

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

تأثیر هندسه بافت سطحی لیزری و حجم قطره بر زاویه تماس با زیر لایه Ti6Al4V

مقاله پژوهشی

غلامرضا دباغ^۱، سید خطیب الاسلام صدرنژاد^{۲*}، رضا شجاع رضوی^۳، امیرعباس نوربخش^۴، ناهید حسن زاده نعمتی^۵

۱- دانشجوی دکتری بیومتریال، گروه مهندسی پزشکی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- استاد تمام علم مواد و مهندسی، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

۳- استاد تمام علم مواد و مهندسی، دانشکده مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

۴- دانشیار علم مواد و مهندسی، گروه علم مواد، واحد شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرضا، ایران.

۵- استادیار مهندسی پزشکی گرایش بیومتریال، گروه مهندسی پزشکی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

sadrnezh@sharif.edu#

چکیده

اصلاح سطح کاشتنی با ایجاد بافت سطحی لیزری بهترین روش شناخته شده برای افزایش چسبندگی است. بهترین الگوی بافت سطحی لیزری هنوز ناشناخته است. به منظور بررسی ویژگی‌های دیگری از الگوی جدید پیشنهادی نویسندگان، در این پژوهش ابتدا بافت‌های جدید خطوط متقاطع با زاویه‌های ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه روی سطح آلیاژ Ti6Al4V با استفاده از لیزر پالسی Nd:YAG ایجاد گردید. سپس زاویه تماس قطرات آب به دو روش ۱- ثبت و آنالیز تصویر قطره و ۲- بکارگیری معادلات اکسترند و مون اندازه‌گیری شد. قطره‌های آب در دو حجم ۱ μlit و ۲۵ μlit انتخاب شدند. با استفاده از میکروسکوپ متالورژی، SEM، بکارگیری معادلات ونزل و کسلی و رسم نمودارهای مربوطه، تأثیر زاویه بین خطوط، ارتفاع، جدایی و پهنای ستون‌های بافت سطحی بر زاویه تماس قطره بررسی شد. مدل کلاسیکی ترشوندگی بافت‌ها تعیین شد. نتایج نشان داد برای قطره با حجم ۱ μlit زاویه تماس در هر دو روش تقریباً ثابت و مستقل از زاویه خطوط متقاطع است که سازگاری خوبی با نتایج تحقیقات قبلی دارد. برای قطره با حجم ۲۵ μlit زاویه تماس در هر دو روش متغیر و وابسته به زاویه خطوط متقاطع می‌باشد. مدل کلاسیک ترشوندگی بافت‌ها در هر دو حجم قطره منطبق بر مدل ونزل می‌باشد.

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۴

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۶

کلید واژگان:

زاویه تماس سطحی

بافت سطحی لیزری

زاویه خطوط متقاطع

حجم قطره

روش قطره ساکن

Effect of Geometry of Laser Surface Texture and Droplet Volume on Contact Angle with Ti6Al4V Substrate

Gholam Reza Dabbagh¹, Seyed Khadab Al Islam Sadrnezhad^{2*}, Reza Shoja Razavi³, Amir Abbas Nourbakhsh⁴, Nahid Hassanzadeh Nemati⁵

۱- Doctoral student, Department of Biomedical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

۲- Professor of Materials Science and Engineering, Department of Materials Science and Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

۳- Professor of Materials Science and Engineering, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malekashtar University of Technology, Tehran, Iran.

۴- Associate Professor of Materials Science and Engineering, Department of Material Science, Shahreza Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

۵- Assistant Professor of Biomedical Engineering, Department of Biomedical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

* sadrnezh@sharif.edu

Article Information

Original Research Paper

Dor:

۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۴۲۳۳۲۲۶.۱۴۰۲.۱۷.۳.۴.۲

Abstract

Implant surface modification by creating laser surface texturing is the best known method to increase adhesion. The best pattern of laser surface texturing is still unknown. In order to investigate other features of the new pattern proposed by the authors, in this research, first, the new surface patterns of intersecting lines with angles of ۰, ۱۵, ۳۰, ۴۵, ۶۰, ۷۵, and ۹۰ degrees on the surface of Ti6Al4V alloy using pulse Nd: YAG laser was created. Then the contact angle of water droplets was measured by two methods: ۱- recording and analyzing the image of

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Gholam Reza Dabbagh, Seyed Khadab Al Islam Sadrnezhad, Reza Shoja Razavi, Amir Abbas Nourbakhsh, Nahid Hassanzadeh Nemati, Effect of Geometry of Laser Surface Texture and Droplet Volume on Contact Angle with Ti6Al4V Substrate, New Process in Material Engineering, ۲۰۲۳, ۱۷(۳), ۳۷-۵۰.

Keywords:

Surface Contact Angle
Laser Surface Texturing
Intersecting Lines Angle
Droplet Volume
Sessile Droplet Method

۱- مقدمه

چسبیدن سلول به سطح کاشتنی^۱، نه تنها به میزان زبری سطح بلکه به ترشوندگی^۲ آن نیز وابسته است. معیارهای بررسی ترشوندگی سطح، اندازه گیری زاویه تماس و محاسبه انرژی آزاد آن می باشد [۱-۲]. زاویه تماس سطح جامد از روش های مختلفی اندازه گیری می شود که یکی از این روش ها، روش قطره ی ساکن (چسبیده یا نشسته) می باشد. در این روش قطره ی مایع با حجم مشخص و با استفاده از یک سرنگ یا قطره چکان مویرگی، روی سطح جامد قرار داده می شود و پس از چند ثانیه، با استفاده از دوربین دیجیتال، عکس برداری جانبی از مقطع قطره و سطح زیرین آن صورت می گیرد. با رسم بردارهای کشش سطحی و خط مماس بر سطح قطره (آنالیز تصویر قطره) می توان زاویه تماس θ را اندازه گیری کرد [۳].

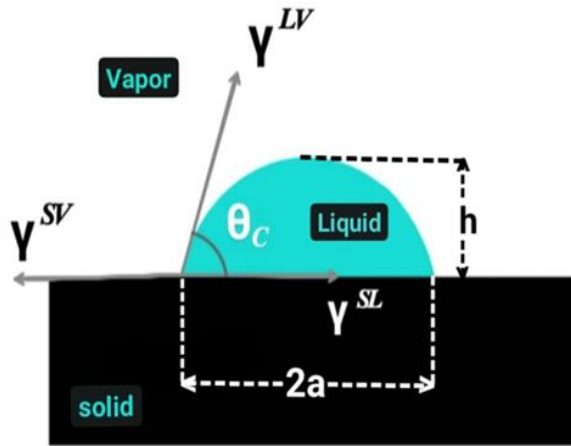
معیار اساسی برای مطالعه زاویه تماس استاتیکی عبارت است از اینکه باید قطره مایع و سطح جامد زیرین آن از لحاظ فیزیکی و شیمیایی غیر برهم کنشی باشند و علاوه بر آن چون زاویه تماس به صورت نوری اندازه گیری می شود، سطح جامد باید از نظر نوری صاف باشد. به همین دلیل سیمای سطح^۳ جامد باید نسبت به اندازه قطر قطره مایع همگن باشد و هرگونه ناهمگنی ریزمقیاس که منشأ فیزیکی یا شیمیایی داشته باشد، باید کوچک بوده و باعث هیچ گونه تغییری در مشخصات نوری قطره ساکن نگردد. برای اندازه گیری دقیق و قابل تکرار زاویه تماس سطوح زبر یا دارای بافت سطحی، باید در انتخاب اندازه قطره دقت شود [۳].

محاسبات نظری روی سطوح دارای بافت سطحی نشان داده است که برای جلوگیری از قابل توجه بودن انحراف خط تماس قطره ناشی از بافت سطح، اندازه قطره باید حداقل ۲ تا ۳ بار بزرگ تر از ابعاد بافت سطحی باشد و هم زمان نیز قطره باید

آن قدر کوچک باشد که اطمینان حاصل شود شکل قطره توسط گرانش بیش از حد منحرف نشده تا تأثیر کمی بر مشخصات نوری قطره داشته باشد [۴-۵]. زمانی که قطره های خیلی کوچک مورد مطالعه قرار می گیرند شاید نیاز باشد که اثر خط کشش روی اندازه گیری زاویه تماس در نظر گرفته شود [۶-۷]. از آنجایی که اغلب قطر قطره آب ساکن حدود ۵mm-۱ است لذا پیشنهاد می شود که ابعاد بافت سطحی Ti6Al4V در رنج ۲۰۰-۱۰۰ μm انتخاب شوند تا داده های به دست آمده برای زاویه تماس هنوز مفید و قابل استفاده باشند [۳].

کرینیس^۴ در سال ۲۰۰۴ نشان داد که برای قطره های در بازه ی ۱۰-۱ μlit چه سطوح آبدوست و چه آبگریز، حجم قطره روی زاویه تماس اندازه گیری شده هیچ تأثیری ندارد. به عنوان یک اولویت کرینیس اشاره کرد که برای سطوح آبدوست قطره های کوچک تر ترجیح داده می شوند و برای سطوح آبگریز، قطره های بزرگ تر مطلوب تر می باشند [۸]. با فرض کروی بودن قطره، قطره ی ساکن با سه کمیت قطر پایه (۲a)، ارتفاع (h) و زاویه تماس θ توصیف می شود (شکل ۱).

