



بررسی تجربی تاثیر سطح تماس و خط تماس سه-فاز بر پیش بینی مدل های ترشوندگی بر ورق آکرلیک ماشینکاری شده با لیزر CO₂

فرشاد اسمعیلیان^۱، رضا ریاحی فر^۱، مازیار صهبا یغمایی^۱، بابک ریسی^۱

^۱. پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده سرامیک، آزمایشگاه ترشوندگی و سیالات (دانشجوی کارشناسی ارشد، استادیار، استادیار، دانشیار)

چکیده

در ۱۸۰۵ میلادی، یانگ با ارائه‌ی توصیفی از وضعیت یک قطره، به جدلی ۱۸۰۰ ساله پایان داد. با این حال سطحی که منجر به استخراج ترمودینامیکی معادله‌ی یانگ می‌شود، ایده‌آل است. چنین سطحی که ناهمگنی شیمیایی-فیزیکی نداشته باشد و با قطره واکنش ندهد در آزمایش‌های تجربی وجود ندارد. وزنل، و کسی و بکستر برای رفع این مشکل معادلاتی ارائه نمودند تا وضعیت قطره بر روی سطوح ناهموار را پیش بینی کنند. اما تحقیقات اکسترند، و گائو و مک کارتی به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۷ میلادی بحثی دیگر را در مبحث ترشوندگی ایجاد نموده است. پژوهش حاضر با استفاده از فرآیند لیزر کاری CO₂ بر سطح ورق آکرلیکی به بررسی نظر موافقین و مخالفین معادلات وزنل و کسی-بکستر پرداخته است. این تحقیق نشان می‌دهد معادله‌ی وزنل خطای زیادی برای سطوح غیریکنواخت داشته، و با وجود بهبود عملکرد در مورد سطوح یکنواخت، روند تغییرات زاویه تماس را نمی‌تواند، پیش‌بینی کند. بنابراین، حداقل امکان می‌بایست از معادله‌ی وزنل اجتناب کرد. همچنین تحقیق حاضر نشان می‌دهد که بهتر است معادله‌ی کسی-بکستر نیز برای سطوحی که از نظر ناهمواری همگن هستند، استفاده شود. با این حال همچنان معادله‌ی کسی-بکستر اختلافی تا ۱۰ درجه با آزمایش‌های تجربی دارد.

واژه‌های کلیدی: ترشوندگی، وزنل، کسی-بکستر، سطح تماس قطره، خط تماس سه-فازی.

^۱. Farshad.Esmailian@Gmail.com

مقدمه

ر. ج. گود^۱ خاستگاه اصلی پدیده‌ی ترشوندگی را به زمان ارسطو باز می‌گرداند [۱]. وی معتقد بود که اگر تکه‌ای از طلا یا چوب ماهون^۲ بر سطح آب قرار بگیرد، شناور می‌ماند. یک قرن بعد از وی ارشمیدس به مفهوم وزن مخصوص^۳ پرداخت و بنیان هیدرواستاتیک^۴ را بنا نهاد. بر این مبنای وزن مخصوص طلا و چوب ماهون از آب بیشتر است، وضعیت شناور ماندن این دو بر سطح آب منتفی است! اختلاف نگرش ارسطو و ارشمیدس تا ۱۸۰۰ سال ادامه داشت و درگیری فلاسفه و دانشمندان را موجب شده بود. گالیلهو گالیله^۵ در سال ۱۶۱۲ میلادی به گزارش مشاهده‌ای ساده پرداخت [۲]. وی شناور ماندن یک ورقه‌ی نازک از جامدی را بر روی آب رویت کرد که حتی چگالی آن بیشتر از آب بود. با این حال چون مفهوم کشش سطحی تعریف نشده بود، گالیله به سراغ اندازه‌گیری زاویه تماس نرفت. سرانجام توماس یانگ^۶ در سال ۱۸۰۵ میلادی، در یک توصیف کیفی معادله‌ای را بیان کرد که به اختلاف نظری ۲۰۰۰ ساله پایان داد [۳]. این معادله که به نام خود وی شناخته می‌شود، وضعیت ترمودینامیکی قطره‌ای (L) را بر سطحی جامد (S) مشخص می‌کند که توسط سیال (بخار V) احاطه شده است:

$$\cos \theta_Y = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)، γ انرژی سطحی فصل مشترک دو فاز است. به منظور آنکه بتوان رابطه‌ی یانگ را به صورت ترمودینامیکی استخراج نمود، می‌بایست نخست پیش فرض‌هایی را در نظر آورد. تمامی این پیش فرض‌ها به برهم کنش میان مایع و جامد زیرلایه باز می‌گردد و نخستین آن عدم وقوع واکنش میان این دو است که تحت عنوان ترشوندگی غیرواکنشی^۷ از آن یاد می‌شود [۴]. از دیگر موارد نیز می‌بایست به کاملاً صاف بودن و غیر قابل تغییر شکل بودن سطح جامد (شکل (۱)-الف) اشاره کرد [۵]. با این حال هیچ سطحی در عمل ایده‌آل نیست. سطوح جامد بطور معمول ناهمگن و ناهموار هستند و این دو عامل تاثیر یکدیگر را نیز بیشتر می‌کنند. یکی از نخستین تلاش‌ها برای درک تاثیر ناهمواری سطح بر ترشوندگی توسط ر. ونزل^۸ انجام شده است. در استخراج معادله‌ی ونزل زاویه تماس موضعی سطح همان زاویه تماس یانگ در نظر آورده می‌شود. اما چون سطح تماس قطره با سطح جامد به دلیل ناهمواری‌ها، بیشتر از حالت ایده‌آل یانگ است، زاویه تماس ظاهری^۹ تغییر می‌کند [۶].

