

## بررسی تجربی دینامیک برخورد قطره بر روی سطوح ویسکوالاستیک

درک اثرات موئینگی در تعامل قطره مایع با سطح در بسیاری از فرآیندها از قبیل کاربردهای صنعتی نظیر چاپگرهای جوهر افشان، ایجاد پوشش رنگها، پاشش سموم کشاورزی و غیره دارای اهمیت بسیاری است. تحقیق حاضر به بررسی تجربی برخورد قطره بر روی سطوح نرم پلی دی متیل سیلوکسان با ضخامت‌های مختلف می‌پردازد. ارزیابی دینامیک قطره طی برخورد در محدوده‌ای از اعداد رینولدز بین ۱۰۰۰ تا ۱۶۰۰۰ و عدد وبر تا ۲۶۰۰ از جمله موارد مورد بررسی در این پژوهش است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که اثر نرمی و ضخامت سطح بر روی مرحله ترشوندگی ناچیز است در حالیکه این تأثیر بر روی مرحله ناخیزش قطره، قابل توجه است.

امیر کریم دوست یاسوری<sup>۱</sup>  
استادیار

واژه‌های راهنما: سطح ویسکوالاستیک، برخورد قطره، تر شدگی، اثرات موئینگی

### ۱- مقدمه

درک مکانیسم ترشوندگی<sup>۲</sup> بر روی سطح نرم به علت تغییر شکل حاصل از برخورد قطره پیچیده است. ریبو<sup>۳</sup> و همکاران [۱] نشان دادند که پسماند زاویه تماس بر روی سطوح نرم یا الاستیک تابعی از سرعت برخورد است. علاقه به برخورد قطره بر روی سطوح نرم در بسیاری از کاربردهای بیولوژیک نظیر تزریق دارو تا کاربردهای مهندسی مانند پوشش‌دهی، نقاشی، سرمایش از طریق اسپری و غیره را در بر می‌گیرد. نتایج تحقیقات [۲-۳] نشان داده است که به علت حرکت تغییر شکل سطح در خط تماس، از ترشوندگی قطره مایع بر روی سطح نرم کاسته می‌شود. این پدیده معمولاً به ترمز ویسکوالاستیک<sup>۴</sup> نسبت داده می‌شود. مطالعه جالبی توسط وو<sup>۵</sup> و همکاران صورت گرفت [۴] که نشان داد هنگامی که ضخامت فیلم به زیر ۳ میکرون کاهش می‌یابد، اتلاف ویسکوالاستیک در تراز سطح الاستومر قابل چشم پوشی بوده و تنها اتلاف لزجت داخل قطره در ترشوندگی قطره حاکم است.

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه لرستان yasuri.am@lu.ac.ir

<sup>۲</sup> wetting

<sup>۳</sup> Rioboo

<sup>۴</sup> Viscoelastic braking

<sup>۵</sup> Voue

چن<sup>۱</sup> و همکاران [۵] نشان دادند که مراحل اولیه ترشوندگی خودبخود قطره بر روی سطوح با نرمی مختلف تحت تأثیر اینرسی و قابلیت ترشوندگی<sup>۲</sup> است ولی در مراحل بعدی اثر ویسکوالاستیسته سطح غالب است. کارپیتشکا<sup>۳</sup> و همکاران [۶] با بررسی حرکت قطره بر روی سطح ویسکوالاستیک دریافتند که فرایند حرکت قطره با یک حرکت موجی از روی لبه پیشرو و در یک زاویه تماس بحرانی صورت می‌گیرد. ایزباسارو و مورادوگلو<sup>۴</sup> [۷] بصورت عددی به بررسی اثر ویسکوالاستیسته بر روی برخورد قطره پرداختند.

نتایج تحقیقات آنها نشان داد که ویسکوالاستیسته، حرکت رو به جلوی خط تماس را در فاز ترشوندگی تسهیل می‌کند و حتی ماکزیمم ضریب پخش را کمی افزایش می‌دهد ولی این اثر در فاز ناخیشش (انقباض)، پس‌زدگی<sup>۵</sup> قطره را افزایش می‌دهد. منگیلی<sup>۶</sup> و همکاران [۸] بصورت تجربی به بررسی دینامیک برخورد قطره بر روی سطح نرم پلی دی متیل سیلوکسان<sup>۷</sup> (PDMS) پرداختند. محدوده سرعت برخورد آنها از 1.7 تا 3.7 m/s تغییر می‌کرد و آزمایش آنها روی سطح با ضخامت 3 mm صورت گرفت. از جمله یافته‌های آنها این بود که در برخورد قطره بر روی سطح نرم نسبت به سطوح با نرمی کمتر، زمان نوسان قطره بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد. در تحقیقی دیگر که توسط چن و همکاران [۹] صورت گرفت، برخورد قطره بر روی سطوح نرم در سرعت‌های برخورد مختلف بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که در اعداد وبر<sup>۸</sup> متوسط، مشابه سطوح صلب، به دام افتادگی حباب هوا در قطره در حال پخش مشاهده می‌شود. مجموعه اعداد بی‌بعد مهم در برخورد قطره در تحقیق حاضر عبارتند از:

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

که در آن  $\rho$ ،  $\mu$  و  $\gamma$  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، عدد رینولدز و عدد اونزورگ را نشان می‌دهند. یک بررسی ساده نشان می‌دهد که تحقیقات انجام شده در زمینه سطوح نرم و انعطاف‌پذیر در مراحل ابتدایی قرار دارد [۲]. تحقیق حاضر با یک بررسی تجربی به ارزیابی برخورد قطره بر روی سطوح نرم پلی دی متیل سیلوکسان می‌پردازد. تحلیل قطر قطره طی برخورد، ترشوندگی و ناخیشش قطره<sup>۹</sup> از جمله موضوعات مورد بررسی در این تحقیق است. بررسی برخورد قطره با خواص فیزیکی مختلف در سرعت‌های برخورد بالا (تا 5 m/s) بر روی سطحی با پوشش فیلم‌های نازک از عمده تفاوت‌های کار حاضر با کار دیگر محققان است. بدین ترتیب که برای بررسی اثر کشش سطحی مایع و نرمی سطح بر روی دینامیک برخورد، از مایعی با درصدهای مختلف اتانول / آب و هم چنین سطوحی از جنس پلی دی متیل سیلوکسان از ضخامت میلیمتر تا فیلم زیر میکرون (تا ضخامت فیلم 60 nm) استفاده گردیده است.

