



## مدلسازی ترمودینامیکی ترشوندگی سطح ورق آکرلیک پولیش مکانیکی شده

فرشاد اسمعیلیان<sup>۱</sup>، مازیار صهبا یغمایی<sup>۱</sup>، رضا ریاحی فر<sup>۱</sup>، بابک ریسی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>. پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده سرامیک، آزمایشگاه ترشوندگی و سیالات (دانشجوی کارشناسی ارشد، استادیار، استادیار، دانشیار)

### چکیده

پدیده‌ی ترشوندگی و اندازه‌گیری زاویه تماس یکی از پرکاربردترین جنبه‌های علم و مهندسی سطح است. در سال ۱۸۰۵ میلادی توماس یانگ با توصیف کیفی پدیده‌ی ترشوندگی، بنیان این مبحث از علم سطح را پایه‌ریزی کرد. اثبات ترمودینامیکی معادله‌ی یانگ نشان می‌دهد که فرض اساسی این معادله ایده‌آل بودن سطح است. نکته‌ای که در تجربه مشاهده نمی‌شود. در سال ۱۹۳۶ میلادی ونزل و در سال ۱۹۴۴ میلادی کسی و بکستر تلاش نمودند مدل‌هایی برای سطوح غیرایده‌آل و ناهموار ارائه کنند. مقاله‌ی حاضر با بررسی سطوح آکرلیکی که تحت پولیش مکانیکی قرار گرفته‌اند به بررسی مدل‌های ارائه شده توسط این محققین می‌پردازد. به منظور بررسی ترمودینامیکی وضعیت قطره‌ای که بر این سطوح قرار گرفته مدل امیرفضلی و لی، به کار رفته است. نتایج نشان می‌دهند که رژیم ونزل (که در آن مایع به درون ناهمواری‌ها نفوذ می‌کند) و رژیم کسی-بکستر (که در آن مایع به درون ناهمواری‌ها نفوذ نمی‌کند)، حالات حدی بوده و ترجیحاً نمی‌بایست مورد استفاده قرار گیرند. جایگزین مناسب این معادلات رابطه‌ی اصلاح شده‌ی کسی-بکستر است که حالت میانه و بهینه‌ای را برای قطره تصور می‌کند. مدلسازی انجام شده نشان می‌دهد که رژیم ترشوندگی اصلاح شده تطابق قابل قبول با داده‌های منتج از آزمایش ترشوندگی داشته و می‌تواند محدوده‌ی زاویه تماس تعادلی و حداکثر زاویه تماس را پیش‌بینی نماید.

**واژه‌های کلیدی:** ترشوندگی، زاویه تماس ظاهری، مدلسازی ترمودینامیکی، ورق آکرلیک.

<sup>۱</sup>. Farshad.Esmailian@Gmail.com

## مقدمه

امروزه ترشوندگی به عنوان یکی از پرکاربردترین مباحث علم و مهندسی سطح شناخته می‌شود [۱]. کاربرد در صنایع شیمیایی نظیر رنگ‌ها، صنایع خودروسازی به ویژه در آماده‌سازی سطوح و تولید شیشه‌های خودتمیزشونده تنها بخشی از بستر گسترده‌ی مبحث ترشوندگی است [۲]. توماس یانگ<sup>۱</sup> نخستین دانشمندی بود که در سال ۱۸۰۵ میلادی هر چند به صورت کیفی، درک درستی از پدیده‌ی ترشوندگی ارائه کرد [۳]. خاصیتی که رژیم ترشوندگی یک سطح مشخص را تعریف می‌کند زاویه تماس می‌باشد که با کمک معادله‌ی یانگ تعریف می‌شود.

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

در معادله‌ی (۱)،  $\gamma$  انرژی سطحی فصل مشترک فازهای مربوطه است. این معادله، در حقیقت نشان می‌دهد که برای قطره‌ای از مایعی مشخص (L) که بر روی سطحی (S) قرار گرفته و توسط سیالی دیگر که معمولاً بخار در نظر آورده می‌شود (V)، احاطه شده است، می‌توان یک زاویه تماس مشخصه تعریف نمود ( $\theta_Y$ ). وضعیت این قطره در شکل (۱)-الف نمایش داده شده است.

با وجود آنکه این معادله به صورت ترمودینامیکی قابل اثبات است اما مجموعه‌ای از فرض‌های اولیه برای استخراج آن لحاظ شده است. اساسی‌ترین این فرض‌ها کاملاً صاف، خنثی و از نظر شیمیایی و فیزیکی همگن بودن سطح است [۴، ۵]. مجموعه‌ی این مفروضات اولیه در ایده‌آل بودن سطح خلاصه می‌شود.

آزمایش‌های تجربی به وضوح انحراف از زاویه تماس یانگ را نمایش می‌دهند. برای سطوح واقعی صرف نظر از واکنش‌پذیری و قابلیت نفوذ مایع به زیرلایه، سطح جامد حتی در ابعاد اتمی نیز کاملاً صاف و ایده‌آل نیست [۵].

بنابراین این انحراف منطقی به نظر می‌رسد. تلاش‌های متعددی برای مدلسازی حالات غیر ایده‌آل انجام شده است تا نتایج تجربی را قابل پیش‌بینی نماید. قدیمی‌ترین این تلاش‌ها در سال ۱۹۳۶ میلادی توسط رابرت ونزل<sup>۲</sup>، منجر به ارائه‌ی رابطه‌ی زیر شده است [۶].

