

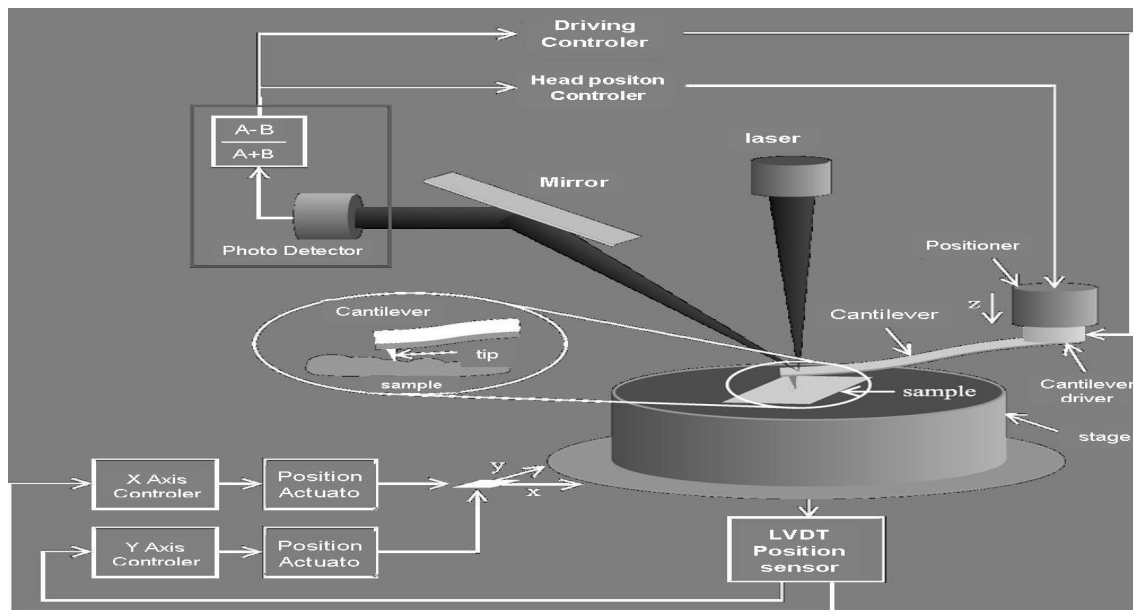
میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)

میکروسکوپ نیروی اتمی یا AFM¹ دستگاهی است که برای بررسی خواص و ساختار سطحی مواد در ابعاد نانومتر بکار می رود. انعطاف پذیری، سیگنالهای بالقوه متعدد، و امکان عملکرد دستگاه در مدهای مختلف محققین را در بررسی سطوح گوناگون، تحت شرایط محیطی متفاوت توانمند ساخته است. این دستگاه امکان عملکرد در محیط خلاء، هوا، و مایع را دارد. بر خلاف اکثر روشهای بررسی خواص سطوح، در این روش غالباً محدودیت اساسی بر روی نوع سطح و محیط آن وجود ندارد. با این دستگاه امکان بررسی سطوح رسانا یا عایق، نرم یا سخت، منسجم یا پودری، بیولوژیک و آلی یا غیر آلی وجود دارد. خواص قابل اندازه گیری با این دستگاه شامل مورفولوژی هندسی، توزیع چسبندگی، اصطکاک، ناخالصی سطحی، جنس نقاط مختلف سطح، کشسانی، مغناطیس، بزرگی پیوندهای شیمیایی، توزیع بارهای الکتریکی سطحی، و قطبش الکتریکی نقاط مختلف می باشد. در عمل از این قابلیتها برای بررسی خوردگی، تمیزی، یکنواختی، زبری، چسبندگی، اصطکاک، اندازه و غیره استفاده می شود.

نحوه عملکرد AFM:

شکل (۱) بطور نمادین اجزای اصلی دستگاه AFM را نشان می دهد.

¹Atomic Force Microscope



شکل ۱- شماتیک اصول عملکرد AFM

اصول کلی کار AFM بدین صورت است که یک سوزن^۲ بسیار تیز و ظریف به نوک یک شیء با قابلیت ارتجاع به نام تیرک^۳ وصل شده و سر دیگر تیرک به یک بازوی پیزو الکتریک متصل شده است. پشت لرزانک با یک لایه نازک از فلز، برای بهبود انعکاس باریکه لیزر از آن، روکش شده است. انعکاس باریکه لیزر به منظور آگاهی از جهتگیری تیرک در فضا می باشد. با اعمال اختلاف ولتاژهای مناسب به پیزو الکتریک^۴ در راستاهای x, y, z و محل اتصال تیرک به پیزوالکتریک را می توان به هر نقطه دلخواه از فضای سه بعدی، با دقت آنگستروم، منتقل کرد.

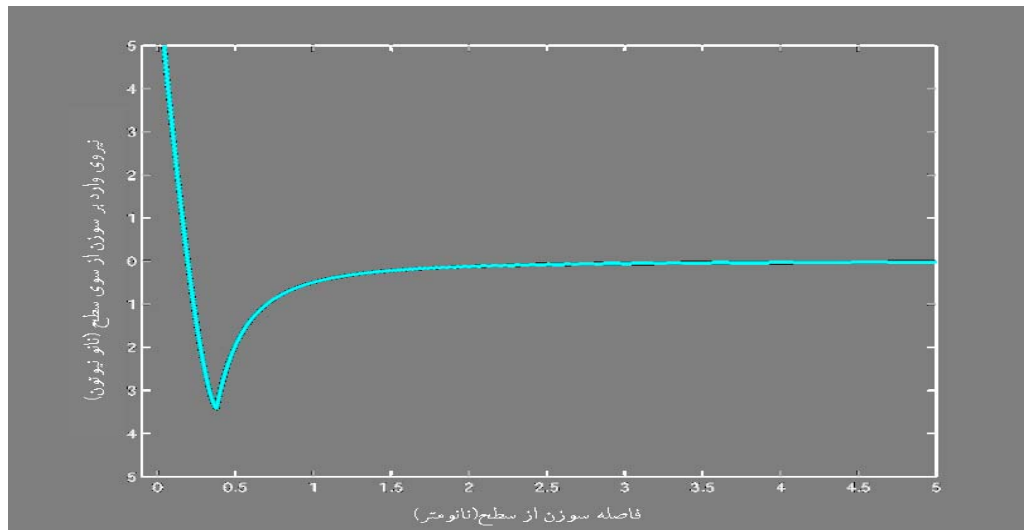
² Tip

³ Cantilever

⁴ پیزو الکتریکها نوعی سرامیک هستند که با اعمال اختلاف ولتاژهای معمولی به دو سر آن طول آن از مرتبه یک آنگستروم تغییر می کند. از این مواد برای جابجاییهای بسیار دقیق استفاده می شود.

