

زاویه تماس و مسئله‌ی پسماند ترشوندگی: بنیان و روش‌های اندازه‌گیری آن

فرشاد اسمعیلیان، مازیار صهبایغمایی، رضا ریاحی فر، بابک ریسی

پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده سرامیک، آزمایشگاه ترشوندگی و سیالات

چکیده

اندازه‌گیری زاویه تماس در آزمون‌های ترشوندگی کمک شایان توجهی به علم و مهندسی سطح نموده است. بسیاری فرایندهای مختلف، از جمله پوشش‌دهی گرم و سرد، ریخته‌گری‌های دوغابی، صنایع مرتبط با سیستم‌های بیولوژیکی، چاپ و به طور کلی هر فرآیندی که با سیستم‌های سه فازی جامد-مایع-سیال (بخار) سر و کار دارند، از این آزمون بهره می‌برند. بنیان این آزمون بر مبنای نظریه‌ای که نخستین بار توماس یانگ ارائه نمود، بنا شده است. با این حال سادگی این آزمون و امکان داده‌برداری فوق‌العاده موجب شده است که بسیاری محققین بدون توجه به دیگر مباحث با اهمیت در ترشوندگی، به توصیف و توجیه پدیده‌ها بپردازند. مسئله‌ی پسماند زاویه تماس، یکی از این مباحث با اهمیت است که می‌بایست بیشتر مورد توجه قرار گیرد. پسماند در ترشوندگی اختلاف میان بیشترین و کمترین زاویه تماس ممکن برای سطح را نشان می‌دهد. همین نکته خود موید آن است که نمی‌بایست مطلقاً به بررسی زاویه تماس اتکا نمود. در این مقاله بنیان مسئله‌ی پسماند مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه این موضوع بیشتر از نگاه ترمودینامیکی بررسی می‌شود، پسماند در حالت سکون موضوع اساسی مقاله خواهد بود. در پایان مقاله روش‌های معمول و پیشرفته‌ی اندازه‌گیری پسماند به همراه مزیت و نقص‌های هر کدام مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در نهایت امید است که مقاله حاضر بتواند نگاه محققین علم سطح را که در تمامی علوم دیگر از جمله علم و فناوری نانو، علم و مهندسی مواد، شیمی فیزیک ماده چگال و البته مواد نرم فعالیت می‌کنند، با دیگر جنبه‌های تکمیلی و اساسی‌تر مبحث ترشوندگی آشنا نماید.

واژه‌های کلیدی: علم سطح، ترشوندگی، زاویه تماس، روش‌های اندازه‌گیری پسماند

farshad.esmaeilian@gmail.com

۱- مقدمه

سیستم‌های بیولوژیکی، صنعتی و بسیاری پدیده‌های روزمره به صورت ترکیبی از فازهای گوناگون موجود می‌باشند. پدیده‌های چند فازی نظیر، جذب سطحی و چسبندگی به ویژه در لعاب‌های سرامیکی مشاهده می‌شود و در زمینه‌های متعدد دیگری نظیر پوشش‌دهی، چاپ، تمیز و آماده‌سازی سطوح، مطرح می‌گردند. بنیان این پدیده‌ها، مرتبط با سیستم‌های سه فازی جامد-مایع-سیال است. ویژگی منحصر-به‌فرد چنین سیستم‌هایی را زاویه تماسی تعیین می‌کند که در حقیقت زاویه میان فصل مشترک مایع-سیال و فصل مشترک جامد-مایع است (شکل-۱). شرایط پایدار ترمودینامیکی برای این زاویه تماس با کمک معادله‌ی یانگ رابطه‌ی (۱) تعیین می‌شود [۱].

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

که در آن γ_{ij} کشش سطحی میان فصل مشترک فازهای جامد (S)-مایع (L)-بخار (V) با واحد $\left[\frac{J}{m^2}\right]$ بوده و θ زاویه تماس برای سه فاز مذکور می‌باشد. این معادله بعدها بوسیله‌ی کار چسبندگی و توسط لویس دوپری نیز به دست آمد [۲]. با اینکه معادله‌ی یانگ وضعیت پایدار سیستم سه فازی نمایش داده شده در شکل-۱-a را تعیین می‌نماید، اما سیستم‌های واقعی هیچگاه با

این دقت از رابطه‌ی (۱) پیروی نمی‌کنند. از نقطه نظر ترمودینامیکی، در صورتیکه سطح جامد کاملاً صاف، همگن و از نظر فیزیکی و شیمیایی خنثی باشد، سیستم با داشتن این زاویه تماس، در شرایط پایدار قرار دارد. اما در حقیقت در سیستم‌های واقعی و غیر ایده‌آل محدوده‌ای از زوایای تماس مشاهده می‌گردد. درک محدوده‌ی زوایای تماس مشاهده شده بر سطح، محققین را به مفهوم پسماند زاویه تماس سوق داده است.