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

در این رابطه  $r_f$  نسبت سطح واقعی به سطح تصویر شده بوده و ضریب ناهمواری نام دارد. به این ترتیب زاویه تماس ظاهری<sup>۳</sup> قطره‌ای بر روی سطحی ناهموار قابل بررسی خواهد بود. پس از ونزل، کسی و بکستر مدل دیگری برای سطوح غیر ایده‌آل ارائه نمودند [۷]. این محققین، برای ارائه مدل خود به تعریف کسر سطح جامد در تماس با قطره،  $f_s$  پرداختند و به این ترتیب رابطه‌ی خود را برای سطوح ناهموار به صورت معادله‌ی (۳) معرفی کردند.

1. Thomas Young.

2. Robert Wenzel.

3. Apparent Contact Angle.

$$\cos \theta_{app}^{CB} = f_s (\cos \theta_Y + 1) - 1 \quad (3)$$

اختلاف اساسی دو مدل، در نحوه‌ی برخورد آن‌ها با سطح غیرایده‌آل می‌باشد. همانطور که شکل (۱) -ب، نمایش می‌دهد، حالت ترمودینامیکی و نزل وضعیتی را برای قطره تصور می‌کند که بر روی سطح ناهموار قرار گرفته و مایع به درون ناهمواری‌ها نفوذ کرده باشد. در مقابل حالت کسی-بکستر، قطره را بر روی نوک ناهمواری‌ها در نظر می‌آورد که در شکل (۱) -ج نمایش داده شده است. در برابر این دو حالت عمومی، نخستین بار ماساشی میوا و همکاران<sup>۱</sup> به رابطه‌ای ترکیبی اشاره نمودند [۸]. پس از آن‌ها آبراهام مرمور<sup>۲</sup> با اثبات ترمودینامیکی، رابطه‌ای ترکیبی که امروزه به نام رابطه‌ی اصلاح شده‌ی کسی-بکستر<sup>۳</sup> شناخته می‌شود را بسط داد [۹]. بر مبنای نگرش حاکم بر حالت اصلاح شده‌ی کسی-بکستر، مایع تا حدودی به درون ناهمواری‌ها نفوذ می‌کند. معادله‌ی (۴) رابطه‌ی اصلاح شده‌ی کسی-بکستر را نشان داده و شکل (۱) -د وضعیت قطره را در این حالت نمایش می‌دهد.

$$\cos \theta_{app}^{RCB} = f_s (r_f \cos \theta_Y + 1) - 1 \quad (4)$$

تمامی حالت‌های فوق را می‌توان با کمک روابط ترمودینامیکی به اثبات رساند [۱۰]. با این وجود مکرراً از نظر تجربی به اثبات رسیده است که این حالت‌ها قابلیت تعریف وضعیت قطره را ندارند [۱۱-۱۳]. در مقابل نیز بسیاری محققین بر این نکته تأکید داشتند که این حالت‌ها در حقیقت پایدارترین وضعیت ترمودینامیکی را برای قطره تعریف می‌کنند. بنابراین حالت‌های نیمه‌پایدار را در نظر نمی‌آورند [۱۴-۱۶]. به این ترتیب در صورتی که قطره در وضعیتی نیمه‌پایدار قرار داشته باشد این حالت‌های ترمودینامیکی قابلیت پیشبینی وضعیت قطره را نخواهند داشت.

بررسی ترمودینامیکی قطره‌ای سه بعدی که بر روی سطحی ناهموار قرار گرفته است، بسیار دشوار می‌باشد. به ویژه ناهمگنی‌های شیمیایی و فیزیکی سطح امکان مدلسازی شکل قطره و استخراج حالات نیمه‌پایدار را دشوارتر می‌کنند. با این وجود در سال ۲۰۰۵ میلادی امیرفضلی و لی<sup>۴</sup>، نگرشی دو بعدی برای مدلسازی وضعیت قطره به کار بردند [۱۷]. مدل ارائه شده توسط این دو محقق بر مبنای یکی از نخستین مدل‌های ترمودینامیکی ارائه شده توسط نیومن و گود<sup>۵</sup> می‌باشد [۱۸].

به منظور آن که بتوان از مدل امیرفضلی و لی استفاده نمود، فرض شده است که ذرات ساینده‌ی کاغذ سنباده به صورت شکل (۲) -ب با سطح تماس یافته و سطح را ناهموار می‌گردانند. اگر قطره‌ای بر روی چنین سطوح ناهمواری قرار گیرد، می‌توان بر مبنای حالت‌های و نزل و کسی-بکستر وضعیت آن را تعریف نمود.

1. Masashi Miwa et al.

2. A. Marmur.

3. Revised-Cassie-Baxter.

4. A. Amirfazli, W. Li.

5. A. W. Neumann, R. J. Good.

به منظور بررسی انرژی آزاد قطره، علاوه بر دمای ثابت، فرض می‌شود که حجم قطره نیز ثابت است. در آزمایش‌های معمول ترشوندگی در صورتی که از مایعاتی با دمای جوش بالاتر از دمای محیط استفاده گردد چنین فرضی مناسب بوده و دقیق است. حال با توجه به اینکه حجم قطره ثابت است، جزئیات مدل امیرفضلی و لی دقیق‌تر بررسی می‌شوند. بر مبنای تحلیل این دو محقق، می‌توان وضعیت قطره را با کمک تحلیل مقطع دوبعدی قطره بررسی نمود. از آنجا که تحلیل از حالت سه بعدی به حالت دوبعدی تقلیل یافته است، فرض ثابت بودن حجم قطره به فرض ثابت بودن مساحت مقطع آن تغییر می‌نماید. همچنین برای ساده‌سازی مقطع قطره به عنوان بخشی از یک دایره در نظر آورده می‌شود. اکنون می‌توان بر مبنای حالت‌های ونزل و کسی-بکستر به بررسی ترمودینامیکی سطح ناهموار شکل (۲)-ج پرداخت.

