**مجله کنترل**
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد ۱۱، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۶، صفحه ۵۵-۴۷

# روشی جدید جهت محاسبه زاویه تماس قطره با سطوح

مصطفی زمانی محی‌آبادی

مربی، گروه پژوهشی پیل سوختی حرارت بالا، دانشگاه ولی‌عصر(عج) رفسنجان، M.Zamani@vru.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۵/۸/۹، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۶/۶/۲۹)

**چکیده:** در این تحقیق، با استفاده از روش پردازش تصویر زاویه تماس قطره با سطح در حالت متقارن و نامتقارن بررسی و اندازه‌گیری شد. در این روش زاویه تماس توسط آنالیز تصویر بدست می‌آید و هیچ نیازی به مشخصات سیال و یا سطح جامد نیست. اساس فرایند اندازه‌گیری، برطبق روش تقاطع همراه با تابع وزن گوسی است، به این صورت که در ابتدا نقطه تماس به صورت دقیق توسط اپراتور هریس مشخص و سپس یکسری از نقاط روی مرز قطره در نزدیکی نقطه تماس انتخاب شد. در مرحله بعد زاویه بین این جفت نقاط توسط خط مرتبط و مستقیم بین آنها بدست آمد. و در نهایت میانگین زوایا براساس یک تابع وزنی گوسی محاسبه شد. جهت اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی نتایج حاصل با نتایج بدست آمده از روش استانداردی که اخیراً مطرح شده مقایسه شد و اختلاف نتایج کمتر از ۱ درجه بدست آمد. مزایای این روش شامل دقت بالا، قابلیت انجام برای گستره وسیعی از زوایای تماس، قابلیت استفاده برای قطره‌های متقارن و نامتقارن و نیز کاملا خودکار بودن این روش است.

**کلمات کلیدی:** اندازه گیری، زاویه تماس، برخورد قطره، پردازش تصویر

# A New Method for Measuring Contact Angle of Impacting Drop

**Mostafa Zamani Mohiabadi**

**Abstract:** In this paper, a new image processing technique has been proposed to measure the contact angle of symmetric and asymmetric drops. In our proposed method, the contact angle is calculated by analyzing the side view image of the drop without needing any liquid parameters. The procedure of the technique is according to the secant technique coupled with a Gaussian weighted function, as follows: at the beginning the exact location of the contact points is obtained by Harris corner detector function, then a series of points are selected on the drop boundary near the contact points. In the third step, a set of contact angles are estimated by passing secant lines through the contact point and each of the boundary points. In the final step, a gaussian weighted average function is applied to the calculated angles to estimate the main contact angle. The contact angle measurement algorithm is verified by comparing its results with the obtained measurements of a recent standard study. High accuracy, usability for all ranges of contact angles, applicability to both symmetric and asymmetric drops and being fully automatic are other advantages of the presented method.

**Keywords:** Measurement, Contact Angle, drop impact, Image Processing.

## ۱- مقدمه

اخیراً پژوهش‌های زیادی در زمینه رفتار قطره در برخورد با سطوح انجام شده‌اند. این پژوهش‌ها عمدتاً مبتنی بر دینامیک سیالات بوده‌اند و از جمله کاربردهای آن می‌توان پوشش نازک سطوح، رنگ اسپری،کاربرد در آفت کش‌ها، و پاشش پلاسما را نام برد. بطور کلی رفتار قطره تابعی از خواص قطره، سطح و محیط اطراف

نویسنده عهده دار مکاتبات: مصطفی زمانی محی‌آبادی


[ Downloaded from joc-isice.ir on 2026-01-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.4.7 ]

آن است. زاویه لحظه ی تماس یکی از پارامترهای معرف این رفتار می‌باشد. زاویه تماس قطره با سطح، جهت توصیف ترشوندگی سطح جامد[۱و۲]، میعان و تبخیر[۳]، از بین بردن یخ زدگی[۴]، چسبندگی بین قطره و سطوح جامد، و بسیاری از کاربردهای عملی دیگر استفاده شده است[۵و۶]. از این رو، اندازه گیری دقیق زاویه تماس نه تنها برای پژوهش‌های علمی، بلکه در طیف گسترده ای از کاربردهای صنعتی اهمیت اساسی دارد[۷]. با توجه به پژوهش-های انجام شده در این زمینه، روش‌های اندازه‌گیری زاویه تماس به دو گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شوند، روش‌های تعادل نیروهای کششی۱و روش‌های نوری. روش‌های تعادل نیروهای کششی بر اساس اندازه‌گیری نیروی تعامل مایع-جامد از طریق معادله یانگ-لاپلاس[۸] انجام می‌گیرند. روش‌های نوری بر اساس تصویربرداری از برخورد قطره در حالت دینامیکی می‌باشند و زاویه تماس کلی مشاهده شده دو بعدی از قطره را اندازه‌گیری می‌کنند. در روش‌های تعادل نیروهای کششی، مقدار زاویه تماس بر اساس تعادل حرارتی-مکانیکی از یک قطره درحال سکون روی یک سطح جامد و با توجه به سه تنش داخلی آن بدست می-آید. در اکثر شرایط عملی ممکن است زاویه لحظه ی تماس با شرایط عدم تعادل [۱۱-۹] مورد توجه باشد، از این رو در چنین مواردی روش‌های نوری تنها گزینه موجود برای اندازه‌گیری زاویه تماس است. در واقع در طول مدت زمان برخورد، شکل قطره دستخوش تغییرات بزرگ، سریع و گاهی اوقات غیرمتقارن می-شود. بنابراین استفاده از روش‌های تعادل نیروهای کششی تقریبا غیرممکن است. در روش‌های نوری، یک دوربین با وضوح بالا روند برخورد را ضبط می‌کند و پس از آن می‌توان با روش‌های مختلف اندازه‌گیری را انجام داد.