۲- تئوری پسماند زاویه تماس

برای تعریف سیستم‌های واقعی و غیر ایده‌آل که از سه فاز جامد-مایع-سیال تشکیل شده‌اند، بهتر است از پسماند زاویه تماس استفاده کرد. رابطه‌ای که از آن برای مشخص کردن پسماند زاویه تماس استفاده می‌شود، در حقیقت اختلاف بیشترین و کمترین زاویه ممکن را برای سیستم سه فازی مورد نظر نشان می‌دهد. بیشترین زاویه‌ی قابل مشاهده زاویه پیشروی (شکل-۱-b) و کمترین زاویه قابل مشاهده زاویه پسروی نامیده می‌شود (شکل-۱-c). رابطه‌ی (۲) معادله‌ی ساده‌ای که در محاسبه‌ی پسماند زاویه تماس استفاده می‌شود را نشان می‌دهد.

$$H = \theta_A - \theta_R \quad (2)$$

باشد [۱۰]، بنابراین، می‌توان مفهوم حالات نیمه‌پایدار را نیز برای سیستم مورد بحث معرفی نمود. در چنین شرایطی سیستم حاضر می‌بایست بتواند بر سد انرژی میان دو حالت غلبه کند تا زاویه تماس خود را تغییر دهد. جانسون و دتر از جمله نخستین کسانی بودند که مسئله‌ی سد انرژی را در سیستم حاضر بررسی نمودند [۱۱]. بررسی‌های دقیق‌تر بعدی با توجه به نوع نگرش محققین بر مسئله‌ی پسماند و نحوه‌ی مدل‌سازی ارائه شده انجام گرفته است. درست در این نقطه پیچیدگی‌های مفهوم پسماند زاویه تماس خود را به خوبی نشان می‌دهد. این پیچیدگی‌ها از این نکته سر چشمه می‌گیرد که برخی پسماند را مسئله‌ای تک بعدی و برخی دیگر دو بعدی می‌دانند. هر دو این نگرش‌ها در ادامه توضیح داده خواهند شد. با این حال باید به این موضوع اشاره نمود که در هر دو نگرش مسئله‌ی پسماند به صورت گذار از یک حالت ترمودینامیکی به حالتی دیگر نگریسته می‌شود. اما منشأ اختلاف، عامل موثر و ایجاد کننده‌ی سد انرژی است.

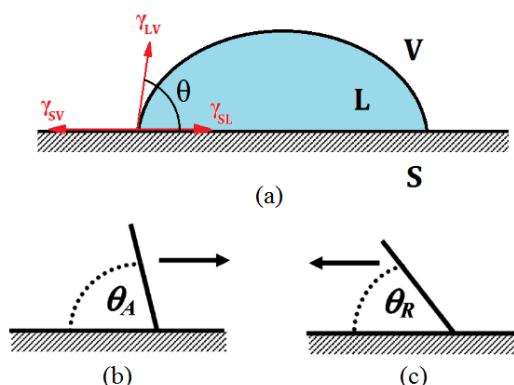
۲-۲- پسماند حالت سکون و حالات نیمه‌پایدار

شکل ۲- نمایش دهنده‌ی منحنی انرژی آزاد بر حسب زاویه تماس می‌باشد که توسط مدل مرمور به دست آمده است. مرمور در مدل خود نشان می‌دهد که دو پارامتر شیب موضعی سطح که ناشی از ناهمواری‌های سطحی است و همچنین ناهمگنی شیمیایی سطح منجر می‌شوند تا زاویه‌ای که بوسیله‌ی محقق و ابزار اندازه‌گیری زاویه تماس به دست می‌آید، متفاوت از زاویه تعادلی یانگ باشد [۱۲]. این زاویه تماس به نام زاویه تماس ظاهری شناخته می‌شود. مرمور در ادامه‌ی بحث خود نشان می‌دهد، ناهمواری‌های سطح و ناهمگنی‌های شیمیایی، موجب می‌شوند که بتوان بی‌نهایت حالت نیمه پایدار با زاویه‌های مختلف برای هر سطح غیر ایده‌آل در نظر آورد و تنها حجم محدود قطره است که این تعداد این حالت‌ها را کاهش می‌دهد [۱۲].

به این ترتیب منطقی به نظر می‌رسد که هر چه سطح آزمایش از سطح ایده‌آل دور شود، می‌توان توقع داشت که زاویه‌ی تماس اندازه‌گیری شده از وضعیت تک مقداری خارج می‌شود و می‌توان مقدار آن را در یک محدوده‌ی مشخص تعریف نمود. این محدوده‌ی مشخص با کمک نمودارهای انرژی آزاد بر حسب زاویه تماس قابل بررسی است. در اینجا حالت نیمه‌پایداری که بزرگترین زاویه تماس را دارد، مشخص کننده‌ی محدوده‌ی بیان شده است.

