

آنالیز پروفایل قطره نامتقارن روی سطوح افقی، شیب‌دار و دارای انحنا با استفاده از پردازش تصویر

محمد آزادی تبار^۱، فرزاد برزگر^۱، محمدحسین غضنفری^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۱۶۳۹-۱۱۱۵۵، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۱۶۳۹-۱۱۱۵۵، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۳۰ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۹۸/۳/۱۲

چکیده

یکی از روش‌های متداول برای تعیین خاصیت ترشوندگی سطوح، اندازه‌گیری زاویه تماس قطره روی آن سطح است. اگرچه محاسبه زاویه تماس قطره روی سطوح افقی، مفصل مورد بررسی قرار گرفته است ولی تعیین زاویه تماس برای قطره نامتقارن روی سطوح شیب‌دار و به ویژه دارای انحنا در حال حاضر عمدتاً از روش‌های مبتنی بر خط مماس انجام می‌شود که این روش از دقت و سرعت کافی برخوردار نیست. هدف اصلی از این مطالعه ارائه الگوریتمی مؤثر برای تعیین زاویه تماس قطره روی سطوح شیب‌دار و دارای انحنا بدون استفاده از مشخصه‌های سیال از قبیل چگالی و حجم قطره می‌باشد. بدین منظور از تصاویر واقعی و مصنوعی قطره استفاده شده است. روش توسعه داده شده از تصاویر جانبی قطره استفاده می‌کند و ماتریس دوتایی تصویر را با استفاده از روش اتسو ایجاد می‌نماید. سپس محل تماس سه فاز جامد-سیال-سیال تشخیص داده می‌شود و در ادامه زاویه تماس با کمک تعیین مشتق در سطح تماس سه فاز محاسبه می‌شود. به دلیل مشکلاتی که در تعیین محل تماس سه فاز وجود دارد، بجای محاسبه مشتق تنها در یک پیکسل، از چندین پیکسل و میانگین‌گیری به منظور کاهش این اثر برای اندازه‌گیری زاویه تماس استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی، تصاویر واقعی قطره چهار سیال مختلف روی سطح کلسیت افقی و همچنین تصاویر مصنوعی ایجاد شده به کمک نرم‌افزارهای گرافیکی با زاویه تماس مشخص مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان‌دهنده دقت مناسب روش پیشنهادی برای محاسبه زاویه تماس قطره متقارن و نامتقارن روی سطوح افقی، شیب‌دار و دارای انحنا است. واژه‌های کلیدی: محاسبه زاویه تماس، پردازش تصویر، قطره نامتقارن، سطح منحنی، دوتایی کردن.

Analysis of Asymmetric Drop Shape on Horizontal, Inclined and Curved Surfaces by Using Image Process

M. Azadi Tabar, F. Barzegar, M. H. Ghazanfari*

School of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, P. O. Box: 11155-1639, Tehran, Iran.

Received: 18-02-2018

Accepted: 21-07-2018

Available online: 02-06-2019

Abstract

Contact angle measurement of a drop on surface is known as a common method for determining the surfaces wettability. Although the drop contact angle measurement on horizontal surface is fully-described, but contact angle measurement for the asymmetric drop on inclined and specially curved surfaces, mainly is analyzed by tangent line method, suffers from inadequate accuracy and speed. The main objective of this study is to introduce an effective algorithm for determining the contact angle of drops on inclined and curved surfaces without using fluid parameters such as density and drop volume. For this purpose, real and artificial image of drops are used. The developed method uses side view image of drops and creates the binary matrix of the image by using the Otsu method. Then, the solid-fluid-fluid interface is detected and the contact angle is calculated by means of determining the derivative at the three phases contact point. One problem which contact angle measurement faces with is determination of the location of three-phase contact point, instead of calculating the derivative based on just one pixel, averaging of several pixels are used to reduce effect of this problem. In order to validate the proposed method, real images of the drops of four different fluids on the calcite surface, as well as artificial images created with the aid of graphic software with a specific contact angle, are used. The results show the accuracy of the proposed method for contact angle measurement of the symmetric and asymmetric drop on horizontal, inclined and curved surfaces. *J. Color Sci. Tech.* 13(2019), 9-23©. Institute for Color Science and Technology.

Keywords: Contact angle measurement, Image process, Asymmetric drop, Curved surface, Binarization.

*Corresponding author: ghazanfari@sharif.edu

۱- مقدمه

هنگامی که یک قطره از مایع روی یک سطح جامد، افقی قرار می‌گیرد، ممکن است به صورت یک قطره با سطح محدود باشد یا اینکه به طور کامل روی سطح پخش شود [۱]. برآیند نیرویی که موجب افزایش سطح می‌شود با نیرویی که موجب کاهش سطح می‌شود حالت ترشوندگی را تعیین می‌کند، (رابطه ۱) [۲].

$$\gamma_{lv} \cos \theta = \gamma_{sv} - \gamma_{sl} \quad (1)$$

که θ زاویه تماس قطره با سطح، γ_{lv} کشش سطحی، γ_{sv} انرژی سطحی بین جامد و گاز و γ_{sl} انرژی سطحی بین جامد و مایع است. دانش رفتار ترشوندگی قطره روی سطح علاوه بر فیزیک پایه برای بسیاری از فرایندها و کاربردهای صنعتی از قبیل تمیز کردن، پوشش دهی، چاپ، علوم و فناوری رنگ و غیره بسیار اهمیت دارد [۴]. تعیین زاویه تماس، یکی از روش‌های متداول بررسی خاصیت ترشوندگی سطح سنگ است [۵-۷]. اگرچه اندازه‌گیری زاویه تماس قطره متقارن روی سطوح افقی از روش‌های خط مماس، برازش چندجمله‌ای، تقریب کروی و روش مارپیچی در مراجع به تفصیل بررسی شده است [۸] ولی تعیین زاویه تماس برای قطره نامتقارن روی سطوح شیب‌دار و علی‌الخصوص دارای انحنا در حال حاضر عمدتاً از روش‌های مبتنی بر خط مماس انجام می‌شود که این روش‌ها به دلیل انتخاب نقاط و یا اتصال دو خط توسط کاربر از دقت و سرعت کافی برخوردار نیست [۸]. روش خط مماس در برخی مراجع [۹، ۶] با خطای بالا ۵ تا ۱۰ درجه و در بهترین حالت ۲ درجه گزارش می‌شود.

ماز و برنت [۱۰] رگرسیون غیرخطی به منظور برازش پروفایل قطره برای محاسبه زاویه تماس ارائه نمودند. در این روش، نقاط زیادی روی پروفایل قطره محاسبه می‌شود و سپس با استفاده از حداقل مربعات بین نقاط انتخاب شده و محاسبه شده، رابطه غیرخطی تعیین می‌شود. ریو و نیومن [۱۱] روش آنالیز قطره کروی با استفاده از حل رابطه لاپلاس به صورت عددی به منظور تعیین زاویه تماس را توسعه دادند. در این روش از یک دوربین به منظور تعیین ارتفاع و بیشینه قطر قطره استفاده می‌شود. موی^۲ و همکارانش [۱۲] و آوارز^۳ و همکارانش [۱۳] هر کدام به صورت جداگانه روش اصلاح شده‌ای برای آنالیز قطره متقارن ارائه دادند. در این روش، رابطه موئینگی لاپلاس برای قطره به صورت عددی حل می‌شود. ورودی این برنامه، اختلاف چگالی، بیشینه قطر قطره، ثابت گرانش، کشش سطحی و حجم قطره است. آنها با استفاده از دو دوربین، یکی به صورت موازی با قطره برای تعیین

ارتفاع و دیگری از بالا، برای تعیین بیشینه قطر قطره استفاده می‌شود. محققان زیادی [۱۶-۱۴] روش‌های تحلیلی برای تعیین پروفایل قطره متقارن ارائه دادند. این روش‌ها اکثراً از تئوری آشفتگی استفاده می‌کند و دارای محدودیت در محاسبه زاویه تماس هستند. آلاه^۴ و همکارانش [۱۷] روشی برای محاسبه زاویه تماس مایع ارائه دادند. آنها پس از عکس برداری از قطره، عکس‌ها را به منظور محاسبه کانتورهای قطره، دوتایی کردند. پس از دوتایی کردن، زاویه تماس از روش آنالیز قطره متقارن محاسبه می‌شود. آنها همچنین بر اساس روش گردابان جانسن و همکارانش که مبتنی بر اندازه‌گیری آنترپوی و تابع توزیع احتمال است، تصویر را دوتایی کردند. استالدر و همکارانش [۸] با استفاده از بهینه‌سازی تابع انرژی تصویر، یک تقریب معادله یانگ لاپلاس برای یافتن مرزهای قطره انجام دادند. همچنین از آشفتگی مرتبه یک برای حل تحلیلی معادله یانگ لاپلاس برای تخمین اولیه زاویه تماس و پروفایل قطره استفاده کردند. برخلاف مطالعات گسترده انجام شده در این زمینه، با توجه به اطلاعات کسب شده، هیچ‌گونه گزارشی در مورد اندازه‌گیری زاویه تماس در سطوح دارای انحنا و شیب‌دار با استفاده از پردازش تصویر ارائه نشده است.

یک اصل مشترک محاسبه زاویه تماس با استفاده از پردازش تصویر دوتایی سازی است. در مطالعات انجام شده روش‌های مختلفی برای بخش‌بندی تصاویر با استفاده از دوتایی کردن آنها ارائه شده است. روش‌های دوتایی‌سازی در گروه‌های مختلفی به شرح زیر دسته‌بندی می‌شوند:

- روش اتسو [۱۸] مبتنی بر آنالیز خوشه‌بندی بر مبنای واریانس تصاویر است.
- جانسن و همکارانش [۱۹] و کاپر و همکارانش [۲۰] روش‌هایی مبتنی بر آنترپوی ارائه دادند.
- ساولا و همکارانش [۲۱] و نیبلاک [۲۲] یک روش دوتایی‌سازی تصاویر بر مبنای واریانس تصاویر ارائه دادند.
- روش برنسن [۲۳] بر مبنای آستانه‌گیری مبتنی بر کنتراست تصاویر است.
- روش کیتلر [۲۴] خطای اندازه‌گیری در محاسبه آستانه بهینه را در نظر می‌گیرد.

