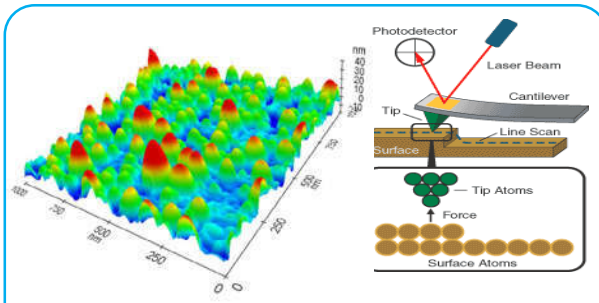


شکل ۲- برخی از انواع سوزن ها و کانتی لیورهای مورد استفاده در میکروسکوپ نیروی اتمی [۴، ۵]



شکل ۳- (سمت راست) نحوه حرکت خطی کانتی لیور بر روی نمونه (سمت چپ) نمونه ای از توپوگرافی سطحی در مقیاس نانومتر [۶، ۷]

نیروهای بین اتمی

نیروهایی که بین اتم‌های سوزن و اتم‌های سطح نمونه وجود دارد و منجر به انحنای کانتی لیور می‌گردد به دو دسته کلی نیروهای جاذبه^۷ و نیروهای دافعه^۸ تقسیم‌بندی می‌شوند. نیروهای جاذبه به نوبه خود عبارتند از: نیروهای وان دروالسی^۹، نیروهای الکترواستاتیک^{۱۰}، نیروهای مویبندی^{۱۱} و نیروهای مغناطیسی^{۱۲}. [۱، ۲، ۸]

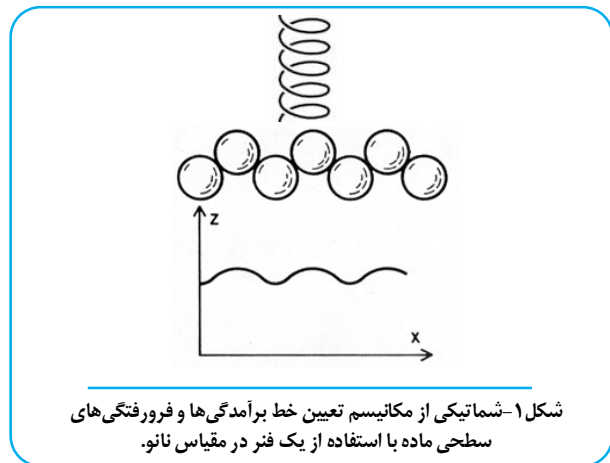
منحنی شکل (۴) شبیه به منحنی پتانسیل بر حسب فاصله اتم^{۱۳} بوده و نیروی وارده به دو اتم فرضی در فواصل مختلف را نشان میدهد که می‌توان آن را بر اتم‌های سوزن و سطح نمونه تطبیق داد. در فواصل زیاد هیچ نیرویی بین اتم‌ها وجود ندارد. با کاهش فاصله، نیروی جاذبه بین سوزن و سطح به وجود می‌آید که کانتی لیور را به سمت نمونه می‌کشد. اگر فاصله سوزن و اتم‌های سطح نمونه کم شود، نیروی دافعه شکل گرفته و با کمتر شدن فاصله، دافعه بیشتر می‌شود تا جایی که برآیند نیروها صفر گردد.

- 7 attractive force
- 8 repulsive force
- 9 Van der Waals forces
- 10 electrostatic forces
- 11 capillary forces
- 12 magnetic forces
- 13 potential-distance curves

میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) با اندازه‌گیری نیروهای بین‌اتمی در مقیاس نانو، تصویری را از سطح ماده پردازش می‌کند اندازه‌گیری این نیروها، بر اساس همان فرمول آشنا و پرکاربرد فنهاسته به این ترتیب که اگر به فنری، نیروی F وارد شود، فنر به اندازه X تغییر طول می‌دهد:

$$F = -kx$$

در این رابطه k ثابت فنر است. ثابت فنر، در واقع همان خاصیتی است که در مقابل تغییر طول فنر مقاومت می‌کند. حال فرض کنید که یک فنر نانومتری، عمود بر سطح یک جامد و در یک خط مستقیم جابجا شود. می‌توان تصور نمود که فنر در برآمدگی‌های سطحی، فشرده شده و در فرورفتگی‌ها، کشیده می‌شود. اگر در حین حرکت فنر بر روی سطح، بتوان میزان تغییر طول فنر را اندازه‌گیری کرد، می‌توان برآمدگی و فرورفتگی‌های سطح ماده را در خط روبش آن رسم کرد (شکل (۱)) [۱، ۲]



شکل ۱- شماتیکی از مکانیسم تعیین خط برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های سطحی ماده با استفاده از یک فنر در مقیاس نانو.

