NAISL
Quarterly, 2017
Volume 1, Number 2
Pages 29 – 35
Print ISSN: 2588-6401
Online ISSN: 2588-641X

Atomic Force Microscope (AFM): The Basis of Work, Mechanism and Performance

Vahid Madadi Avargani[1*], Alireza Nikzad[2], and Roghaieh Parvizi[3]

Abstract

Atomic Force Microscopes (AFM) is known as one of the most important Nano-scale detection devices. The microscope provides the properties of the analyzed samples indirectly using a ideally sharp needle that locates at its tip at the tip of the atom and also, has been played a significant role in advancing the research of various sciences, including nanotechnology, electronics, energy, astronauts, and so on. The forces between the needle tip and the specimen can be included of different types of wind forces, electrostatic, friction, electrical, magnetic, adhesion, capillary, and atomic forces. Depending on the presence of these forces and the needle distance to the surface of the sample, the conditions of the examination are divided into three types of contact, non-contact, and tapping modes. Since there are no restrictions on the physical properties of the material for this device, it can be used to study a variety of conductive, non-conductive and semiconducting materials. The surface image is obtained with the cantilever movement and the deviation of the reflection of the laser beam. By the making small variations in voltage, piezoelectric transitions in the x, y, and z directions have been mechanically modified and can transfer the location of the pointer to different points of the sample. The atomic force microscopy images in the central laboratory of Yasouj University have been shown in various states. The quality of the images and their very high resolution are comparable to the other images, and it shows a more favorable analysis and high resolution of the imaging of this device than other existing devices.

Key Words

Atomic Force Microscopes, Tip, Cantilever, Image quality, Imaging modes

(*) Corresponding author.
1. Assistant professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran, E- mail: v.madadi@yu.ac.ir, Tel: 09133047257
2. Department of Physics, College of Sciences, Yasouj University, Yasouj 75914-353, Iran, E- mail: ar.nikzad@yu.ac.ir, Tel: 09120203751
3. Department of Physics, College of Sciences, Yasouj University, Yasouj 75914-353, Iran, E- mail: parvizi.r@yu.ac.ir, Tel: 09171439670

فصلنامه علمی
سال اول، شماره ۲
صفحات ۲۹ – ۳۵، ۱۳۹۶
شاپای چاپی: ۲۵۸۸-۶۴۰۱
شاپای الکترونیکی: ۲۵۸۸-۶۴۱X

میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM): اساس کار، مکانیسم و عملکرد

وحید مددی اورگانی[۱*]، علیرضا نیکزاد[۲] و رقیه پرویزی[۳]

چکیده

میکروسکوپ‌های نیروی اتمی (AFM) به عنوان یکی از اصلی‌ترین تجهیزات شناسایی در مقیاس نانو شناخته شده است. این میکروسکوپ، با استفاده از سوزنی بسیار تیز که در حالت ایده آل در نوک آن تنها یک اتم جای می‌گیرد، خواصی از نمونه‌های مورد آنالیز را به صورت غیر مستقیم، ارائه می‌دهد و نقش به سزایی را در پیشرفت تحقیقات علوم مختلف از جمله نانوفناوری، الکترونیک، انرژی، فضانوردی و غیره ایفا کرده است. نیروهای میان نوک سوزن و نمونه مورد بررسی می‌توانند از انواع نیروهای واندروالسی، الکترواستاتیکی، اصطکاکی، الکتریکی، مغناطیسی، چسبندگی، موئینگی و نیروهای اتمی باشد که بسته به وجود این نیروها و فاصله سوزن تا سطح نمونه حالت‌های بررسی به سه صورت تماسی، غیر تماسی و ضربه‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند. از آنجایی که هیچ گونه محدودیتی از لحاظ خواص فیزیکی مواد برای این دستگاه وجود ندارد، می‌توان از آن جهت مطالعه انواع مواد رسانا، نارسانا و نیمه رسانا استفاده کرد. از روی جابجایی تیرک و انحراف انعکاس پرتو لیزر، تصویر سطح تهیه می‌شود. با ایجاد تغییرات کوچکی در ولتاژ، پیزوالکتریک در راستاهای x، y و z دارای تغییرات مکانیکی شده و می‌توان محل تیرک را به جاهای مختلف نمونه انتقال داد. تصاویری از میکروسکوپی نیروی اتمی موجود در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه یاسوج در حالت‌های مختلف نشان داده شده است. کیفیت تصاویر و میزان تفکیک‌پذیری بسیار بالای آن‌ها قابل مقایسه با سایر تصاویر می‌باشد و نشان از آنالیز مطلوب‌تر و دقت بالای تصویربرداری این دستگاه نسبت به دیگر دستگاه‌های موجود است.