وابستگی شکل قطره و زاویه تماس به حجم قطره ی ساکن روی سطح PFA^۵ برای قطره های آب، اتیلن گلیکول و دی یودومتان در سال ۲۰۱۰ توسط اکسترن و مون^۶ مورد مطالعه قرار گرفت و اثر حجم قطره را همان گونه که از ۱ تا ۲۰۰۰ میکرولیتر تغییر می کرد، بررسی کردند [۹]. نتایج نشان داد که برای رژیم قطرات با حجم کوچک (تقریباً کمتر از ۱۰ μlit) هر دوی ۲a و h همان طوری که حجم قطره زیاد می شود، افزایش می یابند و ۲a وابستگی خطی به h دارد که بیانگر انبساط قطره به صورت کروی است. همچنین نتیجه گیری شد که چنانچه قطرات به اندازه کافی کوچک باشند می توان آنها



شکل (۱): تصویری شماتیک از رفتار قطره مایع بر روی سطح جامد.

نمونه: جهت گیری انرژی آزاد سطح جامد، انرژی آزاد سطح مایع، انرژی آزاد سطح تماس نشان داده شده است. h و $2a$ به ترتیب ارتفاع و قطر قطره‌ی ساکن می‌باشند. در سال ۲۰۱۴ مشاهده‌ای متفاوت توسط کنسوی^۷ گزارش شد که نشان می‌داد اندازه گیری زاویه تماس برای آب روی چندین سطح فوق آبگریز با میکروباخت‌های سطحی، به اندازه قطره در محدوده‌ی ۰/۵ تا ۱۹ میکرولیتر حساس نیست [۱۰].

ژا^{۱۱} و جانگ^۸ در سال ۲۰۱۸ نشان دادند که برای جلوگیری از تغییر شکل قطره ناشی از گرانش باید آن را کوچک انتخاب نموده و حجم آن بین ۰/۵ تا ۱۰ میکرولیتر باشد [۱۱]. دریلیچ^۹ در سال ۲۰۱۹ با بررسی سطوح الگو دار نشان داد که مکان و مقدار طول و شکل خط تماس سه فاز جامد، مایع و بخار برای توصیف پایدارترین زوایای تماس مورد نیاز است [۱۲]. در سال ۲۰۲۰ توسط گو کبرک اوزچلیک و همکارانش^{۱۰} تأثیر اندازه قطره روی زاویه تماس سطوح ناهمگن و الگو دار سیلیکا مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه گیری شد که در رفتار درشت مقیاس هنگامی که نسبت اندازه قطره به اندازه ناهمگنی یا الگوی سطحی ثابت باشد، تغییرات زاویه تماس یک رفتار جهانی به صورت خطی ثابت، مستقل از اندازه قطره و الگوی سطح نشان می‌دهد. اگر قطر

را بخشی از یک کره فرض کرده و h و a با θ رابطه زیر تعریف می‌شوند:

$$h = a \cdot \tan \theta / \gamma \quad (۱)$$

که می‌توان θ را با اندازه گیری مقادیر h و a از روی تصویر قطره ساکن، با کمک معادله زیر محاسبه نمود:

$$\theta = \gamma \tan^{-1} \left(\frac{h}{a} \right) \quad (۲)$$

همچنین برای قطرات در رژیم متوسط (بین ۱۰ μlit تا ۱۰۰۰ μlit) می‌توان نوشت:

$$h_m = \left[\gamma \left(\frac{\gamma}{\rho g} \right) (1 - \cos \theta) \right]^{\frac{1}{3}} \left[1 + \left(\frac{\gamma}{\rho g} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{\gamma}{2a} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (۳)$$

که می‌توان θ را با اندازه گیری مقادیر h_m (ارتفاع قطره متوسط) و a از روی تصویر قطره ساکن، جایگذاری مقادیر مشخص γ (انرژی آزاد سطح مایع)، ρ (چگالی) و g (شتاب ثقل محیط) با کمک معادله زیر محاسبه نمود:

$$\theta = \cos^{-1} \left(1 - \frac{h_m^2 \left[1 + \left(\frac{\gamma}{\rho g} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{\gamma}{2a} \right]}{\gamma \left(\frac{\gamma}{\rho g} \right)} \right) \quad (۴)$$

$$\cos \theta_{CB} = f \cos \theta + (f - 1) \quad (7)$$

در این معادله θ_{CB} زاویه کسی-باکستر، θ زاویه تماس سطح صاف (بدون بافت) همان ماده و f کسر جامد-مساحت^{۱۹} (یا کسر جامد کسی^{۲۰}) است که با معادله (۸) تعیین می‌شود:

$$f = a/(a + b) \quad (8)$$

لی و امیرفضلی^{۲۱} در سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۷ [۲۱-۲۳] ضمن معرفی معیاری برای انتقال بین حالت‌های ترشوندگی مرکب و غیر مرکب، نشان دادند که می‌توان از این معیار برای طراحی سطوح فوق آبریز استفاده کرد. همچنین با استفاده از دو مدل ونزل و کسی به تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی سطوح فوق آبریز دارای میکروباخت سطحی پرداختند.

نویسندگان این مقاله قبلاً در سال ۲۰۲۱ با استفاده از روش قطره‌ی ساکن^{۲۲} زاویه‌ی تماس نمونه‌هایی از جنس Ti6Al4V که توسط لیزر پالسی Nd: YAG با طول موج ۱۰۶۴ nm و طول پالس ۱۷۰ nsec بافت جدید خطوط کندگی متقاطع با زاویه‌های ۰°، ۱۵°، ۳۰°، ۴۵°، ۶۰°، ۷۵° و ۹۰° روی آنها به وجود آمده بود را برای قطره‌ی آب با حجم ۵ μlit اندازه‌گیری کردند [۱۴]. سپس با محاسبه انرژی آزاد سطح نمونه‌ها، نتیجه‌گیری شد که وابستگی زاویه‌ی تماس و انرژی آزاد سطح به زاویه‌ی خطوط متقاطع بافت سطحی به صورت تابعی سینوسی می‌باشد. همچنین رابطه معنی‌داری بین زاویه‌ی تماس و انرژی آزاد سطح با تعداد کل خطوط، تعداد تقاطع‌های بافت سطحی لیزری و عمق میکروشیارها در آن حجم قطره دیده نشد. در این پژوهش نیز از همان نمونه‌ها (با همان جنس و ابعاد)، همان لیزر و همان بافت‌های سطحی لیزری استفاده شده است که این موضوع نقطه اشتراک مطالعه کنونی و تحقیق قبلی می‌باشد.

قطره تقریباً ۲۴ برابر اندازه ساختار سطحی شود، اثر گیره‌ای ناپدید خواهد شد. چنانچه قطره همواره بر روی تعداد مشخصی از الگوها قرار گرفته باشد با افزایش حجم قطره زاویه‌ی تماس به صورت خطی افزایش می‌یابد [۱۳].

با کاهش زاویه‌ی تماس، ترشوندگی یک سطح افزایش می‌یابد (و بالعکس) [۱-۲]. لذا به جای بررسی تأثیر ویژگی‌های سطح روی زاویه‌ی تماس به تأثیر این ویژگی‌ها روی ترشوندگی سطح پرداخته می‌شود. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سطح روی ترشوندگی آن تأثیرگذار است. از دید فیزیکی سطوح حتی با مقدار زبری یکسان هم اگر چنانچه دارای هندسه‌های متفاوت (بافت‌های سطحی متفاوت) باشند می‌توانند ترشوندگی کاملاً متفاوتی از خود نشان دهند [۱۹]. از نقطه نظر ترمودینامیکی، موضوع هندسه سطح و تأثیرش بر ترشوندگی آن توسط مدل‌های کلاسیکی ونزل^{۱۱} (ترشوندگی^{۱۲} یا حالت غیر مرکب^{۱۳}) [۱۹] و کسی^{۱۴} (غیر ترشوندگی^{۱۵} یا حالت مرکب^{۱۶}) [۲۰] قابل پیش‌بینی است. مدل ونزل که در آن قطره مایع همه جای سطح زیر زبرین خود را تر می‌کند با معادله (۵) تعریف می‌شود:

$$\cos \theta_w = r \cos \theta \quad (5)$$

در این معادله θ_w زاویه ونزل، θ زاویه‌ی تماس سطح صاف (بدون بافت) همان ماده و r فاکتور زبری سطح^{۱۷} (نسبت زبری ونزل^{۱۸}) است که با معادله (۶) داده می‌شود:

$$r = 1 + 2h/(a + b) \quad (6)$$

در این معادله h ارتفاع، a پهنا و b جدایی ستون‌های بافت سطحی می‌باشد. دومین مدل عبارت است از مدل کسی (یا کسی-باکستر) که در آن هوا بین سطوح قطره مایع و جامد زیرین آن به دام می‌افتد و لذا همه جای سطح زیر توسط قطره مایع تر نمی‌شود که به این حالت غیر ترشوندگی یا حالت مرکب نیز گفته می‌شود و با معادله (۷) تعریف می‌شود:

۲۵۰۰ ساییده شدند تا سطح صیقلی و آینه‌ای با زبری کمتر از ۱۰ میکرومتر به دست آید [۲]. بعد از آن همه‌ی نمونه‌ها برای تمیزکاری در حمام اولتراسونیک شرکت Elma مدل Elmasonic P قرار داده شدند و به ترتیب برای ۱۵ دقیقه با استون، ۲۰ دقیقه با اتانل و ۲۰ دقیقه با آب مقطر شسته شدند. یکی از آنها به عنوان نمونه شاهد (S1) نام گذاری گردید (نمونه‌ای که هیچ گونه بافت سطحی لیزری روی آن ایجاد نشد) و بقیه نمونه‌ها برای اجرای الگوهای بافت سطحی لیزری روی آنها بکارگیری شدند.

