

## Comparison of atomic force microscopy with some common methods in measuring surface roughness Abstract



Standardization, Quality tests, and Cleansing Methods to Reuse Face Masks Used in Coronavirus and Respiratory Diseases Outbreaks



Common diseases of farmed shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and laboratory diagnostic methods



Genetic studies in ancient excavations (geoarchaeology)



Prediction of UCs Sterength of Limestone Using Neural Network and ANFIS (Case Study)



Determination of the Uncertainty Sources of Vicat Softening Temperature for Thermoplastic Material

## نویسندگان

مریم خسروی ۵.۱\*  
 مریم مغفوریان ۵.۲  
 سحر طیب طاهر ۵.۳  
 صدیقه صادق حسینی ۵.۴

\*M2012.khosravi@gmail.com

## مقایسه میکروسکوپ نیروی اتمی با برخی از روش‌های رایج در اندازه‌گیری زبری سطح

### چکیده

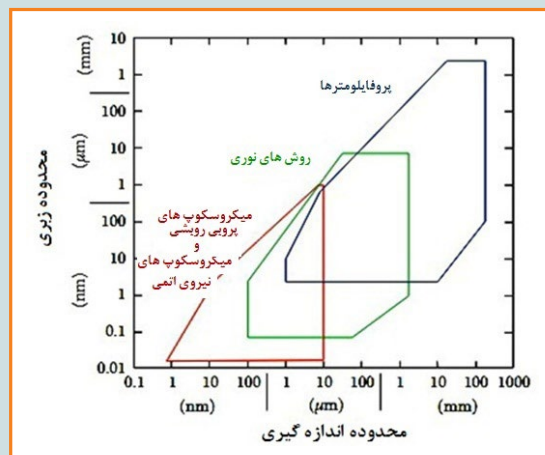
امروزه مطالعه خواص سطح به‌طور گسترده در صنعت و تحقیقات رایج شده‌است و به موجب آن فناوری‌های زیادی برای بررسی ویژگی‌های سطح در محدوده وسیعی از اندازه‌گیری‌ها (از میلی‌متر تا نانومتر) مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از موارد بسیار مهم در مطالعه خواص سطح، زبری سطح است. زبری سطح، خاصیتی از بافت سطحی ماده است که با مقایسه توپوگرافی آن نسبت به یک سطح صاف ایده‌آل شناسایی می‌شود. یک سطح زبر حاوی ناهمواری، برآمدگی و فرورفتگی‌هایی است که به فاصله بسیار کم از یکدیگر قرار گرفته‌اند. روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری زبری سطح وجود دارد که به دو دسته روش‌های تماسی و غیرتماسی قابل تقسیم هستند. در روش تماسی، که اساس کار دستگاه پروفیلومترهای سوزنی<sup>۱</sup> و میکروسکوپ‌های پروبی روبشی<sup>۲</sup> است، زبری سطح با حرکت دادن پروب در طول سطح اندازه‌گیری می‌شود. روش‌های تداخل‌سنجی<sup>۳</sup> و میکروسکوپ‌های هم‌کانون<sup>۴</sup> نیز نمونه‌های متداولی از دستگاه‌های اندازه‌گیری زبری به روش غیرتماسی هستند. البته نوع سطح

و خواص فیزیکی آن، تأثیر بسزایی در انتخاب ابزار مناسب دارد. در این مقاله برخی از روش‌های رایج اندازه‌گیری زبری و اساس آنها بررسی شده و این روش‌ها با میکروسکوپ نیروی اتمی مقایسه شده‌است.

### واژه‌های کلیدی

زبری، میکروسکوپ پروبی روبشی، میکروسکوپ نیروی اتمی، میکروسکوپ هم‌کانون روبشی لیزری، پروفیلومتر، تداخل‌سنجی.

زبری سطح<sup>۱</sup> یکی از مولفه‌های مهم بافت سطح است که نقش بسیار مهمی در بررسی سطوح دارد. بررسی هندسه واقعی سطح به حدی پیچیده است که با تعداد محدودی از عوامل نمی‌توان آن را به خوبی بیان کرد. عوامل ایجاد ویژگی‌های سطح به سه دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته اول ناشی از خطای ساخت است که ممکن است به دلیل بروز خطا در فرآیند ساخت، شکل سطوح از فرم مشخص شده خارج شود. دسته دوم، اعوجاج‌های سطحی است که به علت موج‌های به نسبت بلند همراه با ارتعاش‌های ناخواسته ناشی از ماشین ابزار اتفاق می‌افتد و دسته سوم زبری حاصل بی‌نظمی‌های فرآیند تولید و برش است. این سه مشخصه، هرگز به تنهایی روی سطح واقعی وجود ندارند و همواره ترکیبی از آنها روی سطح حضور خواهد داشت. بنابراین، زمانی که بافت سطح مورد بررسی قرار می‌گیرد، می‌توان به بررسی هر یک از این عوامل پرداخت. زبری سطح به صورت انحرافات یک سطح حقیقی در جهت بردار نرمال، از مقدار ایده‌ال آن تعریف می‌شود. اگر مقدار این انحرافات زیاد باشد، سطح زیر است و اگر مقدار این انحرافات کم باشد، سطح صاف است. نوع سطح و ویژگی‌های کاربردی آن، نقشی اساسی در علوم مختلف ایفا می‌کند. نکته با اهمیت این است که با این‌که در زمان ساخت برای صیقلی بودن سطوح دقت زیادی می‌شود ولی تحت تاثیر عوامل و روش‌های به کارگیری در تولید آنها حتی سطوح صاف در مقیاس اتمی نیز کاملاً تخت نیستند. زبری از ویژگی‌های خاص و با اهمیت سطح محسوب می‌شود و بر اصطکاک و میزان نرمی سطوح مؤثر است. بنابراین، در بررسی پوشش‌ها، مقاومت‌های حرارتی و الکتریکی، دینامیک سیالات، کنترل ارتعاشات و نوفه‌ها، فرآیندهای سایش و فرسودگی و غیره از اهمیت برخوردار هستند. روش‌های مختلفی برای تعیین میزان زبری در حالت دوبعدی به کار می‌روند که به‌عنوان نمونه می‌توان به روش‌های لمسی، چشمی، نوری، ارزیابی فراصوتی و استفاده از ابزارهای سوزنی اشاره کرد. برای بررسی عوامل زبری در حالت دوبعدی و تعیین استانداردهای مناسب برای آن، تاکنون فعالیت‌های بسیار گسترده‌ای انجام شده‌است و با اختراع میکروسکوپ‌های پروبی روبشی، امکان بررسی عوامل زبری در حالت سه‌بعدی نیز فراهم شده‌است. با به کارگیری فناوری دیجیتال و روش‌های تبدیل فوری جدید، امکان استفاده از عوامل متعدد زبری که مختص حالت دوبعدی بودند، در حالت سه‌بعدی نیز مهیا شده‌است. یکی از دلایل استفاده از عوامل زبری در حالت سه‌بعدی، تمایل به تولید سطوح نرم‌تر و با زبری در محدوده‌های نانومتری است. در طول سال‌های گذشته، بسیاری از روش‌های اندازه‌شناسی ابعاد و اندازه‌گیری سطح تکامل یافته‌اند (شکل (۱)).



شکل (۱): مقایسه محدوده اندازه‌گیری و محدوده زبری در سه روش میکروسکوپی نیروی اتمی، روش‌های نوری و پروفایلمترها [۳].

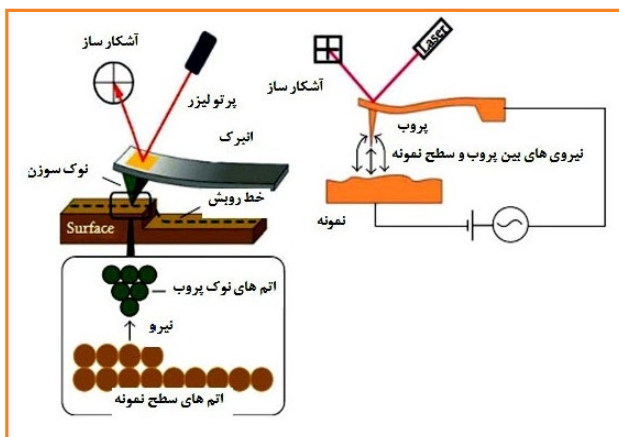
همان‌گونه که در تصویر مشاهده می‌شود، میکروسکوپ‌های پروبی روبشی مانند میکروسکوپ نیروی اتمی بیشتر برای اندازه‌گیری‌های سطوحی با زبری در محدوده نانومتر، روش‌های نوری برای سطوحی با زبری در محدوده نانو و میکرومتر و روش‌های پروفایلمتری برای سطوحی با زبری در محدوده میکرون به بالا مناسب هستند. البته این روش‌ها در برخی از نواحی اندازه‌گیری نیز همپوشانی دارند. در نتیجه این همپوشانی بین روش‌های اندازه‌گیری، نواحی مشترکی مشاهده می‌شوند که دامنه و وضوح گسترده‌ای از اندازه‌گیری‌ها را دربرمی‌گیرند و امکان اندازه‌گیری برای طیف گسترده‌ای از کاربردها در محدوده گسترده‌تری را به صورت مشترک فراهم می‌کند [۶-۱].

حفاظت و رنگ‌آمیزی سطح و مواردی نظیر آن، اشاره نمود. عوامل عملکردی شامل نسبت ماده نسبی<sup>۲۵</sup>، نیمرخ عرضی هسته مرکزی زبری<sup>۲۶</sup>، ضریب نیمرخ عرضی هسته مرکزی زبری<sup>۲۷</sup>، حجم ماده قله<sup>۲۸</sup>، حجم فضای خالی دره<sup>۲۹</sup>، شاخص حجم فضای خالی دره<sup>۳۰</sup> و شاخص تحمل سطح<sup>۳۱</sup> هستند [۶-۸].