$$\cos \theta_{app}^W = r_f \cdot \cos \theta_Y \quad (2)$$

1. R. J. Good.

2. Mahogany.

3. Specific Gravity.

4. Hydrostatic.

5. Galileo Galilei.

6. Thomas Young.

7. Non-Reactive Wetting.

8. R. N. Wenzel.

9. Apparent Contact Angle.

در معادله‌ی فوق، f_i ، نسبت سطح واقعی در تماس با قطره به سطح کاملاً صاف تصویر شده^۱ است (شکل (۱) - ب). تلاش بعدی توسط کسی و بکستر^۲ انجام شد. این محققین سطح را کامپوزیتی از فازهای مختلف در نظر آوردند [۷] که برای اندازه‌گیری زاویه تماس ظاهری آن، می‌بایست میانگینی از کسینوس زاویه تماس یانگ هر فاز ارائه کرد [۸].

$$\cos \theta_{app}^{CB} = \sum_{i=1}^n f_i \cos \theta_{Y,i} \quad (۳)$$

در این رابطه f_i ، کسری از سطح زیر قطره می‌باشد که توسط فاز i ام پوشیده شده است (شکل (۱) - ج). با در نظر آوردن شرایط دو فازی، و توجه به این نکته که زاویه تماس یانگ برای هوا 180° درجه است معادله‌ی (۳) به (۴) تغییر می‌کند.

$$\cos \theta_{app}^{CB} = f_s (\cos \theta_Y + 1) - 1 \quad (۴)$$

به این ترتیب سطح ناهموار برای کسی و بکستر، سطحی کامپوزیتی از هوا و جامدی مشخص می‌باشد. پس از آن‌ها بزرگترین قدم در مسیر پیش‌بینی ترمودینامیکی زاویه تماس بر مبنای معادله‌ی یانگ توسط م. میوا و همکاران^۳ برداشته شده است [۹]. معادله‌ای که میوا و همکاران در سال ۲۰۰۰ ارائه نمودند، توسط آ. مرمور^۴ به صورت ترمودینامیکی به اثبات رسیده است [۱۰]. این رابطه که وضعیتی ترکیبی از حالت ونزل و کسی-بکستر را طرح می‌کند به صورت رابطه‌ی (۵) و شکل (۱) - د قابل نمایش است.

$$\cos \theta_{app}^{RCB} = f_s (r_f \cos \theta_Y + 1) - 1 \quad (۵)$$

اختلاف اساسی رابطه‌ی ونزل و کسی-بکستر که رابطه‌ی (۵) قصد اصلاح آن را دارد در وضعیت قرارگیری قطره بر روی ناهمواری‌ها است. ونزل پیش‌بینی می‌کند که مایع درون ناهمواری‌ها را پر می‌کند تا رژیم ترشوندگی ونزل را پدید آورد. اما کسی-بکستر برای وقوع رژیم کامپوزیتی خود، معتقدند که مایع به درون ناهمواری نفوذ نکرده و قطره تنها بر روی آن‌ها قرار می‌گیرد. رابطه‌ی (۵) که معادله‌ی اصلاح‌شده‌ی کسی-بکستر مشهور است، حالت میانی را در نظر می‌گیرد. این معادله در شرایطی که $f_s = 1$ باشد به معادله‌ی (۴) و در صورتیکه $f_s = 1$ باشد به معادله‌ی (۲) تغییر می‌کند.

در سال ۲۰۰۳ میلادی، و. اکسترند^۵ مقاله‌ای را به منظور رد معادله‌ی کسی-بکستر به چاپ رساند [۱۱]. در این مقاله وی به بررسی زاویه تماس بر روی سطوح نسبتاً صافی پرداخته بود که حاوی ناهمگنی‌های جزیره مانند بودند. نتیجه‌ی بنیادی که از این آزمایش به دست آمد، آن بود که هر چند زیر قطره‌ها حاوی ترکیبی از دو نوع