<sup>1</sup> Chen

<sup>2</sup> wettability

<sup>3</sup> Karpitschka

<sup>4</sup> Izbassaroy & Muradoglu

<sup>5</sup> Rebound

<sup>6</sup> Mangili

<sup>7</sup> Polydimethylsiloxane (PDMS)

<sup>8</sup> weber number

<sup>9</sup> dewetting

## ۲- روش تجربی و تجهیزات آزمایش

### ۲-۱- مواد آزمایش

سطوح انعطاف‌پذیر نرم بیشتر در آزمایش‌های زیستی<sup>۱</sup> برای مطالعه تشکیلات اتصالات مرکزی<sup>۲</sup> سلولها و تحرک سلول بکار می‌رود [۱۰]. پلی دی متیل سیلوکسان به علت سازگاری زیستی و سهولت تهیه از جمله سطوح نرم ایده‌آل محسوب می‌شود. پلی دی متیل سیلوکسان بویژه برای تهیه سطوح با مقادیر مختلف مدول یانگ که از لحاظ فیزیولوژیکی مهم هستند، کاربرد دارد. در تحقیق حاضر، سطوح نازک نرم با استفاده از یک محلول مونومر (پایه)<sup>۳</sup> و اتصال دهنده (عامل بهبود دهنده)<sup>۴</sup> بوسیله پوشش‌دهی از طریق چرخش<sup>۵</sup> پلی دی متیل سیلوکسان ساخته می‌شوند. مدول الاستیسیته پلی دی متیل سیلوکسان را می‌توان با تغییر نسبت مونومر و اتصال دهنده کنترل کرد.

در آزمایش از نسبت‌های ۴۰:۱ (نسبت وزنی، w/w، اتصال دهنده : مونومر)، ۳۰:۱، ۲۰:۱ و ۱۰:۱ با مدول برشی<sup>۶</sup> |G| مابین ۰/۲ تا ۵۱۰ کیلوپاسکال استفاده شد [۵]. در حقیقت سطوح با مدول برشی کمتر، سطوح نرم‌تر محسوب می‌شوند. برای بررسی جامع‌تر، آزمایش‌ها در محلول‌های متفاوتی از آب/ اتانول انجام گرفتند. برای محلول بکار رفته، کشش سطحی در محدوده ۲۲/۸ تا ۷۲/۵ mN/m و لزجت در محدوده ۰/۹۹ تا ۱/۲ mPas تغییر می‌کند. خواص محلول بکار رفته به طور مفصل در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- خواص فیزیکی ترکیب [۱۱]

wt% Ethanol/water	Surface tension (mN/m)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosity (mNs/m <sup>2</sup> )
0	72.7	997.4	0.99
10	48.1	980.4	1.03
20	38.5	961.4	1.06
30	33.5	940.9	1.09
40	30.7	919.3	1.11
50	28.5	896.9	1.13
60	26.7	874.2	1.15
70	25.5	851.5	1.17
80	24.3	829.4	1.18
90	23.2	808.3	1.19
100	22.3	788.5	1.20

<sup>1</sup> Biological

<sup>2</sup> Focal adhesions

<sup>3</sup> Monomer (base)

<sup>4</sup> Cross-linker (curing agent)

<sup>5</sup> Spin-coating

<sup>6</sup> Shear modulus

## ۲-۲- ساخت سطوح آزمایش

### ۲-۲-۱- سطوح ضخیم

برای ساختن سطوح ضخیم (حدود ۲/۵mm ضخامت)، ۵ گرم از محلول پلی دی متیل سیلوکسان با نسبت وزنی‌های مختلف داخل یک ظرف کوچک<sup>۱</sup> ریخته شده و حدود ۴ ساعت در اجاق در دمای ۸۰°C<sup>۲</sup> بهبود داده می‌شود. سپس سطوح مربعی با طول ۲۰mm بریده شده و برای آزمایش بکار می‌رود.

### ۲-۲-۲- سطوح نازک

اسلایدهای شیشه‌ای (۲۰ × ۲۰mm<sup>۲</sup>) با اتانول تمیز شده و سپس بوسیله فشار هوا کاملاً خشک می‌شوند. محلول پلی دی متیل سیلوکسان با نسبت‌های مختلف اتصال دهنده / مونومر بر روی اسلایدهای شیشه‌ای با سرعت چرخش بین ۱۵۰۰ تا ۸۰۰۰rpm در مدت زمان بین ۱ تا ۲ دقیقه برای کنترل ضخامت فیلم مورد استفاده قرار می‌گیرد. سپس نمونه‌های ساخته شده در یک اجاق در دمای ۸۰°C در یک شبانه روز بهبود داده می‌شوند. بوسیله این روش ضخامت‌های فیلم ۲۰ تا ۴۰ میکرون ساخته می‌شوند. به منظور ساختن فیلم‌های نازکتر، هپتان و هگزان برای رقیق کردن محلول پلی دی متیل سیلوکسان مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۲].

دو ضخامت ۱۰ میکرون و ۶۰ نانومتر نیز با استفاده از این روش بدست می‌آیند [۱۳]. شرح مختصری از روش آماده‌سازی و داده‌های اندازه‌گیری شده در این تحقیق در جداول (۲) و (۳) آمده است:

جدول ۲- شرایط آماده سازی فیلم سطوح

مواد (w:w)	پایه سطح	ضخامت (μm)	شرایط پوشش‌دهی
PDMS 1:10 to 1-40	اسلاید شیشه	40	1500 rpm, 1min
PDMS 1:10 to 1-40	اسلاید شیشه	20	7000 rpm, 1min
PDMS <sup>†</sup> :Heptane 25:1	اسلاید شیشه	10	1500 rpm, 1min
PDMS: Hexane 1:100	اسلاید شیشه	0.06	8000 rpm, 2min

\* همه آزمایشها در دمای 20°C صورت گرفته است. †PDMS 1:40

جدول ۳- نمونه های بکار رفته در این تحقیق

درصد اتانول/آب	سطح	سرعت برخورد	ضخامت سطح/ فیلم
0-100%	PDMS 1-10 to 1-40	5 m/s	2.5 mm, 40μm, 10μm*, 60nm
0-100%	PDMS 1-10 to 1-40	4.3 m/s	20μ, 10μm*
0-100%	PDMS 1-10 to 1-40	3.5 m/s	20μ, 10μm*

\* فیلم ۱۰ μm تنها از PDMS 1:40 ساخته شده است.