### ■ میکروسکوپ نیروی اتمی

میکروسکوپ نیروی اتمی ابزاری برای مشاهده نمونه‌هایی با ابعاد میکرو و نانومتر است. در میکروسکوپ‌های نیروی اتمی از نیروهای ضعیف واندروالسی بین نوک پروب و سطح نمونه برای تشکیل تصویر توپوگرافی از سطح نمونه استفاده می‌شود. به کمک میکروسکوپ‌های نیروی اتمی امکان تهیه تصویر با توان تفکیک اتمی از نمونه‌های عایق، رسانا و نیمه‌رسانا وجود دارد. این میکروسکوپ نقش به‌سزایی در پیشرفت علوم مختلف از جمله مواد، فیزیک، شیمی، الکترونیک، نانوفناوری و علوم زیستی ایفا می‌کند.

میکروسکوپ نیروی اتمی سطح نمونه را به کمک یک پروب که شامل تیرک<sup>۳۲</sup> با سوزن<sup>۳۳</sup> تیزی که در انتهای آن است (شعاع حدود ۱۵ نانومتر)، روبش می‌کند. نیروهای بین سوزن و سطح نمونه باعث خم شدن یا انحراف تیرک شده و یک آشکارساز میزان انحراف تیرک در حالی که سوزن سطح نمونه را روبش می‌کند، اندازه می‌گیرد. البته از انحرافات تیرک برای ورودی یک مدار بازخورد نیز استفاده می‌شود، که روبشگر پیزوالکتریک را در مواجهه با توپوگرافی سطح نمونه به‌گونه‌ای در جهت محور z بالا و پایین می‌برد که میزان انحراف تیرک را کنترل کند. پرتو لیزر به پشت تیرک برخورد می‌کند که با جابه‌جایی‌های تیرک، میزان بازتاب پرتو لیزر به آشکارساز تغییر کرده و این امکان فراهم می‌شود که میزان جابه‌جایی‌های پروب حتی به کوچکی ۱۰ آنگستروم، نیز اندازه‌گیری شود (شکل (۲)). این روش میکروسکوپی دارای سه حالت کاری تماسی<sup>۳۴</sup>، غیرتماسی<sup>۳۵</sup> و شبه‌تماسی<sup>۳۶</sup> است [۳].



شکل (۲): نمایی از اساس کار میکروسکوپ نیروی اتمی [۳].

### ■ بررسی انواع عوامل زبری

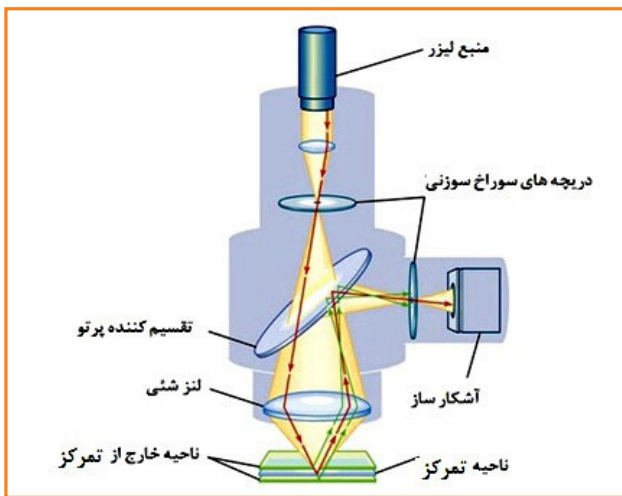
نوع سطح و ویژگی‌های آن، نقشی اساسی در علوم مختلف ایفا می‌کنند. همان‌گونه که گفته شد، سطوح صاف در مقیاس اتمی کاملاً تخت نیستند. هندسه سطح واقعی آنقدر پیچیده است که تعداد محدودی از عوامل نمی‌توانند شرح کاملی از سطح را ارائه دهند. اگر تعداد عوامل مورد استفاده افزایش یابد، می‌توان شرح دقیق‌تری از سطح را بدست آورد. این یکی از دلایل معرفی عوامل جدید برای ارزیابی سطح است. عوامل زبری سطح به‌طور معمول با توجه به عملکرد آن‌ها در چهار گروه دسته‌بندی می‌شوند. این گروه‌ها به‌عنوان عوامل دامنه<sup>۱۱</sup>، فاصله<sup>۱۲</sup>، هیبرید<sup>۱۳</sup> (دوگانه) و عملکردی<sup>۱۴</sup> معرفی می‌شوند.

عوامل دامنه در بررسی مشخصات توپوگرافی سطح نقش بسزایی دارند و برای اندازه‌گیری مشخصات عمودی انحرافات سطح مورد استفاده قرار می‌گیرند و اطلاعات آماری به همراه شکلی از هیستوگرام توزیع ارتفاع و غیره از خواص سطح ارائه می‌کنند. این عوامل شامل متوسط ارتفاع نیمرخ عرضی سطح<sup>۱۵</sup>، انحراف ریشه میانگین مربعات سطح<sup>۱۶</sup>، بیشینه مقدار ارتفاع نیمرخ عرضی سطح<sup>۱۷</sup>، عدم تقارن نیمرخ عرضی ارزیابی شده<sup>۱۸</sup> و کشیدگی نیمرخ عرضی ارزیابی شده<sup>۱۹</sup> هستند. عوامل فاصله برای اندازه‌گیری انحرافات افقی سطح به کار می‌روند. این عوامل در بعضی از فرایندهای ساخت نظیر پرس ورقه‌های استیل با اهمیت بوده و برای به‌دست آوردن پایداری روانکاری به هنگام پرسکاری ورقه‌ای و جلوگیری از ظاهر شدن بافت سطح در محصول نهایی، ضروری هستند. برخی از عوامل زبری فاصله شامل طول سریع‌ترین واپاشی تابع خودهمبستگی خودکار<sup>۲۰</sup>، چگالی قله سطح<sup>۲۱</sup>، جهت‌گیری و نسبت ابعاد بافت<sup>۲۲</sup> سطح و جهت‌گیری سطح بافت هستند.

عوامل دوگانه (هیبرید) نیز به‌منظور بررسی خواص و ویژگی‌های توپوگرافی سطح به کار می‌روند و به شدت وابسته به عوامل زبری دامنه و فاصله هستند. به کمک این عوامل می‌توان خواص و ویژگی‌های حرارتی، الکتریکی، پوششی و نوری سطح را مورد بررسی قرار داد. خواص سطح، تحت تأثیر عوامل مهمی نظیر میانگین انحنای قله‌ها و دره‌ها، شیب سطح، انحنای سطح و دیگر عوامل مشابه قرار دارد. این عوامل شامل شیب ریشه میانگین مربعات نیمرخ عرضی<sup>۲۳</sup>، میانگین حسابی انحنای قله<sup>۲۴</sup> و نسبت سطح فصل مشترک توسعه یافته هستند.

عوامل عملکردی در بررسی بسیاری از سطوحی که برای کاربردهای مهندسی تولید می‌شوند و دارای خواص کاربردی ویژه‌ای نظیر استحکام و پایداری سطح، توانایی آب‌بندی یا نگهداری مایعات و غیره هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. گستره وسیعی از نیازهای عملکردی وجود دارند که در این خصوص می‌توان به کاربردهای حالت تماسی نظیر سایش، چسبندگی، روانکاری، آب‌بندی، تنش، آلودگی و هدایت حرارتی سطوح و یا به کاربردهای حالت غیرتماسی نظیر لنزهای نوری،

دی کروماتیکی (آینه دو رنگی)<sup>۳۹</sup> سرتاسر نمونه را روبش می‌کند، نور منتشر شده از نمونه بعد از عبور از تقسیم کننده پرتو در نقطه درجه دوم که درست مقابل آشکارساز قرار دارد، جمع‌آوری می‌شود. با حذف نورهای خارج از تمرکز<sup>۴۰</sup> که از نقاط بالا و پایین صفحه تمرکز ساطع می‌شوند، توان تفکیک به صورت چشم‌گیری افزایش می‌یابد. در هر لحظه فقط یک نقطه از نمونه قابل مشاهده است و تصویر حاصل، مجموع آنالیز تمام نقاط است. یکی از مهم‌ترین موارد در میکروسکوپ LSCM، قرارگیری درجه سوراخ سوزنی با قطر قابل تغییر روبروی آشکارساز است که امکان تنظیم مناسب نور را فراهم می‌نماید [۹-۱۲].



شکل (۳): نمایی از ساختار میکروسکوپ هم‌کانون روبشی لیزری (LSCM) [۱۲].

### □ مقایسه زبری روی سطوح آب‌گریز<sup>۴۱</sup> با استفاده از LSCM و AFM

در موارد بسیاری، خواص سطح متفاوت از خواص توده آن است و حتی اهمیت زیادی دارد. زیرا خواصی همچون اصطکاک، چسبندگی، جذب، نفوذ مایعات، رنگ‌پذیری، آب‌گریزی و آبدوستی همگی تحت تأثیر سطح هستند. مدتهاست که آب‌گریزی<sup>۴۲</sup> سطح در صنایع بسیار مورد توجه است. به تازگی برای افزایش مقدار آب‌گریزی سطح، افزون بر استفاده از پوشش‌های آب‌گریز با انرژی سطحی کم، از تغییر فیزیکی ساختار سطح به شکلی که زبری‌هایی در ابعاد میکرو-نانو ایجاد شود، نیز استفاده می‌شود. چنین سطوحی به‌عنوان سطوح آب‌گریز شناخته می‌شوند. بنابراین، در تهیه این سطوح دو عامل اثر زبری و کاهش انرژی سطح، باید مورد توجه قرار گیرند و بهبود این دو خاصیت روی مواد مختلف، سبب بهبود کارایی و سهولت نگهداری آنها می‌شود و این مسئله اهمیت زیادی در صنعت و سایر کاربردها دارد.