1. Projected Flat Surface.

2. A. B. D. Cassie and S. Baxter.

3. Masashi Miwa et al.

4. A. Marmur.

5. C. W. Extrand.

سطح متفاوت بود، اما زاویه تماس ابتدا با معادله‌ی کسی-بکستر، قابل توجیه نبود. به این ترتیب اثر خط سه-فاز^۱ و بر هم کنش نواحی مختلف سطح بیشتر از تاثیر سطح زیرین قطره بوده است (شکل (۲)). پیش از این مسئله‌ی تاثیر گذاری خط سه فاز بر زاویه تماس قطره‌هایی که بسیار کوچک هستند به صورت ترمودینامیکی به اثبات رسیده بود [۱۲]. معادله‌ی (۶) رابطه‌ی اصلاح شده‌ی یانگ را برای شرایطی که کشش خطی^۲ بر زاویه تماس موثر است، نمایش می‌دهد که برای قطره‌ای کاملاً کروی نوشته شده است.

$$\cos \theta_Y = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} + \frac{\tau}{\gamma_{LV} \cdot r} \quad (6)$$

در این رابطه، r شعاع فصل مشترک قطره-زیرلایه و τ کشش خطی منتصب به خط سه-فاز است. اما قطراتی که اکسترند از آن‌ها استفاده کرده بود در اندازه‌ی معمول آزمایش‌های ترشوندگی بودند که این نکته اهمیت کار او را نمایش می‌دهد. قدم بعدی در این زمینه توسط ل. گائو و ت. ج. مک‌کارتی^۳ برداشته شد [۱۳]. این دو محقق در سال ۲۰۰۷ مقاله‌ای با عنوان *وزنل و کسی چگونه اشتباه می‌کردند*^۴ چاپ نموده و با کمک آزمایش‌های خود نشان دادند که خط سه-فاز و نه سطح تماس زیرین قطره در تعیین زاویه‌های حداکثر و حداقل بر روی یک سطح موثر هستند. پس از چاپ این مقاله، بحث جدی و جدل علمی دیگری در علم سطح و مبحث ترشوندگی آغاز گردید. در سویی بخشی از محققین بر تاثیر گذاری خط تماس سه-فاز بر زاویه تماس ظاهری قطره تاکید می‌کردند [۱۴-۱۹]. از سویی دیگر نیز برخی دیگر از پژوهشگران بر بنیان ترمودینامیکی استخراج معادلات تاکید داشته و سطح تماس را عامل اصلی تاثیر گذاری بر زاویه تماس می‌دانستند [۱، ۹، ۱۰، ۲۰-۲۳]. این محققین همچنین معتقد بودن که حالات وزنل و کسی-بکستر حالات پایداری ترمودینامیکی هستند، اما وجود حالات نیمه پایدار و نبود انرژی در دسترس کافی برای قطره به منظور غلبه بر سد انرژی میان این حالت‌ها، مانع از وقوع زاویه تماس ظاهری کسی-بکستر یا وزنل می‌شود. م. نوسونوسکی نیز در زمره حامیان معادلات وزنل و کسی-بکستر به این نکته اشاره نموده که معادلات تنها در حالتی قابل استفاده هستند که ناهمواری‌های سطح یکنواخت بوده و در نتیجه ضریب ناهمواری، ϵ_f ، نیز برای تمام سطح ثابت باشد. بر این مبنا استفاده از معادله‌ی وزنل در تحقیقات گائو و مک‌کارتی را رد کرده و نادرست دانسته است [۲۴]. وی همچنین در تحقیق دیگری که به همراه بهوشان انجام داده، صحت رابطه‌ی کسی-بکستر را مورد تایید قرار داده است [۲۵]. البته برخی از انتقادات وارد شده، در سال ۲۰۰۹ توسط گائو و مک‌کارتی مجدداً پاسخ داده شده [۲۶، ۲۷]. امروز مسئله‌ی تاثیر گذاری سطح تماس یا خط تماس بر زاویه تماس ظاهری همچنان به‌طور کامل حل نشده و تا حدودی به سوی نظر شخصی هر محقق گرایش یافته است [۲۸]. در پژوهش حاضر تلاش شده است برخی جنبه‌های مورد نظر محققین هر دو نظریه بررسی شده و پاسخ قابل قبولی به اختلاف وارده داده شود.

1. Triple-Phase Contact Line.

2. Line Tension.

3. L. Gao and T. J. McCarthy.

4. Wenzel and Cassie: How They Were Wrong

مواد و روش تحقیق

در این تحقیق، به منظور بررسی عامل موثر بر زاویه تماس ظاهری، دو مجموعه آزمایش انجام شده است. جهت انجام تمامی آزمایش‌ها از ورق آکرلیکی شرکت چوچن^۱ استفاده گردیده است. زاویه تماس ظاهری اولیه بر روی ورقه‌های کاملاً صاف به مقدار $1,1 \pm 0,2$ درجه به دست آمده که با مقادیر ذکر شده در [۲۹] نیز مطابقت دارد. اندازه‌گیری زاویه تماس در تمامی موارد با کمک نرم‌افزار ارائه شده توسط استالدر و همکاران^۲ صورت گرفته است [۳۰]. نمونه‌های اولیه پس از شستشو با اتانول و با کمک قطره‌ی ۴ میکرولیتری آب‌دیونیزه آزمایش شده‌اند. پس از شستشو نمونه‌ها به دو بخش تقسیم شده و با کمک دستگاه CMA-960 تحت لیزر کاری CO₂ قرار گرفته‌اند. پس از فرآیند لیزر کاری نیز تمامی نمونه‌ها در حمام اتانول و آب مقطر تحت شستشوی التراسونیک قرار گرفته‌اند.