وحید مددی اورگانی

علیرضا نیکزاد

رقیه پرویزی

واژگان کلیدی

میکروسکوپ نیروی اتمی،
سوزن،
تیرک،
کیفیت تصویر،
حالت‌های تصویربرداری

(*) مسئول مکاتبات.
۱. دانشگاه یاسوج، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی، ایمیل: v.madadi@yu.ac.ir، تلفن: ۰۹۱۳۳۰۴۷۲۵۷
۲. دانشگاه یاسوج، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، کارشناس دستگاه AFM آزمایشگاه مرکزی دانشگاه یاسوج، ایمیل: ar.nikzad@yu.ac.ir، تلفن: ۰۹۱۲۰۲۰۳۷۵۱
۳. دانشگاه یاسوج، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، ایمیل: parvizi.r@yu.ac.ir، تلفن: ۰۹۱۷۱۴۳۹۶۷۰

۱ مقدمه

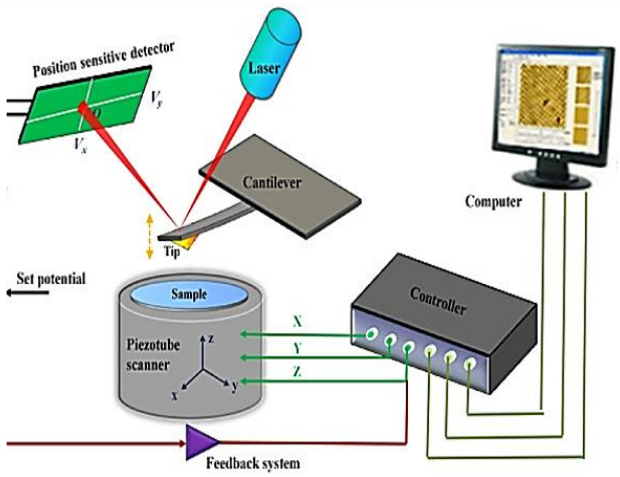
از ابتدای ساخت میکروسکوپ‌های پروبی روبشی[1] در سال ۱۹۸۱ میلادی توسط گرد بینیگ و هاینریش روهرر به عنوان ابزاری قدرتمند جهت تهیه تصاویر با مقیاس اتمی از سطح نمونه‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفتند. امروزه با پیشرفت روز افزون علم و تکنولوژی در ساخت این نوع میکروسکوپ‌ها، امکان شناسایی خواص فیزیکی و شیمیایی سطوح در مقیاس اتمی برای محققین فراهم شده است. کاربری ساده‌تر نسبت به سایر روش‌های آنالیز، امکان آماده‌سازی آسان‌تر، کار در محیط‌های مایع، خلاء و هوا و هم‌چنین کاهش هزینه‌ها منجر به وجه تمایز میان این میکروسکوپ‌ها با سایر روش‌های میکروسکوپی شده است [۱، ۲، ۸].

میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) نیز از خانواده میکروسکوپ‌های پروبی روبشی بوده که در سال ۱۹۸۶ میلادی توسط کوئیت، بینیگ و گربر در شرکت NEC ساخته شد و منحصراً جهت مطالعه خواص مکانیکی سطوح اختراع شد. با تصویربرداری توسط این میکروسکوپ می‌توان تصاویری دو بعدی و سه بعدی دقیق و با توان تفکیک بسیار بالا از سطح نمونه‌ها تهیه کرد که این امر برای محققین در حوزه‌های مختلف علوم و فناوری بسیار مفید و راهگشا می‌باشد. در این میکروسکوپ، سطح نمونه به وسیله یک سوزن نوک تیز (تیپ یا پروب) روبش شده و خواص سطحی از جمله پستی و بلندی‌ها، چسبندگی، میزان اصطکاک، اندازه‌گیری نیروهای جانبی و خواص مغناطیسی محاسبه می‌شود [۸].