در این رابطه H نمایش دهنده‌ی میزان پسماند است. θ_A و θ_R نیز به ترتیب زاویه پیشروی و زاویه پسروی می‌باشند. اگر سیستم مورد بررسی قطره‌ای بر سطحی جامد در نظر آورده شود که توسط بخار احاطه شده است، پدیده‌ی پسماند زاویه تماس در دو حالت سکون و پویا قابل بررسی خواهد بود که در این مقاله حالت سکون مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

برای سیستم فوق تا زمانی که قطره ثابت است یا با سرعت بسیار اندک حرکت می‌کند، پسماند حالت سکون مطرح می‌شود. این نوع پسماند معمولاً وابسته به ناهمواری‌های سطحی دانسته می‌شود و اکثر مباحث مرتبط با مفهوم پسماند زاویه تماس با روش‌هایی سرو کار دارند که این نوع خاص را اندازه می‌گیرند. به بیانی اختلاف زاویه تماس پیشروی و پسروی که به عنوان محدوده‌ی پسماند معرفی شد، در حالت سکون یا در سرعت‌های اندک به این نام شناخته می‌شود [۳].

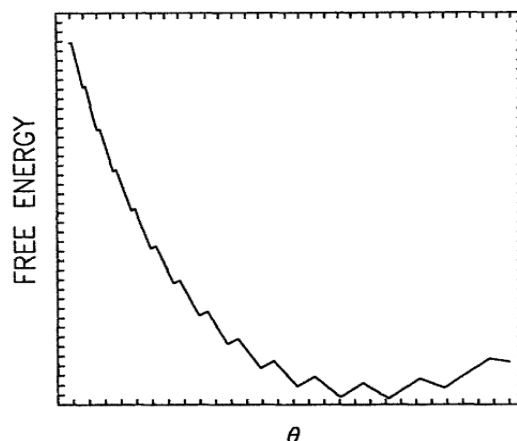


شکل- ۱: (a) سیستم سه فازی جامد-مایع-سیال که با کمک سه کشش سطحی و زاویه تماس مشخص شده است. (b) زاویه پیشروی و (c) زاویه پسروی. [۴]

۲-۱- منشأ سد انرژی و پسماند زاویه تماس

مباحث نظری پسماند در حالت سکون بیشتر جنبه‌ی ترمودینامیکی دارند. از نقطه نظر ترمودینامیکی پدیده‌ی پسماند همواره پیچیدگی‌های خاص خود را داشته است. به نحوی که همچنان علل اساسی آن مشخص نیست [۵]. با این وجود عوامل گوناگونی بر مسئله‌ی پسماند زاویه تماس موثر دانسته می‌شوند. ناهمگنی‌های سطحی، بازآرایی و تنظیم جهت گیری مولکول‌های مایع در تماس با جامد و بالعکس در حین جدایی، و تغییر شکل سطح در اثر تماس با مایع از جمله‌ی اصلی‌ترین آن‌ها می‌باشند [۶-۸].

از نقطه نظر ترمودینامیکی می‌توان برای این سیستم یک حالت تعادلی پایدار در نظر آورد. حالتی که زاویه تماس یانگ مشخصه‌ی اصلی آن است. اما همانطور که گفته شد، پدیده‌ی پسماند زاویه تماس نشان می‌دهد که دسترسی به این حالت تعادل به راحتی ممکن نیست. از آنجا که پسماند زاویه تماس می‌تواند محدوده‌ای به کوچکی ۱ درجه [۹]، تا بزرگی بیش از ۵۰ درجه داشته

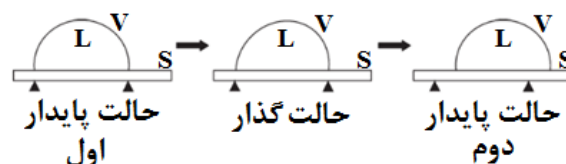


شکل-۲: یک منحنی معمول که تغییرات انرژی آزاد بر حسب زاویه تماس را برای سیستم مورد بررسی نشان می‌دهد [۱۲].

۳-۲- مسئله‌ی سطح تماس و خط تماس

مسئله‌ی پسماند حالت سکون، در شرایطی که کاملاً قطره ساکن در نظر آورده شود، با نگرش فوق تا حدودی قابل توجیه است. اما طبق تعریف حرکت قطره با سرعت‌های اندک نیز در مفهوم پسماند حالت سکون جای می‌گیرد. شکل-۳ نشان دهنده‌ی قطره‌ای است که برای حرکت از یک حالت پایدار به حالتی دیگر، نخست یک تغییر شکل داده و سپس به حالت بعدی خود می‌رسد. در اینجا و در حضور حرکت آهسته مسئله‌ی تحلیل شرایط قطره اندکی پیچیده‌تر است.