از طرفی به هنگام مجاورت سوزن با سطح نمونه، نیرویی به سوزن وارد می شود که بزرگی و جهت آن

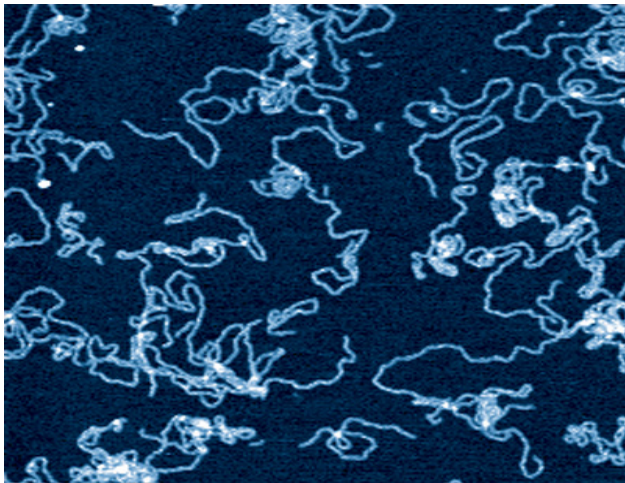
وابسته به فاصله نوک سوزن از سطح و همچنین نوع سطح است. (شکل ۲)



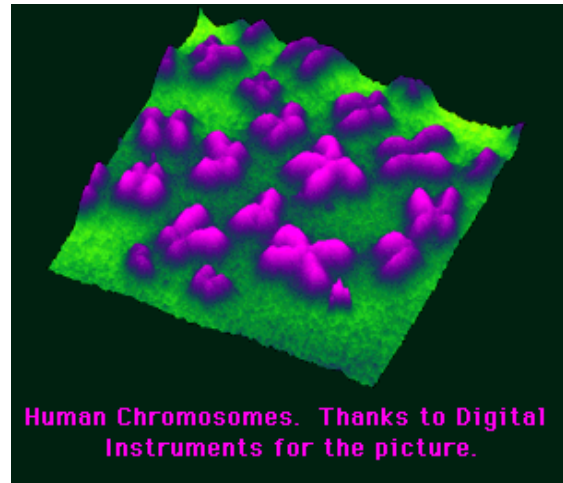
شکل ۲- منحنی تابعیت نیروی وارد بر سوزن از فاصله سوزن از سطح

نیروی ناشی از سطح باعث خم شدن تیرک می شود و باریکه لیزر در صفحه عمود بر افق جابجا می شود. در نتیجه با آگاهی از میزان خمیدگی تیرک توسط دیویدهای نوری و از طرفی معلوم بودن مکان انتهایی تیرک، موقعیت فضایی سوزن مشخص می شود. از سوی دیگر میزان خمیدگی تیرک بیانگر فاصله سوزن از سطح است که با توجه به مشخص بودن موقعیت فضایی سوزن، موقعیت فضایی سطح تعیین می شود.

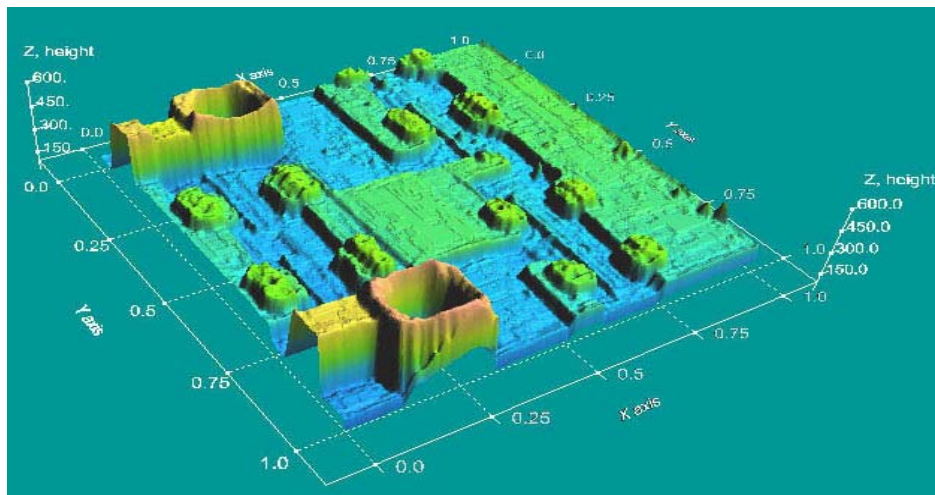
با تغییر پیوسته اختلاف ولتاژهای اعمال شده به پیزوالکتریک، سوزن سطح نمونه را جاروب^۵ می کند و با مکانیزم یاد شده موقعیت تک تک نقاط سطح معین می شود و نتیجه در نمایشگر یک کامپیوتر بصورت یک سطح سه بعدی رسم می شود. در شکل های ۳، ۴، ۵ و ۶ عکس های سه بعدی جالبی بعنوان مثال آورده شده است.



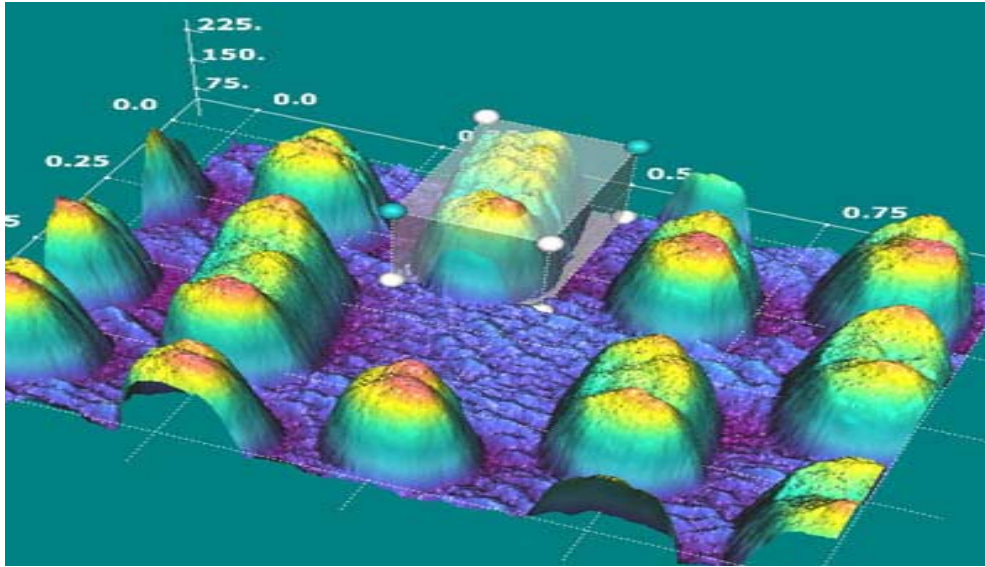
شکل ۴- تصویر مستقیم از ساختار نواری DNA توسط AFM. قابل توجه که قطر DNA ۲ nm است



شکل ۳- تصویر مستقیم و سه بعدی از کروموزومهای انسانی توسط AFM.