۲-۲- فرآیند تابش لیزر و ایجاد بافت سطحی

فرآیند تابش لیزر و ایجاد بافت سطحی روی نمونه‌ها با استفاده از یک دستگاه لیزر نئودیمیم-یاگ^۳ پالسی ساخت شرکت دانش بنیان نوین لیزر صبا واقع در پارک علم و فن آوری دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شد. مشخصات فیزیکی مناسب این سیستم لیزر برای ایجاد خطوط کندگی با پهنای ۵۰ میکرومتر، عمق ۱۲ میکرومتر و فاصله دو قعر بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکرومتر (مناسب برای اهداف کشت سلولی [۱۵-۱۷])، طول موج ۱۰۶۴ nm، فرکانس ۱۵ KHz، جریان ۳۸A، توان W ۱۲، پهنای پالس ۱۷۰ ns، تکرار review ۱۵۰ و سرعت روبش سطحی ۲۰۰ mm/s می‌باشد [۱۴]. ابتدا الگوی بافت هر نمونه در سیستم کنترل لیزر شبیه‌سازی شد و سپس روی نمونه‌ها اجرا گردید. به این ترتیب که روی نمونه‌ی دوم (S۲)، تعداد صد شیار موازی با پهنای ۵۰ میکرومتر و فاصله دو قعر ۱۰۰ میکرومتر ایجاد شد. روی سایر نمونه‌ها، ابتدا پنجاه شیار موازی با پهنای ۵۰ میکرومتر و فاصله دو قعر ۲۰۰ میکرومتر ایجاد گردید و سپس تعداد پنجاه شیار متقاطع با شیارهای اولیه (با همان پهنای ۵۰ میکرومتر و فاصله دو قعر ۲۰۰ میکرومتر) به ترتیب با زاویه ۱۵ درجه (S۳)، ۳۰ درجه (S۴)، ۴۵ درجه (S۵)، ۶۰ درجه (S۶)، ۷۵ درجه (S۷) و ۹۰ درجه (S۸) ایجاد گردید. لذا همه نمونه‌ها، دارای ۱۰۰ میکرو شیار^{۲۴} لیزری با پهنای ۵۰ میکرومتر شدند و تفاوت آنها در زاویه بین

در این مطالعه برای بررسی ویژگی‌های دیگر بافت‌های جدید خطوط متقاطع با زاویه ۰ تا ۹۰ درجه، ابتدا وابستگی زاویه تماس به حجم قطره و زاویه خطوط متقاطع بافت سطحی در نمونه‌های مختلف، برای قطرات آب در دو حجم ۱ μlit و ۲۵ μlit، از طریق دو روش (۱) روش تجربی قطره‌ی ساکن و (۲) روش محاسباتی با استفاده از معادلات اکسترند و مون چندین بار بررسی می‌گردد. سپس تأثیر کمیات هندسی بافت سطحی روی زاویه تماس قطره در هر دو حجم مطالعه و مدل کلاسیکی ترشوندگی نمونه‌ها تعیین می‌شود.

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش برای نمونه‌های آلیاژ Ti6Al4V به ابعاد ۳×۳×۱۰ mm که توسط لیزر پالسی Nd: YAG با طول موج ۱۰۶۴ و طول پالس ۱۷۰ nsec خطوط کندگی متقاطع با زاویه‌های ۰°، ۱۵°، ۳۰°، ۴۵°، ۶۰°، ۷۵° و ۹۰° روی آنها به وجود می‌آید، ابتدا با استفاده از روش تجربی ضبط و آنالیز تصویر قطره‌ی ساکن و سپس با بکارگیری معادلات اکسترند و مون، زاویه تماس قطره‌های آب در دو حجم ۱- μlit (رژیم کوچک) و ۲- ۲۵ μlit (رژیم متوسط) اندازه‌گیری می‌شود. سپس تأثیر زاویه بین خطوط متقاطع، پهنای، ارتفاع و جدایی ستون‌های به وجود آمده ناشی از تابش لیزر بر زاویه تماس اندازه‌گیری شده، در هر دو حجم قطره، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتها با استفاده از نتایج به‌دست آمده، مدل کلاسیکی ترشوندگی نمونه‌ها، ارزیابی و تعیین می‌شود.

۲-۱- مواد و آماده‌سازی نمونه‌های Ti6Al4V

از یک شمش Ti6Al4V با استفاده از دستگاه وایرکات چینی مدل RobiFil ۶۰ تعداد ۸ قطعه مکعب مستطیلی به ابعاد ۳×۳×۱۰ mm (به عنوان نمونه‌های آزمایشگاهی) جدا گردید. پس از شستشوی قطعات با استون، یکی از سطوح آنها به عنوان سطح هدف برای ایجاد بافت لیزری انتخاب گردید. سطوح انتخاب شده به ترتیب با استفاده از کاغذ سنباده شماره ۱۰۰ تا

(۲) محاسبه از روش معادلات اکسترند و مون با استفاده از قطر و ارتفاع قطره.

۲-۵-۱- اندازه‌گیری زاویه تماس قطره‌های آب با حجم ۲۵ μlit (رژیم متوسط)

با کمک نمونه بردار^{۲۷} ۲۵ μlit، قطره‌هایی از آب را با دقت روی لبه مشخصی از تک‌تک نمونه‌ها گذاشته و حدوداً پس از ۱۰ ثانیه با کمک یک دوربین دیجیتال عکس‌برداری Nikon مدل DA۱۰ تصاویری از نمای جلویی قطره روی سطح نمونه گرفته و ضبط شدند. تمام مراحل تصویرگیری در شرایط پایدار دمای ۲۵°C و فشار ۵۶۰ mmHg در محیط هوا انجام گردید. پس از انتخاب بهترین تصویر برای هر نمونه، روی تصاویر بردارهای کشش مرز مشترک جامد-مایع، جامد-بخار و مایع-بخار (خط مماس بر سطح قطره) رسم شدند (شکل (۱)). سپس با استفاده از نرم‌افزار فوتوشاپ، نقاله‌ای با دقت ۱ درجه روی این تصاویر قرار گرفته و بدین وسیله زوایای تماس مشخص و اندازه‌گیری شدند. برای افزایش دقت، پس از هر بار اندازه‌گیری تمامی نمونه‌ها مشابه قبل مجدداً شسته می‌شدند. پس از خشک کردن نمونه‌ها با کمک خشک‌کن، فرآیند تصویرگیری برای چهار بار تکرار شد. با اندازه‌گیری مقادیر h (ارتفاع) و a (شعاع) قطره‌ها از تصویرشان با کمک خط کش میلی‌متری در هر چهار بار تکرار و جایگذاری آنها به انضمام مقادیر مشخص γ و ρ برای آب و شتاب ثقل g محیط در معادله (۴)، زاویه تماس تک‌تک نمونه‌ها برای قطره‌ی ۲۵ μlit از روش معادلات اکسترند و مون نیز محاسبه گردید.

۲-۵-۲- اندازه‌گیری زاویه تماس قطره‌های آب با حجم ۱ μlit (رژیم کوچک)

با کمک سرنگ مویرگی، قطره‌های خیلی کوچکی از آب با حجم ۱ μlit روی لبه انتخابی تک‌تک نمونه‌ها گذاشته شد. دیگر مراحل اندازه‌گیری زاویه تماس قطره‌ها در این

میکروشیارها (از ۰ تا ۹۰ درجه)، طول خطوط، تعداد گوشه‌ها و ابعاد ستون‌های سطحی (ارتفاع، جدایی و پهنای ستون‌ها) است. در جدول (۱) مشخصات نمونه‌ها به همراه الگوی میکروشیارها به تفکیک آورده شده است. پس از اتمام فرآیند تابش لیزر، مشابه قبل همگی نمونه‌ها در حمام اولتراسونیک به ترتیب با استون ۱۵ دقیقه، اتانل ۲۰ دقیقه و آب مقطر ۲۰ دقیقه شسته شدند.

۲-۳- مشاهده و مقایسه بافت سطحی نمونه‌ها

به منظور مشاهده و مقایسه بافت سطحی نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ متالورژی شرکت صا ایران مدل IMM-۴۲۰ و بکارگیری یک دوربین دیجیتال، تصاویری از سطح نمونه‌ها به همراه نمونه شاهد در بزرگنمایی ۲۰ برابر گرفته شد. با استفاده از نرم‌افزار فوتوشاپ، نقاله‌ای با دقت ۱ درجه روی این تصاویر قرار گرفته و بدین ترتیب برای تمام نمونه‌ها زاویه میکروشیارهای سطحی اندازه‌گیری شد.

۲-۴- ریخت‌شناسی، سیما سنجی و اندازه‌گیری ابعاد هندسی بافت سطحی نمونه‌ها

با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی^{۲۵} نشر میدانی شرکت فیلیپس هلند مدل XL-۳۰ تصاویری از سطح نمونه‌ها در بزرگنمایی‌های مختلف برای ریخت‌شناسی، سیماسنجی و همچنین اندازه‌گیری ابعاد میکروشیارها گرفته شد.