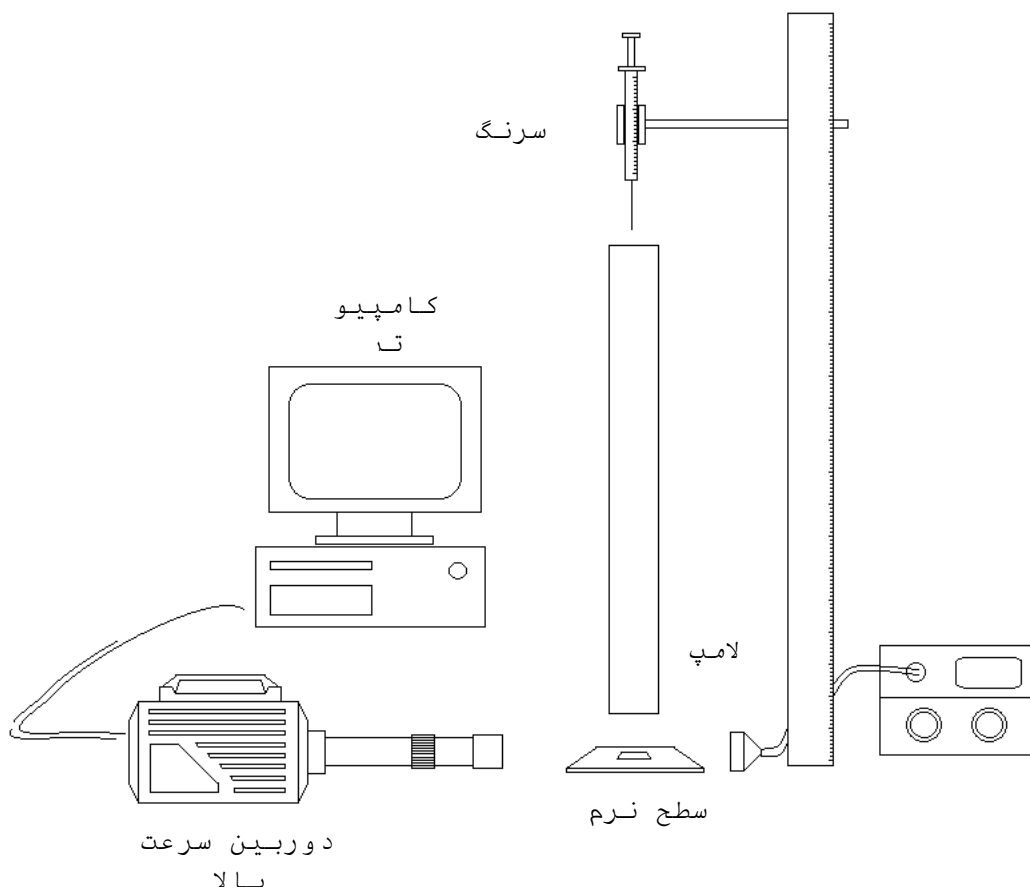
<sup>۱</sup> Petri dish

<sup>۲</sup> Cured

آزمایش‌ها در دمای ثابت ۲۰ درجه سانتیگراد انجام شده است و از اثر تغییرات جزئی دما بر روی پارامترهای دیگر صرف‌نظر شده است. برای بررسی اثر عدد رینولدز بر روی دینامیک برخورد، سرعت‌های برخورد مختلف قطره بر روی سطح در نظر گرفته شده است.

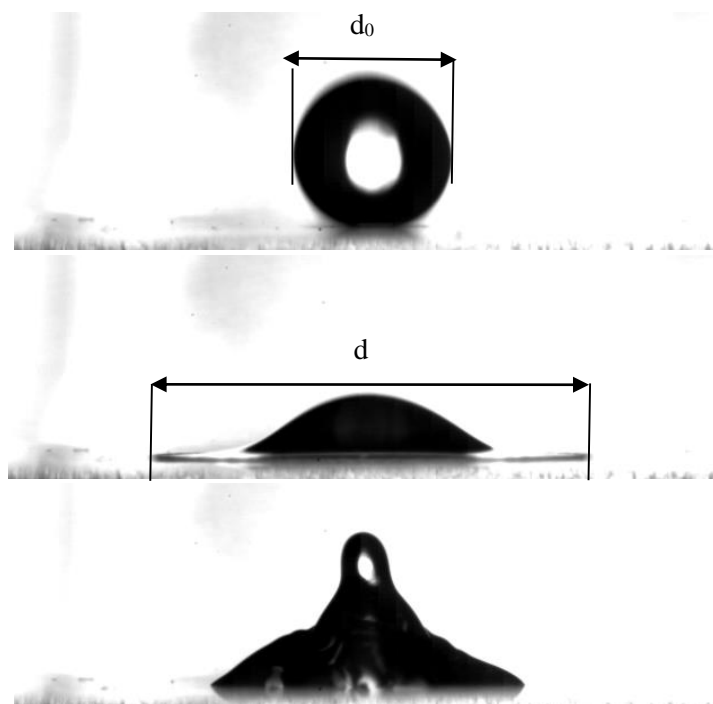
### ۲-۳- دستگاه آزمایش

دوربین سرعت بالای<sup>۱</sup> CCD با  $240 \times 576$  پیکسل با نرخ در محدوده ۳۰۰۰۰ عکس بر ثانیه برای ضبط فرآیند برخورد مورد استفاده قرار گرفت. دوربین در جهت مقابل منبع نور قرار داشته و با زاویه ۱۵ درجه نسبت به افق از فرآیند برخورد عکس می‌گیرد. تصاویر ضبط شده توسط دوربین برای پردازش بیشتر به کامپیوتر ارسال می‌شود. شماتیکی از دستگاه آزمایش در شکل (۱) نشان داده شده است. مایع بکار رفته در آزمایش، غلظت‌های مختلف محلول آب / اتانول بودند (۰-۱۰٪ اتانول). سرعت‌های برخورد با سطح از طریق تقسیم فاصله طی شده دو تصویر متوالی قبل از اینکه به سطح برخورد کنند بر زمان سپری شده محاسبه شده است.



شکل ۱- دستگاه آزمایش

<sup>1</sup> Charged-coupled device camera



**شکل ۲-** قطره آب به ترتیب از بالا به پایین لحظه برخورد با سرعت  $V_0$  با قطر اولیه  $d_0$ ، در حالت ترشوندگی با قطر  $d$  و در حال تعادل

با استفاده از یک الگوریتم MATLAB خودکار<sup>۱</sup> و پردازش تصویر<sup>۲</sup>، قطر قطره در حال ترشوندگی و دیگر کمیت‌های مورد نیاز محاسبه می‌شوند. به منظور بررسی تکرارپذیری، هر آزمایش چندین بار (حداقل چهاربار) آزمایش می‌شود. تصاویری از مراحل مختلف برخورد قطره بر روی سطح در شکل (۲) نشان داده شده است.

