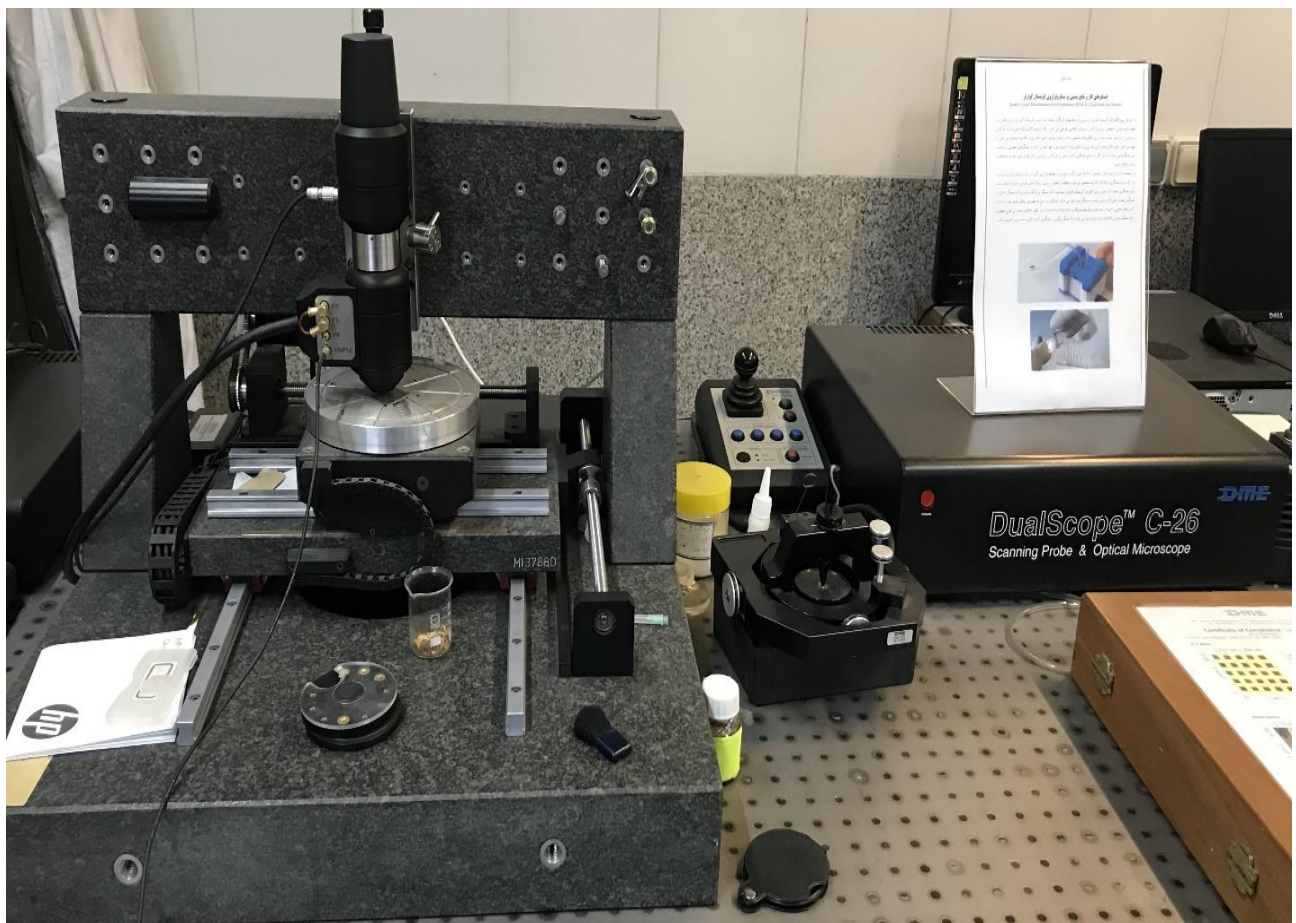


# AFM

## میکروسکوپ نیروی اتمی



هدف از این چکیده گردآوری شده، ارائه یک نمای کلی از ابزار دقیق و کاربردهای اصلی است.

تنظیم کننده: فرزانه خجسته

## فهرست

۱. پیشگفتار..... ۴
- ۱-۱. تفاوت SEM و AFM..... ۶
- ۲-۱. مزایا و معایب میکروسکوپ نیروی اتمی ..... ۶
۲. تاریخچه..... ۷
۳. دامنه کاربرد میکروسکوپ نیروی اتمی..... ۷
۴. سیستم دستگاهی میکروسکوپ روبشی نیروی اتمی..... ۸
- ۱-۴. روبشگر..... ۱۰
- ۲-۴. کانتی لیور..... ۱۱
- ۳-۴. مدار کنترل..... ۱۲
۵. انواع نیروهای موجود در عملیات روبش..... ۱۳
- ۱-۵. نیروی اعمالی توسط کانتلیور..... ۱۳
- ۲-۵. نیروی موئینگی..... ۱۳
۶. مدهای کاری میکروسکوپ روبشی نیروی اتمی..... ۱۴
- ۱-۶. مدهای عملکردی..... ۱۴

- ۱۵.....۱-۱-۶. مد استاتیکی یا تماسی.....
- ۱۶.....۱-۱-۱-۶. مد ارتفاع ثابت.....
- ۱۶.....۲-۱-۱-۶. مد نیروی ثابت.....
- ۱۶.....۲-۱-۶. مد دینامیکی.....
- ۱۷.....۱-۲-۱-۶. مد غیر تماسی.....
- ۱۷.....۳-۱-۶. مد تماس متناوب یا ضربه‌ای.....
- ۱۹.....۷. مزایا و معایب مدهای استاتیکی و دینامیکی.....
- ۲۰.....۱-۷. ویژگیهای مد تماسی.....
- ۲۱.....۸. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری حالات کاری میکروسکوپ روبشی نیروی اتمی.....
- ۲۳.....۱-۸. مزایا و معایب میکروسکوپ نیروی اتمی.....
۹. حوزه کاربردی و شرایط نمونه برای استفاده از دستگاه AFM در مرکز علوم و فناوری نانو پژوهشکده جامع علوم و فناوری های همگرا دانشگاه صنعتی شریف.....۲۵
۱۰. مراجع و منابع.....۲۶