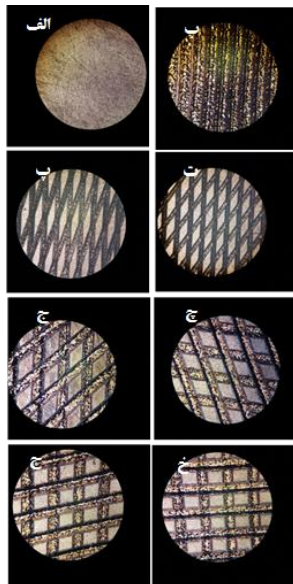
۲-۵-۵- اندازه‌گیری زاویه‌ی تماس

فرآیند اندازه‌گیری زاویه تماس برای قطره‌های آب با حجم ۲۵ μlit (رژیم متوسط) و حجم ۱ μlit (رژیم کوچک) با استفاده از دو روش انجام شد: (۱) روش قطره‌ی ساکن (لاو و ژائو^{۲۶}، ۲۰۱۶) [۳] و با استفاده از ضبط و آنالیز دستی تصویر قطره و

برای ترویج جذب، چسبیدن، مهاجرت، تکثیر و تمایز سلول‌های استخوانی است.

۳-۲- اندازه‌گیری زاویه‌ی تماس

از آنجایی که قطره‌های آب مورد استفاده برای اندازه‌گیری زاویه تماس تقریباً دارای حجم $1 \mu\text{lit}$ در رژیم کوچک و $25 \mu\text{lit}$ در رژیم متوسط می‌باشند لذا با فرض کروی بودن، قطر تقریبی آنها به ترتیب حدود $1/56 \text{ mm}$ و $4/60 \text{ mm}$ خواهد شد که در هر دو مورد بسیار بزرگ‌تر از سه برابر ابعاد بافت سطحی نمونه‌ها می‌باشد و از این لحاظ طبق نتایج پژوهش‌های صورت گرفته اندازه این بافت‌ها تأثیر کمی بر مشخصات نوری قطره گذاشته و داده‌های به‌دست آمده برای زاویه تماس هنوز مفید و قابل استفاده می‌باشند [۳-۵].



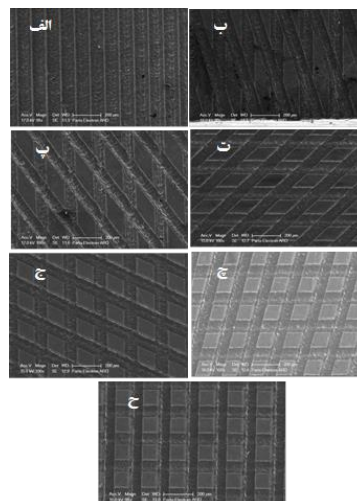
شکل (۲): تصاویر سطح نمونه‌ها که با دوربین دیجیتال از پشت چشمی میکروسکوپ متالورژی در بزرگنمایی ۲۰ برابر گرفته شده است: الف) S۱ نمونه شاهد (صیقلی و بدون بافت) و به ترتیب میکروشیارها با زاویه، ب) S۲ (صفر درجه یا موازی)، پ) S۳ (۱۵ درجه)، ت) S۴ (۳۰ درجه)، ج) S۵ (۴۵ درجه)، ح) S۶ (۶۰ درجه)، ح) S۷ (۷۵ درجه) و خ) S۸ (۹۰ درجه یا متعامد).

رژیم مشابه رژیم متوسط انجام گردید به‌جز اینکه به دلیل کوچک بودن قطرات، برای تصویرگیری مناسب از دوربین دیجیتال عکس‌برداری Nikon مدل DA۱۰ با لنز ماکرو استفاده شد و اندازه‌گیری‌ها برای سه بار تکرار گردید. با اندازه‌گیری مقادیر h (ارتفاع) و a (شعاع) قطره‌ها از تصویرشان در هر سه بار تکرار و جایگذاری آنها در معادله (۲) زاویه تماس این قطره نیز از روش معادلات اکسترند و مون برای تک‌تک نمونه‌ها محاسبه گردید.

۳- نتایج و بحث








۳-۱- سیما سنجی و ریخت‌شناسی سطح

با استفاده از میکروسکوپ متالورژی و نصب دوربین دیجیتال در پشت چشمی آن، تصاویری از سطح تک‌تک نمونه‌ها برای مشاهده و اندازه‌گیری زاویه‌ی میکروشیارها گرفته شد. شکل (۲) این تصاویر را که در بزرگنمایی ۲۰ برابر گرفته شده است نشان می‌دهد. با استفاده از نرم‌افزار فوتوشاپ، نقاله‌ای با دقت ۱ درجه روی این تصاویر قرار گرفته و بدین ترتیب زاویه میکروشیارها اندازه‌گیری شد. شکل (۲) نشان می‌دهد که الگوی میکروشیارهای تک‌تک نمونه‌ها دقیقاً منطبق بر نام‌گذاری جدول (۱) است. برای ریخت‌شناسی میکروشیارها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی تصاویری از سطح آنها در بزرگنمایی ۱۰۰ برابر گرفته شد که شکل (۳) این تصاویر را به تفکیک نمونه‌ها نشان می‌دهد. همچنین برای اندازه‌گیری پهنا، ارتفاع و جدایی میکروشیارها نیز تصاویری در بزرگنمایی ۴۳۰، ۴۳۵ و ۶۵۰ برابر گرفته شد. شکل (۴) این تصاویر را نشان می‌دهد. در شکل‌های (۲) و (۳) مشاهده می‌شود که میکروشیارها کاملاً پیوسته، منظم و یکنواخت می‌باشند. همچنین در شکل (۴) دیده می‌شود که پهنای میکروشیار $50 \mu\text{m}$ و ارتفاع آن حدود $12 \mu\text{m}$ است که مناسب

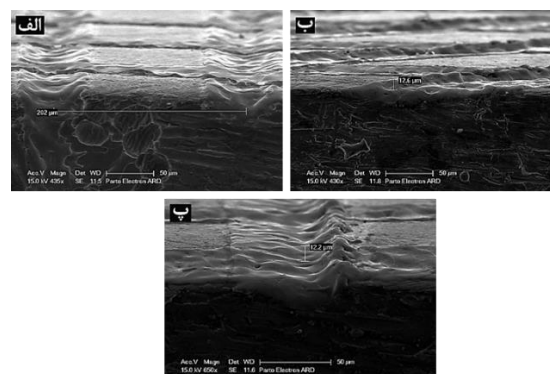


شکل (۳): نمایی نزدیک از سطح نمونه‌های دارای بافت لیزری که توسط دستگاه SEM در بزرگنمایی ۱۰۰ برابر برای ریخت‌شناسی میکروشیارها گرفته شده است. تصاویر به ترتیب مربوط به میکروشیارها با زاویه: الف) صفر درجه یا موازی (S_2)، ب) ۱۵ درجه (S_3)، پ) ۳۰ درجه (S_4)، ت) ۴۵ درجه (S_5)، ج) ۶۰ درجه (S_6)، چ) ۷۵ درجه (S_7) و ح) ۹۰ درجه (S_8) می‌باشند.

جدول (۱): مشخصات نمونه‌ها به همراه الگوی میکروشیارها، مقادیر چهار بار اندازه‌گیری شده‌ی زاویه تماس از روش ضبط و آنالیز تصویر قطره (روش ۱) به همراه مقادیر متناظر محاسبه شده‌ی زاویه تماس با استفاده از معادله (۴) (روش ۲) و مقدار میانگین داده‌های هر دو روش برای قطره‌ی آب با حجم $25 \mu\text{lit}$ (رژیم متوسط).

SA	SV	S6	S5	S4	S3	S2 خطوط موازی	S1 شاهد	نمونه
۹۰	۷۵	۶۰	۴۵	۳۰	۱۵	۰	-	زاویه میکروشیارها (درجه)
							بدون شیار	الگوی میکروشیارها
۵۰	۴۷	۴۸	۵۵	۵۰	۵۶	۴۶	۵۸	روش ۱ (θ_1)°
۶۳	۴۸	۵۰	۵۵	۶۰	۵۹	۶۴	۶۲	روش ۱ (θ_2)°
۵۱	۶۰	۶۴	۵۷	۵۷	۶۲	۶۴	۶۳	روش ۱ (θ_3)°
۶۴	۵۸	۶۳	۵۷	۵۰	۵۸	۵۹	۷۰	روش ۱ (θ_4)°
۵۷	۵۳	۵۶	۵۶	۵۴	۵۹	۵۸	۶۳	روش ۱ (θ)°
۳۷	۵۶	۳۷	۴۵	۴۲	۵۳	۶۴	۵۵	روش ۲ (θ_1)°
۵۳	۴۸	۵۷	۵۷	۵۲	۷۱	۳۵	۳۹	روش ۲ (θ_2)°
۳۸	۳۳	۴۴	۴۸	۳۹	۶۰	۶۲	۵۰	روش ۲ (θ_3)°
۴۴	۴۳	۴۳	۵۴	۳۶	۳۶	۳۵	۴۸	روش ۲ (θ_4)°
۴۳	۴۵	۴۵	۵۱	۴۲	۵۵	۴۹	۴۸	روش ۲ (θ)°