### ۳- مدلی برای نیروی ناشی از برخورد قطره

در اینجا سه رابطه مختلف برای محاسبه نیروی ناشی از برخورد قطره بر روی سطح ویسکوالاستیک ارائه می‌شود. رابطه اول را می‌توان با چشم‌پوشی از اثرات تغییر شکل قطره بصورت تقریبی از رابطه تغییر ممنتوم با نیرو بصورت زیر بدست آورد:

$$F_1 = \frac{mV_0}{t} \quad (۲)$$

که در آن  $m$  جرم قطره و  $t$  مدت زمانی است که سطح به بیشترین تغییر شکل خود می‌رسد. اگر این مدت زمان  $t$  را برابر با مدت زمان جابجایی قطره (سقوط قطره) بر روی سطح بصورت  $t = d_0/V_0$  قرار دهیم، به رابطه دوم خواهیم رسید:

$$F_2 = \frac{mV_0^2}{d_0} \quad (۳)$$

<sup>۱</sup> Self-programmed MATLAB

<sup>۲</sup> Image processing

برای رابطه سوم اما فرض می‌شود طی برخورد در مدت زمان  $dt$ ، یک تکه قطره به ارتفاع  $V_0 dt$ ، قطر  $d(t)$  (که از صفر تا  $d_0$  تغییر می‌کند) و جرم  $dm=0.25\rho\pi d(t)^2 V_0 dt$  از سرعت  $V_0$  به سرعت صفر می‌رسد و بنابراین  $F_3(t)=0.25\rho\pi d(t)^2 V_0^2$ ؛ نیروی برخورد ماکزیمم در  $d(t)=d_0$  اتفاق می‌افتد؛ یعنی:

$$F_3 = 0.25\rho\pi d_0^2 V_0^2 \quad (۴)$$

در حقیقت رابطه (۴) حاصل ضرب فشار دینامیکی  $\rho V_0^2$  در مساحت سطح  $0.25\pi d_0^2$  است.

#### ۴- نتایج و بحث

در این بخش، به ارزیابی فرآیند ترشوندگی از طریق اندازه‌گیری پارامترهای درگیر در برخورد قطره در حوزه وسیعی از اعداد رینولدز و وبر پرداخته می‌شود ( $1000 < Re < 16000$  ,  $We < 2600$ ). قطر قطره، سرعت برخورد، لزجت، چگالی، کشش سطحی و ضخامت فیلم ( $\delta$ ) در محدوده زیر تغییر می‌کنند:

$$1.7 \leq d_0 \leq 3.8 \text{ mm}, \quad 3.5 \leq V_0 \leq 5 \text{ m.s}^{-1}, \quad 0.99 \leq \mu \leq 1.2 \text{ mPa.s}, \quad 788.5 \leq \rho \leq 997.4 \text{ kgm}^{-3},$$

$$\delta=2.5\text{mm (سطح ضخیم)}, \quad 0.060 \leq \delta \leq 40\mu\text{m (فیلم نازک)}, \quad 22.3 \leq \gamma \leq 72.7 \text{ mNm}^{-1}$$

#### ۴-۱- اثرات اینرسی، نرمی و ضخامت فیلم

عکس‌های برخورد قطره آب با سرعت  $4.3 \text{ m/s}$  بر روی سطح PDMS 1:30 با ضخامت  $2.5 \text{ mm}$  در شکل (۳) نشان داده شده است. لحظه  $t=0 \text{ ms}$  تصویر قطره قبل از برخورد به سطح را نشان می‌دهد. در ادامه و در لحظه  $t=0.33 \text{ ms}$  به علت اینرسی، ترشوندگی یا پخش قطره<sup>۱</sup> را خواهیم داشت. در زمان  $t=2.66 \text{ ms}$  قطره به ماکزیمم قطر خودش می‌رسد که لبه<sup>۲</sup> آن در مرزها مشهود است. در زمان‌های  $2.66 < t < 26 \text{ ms}$  مرحله ناخیزش یا عقب کشیدن<sup>۳</sup> قطره را خواهیم داشت.

در زمان  $t=21.33 \text{ ms}$  قطره یک پس‌زدگی جزئی<sup>۴</sup> را نیز تجربه می‌کند. در لحظه  $t=26.33 \text{ ms}$  قطره به علت اینرسی، نوسانهایی را خواهد داشت و همچنان خط تماس<sup>۵</sup> حرکت می‌کند. سرانجام در زمان  $t=40.60 \text{ ms}$  خط تماس متوقف می‌شود ولی همچنان نوسان وجود دارد. تغییرات قطر تماس قطره طی برخورد بر روی سطح به ضخامت فیلم  $\delta \approx 10 \mu\text{m}$  و سرعت برخورد  $V_0=3.5 \text{ m/s}$  در غلظت‌های مختلف محلول اتانول / آب (برای غلظت‌های اتانول ۰ تا ۶۰٪ در محدوده عدد رینولدز ۹۶۵۴ تا ۵۵۰۳ عدد اونزورگ ۰/۰۰۲۲ تا ۰/۰۰۵۲ و عدد وبر ۴۶۱ تا ۸۴۷) در شکل (۴) ارائه شده است.