در[۱۲] لی و همکاران زاویه تماس قطره را بر روی سطوح صاف و خشن برای مایع‌های با ویسکوزیته مختلف اندازه‌گیری کردند. آنها توانستند با استفاده از تعادل انرژی، ارتباطی بین میزان ترشوندگی و سرعت برخورد قطره بدست آورند. آن‌ها یک مدل کروی برای قطره موردنظر در نظر گرفته و سپس زاویه برخورد را توسط آن محاسبه نمودند.

در روش‌های نوری مدرن از تکنیک‌های پردازش تصویر جهت اندازه‌گیری زاویه تماس استفاده می‌گردد که بطور بالقوه قادر به اندازه‌گیری زاویه تماس از هر قطره با هر شکل (متقارن یا نامتقارن) می‌باشند. در ادامه، پژوهش‌های انجام شده در زمینه پردازش تصویر برای اندازه‌گیری زاویه تماس، ارائه می‌شود. لی و همکاران[۱۳] یک تابع دایروی جهت تطبیق با شکل قطره و براساس مشخصات قطره معرفی کرده اند. آنها به منظور استخراج مرزهای قطره، از تکنیک تقسیم بندی تصویر همراه با تبدیل واترشد۲ استفاده کردند. مزیت اصلی این روش سرعت بالای اجرای آن است، ولی قابل اجرا برای قطره‌های نامتقارن نیست. محدودیت دیگر این روش دقت کم در اندازه‌گیری بویژه برای قطره‌های بزرگ است، زیرا در قطره های بزرگ بدلیل گرانش زیاد شکل قطره از حالت دایروی خارج می‌شود[۱۴و۱۵]. چینی و همکاران[۱۶] یک روش مبتنی بر پردازش تصویر ارایه دادند، که در آن زاویه تماس با تقریب چند جمله ای در مرز قطره و در نزدیکی خط تماس اندازه‌گیری می‌شود. اما روش آنها در مواردی که انعکاس نور قابل رویت نباشد با خطا مواجه می‌شود، به درستی عمل نمی‌کند. بنابراین در چنین مواردی نقاط تماس باید بصورت دستی مشخص شوند که حساس به خطای انسانی می‌باشد. در یکی از جدیدترین تحقیقات در این زمینه بیول و همکاران[۱۷] الگوریتمی پیشنهاد دادند که با کمک یک ماسک زاویه‌سنج عمل می‌کند. در این الگوریتم یک ماتریس خروجی هم اندازه با تصویر ورودی، ایجاد می‌گردد و در آن مقدار زاویه محاسبه شده در همان محل از پیکسل‌های مرز قطره قرار می‌گیرد. آنها در روش خود بمنظور به حداقل رساندن خطا، اندازه ماسک را با توجه به قطره مورد مطالعه تنظیم کردند. بعنوان مثال اندازه‌گیری زاویه بسیار کوچک (۱۰>) نیاز به ماسک بزرگتر دارد، در حالی که ماسک کوچکتر را می‌توان برای تصاویر با وضوح کم استفاده نمود. در این مقاله یک روش مبتنی بر پردازش تصویر، برای اندازه‌گیری زاویه تماس معرفی شده است که بر اساس روش تقاطع عمل می‌کند. مقدار زاویه تماس با استفاده از متوسط وزنی زوایای بدست آمده در امتداد نقاط تماس، اندازه‌گیری می‌شود. این مدل قابل اجرا برای هر شکل از قطره می‌باشد. در بخش بعدی روش پردازش تصویر شرح داده شده است، که به طور خودکار می‌تواند در سمت چپ و راست زاویه تماس، و بدون نیاز به دانستن خصوصیات قطره، زاویه مورد نظر را اندازه‌گیری نماید. این روش برای تمام محدوده های زاویه تماس قابل اجرا است. با توجه به موقعیت نقاط تماس، الگوریتم پیشنهادی همچنین می‌تواند عرض ناحیه مرطوب برای قطره‌های متقارن و نامتقارن را تخمین بزنند.

[۱] Tensiometry

[۲] Watershed



[ Downloaded from joc-isice.ir on 2026-01-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.4.7 ]

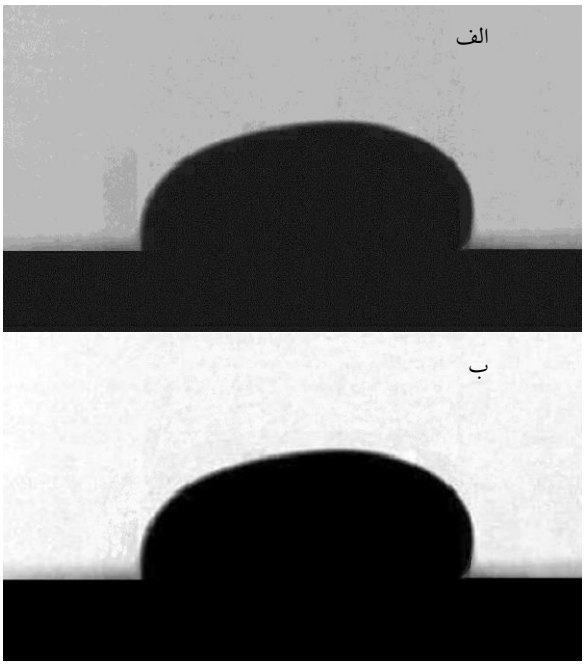
## ۲- پیش پردازش

### ۲-۱- تبدیل تصویر رنگی به تصویر مقیاس خاکستری

در مرحله اول، تصویر رنگی به حالت سیاه و سفید تبدیل می‌شود. تصویر خروجی دارای ۲۵۶ سطح خاکستری، از ۰ (سیاه) تا ۲۵۵ (سفید) می‌باشد.