در میکروسکوپ نیروی اتمی سطح ماده توسط یک سوزن یا نوک^۲ تیز (طول و قطر سوزن در حدود ۲ میکرومتر و کمتر از ۱۰ نانومتر) حس می‌شود. این سوزن بر روی پایه‌ای به نام کانتی لیور^۳ به طول حدودی ۱۰۰ تا ۴۰۰ میکرومتر قرار دارد. تصاویری از نحوه قرارگیری سوزن بر روی کانتی لیور و برخی از انواع سوزن‌های مورد استفاده در میکروسکوپ نیروی اتمی در شکل ۲ آورده شده است.

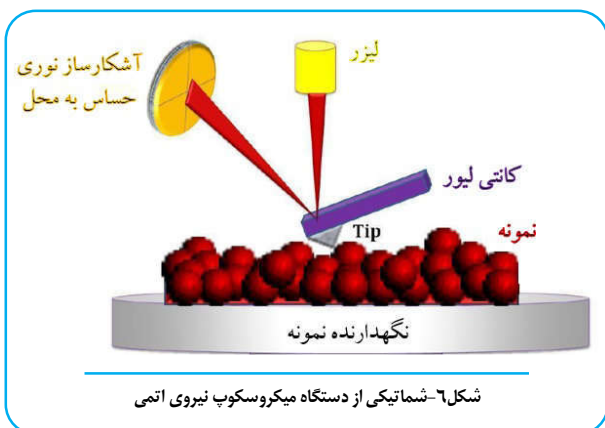
سوزن در فاصله چند آنگسترومی از سطح نمونه قرار داده میشود. در این حالت، اتم‌های موجود در نوک سوزن و اتم‌های سطح ماده به یکدیگر نیرو وارد می‌کنند که منجر به انحنای کانتی لیور می‌گردد. میزان انحنای کانتی لیور و نیروی وارده بر آن که در واقع به عنوان یک فنر ایفای نقش می‌کند، با دقت بسیار بالایی ثبت می‌شود. با روبش پروب^۴ (مجموعه کانتی لیور و سوزن) به صورت خطی بر روی سطح نمونه، با انحنای مداوم کانتی لیور، مجموعه فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌های سطحی در همان خط، ثبت می‌گردد. با روبش خط به خط^۵ تمام سطح نمونه، تصویر سه‌بعدی از سطح یا توپوگرافی^۶ سطح به دست می‌آید. (شکل (۳)) [۲، ۳]

- 1 Atomic Force Microscope (AFM)
- 2 tip
- 3 cantilever
- 4 probe
- 5 line scan
- 6 topography

اگر خواص مغناطیسی نمونه نیز مورد مطالعه باشد، سوزن کانتی لیور از یک جنس مغناطیسی مانند نیکل یا آهن ساخته شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این حالت نیروی مغناطیسی نیز وجود دارد. این تجهیز خاص را میکروسکوپ نیروی مغناطیسی^۴ به اختصار MFM می‌نامند. [۲، ۱]

کارکرد دستگاه

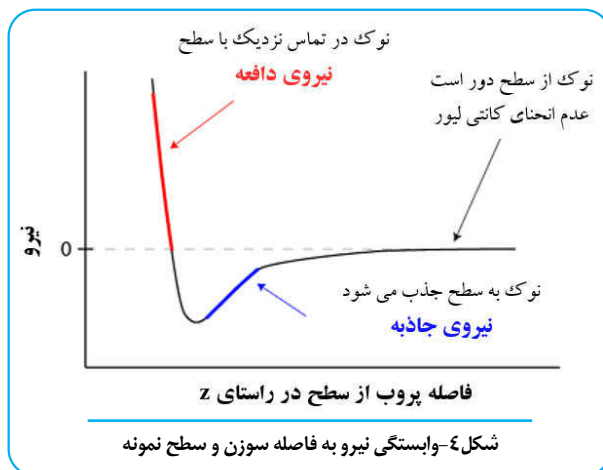
شماتیکی از دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی در شکل (۶) آورده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، نمونه بر روی یک جایگاه^۵ قرار دارد. سوزن کانتی لیور در نزدیکی سطح نمونه تنظیم شده و روبش آغاز می‌گردد. در اکثر میکروسکوپ‌ها، موقعیت کانتی لیور توسط روش‌های نوری^۶ تعیین می‌شود. یک لیزر بر سطح کانتی لیور می‌تابد که به واسطه آن، سیگنالی به یک آشکارساز می‌رسد. در اثر انحنای کانتی لیور، محل برخورد لیزر بر صفحه آشکارساز^۷ تغییر کرده و ثبت می‌شود. بدین ترتیب میزان انحنای کانتی لیور و توپوگرافی سطحی آشکار می‌گردد. روش‌های دیگر برای تعیین موقعیت کانتی لیور استفاده از سوزن STM یا استفاده از مواد پیزوالکتریک^۸ است. در برخی از دستگاه‌ها کانتی لیور متحرک بوده و نمونه را روبش می‌کند و در برخی دیگر، نمونه متحرک و کانتی لیور ثابت است. [۳، ۲]