## ۱. پیشگفتار

برای مشاهده‌ی اجسام و نمونه‌های با ابعاد بسیار ریز در حد مولکول‌های کوچک و اتم‌ها، نمی‌توان از میکروسکوپ‌های معمولی استفاده کرد؛ چرا که این نمونه‌ها ابعاد نانویی دارند و میکروسکوپ‌های معمولی که با نور مرئی کار می‌کنند، قادر به نشان دادن ابعاد نانویی نیستند. بنابراین برای دیدن نمونه‌های نانویی، باید از ابزارهای دقیق‌تر و پیشرفته‌تر جهت شناسایی و آنالیز مواد استفاده شود. با استفاده از روش‌های میکروسکوپی، تصاویر با بزرگنمایی بالا از ماده به دست می‌آید تا بتوان جزئیات آن را با دقت مطالعه نمود. قدرت تفکیک تصاویر میکروسکوپی با توجه به نوع پرتو مورد استفاده مشخص می‌شود. به‌عنوان مثال، با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری، قدرت تفکیکی در حدود ۱ میکرومتر و در بهترین حالت ۲۰۰ نانومتر به دست می‌آید. درحالی‌که با استفاده از میکروسکوپ‌های الکترونی عبوری (TEM)، میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی (SEM)، میکروسکوپ پروبی روبشی (SPM) و میکروسکوپ میدان یونی (FIM) با درجه وضوح اتمی بالا در حدود یک نانومتر تا چند انگستروم قابل دسترسی است. چندین نوع مدل میکروسکوپ پویشگر مانند میکروسکوپ پراب پویشی (که شامل AFM، میکروسکوپ تونلی پویشی STM، و میکروسکوپ نوری روبش میدان نزدیک SNOM/NSOM، میکروسکوپ STED، و میکروسکوپ الکترون پویشی، و الکتروشیمیایی AFM می‌شود) داریم. گرچه SNOM و STED از نور قابل رویت، فرسرخ و یا حتی تراهرتز برای روشن کردن نمونه استفاده می‌کنند، وضوح آن‌ها محدود به حد انکسار نور نیست. در گروه میکروسکوپ پروبی روبشی، میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) یکی از پرکاربردترین ابزار برای بررسی نانومواد است و ابزاری برای مشاهده‌ی نمونه‌ها با ابعاد نانومتری و بررسی توپوگرافی سطح آنها می‌باشد [۱]. میکروسکوپ نیروی اتمی یا میکروسکوپ نیروی پویشی یک مدل از میکروسکوپ پراب پویشی با وضوح تصویر خیلی بالا است، با وضوح تصویر نشان داده شده در حد کسری از نانومتر، ۱۰۰۰ برابر بهتر از پردازش نوری حدی است. اطلاعات با "احساس" کردن یا "لمس" سطح با

یک پراب مکانیکی جمع‌آوری می‌شود. عناصر پیزوالکتریک که حرکات کوچک ولی دقیق و صریح را با فرمان (الکترونیکی) تسهیل می‌کنند، اسکن دقیق را امکان پذیر می‌سازند .

در میکروسکوپ‌های نیروی اتمی از نیروهای ضعیف نظیر نیروهای واندروالس و موینگی بین نوک پروب و سطح نمونه برای تشکیل تصویر توپوگرافی از سطح نمونه استفاده می‌شود. از این رو هیچ محدودیتی برای بررسی سطح نمونه برخلاف میکروسکوپ‌های تونلی روبشی وجود ندارد. این میکروسکوپ قادر به تصویربرداری با تفکیک مکانی اتمی از نمونه‌های رسانا، نارسانا و حتی نمونه‌های بیولوژیکی می‌باشد. از میکروسکوپ AFM علاوه بر مشخصه یابی، می‌توان در زمینه تولید مواد نانو ساختار نیز استفاده کرد. همچنین این دستگاه قابلیت ایجاد تغییر و جابه جایی ذرات و سطوح را دارا می‌باشد. این دستگاه با برخورداری از مزایای تهیه تصویر با قدرت تفکیک بالا، عملکرد ساده، عدم نیاز به آماده سازی پیچیده نمونه (مانند روش های آماده سازی نمونه در میکروسکوپ الکترونی)، تهیه تصاویر سه بعدی و امکان بررسی توپوگرافی سطح به صورت ابزاری قابل قبول در حوزه های مختلف علوم و فناوری نانو درآمده و کاربردهای بسیار گسترده ای یافته است. این دستگاه بسته به مدل آن، قابلیت انجام آزمایش در شرایط خلاء محیط و مایع را داراست.

AFM بر طیف وسیعی از رشته‌های علوم طبیعی شامل فیزیک جامدات، علم و تکنولوژی شبه رساناها، مهندسی مولکولی، شیمی و فیزیک پلیمر، بیولوژی مولکولی، بیولوژی سلولی و دارو اعمال شده است [۵]. استفاده‌ها در رشته فیزیک جامدات شامل (الف) شناسایی اتم‌ها در سطح، (ب) ارزیابی تعاملات بین یک اتم خاص و اتم‌های همسایه آن و (ج) مطالعه تغییرات در ویژگی‌های فیزیکی برخواسته از تغییرات در چیدمان اتمی توسط دستکاری اتمی، می‌شوند. در بیولوژی مولکولی، AFM می‌تواند برای مطالعه ساختار و ویژگی‌های مکانیکی یا اجتماع پروتئین‌ها استفاده شود. برای مثال، از میکروسکوپ نیروی اتمی برای تصویربرداری از ریزلوله‌ها و اندازه‌گیری سختی آن‌ها استفاده می‌شود. در بیولوژی سلولی، از AFM می‌توان برای تشخیص دادن سلول سرطانی از غیرسرطانی بر اساس سختی سلول‌ها و همچنین برای ارزیابی تعاملات بین یک سلول

خاص و سلول‌های همسایه در یک سیستم رقابتی یا شکل غشاء سلول استفاده نمود. امروزه دستگاه‌های تجاری متفاوتی با مبانی مشابه و حالات کاری مختلف عرضه شده‌اند که از نظر دقت و کیفیت تصاویر با یکدیگر تفاوت دارند. در این مقوله ضمن معرفی میکروسکوپ نیروی اتمی و نحوه عملکرد آن، مدهای کاری مختلف و مزایا و معایب هر کدام مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۱-۱. تفاوت SEM و AFM

تفاوت اصلی بین میکروسکوپ نیروی اتمی و تکنولوژی‌های رقیب مانند میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی در این است که AFM از لنز و یا اشعه استفاده نمی‌کند. در نتیجه، از محدودیت وضوح فاصلهای مربوط به انحراف و انکسار و فراهم‌سازی فضا برای هدایت اشعه (با درست کردن مکش) رنج نمی‌برد، و همینطور لکه‌دار کردن نمونه‌ها لازم نیست. جالب است بدانیم، در حالی که فرآیند‌های آماده‌سازی و روبش نمونه در SEM می‌تواند سبب تخریب ساختار طبیعی نمونه گردد AFM به هیچگونه بازسازی نمونه نیازی ندارد. در حالی که مهمترین کاربردهای SEM در بررسی ساختارهای نانو فیبری شامل بررسی سریع شکل، جهت گیری، قطر و یکنواختی فیبرها است، تصویربرداری سه بعدی با AFM تعیین درجه زبری سطح، درجه زبری در طول فیبر و تعیین ضخامت بافت تولید شده را ممکن می‌سازد. علاوه بر این، با رعایت پاره ای ملاحظات تکنیکی AFM می‌تواند در تخمین قطر میانگین، به خوبی SEM عمل نماید.

## ۱-۲. مزایا و معایب میکروسکوپ نیروی اتمی

مزایا

- قدرت تفکیک تصاویر در حد چند نانومتر
- تهیه پروفیل سه بعدی از سطح

- نیاز نبودن به آماده سازی نمونه
- امکان کار در هوا و محیط مایع
- دستکاری اتمی

معایب

- سرعت پایین

## ۲. تاریخچه

گرد کارل بینینگ بر اساس طراحی‌های قبلی که با همکاری هاینرک روهرر، در آزمایشگاه تحقیقاتی زوریخ IBM، در جهت طراحی و ساخت میکروسکوپ تونلی روبشی (STM)، صورت داده بود، در سال ۱۹۸۶ میلادی با همکاری کلونین کوایت و کریستف گربر از دانشگاه استانفورد، میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، را ارائه نمود. هدف او از این کار اندازه‌گیری نیروهای بسیار ناچیز (کمتر از  $1\mu\text{N}$ )، بین نوک سوزن AFM و سطح نمونه مورد بررسی بود [۱ و ۲ و ۳ و ۴ و ۵ و ۶]. تولیدات تجاری این محصولات، با میکروسکوپ STM در سال ۱۹۸۷ میلادی و میکروسکوپ‌های AFM، در ۱۹۸۹ میلادی کلید خورد. به دنبال اختراع STM و سپس AFM، تلاش‌های بسیاری جهت مطالعه مورفولوژی و ساختار سطوح و فصل مشترک آن‌ها صورت گرفت و در بازه کوتاهی از زمان، بسیاری دیگر از ابزارهای شناسایی با مبانی مشابه در عملکرد، تحت عنوان کلی میکروسکوپ‌های پروبی روبشی، ساخته و به جهان علم ارائه گردیدند [۲ و ۳].