در بسیاری از کاربردهای پردازش تصویر، پیکسل‌های سطوح خاکستری متعلق به شیء با پیکسل‌های سطوح خاکستری متعلق به پس‌زمینه، کاملاً متفاوت هستند. آستانه‌گیری ابزار مناسبی جهت جداسازی اشیا از پس‌زمینه است [۱۸]. دوتایی‌سازی تصویر فرآیند تقسیم تصویر به دو بخش سیاه (پیش‌زمینه یا همان شیء) و سفید (پس‌زمینه) است [۱۸]. روش آستانه‌گیری اتسو رایج‌ترین روش

4- Allah

1- Maze and Burnet

2- Moy

3- Alvarez

در این رابطه‌ها $c = \Delta\rho g / h$ ، θ زاویه تماس، x فاصله افقی از مبدأ، z فاصله عمودی از مبدأ، b انحنا، $\Delta\rho$ اختلاف چگالی، g شتاب گرانش و h فاصله نوک قطره از سطح تماس است و V_c حجم واقعی قطره است. برای زاویه تماس‌های بیشتر از ۹۰ درجه معادلات مشابه (۲)، (۳)، (۴) و (۵) هستند و تنها شرایط مرزی متفاوت است [۱۱]:

$$z(0) = \theta(0) = 0, \quad \theta(R) = \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

این رابطه‌های غیرخطی به صورت هم‌زمان حل می‌شوند. با استفاده از یک مقدار ثابت برای b و c ، یک شکل خاص لاپلاسی برای سطح تماس به دست می‌آید. برای حل این معادلات از روش رانک کاتای مرتبه چهارم استفاده شده است. اطلاعات بیشتر در مورد این روش می‌تواند در بسیاری از منابع پیدا شود [۲۷، ۱۴، ۱۲-۱۰، ۸]. از این روش به منظور محاسبه زاویه تماس قطره متقارن و مقایسه آن با روش اسپلین، استفاده شده است.

در این مطالعه، زاویه تماس قطره روی سطح برای سیال‌های مختلف به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری و عکس‌برداری شده است. تصاویر هر قطره با استفاده از روش اتسو دوتایی شده‌اند. الگوریتمی جدید برای تشخیص هم‌زمان پروفایل قطره و سطح تماس سه فاز آن ارائه شده و برازش اسپلین به منظور محاسبه زاویه تماس به کار برده شده است. همچنین تعدادی تصویر مصنوعی توسط نرم‌افزار گرافیکی ایجاد شده و اثر زاویه‌دار بودن و یا منحنی بودن سطح تماس بر محاسبه زاویه تماس قطره بررسی شده است. به منظور بررسی عدم تأثیرگذاری زبری و ناخالصی سطح بر تقارن قطره، پراش پرتو ایکس و تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی از سطح نمونه کلسیت گرفته شده است.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

۲-۱-۱- سیال‌ها

آب مقطر، اتیلن گلیکول، تری‌تان ایکس ۱۰۰ با فرمول شیمیایی $C_8H_{16}C_6H_4(OCH_2CH_2)_nOH$ و نفت سیاه به ترتیب با کشش سطحی ۷۲،۸، ۴۸، ۳۰ و ۴۰ میلی نیوتن بر متر به منظور تعیین زاویه تماس روی سطح کلسیت در حضور هوا به عنوان فاز سوم، استفاده شده است. کشش سطحی سیالات با استفاده از روش دانوی^۲ اندازه‌گیری شد. این روش به دلیل در دسترس بودن، هزینه کم و روش اندازه‌گیری آسان و سریع به روش‌های دیگر ترجیح داده می‌شود [۲۸]. سیال‌ها با کشش سطحی مختلف برای اندازه‌گیری زاویه تماس‌های متفاوت

مورد استفاده برای دوتایی سازی تصاویر است [۲۵]. منظور از به حداقل رساندن گسترش پس‌زمینه و پیش‌زمینه، در واقع همان حداقل کردن واریانس بین دسته‌های است [۲۵]. این روش شامل تخمین و تکرار تمام مقادیر آستانه احتمالی و محاسبه‌ی میزان گسترش برای سطوح پیکسلی است تا مشخص شود که پیکسل موردنظر در پیش‌زمینه یا پس‌زمینه قرار دارد [۲۵]. هدف این است که مقدار آستانه بهینه به‌گونه‌ای پیدا شود که در آن مجموع گسترش پیش‌زمینه و پس‌زمینه به حداقل برسد [۱۸]. انتخاب یک آستانه مناسب از سطح خاکستری برای استخراج اشیاء از پس‌زمینه آنها مهم است [۱۹].

پس از پردازش تصویر، به دلیل مشخص شدن ماتریس قطره، محاسبه زاویه تماس به روش‌های مختلفی امکان‌پذیر است. در این مقاله تنها دو روش اصلی درون‌یابی و لاپلاس که دارای دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها است، بررسی می‌شود. در بین روش‌های درون‌یابی، یکی از قوی‌ترین روش‌ها، اسپلین مکعبی^۱ است. از مزایای این روش، عدم تغییر خروجی تابع در داده‌های ورودی است اما سایر روش‌های درون‌یابی، دارای انحراف از مقدار خروجی هستند. در واقع بین هر دو داده، یک نمودار درجه سوم عبور داده می‌شود. از ویژگی این نمودارها پیوستگی، شیب و انحنای برابر در داده‌های ورودی است [۲۶]. از روش درون‌یابی اسپلین مکعبی به منظور درون‌یابی و محاسبه مشتق در سطح تماس و زاویه تماس متناظر، استفاده شده است.

روش آنالیز قطره متقارن روشی برای محاسبه زاویه تماس با استفاده از پروفایل قطره است [۲۷]. مبنای این روش برازش عددی بین قطره تجربی و مدل ریاضی (رابطه کلاسیک لاپلاس موینگی) است [۱۳]. همچنین در بازه وسیعی از کشش سطحی و برای سیالات مختلف قابل استفاده است [۱۱]. رابطه لاپلاس، شرط تعادل مکانیکی است که برای دو سیال همگن جدا شده توسط یک سطح به دست می‌آید [۲۷]. رابطه لاپلاس برای محاسبه زاویه تماس زیر ۹۰ درجه به صورت روابط ۲-۶ تعیین می‌گردد [۱۱].

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{1}{\cos\theta} (2b + cz - \frac{\sin\theta}{x}) \quad (2)$$

$$\frac{dz}{dx} = \tan\theta \quad (3)$$

$$\frac{dv}{dx} = \pi x^2 \tan(\theta) \quad (4)$$

$$\frac{db}{dx} = 0 \quad (5)$$

$$z(0) = \theta(0) = 0, \quad V(R) = V_c \quad (6)$$

هم‌خوانی دارند.

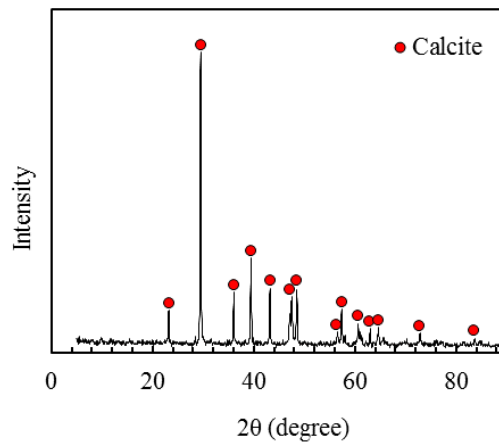
انتخاب سنگ خالص کلسیت این امکان را فراهم می‌کند که زاویه تماس قطره‌ای که روی این سطح قرار می‌گیرد دارای تقارن محوری باشد. ناخالصی و ناهمگونی شیمیایی سطح، موجب عدم تقارن قطره و تغییر زاویه تماس می‌شود. دلیل این پدیده، تغییر خط تماس سه فاز است [۳۱، ۳۲]. در واقع، هنگامی که یک قطره روی سطح با ناهمگونی شیمیایی قرار می‌گیرد، موجب تغییر خط تماس سه فاز و عدم تقارن قطره تماس می‌شود [۳۳-۳۵].

علاوه بر ناهمگونی شیمیایی، زبری سطح عامل دیگر است که می‌تواند موجب انحراف خط تماس سه فاز از حالت متقارن شود [۳۶]. در صورت نامتقارنی قطره، رابطه یانگ لاپلاس نمی‌تواند بر قطره برآش شود [۱۱]. در این مطالعه به منظور کاهش زبری، سطح با استفاده از صفحه سیلیکون کاربید با مش ۶۰۰ صیقل داده شده است.