به‌منظور بررسی آب‌گریزی و میزان تأثیر استفاده از روش‌های حکاکی اسیدی و بازی روی زبری سطح،

### □ معرفی برخی از روش‌های رایج در بررسی زبری و مقایسه آنها با میکروسکوپ نیروی اتمی<sup>۳۷</sup>

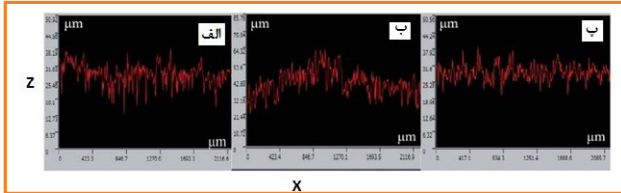
#### □ میکروسکوپ هم‌کانون روبشی لیزری (LSCM)

میکروسکوپ هم‌کانون روبشی لیزری، یکی از روش‌های پیشرفته میکروسکوپ نوری است که در مقایسه با سایر روش‌های میکروسکوپ نوری از توان تفکیک قابل توجه‌ای برخوردار است. این میکروسکوپ، یکی از تجهیزات تحقیقاتی مدرن است که از نظر اساس کار و قابلیت‌های آن، بسیار با میکروسکوپ‌های نوری معمولی متفاوت است. با کمک آن می‌توان در کنار تصاویر دوبعدی، تصاویر سه‌بعدی مناسبی از نمونه‌ها به همراه مطالعه ساختار و توپوگرافی سطحی با قابلیت تعیین لایه‌ها، ضخامت پوشش‌های شفاف، زبری و غیره را فراهم کرد.

ویژگی متمایز این روش، استفاده از دریچه‌های مخصوص است که می‌تواند اثرات نور پراکنده شده در پس‌زمینه را حذف کند و هم‌زمان امکان تجزیه و تحلیل غیرمخرب نمونه‌های شفاف، نیمه‌شفاف و کدر را فراهم کند. با توجه به استفاده از لیزرها به‌عنوان منابع نوری در این میکروسکوپ‌ها، دستیابی به توان تفکیک بالا به همراه افزایش وضوح به‌راحتی فراهم شده‌است. لیزرها در مقایسه با لامپ‌های معمولی به کار رفته در سایر روش‌های میکروسکوپی، دارای مزایای قابل توجه‌ای هستند و با توجه به قابلیت تک رنگ بودن و همچنین شدت بالای آنها، دقت تمرکز پرتو نور افزایش می‌یابد. در این روش، لیزر کل میدان دید را روشن نمی‌کند و فقط در نقطه خاصی از نمونه تمرکز می‌یابد. با استفاده از دریچه‌های ویژه این میکروسکوپ، توانایی جلوگیری از بازتابش نورهای خارج از فاصله کانونی با تغییر قطر دریچه‌ها و دستیابی به وضوح بهبود یافته در امتداد محور Z امکان‌پذیر می‌شود. در مقایسه با میکروسکوپ‌های نوری معمولی، میکروسکوپ LSCM دارای مزایایی نظیر وضوح بهتر، توان تفکیک بالای تصاویر، امکان دستیابی به «برش‌های نوری» با بازسازی سه‌بعدی نمونه و امکان استفاده از روش‌های پردازش دیجیتالی تصاویر دریافتی است. البته روش ذکر شده دارای معایبی نظیر پیچیدگی راه‌اندازی دستگاه، هزینه بالای دستگاه و همچنین هزینه بالای نگهداری آنها است. میکروسکوپ LSCM یک روش منحصر به فرد است که امروزه کاربردهای گسترده‌ای در زمینه زیست‌شناسی، بیوفیزیک، پزشکی، زیست‌شناسی سلولی و مولکولی، میکروالکترونیک، علوم مواد، پلیمرها و سایر علوم پیدا کرده است.

در یک میکروسکوپ LSCM، تصویری از یک نقطه از یک جسم در هر لحظه از زمان ثبت می‌شود و یک تصویر کامل با روبش (حرکت نمونه یا بازسازی سیستم نوری) ایجاد می‌شود. اساس کار میکروسکوپ LSCM در شکل (۳) نشان داده شده‌است. نور لیزر بعد از عبور از دریچه سوراخ سوزنی<sup>۳۸</sup>، نمونه را به صورت نقطه‌ای روبش می‌کند. هم‌زمان که لیزر با استفاده از یک آینه

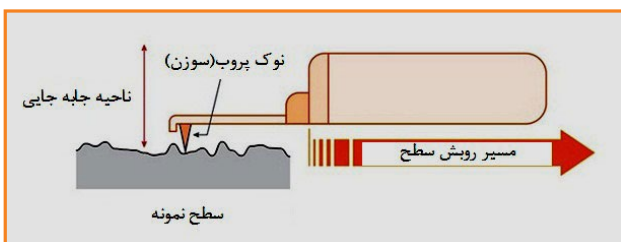
بالا در تصاویر SEM مشاهده شدند و به دلیل غیرتماسی بودن روش LSCM، سپس با این روش بررسی شد (شکل (۶)) و براساس نتایج حاصل از LSCM و مشاهده مقادیر زبری این سطوح (زبری‌های بالای ۳ میکرومتر) و امکان آسیب به پروب دستگاه AFM، از میکروسکوپ نیروی اتمی در بررسی زبری‌های سطوح با حکاکی اسیدی استفاده نشد [۱۳].



شکل (۶): پروفایل‌های حاصل با دستگاه LSCM روی سه سطح با حکاکی اسیدی [۱۳].

### □ پروفایلمتر سوزنی

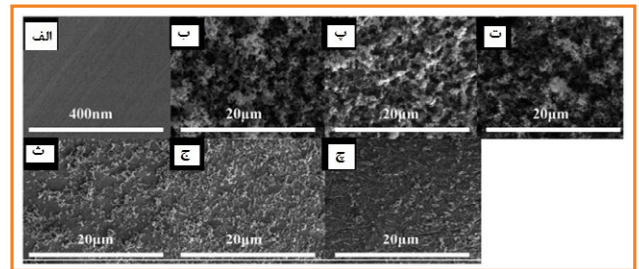
استفاده از این روش، متداول‌ترین روش برای اندازه‌گیری ویژگی‌های سطح است. پروفایلمتر یک دستگاه اندازه‌گیری است که برای اندازه‌گیری پروفایل سطح و تعیین برخی از مشخصه‌های سطحی نظیر زبری، انحناء، برآمدگی و فرورفتگی‌های سطحی استفاده می‌شود. از جمله مزایای این روش می‌توان به ارزان قیمت بودن آن و داشتن وضوح جانبی بالاتر نسبت به روش‌های نوری، بسته به شعاع نوک سوزن (جنس پروب آن به‌طور معمول الماس است) اشاره کرد. با این حال نوک سوزن باید در تماس فیزیکی با سطح باشد که ممکن است این تماس موجب تغییر در سطح نمونه یا نوک سوزن شده و باعث آلودگی شود. بعلاوه، به دلیل اثر متقابل مکانیکی با سطح، سرعت روبش نسبت به روش‌های نوری به‌طور قابل توجهی کندتر است. به دلیل زاویه سوزن، پروفایلمترها نمی‌توانند لبه‌های یک ساختار را به درستی اندازه‌گیری کنند و باعث ایجاد «سایه» یا منطقه نامشخص می‌شوند و از طرفی، وقتی اندازه ویژگی‌های سطح به اندازه شعاع نوک سوزن نزدیک می‌شود نتایج حاصل دقیق نیست. این پروب به‌طور معمول در امتداد یک خط مستقیم (شکل (۷)) روی یک سطح صاف یا به‌صورت قوس مدور در اطراف یک سطح استوانه‌ای ردیابی می‌شود و انحرافات ناشی از زبری سطح به شکل یک پروفایل سطح به‌دست می‌آید.



شکل (۷): نمایی از اساس کار پروفایلمتر [۱۵].

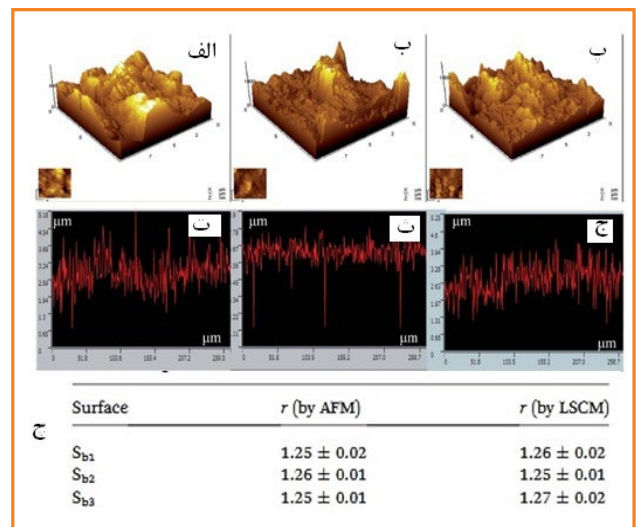
بیشتر پروفایلمترها از ۴ قسمت اصلی گنج‌القایی<sup>۴۴</sup>، پروب،

مطالعه‌ای روی یک نمونه فویل آلومینیومی صورت گرفت و سپس میزان زبری با دو دستگاه AFM و LSCM بررسی شد. به‌منظور انجام عملیات حکاکی اسیدی و بازی، ابتدا سطح فویل آلومینیوم را در معرض غلظت‌های مختلفی از هیدروکلریدریک اسید و محلول آمونیاک قرار دادند، سپس با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۴۳</sup> تصاویری از مورفولوژی این سطوح تهیه شد (شکل (۴)).