در مجموعه‌ی نخست آزمایش‌ها و بر روی سه نمونه، شیاری با فواصلی که در الگوی اولیه ۰,۲، ۰,۴ و ۰,۶ میلی‌متر بوده، با کمک لیزر کاری ایجاد شده‌اند. نتایج به دست آمده از لیزر کاری در جدول (۱) و شکل (۳) قابل مشاهده است.

در مجموعه‌ی دوم آزمایش‌های انجام شده، پس از انجام آزمایش ترشوندگی اولیه، قطر قطره‌ها اندازه‌گیری شده است. این مقدار برای سطح صاف اولیه‌ی ورق آکرلیکی $R_0 = 1,45 \pm 0,08$ میلی‌متر بوده است. الگوهای لیزر کاری نیز طوری طراحی شده که تمامی الگو در محدوده‌ی دایره‌ای به همین قطر قرار بگیرد. الگوهای طراحی شده شامل به ترتیب ۲، ۳ و ۶ سوراخ بوده‌اند. برای هر سوراخ دو نوع توزیع در نظر گرفته شده است. نخست سوراخ‌ها تا جایی که دقت دستگاه لیزر کاری ممکن می‌نموده به یکدیگر نزدیک شده‌اند تا این سری نمونه‌ها با نام نزدیک به مرکز (CC) نام‌گذاری شوند. در حالتی دیگر سوراخ‌ها تا جایی که به لبه‌ی شعاع اولیه نزدیک نشوند از یکدیگر دور شده‌اند، این نمونه‌ها نیز با نام میانه (M) نام‌گذاری شده‌اند. همچنین عمق سوراخ‌ها نیز با کمک مقطع زدن به دست آمده است. اما به منظور جلوگیری از تاثیر گذاری حرارت ورودی لیزر بر عمق سوراخ، مقطع به فاصله‌ی ۲ میلی‌متر از کنار سوراخ‌ها ایجاد شده و با کمک میکروسکوپ نوری در وضعیت عبوری اندازه‌گیری انجام شده است. طراحی اولیه به نحوی بوده است که I_f برای تمامی این سطوح یکسان باشد. با این حال فرآیند لیزر کاری و ذوب موضعی نواحی لیزر کاری شده موجب اختلاف اندکی شده است. شکل (۴) فرآیند پردازش تصویری که برای به دست آوردن قطر قطره‌ی چکانده شده بر سوراخ‌ها و همچنین به دست آوردن قطر سوراخ (RC)ها به کار رفته است را نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است، آزمایش ترشوندگی بر روی هر نوع سطح برای چند مرتبه تکرار شده، تا قطره کاملاً بر روی سوراخ‌ها قرار بگیرد. زمانی که سه نمونه قابل قبول بوده‌اند، اندازه‌گیری برای نمونه به پایان رسیده است. نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده

1. Cho Chen Industry Co.

2. A. F. Stalder et al.

برای نمونه‌های سوراخ‌دار در جدول (۲) نشان داده شده‌اند. قدرت لیزرکاری برای تمامی این سطوح ۵۰ وات و dpi ۱۰۰۰ بوده است.

نتایج و بحث

در مجموعه‌ی نخست آزمایش‌ها، همانطور که نتایج جدول (۱) نشان می‌دهد، در کل هر یک از سطوح فاکتور ناهمواری و نزل ثابت است. با این حال معادله‌ی و نزل پیش‌بینی مناسبی ارائه نداده است. این درحالی است که رابطه‌ی کسی-بکستر مقادیر قابل قبول‌تری را پیش‌بینی نموده است. به منظور استفاده از معادله‌ی اصلاح شده نیز نیاز به دانستن میزان نفوذ مایع به درون ناهمواری‌ها می‌باشد که این مسئله قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد.

برای مجموعه‌ی دوم نمونه‌ها، نتایج به دست آمده از آزمایش ترشوندگی در شکل (۵) نمایش داده شده‌اند. این نتایج به وضوح نشان می‌دهند که زاویه تماس پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها ابتدا از معادلات (۲) و (۴) پیروی نمی‌کنند.

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر به منظور بررسی تاثیرگذاری خط تماس سه-فازی و سطح تماس زیرین قطره انجام شده است (شکل (۲)). در این تحقیق دو مجموعه‌ی آزمایش انجام شده تا تاثیر پارامتر یکنواختی سطوح بر صحت معادلات و نزل و کسی-بکستر مورد بررسی قرار گیرد. نتایج به دست آمده از مجموعه‌ی آزمایش‌های انجام شده را می‌توان به موارد زیر تقسیم‌بندی نمود:

(۱) معادله‌ی و نزل برای سطوح یکنواخت شیاردار و برای سطوح غیریکنواخت سوراخ‌دار ابتدا نتوانسته داده‌های تجربی را پیش‌بینی نماید. بنابراین می‌توان نظر محققین منتقد رابطه‌ی و نزل را پذیرفت. در همین راستا، استفاده از معادله‌ی و نزل در بررسی تجربی سطوح ابتدا توصیه نمی‌شود.