سوزن به تیرک وصل می‌شود و ترکیب سوزن و تیرک معمولاً از جنس سیلیسیم یا سیلیسیم نیترید بوده و در عین حال دارای مقاومت بالایی در برابر فرسایش می‌باشد. این روش در مقایسه با روش‌های مشابه مطالعه‌ی توپوگرافی مانند میکروسکوپ تونلی روبشی ، استفاده از نیروها برای تصویرسازی امکان مطالعه انواع سطوح فلز، نیمه‌رسانا و عایق را فراهم می‌آورد [۲].

۲ اساس کار میکروسکوپ نیروی اتمی

به طور کلی اساس کار میکروسکوپ نیروی اتمی در تشکیل تصاویر بر اساس نیروی میان سوزن و سطح نمونه مورد بررسی می‌باشد. این دستگاه دارای یک تیرک می‌باشد که به یک سر این تیرک سوزنی بسیار تیز با ابعاد نانو متری قرار داده شده است و سر دیگر تیرک به بازویی از جنس پیزوالکتریک متصل می‌شود. لازم به ذکر است که جنس تیرک باید به گونه ای باشد که دارای خاصیت ارتجاعی بالایی بوده تا در اثر تحریک الکتریکی از خود حرکت مکانیکی نشان بدهد. پرتو لیزری به پشت تیرک تنظیم و تابانده می‌شود و از این طریق با انحراف تیرک از حالت اولیه خود، پرتو لیزر از مسیر اولیه خود منحرف می‌شود. بنابراین لازم است به منظور انعکاس بیشتر و دقیق‌تر پرتو لیزر، پشت تیرک با یک لایه‌ای بسیار نازک از فلزاتی همچون طلا، آلومینیوم و یا نقره پوشش داده شوند. با ایجاد تغییرات ولتاژ بسیار کوچک به پیزوالکتریک در راستاهای x، y و z می‌توان محل تیرک را با دقت بسیار بالا (در حد آنگستروم) به جاهای مختلف نمونه انتقال داد. با روبش شدن سطح نمونه توسط سوزن و از آنجایی که سطح دارای ناهمواری‌هایی نیز می‌باشد، از طرف سطح مورد بررسی به سوزن نیرو وارد شده و آشکار ساز با در نظر گرفتن این انحرافات (انحرافات پرتو لیزر نیز در نظر گرفته می‌شود) به رایانه این امکان را می‌دهد تا طرحی از سطح نمونه را تهیه بکند [۴]. شکل ۱ نمایی از روند تصویربرداری و مکانیسم کاری میکروسکوپ نیروی اتمی را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمایی از اجزاء میکروسکوپ نیروی اتمی. بخش‌های مختلف اجزاء این میکروسکوپ نشان داده شده است [۹].

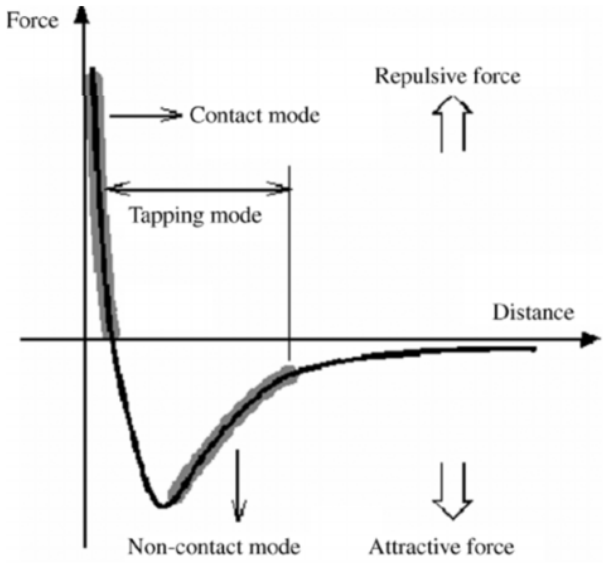
[1] Scanning Probe Microscopy (SPM)