شکل (۴): (الف): سطح فویل آلومینیوم خالص، (ب، پ، ت): سطوح حاصل از حکاکی‌های اسیدی و (ث، ج، چ): سطوح حاصل از حکاکی‌های بازی [۱۳].

براساس مورفولوژی مشاهده شده در نتایج حاصل از SEM، مشخص شد نمونه‌هایی که در محیط آمونیاک حکاکی شده‌اند دارای زبری کمتری نسبت به نمونه‌های حکاکی شده در محیط اسیدی هستند. آنالیز LSCM و AFM هم‌زمان روی آن‌ها انجام شد. در بررسی انجام شده بر این سطوح، مشاهده شد در هر دو روش، مقادیر زبری حاصل در سطوح بازی نزدیک به هم بوده و لذا نتایج زبری حاصل از دستگاه LSCM نیز قابل اعتماد است. میزان زبری سطوح پس از حکاکی بازی در هر دو روش، حدود یک میکرومتر است (شکل (۵)).



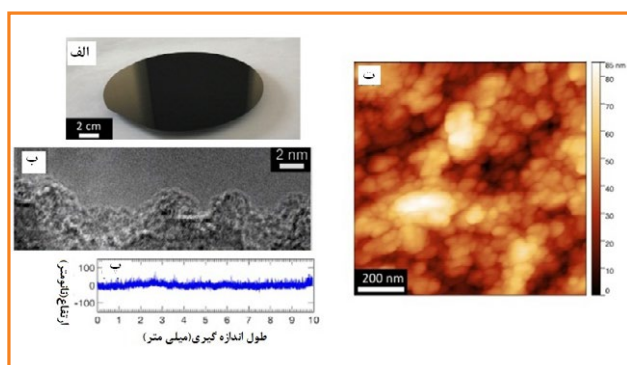
شکل (۵): (الف-ب-پ): تصاویر AFM از توپوگرافی روی سطوح با شرایط مختلف حکاکی بازی، (ت-ث-ج): پروفایل‌های حاصل به کمک LSCM روی سطوح با شرایط مختلف حکاکی بازی و (چ): مقایسه زبری حاصل با روش [۱۳].

بررسی زبری و خواص سطح در نمونه‌هایی که در محیط اسیدی حکاکی شدند، به علت مشاهده مورفولوژی دارای زبری

پروفایلمتری شود، اهمیتی ندارد و از نظر کاربرد می‌توان این دستگاه را با میکروسکوپ‌های AFM مقایسه کرد. یک تفاوت مهم آن است که در میکروسکوپ‌های AFM توپوگرافی به‌طور معمول به‌صورت سه‌بعدی رسم می‌شود، در حالی که در پروفایلمتر بررسی مشخصه‌های سطحی در یک بعد و نتیجه نهایی به‌صورت پروفایل دوبعدی رسم می‌شود. رسم پروفایل سطحی فقط در یک بعد هر چند اطلاعات کمتری نسبت به توپوگرافی‌های سطحی ارائه می‌دهد، اما در واقع، برای بسیاری از کاربردها در حوزه‌هایی نظیر میکروالکترونیک، اپتیک، صنایع رنگ‌سازی، صنایع آبکاری، لایه‌نشانی، زیست‌شناسی، پزشکی و داروسازی داشتن اطلاعات به‌صورت پروفایل دوبعدی کفایت می‌کند [۱۴-۱۷].

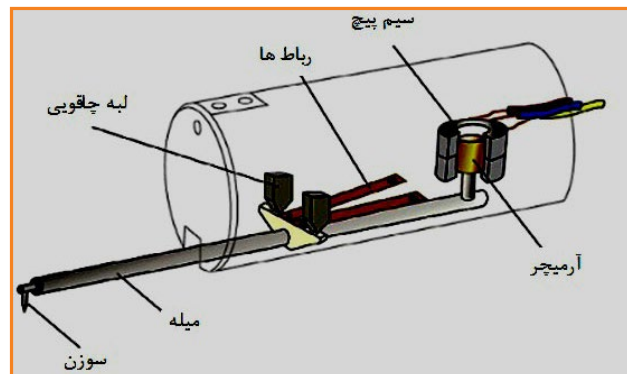
### □ تلفیقی از روش‌های پروفایلمتری و میکروسکوپی AFM و TEM در بررسی زبری سطح پوشش‌های الماس نانوبلوری

با توجه به اهمیت و اثر مستقیم مقادیر ارتفاع ریشه میانگین مربع، شیب ریشه میانگین مربع و انحنای ریشه میانگین مربع بر مقادیر زبری و تاثیر آن‌ها روی خواصی نظیر چسبندگی، اصطکاک و سختی سطح، با به کارگیری روش پروفایلمتری و میکروسکوپی AFM و TEM، مطالعه گسترده‌ای روی سطح پوشش‌های الماس نانوبلوری و محاسبه عوامل فوق انجام شد (شکل ۹). نتایج حاصل از هر روش به‌صورت مجزا و در نهایت در ترکیب با سایر روش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. بررسی فوق، ابتدا از هشت ناحیه مختلف از سطح نانوساختار الماسی با میکروسکوپ الکترونی عبوری<sup>۴۶</sup> تصویرهایی در محدوده بزرگنمایی ۵۰۰ تا ۸۰۰۰۰۰ تهیه شد، سپس با پروفایلمتری با شعاع سوزن ۵ میکرومتر، روبش‌هایی با طول‌های اندازه‌گیری‌های ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۲، ۳/۵ و ۱۰ میلی‌متر روی سطح صورت گرفت، این روبش‌ها به‌صورت تصادفی و در جهات مختلف روی سطح انجام شد که مشخص شود جهت‌گیری سطح تاثیری روی نتایج ندارد، در نهایت با میکروسکوپ AFM که دارای پروبی با شعاع سوزن ۱۷ نانومتر بود، روبش‌هایی در محدوده‌های ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۵، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ میکرومتر روی نواحی مختلف سطح انجام شد.



شکل ۹: (الف): سطح ویفر سیلیکونی با پوششی از نانو الماس، (ب): تصویر میکروسکوپ TEM با توان تفکیک آنگستروم، (پ): اندازه‌گیری پروفایل سطح با پروفایلمتر و (ت): تصویر میکروسکوپ AFM از سطح پوشش [۱۸].

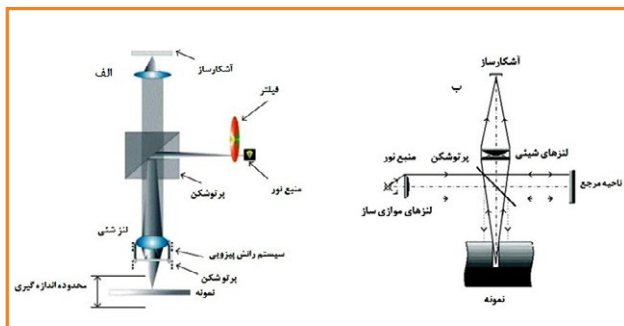
نگهدارنده نمونه و نرم‌افزار تشکیل شده‌اند. سازوکار عملکرد پروفایلمتر بسیار شبیه حالت تماسی میکروسکوپ‌های AFM است. در ابتدا یک پروب که به‌صورت عمودی حرکت می‌کند، در تماس با سطح نمونه قرار می‌گیرد و یک نیروی معین به سطح وارد می‌کند. سپس نگهدارنده نمونه شروع به حرکت دادن نمونه در طول یک خط مستقیم می‌کند. مشخصه‌های سطحی سبب بروز جابه‌جایی‌های جزئی در پروب می‌شود. این جابه‌جایی‌های پروب سبب تولید سیگنال‌های آنالوگ با استفاده از گیج القایی شده که در ادامه به کمک نرم‌افزار به داده‌های کمی تبدیل و ذخیره می‌شود، این داده‌ها با موقعیت طولی پروب تطبیق داده می‌شود و در نهایت، به‌صورت پروفایل دوبعدی ترسیم و ارائه می‌شود. گیج القایی وسیله‌ای است که مختصات عمودی پروفایل حاصل از روبش سطح را با پروفایل مرجع مقایسه و به سیگنال مورد استفاده در ابزار تبدیل می‌کند. این گیج‌ها موقعیت مطلق سوزن را نمایش و فقط موقعیت سوزن در راستای حرکت عمودی آن را نشان می‌دهند. خروجی این دستگاه بسیار کوچک است و باید تحت بزرگنمایی و پردازش قابل توجه سیگنال قرار گیرند تا توان تفکیک مناسبی را فراهم نمایند. در این نوع گیج‌ها، سوزن در نوک میله‌ای قرار دارد که در وسط روی لبه‌های چاقویی قرار گرفته است و در انتهای دیگر آن آرمیچر قرار دارد که بین دو سیم‌پیچ حرکت می‌کند و اندوکتانس (القائه)<sup>۴۵</sup> نسبی آن را تغییر می‌دهد (شکل ۸). سیم‌پیچ‌ها به یک مدار ac متصل هستند به‌گونه‌ای که وقتی آرمیچر در مرکز قرار دارد، تعادل برقرار است و هیچ خروجی نمی‌دهد. حرکت آرمیچر تعادل را به هم می‌زند و باعث می‌شود تا متناسب با جابه‌جایی، یک خروجی حاصل شود. فاز نسبی سیگنال به جهت حرکت بستگی دارد. سیگنال حاصله، بزرگنمایی شده و با سیگنال مرجع مقایسه می‌شود تا تعیین شود که در چه جهتی از نقطه مرکز (صفر) حرکت کرده است. میله‌ای که سوزن روی آن نصب است روی لبه میله نگه داشته می‌شود و رباط‌های متصل به آن از حرکت میله در صفحه افقی جلوگیری می‌کنند و باعث می‌شوند که سوزن فقط در راستای عمودی، آزادی حرکت داشته باشد. ارتفاع مشخصه‌های سطحی که این دستگاه می‌تواند اندازه‌گیری کند تا ۱ میلی‌متر است. همچنین، توان تفکیک افقی به سرعت روبش و نرخ نمونه‌برداری از سیگنال‌ها وابسته است.