(۲) معادله‌ی کسی-بکستر برای سطوح یکنواخت شیاردار نتایج قابل قبولی را پیش‌بینی کرده است. اما همین معادله برای نمونه‌های سوراخ‌دار و غیریکنواخت ابتدا با نتایج تجربی هم‌خوانی ندارد. همانطور که در بخش مقدمه نیز بیان گردید، م. نوسونوسکی به اهمیت یکنواخت بودن سطح اشاره داشته است. بنابراین به نظر می‌رسد در صورتی که سطح یکنواخت باشد و شرط اساسی معادله‌ی کسی-بکستر که نفوذ نکردن مایع به درون ناهمواری‌ها است، برقرار باشد، می‌توان توقع داشت نتایج تجربی با مدل کسی-بکستر مطابقت مناسبی داشته باشند.

(۳) برای سطوح غیریکنواخت نظیر نمونه‌های سوراخ‌دار، عامل اصلی تعیین‌کننده‌ی زاویه تماس، خط تماس سه-فاز بوده و سطح تماس بر زاویه تماس نقش ندارد. چراکه خط تماس بر روی سطحی مشابه سطح اولیه‌ی نمونه‌ها واقع شده و زوایای اندازه‌گیری شده نیز به مقدار اولیه‌ی سطح صاف نزدیک هستند. این نکته در تایید نظر منتقدین روابط کسی-بکستر و نزل می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نگارندگان این مقاله، از شرکت لیزر پرسناژ، به ویژه کارشناس این شرکت خانم کمالی و تکنسین‌ها آقایان وکیلان و روشنی و خانم قدیری به دلیل همکاری در آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش‌های اولیه که با آزمون و خطا همراه بوده تا بتوان شرایط بهینه‌ی لیزرکاری را به دست آورد، کمال تشکر را دارند.

مراجع

- [۱] R. J. Good, "Contact angle, wetting, and adhesion: a critical review", *Journal of Adhesion Science and Technology*, 12, 6, 1992, 1269-1302.
- [۲] G. Galilei, Bodies that Stay Atop Water, or Move in It.(1612);(b) S. Drake, Cause, Experiment and Science: A Galilean Dialogue Incorporating a New Translation of Galileo's Bodies that Stay Atop Water, 1981, University of Chicago Press, Chicago.
- [۳] T. Young, "An essay on the cohesion of fluids", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1805, 65-87.
- [۴] G. H. Meier, Thermodynamics of Surfaces and Interfaces: Concepts in Inorganic Materials, 2014, Cambridge University Press.
- [۵] A. I. Rusanov, "Thermodynamics of solid surfaces", *Surface Science Reports*, 6, 23, 1996, 173-247.
- [۶] R. N. Wenzel, "Resistance of solid surfaces to wetting by water", *Industrial & Engineering Chemistry*, 8, 28, 1936, 988-994.
- [۷] A. Cassie and S. Baxter, "Wettability of porous surfaces", *Transactions of the Faraday Society*, 40, 1944, 546-551.
- [۸] E. Bormashenko, "Progress in understanding wetting transitions on rough surfaces", *Advances in Colloid and Interface Science*, 222, 2015, 92-103.
- [۹] M. Miwa, A. Nakajima, A. Fujishima, K. Hashimoto and T. Watanabe, "Effects of the Surface Roughness on Sliding Angles of Water Droplets on Superhydrophobic Surfaces", *Langmuir*, 13, 16, 2000, 5754-5760.
- [۱۰] A. Marmur, "Wetting on hydrophobic rough surfaces: to be heterogeneous or not to be?", *Langmuir*, 20, 19, 2003, 8343-8348.
- [۱۱] C. Extrand, "Contact angles and hysteresis on surfaces with chemically heterogeneous islands", *Langmuir*, 9, 19, 2003, 3793-3796.
- [۱۲] A. W. Adamson and A. P. Gast, Physical chemistry of surfaces, 1997, John Wiley & Sons.
- [۱۳] L. Gao and T. J. McCarthy, "How Wenzel and Cassie Were Wrong", *Langmuir*, 7, 23, 2007, 3762-3765.
- [۱۴] C. W. Extrand, S. I. Moon, P. Hall and D. Schmidt, "Superwetting of Structured Surfaces", *Langmuir*, 17, 23, 2007, 8882-8890.
- [۱۵] C. Dorrer and J. Rühle, "Drops on Microstructured Surfaces Coated with Hydrophilic Polymers: Wenzel's Model and Beyond", *Langmuir*. ۱۹۶۴-۱۹۵۹, ۲۰۰۸, ۲۴, ۵,
- [۱۶] D. M. Spori, T. Drobek, S. Zürcher, M. Ochsner, C. Sprecher, A. Mühlebach and N. D. Spencer, "Beyond the Lotus Effect: Roughness Influences on Wetting over a Wide Surface-Energy Range", *Langmuir*, 10, 24, 2008, 5411-5417.
- [۱۷] N. Kashaninejad, W. K. Chan and N.-T. Nguyen, "Eccentricity Effect of Micropatterned Surface on Contact Angle", *Langmuir*, 10, 28, 2012, 4793-4799.