شکل ۵- ساختار هندسه سه بعدی سطح قسمتی از یک مدار مجتمع (IC) را نشان می دهد که توسط AFM تهیه شده است. (هر واحد افقی نمودار ۲۵۰ نانومتر و درجه عمودی ۱۵۰ نانومتر)



شکل ۶- ساختار هندسه سه بعدی واحدهای حافظه CD تهیه شده توسط AFM. (هر واحد افقی نمودار ۲۵۰ نانومتر و درجه عمودی ۷۵ نانومتر)

نکته ای که باید برای بدست آوردن بهترین دقت در نتایج اندازه گیری به آن توجه کنیم این است که باید حین فرآیند جاروب سطحی فاصله سوزن از سطح در محدوده مناسبی باقی بماند. چرا که از یک طرف فاصله زیاد (در این نواحی نیروی جاذبه است) موجب کم شدن میزان انحراف لرزانک و کاهش نسبت سیگنال به نویز در تعیین مولفه Z مکان سطح می شود. از طرف دیگر فاصله بسیار نزدیک موجب وارد شدن نیروی زیاد به سطح می شود که علاوه بر آسیب زدن به ساختار سطح و سوزن موجب کاهش درجه تفکیک خواهد شد. بعنوان مثال در مد تماسی AFM (نیروی بین سوزن و سطح دافعه است) برای بدست آمدن بهترین نتایج، فاصله در حدود چند آنگستروم تنظیم می شود که نیروی دافعه ای به بزرگی 10^{-9} N توسط سوزن به سطح وارد شود. فرآیند ثابت ماندن فاصله سوزن از سطح حین روبش سطحی، بطور پیوسته بوسیله یک مدار فیدبک الکترونیکی صورت می گیرد.

شکل ۷- در بیان جابجایی عمودی وافقی باریکه لیزر بازتابیده به ترتیب بر اثر نیروی عمود و مماس بر افق وارد بر تیرک

شکل ۸- خمیدگی $\bar{\alpha}$ تیرک موجب جابجایی $2\bar{\alpha}$ باریکه لیزر بازتابیده بر روی دیود نوری میشود.

از طرفی دیود نوری این قابلیت را دارد که شدت نور لیزر را در هر کدام از نواحی چهارگانه اندازه گیری کند (این دیودها از موادی ساخته شده اند که نور فرودی را به جریان الکتریکی تبدیل می کنند) در اینصورت از روی نسبت پوشش نواحی چهارگانه با محاسبات ساده هندسه تحلیلی می توان میزان انحراف افقی و عمود بر افق باریکه لیزر را تعیین کرد.

قابل توجه اینکه ماهیت روش بکار گرفته شده برای تعیین تغییر جهت گیری تیرک ایجاب می کند که جابجایی باریکه لیزر بازتابیده بر روی دیود نوری حدود ۲۰۰۰ برابر تغییر در خمیدگی لرزانک باشد و همین نکته باعث توانایی AFM در آشکار سازی خمیدگی هایی به بزرگی یک آنگستروم تیرک می شود.

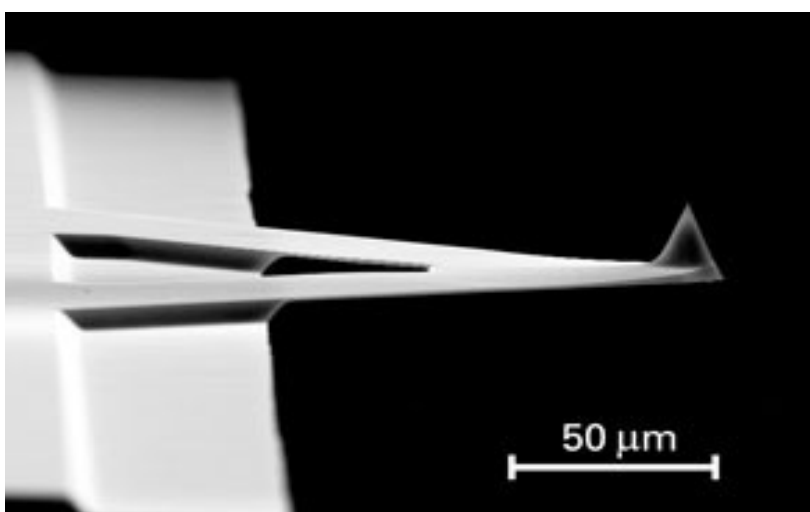
هندسه تیرک:

رایج ترین تیرکهای مورد استفاده عبارتند از بازو مثلثی و تخته گونه. (شکل ۹ و ۱۰) معمولاً از تیرک بازو مثلثی هنگامی استفاده می شود که پیچش محوری^۸ تیرک نامطلوب باشد (به عنوان مثال وقتی در مد تماسی در صدد تعیین مور فولوژی سطح هستیم). در زیر مشخصات هندسی تیرکهای ساخته شده توسط شرکت میکروماسک^۹، یکی از سازندگان توانای سوزن و تیرک در دنیا ارائه می شود

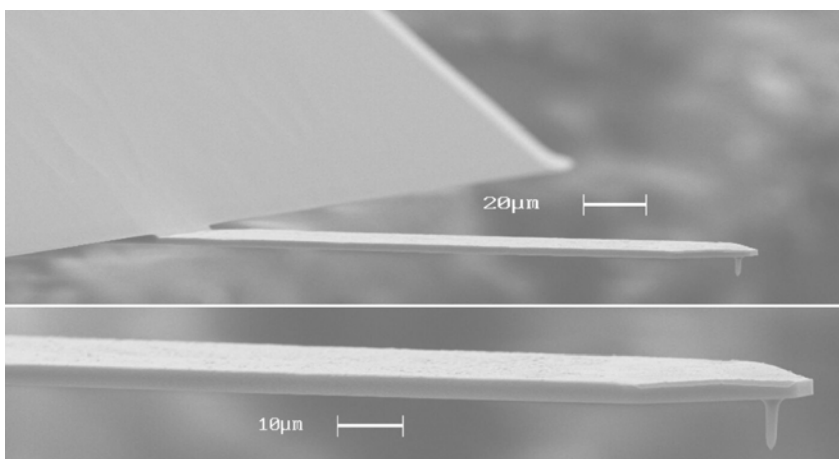
⁸ - twisting

⁹ - MikroMasch

مشخصات تیرکها	شرکت میکروماسک	آمار ادعا شده در نوشتجات دیگران
Length l , μm طول	۹۰-۴۶۰	> 10
Width w , μm عرض	۳۵-۶۰	> 3
Thickness s , μm ضخامت	۰,۷-۷,۵	$> 0,1$
Force constant k , N/m صلبیت	۰,۰۱-۹۱	۰,۰۰۱-۴۰۰
Resonant frequency f_0 , kHz فرکانس تشدید	۷-۴۲۰	۳ kHz ~ ۱۰ Mhz



شکل ۹- نمونه ای از تیرکهای بازو مثلثی



شکل ۱۰- نمونه ای از تیرکهای تخته گونه

سوزن‌ها:

بسته به مد مورد استفاده AFM و خاصیت مورد اندازه گیری از سوزنهای مختلفی استفاده می شود. زمانی که فرایند اندازه گیری مستلزم وارد کردن نیروهایی فوق العاده زیاد از جانب سوزن به سطح باشد از سوزنهای الماسی استفاده می شود. همچنین سوزنهای با روکش های الماسگونه (DLC) برای این منظور مورد استفاده قرار می گیرند. به عنوان مثال در ایجاد نانو خراشها^{۱۰} یا SSRM^{۱۱} با نیروهایی به بزرگی 10^{-5} N سرو کار داریم (این در حالیست که در مد تماسی نیروی وارد بر سطح 10^{-9} N می باشد) و باید از این نوع سوزن ها استفاده کنیم.