## ۳. دامنه کاربرد میکروسکوپ نیروی اتمی

در حالی که میکروسکوپ تونلی روبشی، تنها می‌تواند جهت مطالعه سطوحی که از لحاظ الکتریکی درجاتی از رسانایی دارند، استفاده شود، میکروسکوپ‌های نیروی اتمی می‌توانند جهت مطالعه هر نوع سطح مهندسی

استفاده شوند؛ بنابراین می‌توان از آن جهت مطالعه انواع مواد رسانا، نیمه رسانا و نارسانا استفاده نمود. امروزه AFM، یک کاوشگر سطحی محبوب برای اندازه‌گیری‌های توپوگرافیک و محاسبه نیروهای عمودی در مقیاس میکرو تا نانو شناخته شده است. هم‌چنین از این دستگاه مشخصه‌یابی، می‌توان برای مطالعه خراش و سائیدگی و نیز اندازه‌گیری خواص مکانیکی الاستیک و پلاستیک (از قبیل میزان سختی جسم در برابر جسم فرورونده و مدول الاستیسیته) استفاده نمود [۷ و ۵ و ۴]. از AFM در بسیاری از مطالعات، جهت نوشتار، دستکاری و جایجایی اتم‌های منفرد زنون، مولکول‌ها، سطوح سیلیکونی و پلیمری به کار گرفته شده است. علاوه بر این از این میکروسکوپ جهت انواع نانولیتوگرافی و تولید نانو ساختارها و نانوماشینکاری استفاده شده است [۱۰ و ۹ و ۸ و ۷ و ۶].

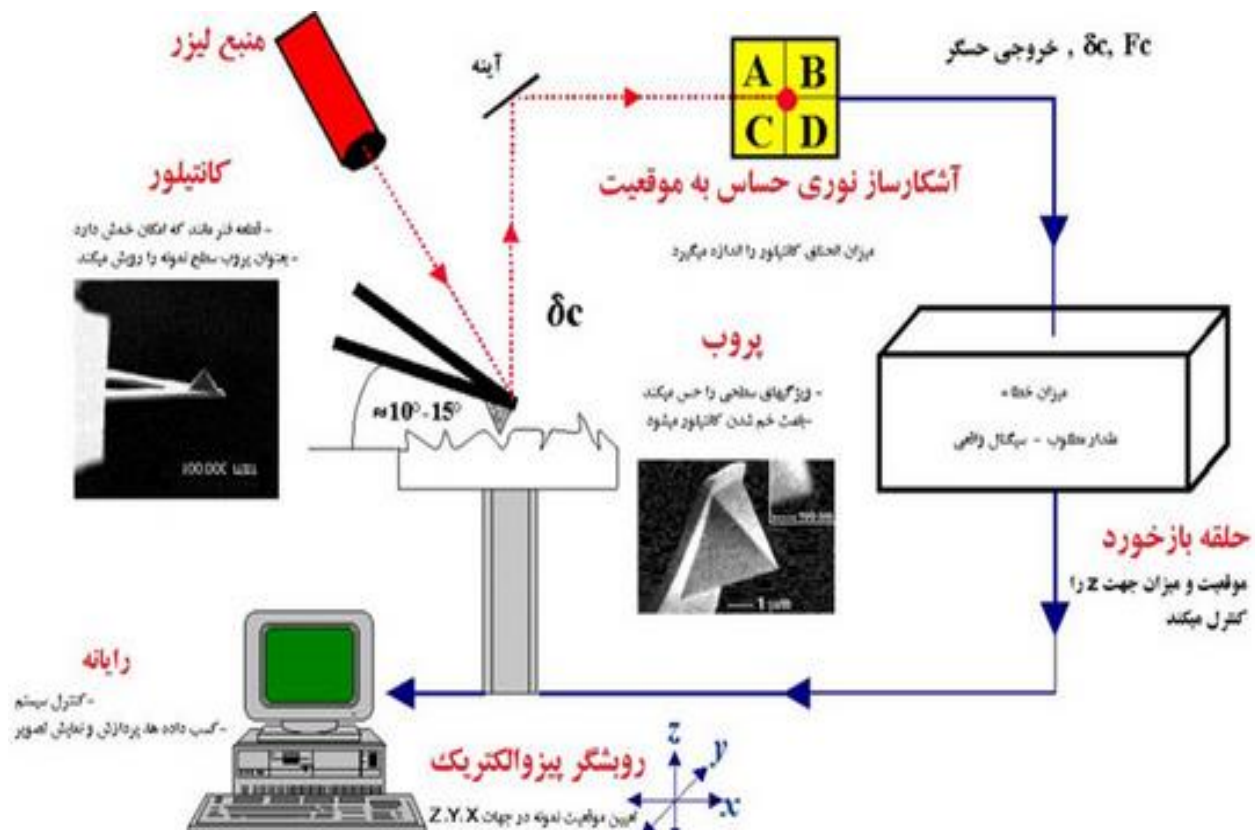
میکروسکوپ‌های نیروی اتمی که برای اندازه‌گیری نیروهای عمودی و جانبی، طراحی شده‌اند، میکروسکوپ‌های نیروی جانبی، یا میکروسکوپ‌های نیروی اصطکاکی نامیده می‌شوند [۱۱ و ۹ و ۸]. دسته‌ای از FFM‌ها از توانایی اندازه‌گیری نیروهای جانبی در دو جهت متعامد برخوردارند [۱۲]. محققین بسیاری طراحی‌های AFM و FFM را اصلاح کرده و بهبود داده‌اند و هم‌اکنون این سیستم‌های بهبود داده شده، جهت اندازه‌گیری چسبندگی، اصطکاک و نیروهای پیوندی در سطوح جامد و مایع در مقیاس نانو و میکرو به کار می‌روند [۱۴ و ۱۳].

#### ۴. سیستم دستگاهی میکروسکوپ روبشی نیروی اتمی

میکروسکوپ روبشی نیروی اتمی AFM سطح نمونه را توسط یک سوزن تیز، به طول ۲ میکرون و غالباً قطر نوک کمتر از ۱۰ نانومتر که معمولاً از جنس سیلیکون یا سیلیکون نیتريد است، آنالیز می‌کند. سوزن در انتهای آزاد یک انبرک (کانتیلور) به طول حدود ۱۰۰ تا ۴۵۰ میکرون قرار دارد [۱۰].