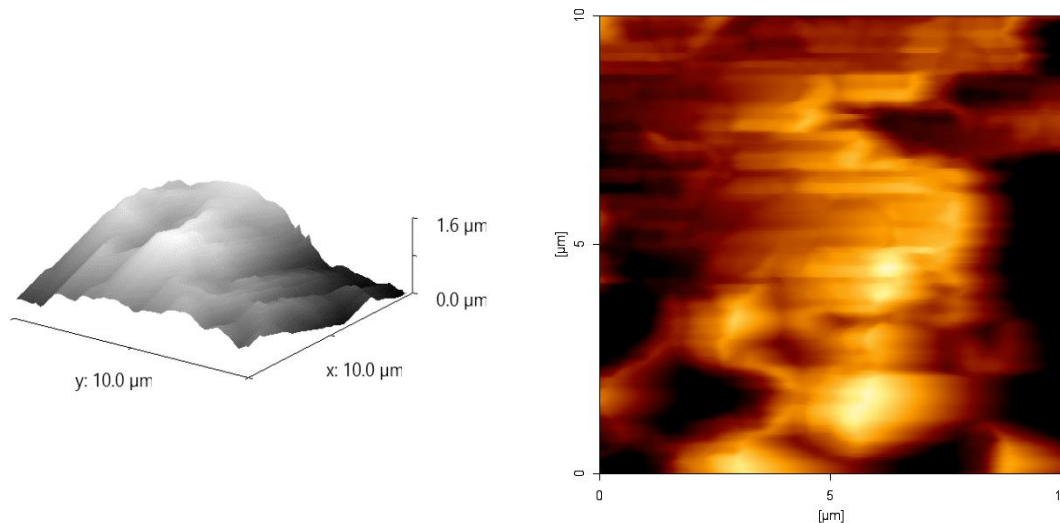
استفاده شده است. به‌طور معمول قطره سیال با کشش سطحی کمتر، دارای زاویه تماس کمتر روی سطح است [۲۹، ۳۰]. چهار مایع با مقادیر متفاوت کشش سطحی به‌منظور تشکیل زوایای تماس مختلف و در نتیجه تصاویری متفاوت استفاده شده است تا امکان مقایسه نتایج بیشتر از روش عددی توسعه داده شده با نرم‌افزارهای موجود فراهم شود. به دلیل حجم زیاد کار، از آوردن مثال‌های بیشتر جلوگیری شده است و تنها چند نمونه زاویه تماس گزارش شده است.

۲-۱-۲- سطح

نمونه‌های سنگ کلسیت مورد استفاده در این مطالعه از معدن الیگودرز تهیه شده است. سپس نمونه‌های در ابعاد $10 \times 10 \times 2$ سانتی‌متر مکعب برش داده شدند. پراش پرتو ایکس نمونه در شکل ۱ نشان می‌دهد که همه قله‌های مشاهده شده با سنگ کلسیت خالص



شکل ۱: پراش پرتو ایکس نمونه سنگ کربناته مورد استفاده.



شکل ۲: تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی. تصویر سمت چپ) نمای سه‌بعدی حاصل از میکروسکوپ نیروی اتمی سطح کلسیت است. سطح واقعی نمونه ۱۱۹،۸۸ میکرومتر مربع است. سطح ظاهری نمونه کلسیت ۱۰۰ میکرومتر مربع است. تصویر سمت راست) نشان‌دهنده نمای بالای سطح کلسیت است.

نمونه کلسیت قرار داده شد. عکس‌برداری از قطره، ۲۰ ثانیه بعد از قرار دادن قطره روی سطح توسط دوربین میکروسکوپی داینو^۲ انجام شده است. این دستگاه موجب ایجاد دو رنگ متمایز سیاه و سفید در تصاویر گرفته شده می‌شود.

۲-۲-۱- نرم‌افزار ایمیج جی^۳

مقایسه نتایج حاصل از روش توسعه داده شده برای نمونه‌های متقارن با نرم‌افزار ایمیج جی مقایسه شده‌اند. این نرم‌افزار قابلیت اندازه‌گیری زاویه تماس قطرات متقارن را با روش ال‌بی‌ای‌دی‌اس‌ای^۴ دارد. برای تعیین زاویه تماس در این نرم‌افزار ابتدا گوشه‌های تصویر شناسایی می‌شود (این روش برای سطوح زبر که تشخیص قطره برای روش‌های دوتایی سخت است، استفاده می‌شود) سپس تصویر مربوطه دوتایی شده و منحنی لاپلاس بر قطره برازش می‌شود. مراحل انجام این کار برای این نرم‌افزار در شکل ۴ آمده است.

۲-۲-۲- روش دوتایی کردن

روش اتسو پیاده شده در متلب R2017b در این مطالعه به‌منظور دوتایی کردن استفاده شده است. این روش، در تشخیصی اشیاء هنگامی که نسبت شیء به عکس پس‌زمینه کوچک باشد، به‌خوبی عمل می‌کند [۳۷]. پس از دوتایی کردن تصویر توسط این روش، یک ماتریس دوتایی خروجی تابع اتسو است.

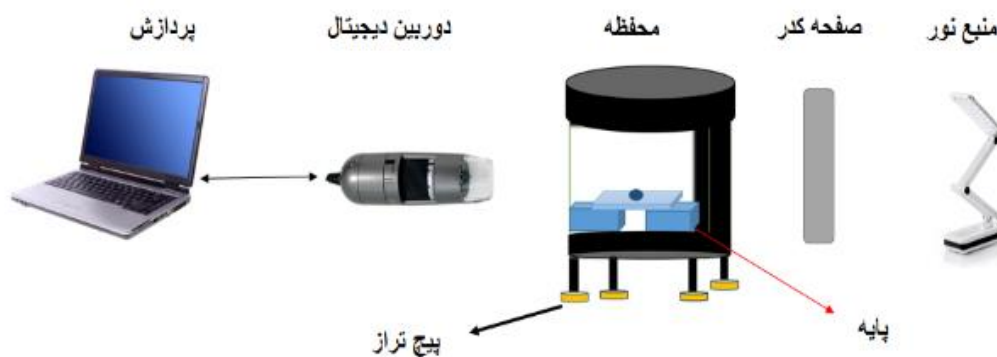
- 1- Atomic force microscopy
- 2- Dino
- 3- ImageJ
- 4- LB-ADSA

زبری سنگ به‌وسیله میکروسکوپ نیروی اتمی^۱ اندازه‌گیری شده است. تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی سطح کلسیت با استفاده از دستگاه فمتواسکن در حالت تماسی تهیه شده است. تصویر سمت راست و چپ شکل ۲ به ترتیب نشان‌دهنده نمای بالای و نمای سه-بعدی سطح کلسیت است. سطح واقعی نمونه ۱۱۹،۸۸۹ میکرومتر مربع و سطح ظاهری نمونه کلسیت ۱۰۰ میکرومتر مربع است. نسبت سطح واقعی به ظاهری کمتر از ۱،۲ است. این مقدار نشان‌دهنده سطح نسبتاً صاف کلسیت به‌منظور آنالیز زاویه تماس است. همچنین نبود نامتقارنی در تصاویر ثبت شده نشان از عدم تأثیرگذاری زبری بر تقارن قطره در دو بعد است.

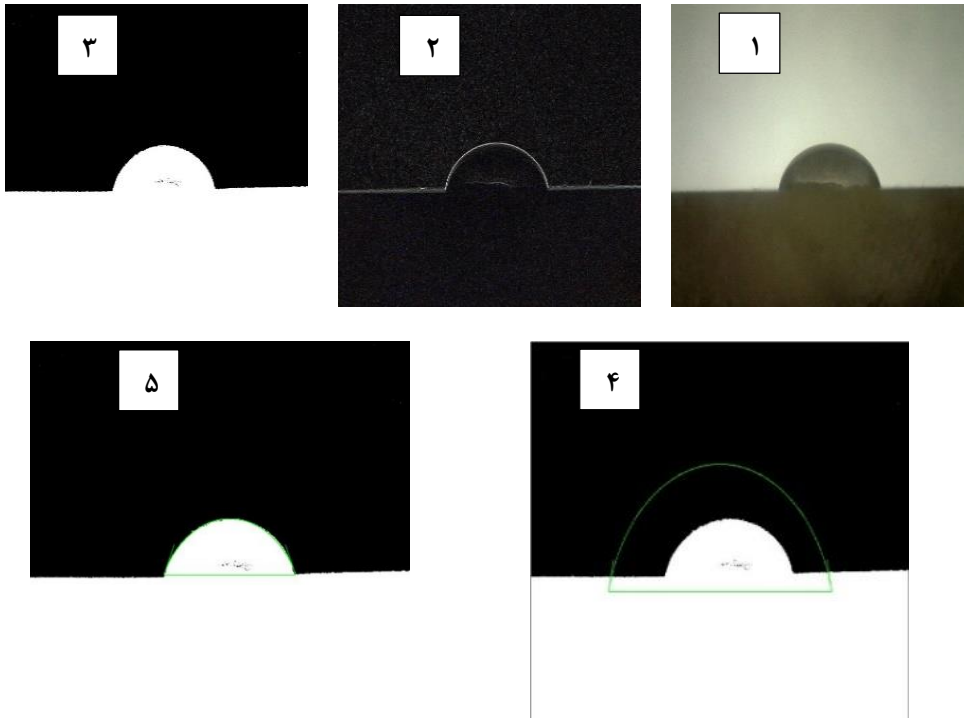
سطح کلسیت و کیفیت آن به‌منظور ایجاد قطرات متقارن برای بررسی دقت روش توسعه داده شده نسبت به سایر روش‌های آنالیز پروفایل قطره متقارن (لاپلاس) مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۲-۲- روش کار