### ۲-۲- بهبود توازن شدت روشنایی

معمولا تصاویر برخورد قطره شامل صفحه بستر با رنگ تیره است که این ناحیه تاریک می‌تواند تاثیر زیادی در کیفیت تصویر داشته باشد. لذا به منظور افزایش کیفیت و بالا بردن وضوح تصویر از روش تعدیل شدت روشنایی استفاده می‌شود[۱۸]. پروسه تعدیل شدت روشنایی که عمدتا با کمک متعادل سازی هیستوگرام[۱] انجام می‌گیرد تغییر محسوسی در جزئیات قطره ایجاد نمی‌کند. مثالی از این پروسه در شکل ۱ نشان داده شده است. در شکل ۱-الف تصویر اصلی نشان داده شده است در حالی که شکل ۱-ب تصویر بعد از متعادل‌سازی هیستوگرام را نشان می‌دهد.




شکل۱ (۱-الف): تصویر اصلی (۱-ب): تصویر بعد از متعادل-سازی هیستوگرام

### ۲-۳- تیز کردن لبه

یکی از روش‌های معمول بدست آوردن مرز قطره استفاده از روش‌های تشخیص لبه[۲] می‌باشد. الگوریتم‌های متعددی در این زمینه استفاده شده اند، که می‌توان به الگوریتم‌های سوبل،[۳] پرویت، روبرتس و لاپلاسین اشاره کرد. این الگوریتم‌ها معمولا یک لبه تیز از تصویر را مشخص می‌کنند و در آن‌ها نتیجه خروجی به فرمت تصویر باینری(۰-۱) تبدیل شده و فقط پیکسل‌هایی که معرف بیشترین تغییرات در شدت پیکسل‌ها هستند مساوی با ۱ قرار داده شده و بقیه مساوی صفر می‌باشند. در این مطالعه علاوه بر تشخیص لبه یک عملگر تیزکنندگی برای لبه‌ها طراحی و استفاده شده است که هدف آن تقویت روشنایی در طول مرز قطره می-باشد. برای این هدف در ابتدا از ماسک واضح‌ساز(*USM*)[۴] استفاده شده که توسط این تکنیک لبه‌های قطره قابل تشخیص می‌شوند. روش کلی اینگونه است که ابتدا ماسک روی تصویر قرار داده شده و آن را بلور می‌کند که در محل لبه ها مقدار بلور شدگی شدیدتر از سایر قسمت‌های تصویر خواهد بود. در مرحله بعد، تصویر حاصل با تصویر اصلی مقایسه می‌شود و در قسمت-هایی که این مقادیر تفاوت بیشتری با هم دارند، لبه تیز می‌گردد. به این ترتیب تصویر نهایی ما دارای تصویری با لبه های تیز و مستخرج از یک تصویر بلور شده خواهد بود. درواقع پروسه بلور کردن باعث کاهش فرکانس‌های بالا در تصویر اصلی می‌گردد. شکل ۲ تصویر اصلی قبل و بعد از پروسه مذکور را نشان می‌دهد.

[۱] Histogram equalization

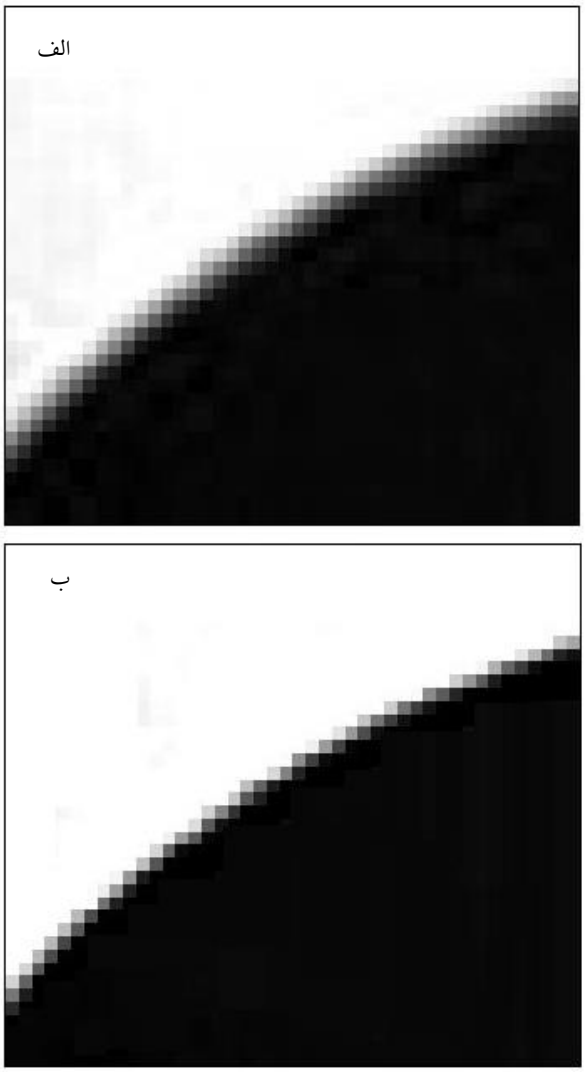
[۲] Edge detection method

[۳] Sobel, Prewitt, Roberts, Laplacian of Gaussian

[۴] Unsharp mask(USM)



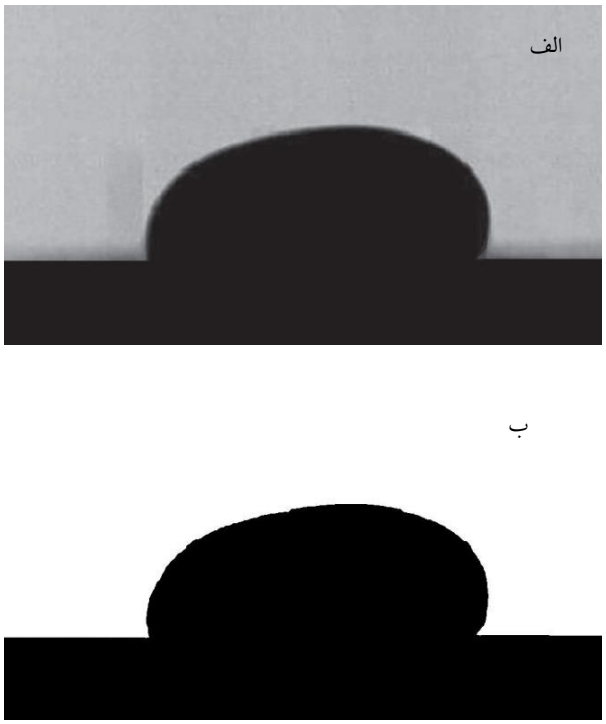
[ Downloaded from joc-isice.ir on 2026-01-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.4.7 ]