۳ انواع حالت‌های تصویربرداری در میکروسکوپ نیروی اتمی

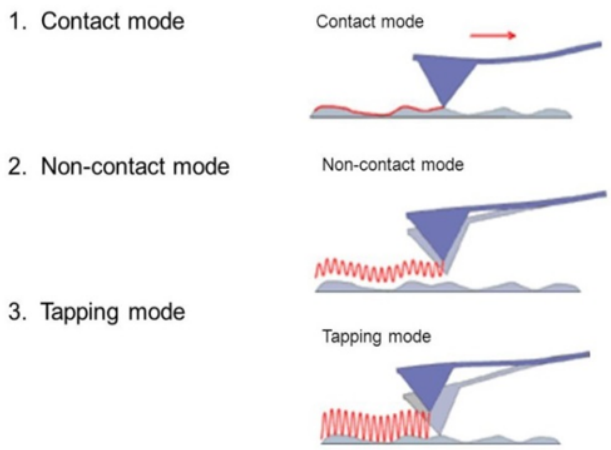
در میکروسکوپ نیروی اتمی، با نیروهایی که میان سطح نمونه مورد بررسی و سوزن در حین روبش وجود دارند، حالت‌های تصویربرداری تعیین شده و تصاویر تهیه می‌شوند. نیروهایی که با نزدیک شدن سوزن به سطح نمونه میان سطح نمونه و سوزن ایجاد می‌شوند شامل چندین نیرو می‌باشند که خود این نیروها به دو دسته نیروهای دور برد و کوتاه برد تقسیم‌بندی می‌شوند. از جمله نیروهای دور برد می‌توان به نیروهای واندروالسی، الکترواستاتیکی و مغناطیسی اشاره کرد و از جمله نیروهای کوتاه برد می‌توان از نیروهای چسبندگی، کوانتومی، کووالانسی و کشسانی نام برد. معمول‌ترین و مهم‌ترین نیروی مورد استفاده در تصویربرداری میکروسکوپ نیروی اتمی، نیروی واندروالسی بوده و در تمامی مواد (حتی مواد خنثی) با نسبت r^{-6} ظاهر می‌شود [۶].

حالت‌های تصویربرداری مختلف در میکروسکوپ نیروی اتمی به برهمکنش‌هایی که در حالت‌های مختلف ظاهر می‌شود بستگی دارد. اگر معیار سنجش ناحیه‌ی عملکرد سوزن باشد، حالت‌های تصویربرداری به سه حالت تماسی[۱] (تقریباً نزدیک‌تر از ۵ آنگستروم)، ضربه زنی[۲] (تقریباً بین ۵ تا ۳۰ آنگستروم) و غیر تماسی[۳] (تقریباً بین ۳۰ تا ۱۵۰ آنگستروم) تقسیم‌بندی می‌شوند. هنگامی که دو اتم از یک فاصله معین نسبت به هم نزدیک‌تر می‌شوند، به دلیل فرو رفتن ابر الکترونی آن‌ها نیروی میانی از نوع دافعه بوده و در صورتی که از هم فاصله گرفته و در مجاورت هم قرار بگیرند، نیروی میان آن‌ها از نوع جاذبه خواهد بود [۹، ۶]. در شکل ۲ وابستگی نیروی واندروالسی و میزان فاصله میان نمونه مورد بررسی و سوزن نشان داده شده است که حالت‌های مختلف تصویربرداری در میکروسکوپ نیروی اتمی نیز با پارامترهای مذکور مشخص شده است.

هم‌چنین در شکل ۳ نمایی از روبش سطح نمونه مورد بررسی در حالت‌های مختلف تصویربرداری تماسی، غیر تماسی و ضربه‌ای در میکروسکوپ نیروی اتمی نشان داده شده است.



شکل ۲: وابستگی نیروی واندروالسی و میزان فاصله میان نمونه مورد بررسی و سوزن در میکروسکوپ نیروی اتمی [۳].



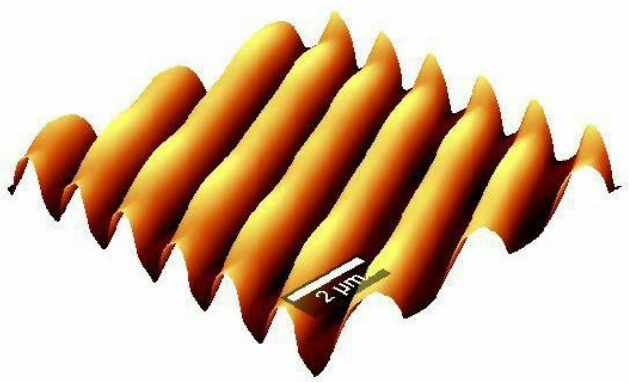
شکل ۳: وابستگی نیروی واندروالسی و میزان فاصله میان نمونه مورد بررسی و سوزن در میکروسکوپ نیروی اتمی [۳].