### تغییرات انرژی آزاد سیستم در رژیم ونزل

همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، برای چنین قطره‌ای می‌توان دو تغییر حالت کلی از A به B و از A به C را تعریف نمود. به این ترتیب در صورتی که جابه‌جایی لبه‌ی قطره در این دو حالت به نحوی صورت گیرد که درون ناهمواری‌ها نیز پر شود، رژیم ترشوندگی ونزل رخ داده است. برای پیشروی لبه‌ی قطره از حالت A به B (نظیر D به E) شرط ثابت بودن مساحت سطح مقطع قطره به صورت:

$$\left( \theta_A \frac{L_A^2}{\sin^2 \theta_A} - L_A^2 \cot \theta_A \right) = \left( \theta_B \frac{L_B^2}{\sin^2 \theta_B} - L_B^2 \cot \theta_B \right) + \lambda h \quad (5)$$

نوشته می‌شود. توجه شود که به دلیل تقارن سیستم تنها نیمی از قطره مورد بررسی قرار گرفته است. تغییرات انرژی آزاد به ازای این جابه‌جایی برای حالت ونزل برابر خواهد بود با:

$$\Delta F_{A \rightarrow B} = \gamma_{LV} \left[ \left( \theta_B \frac{L_B}{\sin \theta_B} - \theta_A \frac{L_A}{\sin \theta_A} \right) - \frac{2h}{\sin \alpha} \cos \theta_Y \right] \quad (6)$$

به طریق مشابه می‌توان برای پیشروی قطره از حالت A به C (نظیر D به B) در رژیم ونزل نوشت:

$$\left( \theta_A \frac{L_A^2}{\sin^2 \theta_A} - L_A^2 \cot \theta_A \right) = \left( \theta_C \frac{L_C^2}{\sin^2 \theta_C} - L_C^2 \cot \theta_C \right) \quad (7)$$

$$\Delta F_{A \rightarrow C} = \gamma_{LV} \left[ \left( \theta_C \frac{L_C}{\sin \theta_C} - \theta_A \frac{L_A}{\sin \theta_A} \right) + s \cdot \cos \theta_Y \right] \quad (8)$$

### تغییرات انرژی آزاد سیستم در رژیم کسی-بکستر

برای سیستم حاضر می‌توان مشابه رژیم ونزل به بررسی رژیم کسی-بکستر پرداخت. در این حالت شرط ثبات مساحت سطح مقطع قطره و تغییرات انرژی آزاد سیستم برای پیشروی لبه‌ی قطره از A به B (نظیر D به E) به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود (شکل (۳)).

$$\left( \theta_A \frac{L_A^2}{\sin^2 \theta_A} - L_A^2 \cot \theta_A \right) = \left( \theta_B \frac{L_B^2}{\sin^2 \theta_B} - L_B^2 \cot \theta_B \right) \quad (9)$$

$$\Delta F_{A \rightarrow B} = \gamma_{LV} \left[ \left( \theta_B \frac{L_B}{\sin \theta_B} - \theta_A \frac{L_A}{\sin \theta_A} \right) + \lambda \right] \quad (10)$$

باید توجه داشت که در حالت کسی-بکستر میان ناهمواری‌ها پر نشده و لبه‌ی قطره تنها بر بالای ناهمواری‌ها حرکت می‌نماید. بنابراین به طریق مشابه می‌توان پسروری لبه‌ی قطره از A به C (نظیر D به B) را به صورت زیر فرموله نمود:

$$\left( \theta_A \frac{L_A^2}{\sin^2 \theta_A} - L_A^2 \cot \theta_A \right) = \left( \theta_C \frac{L_C^2}{\sin^2 \theta_C} - L_C^2 \cot \theta_C \right) \quad (11)$$

$$\Delta F_{A \rightarrow C} = \gamma_{LV} \left[ \left( \theta_C \frac{L_C}{\sin \theta_C} - \theta_A \frac{L_A}{\sin \theta_A} \right) + s \cdot \cos \theta_Y \right] \quad (12)$$

اکنون می‌توان منحنی‌های انرژی آزاد و سد انرژی آزاد را برای سطح حاوی ناهمواری‌های موجود رسم نمود. برای رسم منحنی انرژی آزاد کافی است یک وضعیت مشخص (نظیر A) را با انرژی صفر در نظر آورده و انرژی آزاد وضعیت‌های بعدی با کمک سد انرژی آزاد محاسبه شود. بنابراین منحنی انرژی آزاد با کمک روابط (۶)، (۸)، (۱۰) و (۱۲) رسم می‌شود. از طرفی چون نگرش حاکم بر سیستم موجود کاملاً نسبی می‌باشد، در نظر گرفتن انرژی صفر برای یک وضعیت مشخص مشکل‌ساز نشده و امکان می‌دهد تا نگرش قیاسی حاکم بر مسئله بر قرار باشد [۱۷]. شکل (۴) با توجه به مدل ارائه شده رسم شده است و نمونه‌ای از منحنی‌های انرژی آزاد که با کمک این مدلسازی می‌توان به دست آورد را نمایش می‌دهد.