شکل۲ (۲-الف) قسمتی از لبه قطره از تصویر اصلی (۲-ب) تصویر بعد از تیزکردن لبه

## ۲-٤- تبدیل تصویر به تصویر باینری

این مرحله براساس مقدار آستانه‌ای که برای تصویر تعریف می شود تصویر اصلی به تصویر سیاه و سفید با دو مقدار ۰ و ۱ تبدیل می‌شود. هدف این پروسه ساده‌سازی و تفکیک قطره و سطح برخورد از هوای اطراف می‌باشد، بگونه‌ای که قسمت گازی (هوا) بصورت سفید و مابقی تصویر بصورت سیاه درنظر گرفته شود. لذا شکل تابع تبدیل براساس تابع هدف تعریف شده و بصورت معکوس نسبت به حالت نرمال درنظر گرفته می‌شود. در این حالت تابع موردنظر بشکل تیره می‌باشد. در اکثر مثال‌هایی که برای این پروسه انجام می‌شود معمولا آستانه تغییرات معادل با ۷۰ درصد از بیشترین مقدار شدت در تصویر اصلی در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق از آستانه‌گذاری اتسو[۱] استفاده می‌گردد که در زیرگروه روش‌های آستانه‌گذاری مبتنی بر خوشه‌بندی، دسته‌بندی می‌شود. این متد به روشی برای بخش‌بندی تصویر بر اساس یافتن آستانه بهینه می‌باشد به نحوی که تصویر به دو کلاس مجزا (سیاه و سفید) تقسیم شود. شکل ۳ پروسه‌های مدنظر را نشان می‌دهد.




شکل۳ (۳-الف)تصویر اصلی (۳-ب) تصویر باینری

## ۳- اندازه‌گیری

مرحله اول در اندازه‌گیری، بدست آوردن نقطه تماس در سه فاز گاز، مایع و جامد می‌باشد. بدست آوردن این نقطه جزء مهمترین پروسه‌هایی است که در دقت اندازه گیری زاویه تماس اهمیت دارد. بدین منظور یک روش کاملا اتوماتیک برای بدست آوردن نقطه تماس طراحی شده که با استفاده از تکنیک‌های هوشمند ریاضیاتی قابلیت بدست آوردن این نقطه را دارد. نقطه تماس، نقطه‌ای است که ماکزیمم تغییرات را در همه جهات دارد. با توجه به این ویژگی می‌توان از روش هریس-کرنر[۲] که براساس همبستگی[۳] است استفاده کرد[۱۹]. این عملگر مقدار تغییرات سیگنال را در هر نقطه بدست می‌آورد و با استفاده از پنجره‌ای که برای آن تعریف شده، مقادیر در جهات مختلف بصورت

[۱] Otsu
[۲] Harris Corner Detector
[۳] Auto-correlation



[ Downloaded from joc-isice.ir on 2026-01-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.4.7 ]

همبستگی با مقدار اولیه محاسبه می‌گردند. در نتیجه وقتی که این اپراتور به نزدیکی نقطه گوشه(نقطه تماس ۳ فاز) برسد بیشترین تغییرات را داشته لذا ماکزیمم مقدار در این نقطه بدست می‌آید. الگوریتم موردنظر بشکل ریاضی در ادامه توضیح داده شده است.

اگر تصویر با $I$ نمایش داده شود و قاب تصویر به مرکز $(x,y)$ به اندازه $(u,v)$ جابه جا شود آنگاه:

$$S(x,y) = \sum_u \sum_v w(u,v)\big(I(u+x,v+y) - I(u,v)\big)^2 \quad (۱)$$

$I(u+x,v+y)$ با بسط تیلور بصورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$I(u+x,v+y) \approx I(u,v) + I_X(u,v)x + I_y(u,v)y \quad (۲)$$

در روابط بالا $I_X$ و $I_y$ مشتقات جزئی $I$ در جهت $x$ و $y$ می‌باشند و $w$ پنجره متحرک است که مقدار مشتقات در این پنجره اعمال می‌گردد. $S$ توسط معادله(۳) تخمین زده می‌شود.

$$S(x,y) = \sum_u \sum_v w(u,v)\big(I_x(u,v)x - I_y(u,v)y\big)^2 \quad (۳)$$

$S$ را می‌توان بصورت ماتریس با معادله(۴) نوشت.

$$S(x,y) = (x \;\; y)A\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (۴)$$

که $A$ بصورت معادله(۵)تعریف می‌شود.

$$A = \sum_u \sum_v w(u,v)\begin{bmatrix} I_x^2 & I_xI_y \\ I_xI_y & I_y^2 \end{bmatrix} \quad (۵)$$