در حالت تماسی که سوزن به طور مستقیم بر روی سطح نمونه مورد بررسی فرود می‌آید، و آن را لمس می‌کند، نیروی میانی از نوع دافعه بوده و سوزن توانایی عبور از لایه‌ی سیال ایجاد شده بر روی نمونه را خواهد داشت. نهایتاً تصویری دقیق از سطح نمونه مورد بررسی ارائه می‌شود. توانایی آنالیز و ارائه تصویر برای نمونه‌های حساس و

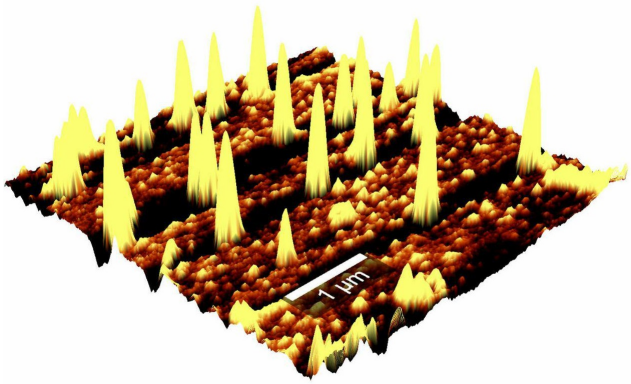
[۱] Contact
[۲] Tapping Mode
[۳] Non- contact

نرم پایین بوده و تفکیک‌پذیری به دلیل میزان بالای نیروی اصطکاک کاهش می‌یابد [۱۰]. کار در محیط‌های مایع و هوا، سرعت روبش بالا، دسترسی به توان تفکیک در مقیاس اتمی و اندازه‌گیری میزان اصطکاک‌های موضعی از مزایای حالت تماسی می‌باشند [۱۱]. در حالت غیر تماسی که سوزن با فاصله از سطح نمونه مورد بررسی قرار دارد و نیروهای جاذبه بر سیستم حاکم هستند، نوسان تیرک در حدود ۳۵۰ هزار سیکل بر ثانیه در نزدیکی سطح می‌باشد. در این حالت از تصویربرداری، سوزن به سطح نمونه مورد بررسی برخورد نمی‌کند و با فاصله معینی سطح نمونه را مورد آنالیز و روبش قرار می‌دهد. از این‌رو لایه سیال جذب شده توانایی مخفی نمودن بخشی از تصویر را خواهد داشت. کیفیت تصویر و عدم آسیب به سوزن و سطح نمونه مورد بررسی می‌تواند از دلایل مهمی بر مطلوب بودن این حالت از تصویربرداری در میکروسکوپ نیروی اتمی باشد. حالت ضربه‌ای در میکروسکوپ نیروی اتمی حالتی میانی در بین دو حالت تماسی و غیر تماسی می‌باشد. در این حالت با تشدید تیرک در فرکانس تشدیدش، ضربه‌های آرامی به سطح نمونه مورد بررسی وارد شده و منجر به تصاویری با توان تفکیک بالا برای نمونه‌های نرم می‌شود. همچنین سطح نمونه‌ها در این روش ایمن‌تر بوده و گستره‌ی وسیع‌تری نسبت به حالت غیر تماسی و با کیفیت بهتر قابل بررسی است [۵].