### مواد و روش تحقیق

به منظور بررسی مدلسازی انجام شده، ۵ نمونه از ورق آکرلیک ساخت شرکت چوچن<sup>۱</sup> انتخاب شده‌اند. زاویه تماس اولیه بر روی این نمونه‌ها ۷۲٫۲ درجه به دست آمده است (شکل (۵)-الف). این زاویه تماس با مقدار ذکر شده در [۱۹] مطابقت دارد. این مقدار در مدل ارائه شده به عنوان زاویه تماس یانگ به کار رفته است. لازم به ذکر است که تمامی زاویه تماس‌های به دست آمده با چکاندن آب دیونیزه بر سطح و با کمک نرم‌افزار ارائه شده توسط استالدر و همکاران<sup>۲</sup> اندازه‌گیری شده‌اند [۲۰].

پس از شستشوی اولیه با اتانول، نمونه‌ها با کمک کاغذ سنباده گس و این<sup>۳</sup> سنباده زنی شده‌اند تا سطحی کاملاً یکنواخت به دست آید. ذرات ساینده‌ی کاغذهای سنباده از جنس سیلیکون کارباید بوده و شماره‌ی استاندارد ISO کاغذهای استفاده شده به همراه اندازه‌ی متوسط ذرات ساینده‌ی در جدول (۱) موجود است.

جهت بررسی ناهمواری سطح و به دست آوردن مقادیر مشخصه‌ی ناهمواری با توجه به مدل ارائه شده، فرض شده است که ساینده‌هایی مربعی شکل سطح را ساییده‌اند. بنابر مدل حاضر، مسئله‌ی اساسی به دست آوردن  $\lambda$  بوده و دیگر پارامترها نظیر  $h$  و  $s$  با توجه به آن قابل محاسبه می‌باشند (شکل (۴)-د). مقدار  $\lambda$  نیز با کمک تصویربرداری میکروسکوپ نوری از سطح ساییده شده به صورت مقداری متوسط به دست آمده است. شکل

1. Cho Chen Industry Co.

2. A. F. Stalder et al.

3. Gesswein

(۵) نمایش دهنده‌ی سطوح ساییده شده‌ی نمونه‌ها، پس از سنباده‌زنی به همراه تصویر قطره‌ی چکانده شده بر روی سطح است. بر مبنای این تصاویر مقدار متوسطی برای تمامی مشخصه‌های سطح به دست آمده که در جدول (۱) قابل مشاهده است.

### نتایج و بحث

با توجه به شکل (۲) - ج و د، و

جدول (۱) مشخصه‌های ناهمواری سطوح آماده شده را می‌توان به دست آورد. منحنی‌های انرژی آزاد برای هر نمونه نیز در دو حالت و نزول و کسی-بکستر مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. جدول (۲) نتایج به دست آمده از رسم این منحنی‌ها را در خود جای داده است. باید توجه نمود که در تمامی اندازه‌گیری‌ها تنها پیشروی قطره لحاظ شده است. دلیل این امر وضعیت قطره در آزمایش ترشوندگی در حالت ایستا است. در این آزمایش قطره به سطح نزدیک شده و پس از برخورد با سطح بر روی آن پخش می‌شود. در چنین حالتی لبه‌ی قطره تنها پیشروی می‌نماید، بنابراین معادلات (۶) و (۱۰) و روابط مشابه جهت مدلسازی به کار رفته‌اند.

بر مبنای تحلیلی که مدل ارائه می‌نماید، حداکثر زاویه تماس در حالت کسی-بکستر رخ داده و این مقدار برابر با ۱۸۰ درجه بوده است. همچنین جدول (۲) نشان می‌دهد که برای حالت‌های کسی-بکستر و ونزل نتایج به دست آمده مطابقت خوبی با مدل ندارند. این امر البته می‌تواند ناشی از فرض‌های اولیه و همچنین شکل ناهمواری‌ها باشد. با این حال و همانطور که رابطه‌ی (۴) نشان می‌دهد، رژیم ترکیبی می‌تواند برقرار باشد. در رژیم اصلاح شده کسی-بکستر مایع، اندکی به درون ناهمواری‌ها نفوذ می‌کند. این رژیم در دو حالت حدی برای  $\text{If} = 1$  و همچنین عمق نفوذ برابر با عمق ناهمواری به ترتیب به رژیم‌های کسی-بکستر و ونزل تغییر می‌نماید (معادله (۴)). نکته‌ی جالب توجه آن است که اگر در نظر گرفته شود که مایع تا نصف عمق ناهمواری به آن نفوذ کرده است، نتایج مطابقت بهتری با اندازه‌گیری‌ها پیدا می‌کنند. بعنوان مثال بازه‌ی زاویه تماس تعادلی تا حداکثر زاویه تماس برای نمونه‌ها در رژیم اصلاح شده نیز در جدول (۲) قابل مشاهده است. از طرفی سطح ورق آکرلیک آب‌دوست می‌باشد، بنابراین مسئله‌ی نفوذ مایع به درون ناهمواری‌های میکرونی قابل قبول خواهد بود.