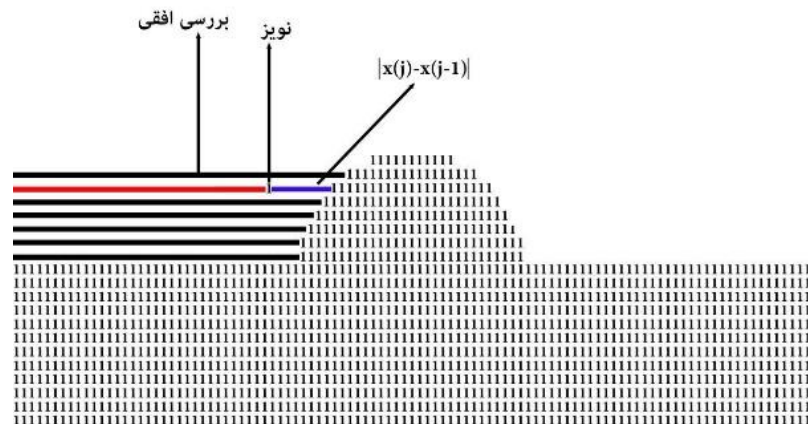
شمای دستگاه آزمایشگاهی در شکل ۳ نشان داده شده است. استفاده از این دستگاه به‌منظور جلوگیری از تأثیر جریان هوا درون آزمایشگاه بر شکل قطره و ایجاد تصویر باکیفیت بالا به‌منظور دوتایی کردن، است. محفظه مورد استفاده در دستگاه دارای دو جداره شیشه‌ای، یکی به‌منظور عکس‌برداری و دیگری برای تابش نور از پشت تصویر است. نور تابیده شده از یک صفحه کدر عبور داده می‌شود تا به‌صورت همگن باشد. نمونه کلسیت از طریق درب تعبیه شده در قسمت بالای دستگاه، درون محفظه قرار می‌گیرد. از تراز حبایی برای بررسی تقارن محوری سطح نمونه استفاده شده است. برای اندازه‌گیری زاویه تماس، توسط قطره‌چکان یک قطره ۱۰ میکرو لیتری از سیال مورد نظر روی سطح



شکل ۳: شمای دستگاه مورد استفاده برای عکس‌برداری از قطره به‌منظور محاسبه زاویه تماس.



شکل ۴: تعیین زاویه تماس با استفاده از روش ال‌بی‌ای‌دی‌اس‌ای. (۱) تصویر ثبت شده، (۲) لبه یابی، (۳) دوتایی کردن تصویر، (۴) و (۵) برازش رابطه لاپلاس به قطره شناسایی شده.



شکل ۵: شماتیک تصویر دوتایی شده قطره به منظور تشخیص محل تماس سه فاز و محاسبه زاویه تماس و پروفایل قطره با استفاده از آنالیز افقی.

به‌عنوان مرز شناخته می‌شوند که دارای شرایط زیر باشند:

$$f(i, j) - f(i, j-1) = 1 \quad (9)$$

$$|y(i) - y(i-1)| < \varepsilon \quad (10)$$

که y ارتفاع پیکسلی است. این دو شرط اساسی تعیین نقاط مرزی برای سطح تماس است، برای بررسی نقاط دارای این شرایط، ماتریس متناظر به صورت عمودی و افقی مورد بررسی قرار گرفته و

۲-۲-۳- تعیین نقاط مرزی سطوح تماس

ماتریس تشکیل‌دهنده تصویر دوتایی شده، f ، در واقع نتایج حاصل از تابع زیر است:

$$f(i, j) = \begin{cases} 0 & (i, j) \in C_b \\ 1 & (i, j) \in C_o \end{cases} \quad (8)$$

که، i و j به ترتیب درایه سطری و ستونی ماتریس متناظر با عکس، C_b پس‌زمینه و C_o شیء (در اینجا قطره) است. نقاطی

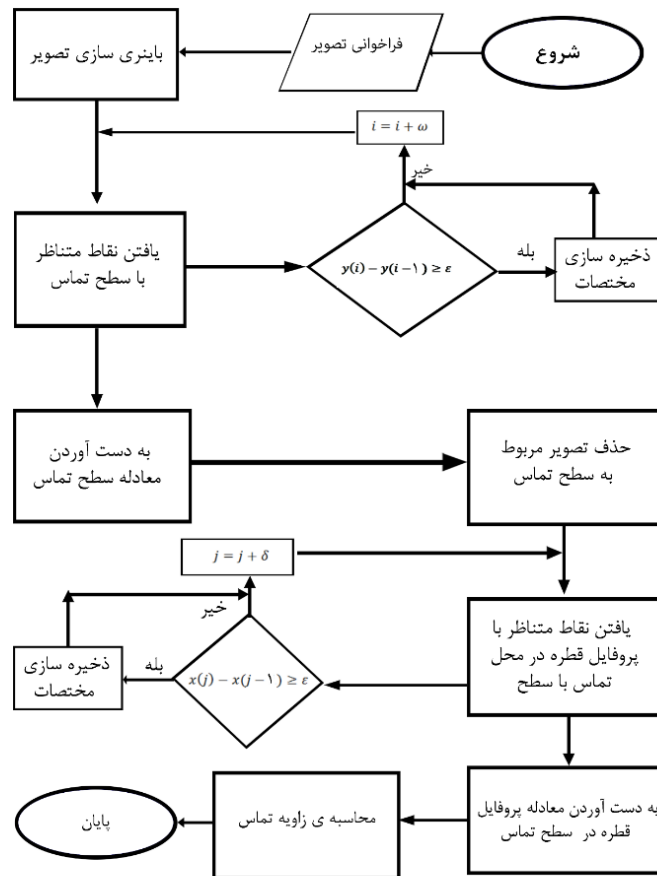
باشند. این دو شرط اساسی به منظور تعیین نقاط مرزی برای قطره است. برای استخراج پروفایل قطره، ماتریس متناظر به صورت افقی مورد بررسی قرار گرفته می‌شود. این عمل به صورت شمایی در شکل ۵ نشان داده شده است. بررسی در راستاهای افقی و عمودی می‌تواند با نرخ صعود دلتا (δ) آغاز انجام شود. حداقل نرخ صعود ۱ پیکسل است. همانند بخش ۰ برای جلوگیری از ورود داده‌های نامتعارف و دارای نویز یک ضریب خطای ϵ برای اعتبارسنجی داده‌ها استفاده شده است. در شکل ۶ روند نمای^۱ تعیین پروفایل قطره و سطح تماس به منظور اندازه‌گیری زاویه تماس نشان داده شده است.

مختصات متناظر اولین نقطه ذخیره شده و سپس مرحله بعدی بررسی در راستای عمودی و افقی به ترتیب با نرخ صعود ثابت ω و دلتا (δ) آغاز می‌شود. برای جلوگیری از ورود داده‌های نامتعارف از قبیل نویز و نقاط پراکنده، ضریب خطای ϵ برای اعتبارسنجی داده‌ها، استفاده شده است. در واقع مختصات نقاط ذخیره شده نمی‌تواند داران نوسانی بیشتر از حد خطا باشد. با به دست آمدن نقاط مرزی، معادله حاکم بر آن از طریق روش‌های عددی محاسبه می‌شود.

۴-۲-۲- شناسایی پروفایل قطره

همان‌طور که گفته شد ماتریس تشکیل‌دهنده تصویر دوتایی شده در واقع نتایج حاصل از تابع $f(i, j)$ است. نقاطی به عنوان پروفایل قطره در نظر گرفته می‌شوند که دارای شرایط مشابه رابطه‌های ۹ و ۱۰

1- Flowchart



شکل ۶: روند نمای تشخیص پروفایل قطره روی سطح.

نقاط مرزی، با پیدا نمودن نقاط بحرانی در تغییرات شیب می‌توان نقاط تماس سه فاز را پیدا نمود. منظور از نقطه بحرانی، پیکسلی است که تغییرات شیب در همسایگی چپ و راست آن دارای مقادیر متفاوتی است. به عبارت دیگر نقاطی از مجموعه‌ی نقاط مرزی قطره که در فاز دوم به دست آمده و در رابطه به دست آمده از فاز اول نیز صدق می‌کنند و دارای کم‌ترین و بیشترین عرض مختصاتی (x) هستند را می‌توان به عنوان نقاط سه فاز در نظر گرفت. قابل ذکر است تمامی محاسبات مربوط به الگوریتم برای محاسبه زاویه تماس در نرم‌افزار متلب R2017b انجام شده است.

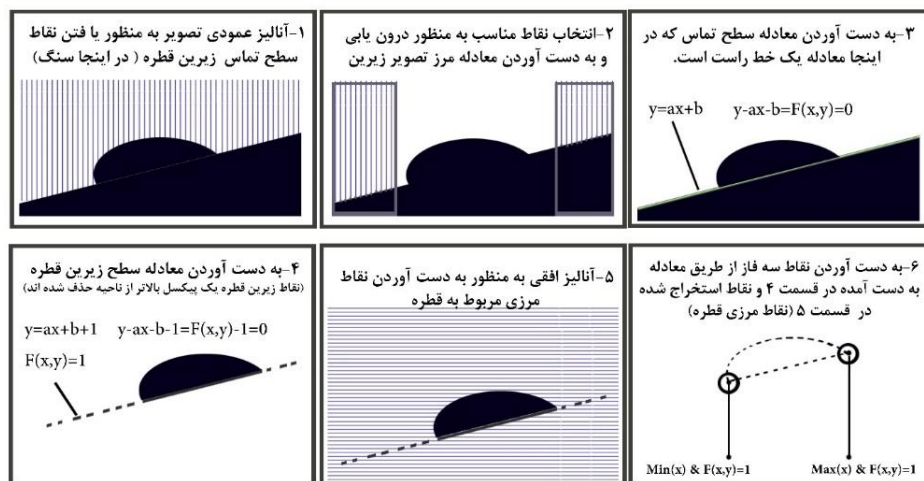
فرآیند حذف سطح بدین صورت است که با فرض یکنواخت بودن رفتار سطح (سطح دارای انحنای ثابت است) به منظور جلوگیری از ایجاد خطا، محدوده‌ای در تصویر همانند شکل ۸ برای تشخیص سطح تماس و سپس حذف آن، بررسی می‌شود. این محدوده با به دست آوردن ناحیه تغییرات شیب بعلاوه یک حاشیه اطمینان معین می‌شود. به عنوان مثال در شکل ۸ اگر مبدأ مختصات گوشه پایین سمت چپ تصویر در نظر گرفته شود، با آنالیز عمودی ماتریس دوتایی از سمت چپ، سطح با شیب ثابتی در حال افزایش است، ناگهان در محل نزدیک پروفایل قطره، یک تغییر شیب برای سطح مشاهده می‌شود. با تکرار آنالیز از سمت راست، محدوده‌ای که قطعاً قطره در آن قرار ندارد، حاصل می‌شود. با آنالیز این محدوده، سطح تماس به دست می‌آید. پس از حذف سطح تماس و محدوده پایین‌تر از آن، تنها شی باقی‌مانده در تصویر همان قطره است. پایین‌ترین نقطه شی تشخیص داده شده در یک آنالیز افقی، نقطه تماس سه فاز اول و نقطه دیگر در محل تغییر انحنای شیب است.