شکل ۸: نمایی از ساختار اصلی گیج القایی پروفایلمتر [۱۴].

امتیاز قابل توجه این دستگاه به دلیل کار در حالت تماسی این است که داشتن اطلاعاتی از جنس لایه و زیرلایه‌ای که قرار است

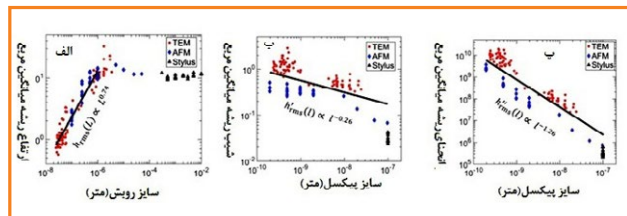
با دقت بالا انجام شده است. تداخل سنجی دانش ترکیب دو یا چند موج است به گونه‌ای که با بررسی موج حاصل از این ترکیب بتوان اطلاعاتی در مورد موج‌های ورودی بدست آورد. ابزاری که برای تداخل امواج بکار می‌رود، تداخل سنج نامیده می‌شود. این روش دارای بالاترین وضوح عمودی در بین سایر روش‌های نوری و وضوح جانبی معادل بیشتر سایر روش‌های نوری دیگر، به جز میکروسکوپ هم کانون (که از وضوح جانبی بهتری برخوردار است)، است. تداخل سنجی روشی مهم برای تحقیق در زمینه‌های فیزیک نور، فیزیک هسته‌ای، فیزیک ذرات، فیزیک پلاسما، فیبر نوری، زمین‌شناسی، زلزله‌شناسی، مکانیک کوانتومی و مطالعات سطح است. این روش با استفاده از خواص موجی امواج الکترومغناطیس به خصوص نور مرئی می‌تواند اندازه‌گیری‌های بسیار دقیقی از کمیت‌های فیزیکی انجام دهد. اساس کار تداخل سنج‌ها بر پایه اصول تداخل نور است. براساس اصول تداخلی، چنانچه دو منبع نوری هم‌دوس<sup>۴۸</sup> نورشان با یکدیگر تداخل کند این پرتوها با یکدیگر برهم‌نهی نموده و نتیجه این برهم‌نهی، نواحی تاریک و روشن در فضا خواهد بود. اگر تغییری در محیط انتشار این دو پرتو یا هر کدام از آن‌ها رخ دهد (مانند تغییر دما، فشار، طول موج و مانند آن) نقش تداخلی دو پرتو (نواحی تاریک و روشن) تغییر خواهد کرد؛ با ثبت این تغییرات و اندازه‌گیری آن‌ها می‌توان مورفولوژی و تغییرات سطح را مطالعه کرد و عوامل زبری را محاسبه نمود. در شکل (۱۲) نمایی از اساس کار دستگاه تداخل سنجی نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نور در ناحیه تقسیم کننده پرتو<sup>۴۹</sup> که مقابل فیلتر قرار دارد، از منبع نور به عدسی شیئی هدایت می‌شود. دسته‌ای از پرتوهای شکسته شده در عدسی شیئی دوباره به دو شعاع نوری تقسیم می‌شود که یکی از آنها به‌طور مستقیم به نمونه و دیگری به یک منبع بازتاب کننده داخلی هدایت می‌شود. دو نور بار دیگر با هم ترکیب و به آشکارساز فرستاده می‌شود، در شکل (۱۲) مسیری که نمونه و منبع تداخل می‌کنند، قابل مشاهده است. آشکارساز شدت پرتوهای خارج شده بعد از روبش نمونه را اندازه‌گیری می‌کند.



شکل (۱۲): (الف): نمایی از یک دستگاه تداخل سنج و (ب): اساس کار آن [۳].

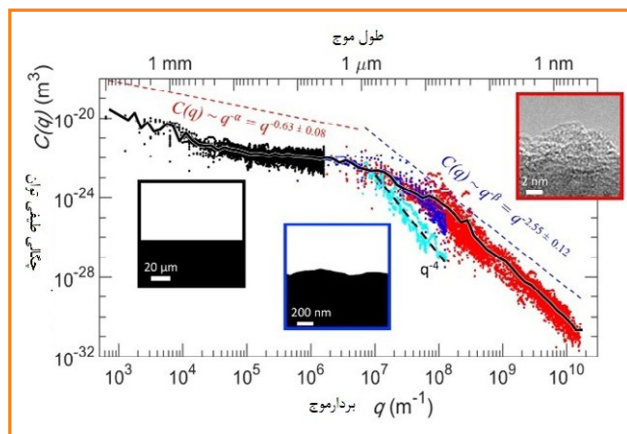
شکل (۱۳) نشان می‌دهد که چگونه آشکارساز، تصاویری از نمونه را جمع‌آوری می‌کند. این عکس‌ها که به‌صورت لحظه‌ای گرفته می‌شوند، تصاویری مناسب برای اندازه‌گیری

با توجه به پراکندگی زیاد نتایج حاصل از هر سه روش در اندازه‌گیری عوامل ارتفاع ریشه میانگین مربع، شیب ریشه میانگین مربع و انحنای ریشه میانگین مربع در کل محدوده‌های روبش، مشاهده شد (شکل (۱۰))، امکان استفاده مجزای داده‌ها در هر کدام از روش‌های ذکر شده به تنهایی در تفسیر کامل زبری سطح وجود نداشت.



شکل (۱۰): (الف): بررسی میزان پراکندگی حاصل برای مقادیر ارتفاع ریشه میانگین مربع، (ب): شیب ریشه میانگین مربع و (پ): انحنای ریشه میانگین مربع در کل محدوده اندازه‌گیری شده با سه روش، میکروسکوپ TEM (نقاط قرمز رنگ)، میکروسکوپ AFM (نقاط آبی) و پروفیلومتر (نقاط تیره) نسبت به مقدار مرجع (خط تیره) [۱۸].

در یک تحقیق، از چگالی طیفی توان<sup>۴۷</sup> به‌عنوان ابزاری برای تلفیق اندازه‌گیری‌های چند مقیاسی در یک حالت واحد با نتایج هر سه روش استفاده شد. به این ترتیب با بکارگیری چگالی طیفی توان و ادغام نتایج حاصل از ۱۲۷ اندازه‌گیری صورت گرفته با هر سه روش، به بررسی جامع و کامل ویژگی‌های مورفولوژی و عوامل زبری سطح، پرداخته شد (شکل (۱۱)) [۱۸].



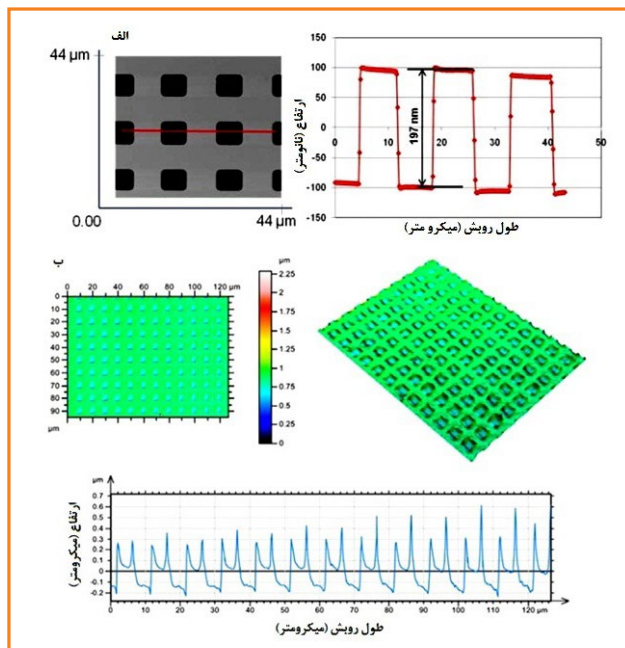
شکل (۱۱): نمودار سیاه رنگ، چگالی طیفی توان حاصل از ادغام هر سه عامل ارتفاع ریشه میانگین مربع، شیب ریشه میانگین مربع و انحنای ریشه میانگین مربع در کل محدوده اندازه‌گیری شده با پروفیلومتر (مناطق سیاه رنگ)، میکروسکوپ AFM (مناطق آبی) و میکروسکوپ TEM (مناطق قرمز رنگ) است (نواحی فیروزه‌ای مربوط به اثرات ناخواسته حاصل از پروب AFM است)، در ضمن تصاویر داخلی نشان داده شده روی نمودار، بیانگر یک توصیف جامع از توپوگرافی سطح برای هر روش است [۱۸].