### نتیجه‌گیری

در مقاله‌ی حاضر به منظور بررسی مدل ترمودینامیکی امیرفضلی و لی، نمونه‌هایی از ورق آکرلیکی تحت پولیش مکانیکی قرار گرفته و ناهمواری‌های ایجاد شده بر سطح نمونه‌ها با فرض‌های نمایش داده شده در شکل (۲) تعریف شده‌اند. سپس تمامی نمونه‌ها تحت آزمایش ترشوندگی قرار گرفته و زاویه تماس به دست آمده با توجه به مدل این دو محقق تحلیل شده است که نتایج به دست آمده به شرح زیر می‌باشد:

(۱) بر مبنای داده‌های نمایش داده شده در جدول (۲) دو رژیم ترشوندگی کسی-بکستر و ونزل تطابق خوبی با نتایج به دست آمده نداشته‌اند. همانطور که در مقدمه‌ی مقاله‌ی حاضر نیز اشاره گردید، این دو حالت ترمودینامیکی در حقیقت وضعیت‌هایی حدی را برای قطره تعریف می‌نمایند. بر این مبنای توصیه می‌شود حتی جهت مدلسازی مورد استفاده قرار نگیرند.

(۲) جدول (۲) همچنین رژیم اصلاح شده‌ی کسی-بکستر را با داده‌های آزمایش مقایسه نموده است. در این رژیم ترکیبی فرض می‌شود که مایع تا حدودی به درون ناهمواری‌ها نفوذ می‌کند. نتایج به دست آمده در این رژیم با داده‌های آزمایش همخوانی مناسب‌تری دارند. بنابراین توصیه می‌شود از معادله‌ی اصلاح شده‌ی کسی-بکستر در بررسی رفتار سطوح و به ویژه مدل‌سازی ترمودینامیکی استفاده گردد.

(۳) هر چند معادلات (۲) و (۳) شرایط پایدار ترمودینامیکی را برای یک سطح تعریف می‌کنند، اما مدل امیرفضلی و لی نمایش می‌دهد که این شرایط بسیار تحت تاثیر اندازه و مقیاس ناهمواری‌هاست. شکل (۴) به وضوح نشان می‌دهد که در اندازه‌ی بسیار کوچک ناهمواری‌ها مدل‌سازی انجام شده به سوی معادله و نزل میل می‌کند. اما همانطور که از نتایج جدول (۲) بر می‌آید، با افزایش اندازه‌ی ناهمواری‌ها، برای سیستم ممکن است حالت ترمودینامیکی و نزل و کسی-بکستر قابل تعریف نباشد.

(۴) در پایان ذکر این نکته لازم به نظر می‌رسد که مدل‌سازی انجام شده با در نظر آوردن مفروضاتی صورت گرفته که ممکن است در مورد برخی نمونه‌ها صادق نباشد. سطح ساییده شده توسط ذرات ساینده هرگز به حالت ایده‌آل نمایش داده شده در شکل (۲) نخواهد بود. این نکته خود در شکل (۵) قابل مشاهده است. لبه‌های ناهمواری‌ها حالتی دندان‌دار دارند که در صورت در نظر آوردن این مفروضات مدل ساده‌ی ارائه شده بسیار پیچیده‌تر می‌شود. با این حال تطابق مناسبی که نتایج جدول (۲)، به ویژه با رژیم اصلاح شده‌ی کسی-بکستر دارد، خود موید دقت این رابطه و اهمیت و کاربرد قابل توجه مدل امیرفضلی و لی می‌باشد.

## مراجع

- [۱] G. Bracco and B. Holst, Surface science techniques, 2013, Springer Science & Business Media.
- [۲] P.-G. De Gennes, F. Brochard-Wyart and D. Quéré, Capillarity and wetting phenomena: drops, bubbles, pearls, waves, 2004, Springer Science & Business Media.
- [۳] T. Young, "An essay on the cohesion of fluids", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1805, 65-87.
- [۴] A. W. Adamson and A. P. Gast, Physical chemistry of surfaces, 1997, John Wiley & Sons.
- [۵] E. Bormashenko, "Progress in understanding wetting transitions on rough surfaces", *Advances in Colloid and Interface Science*, 222, 2015, 92-103.
- [۶] R. N. Wenzel, "Resistance of solid surfaces to wetting by water", *Industrial & Engineering Chemistry*, 8, 28, 1936, 988-994.
- [۷] A. Cassie and S. Baxter, "Wettability of porous surfaces", *Transactions of the Faraday Society*, 40, 1944, 546-551.
- [۸] M. Miwa, A. Nakajima, A. Fujishima, K. Hashimoto and T. Watanabe, "Effects of the Surface Roughness on Sliding Angles of Water Droplets on Superhydrophobic Surfaces", *Langmuir*, 13, 16, 2000, 5754-5760.
- [۹] A. Marmur, "Wetting on hydrophobic rough surfaces: to be heterogeneous or not to be?", *Langmuir*, 20, 19, 2003, 8343-8348.
- [۱۰] G. H. Meier, Thermodynamics of Surfaces and Interfaces: Concepts in Inorganic Materials, 2014, Cambridge University Press.
- [۱۱] H. Y. Erbil, "The debate on the dependence of apparent contact angles on drop contact area or three-phase contact line: a review", *Surface Science Reports*, 4, 69, 2014, 325-365.