نگرش دو بعدی به مسئله‌ی پسماند از این نکته نشئت می‌گیرد که در سال ۱۹۳۶ میلادی رابرت ونزل متوجه شد که معادله‌ی یانگ یک شرایط عمومی را برای سطوح واقعی تعریف نمی‌کند [۱۳]. وی نشان داد که برای روی سطوح ناهموار می‌توان سطح واقعی که قطره با آن در تماس است را محاسبه نمود، و به این ترتیب معادله‌ی متفاوتی برای زاویه تماس استخراج کرد. بر اساس این نگرش عامل اصلی تغییر معادله، سطح تماس زیر قطره است. از آنجا که سطح مسئله‌ای دو بعدی است، بنابراین، روش حاضر نگرش دوبعدی نامیده می‌شود. پس از وی در ۱۹۴۴ میلادی کسی و بکستر مسئله‌ی مورد نظر ونزل را بسط دادند و همچنان بر اهمیت سطوح مشترک در محاسبه‌ی زاویه تماس تأکید نمودند [۱۴]. به نحوی که اکنون زاویه تماس به عنوان یک زاویه میانگین، ناشی از تمام زاویه‌های ممکن و مرتبط با ناهمواری‌ها و ناهمگنی‌های سطح زیر قطره خواهد بود.



شکل-۳: مسئله‌ی پسماند زاویه تماس از نقطه نظر گذار از حالتی پایدار به حالتی دیگر. بر مبنای نگاه این محققین برای گذار قطره تغییر شکلی در سطح مشترک مایع-بخار می‌دهد که می‌تواند به عنوان سد انرژی برای این گذار در نظر آورده شود. این سد انرژی در حقیقت کاری است که باید انجام شود تا نیروی ناشی از آن موجب جابجایی خط سه فازی گردد [۹].

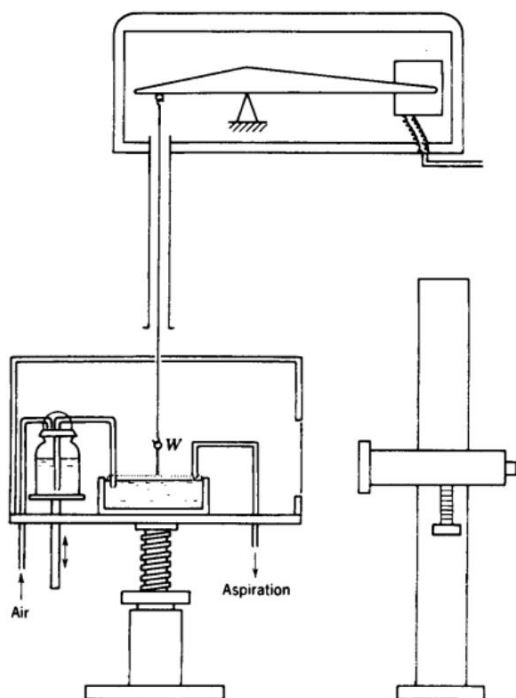
معادلات ونزل و کسی-بکستر به پیشرفت علم سطح در زمینه‌ی ترشوندگی کمک شایان توجهی کردند. اما از نظر برخی محققین در کنار کارایی بالا، موجب شدند که در بررسی پسماند زاویه تماس، مسئله‌ی اصلی سطح مشترک دانسته شود. این در حالی است که محققین مذکور معتقدند شرایط قطره در محل خط تماس بر پسماند تأثیر گذار است [۹، ۱۰، ۱۵، ۱۶]. خط تماس سه گانه، که در شکل-۴ نشان داده شده، در حقیقت محدوده‌ای است به دور قطره که مرز سه فاز موجود در سیستم را تعیین می‌کند. در نظر این محققین مسئله‌ی پسماند زاویه تماس به خط تماس و قابلیت تحرک آزادانه‌ی آن بر روی سطح وابسته بوده و در نتیجه‌ی وابستگی به یک خط، تک بعدی است.

آن‌ها معتقدند، قطره فقط در یک حالت حرکت می‌کند و آن با توجه به جهت حرکت قطره، حالتی است که پشت قطره پسروی کرده و جلوی قطره پیشروی نماید. اگر شرایط حرکت قطره طوری باشد که فرآیند پسروی و پیشروی رخ ندهند، بنابراین پسماند صفر خواهد بود و خط تماس سه گانه بدون هیچ مانعی بر سر راه خود حرکت می‌کند. اما در صورتیکه پسماند وجود داشته باشد، خط تماس حرکت نمی‌کند. به این ترتیب نخست شکل و شمای کلی قطره تغییر کرده و به جهت حرکت متمایل می‌شود (شکل-۳). در نتیجه پشت و جلوی قطره به ترتیب کاهش و افزایش زاویه تماس را تجربه خواهند کرد. پس از آنکه زاویه‌ی جلوی قطره از زاویه پیشروی بیشتر شد، خط تماس در ناحیه‌ی جلوی قطره جابجا می‌شود. در مقابل هم، خط تماس در پشت قطره تا زمانی ثابت می‌ماند که زاویه پشت قطره از زاویه پسروی بیشتر باشد. بنابراین، پدیده‌های پیشروی و پسروی به طور مطلق تأثیر یکدیگر را خنثی نمی‌کنند و لزوماً رخ دادن یکی از آن‌ها تضمین کننده رخ دادن دیگری نخواهد بود [۹، ۱۷].