## تداخل سنجی

استفاده از فناوری نوری برای مطالعه سطح برای مدتی به نسبت طولانی بسیار جامع و عمومی شده بود و در سال‌های گذشته پیشرفت‌های قابل توجهی برای اصلاح کیفیت سطح



در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، یک نمونه استاندارد دارای پله‌هایی با ارتفاع ۲۰۰ نانومتر با دو روش AFM و تداخل‌سنجی بررسی شده‌است. در نتایج حاصل، ارتفاع پله‌های مشاهده شده با روش AFM حدود ۱۹۷ نانومتر دیده شد، در حالی که در پروفایل اندازه‌گیری ارتفاع با روش تداخل‌سنجی، در محل پله‌های پله اعوجاج‌های زیادی مشاهده و ارتفاع پله‌ها حدود ۳۰۰ نانومتر گزارش شده‌است [۳ و ۲۳-۱۹].

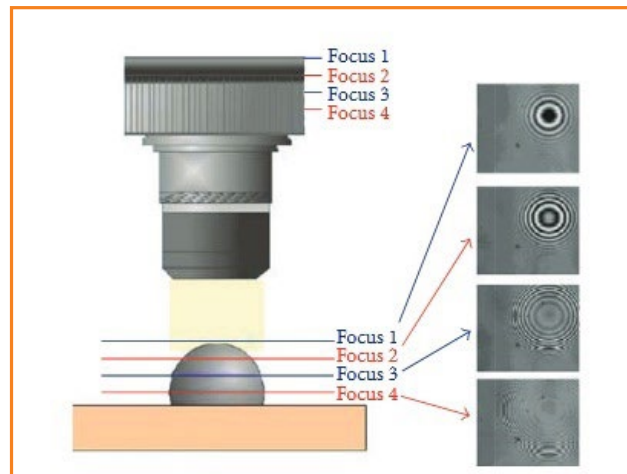


شکل (۱۴): (الف): اندازه‌گیری نمونه استاندارد با میکروسکوپ AFM و (ب): روش تداخل‌سنجی [۱۹].

## □ بررسی میزان سایش اجزای یک موتور، با دو روش میکروسکوپی نیروی اتمی و تداخل‌سنجی

در فرآیندهای ساخت قطعات مکانیکی، عملیات بهبود کیفیت سطوح آنها با توجه به شرایط مختلف بهره‌برداری از لحاظ مقاومت به خوردگی و خستگی، مقدار اصطکاک، چگونگی تماس بین سطوح و شکل ظاهری از اهمیت قابل توجهی برخوردار است و زبری سطح قطعات مکانیکی تاثیر بسزایی روی این عوامل دارد. بررسی توپوگرافی سطوح برای کاربردهای مهندسی، به‌طور معمول برای تجزیه و تحلیل سطوح قبل و بعد از انجام عملیات انجام می‌شود و بیشتر از انحراف معیار زبری‌ها به‌عنوان تنها معیار مهم در تحلیل قطعات زیر در حال تماس یاد می‌شود. با توجه به اهمیت الگوی زبری سطح یا به عبارتی، اثر زبری‌ها روی عملکرد قطعات مکانیکی در تماس، در این مطالعه ویژگی‌های بافت سطح و اثرات آن در بررسی‌های مقاومت در برابر سایش روی اجزای موتور مورد تحقیق قرار گرفته است. با توجه به نتایج حاصل از مطالعات قبلی مشخص شد، تشکیل الگوی زبری در راستای عرضی سطح در مقیسه

نواحی تداخلی هستند و از این تصاویر برای بررسی زبری سطح استفاده می‌شود. برای این کار از نور تک‌رنگ استفاده شده که باعث افزایش دقت اندازه‌گیری می‌شود.



شکل (۱۳): نمایی از ثبت تصاویر لحظه‌ای در عمق‌های مختلف نمونه [۳].

از روش‌های مختلفی برای کنترل حرکت تداخل‌سنجی و همچنین محاسبه عوامل سطح استفاده می‌شود. در اندازه‌گیری نوری، با کنترل سازوکار روبش و محاسبه دقیق ویژگی‌های سطح، دقت و تکرارپذیری مناسب در روبش به دست می‌آید. اما دقت آن به کمک دقت آشکارساز کنترل می‌شود. دقت‌های بیشتر نیاز به بزرگنمایی بزرگتر دارند که باعث کوچک شدن منطقه مورد اندازه‌گیری می‌شود. در حال حاضر محدوده دقت برای تداخل‌سنجی نوری در حدود ۰/۵ میکرون است. عامل موثر دیگر در این روش، انتخاب درپچه عددی<sup>۵۱</sup> مناسب است. درپچه عددی، با زاویه‌ای که نور با نمونه برخورد می‌کند، مرتبط است و بیشترین مقدار NA هنگامی است که بیشترین مقدار زاویه اندازه‌گیری شود. به‌طور معمول بیشترین مقدار بزرگنمایی اشیاء می‌تواند بیشترین مقدار NA را ایجاد کند. دو نوع از روش‌های تداخل‌سنجی رایج شامل تداخل‌سنجی انتقال فاز<sup>۵۱</sup> و تداخل‌سنجی روبش نوری<sup>۵۲</sup> هستند. تداخل‌سنجی انتقال فاز روشی رایج و بسیار قوی است. در این روش مشخصات سطح را با تعیین میزان تغییرات فاز نور منعکس شده از سطح و تبدیل آنها به تغییرات ارتفاع، اندازه‌گیری می‌شود که این روش دارای دقت بالایی است. این نوع ابزارها به‌راحتی می‌توانند نشان دهند که اختلاف ارتفاع دو نقطه مجاور باید کمتر از  $\lambda/4$  باشند ( $\lambda$  طول موج نور استفاده شده‌است). در مواردی که سطح بسیار صاف (آینه مانند) است، از تداخل‌سنجی روبشی نوری استفاده می‌شود. به‌طور کلی، روش‌های تداخل‌سنجی تاثیرپذیری زیادی از خواص فیزیکی سطح دارند، در بررسی سطوحی با الگوهای متقارن، دارای شیب، پله و ساختارهایی شامل لبه‌های تیز، به علت اعوجاج‌های زیاد الگوهای تداخل در نواحی فوق به‌خصوص در نواحی لبه‌ها، دقت اندازه‌گیری کاهش یافته و خطای زیادی در نتایج مشاهده می‌شود. همان‌گونه که

## بررسی و مقایسه میزان زبری حاصل از تراشکاری<sup>۵۵</sup> روی سطح فولاد<sup>۵۶</sup> با سه روش میکروسکوپی نیروی اتمی، تداخل سنجی و پروفایلمتری

تراشکاری در واقع شکل دهی به فلزات به روش براده برداری با استفاده از ماشین تراشکاری است. در این روش، نمونه‌های فلزی به شکل استوانه و یا اشکال دیگر، با قدرت و سرعت معین به چرخش درآمده و با حرکت تیغچه‌های تراشکاری روی آن، عمل براده برداری با عمق و سرعت معین انجام می‌شود. عملیات براده برداری به دو صورت خشن کاری و پرداخت کاری انجام می‌شود. در حالت اول عمق برش و میزان پیشروی زیاد و سرعت براده برداری کم انتخاب می‌شود و در حالت دوم عمق برش و نرخ پیشروی<sup>۵۷</sup> اندک، اما سرعت براده برداری زیاد است (سرعت زیاد براده برداری در افزایش صافی سطح موثر است). یکی از عوامل بسیار موثر در کیفیت تراشکاری سطح، نرخ پیشروی (به میزان جابه جایی ابزار تراش (در واحد طول) یا میزان براده برداری به ازای هر دور چرخش) است. اثر این مولفه بر دو عامل زبری، متوسط ارتفاع نیمرخ عرضی (Ra) و بیشینه مقدار ارتفاع نیمرخ عرضی (Rz)، روی نمونه‌ها با روش‌های میکروسکوپی نیروی اتمی، تداخل سنجی و پروفایلمتری مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی براده برداری روی سه نمونه فولادی با شرایط تراشکاری یکسان و نرخ‌های پیشروی مختلف انجام شد (شکل (۱۷)).

شرایط تراشکاری	فولاد AISI 52100		
	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳
ابزار برش	الماس سرامیکی	الماس سرامیکی	الماس سرامیکی
عمق برش (میکرومتر)	50	50	50
سرعت چرخش (rpm)	2400	2400	2400
سرعت برش (متر / دقیقه)	340	340	340
نرخ پیشروی (میکرومتر / دور بر دقیقه)	6.2	12.5	18.7

شکل (۱۷): تنظیمات دستگاه تراشکاری برای سه نمونه فولاد [۱۹].