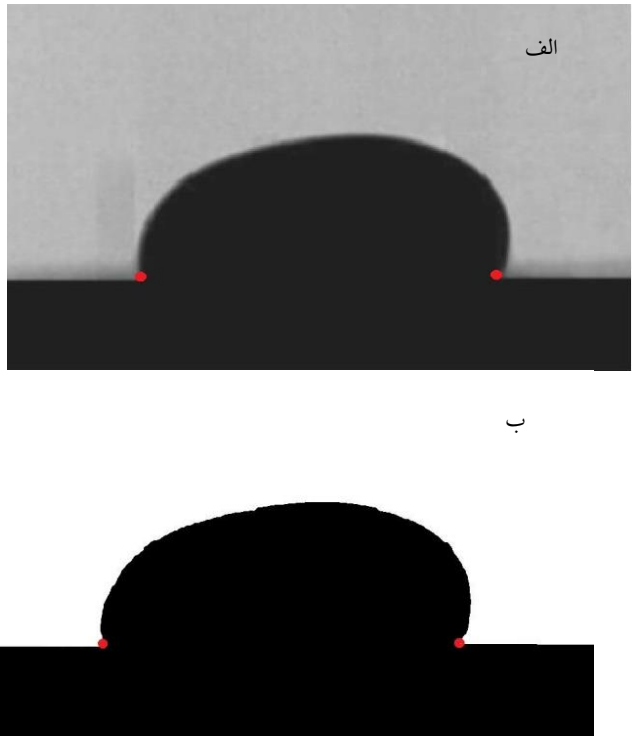
به ماتریس $A$ ماتریس هریس[۱] گفته می‌شود.

روش هریس بدین صورت عمل می کند که برای هر پیکسل از تصویر، ماتریس هریس محاسبه می گردد. با توجه به ماتریس $A$ به هر پیکسل یک امتیاز داده می شود که بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$Mc = \Delta(A) - \alpha \times trace^2(A) \quad (۶)$$

که $\Delta$ دترمینان (حاصل ضرب مقادیر ویژه) و $trace$ مجموع عناصر قطری (مجموع مقادیر ویژه) ماتریس می‌باشند و $\alpha$ یک عدد ثابت است. براساس بیان ریاضی، در رابطه بالا، نقاطی به عنوان گوشه تشخیص داده می‌شوند که در آنها $Mc$ ماکزیمم باشد، که باتوجه به فرمول ۴-۶، منجر به بیشینه شدن مقدار $S$ در نقطه گوشه می شود.

از طرفی چون در تصاویر مربوطه ۲ نقطه تماس داریم، $y$ و $x$ برای دو نقطه ی که در آنها $S$ ماکزیمم می‌شود، به عنوان مختصات نقاط تماس تشخیص داده می‌شوند. شکل ۴ محل نقاط تماس (گوشه) را با استفاده از عملگر هریس برای تصویر باینری نشان می‌دهد. محل نقاط گوشه در تصویر اصلی نیز نشان داده شده که مشخص کننده دقت اندازه‌گیری می‌باشد.




شکل۴ محل نقاط گوشه: (۴-الف) تصویر اصلی (۴-ب)تصویر باینری

## ٤- محاسبه زاویه تماس

در این مقاله اندازه‌گیری زاویه تماس و آنالیز خط تماس براساس روش پردازش تصویر و با استفاده از روش تقاطع به همراه تابع وزنی صورت گرفته است. روش تقاطع ممکن است در ابتدا بعنوان ساده ترین روش در پردازش تصویر شناخته شود، اما سادگی لزوماً به معنی عدم دقت نیست. روش تقاطع براساس تقریب زاویه تماس بین نقطه تماس و نقاط روی مرز قطره می‌باشد. همانطور که بطور شماتیک در شکل ۵ نشان داده شده، الگوریتم تقاطع می‌تواند با معادله(۷) نشان داده شود.

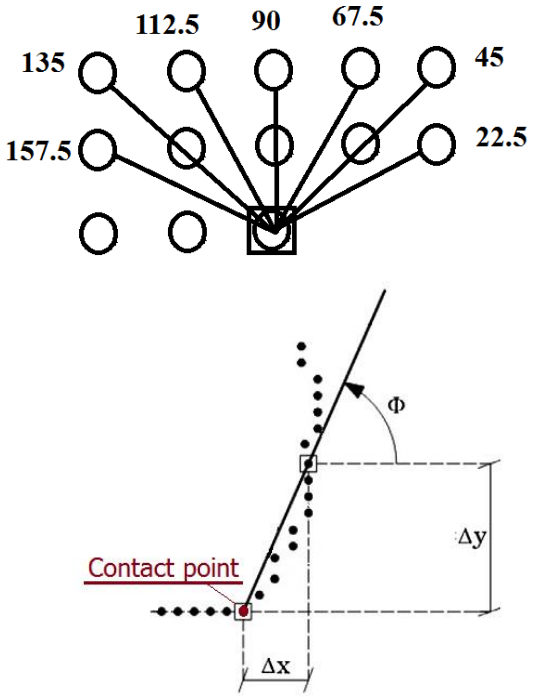
$$\emptyset = arctan(\Delta y/\Delta x) \quad (۷)$$

در این معادله $\Delta x$ و $\Delta y$ بترتیب نشان دهنده فاصله افقی و عمودی از نقطه تماس می‌باشند. این تقریب برای زاویه تماس زمانی دقیق است که نقطه دوم که روی مرز قطره قرار گرفته بطور صحیح انتخاب شود. درصورتیکه نقطه دوم خیلی نزدیک یا خیلی دور از نقطه تماس انتخاب شود زاویه اندازه گرفته شده دقت کافی را برای تقریب زاویه تماس قطره نخواهد داشت.

[۱] Harris



[ Downloaded from joc-isice.ir on 2026-01-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.4.7 ]




شکل۵ محاسبه زاویه تماس براساس مکانیزم تقاطع و محدوده قابلیت اندازه‌گیری زوایا

برای مثال فرض کنید نقطه دوم را به اندازه ۲ پیکسل درنظر بگیریم ($\Delta y=2$)، در این صورت الگوریتم ارایه شده، تنها قابلیت اندازه-گیری ۷ زاویه ۲۲/۵، ۴۵، ۶۷/۵، ۹۰، ۱۱۲/۵، ۱۳۵ و ۱۵۷/۵ (شکل ۵) درجه را خواهد داشت و زوایای مابین آن‌ها قابل اندازه‌گیری نخواهد بود. به عبارت دیگر اگر نقطه دوم خیلی نزدیک به نقطه تماس باشد دقت اندازه‌گیری پایین می‌آید. از طرفی چنانچه نقطه دوم در فاصله خیلی دور از نقطه تماس درنظر گرفته شود، امکان دارد زاویه محاسبه شده، نشان دهنده‌ی مقدار دقیقی برای زاویه تماس نباشد(شکل ۵).