نگرش گائو و مکاریتی از این جهت قابل توجه است که سد انرژی که مانع حرکت قطره است را به مسئله‌ی تغییر سطح تماس زیرین قطره با سطح، مرتبط نمی‌کنند. بلکه معتقدند با کمک میزان تغییر شکل سطح مشترک مایع-بخار (ΔA_{LV}) می‌توان مقدار سد انرژی را کمی سازی نمود. رابطه‌ی (۳) معادله‌ی ارائه شده توسط این محققین را نمایش می‌دهد.

$$E_a = \gamma_{LV}\Delta A_{LV} + \gamma_{SV}\Delta A_{SV} + \gamma_{SL}\Delta A_{SL} \quad (3)$$

که در آن E_a انرژی فعالسازی برای عبور از سد انرژی با واحد $[J]$ و ΔA_{ij} تغییرات ایجاد شده در سطح مشترک دو فاز با واحد $[m^2]$ است. اگر به نحوی حرکت قطره به درستی توجه شود، می‌توان فهمید که ΔA_{SV} و ΔA_{SL} می‌بایست برابر باشند. به این ترتیب مسئله‌ی پسماند زاویه تماس تنها متأثر از نواحی اطراف خط تماس سه گانه خواهد بود و ابتدا به شرایط سطح زیرین قطره وابسته نمی‌باشد. به عبارت دقیق‌تر قطره با حرکت دادن خط سه گانه موجب از بین رفتن و یا ایجاد بخشی از سطح تماس خود در مجاورت خط تماس سه گانه می‌شود. اما به طور معمول بخش اعظمی از سطح تماس زیرین قطره ثابت خواهد ماند.



شکل-۵: وضعیت موجود در روش ویلهلمی. در قسمت W، صفحه با مایع تماس پیدا می‌کند و در بالا، سیستمی حساس، جهت اندازه‌گیری نیروی وارد شده به صفحه پس از تر شدن توسط مایع وجود دارد [۱۸].

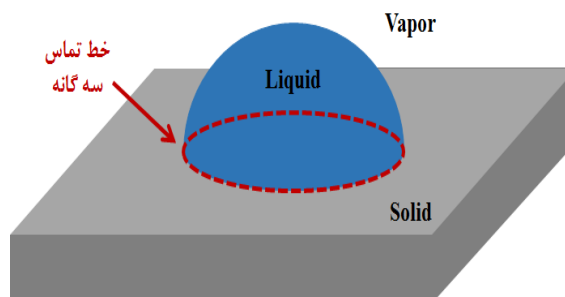
۳-۲- روش سطح مایل

روش سطح مایل تنها نیازمند یک سیستم تصویربرداری و سطحی با قابلیت چرخش است. در اینجا به طور معمول زاویه چرخش سطح با α نمایش داده می‌شود. سرعت چرخش سطح معمولاً ۰٫۱ تا ۵ درجه بر ثانیه است. به این ترتیب با قرار گرفتن قطره بر روی سطح، در لحظه‌ای به حرکت درآمدن قطره تصویر مورد تحلیل قرار گرفته و محدوده‌ی پسماند با کمک اندازه‌گیری زاویه‌ی جلو و عقب قطره به دست می‌آید. شکل-۶-۱ به وضوح نشان می‌دهد که زاویه‌ی پیشروی و پسروی قطره چطور قابل محاسبه خواهند بود.

با وجود سادگی ابزار مورد نیاز برای آزمون سطح مایل، مشکلاتی نیز برای این روش اندازه‌گیری مطرح می‌باشد. مشکل نخست در اندازه‌گیری زاویه‌ی تماس جلو و عقب قطره است. از نظر تئوری اختلاف فشار میان مایع-بخار در جلو و عقب موجب انحنای سطح مایع می‌شود. بنابراین شکل قطره متقارن نخواهد بود. پس محقق ناچار به محاسبه زاویه تماس با کمک روش‌های پیچیده‌تر و نادقیق‌تر اندازه‌گیری است.

مشکل دیگر که توسط کراسویتسکی و مرمور، بیان شده است، حرکت نمودن قطره پیش از حتی دست‌یابی به زاویه‌های پیشروی و پسروی واقعی است [۱۹]. در همین راستا، پیرس و همکاران، نشان داده‌اند که حتی روش قرار دادن قطره بر روی سطح بر زوایای پسماند و حرکت قطره موثر است [۲۰].

بنابر آنچه بیان گردید روش حاضر تنها به عنوان روشی کیفی شناخته می‌شود. این روش هر چند برای سطوح مختلف قابل



شکل-۴: خط تماس سه گانه برای سیستم مورد بررسی. در صورتیکه قطره کاملاً کروی باشد، خط تماس سه گانه دایره خواهد بود.

با اینکه نگرش گائو و مکاریتی متفاوت‌تر از دیگر روش‌ها به نظر می‌رسد، اما همچنان مسائل عمده و حل نشده در مورد پسماند زاویه تماس باقی است. پیچیدگی مسئله‌ی پسماند زاویه تماس، همچنین خود را در روش‌های متعدد اندازه‌گیری و محاسبه‌ی آن نیز نشان می‌دهد که موضوع بخش پایانی این مقاله خواهد بود.