نرخ پیشروی و شعاع نوک ابزار تراش بیشترین تأثیر را روی زبری سطح دارند، رابطه این مولفه با عامل زبری متوسط ارتفاع نیمرخ عرضی (Ra) بصورت زیر تعریف می‌شود:

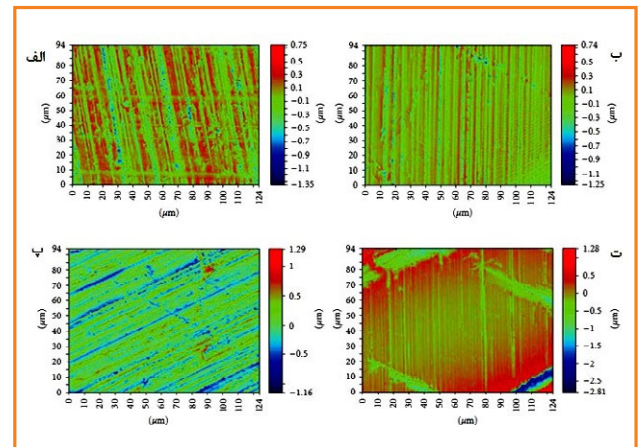
$$Ra = 0.0321 f^2 / r$$

که در آن:

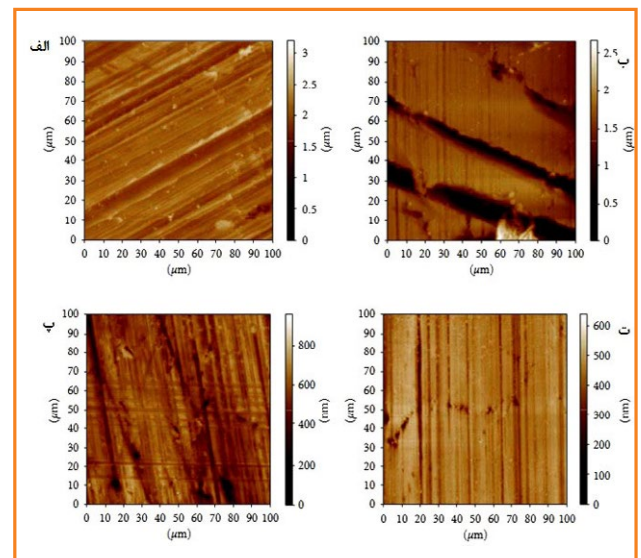
(f) نرخ پیشروی (میلی‌متر / دور بر دقیقه) و (r) شعاع نوک ابزار تراش (میلی‌متر) است.

سطوح فولادی نسبت به سایش، سختی و مقاومت زیادی دارند، با کاهش نرخ پیشروی، صافی سطح (کیفیت سطح) بهتر می‌شود، اما به زمان بیشتری برای تراشکاری نیاز دارد، همچنین افزایش مقدار نرخ پیشروی در تراشکاری قطعات سخت باعث شکستن ابزار یا کاهش شدید عمر آن می‌شود و

با الگوی زبری شکل گرفته در راستای طولی سطح، بیشتر ملموس بوده و باعث می‌شود سهم بیشتری در زبری کل داشته باشد و در نتیجه آن ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. لذا در این بررسی اجزای موتور شامل آستر سیلندر (بوش سیلندر<sup>۵۳</sup>) و حلقه فشرده‌سازی بالای پیستون<sup>۵۴</sup> در دو حالت قبل و بعد از استفاده، با روش‌های میکروسکوپی نیروی اتمی و تداخل سنجی نوری مورد بررسی قرار گرفتند. در نتایج حاصل با روش‌های تداخل سنجی (شکل (۱۵)) و میکروسکوپی نیروی اتمی (شکل (۱۶)) مشاهده شد که خراشیدگی‌ها و سایش‌ها در هر دو قطعه در جهت عرضی شکل گرفته است.



شکل (۱۵): تصاویر حاصل با روش تداخل سنجی در بررسی اجزای موتور، سیلندر قبل از استفاده و (ب): بعد از استفاده و (پ): پیستون قبل از استفاده و (ت): بعد از استفاده [۳].



شکل (۱۶): تصاویر حاصل با روش AFM در بررسی اجزای موتور، سیلندر قبل از استفاده و (ب): بعد از استفاده و (پ): پیستون قبل از استفاده و (ت): بعد از استفاده [۳].

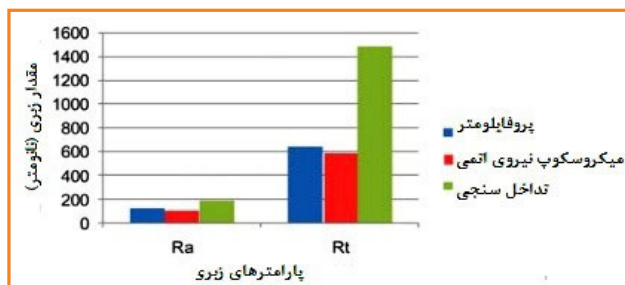
بررسی میزان سایش نمونه‌ها نشان می‌دهد که سطوح با زبری کم، کمترین سختی و بیشترین میزان سایش را داشته و با افزایش مقدار زبری بر مقدار سختی سطوح و مقاومت به سایش آنها افزوده می‌شود [۳].

می‌شود، این اثر نسبت به اثر هموارسازی مشاهده شده در روش تداخل‌سنجی بسیار ناچیز است.



شکل (۱۹): مقایسه روبش پروفایلمتری و تداخل‌سنجی در امتداد خط روبش سطح [۱۹].

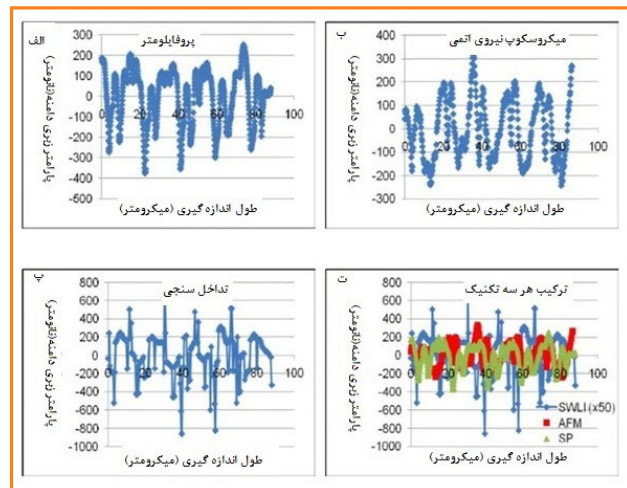
همان‌گونه که در این بررسی مشاهده شد، مقادیر زبری گزارش شده با روش تداخل‌سنجی به دلیل حساسیت بالای این روش به خواص فیزیکی سطح و اثرپذیری آن از مقدار طول موج منبع نور، دارای اختلاف قابل توجه بیشتری با دو روش دیگر است (شکل ۲۰). همچنین با توجه به محدودیت میزان حرکت روبشگر در روش میکروسکوپی نیروی اتمی، استفاده از این روش برای محدوده‌های میکرومتری و برای محدوده‌های بزرگ، استفاده از روش پروفایلمتری توصیه می‌شود [۱۹].



شکل (۲۰): مقایسه عوامل زبری برای سه روش میکروسکوپی نیروی اتمی، پروفایلمتری و تداخل‌سنجی [۱۹].

بر کیفیت سطح تاثیر زیادی می‌گذارد.

در بررسی‌های انجام شده روی هر سه نمونه، مشاهده شد که نتایج حاصل از دو روش میکروسکوپی نیروی اتمی و پروفایلمتری بسیار به هم نزدیک بوده، ولی نتایج گزارش شده در روش تداخل‌سنجی دارای پراکندگی بیشتری نسبت به دو روش دیگر است (شکل ۱۸).



شکل (۱۸): (الف): پروفایل‌های زبری روش‌های پروفایلمتری، (ب): میکروسکوپی نیروی اتمی، (پ): تداخل‌سنجی و (ت): ترکیب هر سه روش [۱۹].

در روش تداخل‌سنجی، هر پیکسل تصویر، میانگینی از ارتفاع‌های مشاهده شده در ناحیه اندازه‌گیری است و نتایج به شدت تحت اثر هموارسازی<sup>۵۸</sup> ناشی از این میانگین‌گیری‌ها هستند (شکل ۱۹)، در حالی که در دو روش دیگر، پیکسل‌های تصویر، حاصل روبش نقطه به نقطه از ارتفاع‌های سطح در امتداد خط روبش هستند و هیچ‌گونه میانگین‌گیری روی نتایج صورت نمی‌گیرد. البته در روش پروفایلمتری اثر ناخواسته ناشی از شعاع پروب، کمی روی نتایج واقعی اثرگذار است و باعث دقت کمتر در مقادیر زبری نسبت به روش میکروسکوپی نیروی اتمی می‌شود ولی همان‌گونه که در شکل (۱۹) هم مشاهده

## نتیجه‌گیری

از آنجا که استفاده از هر دستگاه اندازه‌گیری دارای مزایا و معایبی است و در بسیاری از موارد، مشخصات دستگاه اندازه‌گیری نیز ممکن است تأثیر زیادی بر داده‌ها و نتایج بگذارد، این امر به ویژه هنگام اندازه‌گیری سطوح بسیار صاف بسیار مشهود است. عموماً روش‌های نوری (میکروسکوپی هم‌کانون و تداخل‌سنجی) بسیار تأثیرپذیر از خواص فیزیکی سطح هستند. در بسیاری از موارد، نور ورودی به سطح نمونه، در داخل آن نفوذ زیادی می‌کند و تنوع نفوذ، بر مسیر طول نوری تأثیر می‌گذارد و نتایج آزمایش را تغییر می‌دهد. از طرف دیگر، ویژگی‌های ساختار سطحی نظیر شعاع کوچک انحناها، ریزترک‌ها یا ریزچاله‌ها، ممکن است دلایل دیگری برای این نوع ناهنجاری باشند. در روش‌های تماسی (پروفایلمتری و میکروسکوپی نیروی اتمی) نیز نوک پروب باید در تماس فیزیکی با سطح باشد که ممکن است سطح و یا نوک پروب را تغییر دهد و باعث آلودگی و خراشیدگی سطح نمونه شود. بعلاوه، به دلیل اثر متقابل مکانیکی، سرعت روبش این روش‌ها نسبت به روش‌های نوری به‌طور قابل ملاحظه‌ای کندتر است. مشکل دیگر این است که پروب ممکن است برای رسیدن به انتهای دره‌های عمیق بسیار نازک باشد و ممکن است نوک قله‌های تیز را نیز نتواند به‌طور مناسب اندازه بگیرد و دقت ابزار را محدود کند. لذا در نظر گرفتن عواملی نظیر نوع کاربرد، خواص فیزیکی سطح، مقیاس اندازه‌گیری و توان تفکیک تجهیز روی انتخاب ابزار مناسب بسیار اثرگذار است، حتی در مواردی توصیه می‌شود از همپوشانی برخی از روش‌ها در بررسی دقیق‌تر خواص و ویژگی‌های سطح استفاده شود.