با توجه به مطالب گفته شده، زاویه محاسبه شده شدیداً تابع انتخاب نقطه دوم بر روی مرز قطره است. به این منظور یکسری از نقاط روی سطح قطره، و در نزدیکی نقطه تماس در نظر گرفته شده و سپس برای هرکدام از نقاط روی مرز، بطور جداگانه زاویه ای درنظر گرفته می‌شود. سپس تابع وزنی برای میانگین‌گیری زوایای بدست آمده، اعمال می‌گردد. بطور خلاصه می‌توان روش موردنظر را بشکل زیر در نظر گرفت: ابتدا نقاط انتخاب شده، به تعداد ۱۰ در صد از ارتفاع قطره درنظر گرفته می‌شود. بعنوان مثال اگر ارتفاع قطره به اندازه ۴۱۷ پیکسل باشد به اندازه ۴۱ پیکسل از پیکسل‌هایی که در روی سطح قطره قرار گرفته‌اند را مورد مطالعه قرار می‌دهیم، بترتیبی که پیکسل شماره ۱ نزدیکترین فاصله و پیکسل شماره ۴۱ دورترین نقطه را دارد. با توجه به شکل ۵ نزدیکترین و دورترین نقاط، پتانسیل عدم دقت بیشتری دارند اما نقاط میانی پتانسیل بیشتری برای اندازه‌گیری دقیق دارند. بدین منظور از تابع گوسی، به عنوان تابع وزنی استفاده می‌گردد. این تابع در رابطه(۹) نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۵ مشخص است، این تابع نقاط ابتدا و انتها را کم وزن‌تر و نقاط میانی را پر وزن‌تر درنظر می‌گیرد.

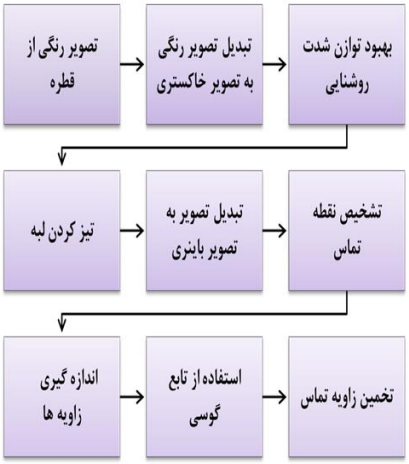
تابع وزنی به نقاط اندازه‌گیری اعمال شده و مطابق با رابطه ۸ تا ۱۰ مقدار نهایی زاویه تماس ($\theta$) تقریب زده می‌شود.

$$\emptyset = \{\emptyset_1, \emptyset_2, \dots, \emptyset_N\} \quad (۸)$$

$$w(i) = e^{\frac{-(i-0.5N)^2}{5N}} \quad (۹)$$

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^{N} w(i)*\emptyset_i}{\sum_{i=1}^{N} w(i)} \quad (۱۰)$$

در روابط بالا $\emptyset_i$ زاویه $i$ ام، $w$ تابع گوسی، $i$ شماره زاویه مدنظر و $N$ تعداد کل زوایا می‌باشند. در شکل ۶ تمامی مراحل اعمال شده بر روی تصویر یک قطره نشان داده شده است.




شکل۶ مراحل پردازش اعمال شده بر روی تصویر یک قطره جهت اندازه‌گیری زاویه تماس

## ۵- اعتبارسنجی

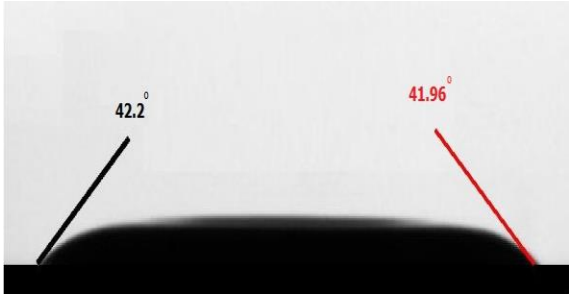
جهت اعتبارسنجی الگوریتم ارایه شده، نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی، با اندازه‌گیری‌های انجام شده در مقاله[۱۲] مقایسه شده است. در شکل‌های(۷-۹) آقای لی و همکاران[۱] زاویه تماس را برای یک قطره ۳ میلی‌لیتری در حالت تعادل بدست آوردند که با خط تیره در سمت چپ تصویر نشان داده شده است. در این تصاویر خط قرمز نشان دهنده‌ی زاویه بدست آمده از روش ارائه شده در مقاله[۱۲] می‌باشد. از آنجایی که قطره در حالت تعادل بوده و شرایط در دو طرف قطره بسیار بهم نزدیک و مشابه می-باشند، لذا مقایسه دو زاویه در دو سمت قطره مقایسه‌ی صحیحی

[۱] Lee, Derome et al

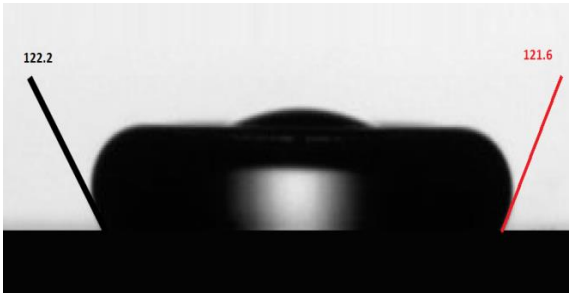


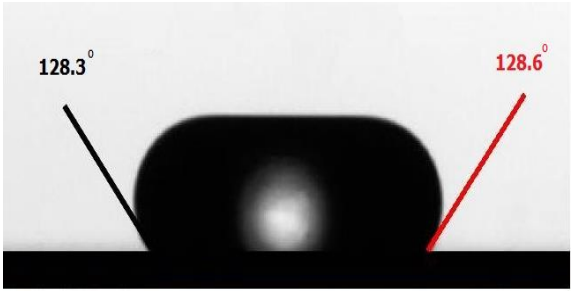
[ Downloaded from joc-isice.ir on 2026-01-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.4.7 ]