شدند. با جایگذاری این مقادیر به همراه مقدار مشخص انرژی آزاد سطح آب در دمای 23°C (مقدار $72/75 \text{ mJ/m}^2$ بر اساس مرجع [۱۸])، مقدار چگالی آب ($998 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$) و شتاب ثقل محیط ($9/81 \frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$) (بر اساس مرجع [۹]) در معادله (۴)، زاویه تماس از روش اکسترنند و مون برای تک تک نمونه‌ها محاسبه گردید. در ستون‌های چهارم تا هشتم جدول (۱) مقادیر چهار بار اندازه‌گیری شده‌ی زاویه تماس از روش ضبط و آنالیز تصویر قطره به همراه مقدار میانگین آنها و در ستون‌های نهم تا سیزدهم، مقدار محاسبه شده‌ی زاویه تماس قطره‌ها از روی ابعادشان با استفاده از معادله (۴) به همراه مقدار میانگین آنها، به تفکیک نمونه‌ها برای قطره $25 \mu\text{lit}$ آورده شده است. بررسی داده‌های جدول (۱) نشان می‌دهد که مقدار زاویه تماس نمونه شاهد (اندازه‌گیری شده از روش آنالیز تصویر قطره) با مقدار بیان شده در اکثر مراجع (تقریباً 65° درجه) مطابقت خوبی دارد. در عین حال دیده می‌شود که مقدار میانگین زاویه تماس اندازه‌گیری شده (از هر دو روش) برای نمونه‌های مختلف، متغیر است یعنی می‌توان گفت که زاویه تماس اندازه‌گیری شده برای قطره

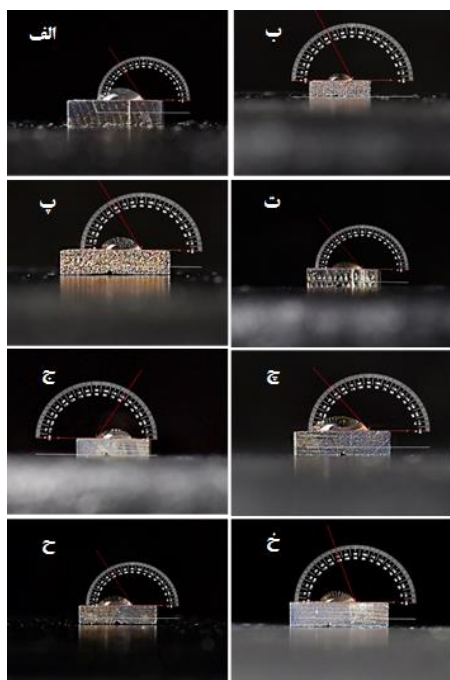


شکل (۴): تصاویر SEM از سطح نمونه‌ها که اندازه پهنای، ارتفاع و جدایی میکروشیارها را نشان می‌دهد.

۳-۲-۱- اندازه‌گیری زاویه تماس قطره‌ها با حجم $25 \mu\text{lit}$ (رژیم متوسط)

شکل (۵) تصاویر انتخابی از نیمرخ قطرات آب با حجم $25 \mu\text{lit}$ روی سطح نمونه‌ها را نشان می‌دهد که با رسم بردار کشش‌های مرز مشترک لایه‌ها، زاویه θ مشخص و با نرم‌افزار فوتوشاپ با دقت یک درجه اندازه‌گیری شده است. این روش باهدف افزایش دقت اندازه‌گیری، برای هر نمونه، چهار بار تکرار گردید. همچنین با استفاده از تصویر قطره و مقیاس بندی مناسب آن، مقادیر h و a اندازه‌گیری

کمتر از $2/8$ درصد) می‌باشد. این تساوی بیانگر عدم وابستگی زاویه تماس به زاویه میکروشیارها در این حجم است که رفتاری متفاوت با رفتار زاویه تماس برای قطره‌های آب با حجم $25\mu\text{lit}$ می‌باشد. به عبارتی با این حجم قطره نمی‌توان بهترین زاویه میکروشیارها را از لحاظ زاویه تماس تعیین نمود. مقادیر میانگین داده‌های روش دوم نیز با تقریب خوبی (خطای کمتر از 17 درصد) با مقادیر میانگین روش اول نزدیک هستند که می‌تواند تأییدی مجدد بر عدم وابستگی گفته شده باشد.



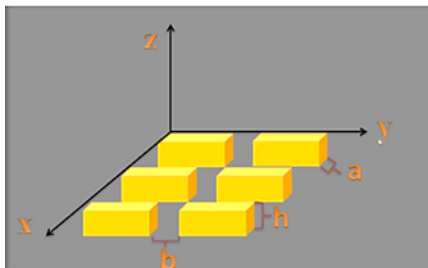
شکل (۵): تصاویری از نیمرخ قطرات آب با حجم $25\mu\text{lit}$ (رژیم متوسط) روی سطح نمونه‌ها که با نرم‌افزار فوتوشاپ، زاویه تماس اندازه‌گیری شد.

$25\mu\text{lit}$ به زاویه میکروشیارها وابسته است. البته حداکثر میزان تغییرات در روش اول حدود 18 درصد است که این میزان برای روش دوم حدود 30 درصد می‌باشد. مشاهده می‌شود که کمترین زاویه تماس (بهترین خاصیت ترشوندگی) در زاویه‌های 30 و 75 درجه میکروشیارها رخ می‌دهد. چون با تغییر زاویه خطوط تقاطع نسبت قطر قطره به اندازه‌ی پهنای، ارتفاع و جدایی ستون‌های سطحی تغییر می‌کند لذا زاویه تماس اندازه‌گیری شده نوعی وابستگی به زاویه خطوط کندگی سطحی در الگوهای گوناگون نشان داده است و این با نتایج پژوهش گو کبرک از چلیک و همکارانش مبنی بر اینکه در رفتار درشت مقیاس اگر نسبت قطر قطره به اندازه ناهمگنی سطح نمونه (ابعاد بافت سطحی) ثابت باشد، در این صورت تغییرات زاویه تماس مستقل از اندازه قطره و الگوی سطحی می‌باشد، مطابقت دارد [۱۳].

۳-۲-۲- اندازه‌گیری زاویه تماس قطره‌ها با حجم $1\mu\text{lit}$ (رژیم کوچک)

شکل (۶) تصاویر انتخابی از نیمرخ قطرات آب با حجم $1\mu\text{lit}$ روی سطح نمونه‌ها را نشان می‌دهد که با رسم بردار کشش‌های مرز مشترک لایه‌ها، زاویه θ مشخص و با نرم‌افزار فوتوشاپ با دقت یک درجه اندازه‌گیری شده است. این روش با هدف افزایش دقت اندازه‌گیری، برای هر نمونه، سه بار تکرار گردید. در این حجم نیز با استفاده از تصویر قطره و مقیاس بندی مناسب آن، مقادیر a و h اندازه‌گیری شدند. با جایگذاری این اعداد در معادله (۲) زاویه تماس از روش اکسترنال و مون نیز محاسبه گردید. در ستون‌های دوم تا پنجم جدول (۲) مقادیر سه بار اندازه‌گیری شده‌ی زاویه تماس از روش ضبط و آنالیز تصویر قطره به همراه مقدار میانگین آنها و در ستون‌های ششم تا نهم آن، مقدار محاسبه شده‌ی زاویه تماس قطره‌ها از روی ابعادشان با استفاده از معادله (۲) به همراه مقدار میانگین آنها، به تفکیک نمونه‌ها برای قطره $1\mu\text{lit}$ آورده شده است. مرور داده‌های جدول (۲) در روش اول نشان‌دهنده‌ی تساوی تمامی مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی زاویه تماس برای قطره‌های آب با حجم $1\mu\text{lit}$ (رژیم کوچک) (با خطای

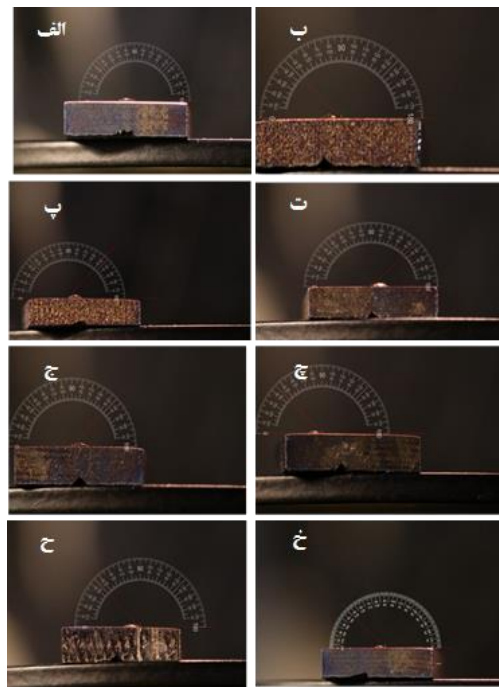
شده‌اند (این ساختار شبیه بافت سطحی نمونه S8 در این پژوهش است). با استفاده از تصاویر شکل (۵) و (۶) کمیت‌های ارتفاع (h)، پهنا (a) و جدایی (b) ستون‌های بافت سطحی نمونه‌ها اندازه‌گیری شدند (جدول (۳)). به‌منظور تجزیه، تحلیل و تعیین مدل ترمودینامیکی نمونه‌ها در دو حجم قطره ۲۵ μlit و ۱ μlit ، با استفاده از معادلات (۶) و (۸) کمیات r و f برای نمونه‌ها محاسبه گردید. سپس با جایگذاری این کمیات و مقادیر میانگین زاویه تماس (مندرج در جداول (۱) و (۲)) در معادلات (۵) و (۷) کسینوس زوایای وزنل و کسی برای نمونه‌ها در هر دو حجم قطره تعیین گردید و این مقادیر با کسینوس میانگین زوایای تماس اندازه‌گیری شده هر نمونه مقایسه و خطاگیری شدند.