- [۱۲] C. Extrand, "Contact angles and hysteresis on surfaces with chemically heterogeneous islands", *Langmuir*, 9, 19, 2003, 3793-3796.
- [۱۳] L. Gao and T. J. McCarthy, "How Wenzel and Cassie Were Wrong", *Langmuir*, 7, 23, 2007, 3762-3765.
- [۱۴] E. Bormashenko, "Why does the Cassie-Baxter equation apply?", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1-3, 324, 2008, 47-50.
- [۱۵] A. Marmur and E. Bittoun, "When Wenzel and Cassie Are Right: Reconciling Local and Global Considerations", *Langmuir*, 3, 25, 2009, 1277-1281.
- [۱۶] M. Nosonovsky, "On the Range of Applicability of the Wenzel and Cassie Equations", *Langmuir*, 19, 23, 2007, 9919-9920.
- [۱۷] W. Li and A. Amirfazli, "A thermodynamic approach for determining the contact angle hysteresis for superhydrophobic surfaces", *Journal of colloid and interface science*, 1, 292, 2005, 195-201.
- [۱۸] A. Neumann and R. Good, "Thermodynamics of contact angles. I. Heterogeneous solid surfaces", *Journal of Colloid and Interface Science*, 2, 38, 1972, 341-358.
- [۱۹] D. Li, *Encyclopedia of microfluidics and nanofluidics*, 2008, Springer Science & Business Media.
- [۲۰] A. F. Stalder, T. Melchior, M. Müller, D. Sage, T. Blu and M. Unser, "Low-bond axisymmetric drop shape analysis for surface tension and contact angle measurements of sessile drops", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1, 364, 2010, 72-81.

جدول (۱): مشخصات ساینده‌های به کار رفته در ایجاد سطوح ناهموار. ساینده در مدل به صورت مربع در نظر آورده شده که برای استخراج ضلع آن، مساحت مربع با مساحت دایره‌ای به قطر استاندارد ذرات برابر گرفته شده است. همچنین مقادیر اندازه‌گیری شده مشخصات ناهمواری‌ها نیز در جدول ارائه شده است.

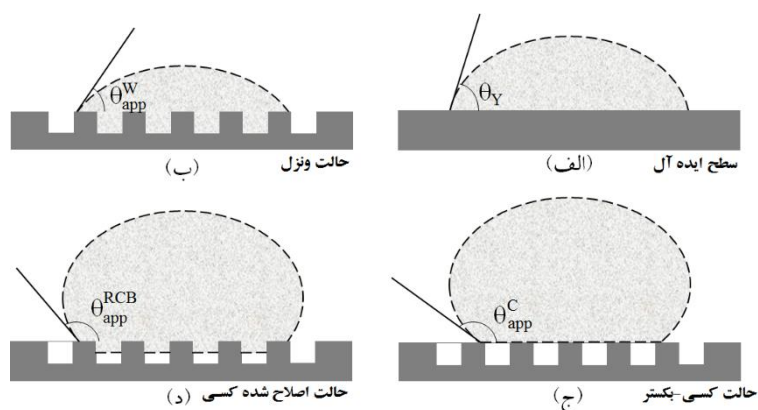
س (میکرون)	h (میکرون)	$\lambda$ (میکرون)	عرض ساینده با فرض مربعی بودن مدل (میکرون)	قطر ساینده با فرض دایره‌ای بودن (میکرون)	کد ساینده
۱۵۸,۰	۴۷,۰	۹۴,۰	۱۷۸,۰	۲۰۱,۰	<b>P80</b>
۶۴,۳	۳۱,۰	۶۱,۰	۸۸,۶	۱۰۰,۰	<b>P150</b>
۲۳,۴	۲۱,۰	۴۲,۰	۴۶,۳	۵۲,۲	<b>P280</b>
۱۹,۵	۳,۹	۷,۸	۱۹,۳	۲۱,۸	<b>P800</b>
۸,۰	۱,۷۲	۳,۴	۸,۱	۱۰,۳	<b>P2000</b>

جدول (۲): زاویه تماس تعادلی و زاویه تماس حداکثر که توسط مدل امیرفضلی و لی، برای سطوح ناهموار و با توجه به فرض‌های نمایش داده شده در شکل (۲) - ج و د به دست آمده است. زاویه تماس رژیم اصلاح شده نیز برای حالتی که آب تا نیمی از عمق ناهمواری نفوذ کند قابل مشاهده است.

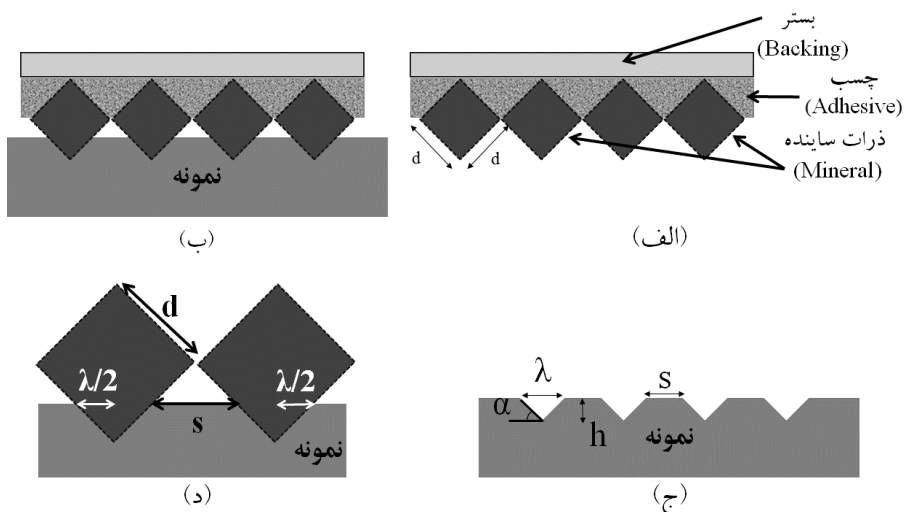
کد ساینده	زاویه تماس رژیم کسی - بکستر	زاویه تماس رژیم ونزل	زاویه تماس رژیم اصلاح شده	زاویه تماس اندازه‌گیری
--------------	--------------------------------	----------------------	------------------------------	---------------------------