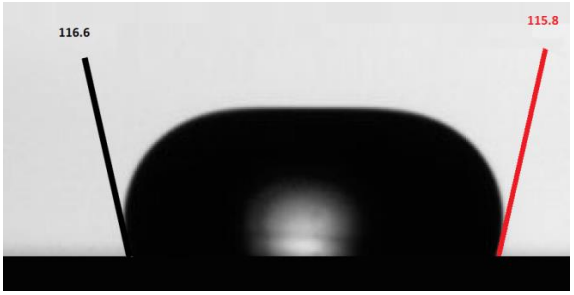
جهت آزمودن روش پیشنهادی می‌باشد. جهت اعتبارسنجی، اعداد نوشته شده در سمت چپ و راست در شکل قابل مشاهده می‌باشند و در ادامه در جدول(۱) با هم مقایسه می‌شوند.



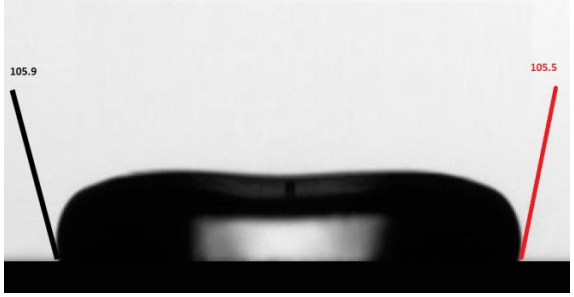
شکل۷ تصویر برخورد قطره اتانول با سطح استیل[۱۲]

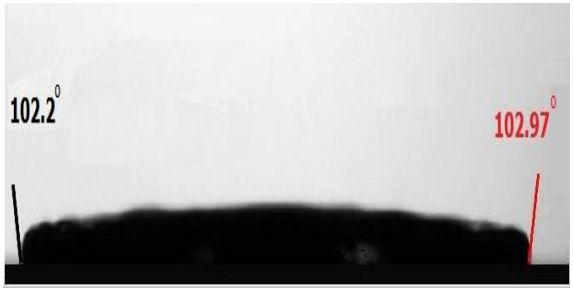


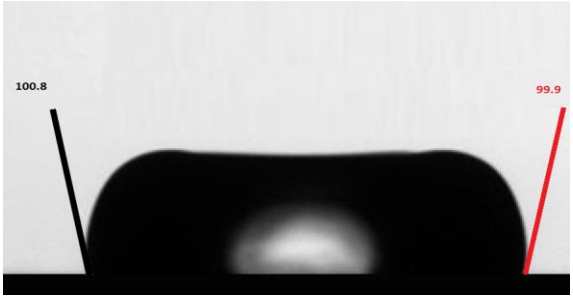




شکل۸ تصویر برخورد قطره گلیسیرین با سطح استیل[۱۲]




شکل۹ تصویر برخورد قطره آب با سطح استیل[۱۲]

[ Downloaded from joc-isice.ir on 2026-01-31 ]

[ DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.4.7 ]

جدول(۱) مقایسه اندازه گیری انجام شده روش پیشنهادی با روش آقای لی و همکاران[۱۲]

| محاسبه زاویه برخورد قطره با سطح(درجه) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | شکل اول | | شکل دوم | | شکل سوم | | میانگین درصد اختلاف دو روش |
| | *روش۱ | **روش۲ | روش۱ | روش۲ | روش۱ | روش۲ | |
| قطره اتانول با سطح استیل | ۴۲/۲ | ۴۱/۹۶ | ۴۲/۷ | ۴۲/۳ | ۴۱/۲ | ۴۱/۳ | ۰/۵۸۳ |
| قطره گلیسیرین با سطح استیل | ۱۲۸/۳ | ۱۲۸/۶ | ۱۲۲/۲ | ۱۲۱/۶ | ۱۱۶/۶ | ۱۱۵/۸ | ۰/۴۷ |
| قطره آب با سطح استیل | ۱۰۲/۲ | ۱۰۲/۹۷ | ۱۰۵/۹ | ۱۰۵/۵ | ۱۰۰/۸ | ۹۹/۹ | ۰/۶۷ |

*روش مرجع[۱۲]

** روش پیشنهادی

در بعضی از تصاویر مانند شکل (۹)، تشخیص زاویه تماس و همچنین محل دقیق نقاط تماس کیفیت پایینی دارد، به گونه‌ای که حتی به صورت چشمی نیز قابل تشخیص نیست. در صورتیکه با استفاده از روش پیشنهادی، نقطه تماس بصورت قابل قبولی تشخیص داده شده است و همانطور که مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده در این اندازه‌گیری به نتایج بدست آمده از روش مرجع *[۱۲]* نزدیک بوده که نشان از دقت بسیار خوب این روش می‌باشد. لازم به ذکر است که اگرچه مقادیر بدست آمده از روش پیشنهادی و روش مرجع *[۱۲]* اندکی تفاوت دارند، این تفاوت لزوماً به معنی خطا در اندازه‌گیری با روش پیشنهادی نیست.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش پردازش تصویر جدید ارایه شده است که مقدار زاویه تماس برای تصاویر متقارن و غیرمتقارن را، با استفاده از تصویر گرفته شده از قسمت جانبی قطره، بدست می آورد. براساس طبیعت پردازش تصویر، الگوریتم پیشنهاد شده نیاز به هیچگونه اطلاعاتی از سیال و جامد وحتی مقادیر مربوط به سطح ندارد و همچنین نیاز به هیچگونه تحلیل فیزیکی ندارد. لذا این روش بعنوان یک روش کاملا اتوماتیک، در تمامی کاربردها قابل اجراست. نتایج بدست آمده، نشان می‌دهد که بدست آوردن نقطه تماس بوسیله اپراتور هریس که براساس همبستگی و تغییرات شدت روشنایی در تصویر است، دارای دقت بسیار بالایی در بدست آوردن نقطه تماس می‌باشد.