شکل (۷): نمایی بزرگ شده از ستون‌های بافت سطحی یکی از نمونه‌ها که در آن کمیت‌های پهنا (a)، جدایی (b) و ارتفاع ستون‌ها (h) مشخص شده‌اند.

۳-۳-۱- بررسی مدل کلاسیکی ترشوندگی قطره ۲۵ μlit (روژیم متوسط)

به‌منظور تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی تأثیر الگوهای بافت سطحی روی ترشوندگی نمونه‌ها (تعیین مدل کلاسیکی ترشوندگی آنها)، با جایگذاری r و f نمونه‌ها به همراه کسینوس میانگین زاویه تماس نمونه شاهد اندازه‌گیری شده از روش ۱ (زاویه تماس سطح صاف θ) در روش ۱ که آن را $\overline{\theta}_{1,p}$ نامیده و طبق جدول (مقدار ۶۳ درجه است) و کسینوس میانگین زاویه تماس نمونه شاهد اندازه‌گیری شده از روش ۲ (زاویه تماس سطح صاف θ) در روش ۲ که آن را $\overline{\theta}_{2,p}$ نامیده و طبق جدول (۱) مقدار ۴۸ درجه است) در معادله‌های (۵) و (۷) به ترتیب کسینوس‌های زاویه وزنل از هر دو روش $\cos \overline{\theta}_{1,p} = \cos \theta(W) = 1$ و $\cos \overline{\theta}_{2,p}$



شکل (۶): تصاویری از نیم‌رخ قطرات آب با حجم ۱ μlit (روژیم کوچک) روی سطح نمونه‌ها که با نرم‌افزار فوتوشاپ، زاویه تماس اندازه‌گیری شد.

جدول (۲): مقادیر سه بار اندازه‌گیری شده‌ی زاویه تماس از روش ضبط و آنالیز تصویر قطره (روش ۱) به همراه مقادیر متناظر محاسبه شده‌ی زاویه تماس با استفاده از معادله (۲) (روش ۲) به علاوه مقدار میانگین داده‌های هر دو روش برای قطره‌ی آب با حجم ۱ μlit (روژیم کوچک).

نمونه	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
روش ۱ (θ_1)	۴۵	۴۴	۴۴	۴۵	۴۴	۴۴	۴۴	۴۵
روش ۱ (θ_2)	۴۵	۴۵	۴۹	۴۹	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵
روش ۱ (θ_3)	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵
روش ۱ ($\bar{\theta}$)	۴۵	۴۵	۴۶	۴۶	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵
روش ۲ (θ_1)	۴۵	۴۶	۶۴	۶۰	۴۶	۴۳	۶۰	۵۰
روش ۲ (θ_2)	۵۴	۴۱	۳۳	۳۸	۵۳	۳۹	۵۴	۵۵
روش ۲ (θ_3)	۴۰	۵۱	۳۲	۵۵	۴۶	۴۷	۴۲	۴۲
روش ۲ ($\bar{\theta}$)	۴۶	۴۶	۴۳	۵۱	۴۸	۴۳	۵۲	۴۹

۳-۳-۳- تأثیر سایر ویژگی‌های سطح روی زاویه تماس

شکل (۷) نمایی بزرگ شده از ستون‌های بافت سطحی را نشان می‌دهد که در آن کمیت‌های a، b و h مشخص

۳-۳-۲- بررسی مدل کلاسیکی ترشوندگی قطره

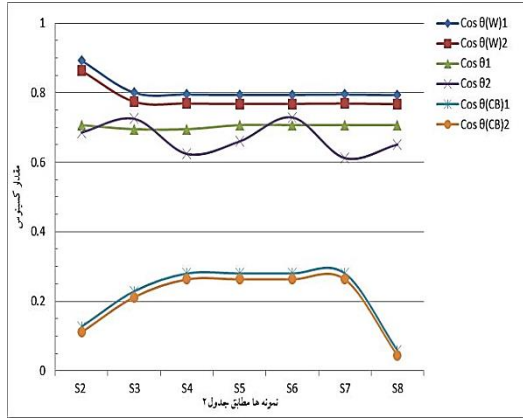
۱) (رژیم کوچک) μlit

برای قطره آب با حجم $1 \mu\text{lit}$ نیز مشابه قطره $25 \mu\text{lit}$ ، با جایگذاری مقادیر f و r نمونه‌ها به همراه کسینوس زوایای $\overline{\theta}_{1,2} = 46.8^\circ$ و $\overline{\theta}_{1,2} = 45^\circ$ (جدول (۲)) در معادله‌های (۵) و (۷) به ترتیب کسینوس زوایای ونزل و کسی از هر دو روش محاسبه گردیدند. همچنین با استفاده از مقادیر میانگین زاویه تماس سایر نمونه‌ها اندازه‌گیری شده از روش‌های ۱ و ۲ (که آنها را به ترتیب $\overline{\theta}_1$ و $\overline{\theta}_2$ نامیدیم) (جدول (۲)) کسینوس این زوایا تعیین و درصد اختلاف آنها با کسینوس زوایای ونزل و کسی روش مربوطه محاسبه شد. در جدول (۴) این مقادیر برای قطره $1 \mu\text{lit}$ آورده شده است. از بررسی درصد اختلاف $\overline{\theta}_1$ با $\text{Cos } \theta(W)$ و $\overline{\theta}_2$ با $\text{Cos } \theta(W)$ (جدول (۴)) مشاهده می‌شود که برای ۶ مورد از نمونه‌ها این خطا مساوی یا کمتر از ۱۱ درصد و برای سایر نمونه‌ها نیز حداکثر ۲۱ درصد است. در صورتی که درصد اختلاف $\overline{\theta}_1$ با $\text{Cos } \theta(\text{CB})$ و $\overline{\theta}_2$ با $\text{Cos } \theta(\text{CB})$ (جدول (۴)) حداکثر ۱۳۳ و حداکثر تا ۱۳۸۰ درصد نیز می‌رسد.

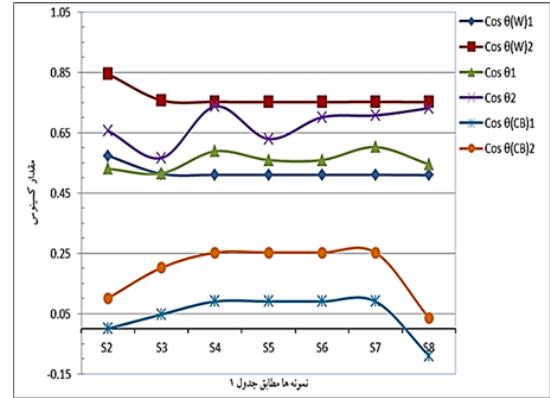
در شکل (۹) نمودار خطی توابع $\text{Cos } \theta(W)$ ، $\text{Cos } \theta(W)$ ، $\text{Cos } \overline{\theta}_1$ ، $\text{Cos } \overline{\theta}_2$ ، $\text{Cos } \theta(\text{CB})$ و $\text{Cos } \theta(\text{CB})$ برای قطره $1 \mu\text{lit}$ و بر اساس نمونه‌های مختلف ترسیم شده است. شکل (۹) نشان می‌دهد که برای قطره $1 \mu\text{lit}$ رفتار توابع $\text{Cos } \theta(W)$ و $\text{Cos } \theta(\text{CB})$ و همچنین $\text{Cos } \theta(\text{CB})$ و $\text{Cos } \theta(\text{CB})$ بسیار مشابه و هماهنگ است. در عین حال مشاهده می‌شود که مقادیر $\overline{\theta}_1$ و $\overline{\theta}_2$ با $\text{Cos } \theta(W)$ نسبتاً خوبی با مقادیر $\text{Cos } \theta(W)$ و $\text{Cos } \theta(\text{CB})$ نزدیک می‌باشد. در صورتی که مقادیر $\text{Cos } \theta(\text{CB})$ و $\text{Cos } \overline{\theta}_1$ از مقادیر $\text{Cos } \theta(\text{CB})$ و $\text{Cos } \overline{\theta}_2$ دارای فاصله قابل توجه و معنی‌داری می‌باشند. نتیجه بررسی مقادیر جدول (۴) و نمودار شکل (۹) این است که برای قطره $1 \mu\text{lit}$ نیز با تقریب نسبتاً خوبی می‌توان گفت مدل کلاسیکی ترشوندگی نمونه‌ها، مدل ونزل می‌باشد یعنی قطره مایع همه جای سطح زبر زیرین خود را تر می‌کند.