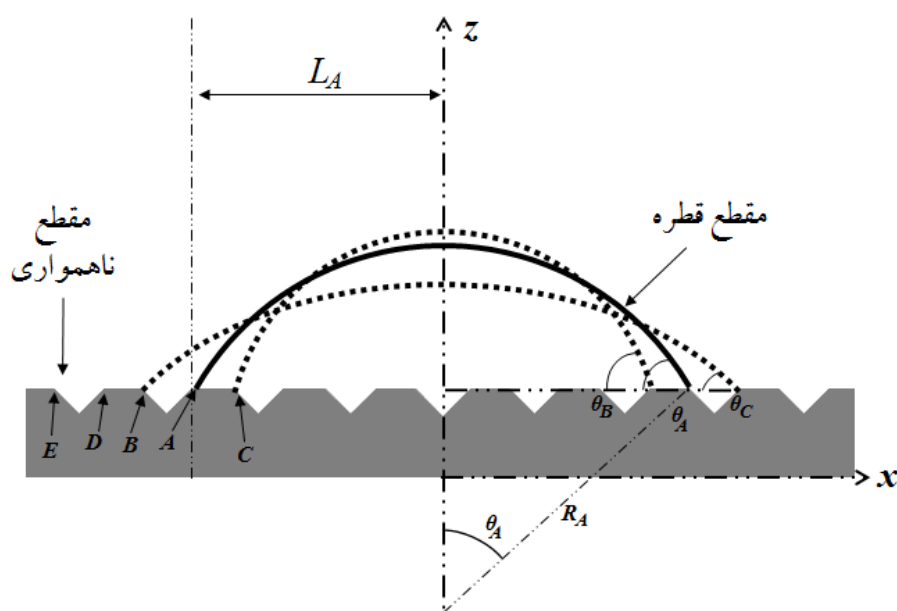
شده (درجه)	حداکثر (درجه)	تعادلی (درجه)	حداکثر (درجه)	تعادلی (درجه)	rf	حداکثر (درجه)	تعادلی (درجه)	fs	
۱۰۴,۲ +/- ۱,۰	۱۰۸,۹	۸۹,۰	۷۶,۵	۷۲,۶	۱,۱۵	۱۸۰	۱۰۵,۱	۰,۶۳	<b>P80</b>
۱۰۰ +/- ۰,۸	۱۰۸,۰	۹۰,۷	۷۴,۰	۶۹,۷	۱,۲۱	۱۸۰	۱۱۱,۵	۰,۵۱	<b>P150</b>
۹۳,۹ +/- ۰,۹	۱۰۷,۵	۹۵,۱	۷۲,۸	۶۷,۹	۱,۲۷	۱۸۰	۱۲۳,۴	۰,۳۶	<b>P280</b>
۹۱,۰ +/- ۰,۸	۱۰۶,۷	۸۲,۶	۷۳,۰	۷۰,۴	۱,۱۲	۱۸۰	۹۴,۴	۰,۷۱	<b>P800</b>
۸۹,۸ +/- ۰,۹	۱۰۶,۶	۸۲,۸	۷۲,۴	۷۰,۱	۱,۱۲	۱۸۰	۹۵,۲	۰,۷۰	<b>P2000</b>



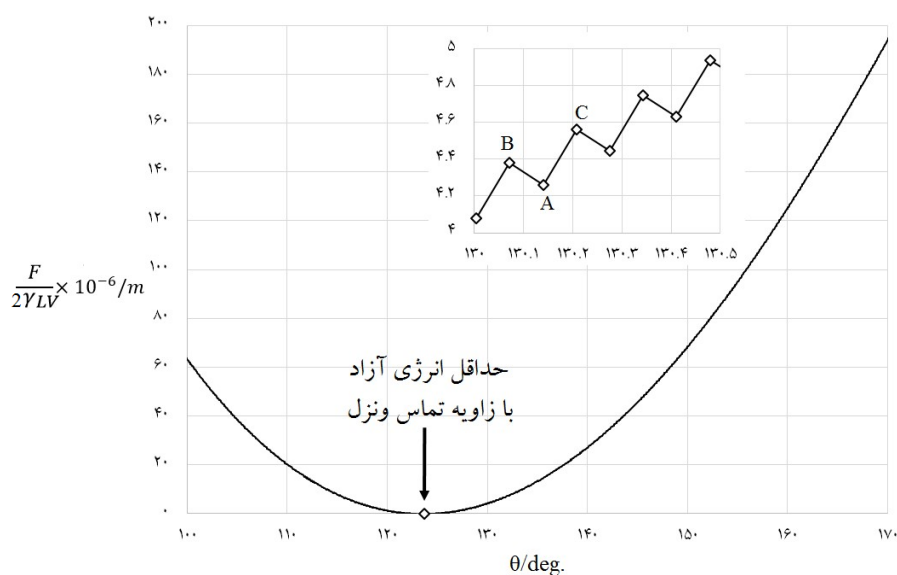
شکل (۱): (الف) حالت قرارگیری قطره بر روی سطح ایده آل و زاویه تماس یانگ. (ب) تا (د) حالت های قرارگیری قطره بر روی سطوح ناهموار را نمایش می دهند که برای هر کدام زاویه تماس ظاهری متناسب با حالت تعریف می شود.