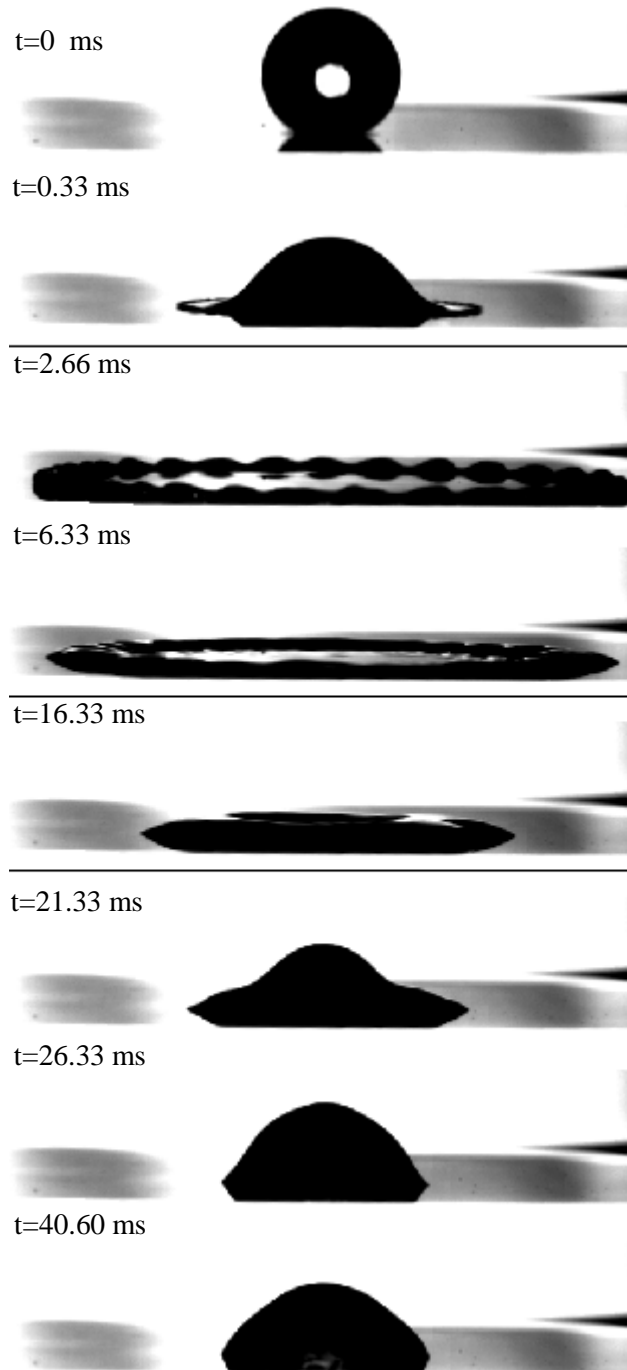
<sup>1</sup> Spreading

<sup>2</sup> Rim

<sup>3</sup> Receding

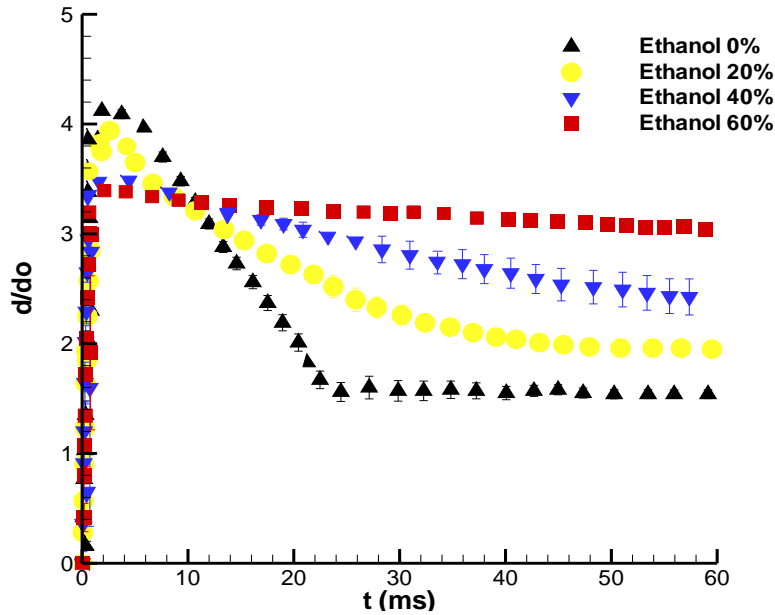
<sup>4</sup> Partial rebound

<sup>5</sup> Contact line



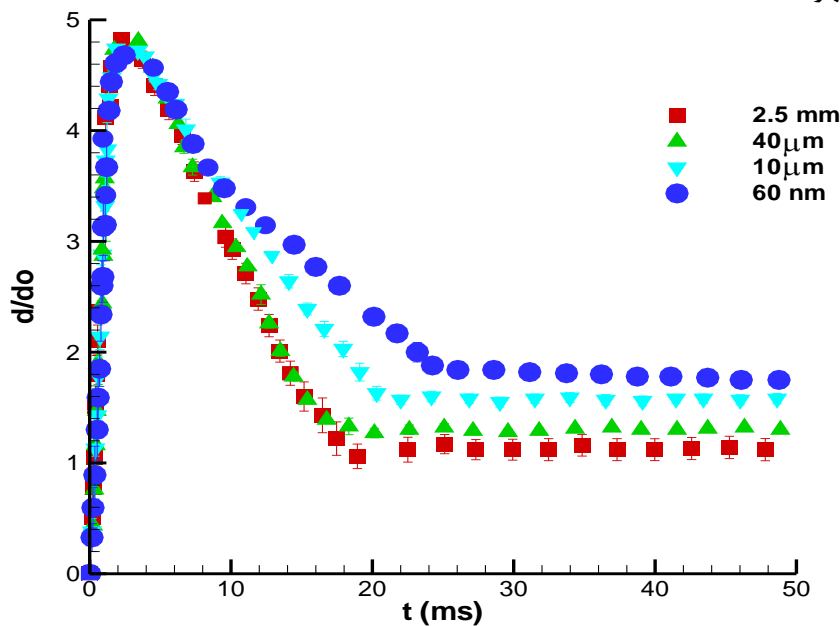
شکل ۳- مراحل مختلف برخورد قطره بر روی سطح PDMS 1:30





شکل ۴- ارزیابی برخورد قطره بر روی سطح PDMS 1:40 با ضخامت فیلم  $\delta \approx 10 \mu\text{m}$  و  $V_0 = 3.5 \text{ m/s}$  در غلظت های مختلف محلول اتانول / آب

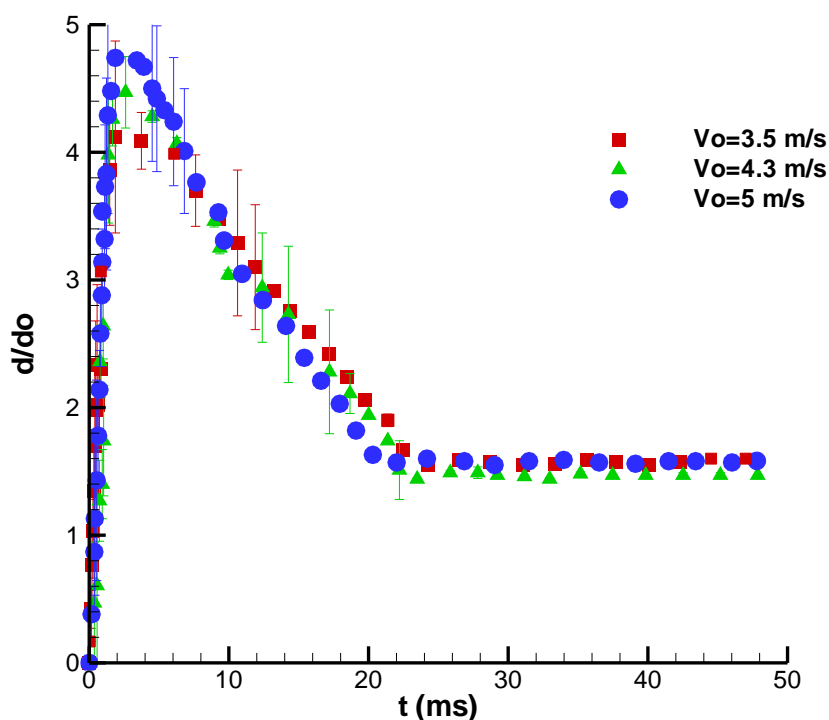
مشاهده فاز ترشوندگی برای هریک از مایعات در نظر گرفته شده نشان می دهد که اینرسی در این مرحله غالب است. کاهش کشش سطحی مایع (از  $72.5$  به  $26 \text{ mNm}^{-1}$ ) از طریق افزایش غلظت اتانول، فاز ترشوندگی را آنچنان تحت تأثیر قرار نمی دهد این در حالیست که قابلیت ناخسش قطره بطور قابل توجهی محدود می شود ( $> 50\%$ ). خطاهای نشان داده شده انحراف معیار استاندارد است که در برخی موارد که ردیابی قطر قطره توسط الگوریتم با مشکل مواجه می شود بزرگ نشان داده شده و مواردی هم به علت کوچک بودن مشهود نیست.