از روکش هایی نظیر Pt و Cr - Au برای محافظت سوزن در برابر شرایط خشن محیطی استفاده می شود. برای جلوگیری از تجمع بارها (یا یونها) در سطح سوزن خصوصاً در EFM^{۱۲} از روکش های رسانایی نظیر

¹⁰ - nano Scratching

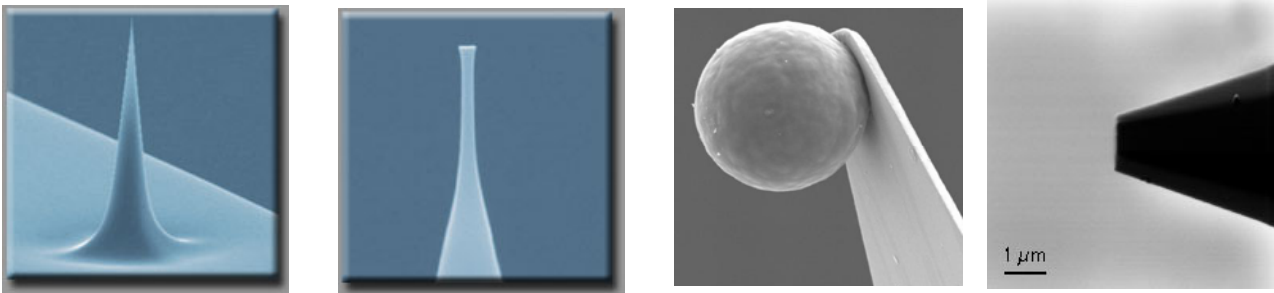
¹¹ - Scanning Spreading Resistance Microscopy

¹² - Electrostatic Force Microscopy

TiD، C₂W، TiN و DLC آلاینده^{۱۳} شده استفاده می شود.

در اندازه گیری خواص مغناطیسی نقاط سطح از سوزن هایی با روکش مواد فرو مغناطیس مانند Ni، Fe و Co استفاده می شود.

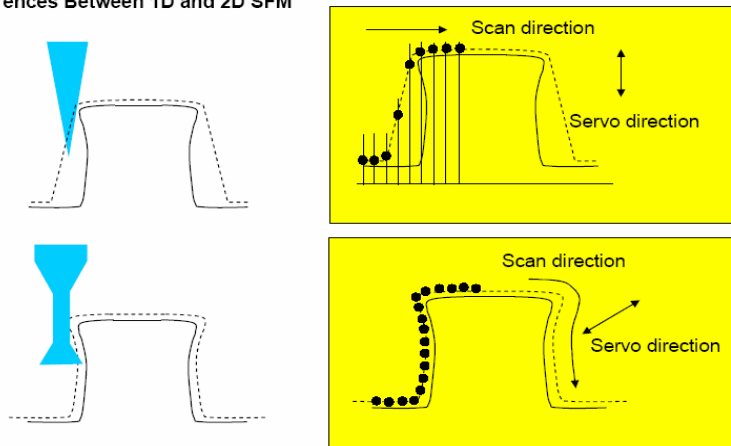
پارامترهای هندسی سوزن که نوع کارایی سوزن و میزان دقت نتایج بدست آمده را تعیین می کنند عبارتند از شکل، بلندی، نازکی (زاویه راس هرم فرضی منطبق بر نواحی نوک)، تیزی (شعاع دایره فرضی منطبق بر نوک).



شکل ۱۱- انواع شکل های سوزن شامل نوک تخت، نوک کروی، نوک T شکل و نوک تیز

سوزن های T شکل برای نقشه برداری و آشکار سازی فرورفتگی های موجود در بخش های دیواره مانند سطح نمونه به کار می رود. این در حالی است که سوزن های نوک تیز این قابلیت را ندارند (شکل ۱۳).

Differences Between 1D and 2D SFM



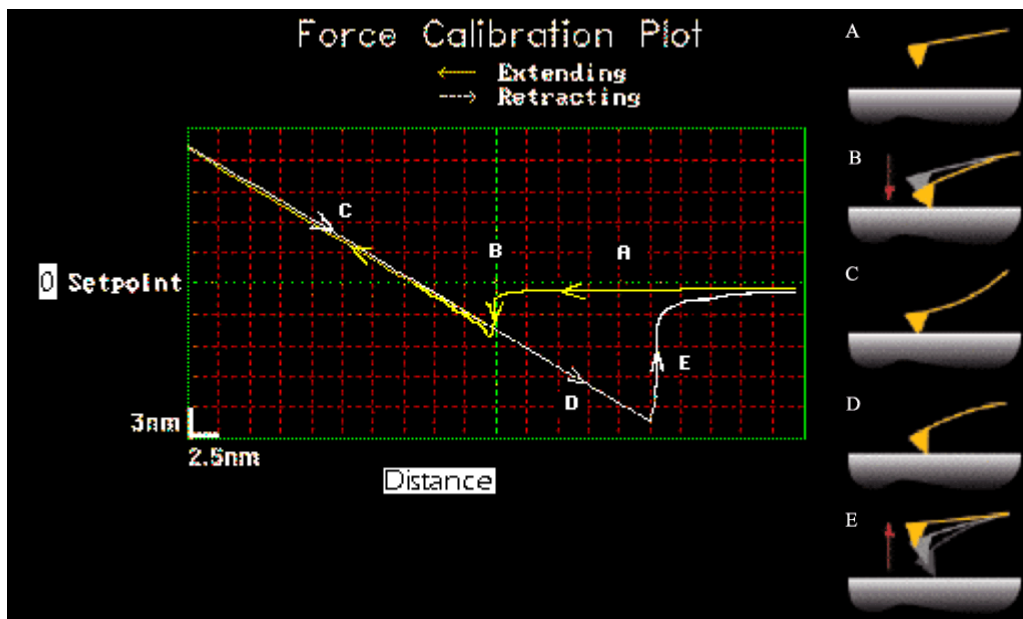
شکل ۱۲- مقایسه بین سوزن‌های نوک تیز و T شکل

از سوزن‌های نوک تخت هم برای بررسی اصطکاک نواحی مختلف سطح استفاده می‌شود. چرا که آنچه در عمل به صورت اصطکاک نمایان می‌شود رفتار جمعی مجموعه از اتم‌های سطح است و نه یک نقطه به اندازه یک اتم.