یکی از نکات کلیدی در میکروسکوپ های پروبی روبشی ، روبش سطح نمونه با قدرت تفکیک بالاست. مواد پیزو الکتریک این امکان را فراهم می آورند. این مواد با اعمال ولتاژ و متناسب با جهت و میزان آن، تغییر طول می دهند. به این ترتیب و با اعمال کانتی لیوربه همراه سوزن به روبشگر پیزو، امکان روبش سطح نمونه با قدرت تفکیکی در حد ۰/۱ انگستروم فراهم می آید. در میکروسکوپ های SPM اولیه، سه میله عمود بر هم، این روبشگر را تشکیل می داد که اعمال ولتاژ به هر یک از این سه میله باعث تغییر طول آن و در نتیجه انحراف سوزن در راستاهای X، Y و یا Z می شد. در میکروسکوپ های جدید روبش توسط یک استوانه توخالی از ماده پیزو انجام می شود. سطح داخلی استوانه با لایه نازکی از یک فلز رسانای الکتریسیته (مانند نیکل) پوشانده شده است و چهار تا نوار فلزی نیز در سطح خارجی این استوانه پیزو نشانده شده است. اعمال ولتاژ با جهت و مقدار یکسان به هر چهار الکترود خارجی (نسبت به الکترود داخلی) باعث انبساط و در نتیجه پایین آمدن استوانه و سوزن چسبیده به آن و یا انقباض و بالا رفتن آن می شود. اعمال ولتاژ با علامت های مخالف به الکترودهای متقابل (مثلا X و -X) باعث خم شدن استوانه می شود که در واقع شامل حرکت در صفحه Y، X و همچنین حرکت در جهت Z است. با کنترل نرم افزاری اعمال ولتاژ، می توان سوزن را به دلخواه در هر سه جهت حرکت داد. سیستم الکترونیک دستگاه امکان کنترل این حرکت را با دقت ۰/۱ انگستروم فراهم می کند.



شکل ۱-۴. اجزای کلی میکروسکوپ نیروی اتمی و عملکرد آنها

نیروهای بین سوزن و سطح نمونه باعث خم شدن یا انحراف کانتیلور شده و یک آشکارساز میزان انحراف کانتیلور را در حالیکه سوزن سطح نمونه را روبش می کند یا نمونه در زیر سوزن روبش می شود؛ در سیستم هایی که نمونه حرکت روبشی را انجام می دهد، اندازه می گیرد. می توان از انحراف کانتیلور برای ورودی یک مدار باز خورد استفاده کرد که روبشگر پیزوالکتریک را در مواجهه با توپوگرافی سطح نمونه به گونه ای در جهت Z بالا و پایین می برد که میزان انحراف کانتیلور ثابت بماند. اندازه گیری انحرافات کانتیلور به کامپیوتر امکان تولید تصویر توپوگرافی سطح را می دهد [۱۱].

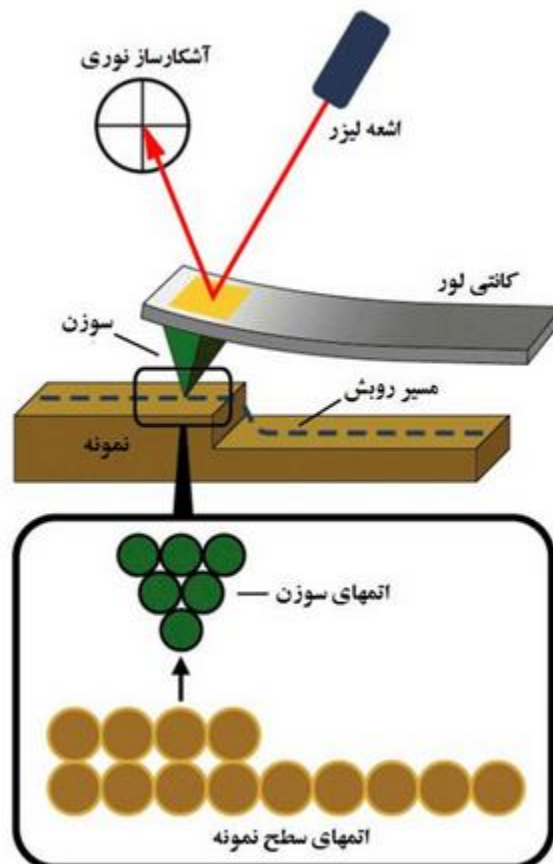
#### ۴-۱. روبشگر

روبشگر پیزو، مجموعه کانتی لیور و سوزن، سیستم آشکارسازی لیزری حساس به موقعیت کانتی لیور و در مواردی یک پیش تقویت کننده، مجموعاً قسمت روبشگر دستگاه را تشکیل می دهند.

روبشگر توسط یک سه پایه از جنس آلایژ فلزی مخصوص یا حداقل انبساط و انقباض حرارتی بر روی یک پایه یا میز  $X, Y$  نصب می شود. نمونه بر روی میز قرار داده شده و سطح آن توسط سوزن روبش می شود. این پایه به لاستیک های جاذب انرژی مجهز است. پایه روبشگر به یک دوربین CCD مجهز می شود که می تواند مستقیماً به عنوان یک میکروسکوپ با بزرگنمایی حدود سیصد برابر استفاده شود.

#### ۴-۲. کانتی لیور

در اغلب AFM هایی که امروزه عرضه می شود، موقعیت کانتیلور را با استفاده از روش های اپتیکی تعیین می کنند. متداول ترین آنها در شکل ۴-۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲. اجزای نحوه آشکارسازی موقعیت کانتیلور با روش متداول در میکروسکوپ نیروی اتمی

یک اشعه لیزری از پشت کانتیلور به سمت یک آشکارساز نوری حساس به موقعیت منعکس می‌شود [۱۲]. کانتی لیور معمولا از جنس سیلیکون یا سیلیکون نیتريد با شعاع انحنای نوک در حد نانومتر است. وقتی نوک به نزدیکی سطح نمونه آزمایش آورده می‌شود، نیروهای بین نوک و نمونه به انحراف آن (با توجه به قانون هوک منجر میشوند) [۶].

با خم شدن کانتیلور محل اشعه لیزر روی آشکارساز تغییر کرده و PSPD (آشکار سازی دایودی حساس به موقعیت) می‌تواند جابه‌جایی به کوچکی ۱۰ آنگستروم (۱ نانومتر) را اندازه‌گیری کند. نسبت فاصله بین کانتیلور و آشکارساز به طول کانتیلور به عنوان یک تقویت کننده مکانیکی عمل می‌کند. در نتیجه سیستم می‌تواند حرکت عمودی کمتر از آنگستروم نوک کانتیلور را اندازه‌گیری کند. روشی دیگر جهت آشکارسازی انحراف آشکارساز بر مبنای تداخل اپتیکی می‌باشد. از مواد مورد استفاده رایج در ساخت کانتیلورها می‌توان به الماس،  $Si_3N_4$ ،  $Si$ ،  $W$  و  $Ir$  اشاره نمود [۱۵].

#### ۳-۴. مدار کنترل

سیگنال های به دست آمده ناشی از حرکت سوزن، با یا بدون تقویت اولیه به قسمت کنترل کننده که حاوی مدارهای الکترونیک یا نویز کم هستند وارد شده و پس از تقویت و پردازش اولیه جهت تشکیل تصویر به کامپیوتر فرستاده می‌شود. کنترل کننده با فرستادن سیگنال های الکتریکی، روبشگر را کنترل می‌نماید. نرم افزار نصب شده بر روی کامپیوتر سیگنال های خروجی از قسمت کنترل کننده را پردازش نموده و به تصویر تبدیل می‌کند. در عین حال نرم افزار امکان پردازش و اندازه‌گیری های سه بعدی را بر روی تصویر به دست آمده فراهم می‌کند.