$\text{Cos } \theta(W)$ و کسینوس‌های زاویه کسی از هر دو روش $\text{Cos } \theta(\text{CB}) = f \text{Cos } \overline{\theta}_1 + (f-1)$ و $\text{Cos } \theta(\text{CB}) = f \text{Cos } \overline{\theta}_2 + (f-1)$ محاسبه گردیدند. همچنین استفاده از مقادیر میانگین زاویه تماس سایر نمونه‌ها اندازه‌گیری شده از روش ۱ (که آن را $\overline{\theta}_1$ می‌نامیم) و روش ۲ (که آن را $\overline{\theta}_2$ می‌نامیم) (همگی مندرج در جدول (۱)) کسینوس این زوایا تعیین و درصد اختلاف آنها با کسینوس زوایای ونزل و کسی روش مربوطه محاسبه شد. در جدول (۳) این مقادیر برای قطره $25 \mu\text{lit}$ آورده شده است. از بررسی درصد اختلاف $\overline{\theta}_1$ با $\text{Cos } \theta(W)$ و $\overline{\theta}_2$ با $\text{Cos } \theta(W)$ (جدول (۳)) مشاهده می‌شود که برای ۹ مورد از نمونه‌ها این خطا مساوی و یا کمتر از ۱۰ درصد و برای سایر نمونه‌ها نیز حداکثر ۲۵ درصد است. در صورتی که درصد اختلاف $\overline{\theta}_1$ با $\text{Cos } \theta(\text{CB})$ و $\overline{\theta}_2$ با $\text{Cos } \theta(\text{CB})$ (جدول (۳)) حداکثر ۱۰۰ و حداکثر تا ۱۹۸۹ درصد نیز می‌رسد. در شکل (۸) نمودار خطی توابع $\text{Cos } \theta(W)$ ، $\text{Cos } \theta(W)$ ، $\text{Cos } \overline{\theta}_1$ ، $\text{Cos } \overline{\theta}_2$ ، $\text{Cos } \theta(\text{CB})$ و $\text{Cos } \theta(\text{CB})$ برای قطره $25 \mu\text{lit}$ و بر اساس نمونه‌های مختلف ترسیم شده است.

شکل (۸) نشان می‌دهد که برای قطره $25 \mu\text{lit}$ رفتار توابع $\text{Cos } \theta(W)$ و $\text{Cos } \theta(\text{CB})$ یا $\text{Cos } \overline{\theta}_1$ و $\text{Cos } \theta(W)$ و $\text{Cos } \theta(\text{CB})$ بسیار مشابه و هماهنگ است. در عین حال مشاهده می‌شود که توابع $\overline{\theta}_1$ و $\text{Cos } \theta(W)$ توسط توابع $\text{Cos } \theta(W)$ و $\text{Cos } \theta(\text{CB})$ احاطه شده و با تقریب خوبی مقادیرشان نزدیک می‌باشد. در صورتی که مقادیر $\text{Cos } \theta(\text{CB})$ و $\text{Cos } \overline{\theta}_1$ از مقادیر $\text{Cos } \theta(\text{CB})$ و $\text{Cos } \overline{\theta}_2$ دارای فاصله قابل توجه و معنی‌داری می‌باشند. نتیجه بررسی مقادیر جدول (۳) و نمودار شکل (۸) این است که برای قطره $25 \mu\text{lit}$ با تقریب نسبتاً خوبی می‌توان گفت که مدل کلاسیکی ترشوندگی نمونه‌ها، مدل ونزل می‌باشد یعنی قطره مایع همه جای سطح زبر زیرین خود را تر می‌کند.



شکل (۹): نمودار خطی تغییرات توابع $\cos \theta$, $\cos \bar{\theta}_1$, $\cos \bar{\theta}_2$ برای قطره ۱ μlit بر اساس نمونه‌های مختلف.



شکل (۸): نمودار خطی تغییرات توابع $\cos \theta$, $\cos \bar{\theta}_1$, $\cos \bar{\theta}_2$ برای قطره ۲۵ μlit بر اساس نمونه‌های مختلف.

جدول (۳): کمیات اندازه‌گیری و محاسبه شده‌ی قطره ۲۵ μlit برای بررسی مدل‌های ونزل و کسبی.

SA	SY	SE	SD	SF	SS	SZ	S1	نمونه
۱۲۵	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۴۵	۶۶/۶	-	a(μm)
۷۵	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۵	۳۳/۳	-	b(μm)
۱۲/۲	۱۲/۴	۱۲/۳	۱۲/۳	۱۲/۴	۱۳/۱	۱۳/۱	-	h(μm)
۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۳	۱/۲۶	-	r
۰/۶۲	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۲	۰/۶۶	-	f
۰/۵۰۹	۰/۵۱۰	۰/۵۱۰	۰/۵۱۰	۰/۵۱۰	۰/۵۱۳	۰/۵۷۳	-	$\cos \theta(W)1$
۰/۷۵۱	۰/۷۵۲	۰/۷۵۱	۰/۷۵۱	۰/۷۵۲	۰/۷۵۷	۰/۸۴۴	-	$\cos \theta(W)2$
-۰/۰۹۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۴۷	-۰/۰۴	-	$\cos \theta(CB)1$
۰/۰۳۵	۰/۲۵۲	۰/۲۵۲	۰/۲۵۲	۰/۲۵۲	۰/۲۰۲	۰/۱۰۱	-	$\cos \theta(CB)2$
۰/۵۴۵	۰/۶۰۲	۰/۵۵۹	۰/۵۵۹	۰/۵۸۸	۰/۵۱۵	۰/۵۳۰	-	$\cos \bar{\theta}_1$
۰/۷۳۱	۰/۷۰۷	۰/۷۰۱	۰/۶۲۹	۰/۷۳۷	۰/۵۶۶	۰/۶۵۶	-	$\cos \bar{\theta}_2$
۷	۱۸	۱۰	۱۰	۱۵	۱	۷	-	درصد اختلاف $\cos \bar{\theta}_1$ با $\cos \theta_{W1}$
۳	۶	۷	۱۶	۲	۲۵	۲۲	-	درصد اختلاف $\cos \bar{\theta}_2$ با $\cos \theta_{W2}$
۶۵۰	۵۶۹	۵۲۱	۵۲۱	۵۵۳	۱۰۰	۱۴۲۵	-	درصد اختلاف $\cos \bar{\theta}_1$ با $\cos \theta_{CB1}$
۱۹۸۹	۱۸۱	۱۷۸	۱۵۰	۱۹۲	۱۸۰	۵۴۹	-	درصد اختلاف $\cos \bar{\theta}_2$ با $\cos \theta_{CB2}$

جدول (۴): کمیات اندازه‌گیری و محاسبه شده‌ی قطره ۱ μlit برای بررسی مدل‌های ونزل و کسبی.

SA	SY	SE	SD	SF	SS	SZ	S1	نمونه
۱۲۵	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۴۵	۶۶/۶	-	a(μm)
۷۵	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۵	۳۳/۳	-	b(μm)
۱۲/۲	۱۲/۴	۱۲/۳	۱۲/۳	۱۲/۴	۱۳/۱	۱۳/۱	-	h(μm)
۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۲	۱/۱۳	۱/۲۶	-	r
۰/۶۲	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۲	۰/۶۶	-	f
۰/۷۹۳	۰/۷۹۵	۰/۷۹۴	۰/۷۹۴	۰/۷۹۵	۰/۸۰۰	۰/۸۹۲	-	$\cos \theta(W)1$
۰/۷۶۷	۰/۷۶۹	۰/۷۶۸	۰/۷۶۸	۰/۷۶۹	۰/۷۷۴	۰/۸۶۳	-	$\cos \theta(W)2$
۰/۰۵۸	۰/۲۸۰	۰/۲۸۰	۰/۲۸۰	۰/۲۸۰	۰/۲۲۹	۰/۱۲۷	-	$\cos \theta(CB)1$
۰/۰۴۴	۰/۲۶۳	۰/۲۶۳	۰/۲۶۳	۰/۲۶۳	۰/۲۱۲	۰/۱۱۱	-	$\cos \theta(CB)2$
۰/۷۰۷	۰/۷۰۷	۰/۷۰۷	۰/۷۰۷	۰/۶۹۵	۰/۶۹۵	۰/۷۰۷	-	$\cos \bar{\theta}_1$
۰/۶۵۱	۰/۶۱۲	۰/۷۲۹	۰/۶۶۰	۰/۶۲۴	۰/۷۲۵	۰/۶۸۶	-	$\cos \bar{\theta}_2$
۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	۱۳	۱۳	۲۱	-	درصد اختلاف $\cos \bar{\theta}_1$ با $\cos \theta_{W1}$
۱۵	۲۰	۵	۱۴	۱۹	۶	۲۱	-	درصد اختلاف $\cos \bar{\theta}_2$ با $\cos \theta_{W2}$
۱۱۱۹	۱۵۲	۱۵۲	۱۵۲	۱۴۸	۲۰۳	۴۶۶	-	درصد اختلاف $\cos \bar{\theta}_1$ با $\cos \theta_{CB1}$
۱۳۸۰	۱۳۳	۱۷۷	۱۵۱	۱۳۷	۲۴۲	۵۱۸	-	درصد اختلاف $\cos \bar{\theta}_2$ با $\cos \theta_{CB2}$

[۲] Y. Yan, E. Chibowski & A. Szczes, "Surface Properties of Ti6Al4V Alloy part I: Surface Roughness and Apparent Surface Free Energy", *Materials Science and Engineering C*, vol. ۷۰, pp. ۲۰۷-۲۱۵, ۲۰۱۷.