مقدار زاویه بدست آمده در مطالعه، براساس روش تقاطع همراه با تابع وزنی اعمال شده به چندین نقطه در روی مرز قطره می‌باشد. از آنجایی که نقاط نزدیک و دور از قطره پتانسیل عدم دقت را دارند، لذا تابع وزنی به گونه‌ای طراحی می‌شود که نقاط دور و نزدیک دارای وزن کمتری نسبت به بقیه نقاط داشته باشند. برای اعتبارسنجی روش پیشنهادی، نتایج بدست آمده با نتایج موجود در مقاله‌ای(مرجع *[۱۲]*) در این زمینه مقایسه گردیده است. نتایج بدست آمده دارای دقت خوبی بوده و اختلافی کمتر از یک درجه داشته‌اند. مزیت اصلی این روش، کاملا هوشمند بودن الگوریتم در پیدا کردن نقاط تماس قطره و همچنین توانایی برای اندازه-گیری دقیق هرگونه زاویه کوچک و بزرگ می‌باشد. همچنین هزینه محاسبات بسیار کم امکان استفاده از این روش برای کاربردهای صنعتی با تصاویر بسیار زیاد را فراهم می‌آورد.

## مراجع

[1] R. Förch, H. Schönherr, A. Tobias, A. Jenkins, Surface Design: Applications In Bioscience And Nanotechnology, John Wiley & Sons, 2009.

[2] J.T. Cieslinski, K. Krygier, Sessile Droplet Contact Angle Of Water–Al2o3, Water–Tio2 And Water–Cu Nanofluids, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 59, pp.258–263, 2014.

[3] F.M. Mancio Reis, P. Lavieille, M. Miscevic, Toward Enhancement Of Water Vapour Condensation Using Wettability Gradient Surface, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 67, pp.70–74, 2015.

[4] Z.-J. Wang, D.-J. Kwon, K.L. Devries, J.M. Park, Frost Formation And Anti-Icing Performance Of A Hydrophobic Coating On Aluminum, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.60, pp.132–137, 2015.

[5] J.H. Moon, D.Y. Kim, S.H. Lee, Spreading And Receding Characteristics Of A Non-Newtonian Droplet Impinging On A Heated Surface,



[ Downloaded from joc-isice.ir on 2026-01-31 ]
[ DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.4.7 ]

[13] L. Li, W. Kang, D. Ye, A Contact Angle Measurement Method For The Droplets In Ewod-Based Chips, In: Proceeding 2nd Ieee, Conference Nano/Micro Engineering Molecular System, Bangkok, Thailand, 16th–19th January, 2007.

[14] M. Bortolotti, M. Brugnara, C.D. Volpe, S. Siboni, Numerical Models For The Evaluation Of The Contact Angle From Axisymmetric Drop Profiles: A Statistic Comparison, Journal of colloid and interface science, Vol.336, pp.285–297, 2009.

[15] Skinner, F. K., Y. Rotenberg, And A. W. Neumann. "Contact Angle Measurements From The Contact Diameter Of Sessile Drops By Means Of A Modified Axisymmetric Drop Shape Analysis." Journal Of Colloid And Interface Science, Vol.130.1, pp.25-34, 1989.

[16] S.F. Chini, A. Amirfazli, A Method For Measuring Contact Angle Of Asymmetric And Symmetric Drops, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol.388, pp.29–37, 2011.

[17] D. Biolè, V. Bertola, A Goniometric Mask To Measure Contact Angles From Digital Images Of Liquid Drops, Colloids Surf. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol.467, pp.149–156, 2015.

[18] M. Piccardi, Background Subtraction Techniques: A Review, Systems, man and cybernetics, IEEE international conference on. Man Cybern, 2004.

[19] C. Harris And M. Stephens, A Combined Corner And Edge Detector, Alvey vision conference, pp.147–151, 1988.

Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.57, pp.94–101, 2014.

[6] F. Salaun, E. Devaux, S. Bourbigot, P. Rumeau, Application Of Contact Angle Measurement To The Manufacture Of Textiles Containing Microcapsules, Textile research journal, Vol.79, pp.1202–1212, 2009.

[7] D. Biole,M. Wang, And V. Bertola, Assessment Of Direct Image Processing Methods To Measure The Apparent Contact Angle Of Liquid Drops, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.76, pp.296 - 305, 2016.

[8] C. Della Volpe, D. Maniglio, M. Morra, S. Siboni, The Determination Of A 'Stable-Equilibrium' Contact Angle On Heterogeneous And Rough Surfaces, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol.206, pp.47–67, 2002.

[9] A.B.D. Cassie, Contact Angles, Discussions of the Faraday Society, Vol.3, pp.11–16, 1948.

[10] S. Baxter, Wetting And Contact-Angle Hysteresis, Nature, Vol.165, pp.198, 1950.

[11] K.H. Kang, How Electrostatic fields Change Contact Angle In Electro-Wetting, Langmuir, Vol.18, pp.10318–10322, 2002.

[12] J. B. Lee, N. Laan, , K. G. de Bruin, G. Skantzaris, N. Shahidzadeh, D. Derome, J. Carmeliet, and D. Bonn, "Universal rescaling of drop impact on smooth and rough surfaces." Journal of Fluid Mechanics, Vol.786, pp.R4, 2015.

[ Downloaded from joc-isice.ir on 2026-01-31 ]

[ DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.4.4.7 ]