## ۵. انواع نیروهای موجود در عملیات روبش

میکروسکوپ‌های نیروی اتمی در حین کار با نیروهایی نظیر نیروهای کوتاه برد، الکترواستاتیک، موئینگی و ... روبه‌رو هستند. به عنوان مثال در زیر به دو نیرویی که علاوه بر نیروی دافعه واندروالس، در حین عملیات AFM استاتیکی حضور دارند، اشاره می‌شود:

### ۵-۱. نیروی اعمالی توسط کانتیلور

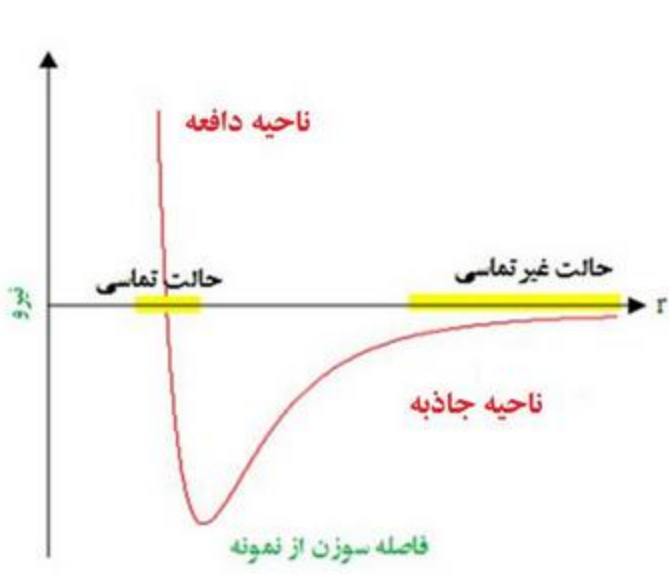
نیرویی که توسط خود کانتیلور اعمال می‌شود، مانند نیروی یک فنر فشرده است. اندازه و علامت (جاذبه یا دافعه) نیروی کانتیلور به انحراف کانتیلور و ثابت فنر آن بستگی دارد.

### ۵-۲. نیروی موئینگی

نیروی موئینگی معمولا توسط لایه نازک آب (که ممکن است از رطوبت محیط ناشی گردد) اعمال می‌شود [۱۳]. نیروی موئینگی هنگامی به وجود می‌آید که لایه‌ای از آب دور سوزن ایجاد گردد. در این حالت نیروی جاذبه قوی حدود  $10^{-8}$  نیوتن پدیدار می‌شود که در این حالت سوزن را در تماس با سطح نگه می‌دارد. بزرگی نیروی موئینگی به فاصله سوزن تا نمونه بستگی دارد. تا زمانی که سوزن با نمونه تماس دارد، نیروی موئینگی ثابت می‌باشد. همچنین فرض می‌شود که لایه آب تقریبا همگن است. در نتیجه نیروی متغیر در AFM استاتیکی باید توسط نیروی دافعه واندروالس جبران گردد. اندازه نیروی کل اعمال شده بر نمونه از  $10^{-8}$  نیوتن (در شرایطی که تقریبا آب سوزن را به طرف نمونه می‌کشد و کانتیلور آن را از نمونه می‌راند) تا محدوده معمول تر  $10^{-6}$  تا  $10^{-7}$  نیوتن تغییر می‌کند [۳].

## ۶. مدهای کاری میکروسکوپ روبشی نیروی اتمی

در هنگام کار با میکروسکوپ نیروی اتمی، نیروهای مختلفی در انحراف کانتیلور AFM مشارکت می‌کنند. منظور از نیروهای مختلف، نیروهای کوتاه برد اتمی بین اتم‌های نوک سوزن و اتم‌های روی سطح نمونه می‌باشد. از جمله این نیروها می‌توان به نیروهای کوالانسی و یا نیروهای واندروالس از نوع جاذبه و دافعه اشاره نمود. وابستگی نیروی واندروالس به فاصله سوزن و نمونه در شکل ۱-۷، نشان داده شده است.



شکل ۱-۶. نمودار انرژی پتانسیل پروب و نمونه

### ۶-۱. مدهای عملکردی

در شکل ۱-۶، دو مد مربوط به دو ناحیه علامت گذاری شده است:

۱- مد استاتیکی (DC-AFM) یا حالت دفعی

۲- مد دینامیکی (AC-AFM) یا حالت جذبی

## ۶-۱-۱. مد استاتیکی یا تماسی

در مد استاتیکی یا ایستا، نوک پروب در فاصله چند آنگسترومی از سطح قرار گرفته و تقریباً در تماس با سطح قرار می‌گیرد. در این حالت نیروی بین اتم‌های نوک پروب و سطح نمونه دافعه بوده و تیپ در ناحیه نیروهای دافعه واندروالسی بین اتم‌های نوک تیپ با سطح و بدون ایجاد ارتعاش روی کانتیلور عمل می‌کند. نیروی بین سایر اتم‌های پروب و سطح نمونه همچنان جاذبه است. در مد استاتیکی، پستی و بلندی‌های موجود بر روی سطح نمونه منجر به خم شدن کانتیلور می‌شود و دستگاه با یک مکانیسم فید بک انحراف کانتیلور را اندازه گرفته و در یک نقطه ثابت نگاه می‌دارد. خمش کانتیلور سبب جابه‌جایی بازتابش اشعه لیزر بر روی کانتیلور شده و این تغییر در زاویه بازتابش به آشکارساز ارسال می‌شود. زمانی که تیپ در حال روبش سطح می‌باشد، تصویربرداری با ثبت ولتاژ اعمال شده به پیزوالکتریک متحرک انجام می‌شود. مد تماسی برای بررسی سطوح سخت با تیپ‌های نازک و فوق‌تیز و سخت مناسب می‌باشد و برای نمونه‌های که سطح نرمی دارند مناسب نمی‌باشد و باعث خراب شدن سطح نمونه می‌گردد. در مواردی که می‌توان از این مد استفاده کرد، قدرت تفکیک بسیار مناسب و بهتری نسبت به مدهای دیگر دارد.



شکل ۲-۶. تصویر مد تماسی یا استاتیکی

#### ۶-۱-۱-۱. مد ارتفاع ثابت

در حالتی که ارتفاع روبشگر پیرو در حین روبش ثابت است، تغییرات انحراف کانتیلور می‌تواند مستقیماً برای تولید اطلاعات توپوگرافی استفاده شود. از این مد، اغلب برای ایجاد تصاویر در مقیاس اتمی از سطوحی که در حد اتمی مسطح هستند، استفاده می‌گردد. در اینجا انحرافات کانتیلور و بنابراین تغییرات در نیروی اعمالی، کوچک است. مد ارتفاع ثابت برای ثبت تصاویر همزمان سطوح در حال تغییر، که سرعت بالای روبش ضروری است، مورد نیاز است.

#### ۶-۱-۱-۲. مد نیروی ثابت

می‌توان از انحراف کانتیلور برای ورودی یک مدار بازخورد استفاده کرد که روبشگر پیزوالکتریک را در مواجهه با توپوگرافی سطح نمونه به گونه‌ای در جهت Z بالا و پایین می‌برد که میزان انحراف کانتیلور ثلثت بماند. در این مورد، تصویر از حرکت روبشگر پیرو تولید می‌شود. با ثابت نگه داشتن انحراف کانتیلور، کل نیروی اعمالی بر نمونه ثابت خواهد بود. در مد نیروی ثابت، سرعت روبش با زمان واکنش مدار بازخورد محدود می‌شود، ولی کل نیروی اعمالی توسط سوزن بر نمونه به خوبی کنترل می‌گردد. برای بسیاری از کاربردها، مد نیروی ثابت ترجیح داده می‌شود.