شکل ۵- ارزیابی قطر ترشوندگی آب بر روی سطح PDMS 1:40 در ضخامت های مختلف فیلم و سرعت برخورد  $V_0 = 5 \text{ m/s}$

به منظور بررسی بیشتر اثر ضخامت فیلم بر روی دینامیک برخورد، نسبت قطر ترشوندگی قطره آب بر روی سطح PDMS 1:40 در ضخامت‌های مختلف فیلم در شکل (۵) آمده است ( $We=1100$ ,  $Re=10200$ ). یک نگاه کلی به مراحل اولیه ترشوندگی ( $t < 5$  ms) این حقیقت را آشکار می‌کند که اثرات اینرسی در این مرحله غالب است. در ابتدا وقتی ضخامت از  $2/5$  mm به  $40 \mu\text{m}$  کاهش می‌یابد، تفاوت کمی در فاز آرامش<sup>۱</sup> مشاهده می‌شود. ولی اگر ضخامت بیشتر کاهش یابد یعنی تا  $40 \mu\text{m}$  و  $60 \text{nm}$ ، فیلم شبیه پایه نگهدارنده یعنی شیشه رفتار می‌کند. بنابراین قابلیت ناخیزش بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر در ترشوندگی بر روی سطوح با فیلم نازک‌تر، اثرات انرژی سطحی نسبت به اینرسی مهم‌تر شده و بنابراین اثرات محدود کنندگی قوی‌تری ایجاد می‌شود.

هنگامی که قطره مایع با انرژی جنبشی بالا به سطح برخورد می‌کند، سطح تغییر شکل داده و بطور قابل توجهی کشیده می‌شود. برای سطوح آبدوست (نظیر شیشه)، این تماس از حیث ترمودینامیکی برای سطح مشترک مایع / جامد مطلوب است. از این رو است که قابلیت ناخیزش قطره بر روی چنین سطوحی کاهش می‌یابد که این نتیجه با تحقیقات دیگر محققان نیز مطابقت دارد [۴]. البته در این تحقیق از ضخامت فیلم کمتر از  $10$  میکرون به پایین‌تر قابلیت ناخیزش قطره کمتر می‌شود.



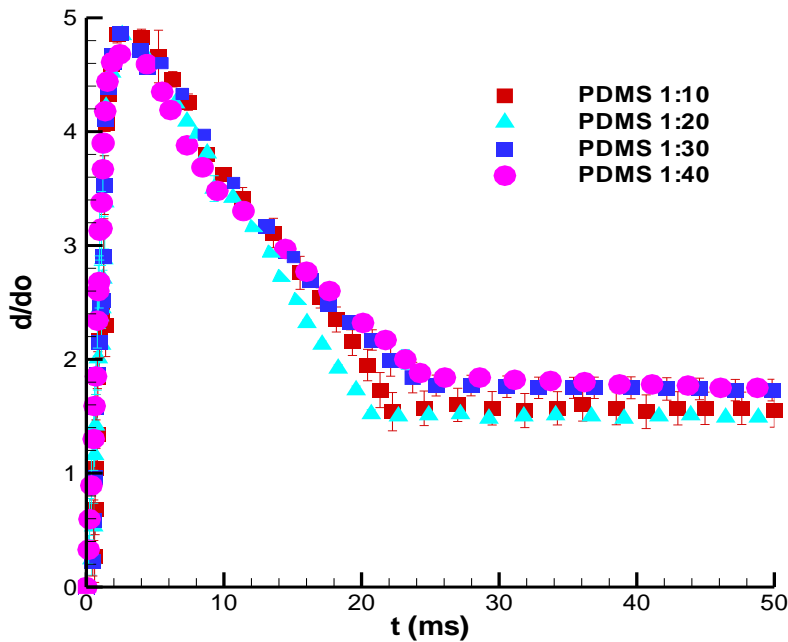
شکل ۶- نسبت قطر ترشوندگی آب بر روی سطح PDMS 1:40 با ضخامت فیلم  $\approx 10 \mu\text{m}$  در سرعت‌های برخورد متفاوت

<sup>1</sup> Relaxation

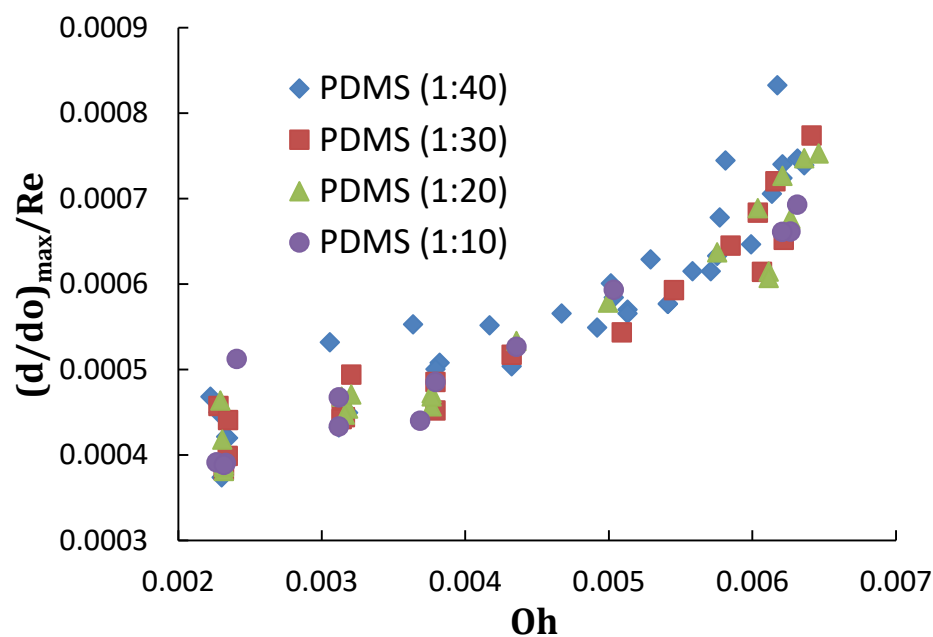
همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود وقتی سرعت برخورد افزایش می‌یابد (با افزایش عدد رینولدز از ۹۳۳۲ به ۱۲۸۷۲ و افزایش عدد وبر از ۴۴۶ تا ۸۷۸)، ماکزیمم ضریب ترشوندگی افزایش یافته و به علت اینرسی باقیمانده از فاز اولیه ترشوندگی، زمان ناخسش قطره کاهش می‌یابد (۲۰٪ برای رینولدزهای ۹۳۳۲ و ۱۲۸۷۲) اما سطح تماس نهایی زیاد تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. انحراف معیار زیاد در بعضی از موارد به علت خطا در محاسبه قطر ترشوندگی به وسیله کد MATLAB است. شکل (۷) ارزیابی زمانی قطر ترشوندگی  $\xi(t) = d(t)/d_0$  برای یک قطره طی برخورد بر روی سطح با نرمی‌های مختلف را نشان می‌دهد. در مراحل اولیه ترشوندگی، ضریب قطر ترشوندگی برای همه سطوح تقریباً یکسان است. با گذشت زمان وقتی که الگوی ترشوندگی تغییر می‌کند تفاوت در فاز ناخسش مایع آشکارتر می‌شود. بدین ترتیب که با افزایش نرمی سطح، قابلیت ناخسش مایع نیز ضعیفتر می‌شود. این موضوع را می‌توان اینطور توضیح داد که ترشوندگی بر روی سطوح نرم‌تر به علت تغییر شکل سطح انرژی بیشتری مصرف می‌کند و در نتیجه قابلیت ناخسش قطره را تعدیل می‌کند. البته این موضوع برای ضخامت‌های بالاتر فیلم شدیدتر است.