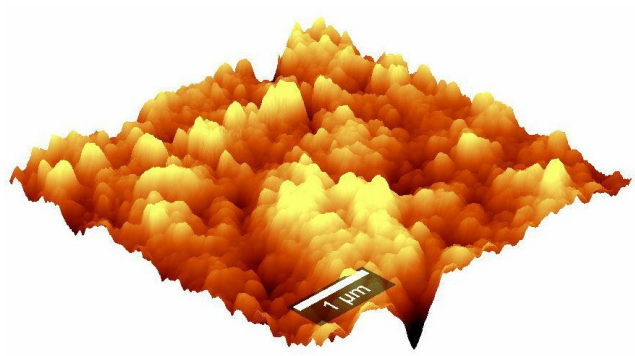
شکل‌های بعدی تعدادی از تصاویر میکروسکوپی نیروی اتمی دستگاه AFM (مدل Alpha 300A WITec Germany) موجود در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه یاسوج در حالت‌های مختلف را نشان داده است. کیفیت و میزان تفکیک‌پذیری بسیار بالای این تصاویر قابل مقایسه با سایر تصاویر میکروسکوپی نیروی اتمی بوده و گویای عملکرد بهتر، آنالیز مطلوب‌تر و دقت بالای تصویربرداری این دستگاه نسبت به دیگر دستگاه‌های موجود می‌باشد. تصویر الف) ساختار سه بعدی بخشی از حافظه یک CD را نشان می‌دهد که نشان از ساختار توپوگرافی منظم و دقیق این سطح می‌باشد. برای نمایان ساختن ارتفاع از رنگ استفاده می‌شود. هر چه رنگ به سمت روشن‌تر شدن پیش رود، ارتفاع سطح و یا احیاناً ذرات بیشتر خواهد بود. تصویر ب) تصویری سه بعدی از نانو ذرات اکسید روی بر لایه سیلیسیم را نشان می‌دهد. با آماده‌سازی نمونه‌های پودری در شرایط خاص و انجام آنالیز AFM می‌توان مورفولوژی ذرات و اندازه‌ی ارتفاع ذرات نانومتری را در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی با دقت و میزان تفکیک‌پذیری بالایی اندازه‌گیری کرد. تصویر نمونه حالت ج) ساختار سه بعدی از غشای متخلخل به وسیله جذب PAA را نشان داده است. سطح این غشا بسته به کاربرد نهایی نمونه با روش شیمیایی دارای تخلخل‌های بسیار ریزی شده است که همانطور که از تصویر گویاست به وسیله آنالیز AFM و حالت تماسی دستگاه میزان زبری و فرورفتگی سطح به خوبی و با دقت و کیفیت بالایی به تصویر کشیده شده است. تصویر نمونه د) نمونه فولادی با پوشش ذرات نیترید آهن را نشان داده است. نانو ذرات نیترید آهن با تراکم بالایی به خوبی بر روی سطح پوشش داده شده اند به طوری که این نانو ذرات به صورت چند لایه‌ای روی سطح قرارگرفته‌اند و تقریباً سطحی یک دست از نانو ذرات ایجاد شده است. در تصویر نمونه هـ) نیز تصویر سه بعدی از لایه لاکتوز با سطحی ناهموار نشان داده شده است. لایه‌ی لاکتوز روی سطح با پوشش‌هایی در اندازه‌های حداقل $۲\mu m$ پوشش داده شده است و اختلاف میان حداکثر و حداقل ارتفاع پوشش پشمگیر بوده است. لازم به ذکر است که انجام آنالیز برای نمونه‌های مختلف، بسته به نوع نمونه و شرایط حاکم بر آن، در حالت‌های مختلف تماسی، غیر تماسی و ضربه‌ای انجام می‌شود. انجام آنالیز توسط این دستگاه می‌تواند به محققینی که در زمینه‌های رشد بلور در هر دو مقیاس میکرو و نانو فعالیت می‌کنند، کمک کند. زیرا در این صورت هم می‌توان تصاویر با توان تفکیک بسیار بالایی در حالت دو بعدی را بدست آورد و هم قادر به اندازه‌گیری ارتفاع سطوح یا ذرات تهیه شده می‌باشد.