سوزن‌های کروی به دلیل سطح تماس بسیار بزرگی که با سطح نمونه مورد بررسی دارند نیروی وارد بر واحد سطح بسیار ناچیزی به سطح وارد می‌کند، در نتیجه نمونه‌های بسیار نرم و حساس با این روش قابل بررسی می‌باشند. در عین حال به دلیل برهمکنش موثر ناحیه وسیعی از سطح با نقاط متعددی از این سوزن‌ها درجه تفکیک تصویر نهایی افت می‌کند. بنابراین وقتی درجه تفکیک خیلی بالا برای محققین ضروری نیست این سوزن‌ها وسیله ایده آلی برای تهیه تصویر از سطوح نرم و حساس، بدون نیاز به ایجاد شرایط محیطی ویژه (ایزوله کردن ارتعاشی مجموعه اندازه‌گیری، کالیبراسیون‌های دقیق)، محسوب می‌شوند. بعنوان مثال این سوزن‌ها کاربرد وسیعی در مطالعه انواع سطوح بیولوژیک یافته‌اند.

نحوه برهم کنش سوزن با سطح :

شکل ۱۴ به طور نمادین بزرگی و تغییرات نیروی بین سوزن و سطح را در فواصل مختلف سوزن از سطح نشان می دهد. جهت فلش ها نشان دهنده نزدیک شدن (رفت) یا دور شدن (برگشت) سوزن نسبت به سطح می باشد



شکل ۱۳- سمت چپ: نمایش نمادین بزرگی و تغییرات نیروی بین سوزن و سطح در فواصل مختلف سوزن از سطح
سمت راست: انحراف تیرک حین رفت و برگشت در نواحی مختلف فاصله از سطح (نیروی جاذبه یا دافعه)

هدف از مشخص کردن منحنی نیرو بر حسب فاصله این است که: (۱) تعیین مشخصات مختلف سطح مد نظر باشد. (۲) فاصله بهینه روبشگر از سطح (که کمترین نیرو از جانب سوزن به سطح وارد می شود) مطلوب باشد. چرا که باید حین فرایند روبش سطح توسط سوزن کمترین آسیب به سطح برسد تا بیشترین دقت اندازه گیری حاصل شود.

نیروهای عمل کننده بین سوزن و سطح شامل نیروهای بلند برد و کوتاه برد می باشند. نیروهای واندروالس،

الکترواستاتیک، مغناطیسی جزء نیروهای بلند برد هستند. در این میان نیروی واندروالس در تمام آزمایش‌ها وجود دارد. نیروی واندروالس عبارت از برهم کنش جاذبه دو قطبی‌های القایی است و به صورت Γ^{-6} تغییر می‌کند. نیروهای کوتاه برد عبارتند از چسبندگی، کشسانی نیروی کوانتومی (ناشی از عدم تمایل تطابق کامل ابر الکترونی مولکول‌ها) و نیروهای کووالانسی.

شکل منحنی بدست آمده در حالت کلی تابعی از خواص سطح (مکانیکی، الکترواستاتیکی، مغناطیسی، چسبندگی) و شرایط محیطی نمونه (خلا، هوا، مایع، PH مایع) و مشخصات مکانیکی سوزن (تیزی، شکل، جنس) و تیرک (شکل، صلیبت) می‌باشد. معمولاً مشخصات مکانیکی سوزن و تیرک در کالیبراسیون اولیه دستگاه AFM مشخص می‌شود. در نتیجه تحلیل و بررسی نمودار نیرو بر حسب فاصله سوزن از سطح، مشخصات سطح و محیط آنرا آشکار می‌کند. منظور از تحلیل و بررسی نمودار ابتدا مشخص کردن نقاط اکسترمم، پرش (یافت ناگهانی)، شکستگی و تیزی، نیروی صفر، شیب منحنی در نواحی مختلف، هیستریزس (میزان تفاوت منحنی نزدیک شدن به سطح با منحنی دور شدن) می‌باشد. سپس هر کدام از این حالات و شدت آنها بررسی می‌شوند.

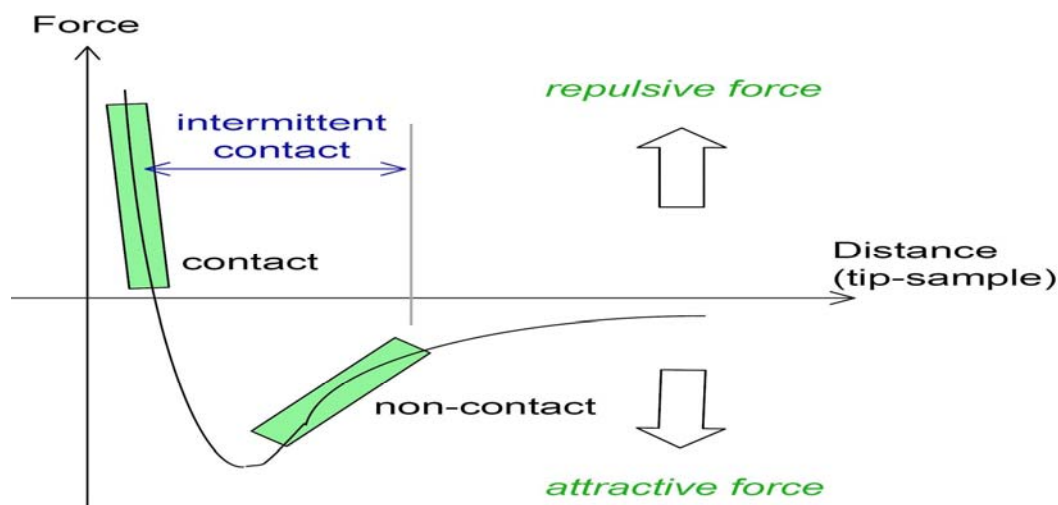
مدهای مختلف AFM:

بر حسب ناحیه عملکرد سوزن، مدهای AFM به سه دسته کلی تماسی^{۱۴} (تقریباً نزدیکتر از ۵ آنگستروم) شبه تماسی^{۱۵} (بین ۴ آنگستروم تا ۳۰ آنگستروم) و غیر تماسی^{۱۶} (بین ۳۰ تا ۱۵۰ آنگستروم) تقسیم می‌شوند. (شکل ۱۴).