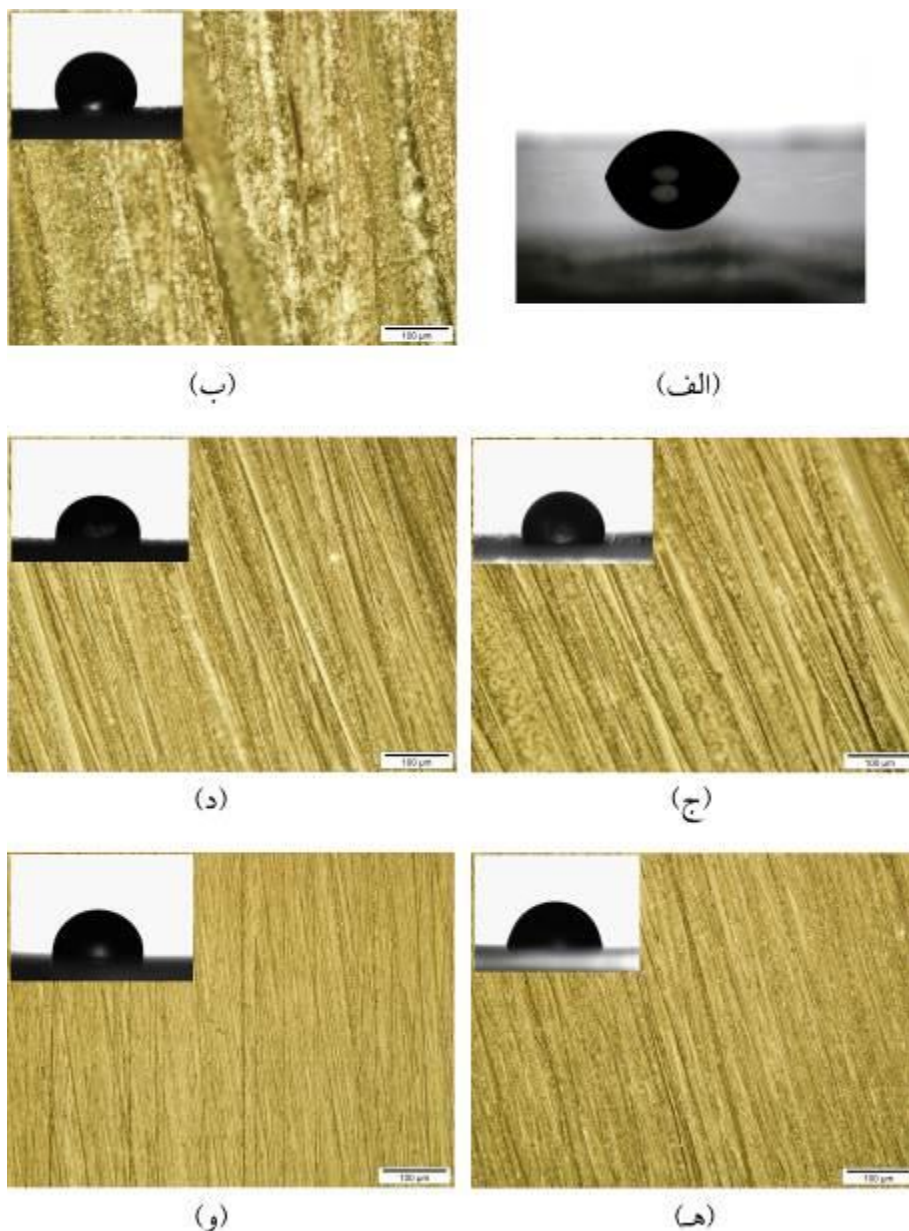
شکل (۲): (الف) وضعیت اجزای سازنده کاغذ سنباده که در مدل ارائه شده فرض شده است. (ب) نحوه تماس ذرات ساینده با سطح نمونه و (ج) ناهمواری های باقی مانده بر سطح نمونه به همراه پارامترهای فاصله (s)، طول موج (lambda) و عمق ناهمواری (h).



شکل (۳): شمای مقطع دو بعدی قطره واقع بر صفحه  $y=0$ . حرکت لبه‌ی قطره از A به C و A به B دو تغییر حالت عمومی برای قطره بر روی سطح ناهموار نمایش داده شده می‌باشد.



شکل (۴): منحنی انرژی آزاد رسم شده برای مدل ارائه شده در شرایطی که  $\theta_Y = 110$  درجه،  $\lambda = s = 1$  و  $h = 1$  میکرومتر باشند. همانطور که در شکل نمایان است، حداقل انرژی آزاد برای  $I_f = 1.62$  زاویه ونزل با مقدار  $123.6$  درجه به دست آمده است که صحت ترمودینامیکی مدل را می‌رساند. بخش بزرگنمایی شده وضعیت واقعی نمودار را نمایش می‌دهد که در آن حالت نیمه پایدار، و B و C حالات ناپایدار می‌باشند. تاکید می‌شود که به دلیل تقارن سیستم مدلسازی برای نیمی از قطره انجام شده است.



شکل (۵): (الف) تصویر قطره‌ای چهار میکرولیتری بر روی سطح کاملاً صاف و اولیه‌ی ورق آکرلیکی. (ب) تا (و) تصویر میکروسکوپ نوری سطوح سنباده‌زنی شده با به ترتیب P80، P150، P280، P800 و P2000 در بزرگنمایی ۲۰۰ برابر. تصویر آزمایش ترشوندگی برای قطره‌ی قرار گرفته بر سطح نیز قابل رویت می‌باشد. مقیاس نمایش داده شده در تصاویر ۱۰۰ میکرون است.