مراحل الگوریتم به شرح زیر است:

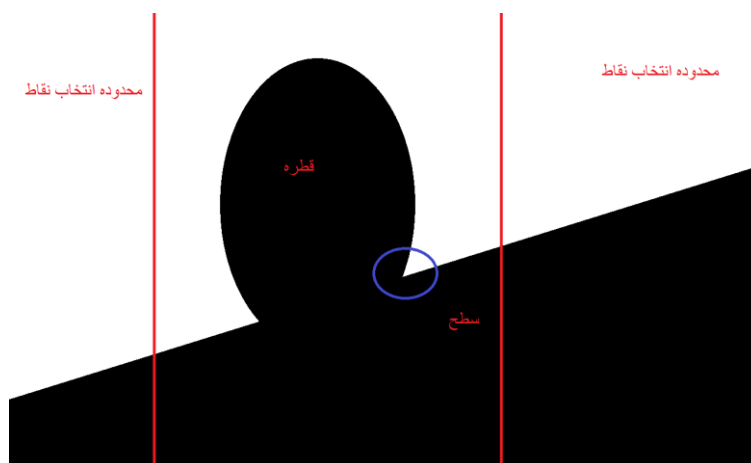
- فراخوانی تصویر
- آستانه‌گیری و دوتایی کردن تصویر با استفاده از روش اتسو
- آنالیز عمودی ماتریس متناظر تصویر به منظور یافتن پیکسل‌های تشکیل‌دهنده سطح تماس و حذف نقاط حاصل از نویز
- استفاده از روش عددی برای محاسبه معادله حاکم بر سطح تماس، این بخش در صورتی که سطح تماس غیر افقی و یا منحنی است، انجام می‌شود
- حذف تصویر مربوط به سطح تماس به منظور جلوگیری از ایجاد اختلال در مراحل بعد و کوچک‌تر کردن ماتریس تصویر
- آنالیز افقی تصویر به منظور یافتن نقاط تشکیل‌دهنده سطح خارجی قطره و حذف نقاط حاصل از نویز
- محاسبه زاویه تماس از طریق روش‌های عددی

۲-۲-۵- تعیین نقطه سطح تماس سه فاز (جامد-سیال-سیال)

برای محاسبه زاویه تماس، نیاز به تعیین دقیق سطح تماس سه فاز به منظور محاسبه مشتق در پیکسل مربوطه است. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، از آنجایی که فرآیند شناسایی مرزها به این صورت است که در فاز ابتدایی، تصویر و معادله حاکم بر نقاط مرزی سطح زیر قطره (در این مطالعه منظور سنگ است) شناسایی و حذف می‌شود، بنابراین در فاز ثانویه تصویر مربوط به یک قطره باقی می‌ماند که رابطه قسمت زیرین این قطره از فاز اول مشخص شده است. رابطه سطح زیرین قطره همواره یک پیکسل نسبت به رابطه به دست آمده در فاز اول بالاتر است و این شرط در رابطه‌ها لحاظ شده است. با انجام آنالیز افقی بر روی قطره و به دست آوردن کلیه



شکل ۷: الگوریتم شناسایی نقاط سطح تماس سه فاز برای یک سطح شیب‌دار به صورت شماتیک.



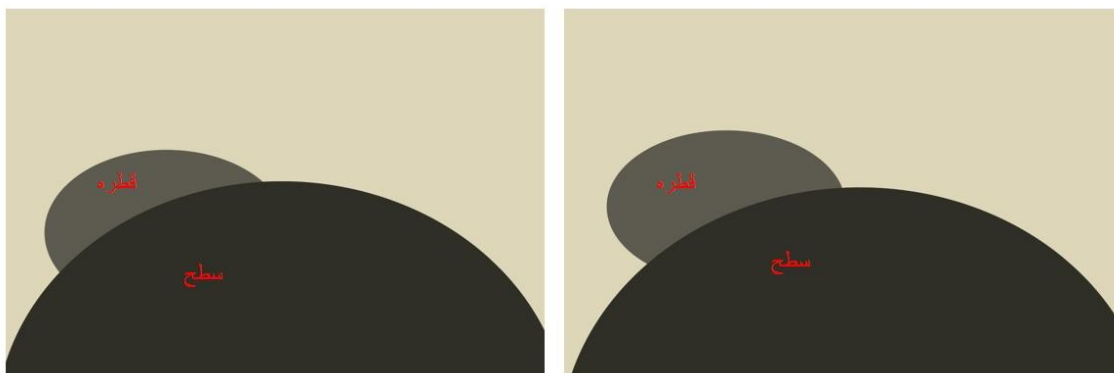
شکل ۸: محدوده بررسی شده برای تشخیص سطح تماس و سپس حذف آن از تصویر مربوطه.

انتخاب دستی نقاط پروفایل قطره، این امکان فراهم است که برای سطوح غیر افقی و انحنادار زاویه تماس قطره نامتقارن محاسبه شود. اما در تصاویر واقعی به دلیل اینکه این روش به کاربر و دقت آن در انتخاب نقاط بستگی دارد، وقت‌گیر و دارای خطای انسانی در محاسبات است. در روش توسعه داده‌شده، با توجه به اینکه تمام محاسبات توسط کامپیوتر انجام می‌شود، خطای انسانی حذف شده است. مشخص است که نتایج این بخش نشان‌دهنده توانایی این روش برای محاسبه زاویه تماس در سطوح شیب‌دار است. در صورت لزوم، مثال‌های بیشتر از سطوح شیب‌دار و دارای انحنا می‌تواند در اختیار قرار گیرد. قابل‌ذکر است در صورتی که از تصاویر واقعی استفاده شود به دلیل وجود نویز در تصاویر، دوتایی شدن تصویر موجب خطا در محاسبه زاویه تماس و همچنین تشخیص محل تغییر شیب سطح برای تعیین خط تماس سه فاز می‌شود. این الگوریتم برای زاویه تماس‌های کمتر از ۱۰ درجه برای تصاویر واقعی به دلیل دشوار بودن تعیین محل تغییر شیب قابل استفاده نیست.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- داده‌های مصنوعی

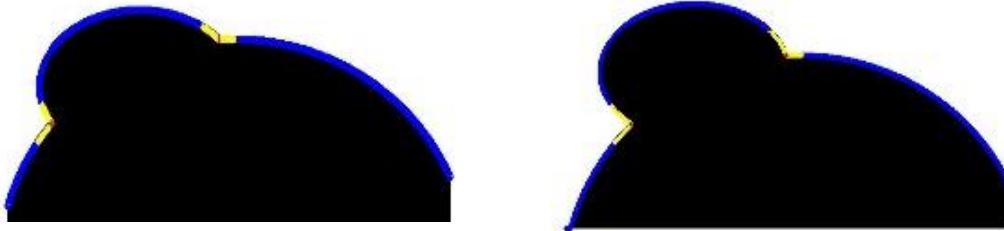
شکل ۹ تصویر مصنوعی به‌منظور بررسی و اعتبارسنجی روش برای اندازه‌گیری زاویه تماس در سطوح غیرافقی را نشان می‌دهد. در این تصویر قسمت مشکی سطح مورد نظر و قسمت خاکستری قطره است. در شکل ۱۰ مرز تشخیص داده‌شده توسط برنامه و سطح تماس سه فاز نمایش داده شده است. همان‌طور که گفته شد، این مرز از طریق تغییر شیب سطح منحنی به دست می‌آید. شناسایی این تغییر به کمک ماتریس دوتایی شده تصویر انجام می‌شود. در جدول ۱ خروجی برنامه توسعه داده‌شده با کمک روش مشتق در محل تماس سه فاز با روش محاسبه زاویه تماس خط مماس مقایسه شده است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که زاویه تماس این قطرات در نرم‌افزار گرافیکی به‌گونه‌ای مشخص، ساخته شده است که دارای زاویه تماس با اندازه‌گیری دقیق توسط روش خط مماس باشد. در واقع نتایج حاصل از خط مماس دقیقاً برابر زاویه تماس ساخته‌شده در نظر گرفته شده است. روش خط مماس به دلیل



شکل ۹: نمونه‌ای از تصاویر مصنوعی ساخته‌شده به‌منظور بررسی اثر سطح منحنی بر محاسبه زاویه تماس.

جدول ۱: مقایسه زاویه تماس قطره مصنوعی روی سطح انحنا دار به منظور اعتبار سنجی الگوریتم پیشنهادی.

شکل ۱۰	الگوریتم پیشنهادی (مشتق)	روش خط مماس به عنوان روش مرجع
سمت راست	زاویه سمت چپ ۷۶,۸۷	زاویه سمت چپ ۷۵,۹۶
	زاویه سمت راست ۶۰,۵۶	زاویه سمت راست ۵۹,۰۴
سمت چپ	زاویه سمت چپ ۸۸,۹۶	زاویه سمت چپ ۹۰
	زاویه سمت راست ۴۵,۴۶	زاویه سمت راست ۴۵



شکل ۱۰: تشخیص دقیق مرز و سطح تماس سه فاز توسط برنامه توسعه داده شده.