#### ۶-۱-۲. مد دینامیکی

در مد دینامیکی پروب با فرکانس (۴۰۰-۱۰۰ هرتز) و دامنه (چند دهم آنگستروم) مشخصی نوسان می‌کند. در مد دینامیکی کانتیلور در فاصله چند ده تا چند صد آنگستروم از سطح نمونه قرار داده می‌شود و در این مد نیروی بین اتمی بین کانتیلور و نمونه (عمدتاً به دلیل برهمکنش‌های واندروالس دوربرد)، نیروی جاذبه است.



### ۶-۱-۲-۱. مد غیر تماسی

در مد غیر تماسی میکروسکوپ نیروی اتمی، تیپ در ناحیه نیروهای جاذبه واندروالسی با سطح و با ایجاد ارتعاش روی کانتیلور عمل می‌کند. در این حالت کانتیلور در نزدیکی یک فرکانس رزونانس طبیعی، نوسان می‌کند. سپس نمونه نزدیک می‌شود تا دامنه کانتیلور به مقدار تعیین شده کاهش یابد. بدین صورت که اثر متقابل تیپ-نمونه باعث کاهش شدید دامنه می‌شود، وقتی که این فاصله به ابعاد نانومتری رسید، تیپ سطح نمونه را روبش می‌کند. در این حالت مکانیسم فیدبک دامنه نوسان را اندازه‌گیری کرده و ثلثت نگاه می‌دارد. تغییر فرکانس کانتیلور به وسیله قطعه پیزوالکتریک متصل به کانتیلور اندازه‌گیری و برای ساخت تصویر استفاده می‌شود. این مد بیشتر برای محیط هوا و مایع مناسب می‌باشد. از آن جایی که نیروی کمتری بر نمونه وارد می‌شود در نتیجه این روش تخریب کمتری را برای نمونه‌های نرم و تیپ دربردارد. با وجود این که تولید تصویر اتمی با میکروسکوپ نیروی اتمی دشوارتر از میکروسکوپ تونلی روبشی است ولی حالت دینامیک غیر تماسی می‌تواند در خلاء بسیار بالا، قدرت تفکیک اتمی ایجاد کند.



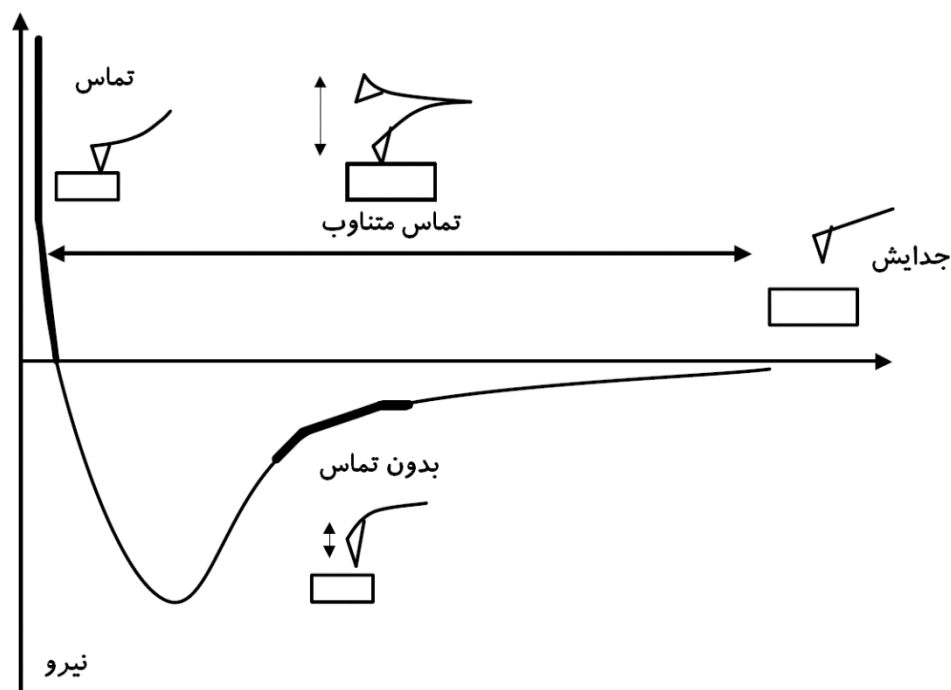
شکل ۳-۶. تصویر مد غیر تماسی یا دینامیکی

### ۶-۱-۳. مد تماس متناوب یا ضربه‌ای

این حالت نیز مانند حالت بدون تماس است با این تفاوت که در حالت تماس متناوب نوک کانتی‌لیور مرتعش به آرامی با نمونه برخورد می‌کند و دامنه نوسان خیلی بزرگتر از حالت بدون تماس است. در این مد تصویرسازی با استفاده از دامن ارتعاش کانتیلور انجام می‌شود. به این صورت که کانتیلور با فرکانس مشخصی بر روی سطح

نمونه ضربه وارد می‌کند و در نتیجه در صورت وجود پستی و بلندی دامنه نوسانات کانتلیور دچار تغییر شده و این تغییر بوسیله قطعه پیزوالکتریک متصل به کانتلیور ثبت می‌شود.

شکل ۴-۶ یک منحنی شماتیک نیرو-فاصله را برای میکروسکوپ نیروی اتمی نشان می‌دهد. در فاصله ی دور از نمونه، کانتی لیور (تیر یکسر گیردار) توسط نیروی بین اتمی جذب نمی‌شود و در حالت تعادل آزاد خود است. اما هنگامی که کانتی لیور به سطح نمونه نزدیک می‌شود، نیروهای جاذبه کانتی لیور را به سمت نمونه جذب می‌کنند. هنگامی که نوک با سطح در تماس است، نیروهای دافعه غالب بوده و کانتی لیور را دور می‌کنند. خطوط پررنگ دامنه را در حالت‌های تماسی و بدون تماس نشان می‌دهند. پیکان افقی دراز، دامنه ی معمول تماس متناوب را نشان می‌دهد .



شکل ۴-۶. منحنی نیرو-فاصله میکروسکوپ نیروی اتمی

## ۷. مزایا و معایب مدهای استاتیکی و دینامیکی

مزایای میکروسکوپ‌های نیروی اتمی دینامیکی بدین صورت می‌باشد که توپوگرافی نمونه بدون تماس یا با تماس خیلی کم بین سوزن و نمونه اندازه‌گیری می‌شود. کل نیروی بین سوزن و نمونه در مد دینامیکی بسیار کم است (معمولا حدود  $10^{-12}$  نیوتن). این نیروی کم مزیتی، برای مطالعه نمونه‌های نرم یا الاستیک به شمار می‌رود. همچنین نمونه‌هایی مانند ویفرهای سیلیکونی از طریق تماس با سوزن آلوده نمی‌شوند. از طرف دیگر به دلیل اینکه نیروی بین سوزن و نمونه در مد دینامیکی کم است، اندازه‌گیری آن مشکل‌تر از نیروی چندین بار بزرگتر مد استاتیکی است.