#### ۴-۲- ماکزیمم ضریب ترشوندگی

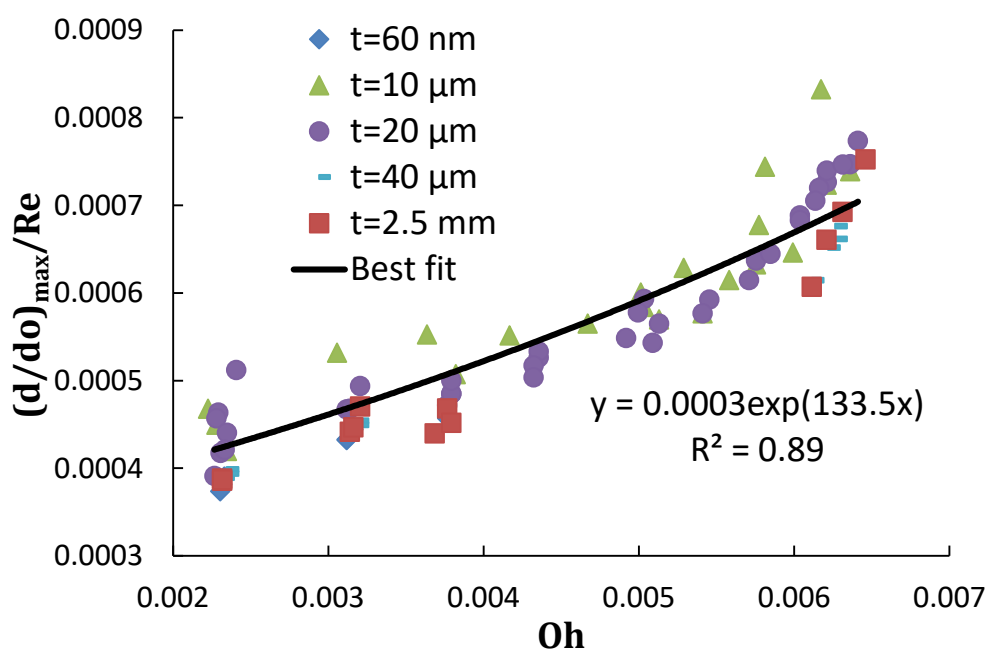
ماکزیمم ضریب ترشوندگی  $(d/d_0)_{max}$  معمولاً با استفاده از ملاحظات بالانس انرژی بصورت تابعی از اعداد رینولدز، وبر و زاویه تماس یا مدل‌های تجربی براساس صرفاً عدد رینولدز و وبر بدست می‌آیند [۱۴]. ولی در این تحقیق مشاهده می‌شود که بین مقادیر ماکزیمم ضریب ترشوندگی بدست آمده از مقادیر تجربی و اعداد رینولدز و انزورگ رابطه‌ای وجود دارد. تابع  $(d/d_0)_{max} / Re$  نسبت به  $Oh$  از حیث نوع سطح از جهت نرمی و ضخامت فیلم به ترتیب در شکل (۸) الف و ب نشان داده شده است.



شکل ۷- نسبت قطر ترشوندگی آب بر روی سطح با ضخامت فیلم 60 nm و سرعت  $V_0=5$  m/s بر روی سطح با نرمی‌های مختلف ( $Oh=0.0023$  و  $We=878$ ,  $Re=12872$ )



(الف)



(ب)

شکل ۸- ماکزیمم ضریب ترشوندگی بعد از برخورد قطره بر روی سطح. سطوح از حیث (الف) نرمی مختلف و (ب) ضخامت فیلم مختلف متمایز شده اند

همانطور که ملاحظه می شود، ماکزیمم ضریب ترشوندگی کمی تحت تأثیر نرمی و ضخامت فیلم قرار می گیرد بطوریکه مقدار ضریب ترشوندگی ماکزیمم  $(d/do)_{max}$  را می توان بصورت تابعی از عدد انزورگ (Oh) و عدد رینولدز (Re) نوشت؛

**جدول ۴-** نیروی ناشی از برخورد قطره آب بر روی سطح PDMS 1:30 از مقادیر تجربی ( $F_1$ ) در مقایسه

با دو مدل توسعه داده شده ( $F_2$  و  $F_1$ ) با  $m=8.15 \times 10^{-6}$  kg و  $\rho=997.4$  kg/m<sup>3</sup>,  $d_0=2.5$  mm

$V_0$ [m/s]	$F_1 = \frac{mV_0}{t}$ [mN]	$F_2 = \frac{mV_0^2}{d_0}$ [mN]	$F_3 = \frac{1}{4}\rho\pi d_0^2 V_0^2$ [mN]
2.5	37.8	20.4	30.6
3.5	52.9	40	59.9
4.3	64.9	60.3	90.5
5	75.5	81.6	122.3

به عنوان مثال تابع زیر :

$$\left(\frac{d}{d_0}\right)_{\max} = 3 \times 10^{-4} \text{Re} \cdot \exp(133.5\text{Oh}), \quad R^2 = 0.89 \quad (5)$$

به خوبی با داده‌های تجربی مطابقت دارد. ضرایب ثابت در سمت راست رابطه (۵) از برازش<sup>۱</sup> داده تجربی بدست آمده‌اند.