نمای جانبی یک قطره روی سطح کلسیت برای زاویه دوربین با سطح کلسیت در تصویر سمت راست و چپ به ترتیب صفر و نامشخص است. زاویه تماس محاسبه شده با استفاده از روش پیشنهادی برای هر دو تصویر مقدار یکسان ۶۴,۹ را دارد.

همکارانش [۸] در سطوح افقی توسعه داده شده است. نتایج نشان دهنده تطابق زاویه تماس‌های محاسبه شده است. شکل ۱۱ یک نمونه مقایسه بین پروفایل قطره شناسایی شده توسط برنامه توسعه داده شده و قطره واقعی است. این تصاویر بعد از تشخیص دقیق پروفایل قطره با حذف سطح تماس به دست آمده است. در پایان تصویر باقی مانده که تصویر یک قطره است را بر روی تصویر اولیه انداخته و خروجی نمایش داده شده است.

۳-۲- داده‌های آزمایشگاهی

داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده، برای سیالات آب مقطر، نفت، تری‌تان و اتیلن گلیکول در جدول ۲ آمده است. این داده‌ها به منظور اعتبارسنجی روش و بررسی دقت آن برای قطراتی که روی سطوح افقی قرار می‌گیرند، ایجاد شده است. خروجی برنامه توسعه داده شده (مشتق و لایپلاس) با روش محاسبه زاویه تماس ال‌بی‌ای‌دی‌اس‌ای مقایسه شده است. روش ال‌بی‌ای‌دی‌اس‌ای به منظور محاسبه زاویه تماس توسط استالدرد

جدول ۲: زاویه تماس قطره سیالات مختلف روی سطح کلسیت به منظور اعتبارسنجی روش به کار برده شده.

سیال	الگوریتم پیشنهادی (مشتق)	الگوریتم پیشنهادی (لاپلاس)	روش ال‌بی‌ای‌دی‌اس‌ای به عنوان روش مرجع
آب مقطر	۵۸,۰۱۲	۵۹,۶۲۴	۵۷,۵۸۷
نفت	۱۷,۱۵۵	۱۹,۱۰۳	۱۸,۲۳۷
تری‌تان	۹,۱۰۲	۷,۷۴۰	۸,۸۶۵
اتیلن گلیکول	۴۵,۸۲۲	۴۵,۵۸۵	۴۶,۸۴۶



شکل ۱۱: مقایسه تصویر واقعی و تصویر پردازش شده، سمت راست) انطباق تصویر پردازش شده روی تصویر واقعی و سمت چپ) تصویر واقعی.

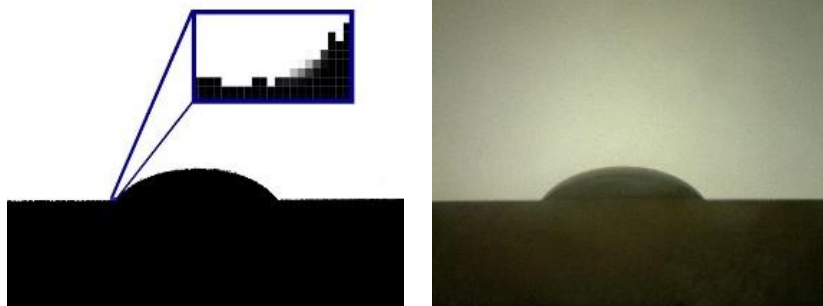
۳-۳- اثر تعداد پیکسل بر زاویه تماس

همان‌طور که از شکل ۱۲ مشخص است، تصاویر دوتایی در محل تماس سه فاز، دارای کیفیت پایینی هستند، این مشکلات در تصاویری با کیفیت کم و یا نور نامناسب محیط موجب ایجاد تصاویر دوتایی ضعیف می‌شود. استفاده از یک پیکسل به منظور محاسبه شیب خط و زاویه تماس متناظر موجب وابستگی شدید به کیفیت تصاویر و تشخیص محل تماس سه فاز دارد.

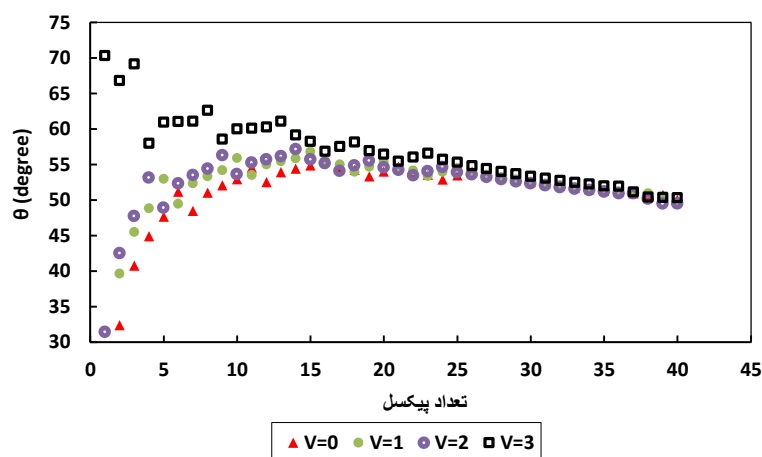
در شکل ۱۳ اثر تعداد پیکسل انتخاب شده به منظور محاسبه مشتق در محاسبه زاویه تماس برای یک نمونه تصویر آزمایشگاهی نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، محاسبه مشتق در بیش از ۵ پیکسل، موجب کاهش اثر نویز و همچنین کاهش اثر انتخاب محل سطح تماس (v) بر زاویه تماس می‌شود. افزایش بیش از حد تعداد پیکسل در محاسبه زاویه تماس، موجب کاهش دقت محاسبات می‌شود. انتخاب سطح تماس سه فاز در سه پیکسل بالاتر از سطح تماس تشخیص داده شده ($v=3$) در صورت محاسبه مشتق در چند نقطه و میانگین‌گیری تأثیر کمی بر محاسبات دارد. قابل ذکر است این اثر برای ۱۰ نمونه مختلف بررسی شده و نتایج تقریباً مشابه‌ای حاصل شده است.

۳-۴- اثر تعداد پیکسل‌های برای برازش اسپلاین

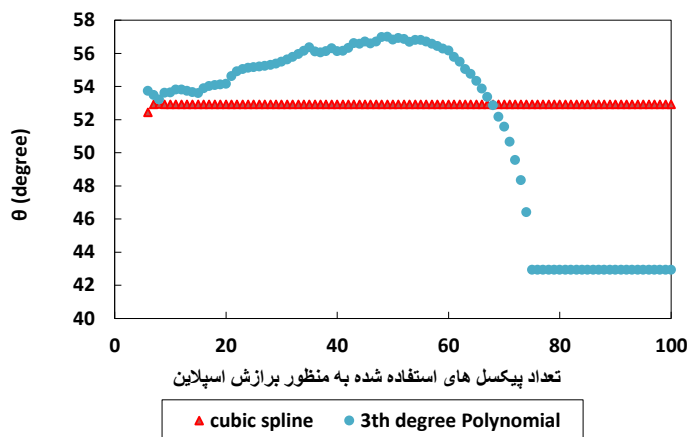
به منظور بررسی تعداد پیکسل مورد نیاز برای برازش اسپلاین به منظور محاسبه زاویه تماس، قطرات مصنوعی و واقعی بین زاویه تماس ۱۰ تا ۱۷۰ درجه مطالعه شدند. برای همه موارد، زاویه تماس محاسبه شده نسبت به تعداد پیکسل مورد استفاده برای برازش اسپلاین مکعبی رسم شدند. همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است با افزایش تعداد پیکسل مورد استفاده برای برازش اسپلاین مکعبی، نمودار زاویه تماس به یک مقدار ثابت میل می‌کند. واضح است که برازش اسپلاین به تعداد پیکسل کمتر از ۱۰، موجب تفاوت در محاسبه زاویه تماس می‌شود. دلیل این تفاوت می‌تواند در تشخیص نامناسب محل خط تماس سه فاز و همچنین مرز قطره بر منحنی اسپلاین باشد. این نمودار همچنین تعداد پیکسل مورد نیاز برای محاسبه زاویه تماس از روش درونیایی چندجمله‌ای درجه ۳ را با روش اسپلاین مکعبی مقایسه می‌کند. واضح است که درونیایی اسپلاین به دلیل یکسان بودن مقادیر خروجی در مقدارهای ورودی داده شده و همچنین برابری مشتق چپ و راست نسبت به چندجمله‌ای درجه ۳، وابستگی کمتری به تعداد پیکسل برای برازش دارد.



شکل ۱۲: تصویر سمت راست) عکس برداری از قطره توسط میکروسکوپ داینو و تصویر سمت چپ) تصویر دوتایی شده توسط روش اتسو.



شکل ۱۳: بررسی اثر تعداد پیکسل برای محاسبه مشتق بر زاویه تماس. مثلث توپر، دایره توپر، دایره توخالی و مربع توخالی به ترتیب نشان‌دهنده محاسبه مشتق در سطح تماس، یک پیکسل بالاتر از سطح تماس، دو پیکسل بالاتر از سطح تماس و سه پیکسل بالاتر از سطح تماس است. زاویه تماس محاسبه شده از نرم‌افزار ایمیج جی برابر ۵۵٫۸۹ درجه است.



شکل ۱۴: نمونه‌ای از رفتار زاویه تماس محاسبه شده نسبت به تعداد پیکسل استفاده شده به منظور برازش اسپلاین برای نمونه‌های مصنوعی ساخته شده با زاویه تماس ۵۱ درجه و مقایسه آن با روند تغییرات زاویه تماس با تعداد پیکسل برازش شده برای برازش چندجمله‌ای درجه دو.