۱. کارشناسی ارشد مهندسی پلیمر، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران
۲. دکتری شیمی تجزیه، کارشناس آزمایشگاه جامع تحقیقاتی، دانشگاه شهید بهشتی
۳. کارشناس ارشد فیزیک حالت جامد، پژوهشگاه مواد و انرژی
۴. دکتری شیمی تجزیه، پژوهشگاه صنعت نفت
۵. عضو کارگروه تخصصی میکروسکوپ پروبی روبشی شبکه آزمایشگاهی
6. Profilometer Stylus (PS)
7. Scanning Probe Microscope (SPM)
8. Interferometry
9. Laser scanning confocal microscopy(LSCM)
10. Surface roughness
11. Amplitude Parameters
12. Spacing Parameters
13. Hybrid
14. Functions parameters
15. Average height of Surface Profile
16. Root Mean Square Deviation of the surface
17. Maximum height of Surface Profile
18. Skewness of the Assessed Profile
19. Kurtosis of the Assessed Profile
20. The Fastest Decay Auto Correlation Length
21. Density of Summits of the Surface
22. Texture direction of the surface
23. Root mean square slope
24. Arithmetic Mean Summit Curvature
25. Relative material ratio
26. Roughness core profile
27. Core fluid retention index
28. Peak material volume
29. Valley void volume
30. Index valley void volume
31. Surface bearing index
32. Cantilever
33. tip
34. Contact Mode
35. Non-Contact Mode
36. Tapping Mode
37. Atomic-force microscopy (AFM)
38. pinhole aperture
39. dichromatic mirror
40. out-of-focus
41. hydrophobic surfaces
42. Hydrophobicity
43. Scanning Electron Microscope(SEM)
44. Inductive gauge
45. Induction
46. Transmission electron microscopy (TEM)
47. power spectral density (PSD)
48. Coherence
49. Beam splitter
50. aperture Numerical (NA)
51. phase-shifting interferometry(PSI)
52. scanning white light interferometry (WLI)
53. cylinder liner
54. piston
55. Turning
56. Steel
57. Feed Rate
58. smoothing

- [1] Surface roughness: A review of its measurement at micro-/nano-scale Article in Physical Sciences Reviews · January 2018
- [2] Non contact surface roughness measurement instrumentation, Claudio Campana, University of Hartford, Brian Derynioski, University of Hartford, Saeid Moslehpour, University of Hartford
- [3] Advanced Nanomeasuring Techniques for Surface Characterization, Salah H. R. Ali
- [4] Comparison of four methods of surface roughness assessment of corneal stromal bed after lamellar cutting, Clotilde jume, alina hamri, gregoryegaud, Cyril, mauclair, Stephanie reynaud, virginie dumas, Sandrine, Pereira, thibaud garcin, philippe gain and gilles thuret
- [5] Measuring surface roughness, three techniques, charola, elena, grissom, carol a, erder, evin, wachowiak, Melvin j and oursler, douglas.
- [6] Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques, Bharat Bhushan The Ohio State University
- [7] AC 2007-2557: Non contact surface roughness measurement instrumentation, Claudio Campana, University of Hartford, Brian Derynioski, University of Hartford, Saeid Moslehpour, University of Hartford
- [8] Quick guide surface roughness measurement Reference guide for laboratory and workshop, EN ISO 4287 and EN ISO 16610-2
- [9] Analysis of surface roughness using confocal microscopy, d.a.lange,h,m, Jennings,s,p,shah, nsf Center for Advanced Cement-Based Materials, Department of Civil Engineering, Northwestern University, Evanston, IL 60208, USA
- [10] Surface roughness determination using laser scanning confocal microscope zeiss lsm, Tomáš Bezák a, Martin Kusý b, Michal Eliáš a, Michal Kopček
- [11] Profile and area roughness determination of surfaces obtained by laser scanning confocal microscope, Tomas Bezak1, a, Martin Kusy2, b, Michal Elias1, c, Michal Kopcek1, d, Michal Kebisek1, e, Lukas Spendla
- [12] <https://www.britannica.com/technology/confocal-microscope>
- [13] Measurement of Wenzel roughness factor by laser scanning confocal microscopy, Ai Hongru, a Li Xiangqin, a Shi Shuyan, b Zhang Yinga and Liu Tianqing
- [14] Effect of the tracing speed and span on roughness parameters determined by stylus type equipment, M. Arvinth Davinci, N.L. Parthasarathi <sup>†</sup>, Utpal Borah, Shaju K. Albert
- [15] <https://www.gdandtbasics.com/what-is-a-profilometer/>
- [16] Study of Surface Roughness by Stylus Profilometer and Binary Laser Speckle B/D Counting Techniques, R.Balamurugan1, S.Muruganand
- [17] Comparison of Optical and Stylus Methods for Measurement of Surface Texture, T.V. Vorburger, H.-G. Rhee, T.B. Renegar, J.-F. Song, A. Zheng
- [18] Combining TEM, AFM, and Profilometry for Quantitative Topography Characterization Across All Scales Abhijeet Gujrati, Subarna R. Khanal, Lars Pastewka, Tevis D. B. Jacobs
- [19] Multi-scale analysis of high precision surfaces by Stylus Profiler, Scanning White-Light Interferometry and Atomic Force Microscopy, N. Jouini, A. Gautier, P. Revel\*, P-E. Mazeran and M. Biggerelle
- [20] Surface recovery algorithm in white light interferometry based on combined white light phase shifting and fast Fourier transform algorithms, Quangsang vo, fengzhou fang, xiaodong zhang and huimin gao
- [21] Guide to the Measurement of Smooth Surface Topography using Coherence Scanning Interferometry Richard Leach National Physical Laboratory Leigh Brown, Xiangqian Jiang University of Huddersfield Roy Blunt IQE Ltd Mike Conroy, Darian Mauger Taylor Hobson Ltd
- [22] Construction and Validation of a White Light Interferometer, Master's Thesis in Electrical Engineering, Karthick Sathiamoorthy & Tanjim Ahmed Supervisor.
- [23] White-light interferometer without mechanical scanning Pavel Pavliček\*, Erik Mikeska.

## Authors

Maryam Khosravi<sup>1,5\*</sup>  
Maryam Maghfourian<sup>2,5</sup>  
Sahar Tayebtahar<sup>3,5</sup>  
Sedigheh Sadegh hassani<sup>4,5</sup>

\*M2012.khosravi@gmail.com

1. M.Sc of Polymer Engineering, Iran Polymer and Petrochemical Institute
2. PhD of Analytical chemistry, Central Research laboratories, Shahid Beheshti University
3. M.Sc of solid state Physics, Material and Energy Research Center (MERC)
4. PhD of Analytical chemistry, Research Institute of petroleum Industry (RIPI)
5. SPM Experts Workgroup

## Comparison of atomic force microscopy with some common methods in measuring surface roughness Abstract

### Abstract

Today, the study of surface properties has become widely used in industry and research, so many technologies are used to observe and study surface properties in a wide range of measurements (from millimeters to nanometers). One of the most important items in the study of surface properties is surface roughness. Surface roughness is a one of property of the material surface texture that is identified by comparing of its topography with an ideal smooth surface. A rough surface contains roughness, peaks, and Valleys that are very close to each other. There are several methods for measuring surface roughness that can be divided into contact and non-contact techniques. In the contact method, which is the basis of profillometrs stylus and scanning probe microscopes, the surface roughness is measured by moving a probe along the surface. Interferometry techniques and confocal microscopes are also common examples of non-contact roughness measuring devices. Of course, the type of surface and its physical properties also have a significant impact on choosing the right tool. In this article, some of common methods in roughness measuring and their principles are investigated and these techniques compared with the atomic force microscopy method.

### Keywords

Roughness, Scanning probe Microscope, Atomic Force Microscope, Laser scanning confocal microscopy Confocal microscope, Profilometer, Interferometry.

# دانش آزمایشگاهی ایران

سال نهم ■ شماره ۴ ■ زمستان ۱۴۰۰ ■ شماره پیاپی ۳۶

ISSN 2538-3450



استانداردها، آزمون‌های ارزیابی کیفیت انواع ماسک مورد استفاده در شیوع ویروس کرونا و ...



بیماری‌های شایع میگوهای پرورشی و روش‌های تشخیص آزمایشگاهی



مطالعات ژنتیک در کاوش‌های باستانی (ژئوآرکئولوژی)



ارزیابی منابع عدم قطعیت در تعیین دمای نرمی ویکات پلاستیک‌های گرم‌انرم



پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ‌های آهکی با استفاده از شبکه عصبی و سیستم انطباقی منطق فازی

## مقایسه میکروسکوپ نیروی اتمی با برخی از روش‌های رایج در اندازه‌گیری زبری سطح

باشگاه مشتریان شبکه آزمایشگاهی و تسهیل توسعه پژوهش در کشور

باشگاه مشتریان شبکه آزمایشگاهی و تسهیل توسعه پژوهش در کشور