#### ۴-۳- نیروی ناشی از برخورد قطره

نیروی ناشی از برخورد قطره بر روی سطح با استفاده رابطه (۲) از مقادیر تجربی بدست آمده و با مقادیر حاصل از دو رابطه (۳) و (۴) در جدول (۴) مقایسه می‌شوند.  $t$  در رابطه (۲) مدت زمان ماکزیمم تغییر شکل سطح از مقادیر تجربی است که در این تحقیق برای سرعت‌های برخورد مختلف تقریباً ثابت و برابر  $t=0.54$  ms است [۸]. مقایسه روی قطره آب بر روی سطح PDMS 1:30 صورت گرفته است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقادیر بدست آمده از رابطه  $F_1$  که در آن  $t$  از آزمایش بدست آمده با مقادیر دو رابطه توسعه داده شده  $F_2$  و  $F_3$  دارای اختلاف است. این موضوع می‌تواند ناشی از ساده‌سازیها و فرضیات اعمالی باشد. بجز در سرعت 2.5 و 5 m/s در بقیه موارد رابطه  $F_2$  و  $F_3$ ، مقدار نیرو را به ترتیب کمتر و بیشتر از مقدار رابطه  $F_1$  نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد روابط ارائه شده بصورت تقریبی می‌تواند نیروی ممنتام اعمالی را پیش‌بینی کند.

#### ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر نرمی و ضخامت فیلم در دینامیک برخورد قطره با خواص فیزیکی مختلف مایع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که اثر نرمی سطح که در برخورد قطره خودش را بصورت تغییر شکل سطح نشان می‌دهد، در مرحله انبساط قطره (ترشوندگی) به علت اینرسی بالا ناچیز است ولی اتلاف انرژی ناشی از تغییر شکل مرحله انقباض قطره (ناخیسش) را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد.

<sup>1</sup> Fitting

هنگام ترشوندگی قطره بر روی سطوح با فیلم نازکتر ( $\approx 60 \text{ nm}$ )، انرژی سطحی نسبت به اینرسی مهم‌تر شده و بنابراین اثرات محدود کنندگی قوی‌تری را در مرحله انقباض قطره از خود بروز می‌دهد. ضریب ماکزیمم ترشوندگی قطره کمتر تحت تأثیر نرمی سطح قرار گرفته ولی برای مایعات با کشش سطحی بالاتر و سرعت برخورد بالاتر مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد. همچنین روابطی تقریبی برای نیروی ناشی از برخورد قطره بر روی سطح ارائه و با مقادیر تجربی مقایسه شد.

## مراجع

- [1] Rioboo, R., Voue, M., Adao, H., Ephine Conti, J., Vaillant, A., Seveno, D., and De Coninck, J., "Drop Impact on Soft Surfaces: Beyond the Static Contact Angles", *Langmuir*, Vol. 26, No. 7, pp. 4873-4879, (2010).
- [2] Shanahan, M.E. R., and Carre, M., "Anomalous Spreading of Liquid Drops on an Elastomeric Surface", *Langmuir*, Vol. 10, pp. 1647-1649, (1994).
- [3] Shanahan, M.E. R., and Carre, M., "Viscoelastic Dissipation in Wetting and Adhesion Phenomena", *Langmuir*, Vol. 11, pp. 1396-1402, (1995).
- [4] Voue, M., Rioboo, R., Bauthier, C., Conti, J., Charlot, M., and De Coninck, J., "Dissipation and Moving Contact Lines on Non-rigid Substrates", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 23, pp. 2769-2775, (2003).
- [5] Chen, L., Auernhammer, G. K., and Bonaccorso, E., "Short Time Wetting Dynamics on Soft Surfaces", *Soft Matter*, Vol. 7, pp. 9084-9089, (2011).
- [6] Karpitschka, S., Das, S., Gorcum, M., Van Perrin, H., Andreotti, B., and Snoeijer, J.H., "Droplets Move Over Viscoelastic Substrates by Surfing a Ridge", *Nature Communications*, 6:7891, ncomms 8891, (2015).
- [7] Izbassarov, D., and Muradoglu, M., "Effect of Viscoelasticity on Drop Impact and Spreading on a Solid Surface", *Physical Review Fluids*, Vol. 10, No. 023302, pp. 1-18, (2016).
- [8] Mangili, S., Antonini, C., Marengo, M., and Amirfazli, A., "Understanding the Drop Impact Phenomenon on Soft PDMS Substrates", *Soft Matter*, Vol. 8, pp. 10045-10054, (2012).
- [9] Chen, L., Bonaccorso, E., Deng, P., and Zhang, H., "Droplet Impact on Soft Viscoelastic Surfaces", *Physical Review E*, Vol. 94, 063117, (2016).
- [10] Harris, A.K., Wild, P., and Stopak, D., "Silicon Rubber Substrate: A New Wrinkle in the Study of Cell Locomotion", *Science*, Vol. 208, pp. 177-179, (1980).
- [11] Vhquez, G., Alvarez, E., and Navaza, J. M., "Surface Tension of Alcohol / Water from 20 to 50°C", *Journal of Chemical and Engineering Data*, Vol. 40, pp. 611-614, (1995).

- [12] Thangawng, A. L., Ruoff, R. S., Swartz, M. A., and Glucksberg, M. R., "An Ultra-thin PDMS Membrane as a Bio/micro-nano Interface: Fabrication and Characterization", *Biomed Microdevices*, Vol. 9, pp. 587–595, (2007).
- [13] Ryoo, J. H., Jeong, G.S., Kang, E., and Lee, S.H., "Ultrathin, Hyperelastic PDMS Nano Membrane: Fabrication and Characterization", 15<sup>th</sup> International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences, Seattle, Washington, USA, (2011).
- [14] Pasandideh-Fard, M., Qiao, Y.M., Chandra, S., and Mostaghimi, J., "Capillary Effects during Droplet Impact on a Solid Surface", *Physics of Fluids*, Vol. 8, pp. 650-659, (1996).

### فهرست نمادهای انگلیسی

d	قطر قطره بر حسب متر
F	نیروی برخورد بر حسب نیوتن
G	مدول برشی بر حسب پاسکال
m	جرم قطره بر حسب کیلوگرم
Oh	عدد اونزورگ
Re	عدد رینولدز
t	مدت زمان بیشترین تغییر شکل سطح جامد بر حسب ثانیه
$V_0$	سرعت اولیه قطره بر حسب متر بر ثانیه
We	عدد وبر
$\delta$	ضخامت فیلم بر حسب متر
$\gamma$	ضریب کشش سطحی بر حسب نیوتن بر متر
$\mu$	ضریب لزجت بر حسب نیوتن در ثانیه
$\rho$	چگالی مایع بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب

**Abstract**

Understanding the capillary effects of liquid droplet interaction with the surface in many industrial processes such as inkjet printers, painting, spraying pesticides, etc. is of critical importance. This study examines the impact of a drop on viscoelastic substrates with various film thicknesses. Droplet dynamic measurements during the impact in the range of Reynolds numbers between 1000 and 16000 and the Weber number to 2600, including those examined in this study. Experimental results show that the effect of substrate softness and thickness is negligible in wetting phase while this effect is significant in dewetting phase.