شکل ۶- شماتیکی از دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی

دستگاه، اطلاعات توپوگرافی را در دو نوع ارتفاع ثابت^۹ یا نیرو ثابت^{۱۰} ارائه می‌کند. در حالت ارتفاع ثابت، فاصله سوزن کانتی لیور و سطح ماده مقدار ثابتی است؛ بنابراین در فرورفتگی‌های سطحی، کانتی لیور در جهت نمونه و در برآمدگی‌ها در خلاف جهت نمونه، انحنای می‌یابد. در این حالت، توپوگرافی سطحی مستقیماً از میزان انحراف کانتی لیور حاصل می‌شود. این حالت برای سطوحی که در مقیاس اتمی مسطح هستند، به کار می‌رود. می‌توان گفت که اگر میزان انحنای کانتی لیور ثابت بماند، برآیند نیروهای وارد بر آن نیز ثابت خواهد بود. به این ترتیب، با استفاده از یک مدار بازخورد که خود به عنوان آشکارساز نیز ایفای نقش می‌کند، نیروی وارد بر کانتی لیور ثابت باقی نماند. [۱، ۲، ۸]

با ادامه کاهش فاصله میان سوزن و سطح، نیروی غالب میان اتم‌های سوزن و اتم‌های سطح ماده، دافعه خواهد بود.



از میان نیروهای جاذبه، نیروی واندروالسی اهمیت ویژه‌ای دارد. این نیرو که به برهمکنش دوقطبی‌ها مربوط می‌شود خود به سه بخش مختلف تقسیم می‌گردد:

- Keesom dipole force
- Debye dipole force
- London dispersion force

اگر سوزن، باردار^۱ باشد، نیروی الکترواستاتیک نیز در جاذبه نقش بازی میکند در شرایطی که سطح نمونه با آب پوشیده شده باشد، سوزن در حال روبش، توسط آب، تر^۲ میشود. در این حالت با تشکیل یک هلال آب^۳ بین سوزن کانتی لیور و سطح نمونه، نیروی جاذبه مویبینگی (در حدود ۱۰-۸ نیوتن) به وجود می‌آید. (شکل (۵))



4 Magnetic Force Microscopy (MFM)

5 sample holder

6 optical

7 Position Sensitive Photo Detector (PSPD)

8 piezoresistive

9 constant height

10 constant force

1 charged tip

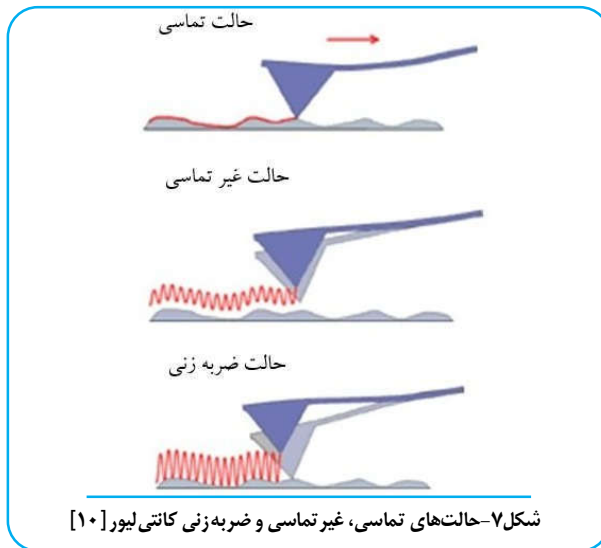
2 wet

3 meniscus

همانطور که ذکر شد، مکانیسم تشکیل تصویر در میکروسکوپ نیروی اتمی، اندازه‌گیری نیروهای برهمکنش کننده بین اتم‌های سوزن و اتم‌های سطح ماده است. بر اساس وضعیت (فاصله) سوزن نسبت به نمونه، دو حالت تصویربرداری در میکروسکوپ نیروی اتمی وجود دارد: حالت تماسی^۱ و حالت غیرتماسی^۲. (شکل (۷))