- [۱۸] E. Bormashenko and Y. Bormashenko, "Wetting of Composite Surfaces: When and Why Is the Area Far from The Triple Line Important?", *The Journal of Physical Chemistry C*, 38, 117, 2013, 19552-19557.
- [۱۹] E. Bormashenko, A. Musin, G. Whyman, Z. Barkay and M. Zinigrad, "Revisiting the Fine Structure of the Triple Line", *Langmuir*, 46, 29, 2013, 14163-14167.
- [۲۰] A. B. D. Cassie, "Contact angles", *Discussions of the Faraday Society*, 0, 3, 1948, 11-16.
- [۲۱] J. Rulon E and D. Robert H, Contact Angle Hysteresis, 1964, AMERICAN CHEMICAL SOCIETY.
- [۲۲] A. Marmur, "Soft contact: measurement and interpretation of contact angles", *Soft Matter*, 1, 2, 2006, 12-17.
- [۲۳] G. McHale, "Cassie and Wenzel: Were They Really So Wrong?", *Langmuir*, 15, 23, 2007, 8200-8205.
- [۲۴] M. Nosonovsky, "On the Range of Applicability of the Wenzel and Cassie Equations", *Langmuir*, 19, 23, 2007, 9919-9920.
- [۲۵] B. Bhushan, M. Nosonovsky and Y. C. Jung, "Towards optimization of patterned superhydrophobic surfaces", *Journal of The Royal Society Interface*, 15, 4, 2007, 643-648.
- [۲۶] L. Gao and T. J. McCarthy, "An Attempt to Correct the Faulty Intuition Perpetuated by the Wenzel and Cassie "Laws"", *Langmuir*, 13, 25, 2009, 7249-7255.
- [۲۷] L. Gao and T. J. McCarthy, "Wetting 101°", *Langmuir*, 24, 25, 2009, 14105-14115.
- [۲۸] H. Y. Erbil, "The debate on the dependence of apparent contact angles on drop contact area or three-phase contact line: a review", *Surface Science Reports*, 4, 69, 2014, 325-365.
- [۲۹] D. Li, Encyclopedia of microfluidics and nanofluidics, 2008, Springer Science & Business Media.
- [۳۰] A. Stalder, G. Kulik, D. Sage, L. Barbieri and P. Hoffmann, "A snake-based approach to accurate determination of both contact points and contact angles", *Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects*, 1, 286, 2006, 92-103.

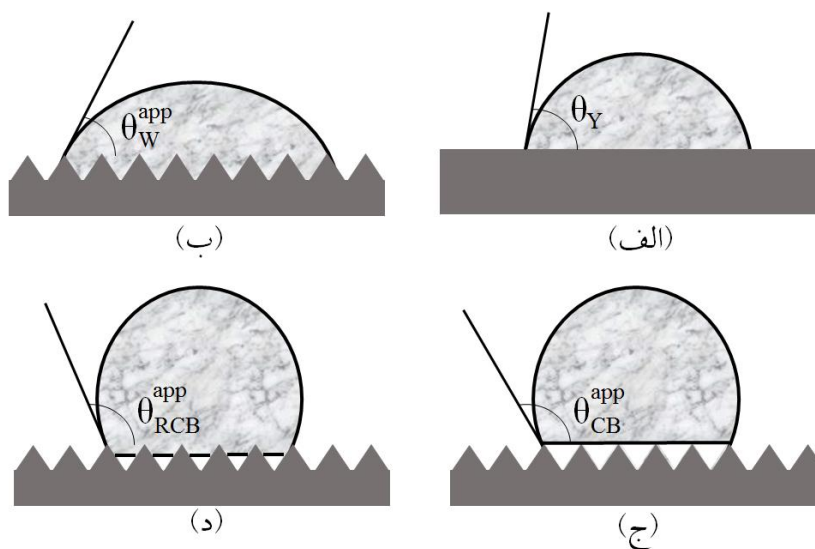
جدول (۱): نتایج به دست آمده برای نمونه‌های مجموعه‌ی اول (شیاردار) لیزرکاری شده. اندازه‌گیری‌ها با کمک میکروسکوپ نوری انجام شده‌اند.