[۳] K. Y. Law & H. Zhao, "Surface Wetting: Characterization, Contact Angle, and Fundamentals", Springer, ۲۰۱۶.

[۴] A. Marmur & E. Bittoun, "When Wenzel and Cassie are right: reconciling local and global considerations", *Langmuir*, vol. ۲۵, pp. ۱۲۷۷-۱۲۸۱, ۲۰۰۹.

[۵] A. Marmur, "Soft contact: measurement and interpretation of contact angles", *Soft Matter*, vol. ۲, pp. ۱۶-۱۷, ۲۰۰۶.

[۶] A. Amirfazli, D. Y. Kwok, J. Gaydos & A. W. Neumann, "Line tension measurements through drop size dependence of contact angle", *Colloid Interface Science*, vol. ۲۰۵, pp. ۱-۱۱, ۱۹۹۸.

[۷] A. Marmur, "Line tension and the intrinsic contact angle in solid-liquid-fluid systems". *Colloid Interface Science*, vol. ۱۸۶, pp. ۴۶۲-۴۶۶, ۱۹۹۷.

[۸] S. Kranias, "Effect of drop volume on static contact angles", Technical note ۳۱۰e: Kruss GmbH, France, ۲۰۰۴.

[۹] C. W. Extrand & S. I. Moon, "When sessile drop Are No longer small: transitions from spherical to fully flattened", *Langmuir*, vol. ۲۵, pp. ۱۱۸۱۵-۱۱۸۲۲, ۲۰۱۰.

[۱۰] C. E. Cansoy, "The effect of drop size on contract angle measurements of superhydrophobic surfaces", *RSC Adv*, vol. ۴, pp. ۱۱۹۷-۱۲۰۳, ۲۰۱۴.

[۱۱] T. Zhao & L. Jiang, "Contact angle measurement of natural materials", *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol. ۱۶۱, pp. ۳۲۴-۳۳۰, ۲۰۱۸.

[۱۲] J. W. Drelich, "Contact angles: From past mistakes to new developments through liquid-solid adhesion measurements", *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. ۲۶۷, pp. ۱-۱۴, ۲۰۱۹.

[۱۳] H. Gokberk Ozcelik, E. Satiroglu, & M. Barisik, "Size Dependent Influence of Contact Line Pinning on Wetting of Nano-textured/patterned Silica Surfaces", *Nanoscale*, vol. ۴۱, pp. ۱-۳۰, ۲۰۲۰.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش برای قطرات آب با حجم ۱ μlit (رژیم کوچک) سه بار و برای حجم ۲۵ μlit (رژیم متوسط) چهار بار زاویه تماس با دو روش (۱) ضبط و آنالیز تصویر قطره و (۲) بکارگیری معادلات اکسترند و مون برای سطوحی از جنس آلیاژ Ti6Al4V که توسط لیزر پالسی Nd:YAG با طول موج ۱۰۶۴ nm و طول پالس ۱۷۰ ns بافت سطحی لیزری به صورت خطوط متقاطع با زاویه‌های ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه روی آن ایجاد شده بود، اندازه گیری شد. نتیجه گیری شد که زاویه‌ی تماس اندازه گیری شده از هر دو روش برای قطرات آب با حجم ۱ μlit (رژیم کوچک)، تقریباً ثابت و مستقل از زاویه خطوط متقاطع بافت سطحی می‌باشد. ولی زاویه تماس قطرات آب با حجم ۲۵ μlit (رژیم متوسط)، متغیر بوده و به زاویه‌ی خطوط متقاطع بافت سطحی وابسته است. با اندازه گیری سه کمیت a (پهنا)، b (جدایی) و h ارتفاع ستون‌های بافت سطحی نمونه‌ها، محاسبه دو فاکتور r و f، جایگذاری آنها در معادلات ونزل و کسی و رسم نمودارهای مربوطه بر اساس نمونه‌های این تحقیق، دیده شد که با تقریب نسبتاً خوبی مدل کلاسیکی ترشوندگی نمونه‌ها، برای هر دو قطره ۱ μlit و ۲۵ μlit، مدل ونزل می‌باشد یعنی قطره مایع همه جای سطح زبر زیرین خود را تر می‌کند. در این تحقیق نمونه‌های مکعب مستطیل Ti6Al4V به‌جای کاشتنی واقعی، شرایط آزمایشگاهی بیرون بدن به‌جای درون آن و میکروشیارهای متقاطع با اختلاف زاویه‌ای ۱۵ درجه در بازه ۰ تا ۹۰ درجه مورد بررسی قرار گرفت که با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان مبنای بررسی‌های آتی را در حوزه‌های بکارگیری کاشتنی‌های واقعی، شرایط درون بدن، میکروشیارهای متقاطع با اختلاف زاویه‌ای کمتر از ۱۵ درجه، زیست‌فعالی و رفتار سلولی بافت پیشنهادی قرار داد.

۵- مراجع

[۱] Q. Zheng, L. Mao, Y. Shi, W. Fu & Y. Hu, "Biocompatibility of Ti6Al4V Titanium Alloy Implants with Laser Microgrooved Surfaces", *Materials Technology*, vol. ۵۵, pp. ۱-۱۰, ۲۰۲۰.

۶- پی‌نوشت

- [۱] Implant
- [۲] Wettability
- [۳] Topography
- [۴] Kranias
- [۵] Perfluoroalkoxy Copolymer
- [۶] Extrand & Moon
- [۷] Cansoy
- [۸] Zhao & Jiang
- [۹] Drelich
- [۱۰] Gokberk Ozcelik et al
- [۱۱] Wenzel's Model
- [۱۲] Noncomposite State
- [۱۳] Cassie – Baxter model
- [۱۴] Nonwettability
- [۱۵] Composite State
- [۱۶] Surface Roughness Factor
- [۱۷] Wenzel's Roughness Ratio
- [۱۸] Solid-Area Fraction
- [۱۹] Cassie's Solid Fraction
- [۲۰] Li & Amirfazli
- [۲۱] Sessile Drop Contact Angle and IFT
Measurement
- [۲۲] Neodymium YAG
- [۲۳] Microgroove
- [۲۴] Scanning Electron Microscope
- [۲۵] Morphology
- [۲۶] Law & Zhao
- [۲۷] Sampler
- [۱۴] Gh. R. Dabbagh, S. K. Sadrnezhad, R. Shoja Razavi, A. M. Nourbakhsh & N. Hassanzadeh Nemati, "Laser textured novel patterns on Ti₆Al₄V alloy for dental implants surface improvement", Laser Applications, vol. ۳۳, pp. ۱-۱۷, ۲۰۲۱.
- [۱۵] K. T. Voisey, C. A. Scotchford, L. Martin & H. S. Gill, "Effect of Q-Switched Laser surface Texturing of Titanium on Osteoblast Cell Response", Physics Procedia, vol. ۵۶, pp. ۱۱۲۶-۱۱۳۵, ۲۰۱۴.
- [۱۶] A. Y. Fasasi, S. Mwenifumbo, N. Rahbar, J. Chen, M. Li, A. C. Beye, C. B. Arnold & W. O. Soboyejo, "Nano – Second UV Laser Processed Micro – Grooves on Ti₆Al₄V for Biomedical Applications", Materials Science and Engineering C, vol. ۲۹, pp. ۵-۱۳, ۲۰۰۹.
- [۱۷] Ch. Wang, H. Hu, Zh. Li, Y. Shen, Y. Xu, G. Zhang, X. Zeng, J. Deng, Sh. Zhao, T. Ren & Y. Zhang, "Enhanced Osseointegration of Titanium Alloy Implants with Laser Microgrooved Surface and Graphene Oxide Coating", Applied Materials & Interfaces, vol. ۱۱, pp. ۳۹۴۷۰-۳۹۴۸۳, ۲۰۱۹.
- [۱۸] D. Li & A. W. Neumann, "Equation of State for Interfacial Tensions of Solid-Liquid Systems", Advances in Colloid and Interface Science, vol. ۳۹, pp. ۲۹۹-۳۴۵, ۱۹۹۲.
- [۱۹] R. N. Wenzel, "Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water", Industrial and Engineering Chemistry, vol. ۲۸, pp. ۹۸۸-۹۹۴, ۱۹۳۶.
- [۲۰] - A.B.D. Cassie, S. Baxter, "Wettability of porous surfaces", Transaction of the faraday society, vol. ۴۰, pp. ۵۴۶-۵۵۱, ۱۹۴۴.
- [۲۱] W. Li & A. Amirfazli, "A thermodynamic approach for determining the contact angle hysteresis for superhydrophobic surfaces", Colloid Interface Science, vol. ۲۹۲, pp. ۱۹۵-۲۰۱, ۲۰۰۵.
- [۲۲] W. Li & A. Amirfazli, "Superhydrophobic Surfaces: Adhesive Strongly to Water", Advanced Materials, vol. ۱۹, pp. ۳۴۲۱-۳۴۲۲, ۲۰۰۷.
- [۲۳] W. Li & A. Amirfazli, "Microtextured superhydrophobic surfaces: A thermodynamic analysis", Advances in Colloid and Interface Science, vol. ۱۳۲, pp. ۵۱-۶۸, ۲۰۰۷.