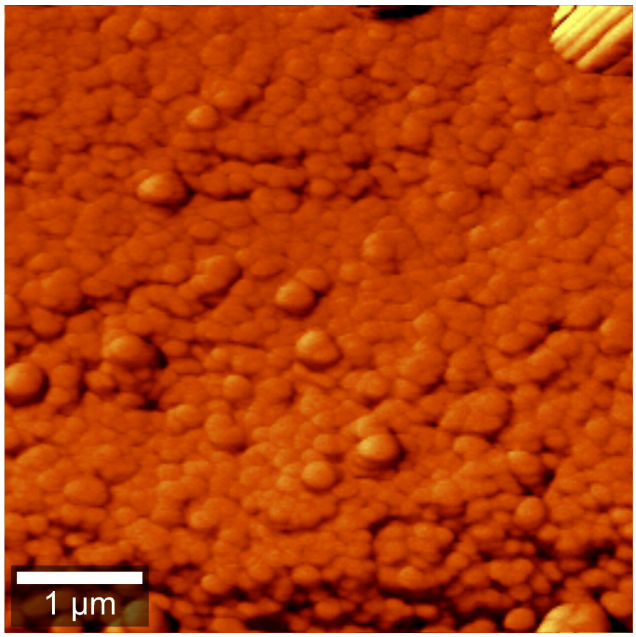
الف



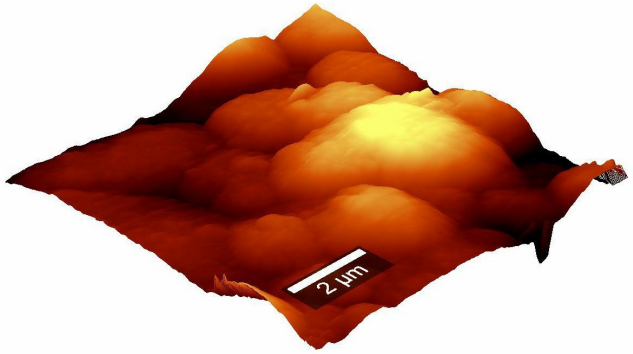
ب



ج



د



هـ

۴ نتیجه‌گیری

استفاده از میکروسکوپ‌های پروبی روبشی و بالاخص میکروسکوپ نیروی اتمی را می‌توان از جمله دستگاه‌هایی دانست که نقش تعیین‌کننده‌ای برای پژوهش در حوزه‌های مختلف فناوری ایفا می‌کند. این میکروسکوپ دارای کاربرد گسترده‌ای در زمینه تعیین توپوگرافی سطوح، بررسی جزئیات در مقیاس نانومتر، کاربری آسان، مطالعه نیروهای سطحی، امکان بررسی نمونه‌های مختلف هادی، نیمه‌هادی، سخت، نرم و بیولوژیکی است. در این دستگاه، از اثر متقابل بین نوک سوزن میکروسکوپ و نمونه، برای بررسی خواص سطحی استفاده کرده و در سه مد تماسی، غیر تماسی و ضربه‌ای قادر به تصویربرداری می‌باشد. نیروی بین نوک سوزن و نمونه می‌تواند از انواع نیروهای واندروالسی، الکترواستاتیکی، اصطکاکی، الکتریکی، مغناطیسی، چسبندگی، موئینگی و نیروهای اتمی باشد.

مراجع

[1] B. Gerd, C. Quate, and C. Gerber, Atomic force microscope, Physical review letters, 56, 9, (1986), 930-938.

[2] D. Guo, X. Guoxin, and L. Jianbin, Mechanical properties of nanoparticles: basics and applications, Journal of physics D: applied physics, 47, 1, (2013), 013001.

[3] E.santner and B. Stegemann, Federal Institute for Materials research and Testing (BAM), Germany.

[4] F. Giessibl, Advances in atomic force microscopy, Reviews of modern physics, 75, 3, (2003), 949- 968.

[5] F. Leite and P. Herrmann, Application of atomic force spectroscopy (AFS) to studies of adhesion phenomena: a review, Journal of adhesion science and technology, 19, 3-5, (2005), 365-405.

[6] G. Binnig, C. Gerber, E. Stoll, T. Albrecht, and C. Quate, Atomic resolution with atomic force microscope, EPL (Europhysics Letters), 3, 12, (1987), 1281.

[7] J. Bastidas, J. Pawlak, R. Venditti, J. Heitmann, M. Hubbe, and J. Kadla, A colloidal probe microscopy study of cellulose/gypsum interactions. Materials Characterization, 59, 2, (2008), 144-150.

[8] N. Burnham, X. Chen, C. Hodges, G. Matei, E. Thoreson, C. Roberts, M. Davies, and S. Tendler, Comparison of calibration methods for atomic-force microscopy cantilevers, Nanotechnology, 14, 1, (2002), 1-16.

[9] M. Tanaka, M. Komagata, M. Tsukada, and H. Kamiya, Evaluation of the particle–particle interactions in a toner by colloid probe AFM, Powder Technology,183, 2, (2008), 273-281.

[10] N. Jalili and L. Karthik, A review of atomic force microscopy imaging systems: application to molecular metrology and biological sciences, Mechatronics, 14, 8, (2004), 907-945.

[11] Y. Sugimoto, P. Pou, M. Abe, P. Jelinek, R. Pérez, S. Morita, and Ó. Custance, Chemical identification of individual surface atoms by atomic force microscopy, Nature, 446, 7131, (2007), 64.