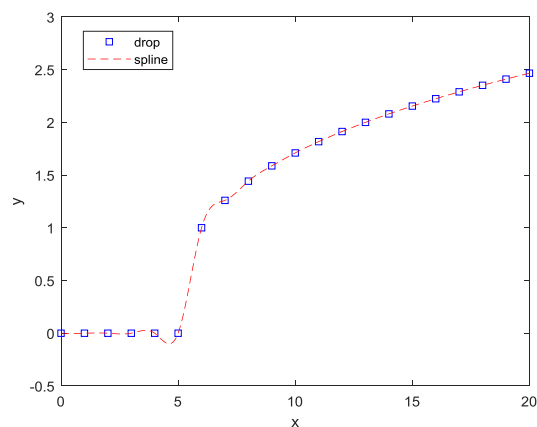
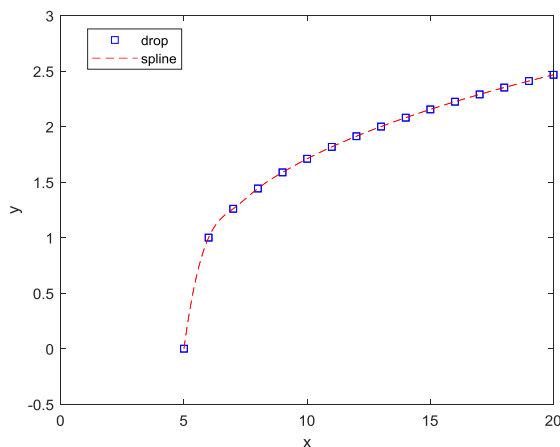
روش توسعه داده شده در این مطالعه، زاویه تماس محلی را در اختیار می‌دهد. در واقع برای سطوح واقعی این دو روش تفاوت دارند. روش‌های درون‌یابی دیگر استفاده شده، به تعیین محل دقیق نقطه سه‌گانه، به عبارت دیگر محل تماس سه فاز، وابستگی زیادی دارد. در این روش‌ها، زاویه تماس با استفاده از مشتق در محل تماس از سطح تماس محاسبه می‌شود. اما در روش توسعه داده شده، مشتق به صورت مرکزی و با استفاده از چند پیکسل گرفته می‌شود که موجب کاهش اثر وابستگی زاویه تماس به تعیین محل دقیق نقطه سه‌گانه می‌شود. این روش همانند سایر روش‌های مبتنی بر درون‌یابی، هیچ‌گونه محدودیتی از قبیل شکل لاپلاسی قطره، تقارن قطره، سطح آرمانی و اطلاعات وزنی سیال مانند اختلاف چگالی و نیروی گرانش برای محاسبه زاویه تماس ندارد.

۳-۵- اثر سطح تماس بر برازش اسپلاین

در صورتی که علاوه بر پروفایل قطره، سطح تماس وارد محاسبات زاویه تماس بشود، برابری مشتق چپ و راست می‌تواند در محاسبه زاویه تماس ایجاد خطا کند. شکل ۱۵ نمونه‌ای از ایجاد خطا در محاسبات به علت استفاده از سطح تماس در محاسبات زاویه تماس است. تصویر سمت راست شکل ۱۵، نشان‌دهنده برازش اسپلاین بر پروفایل قطره و سطح است اما در تصویر سمت چپ شکل ۱۵ منحنی اسپلاین تنها بر پروفایل قطره برازش شده است.

۳-۶- تحلیل

روش آنالیز قطره متقارن تمام پروفایل قطره را برای محاسبه زاویه تماس بررسی می‌کند. فرضیات این روش: سطح آرمانی (صاف و بدون ناهمگونی شیمیایی)، شکل لاپلاسی و تقارن محوری قطره است.



شکل ۱۵: برابری مشتق چپ و راست و تأثیر آن بر برازش اسپلاین استفاده شده به منظور محاسبه زاویه تماس. تصویر سمت راست) برازش منحنی اسپلاین بر سطح و قطره، تصویر سمت چپ) برازش منحنی اسپلاین بر پروفایل قطره.

به صورت غیرافقی، خطای انحراف دوربین را حذف می‌کند و همچنین در سطوح کاملاً افقی و حتی شیب‌دار نیاز به تنظیم دوربین به صورت محوری برای اندازه‌گیری زاویه تماس نیست. قابل ذکر است روش توسعه داده شده تقریباً با بیش از ۱۰ تصویر مصنوعی و ۵۰ تصویر واقعی بررسی شده است.

۳-۸- گوشه و لبه یابی

دلیل اصلی عدم استفاده از روش‌های پیشرفته نرم‌افزار متلب در لبه‌یابی مانند سوبل و یا پریویت و گوشه‌یابی مانند الگوریتم هریس استفان و حداقل مقادیر ویژه به دلیل مشکلات در پیاده‌سازی به منظور محاسبه زاویه تماس قطره روی سطح است. گوشه‌یابی کردن قطره و سطح از اهداف اصلی این مطالعه نیست بلکه هدف اصلی در این مطالعه محاسبه زاویه تماس قطره روی سطح است. در تصاویر ثبت شده از قطره روی سطح، معمولاً قطره به دلیل انعکاس نور دارای بیشترین نویز است. در روش گوشه‌یابی و لبه‌یابی نویزها را به عنوان گوشه و لبه وارد محاسبات می‌کنند. در این مطالعه به دلیل عدم آنالیز تمام تصویر (آنالیز از پس‌زمینه انجام می‌شود)، این مشکل وجود ندارد. در صورت فرض بر عدم نویز در شی (در اینجا قطره)، روش‌های لبه‌یابی لزوماً سطح تماس را به صورت یک‌لایه در اختیار قرار نمی‌دهند. اما در روش توسعه داده شده نوعی لبه‌یابی از بررسی پس‌زمینه و به صورت یک‌لایه حاصل می‌شود. البته این عمل در روش‌های گوشه‌یابی انجام می‌شود، اما مشکل در منظم کردن ماتریس نهایی این روش‌ها برای استفاده در ایده این مطالعه به منظور تشخیص نقطه تماس سه فاز برای قطرات نامتقارن است.

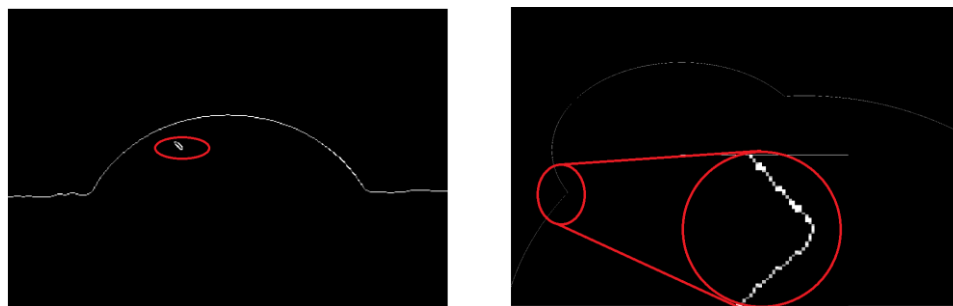
این روش به این دلیل که در محاسبه مشتق هم‌زمان از چند پیکسل استفاده می‌کند، زاویه تماس به نقاط مرزی و عدم تشخیص دقیق شکل قطره وابستگی کمتری دارد. همچنین به دلیل استفاده از اسپلاین مکعبی، قدرت تشخیص بالاتری نسبت به سایر روش‌های درون‌یابی دارد. در روش‌های محاسبه زاویه تماس به کمک عبور چندجمله‌ای از پیکسل‌ها، انتخاب درجه درست چندجمله‌ای خود از معضلات این روش‌ها است. استفاده تنها از روش اسپلاین، بدون محاسبه مشتق در چند نقطه مختلف، موجب می‌شود که حساسیت روش برای انتخاب دقیق سطح تماس بسیار اهمیت یابد. همان‌طور که در شکل ۱۲ نمایش داده شده است، عدم تشخیص درست سطح تماس سه فاز (وابستگی به آخرین پیکسل که به عنوان قطره تشخیص داده شده است) موجب می‌شود زاویه تماس بسیار متغیر باشد. این مشکل می‌تواند با استفاده از درون‌یابی چندجمله‌ای کم اثر شود.

۳-۷- کاربرد

هنگام تصویربرداری از قطره روی سطوح افقی و یا شیب‌دار، تنظیم دوربین به صورت کاملاً موازی با سطح برای ایجاد تقارن محوری به منظور استفاده از روش‌های محاسبه زاویه تماس، موجب افزایش زمان انجام آزمون زاویه تماس استاتیک و یا دینامیک می‌شود. خطای انحراف دوربین و عدم تقارن محوری موجب خطا در محاسبه زاویه تماس می‌شود [۳۸]. همچنین برای بیشتر سیالات با کشش سطحی بالا روی سطوح پلیمری محاسبه زاویه تماس دینامیک از روش‌های مبتنی بر تقارن قطره به دلیل عدم تقارن قطره در این سطوح غیرممکن است [۳۸]. در تمامی این موارد، با استفاده از روش توسعه داده شده در این مطالعه، می‌توان زاویه تماس را اندازه‌گیری کرد. این روش به دلیل قابلیت چرخش محور مختصات و تشخیص سطح

1- Corner

2- Edge



شکل ۱۶: برخی از مشکلات در روش‌های گوشه‌یابی. تصویر سمت راست) تشخیص چندلایه مرز در روش سوبل. در قسمت بزرگ‌نمایی شده به ازای یک مقدار x ، بیش از ۲ مقدار برای y به‌عنوان مرز تشخیص داده شده است. تصویر سمت چپ) وجود نویز در قطره.