علاوه بر این کانتیلورهای استفاده شده برای AFM های دینامیکی باید نسبت به کانتیلورهای AFM های استاتیکی سفت‌تر باشند، زیرا کانتیلور نرم می‌تواند به طرف سمت سطح نمونه کشیده شده و در تماس با آن قرار گیرد. از طرفی، مد دینامیکی برای اندازه‌گیری نمونه‌های نرم بر مد استاتیکی ترجیح داده می‌شود. مقدار کم نیرو و سفت بودن کانتیلورها، در مد دینامیکی، هر دو عواملی هستند که سیگنال AFM دینامیکی را کوچک می‌کنند. در مورد مد دینامیکی، مشکل از بین رفتن سوزن یا نمونه، که گاهی بعد از اسکن‌های فراوان توسط حالت استاتیکی مشاهده می‌شود، وجود ندارد.

در مورد نمونه‌های صلب ممکن است تصاویر AFM استاتیکی و دینامیکی به یک گونه به‌نظر برسند. ولی اگر برای مثال چند لایه آب روی سطح یک نمونه صلب میعان کرده باشد، ممکن است تصاویر کاملا متفاوت باشند. میکروسکوپ نیروی اتمی که در مد استاتیکی کار می‌کند می‌تواند به این لایه نفوذ کند و سطح زیر آن را تصویر کند، در حالیکه در مد AFM دینامیکی، سطح مایع را تصویر می‌کند. در جدول ۷-۱ نقاط ضعف و قوت AFM در مدهای کاری مختلف ارائه شده است.

## ۷-۱. ویژگی‌های مد تماسی

- مد استاتیکی تماسی ساده‌ترین حالت برای دریافت اطلاعات اصلی پستی بلندی‌های سطوح جامد است.
- نیروی بین اتم‌های نوک سوزن و اتم‌های نمونه دافعه است.
- سرعت بالا
- مناسب برای سطوح سخت
- قابلیت بررسی اصطکاک
- سنجش میزان الاستیسیته / نرمی
- امکان آسیب‌رسانی به نمونه‌ها نرم

## ویژگی‌های مد دینامیکی غیر تماسی

- نیروی بین اتم‌های نوک سوزن و اتم‌های نمونه جاذبه است.
- طول عمر بالای سوزن
- قدرت تفکیک پایین
- سطح باید کاملاً تمیز باشد.
- خلاء بسیار بالا

جدول ۱-۷- نقاط قوت و ضعف مدهای کاری

ضربه ای	دینامیکی (غیر تماسی)	استاتیکی (تماسی)	
حذف نیروهای جانبی در بیشتر موارد قدرت تفکیک بالاتر جانبی در بیشتر نمونه ها نیروهای کمتر (که منجر به صدمه کمتر به نمونه یا پروب می شود).	عدم تخریب در نمونه های نرم به دلیل اعمال نیروی کم به سطح نمونه (هر دو نیروی جانبی و عادی کمترین مقدار را دارند) قدرت تفکیک اتمی در محیط خلأ بسیار بالا	سرعت روبش بالا و دستیابی به رزولوشن اتمی رویش آسانتر نمونه های زیر با حداکثر تغییرات در توپوگرافی عمودی	<b>نقاط قوت</b>
سرعت روبش پایین تر از مد تماسی	رزولوشن جانبی کمتر و سرعت روبش کمتر (جهت جلوگیری از تماس با لایه سیالات) مح دودیت در نوع نمونه (معمولا در نمونه های به شدت آگریز با حداقل لایه سیال موجود، کاربرد دارد) و ضخامت لایه های جذب شده سطحی و عدم امکان اندازه گیری مؤثر	امکان تحریف تصویر توسط نیروهای جانبی اعمال نیروهای عمودی بزرگ در برهمکنش نمونه و سوزن متاثر از نیروهای موئینگی حاصل از وجود لایه ای سیال کاهش رزولوشن فضایی و تخریب سطوح نرم نمونه به دلیل ترکیب سایر نیروها	<b>نقاط ضعف</b>

## ۸. جمع بندی و نتیجه گیری حالات کاری میکروسکوپ روبشی نیروی اتمی

در میکروسکوپ نیروی اتمی نیروی بین سوزن روبشگر و سطح نمونه که باعث خم شدن کانتیلور می شود، توسط آشکارساز اندازه گیری می شود. از این میکروسوپها علاوه بر اینکه می توان جهت انواع نانولیتوگرافی و تولید

نانوساختارها و نانوماشینکاری استفاده کرد، برای مطالعه خواص مکانیکی، سایش یا خراش و ... نیز به کار می‌روند. این میکروسکوپ‌ها با دو حالت کاری استاتیکی (تماسی) و دینامیکی (غیر تماسی) کار می‌کنند. در حالت استاتیکی، کانتیلور در فاصله کم از سطح نمونه قرار دارد که هنگام روبش سوزن روی سطح نمونه، نیروی استاتیکی باعث خم شدن کانتیلور می‌شود. در این حالت نیروی بین کانتیلور و نمونه، نیروی دافعه است. حالت استاتیکی با دو مد کاری ارتفاع ثلثت و نیرو ثلثت کار می‌کند. در حالت دینامیکی، فرکانس رزونانس کانتیلور می‌تواند به عنوان معیار تغییر نیرو (یا تغییر فاصله سوزن تا نمونه) استفاده شود. در این حالت نیروی اتمی بین کانتیلور و نمونه، از نوع جاذبه است. در این حالت به علت عدم تماس با نمونه‌های نرم، تخریبی ایجاد نمی‌شود اما نسبت به حالت تماسی، سرعت روبش کمتری دارد.

AFM سه توانایی غالب دارد: اندازه‌گیری نیرو، تصویربرداری توپوگرافی و دستکاری .

- در اندازه‌گیری نیرو، AFM ها می‌توانند برای اندازه‌گیری نیروهای بین پراب و نمونه به شکل تابعی از جداسازی متقابل استفاده شوند. این می‌تولند برای طیف سنجی نیرو به هدف اندازه‌گیری‌های ویژگی‌های مکانیکی نمونه اعمال شود، مانند مدول یانگ نمونه که یک معیار سفتی است.
- در تصویربرداری، واکنش پراب به نیروهایی که نمونه به آن تحمیل می‌کند می‌تواند برای تشکیل یک تصویر سه بعدی از سطح نمونه با وضوح بالا استفاده شود. این تصویر با اسکن شطرنجی از وضعیت نمونه نسبت به نوک و سپس ضبط ارتفاع پراب که در یک تعامل ثابت پراب-نمونه به دست می‌آید.
- در دستکاری، نیروهای بین نوک و نمونه می‌توانند برای این استفاده شوند که ویژگی‌های نمونه را به شیوه‌های کنترل شده، تغییر دهند. مثال‌های این دستکاری اتمی شامل: تحریک موضعی سلول‌ها و پراب پوشی حکاک می‌شوند.

همزمان با حاصل شدن تصویرهای توپوگرافی، ویژگیهای دیگر نمونه می‌توانند به طور موضعی اندازه‌گیری شوند و به شکل یک تصویر، معمولا مشابه تصویرهای توپوگرافی با وضوح بالا نشان داده شوند. مثال‌های این ویژگی‌ها، ویژگی‌های مکانیکی مانند سختی و قدرت چسبندگی و ویژگی‌های الکتریکی مانند رسانایی یا پتانسیل سطح هستند. در واقع، اکثر تکنیک‌های SPM گسترده شده‌ی AFM هستند که از این حالت استفاده می‌کنند.