۳-۱- روش‌های اندازه‌گیری پسماند زاویه تماس

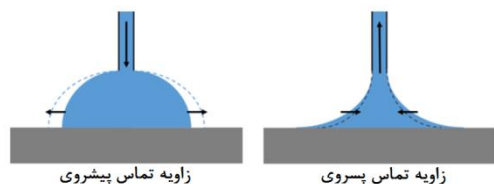
اکنون و پس از آشنایی با مفهوم پسماند زاویه تماس در حالت سکون، روش‌های اندازه‌گیری آن معرفی می‌شوند. امروزه از سه روش کلی سطح مایل، قطره چسبیده و ویلهلمی جهت اندازه‌گیری پسماند زاویه تماس استفاده می‌گردد.

۳-۱- روش ویلهلمی

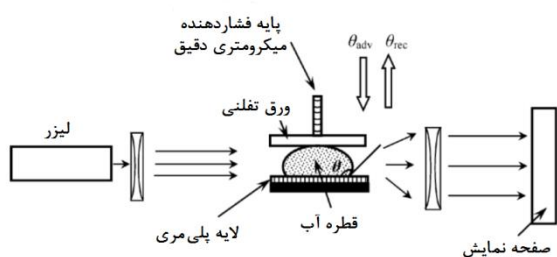
روش ویلهلمی یکی از قدیمی‌ترین روش‌های اندازه‌گیری زاویه تماس می‌باشد. همانطور که در شکل-۵ نمایش داده شده است، به جای قرار دادن قطره بر سطح و اندازه‌گیری زاویه تماس، سطح به درون مایع فرو برده و یا از آن بیرون کشیده می‌شود. ولی باید توجه نمود، در اینجا با استفاده از اندازه‌گیری نیروی لازم جهت فرو بردن سطح و یا بیرون کشیدن آن، و به صورت غیر مستقیم زاویه تماس استخراج می‌شود.

از مزیت‌های این روش، امکان بررسی پسماند یک سطح وسیع با یکبار اندازه‌گیری است. با این حال این مزیت، در صورت در دسترس نبودن مایع به مقدار کافی، تبدیل به محدودیت می‌شود. مسئله‌ی دیگر در مورد سطوح ضخیم، تاثیر لبه‌های سطح می‌باشد که بر عوامل موثر بر آزمایش می‌افزاید. با این حال روش ویلهلمی، همچنان در مورد سنجش یک سطح وسیع روشی بدون جایگزین است.

روش شدیداً محدود می‌شود. مزیت دیگر این روش از اساس تصویربرداری قطره سرچشمه می‌گیرد. به عبارتی در این روش زاویه تماس قطره در حین پیشروی و پسروی مستقیماً با کمک پردازش تصاویر اندازه‌گیری می‌شود.



(a)



(b)

شکل-۷: (a) روش قطره‌ی چسبیده برای اندازه‌گیری پسماند زاویه تماس. در حین تزریق و مکش به ترتیب زوایای پیشروی و پسروی اندازه‌گیری می‌شوند. (b) روش ارائه شده توسط برماشکو و همکاران وی که از فشردن قطره توسط یک ورق تفلنی برای اندازه‌گیری پسماند استفاده می‌کند [۲۲].

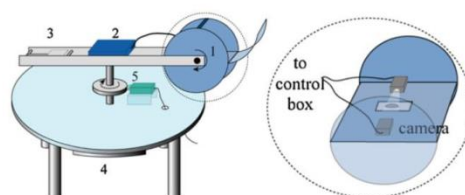
اما از جمله معایب این روش، نیاز به قرار داشتن سوزن تزریق کننده‌ی قطره درون آن، حین تصویر برداری است. این مسئله می‌تواند موجب تغییر شکل قطره شده و در نتیجه، زاویه تماس ظاهری را تحت تاثیر قرار دهد. عیب دیگر این روش در تمامی روش‌های تصویربرداری نوری وجود دارد. هنگامی که زاویه تماس به صفر یا ۱۸۰ درجه نزدیک می‌شود، اندازه‌گیری آن با روش‌های برازش منحنی غیر ممکن می‌شود. این مسئله موجب می‌گردد که روش‌های محاسباتی دیگری جایگزین شوند که سرعت عملکرد کندتری دارند.

یکی دیگر از روش‌های ویژه‌ای که تا حدودی با الهام گرفتن از روش حاضر توسط برماشکو و همکاران ابداع شده است، فشردن قطره است [۲۲]. همانطور که شکل b-۷ نمایش می‌دهد، در این روش قطره به وسیله‌ی ابزاری بسیار دقیق که توسط ورق تفلنی پوشیده شده است، فشرده می‌شود. فشردن قطره در اندازه‌گیری زاویه تماس پیشروی و برداشتن فشار از روی قطره برای اندازه‌گیری زاویه تماس پسروی کاربرد دارد. البته با توجه به شرایط آزمایش این روش در بررسی پسماند سطوح آبگریز بیشترین کاربرد را دارد. در نهایت می‌توان به فرآیند تبخیر قطره اشاره نمود. تبخیر قطره در صورتیکه شامل مراحل کم شدن قطر قطره باشد، می‌تواند به ویژه برای اندازه‌گیری زاویه پسروی مورد استفاده قرار گیرد. اربیل و همکاران به بحث جامعی در زمینه‌ی این روش اندازه‌گیری پسماند زاویه تماس پرداخته‌اند [۲۳].