زاویه تماس اندازه‌گیری شده (درجه)	زاویه تماس ظاهری کسی-بکستر (درجه)	fs	زاویه تماس ظاهری و نزل (درجه)	r _f	شعاع شیارها (mm)
۱۳۶ +/- ۶	۱۴۶,۱	۰,۱۳	۲۳,۵	۳,۰	۰,۳۴ +/- ۰,۰۲
۱۳۱ +/- ۴	۱۲۲,۹	۰,۳۵	۵۴,۵	۱,۹	۰,۵۱ +/- ۰,۰۲
۱۲۷ +/- ۴	۱۲۲,۰	۰,۳۶	۵۸,۷	۱,۷	۰,۷۴ +/- ۰,۰۱

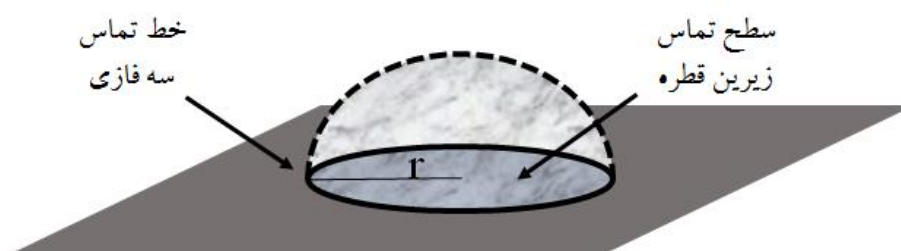
جدول (۲): مشخصات استخراج شده از الگوهای لیزرکاری شده برای نمونه‌های مجموعه‌ی دوم (سوراخ‌دار). این جدول حاوی فاکتورهای و نزل و کسی-بکستر نیز می‌باشد. تمامی مشخصات با کمک پردازش تصویر استخراج شده‌اند.

fs	r _f	H _c	R _c	R _D	موقعیت سوراخ	تعداد سوراخ
----	----------------	----------------	----------------	----------------	-----------------	----------------

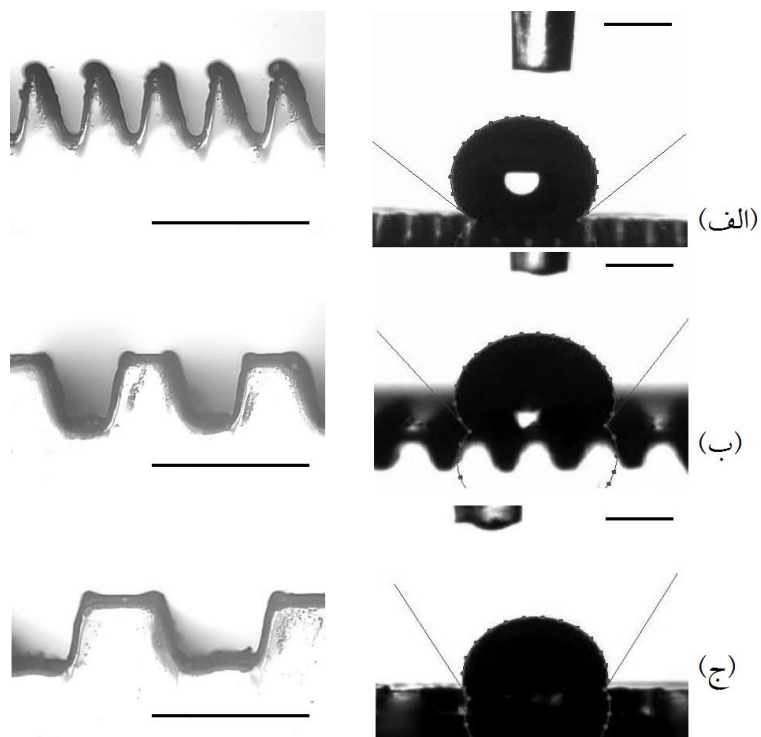
۰,۸۹	۱,۴۰	۰,۴۴ +/- ۰,۰۱	۰,۳۴ +/- ۰,۰۱	۱,۴۵ +/- ۰,۰۲	CC	۲
۰,۸۹	۱,۴۰	۰,۴۴ +/- ۰,۰۱	۰,۳۴ +/- ۰,۰۱	۱,۴۳ +/- ۰,۰۱	M	
۰,۹۳	۱,۳۶	۰,۴۴ +/- ۰,۰۰	۰,۲۴ +/- ۰,۰۰	۱,۴۹ +/- ۰,۰۴	CC	۳
۰,۹۳	۱,۳۵	۰,۴۳ +/- ۰,۰۱	۰,۲۳ +/- ۰,۰۱	۱,۴۶ +/- ۰,۰۳	M	
۰,۹۵	۱,۲۸	۰,۲۹ +/- ۰,۰۲	۰,۱۴ +/- ۰,۰۰	۱,۴۸ +/- ۰,۰۳	CC	۶
۰,۹۵	۱,۲۸	۰,۲۷ +/- ۰,۰۱	۰,۱۴ +/- ۰,۰۰	۱,۴۵ +/- ۰,۰۴	M	