Contact Mode¹⁴

Semicontact Mode¹⁵

Noncontact Mode¹⁶



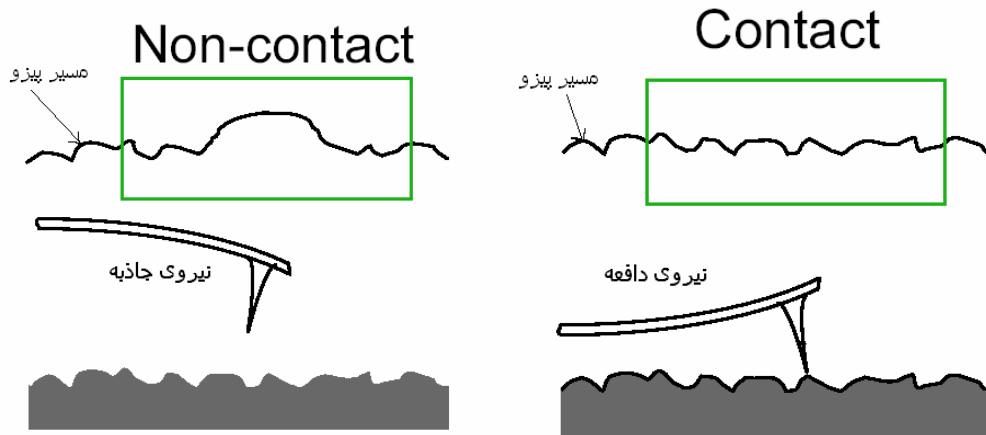
شکل ۱۴

مدهای تماسی و شبه تماسی هر کدام بر حسب ارتعاش یا عدم ارتعاش تیرک به دو دسته A.C. و D.C. طبقه بندی می شوند. در ناحیه غیر تماسی به دلیل ناچیز بودن سیگنال نیرو معمولاً فقط از مد A.C استفاده می شوند. لازم به ذکر است که برای تنظیم بهینه پارامترهای AFM در هر مد، ابتدا در یک مکان نمودار نیرو بر حسب فاصله از سطح اندازه گیری می شود و با توجه به این نمودار پارامترها انتخاب می شوند. البته بسیاری از دستگاههای AFM بطور خودکار این پارامترها را تعیین می کنند. در ادامه هر کدام از این دسته ها را با تفصیل بیشتری بررسی می کنیم و انواع آنها را به اجمال معرفی می کنیم.

مدهای تماسی:

مطابق تعریف به ناحیه ای " ناحیه تماس " می گویند که نیروی بین سوزن و سطح دافعه باشد. در مقایسه با مدهای دیگر نیروی وارد شده به سطح در مدهای تماسی بزرگتر است. از طرفی به دلیل تماس پیوسته سوزن با سطح حین فرآیند روبش نیروهای اصطکاک قابل توجهی (علاوه بر نیروی عمودی) به سطح و سوزن وارد می

شود که موجب آسیب دیدگی سطوح حساس و کند شدن سوزن می گردد (شکل ۱۵).



شکل ۱۵- مقایسه نمادین بین حالت تماسی و حالت غیرتماسی

بر این اساس مطالعه سطوح حساس و نرم با مدهای تماسی قدرت تفکیک اندازه گیری را کاهش می دهد و بعضاً باعث بروز خطای سیستماتیک در نتایج می شود. در عین حال بیشترین قدرت تفکیک و دقت اندازه گیری با AFM مربوط به بررسی سطوح سخت با سوزنهای نازک و فوق تیز و سخت در مد تماسی می باشد.

مد نیرو ثابت:

در این مد حین فرآیند روبش نیروی سوزن به سطح (فاصله سوزن از سطح) توسط مدار فیدبک ثابت نگه داشته می شود. در نتیجه حین فرآیند روبش، مسیر طی شده توسط پیزو الکتریک با مسیر سوزن و با توپوگرافی

سطح یکسان می باشد و نمودار سطح با دقت بسیار بالایی تعیین می شود. در واقع در هر گام روبش، آنقدر مدار کنترلی فیدبک به پیزو فرمان تغییر ارتفاع می دهد تا فاصله سوزن از سطح مورد نظر ثابت قرار گیرد.

یکی از مسائل نامطلوب این روش مدت زمان زیاد روبش کامل سطح است چرا که در هر گام روبش مدار فیدبک چندین بار به پیزو فرمان تغییر ارتفاع می دهد تا اینکه فاصله سوزن از سطح به بازه مورد نظر برسد.

از طرفی هر چه تفکیک پذیری عرضی بیشتری لازم باشد گام های روبش کوچکتری مورد نیاز است و به تناسب سرعت روبش کمتر می شود. بر این اساس طراحی بهینه مدار فیدبک اهمیت پیدا می کند. برای رسیدن به سرعت های قابل قبول مدار فیدبک باید فرکانس تکرار حدود 10 KHZ داشته باشد.

از مهمترین مزیت های این روش یکی دقت بسیار بالای تعیین توپوگرافی سطوح سخت است. دیگر اینکه حین روبش سطح، علاوه بر مشخص شدن توپوگرافی هندسی، کمیات دیگری از سطح، مانند اصطکاک، توزیع مقاومت الکتریکی و، بطور همزمان تعیین می شوند. یکی از محدودیتهای این روش در تعیین مشخصات سطوح نرم است چرا که توپوگرافی حین روبش توسط سوزن، بدلیل لزوم تماس آن با سطح، تغییر می کند و در نتیجه دقت و تفکیک پذیری اندازه گیری کاهش پیدا می کند.

مد ارتفاع ثابت:

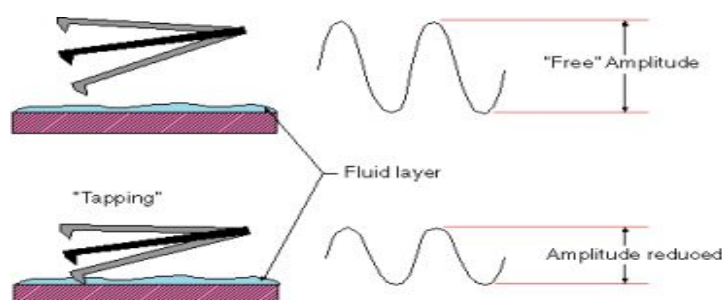
در این مد ارتفاع پیزوالکتریک حین فرآیند روبش تغییر نمی کند و حرکت آن در یک سطح کاملاً افقی صورت می گیرد. در نتیجه وابسته به فاصله پیزو از سطح نمونه مورد بررسی، نیرویی به سوزن وارد می شود. با ثبت انحرافات لرزانک حین فرآیند اندازه گیری نمودار نیروی وارد بر سوزن حین فرآیند روبش مشخص می شود و با توجه به تابعیت نیروی وارد بر سوزن از فاصله آن تا سطح، اختلاف ارتفاع نقاط مختلف سطح از ارتفاع پیزو معلوم می شود، که همان توپوگرافی سطح می باشد. سرعت روبش سطحی در این روش بسیار زیاد

است چرا که فرآیند کنترل ارتفاع وجود ندارد تا سیکل مدار فیدبک سرعت روبش را کند کند (تنها عامل تعیین کننده سرعت روبش سرعت عکس العمل لرزانک در تغییر جهتگیری است که در مقایسه با مدار فیدبک بسیار سریعتر است).

محدودیت جدی این روش این است که فقط سطوح نسبتاً هموار را می تواند بررسی کند. از طرفی بدلیل عدم کنترل ارتفاع ممکن است سوزن در نقاطی به سطح فشار وارد کند که سطح نمونه های نرم در این مورد تغییر می کند که منجر به کاهش قدرت تفکیک نتایج می شود.