استفاده است، اما مقادیر به دست آمده قابل اعتماد نمی‌باشند. به همین دلیل امروزه کمتر از روش حاضر جهت سنجش پسماند استفاده می‌شود.



(a)



(b)

شکل-۶: (a) وضعیت قطره در حین آزمایش سطح مایل؛ (b) دستگاه چسبندگی چرخشی تعادلی؛ قطره درون محفظه‌ی ۱ قرار می‌گیرد. درون ۱ منبع نور و سیستم تصویربرداری وجود دارد. همچنین ۱ با کمک موتور قابلیت چرخش حول ۲ را نیز دارد. بر همین اساس، روش حاضر با کمک شرایط تعادلی میان نیروی گریز از مرکز و نیروی جاذبه‌ی موثر بر قطره، زاویه پیشروی و پسروی را می‌سنجد و چسبندگی سطح و مایع را اندازه‌گیری می‌کند. بخش ۳ جهت ایجاد تعادل و بخش ۵ حاوی سیستم‌های کنترل کننده است. کل دستگاه بر روی بدنه ۴ قرار خواهد داشت. [۲۱]

نکته‌ی جالب توجه آن است که با وجود نتایج نسبتاً کیفی که این روش به دست می‌دهد، همچنان تحقیقات گسترده بر آن ادامه دارد. در سال‌های اخیر با استفاده از سیستمی جدید، دستگاهی ساخته شده است، که پسماند زاویه تماس بر سطحی مایل که در حال چرخش افقی نیز هست را اندازه‌گیری می‌گیرد. شکل b-۶ این دستگاه را نشان می‌دهد. توضیحات بیشتر در زمینه‌ی روش عملکرد این دستگاه به مقاله‌ی تدمور و همکاران ارجاع داده می‌شود [۲۱].

۳-۳- روش قطره چسبیده

در این روش با کمک سیستم تصویر برداری و قطره‌ای که بر سطح واقع است، پسماند سنجیده می‌شود. اما در اینجا پسماند در دو مرحله اندازه‌گرفته می‌شود. نخست تزریق قطره بر روی سطح رخ می‌دهد. پس از آن تزریق ادامه یافته و حجم قطره با ادامه‌ی تزریق افزایش می‌یابد. این بخش منجر به اندازه‌گیری زاویه تماس پیشروی می‌شود. در مرحله‌ی بعد، مکش قطره از سطح و اندازه‌گیری زاویه تماس پسروی انجام می‌گیرد. این روش به دلیل پردازش تصویر در هر مرحله، نتایج بسیار دقیق‌تری نسبت به سطح مایل ارائه می‌دهد (شکل a-۷).

یکی از مزایا و در عین حال محدودیت‌های این روش نیاز به تنها یک قطره بر سطحی کوچک جهت سنجش پسماند زاویه تماس است. مزیت این روش، عدم نیاز به سطحی بزرگ و حتی مایعی به مقدار زیاد برای اندازه‌گیری پسماند می‌باشد. از سوی دیگر در صورتی که نیاز به سنجش پسماند برای سطح بزرگی باشد، این



- [5] Abraham Marmur and Eyal Bittoun, "When Wenzel and Cassie are right: reconciling local and global considerations", *Langmuir*.25[3]: 1277-1281 (2009)
- [6] CW Extrand, "A thermodynamic model for contact angle hysteresis", *Journal of colloid and interface science*.207[1]: 11-19(1998)
- [7] A Wilhelm Neumann, *et al.*, "Applied surface thermodynamics", (CRC press: 2010).
- [8] Edward Bormashenko, "Progress in understanding wetting transitions on rough surfaces", *Advances in colloid and interface science*. (2014)
- [9] Lichao Gao and Thomas J McCarthy, "Contact angle hysteresis explained", *Langmuir* 6237-6234:[14]22. (2006)
- [10] Pierre-Gilles De Gennes, *et al.*, "Capillarity and wetting phenomena: drops, bubbles, pearls, waves", (Springer Science & Business Media: 2004).
- [11] Rulon E Johnson Jr and Robert H Dettre, "Contact angle hysteresis. III. Study of an idealized heterogeneous surface", *The journal of physical chemistry*.68[7]: 1744-1750(1964)
- [12] Abraham Marmur, "Thermodynamic aspects of contact angle hysteresis", *Advances in colloid and interface science*.50[121-141 (1994)
- [13] Robert N Wenzel, "Resistance of solid surfaces to wetting by water", *Industrial & Engineering Chemistry*.28[8]: 988-994(1936)
- [14] ABD Cassie and S Baxter, "Wettability of porous surfaces", *Transactions of the Faraday Society*.40[546-551 (1944)
- [15] CW Extrand, "Designing for optimum liquid repellency", *Langmuir*.22[4]: 1711-1714(2006)
- [16] Didem Öner and Thomas J McCarthy, "Ultrasuperhydrophobic surfaces. Effects of topography length scales on wettability", *Langmuir*.16[20]: 7777-7782(2000)
- [17] Lichao Gao and Thomas J McCarthy, "Wetting 101°+", *Langmuir*.25[24]: 14 (2009)14115-105
- [18] Arthur W Adamson and Alice Petry Gast, "Physical chemistry of surfaces", (John Wiley & Sons: 1997).
- [19] Boris Krasovitski and Abraham Marmur, "Drops down the hill: theoretical study of limiting contact angles and the hysteresis range on a tilted plate", *Langmuir*.21[9]: 3881-3885(2005)