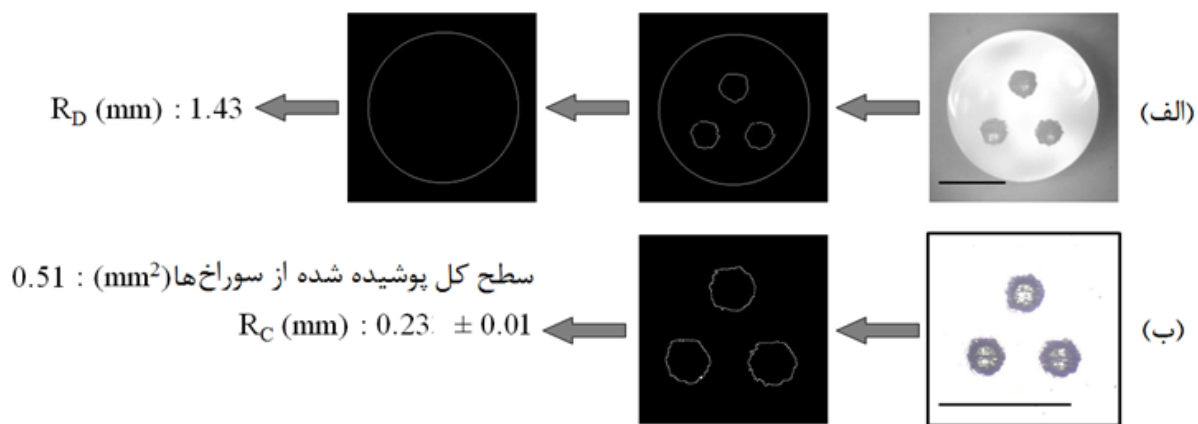
شکل (۱): وضعیت قرارگیری قطره برای (الف) حالت تعادلی یانگ، (ب) حالت ونزل، (ج) حالت کسی-بکستر و (د) حالت اصلاح شدهی کسی-بکستر که در آن مایع تا حدودی به درون ناهمواری‌ها نفوذ می‌نماید.



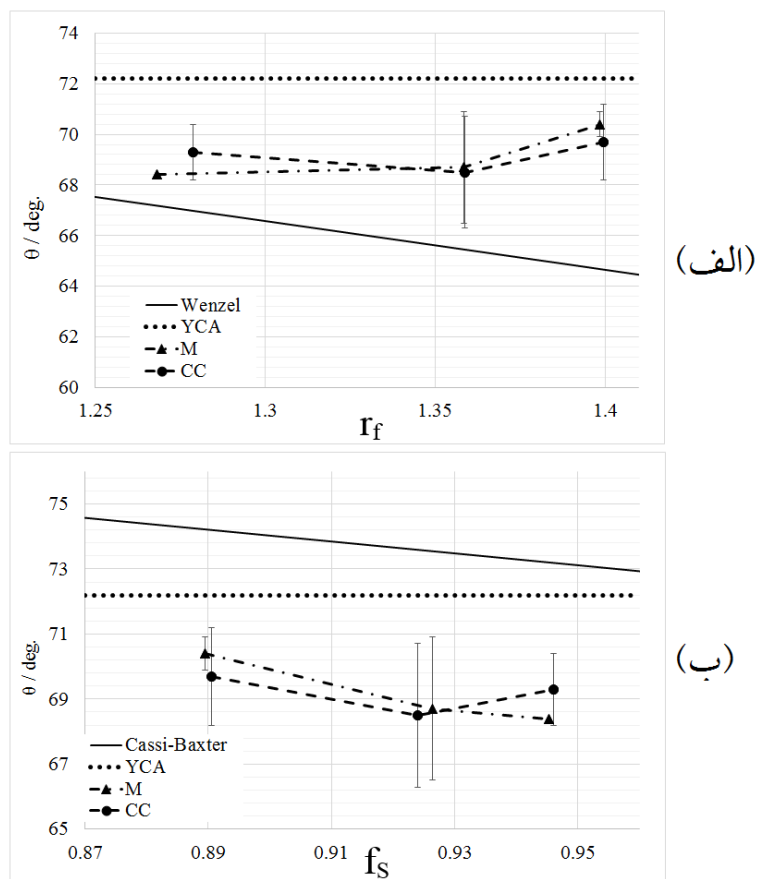
شکل (۲): شمایی از یک قطره به همراه خط تماس سه-فاز و سطح زیرین قطره که در تماس با سطح جامد زیرلایه است.



شکل (۳): مقطع سطح لیزرکاری شده به همراه آزمایش ترشوندگی بر روی سطوح برای شعاع شیار (الف) ۰,۳۴، (ب) ۰,۵۱ و (ج) ۰,۷۴ میلی متر. تمامی مقیاس های تصاویر یک میلی متر را نمایش می دهند.



شکل (۴): فرآیند به کار رفته به منظور تحلیل تصاویر برداشته شده از الگوهای لیزرکاری شده. (الف) روش استخراج شعاع قطره ای که واقع بر ناهمواری ها است (R_D) با کمک تصویربرداری عمودی از قطره. (ب) روش محاسبه شعاع سوراخ ها (R_C).



شکل (۵) میزان تطابق نتایج به دست آمده با روابط (الف) ونزل و (ب)کسی-بکستر. زاویه تماس یانگ نی به صورت نقطه چین بر نمودارها مشخص شده است.