## ۸-۱. مزایا و معایب میکروسکوپ نیروی اتمی

- مزایا

- سرعت بالا
- سادگی تهیه‌ی نمونه
- اطلاعات دقیق ارتفاع
- قابلیت کار در هوا، خلا و مایعات (بر خلاف میکروسکوپ‌های الکترونی)
- قابلیت مطالعه‌ی سیستم‌های زیستی زنده

- محدودیت‌ها

- بازه‌ی مطالعه‌ی عمودی محدود
- بازه‌ی بزرگنمایی محدود
- وابستگی اطلاعات بدست آمده به نوع نوک میکروسکوپ
- امکان آسیب دیدن نوک میکروسکوپ یا نمونه

اندازه‌گیری AFM را می‌توان با یک پروب SPM رسلنا انجام داد که می‌تولند به عنوان پروب AFM در حالت DC یا AC نیز استفاده شود. هنگامی که از چنین پروبی استفاده می‌شود، ایمن کردن یک اتصال الکتریکی نه تنها بین پروب SPM و نگهدارنده پروب SPM، بلکه بین سطح نمونه و ژنراتور بایاس خارجی نیز

بسیار مهم است. باید بررسی شود که سیگنال پروب به جریان سنج خارجی می رود. انجام دادن پروب های SPM در نگهدارنده پروب با چسب رسانا(نقره و ...) ثابت می شوند. اگر مایلید از اتصال الکتریکی اطمینان حاصل کنید، می توانید مقاومت روی پروب را با یک ابزار اندازه گیری چندگانه به دقت اندازه گیری کنید تا قبل از انجام اتصالات الکتریکی بعدی، اتصال الکتریکی را تأیید کنید.

برای انجام اندازه گیری مراحل زیر را انجام دهید:

یک کنسول که با چسب رسانا چسبانده شده است را نصب کنید. ممکن است برای اندازه گیری نمونه مورد نظر به یک پوشش مخصوص کنسول نیاز باشد.

همانطور که توضیح داده شد، از یک سیم برای اتصال الکتریکی نمونه به ژنراتور بایاس خارجی استفاده کنید.

هنگامی که کانتی لیور به درستی نصب شد، مراحل بعدی با اسکنر DS 95 انتخاب حالت اسکن، انجام یک تنظیم لیزری و یافتن فرکانس رزونانس کنسول در صورتی که AFM در حالت AC کار می کند، است. کل این روش "تنظیم اسکنر" نامیده می شود.



## ۹. حوزه کاربردی دستگاه AFM و شرایط نمونه آزمون AFM در مرکز علوم و فناوری

### نانو- پژوهشکده جامع علوم و فناوری های همگرا (ICST) - دانشگاه صنعتی شریف

مقادیر و شرایط معمول برای آزمایش AFM در حالت های رایج در جدول ۱-۹ خلاصه شده است.

جدول ۱-۹. مقادیر و شرایط آزمون AFM

نوع نمونه	محدودیت کاربرد
نمونه های بالک	برای نمونه های جامد بیشترین اندازه: $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 1\text{cm}$
نمونه های پودری	در حد دهم گرم... با حلال مناسب (اتانول و ...) برای سنتز محلول دیسپرس شده مناسب
نمونه های لایه نازک، نمونه های نارسانا	ضخامت بسیار کم

معرفی جنس کانتی لیور، پراب و پیزوالکتریک، دقت اندازه گیری اسکنر و جهت تابش نور لیزر برای آزمایش AFM در حالت های رایج در جدول ۲-۹ خلاصه شده است.

جدول ۲-۹. جنس اجزاء روبشگر، دقت اندازه گیری اسکنر و جهت تابش نور لیزر دستگاه AFM

جنس کانتی لیور و پراب و پیزوالکتریک	دقت اندازه گیری اسکنر با دقت کمتر	دقت اندازه گیری اسکنر با دقت بیشتر	جهت تابش لیزری
کانتی لیور و پراب: سیلیکون، سیلیکون نیتريد(ضدسایش) پیزوالکتریک: تیتلنیات زیرکونات سرب (PZT)	حداکثر ابعاد پنجره $200\text{mic} \times 200\text{mic}$ حداقل ابعاد پنجره $1\text{mic} \times 1\text{mic}$	حداکثر ابعاد پنجره $50\text{mic} \times 50\text{mic}$ حداقل ابعاد پنجره $100\text{nm} \times 100\text{nm}$	۴۵ درجه مناسب جهت اندازه گیری نیروی جانبی در دو جهت
دقت نامی AFM	دقت تشخیصی AFM		
افقی در حد نانو متر عمودی در حد دهم نانومتر	به جنس نمونه و برهم کنش نیروهای جذب و دفع بستگی دارد		

- [1]-G. Binnig, C. Gerber, E. Stoll, T.R. Albrecht, C.F. Quate, Atomic resolution with atomic force microscope, *Europhys. Lett.* 3, 1281–1286 (1987).
- [2]- Bharat Bhushan, "Springer Handbook of Nanotechnology", USA, Springer, (2004).
- [۳]- علیرضا ذوالفقاری، محمد الماسی، پیروز مرعشی، مهرداد نجبا، امید سیفی، "میکروسکوپ پروبی روبشی آزمایشگاهی روی نوک سوزن"، تهران، پیکنور، (۱۳۸۵).
- [4]-G.Meyer, N.M. Amer, Novel optical approach to atomic force microscopy, *Appl. Phys. Lett.* 53, 1045–1047 (1988).
- [5]-B. Bhushan, S. Sundararajan, Micro-/nanoscale friction and wear mechanisms of thin films using atomic force and friction force microscopy, *Acta Mater.* 46, 3793–3804 (1998).
- [6]-D.M. Eigler, E.K. Schweizer, Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope, *Nature* 344, 524–528 (1990).
- [7]- A.L. Weisenhorn, J.E. MacDougall, J.A.C. Gould, S.D. Cox, W.S. Wise, J. Massie, P.Maivald, V.B. Elings, G.D. Stucky, P.K. Hansma, Imaging and manipulating of molecules on a zeolite surface with an atomic force microscope, *Science* 247, 1330–1333 (1990).
- [8]- I.W. Lyo, P. Avouris, Field-induced nanometer-to-atomic-scale manipulation of silicon surfaces with the STM, *Science* 253, 173–176 (1991).
- [9]- O.M. Leung, M.C. Goh, Orientation ordering of polymers by atomic force microscope tip-surface interactions, *Science* 225, 64–66 (1992).
- [10]-A.Majumdar, P.I. Oden, J.P. Carrejo, L.A. Nagahara, J.J. Graham, J. Alexander, Nanometer scale lithography using the atomic force microscope, *Appl. Phys. Lett.* 61, 2293–2295 (1992).
- [11]-B. Bhushan, O. Marti, "Scanning Probe Microscopy – Principle of Operation, Instrumentation, and Probes", *Nanotribology and Nanomechanics*, Springer, (2011).

[12]-D. Bonnell, (Ed.), "Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy: Theory, Techniques, and Applications", 2nd ed., Wiley-VCH, New York, (2001).

[13]- M. Binggeli, R. Christoph, H.E. Hintermann, J. Colchero, O. Marti, Friction force measurements on potential controlled graphite in an electrolytic environment, *Nanotechnology* 4, 59–63 (1993).

[14]- Paolo Samori, "Scanning Probe Microscopies Beyond Imaging", WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, (2006).

[15]-B. Bhushan, O. Marti, "Scanning Probe Microscopy – Principle of Operation, Instrumentation, and Probes" ,*Nanotribology and Nanomechanics*, Springer, (2011).