۴- نتیجه‌گیری

زاویه تماس یانگ که با معادله‌ی یانگ-دوپری نشان داده می‌شود، شرط ترمودینامیکی تعادل برای قطره‌ای واقع بر سطحی جامد و احاطه شده توسط یک سیال (بخار) است. از نخستین بررسی‌های تجربی، پیروی سطوح از زاویه تماس مذکور مشاهده نگردید. عقیده‌ی اساسی بر آن بود که از نظر موضعی سطح می‌بایست چنین زاویه تماسی را در مقیاس میکروسکوپی نشان دهد و این تنها زاویه تماس ظاهری است که در بررسی‌های ترشوندگی تغییر می‌کند. اما علل مختلفی از جمله ناهمگنی‌های سطح نشان داد که بر روی یک سطح در مقیاس میکروسکوپی نیز این اظهار نظر چندان دقیق نیست. مفهوم پسماند زاویه تماس نیز درست از این نقطه آغاز می‌شود. پسماند در اینجا اختلاف دو زاویه پیشروی و پسروی تعریف می‌شود، که به ترتیب به عنوان بیشترین و کمترین زاویه تماس ممکن بر سطح می‌باشند. عوامل موثر بر پسماند همچنان به طور دقیق مشخص نیست. عقاید محققین در این زمینه به دو دسته تقسیم می‌شود. عده‌ای بر این عقیده‌اند که پسماند ناشی از سطح تماس نواحی زیر قطره است. دیگر محققین نواحی اطراف خط تماس و بر همکنش خط تماس را با این نواحی عامل اصلی پسماند می‌دانند. به نظر می‌رسد دسته بندی دقیق‌تری برای پسماند زاویه تماس مورد نیاز است. مسئله‌ی بررسی سیستم در شرایط پویا یا حالت سکون می‌تواند بسیاری از دیدگاه‌ها را اصلاح نموده و درک مناسب‌تری از مسئله برای محققین فراهم آورد. با این حال مسلمان مسئله‌ی پسماند زاویه تماس، یکی از جالب توجه‌ترین و در عین حال پیچیده‌ترین مفاهیم در مباحث مرتبط با علم سطح و ترشوندگی می‌باشد. وجود روش‌های متعددی که جهت اندازه‌گیری این پدیده ارائه شده است و برخی اختلاف‌ها میان داده‌های استخراج شده از هر کدام از این روش‌ها، خود نشان دهنده‌ی آن است که به منظور به دست آوردن درک دقیق‌تری از مسئله‌ی پسماند زاویه تماس باید تحقیقات وسیع‌تری در این زمینه انجام گیرد. با این حال نباید فراموش نمود که استفاده از پسماند زاویه تماس می‌تواند درک بهتری از ویژگی‌های سطح به دست بدهد. ویژگی‌هایی که تنها با انجام آزمون ترشوندگی و اندازه‌گیری ساده‌ی زاویه تماس هرگز قابل درک نیستند.

۵- منابع

- [1] Thomas Young, "An essay on the cohesion of fluids", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*.65-87 (1805)
- [2] A Dupre, "Théorie mécanique de la chaleur, 1869", Paris, France.
- [3] HB Eral and JM Oh, "Contact angle hysteresis: a review of fundamentals and applications", *Colloid and polymer science*.291[2]: 247-260 (2013)
- [4] J-M Di Meglio, "Contact angle hysteresis and interacting surface defects", *EPL (Europhysics Letters)*.17[7]: 607 (1992)

various experimental techniques, its interpretation, and quantitative characterization", *Langmuir*.24[8]: 4020-4025(2008)

[23] H Yildirim Erbil, *et al.*, "Determination of the receding contact angle of sessile drops on polymer surfaces by evaporation", *Langmuir*.15[21]: 7378-7385 (1999)

[20] E Pierce, *et al.*, "Understanding of sliding and contact angle results in tilted plate experiments", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*.323[1]: 73-82(2008)

[21] Rafael Tadmor, *et al.*, "Measurement of lateral adhesion forces at the interface between a liquid drop and a substrate", *Physical review letters*.103[26]: 266101 (2009)

[22] Edward Bormashenko, *et al.*, "Contact angle hysteresis on polymer substrates established with