جدول ۳: سیاهه نمادها.

نماد	واحد	شرح
z, γ, x	m	مختصات پیکسل
ω, δ	-	نرخ صعود ثابت
θ	درجه	زاویه تماس
h	m	فاصله نوک قطره از سطح تماس است
$\Delta\rho$	kg/m ³	اختلاف چگالی
C_b	-	پس‌زمینه
v	-	محل فرضی سطح تماس سه فاز در سطوح افقی
\mathcal{E}	-	ضریب خطا
V_c	m ³	حجم واقعی قطره
g	m/s ²	شتاب گرانش
b	1/m	انحنای
f	-	ماتریس تشکیل‌دهنده تابع دوتایی
C_o	-	شیء
γ_{lv}	mN/m	کشش سطحی
γ_{sv}	mN/m	انرژی سطحی بین جامد و گاز
γ_{sl}	mN/m	انرژی سطحی بین جامد و مایع

استفاده از چند پیکسل، موجب کاهش اثر خطای تشخیص سطح تماس سه فاز بر زاویه تماس می‌شود. روش توسعه داده‌شده، برای سطوح شیب‌دار و سطوح دارای انحنای از طریق تغییر شیب سطح تماس و بدون نیاز به مشخصه‌های قطره سیال، زاویه تماس را اندازه‌گیری می‌کند. روش پیشنهادی زاویه تماس برای قطرات نامتقارن (ایجادشده توسط نرم‌افزارهای گرافیکی) روی سطوح دارای انحنای را به‌طور موفقیت‌آمیزی اندازه‌گیری می‌کند. این روش نیازی به تنظیم دوربین به‌صورت کاملاً موازی با سطح تماس در سطوح شیب‌دار و حتی افقی ندارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه الگوریتمی برای تشخیص پروفایل قطره و سطح تماس سه فاز جامد-سیال-سیال ارائه شده است. پراش پرتو ایکس و تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی از سطح نمونه‌ها نشان‌دهنده کیفیت مناسب نمونه‌ها برای آزمایش زاویه تماس و مقایسه بین روش لاپلاس و اسپلین است. ابتدا به طریق آزمایشگاهی زاویه تماس قطره چهار سیال مختلف روی سطح کلسیت افقی اندازه‌گیری شده است. زاویه تماس از روش‌های متفاوت اسپلین و لاپلاس تعیین شد و با روش ال‌بی‌ای‌اس‌ای مقایسه گردیده است. محاسبه مشتق با

۵- مراجع

1. F. Eslami, J. A. Elliott, Thermodynamic investigation of the barrier for heterogeneous nucleation on a fluid surface in comparison with a rigid surface. *J. Phys. Chem. B.* 115(2011), 10646-10653.
2. A. Cassie, Contact angles, *Discuss. Faraday Soc.* 3(1948), 11-16.
3. D. Janssen, R. De Palma, S. Verlaak, P. Heremans, W. Dehaen, Static solvent contact angle measurements, surface free energy and wettability determination of various self-assembled monolayers on silicon dioxide. *Thin Solid Films.* 515(2006), 1433-1438.
4. E. Chibowski, R. Perea-Carpio, Problems of contact angle and solid surface free energy determination. *Adv. Colloid Int. Sci.* 98(2002), 245-264.
۵. آ. الماسیان، م. پروین‌زاده گشتی، رنگبری رنگزای بازیگ بر روی الیاف پشم پوشش داده شده با نانو ذرات دی‌اکسید زیرکونیم با پرتو دهی فرابنفش. نشریه علمی پژوهشی علوم و فناوری رنگ. ۷(۱۳۹۲)، ۱-۱۳.
6. A. Dehghan Monfared, M. H. Ghazanfari, M. Jamialahmadi, A. Helalizadeh, Potential application of silica nanoparticles for wettability alteration of oil-wet calcite: A Mechanistic study. *Energy Fuels.* 30(2016), 3947-3961.
7. A. D. Monfared, M. Ghazanfari, M. Jamialahmadi, A. Helalizadeh, Adsorption of silica nanoparticles onto calcite: Equilibrium, kinetic, thermodynamic and DLVO analysis. *Chem. Eng. J.* 281(2015), 334-344.
8. A. F. Stalder, T. Melchior, M. Müller, D. Sage, T. Blu, M. Unser, Low-bond axisymmetric drop shape analysis for surface tension and contact angle measurements of sessile drops. *Colloids Surf. A.* 364(2010), 72-81.
9. H. R. E. Gahrooei, M. H. Ghazanfari, Application of a water based nanofluid for wettability alteration of sandstone reservoir rocks to preferentially gas wetting condition. *J. Mol. Liq.* 232(2017), 351-360.
10. C. Maze, G. Burnet, A non-linear regression method for calculating surface tension and contact angle from the shape of a sessile drop. *Surf. Sci.* 13(1969), 451-470.
11. O. Del Río, A. Neumann, Axisymmetric drop shape analysis: computational methods for the measurement of interfacial properties from the shape and dimensions of pendant and sessile drops. *J. Colloid Int. Sci.* 196(1997), 136-147.
12. E. Moy *et al.*, Measurement of contact angles from the maximum diameter of non-wetting drops by means of a modified axisymmetric drop shape analysis. *Colloids Surf.* 58(1991), 215-227.
13. J. Alvarez, A. Amirfazli, A. Neumann, Automation of the axisymmetric drop shape analysis-diameter for contact angle measurements. *Colloids Surf. A.* 156(1999), 163-176.
14. M. E. Shanahan, An approximate theory describing the profile of a sessile drop. *J. Chem. Soc. Faraday Trans. 1.* 78(1982), 2701-2710.
15. J. S. Allen, An analytical solution for determination of small contact angles from sessile drops of arbitrary size. *J. Colloid Int. Sci.* 261(2003), 481-489.
16. M. E. Shanahan, Contact—angle evaluation from small sessile drops: A simplified perturbation approach. *J. Colloid Int. Sci.* 106(1985), 263-264.
17. C. Atae-Allah, M. Cabrerizo-Vílchez, J. Gómez-Lopera, J. Holgado-Terriza, R. Román-Roldán, and P. Luque-Escamilla, Measurement of surface tension and contact angle using entropic edge detection. *Meas. Sci. Technol.* 12(2001), 288.
18. N. Otsu, A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.* 9(1979), 62-66.
19. G. Johannsen, J. Bille, A threshold selection method using information measures. in *ICPR*, 82(1982), 140-143.
20. J. N. Kapur, P. K. Sahoo, A. K. Wong, A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram. *Computer vision, graphics, and image processing*, 29(1985), 273-285.
21. J. Sauvola, M. Pietikäinen, Adaptive document image binarization. *Pattern recognition.* 33(2000), 225-236.
22. W. Niblack, An introduction to digital image processing. Strandberg Publishing Company, 1985.
23. J. Bernsen, Dynamic Thresholding of gray level image. *Proceedings of International Conference on Pattern Recognition*, (1986), 1251-1255, 1986.
24. J. Kittler, J. Illingworth, Minimum error thresholding. *Pattern recognition.* 19(1986), 41-47.
25. T. R. Singh, S. Roy, O. I. Singh, T. Sinam, K. Singh, A new local adaptive thresholding technique in binarization. *arXiv preprint arXiv:1201.5227*, 2012.
26. M. Unser, Splines: A perfect fit for signal and image processing, *IEEE Signal processing magazine*, 16(1999), 22-38.
27. D. Li, P. Cheng, A. Neumann, Contact angle measurement by axisymmetric drop shape analysis (ADSA). *Adv. Colloid Int. Sci.* 39(1992), 347-382.
28. B. B. Lee, E. S. Chan, P. Ravindra, T. A. Khan, Surface tension of viscous biopolymer solutions measured using the du Nouy ring method and the drop weight methods. *Polym. Bulletin.* 69(2012), 471-489.
29. M. Gindl, G. Sinn, W. Gindl, A. Reiterer, S. Tschegg, A comparison of different methods to calculate the surface free energy of wood using contact angle measurements. *Colloids Surf. A.* 181(2001), 279-287.
30. A. Kozbial *et al.*, Study on the surface energy of graphene by contact angle measurements. *Langmuir.* 30(2014), 8598-606.
31. W. Choi, A. Tuteja, J. M. Mabry, R. E. Cohen, G. H. McKinley, A modified Cassie-Baxter relationship to explain contact angle hysteresis and anisotropy on non-wetting textured surfaces. *J. Colloid Int. Sci.* 339(2009), 208-216.
32. J. Drelich, J. L. Wilbur, J. D. Miller, G. M. Whitesides, Contact angles for liquid drops at a model heterogeneous surface consisting of alternating and parallel hydrophobic/hydrophilic strips. *Langmuir.* 12(1996), 1913-1922.
33. J. Drelich, The effect of drop (bubble) size on contact angle at solid surfaces. *J. Adhesion.* 63(1997), 31-51.
34. D. Li, Drop size dependence of contact angles and line tensions of solid-liquid systems. *Colloids Surf. A.* 116(1996), pp. 1-23, 1996.
35. D. Li, F. Lin, A. Neumann, Effect of corrugations of the three-phase line on the drop size dependence of contact angles. *J. Colloid Int. Sci.* 142(1991), 224-231.
36. D. Li, A. Neumann, Determination of line tension from the drop size dependence of contact angles. *Colloids Surf.* 43(1990), 195-206.
37. J. Zhang, J. Hu, Image segmentation based on 2D Otsu method with histogram analysis. in *Computer Science and Software Engineering, 2008 International Conference.* 6(2008), 105-108: IEEE.
38. R. David, M. K. Park, A. Kalantarian, A. W. Neumann, Drop size dependence of contact angles on two fluoropolymers. *Colloid Polym. Sci.* 287(2009), 1167-1173.