در حالت تماسی فاصله سوزن و نمونه به قدری کم است (کمتر از ۵ آنگستروم) که نیروی وارد بر کانتی‌لیور از طرف سطح، از نوع دافعه است. (ناحیه قرمز رنگ در شکل (۴))

می‌توان گفت که در این حالت سوزن با سطح نمونه در تماس فیزیکی هستند این حالت دارای سرعت روبش بالایی بوده و برای سطوح زبر و بررسی اصطکاک به کار می‌رود؛ اما برای سطوح نرم و انعطاف‌پذیر و بعضاً سامانه‌های زیستی مناسب نیست. حالت تماسی معمولاً در نیروی ثابت^۳ اجرا شده و در صورت وجود آب (یا هر مایعی) بر روی سطح، توپوگرافی واقعی سطحی را آشکار می‌سازد. [۱، ۲]



در حالت غیرتماسی، بین سوزن کانتی‌لیور و نمونه فاصله وجود دارد (در حدود ۳۰ تا ۱۵۰ آنگستروم) و تماس مستقیمی صورت نمی‌گیرد. برآیند نیروهای وارد بر کانتی‌لیور در این حالت، از نوع جاذبه است. (ناحیه آبی در شکل (۴))

در حالت غیرتماسی، کانتی‌لیور در نزدیکی سطح با فرکانس مشخص (نزدیک به فرکانس رزونانس کانتی‌لیور در حدود ۱۰۰-۴۰۰ کیلوهرتز) و دامنه چند دهم آنگستروم نوسان می‌کند. طی روبش، تغییرات فرکانس رزونانس کانتی‌لیور اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. این پارامتر با ثابت فنر کانتی‌لیور مرتبط است. بدین ترتیب، نیروی وارد بر کانتی‌لیور به صورت غیرمستقیم اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. حالت غیرتماسی برای نمونه‌های نرم، زیستی و حساس به آلودگی (مانند ویفرهای سیلیکونی) مورد استفاده قرار می‌گیرد اما قدرت تفکیک کمتری نسبت به حالت تماسی دارد. [۱، ۲، ۸]

حالت ضربه‌زنی یا تماسی متناوب به عنوان زیر مجموعه‌ای از حالت غیرتماسی در نظر گرفته می‌شود. فاصله سوزن و نمونه در حالت ضربه‌زنی، نه به نزدیکی حالت تماسی و نه به دوری حالت غیرتماسی (در حدود ۵ تا ۳۰ آنگستروم) است. نیروی برآیند وارد بر کانتی‌لیور از نوع جاذبه است. سوزن کانتی‌لیور در پایین‌ترین نقطه نوسان، سطح نمونه را حس می‌کند. این حالت برای نمونه‌های آسیب‌پذیر استفاده می‌شود در حالی که نیاز به قدرت تفکیک بالا باشد.

به طور کلی، از میکروسکوپ نیروی اتمی به منظور تعیین مشخصات و بررسی ساختارهای زیستی و نانو، بررسی پوشش‌های دارویی، تصویربرداری از سطوح و بررسی مورفولوژی و توپوگرافی، آنالیز ترک‌های خستگی و دینامیکی و... استفاده می‌شود.

- [1] V. Bellitto, "Atomic Force Microscopy - Imaging, Meas., Manip. Surfs. at the Atomic Scale", Intech, 2012
- [2] Greg Haugstad, "Atomic Force Microscopy: Understanding Basic Modes and Advanced Applications", 2012
- [3] Peter Eaton, Paul West, "Atomic Force Microscopy", Oxford University Press, USA, 2010
- [4] <https://www.nunano.com/blog/2016/12/12/a-pedants-christmas-guide-to-afm-probe-terminology>
- [5] <http://getfab.ru/post/593/>
- [6] <https://www.keysight.com/main/editorial.jsp?key=1774141&lc=eng&cc=IR>
- [7] <https://www.umass.edu/ials/afm>
- [8] Eaton P., West P., "Atomic Force Microscopy", OUP, 2010
- [9] <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26893-5>
- [10] E.santner and B. Stegemann, Federal Institute for Materials research and Testing (BAM), Germany.