روشهای شبه تماسی:

همانطور که قبلاً گفته شد به ناحیه بین ناحیه تماسی و غیر تماسی بعلاوه بخش کوچکی از ناحیه تماسی (حدود ۴ آنگستروم تا ۳۰ آنگستروم) " ناحیه شبه تماسی " گویند. از مد شبه تماسی در ادبیات فعلی نانو با واژه های مختلفی نام برده می شود که همگی یک معنی دارند. این واژگان عبارتند از Semicontact Mode، Intermittent Contact Mode و Tapping Mode. شایان ذکر است که ناحیه شبه تماسی، اندکی با ناحیه تماسی همپوشانی دارد. به منظور دستیابی به نسبت سیگنال به نویز حداکثر از مدهای متناوب (A.C.) در این ناحیه استفاده می شود.



شکل ۱۶- دامنه نوسانات تیرک تابعی از فاصله پیزو از سطح است.

حین فرآیند روبش ناحیه نوسانات تیرک به گونه‌ای است که به ناحیه تماسی هم نفوذ می‌کند و در هر دوره تناوب یکبار سطح را لمس می‌کند (تحت نیروی دافعه قرار می‌گیرد). با کاهش ارتفاع پیزوالکتریک تیرک در حال نوسان به سطح نزدیک می‌شود. در این شرایط دامنه اش کاهش می‌یابد و از روی اندازه کاهش دامنه فاصله پیزوالکتریک از سطح تعیین می‌شود.

اختلاف فاز ارتعاشات تیرک با منبع القاکننده ارتعاش وابسته به مشخصات مکانیکی سطح، از قبیل مدول یانگ و سختی است. بنابراین با اندازه‌گیری اختلاف فاز، مشخصات مکانیکی سطح معلوم می‌شوند. همچنین ثابت شده است که فرکانس تشدید تیرک در حال ارتعاش بر اثر حرکت در گرادیان نیرو تغییر می‌کند. در نتیجه اندازه‌گیری تغییرات فرکانس تشدید، ما را از جزئیات نمودار نیرو بر حسب فاصله سوزن از سطح آگاه می‌کند.

بر خلاف روش غیرتماسی که سیگنال نیرو بدلیل دوری از سطح کوچک است و منجر به کاهش دقت اندازه‌گیری می‌شود سیگنال نیرو در روش شبه تماسی مناسب است. دقت اندازه‌گیری مدهای شبه تماسی با دقیقترین روش‌های تماسی برابری می‌کند، در عین حال با توجه به ماهیت این روش نیروهای عرضی، که بیشترین آسیب را به نمونه‌ها در مد تماسی وارد می‌کند، وجود ندارد. همچنین به دلیل مدت زمان بسیار کمتری که سوزن در تماس مؤثر با سطح است (به سطح نیروی دافعه وارد می‌کند) فشار مؤثر سوزن در این روش از مدهای تماسی کمتر است. همچنین با استفاده از القاگرهای غیرمکانیکی، مانند اعمال میدان مغناطیسی متناوب به تیرکی که یک لایه فرو مغناطیس در پشت آن لایه نشانی شده است، نویز بسیار کمتر می‌شود و در نتیجه "سیگنال به نویز" افزایش می‌یابد. در نتیجه با دامنه‌هایی کوچکتر از قبل می‌توان سیگنال قابل قبولی بدست

آورد. استفاده از دامنه های کمتر به معنی کاهش نیروی عمودی سوزن به سطح است. بر این اساس امکان مطالعه سطوح نرم و حساس با دقت های بالا میسر می شود در حالیکه این مساله در مدهای تماسی ممکن نیست. استفاده از این روش در محیط مایع نیز ممکن است. چرا که اولاً نیروهای مویین حذف می شوند که باعث تضعیف شدید تفکیک پذیری اندازه گیری می شوند و ثانیاً در محیط مایع با تغییر PH و غلظت یونها و ... می توانیم شرایطی را ایجاد کنیم که نیروی سوزن به سطح به کمینه مقدار خود برسد. نتیجه این مساله امکان بررسی سطوح حساستر با دقت اندازه گیری بیشتر می باشد.

مد دامنه ثابت :

همانطور که گفتیم تغییر دامنه ارتعاشات، نسبت به ارتعاشات آزاد، وابسته به بزرگی نیروی مؤثر عمل کننده بر لرزانک (میانگین زمانی نیرو در یک گام روبش سطحی) می باشد. و به جنس سطح در آن نقطه چندان وابسته نیست از طرفی با تقریب بسیار خوبی، بزرگی این نیروی مؤثر با فاصله مؤثر لرزانک از سطح تناظر یک به یک دارد. در نتیجه ثابت ماندن اندازه دامنه در خلال روبش سطحی دلیل بر ثابت ماندن فاصله پیزو الکتریک از سطح حین فرآیند روبش سطحی است. در نتیجه با ثبت مسیر طی شده توسط پیزو الکتریک بوسیله مدار کنترلی، میتوان هندسه سطح را تعیین کرد. مزیت این روش توانایی تهیه نقشه هایی با تفکیک پذیری بالا از سطوح نرم و آسیب پذیر می باشد. نقطه ضعف این روش مدت زمان طولانی روبش کامل سطح است، چرا که ارتفاع پیزو الکتریک در هر گام روبش، چندین مرتبه توسط مدار کنترل فیدبک تغییر می کند (به منظور ثابت نگه داشتن دامنه نوسان). هر چه تغییر ارتفاع در گام جدید شدیدتر باشد (مانند پله ها) دفعات تغییر ارتفاع افزایش می یابد در نتیجه هر چه تعداد پستی بلندیهای سطح بیشتر و شیب آنها شدیدتر باشد (مانند پله ها) مدت زمان مورد نیاز برای روبش کامل سطح به مراتب طولانی تر خواهد بود. البته با صرف نظر کردن از پاره ای از اطلاعات سطحی می توان، با سرعت قابل قبولی، نقشه پستی بلندی های مهم و بزرگ سطح را با تفکیک پذیری

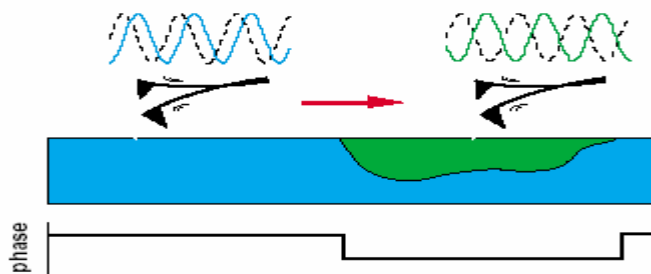
بالایی معین کرد. روش بکار رفته را مد « خطای شبه تماسی » می گویند. این روش پستی بلندیهای ملایم را آشکار نمی کند.

