (2003).
15. Schiaffino, S. and Sonin, A. A. "Molten droplet deposition and solidification at low Weber numbers", *Phys. Fluids*, **9**, pp. 3172-3187 (1997).
16. Chen, L., Jun Wu, Z. and Li Yao, S. "Evolution of entrapped air under bouncing droplets on viscoelastic surfaces", *Colloid Surface A*, **384**, pp. 726-732 (2011).
17. Chen, L. and Li, Z. "Bouncing droplets on nonsuperhydrophobic surfaces", *Phys. Rev. E*, **82**, pp. 016308(1-5) (2010).
18. Pepper, R.E., Courbin, L. and Stone, H.A. "Splashing on elastic membranes: The importance of early-time dynamics", *Phys. Fluids*, **20**, pp. 0821031(1-8) (2008).
19. Shanahan, M. and Carre, A. "Anomalous Spreading of Liquid Drops on an Elastomeric Surface", *Langmuir*, **10**, pp. 1647-1649 (1994).
20. Vega, E.J. and Castrej n-Pita, A.A. "Suppressing prompt splash with polymer additives", *Exp. Fluids*, **58**: 57. <https://doi.org/10.1007/s00348-017-2341-y> (2017).
21. Chen, S. and Bertola, V. "Drop impact on spherical soft surfaces" *Phys. Fluids*, **29**: <http://doi.org/10.1063/1.4996587> (2017).
22. Weisensee, P. B., Tian, J., Miljkovic, N. and et al. "Water droplet impact on elastic superhydrophobic surfaces", *Sci. Rep.* — 6:30328 — DOI: 10.1038/srep30328 (2016).
23. Karpitschka, S., Das, S., Gorcum, M. and et al. "Droplets move over viscoelastic substrates by surfing a ridge", *Nat. Commun.*, **6**:7891, ncomms 8891(2015).
24. Alizadeh, A., Bahadur, V., Shang, W. and et al. "Influence of Substrate Elasticity on Droplet Impact Dynamics", *Langmuir*, **29**(14), pp. 4520-4524 (2013).
25. Antonini, C., Marengo, M. and et al. "Understanding Mangili, S., the drop impact phenomenon on soft PDMS substrates", *Soft Matter*, **8**, pp. 10045-10054 (2012).
26. Chen, L., Auernhammer, G. K. and Bonaccorso, E. "Short time wetting dynamics on soft surfaces", *Soft Matter*, **7**, pp. 9084-9089 (2011).
27. Harris, A.K., Wild, P. and Stopak, D. "Silicon rubber substrate: A new wrinkle in the study of cell locomotion", *Science*, **208** (4440), pp. 177-179 (1980).
28. Vazquez, G., Alvarez, E. and Navaza, J. M. "Surface Tension of Alcohol + Water from 20 to 500  C", *J. Chem. Eng. Data*, **40**, pp. 611-614 (1995).
29. Thangawng, A. L., Ruoff, R. S., Swartz, M. A. and et al. "An ultra-thin PDMS membrane as a bio/micro-nano interface: fabrication and characterization", *Biomed Microdevices*, **9**, pp. 587-595 (2007).
30. Ryoo, J. H., Jeong, G. S., Kang, E. and et al. "Ultra-thin, hyperelastic PDMS nano membrane: fabrication and characterization", *15th Int. Conf. on Miniaturized Systems for Chem. and Life Sci., Seattle, Washington, USA* (2011).
31. Pericet-Camara, R., Best, A., Butt, H. J. and et al. "Effect of capillary pressure and surface tension on the deformation of elastic surfaces by sessile liquid microdrops: an experimental investigation", *Langmuir*, **24**, pp. 10565-10568 (2008).
32. Vander Wal, R.L., Berger, G.M. and Mozes, S.D. "The splash/ nonsplash boundary upon a dry surface and thin fluid film", *Exp. Fluids*, **40**, pp. 53-59 (2006).