برای دیدن یک انیمیشن آموزشی به آدرس زیر مراجعه کنید:

؟؟

مد تصویر برداری از اختلاف فاز:

در هر گام روبش، وابسته به جنس سطح (مثلاً چسبندگی و مدول یانگ سطح) نمودار نیرو بر حسب فاصله پیزو از سطح متفاوت است. در این حالت ارتعاشات پیزو نسبت به ارتعاشات تیرک اختلاف فاز خواهند داشت که بزرگی آن به جنس سطح در آن نقطه بستگی دارد. بنابراین از نقشه اختلاف فاز در نقاط مختلف سطح بعنوان عاملی برای تمایز جنس نقاط مختلف سطح استفاده می شود.



شکل ۱۷- تفاوت اختلاف فاز پیزو نسبت به لرزانک در نقاط با جنس متفاوت سطح

همچنین از این نقشه برای افزایش تفکیک پذیری و بهبود سایر نقشه های سطحی از قبیل نقشه نیروی عرضی و اصطکاک، توزیع مقاومت الکتریکی، و در حالت کلی انواع مدهای تعیین مشخصات مکانیکی سطح استفاده می شود.

کاربردها:

همانطور که گفتیم دقت بالا، عدم محدودیت در بررسی اغلب سطوح در شرایط محیطی مختلف، عدم نیاز به آماده سازی نمونه در اغلب موارد، سرعت بالای اندازه گیری، تهیه تصاویر سه بعدی و توانایی بررسی انواع خواص سطحی موجب توجه ویژه و رو به رشد به AFM در حوزه های مختلف تکنولوژی کاربردی اعم از الکترونیک، هوا فضا، خودروسازی، علم مواد، بیولوژی، ارتباطات از راه دور، انرژی، داروسازی، لوازم آرایشی، پتروشیمی و شده است.

بطور کلی دلیل استفاده از AFM در حوزه های مختلف تکنولوژی عبارت است از:

۱- بررسی کیفیت ساختار و خواص ادوات ساخته شده

۲- بررسی تحولات ساختار و خواص ادوات با گذشت زمان و در شرایط مختلف

منظور تکنولوژیستها از در پیش گرفتن این اهداف آگاهی از اصول بهینه سازی روشهای ساخت و

پارامترهای این روشها، افزایش کارایی مجموعه و زیاد تر شدن طول عمر ادوات است.

در ادامه این بخش مثالهایی از کاربرد AFM در حوزه های تکنولوژی ذکر می کنیم.

مطالعه فرآیندهای اصطکاکی و تحول ادوات تحت اصطکاک در ابعاد نانومتر:

در اصطلاح به علم مطالعه فرآیندهای اصطکاکی و سطوح تحت اصطکاک « تریبولوژی»^{۱۷} گفته

می شود، این علم شامل مطالعه نیروی اصطکاک (علم فیزیک) ، خوردگی (علم مواد) و روانسازها¹⁸ (علم شیمی) می باشد.

جالب توجه اینکه AFM در هر سه این بخشها ایفای نقش می کند و مطالعه سطح را با دقت نانومتر ممکن می سازد. نحوه استفاده از AFM در بخشهای مختلف این علم عبارتند از: تولید نیروی اصطکاک و تهیه نقشه اصطکاک در نقاط مختلف (بررسی اصطکاک)، تعیین مورفولوژی و نقشه هندسه و خواص مختلف سطحی (بررسی خوردگی)، و بررسی چسبندگی و لزجت لایه های روان کننده موجود در سطح (بررسی نقش روانسازها)

متالورژی و خوردگی ادوات:

خصوصیات منحصر به فرد AFM که در بالا ذکر شد موجب استفاده از این روش ، برای پیشبرد مقاصد مختلف در متالورژی و خوردگی شده است . بررسی آلیاژها، ساختار و فاز بلوری مواد، روکشهای محافظ فلزی، سطوح تحت شرایط محیطی سخت (حرارت بالا، مواد شیمیایی خورنده، اصطکاک زیاد) و کامپوزیتها مثالهایی از تاثیر AFM در علم متالورژی می باشند.

غشاها و فیلترها:

«غشا» به لایه های نازکی گفته می شوند که مخلوطی از مواد را ، بوسیله عبوردهی انتخابی یکی از آنها، از هم تفکیک می کند. عوامل تفکیک متفاوت است . مثلاً تفاوت اندازه در جدا سازی ذرات جامد معلق در سیال ، تفاوت حل شدن در غشا در جداسازی گاز اکسیژن از نیتروژن ، تفاوت بار الکتریکی در جداسازی ویروسها و باکتریها از آب نمونه هایی از این عوامل هستند. بوسیله AFM ساختار متخلخل، عمق سوراخها و

خواص سطحی غشاها و فیلترهای ساخته شده یا در حال استفاده را در ابعاد نانومتر می توان مشخص کرد. نهایتاً نتایج بدست آمده در تنظیم بهینه پارامترهای ساخت غشا و فهم نحوه عملکرد و تحول غشا (برای ساخت غشاهاى کارآمدتر مبتنى بر مکانیزم‌های درک شده) و افزایش طول عمر آن بکار گرفته می شود (چرا که با گذشت زمان مواد بر جای مانده در سوراخ‌های غشاء باعث از بین رفتن خاصیت جداکنندگی آن می شود).

کنترل کیفیت و بررسی میزان نقص‌های سطحی در واحدهای حافظه مغناطیسی

با توجه به ابعاد نانومتری واحدهای حافظه AFM وسیله‌ای ایده‌آل برای تهیه نقشه سه بعدی از ساختار و توپوگرافی سطحی واحدهای حافظه محسوب می شود. چرا که تهیه تصاویری با این دقت بوسیله روش‌های دیگر به سادگی ممکن نیست. طول، عرض، ارتفاع، شیب و همگنی هر کدام از واحدهای حافظه با دقت نانومتر تعیین می شود و نقصهای ساختاری آشکار می شوند. بر این اساس می توان از میزان مطلوبیت روش‌های ساخت و همچنین نحوه تحول سلولهای حافظه به مرور زمان بر اثر تماس با هد آگاه شد. در نهایت امکان بهینه سازی فرآیند پولیش سطحی و نحوه استفاده بهینه از روانسازها، در فرآیند تماس هد با واحد حافظه، فراهم می شود.

مقایسه AFM با سایر روشهای بررسی ساختار سطوح:

SEM	TEM	STM	AFM	نوع دستگاه مورد مقایسه
نانومتر	آنگستروم (در نوع تفکیک پذیری بالا HRTEM)	آنگستروم	آنگستروم (بررسی چیدمان اتمی سطوح بوسیله سوزنهای فوق تیز و بسیار سخت)	بیشترین دقت
۲۰۰-۴۰۰ دلار (نوع تفکیک پذیری بالا)	بالای ۵۰۰ دلار (نوع تفکیک پذیری بالا)		۲۰۰-۱۰۰ دلار (نوع تفکیک پذیری بالا)	هزینه
- چندین ساعت برای رسیدن به خلاء بالا مورد نیاز است	- بررسی نمونه های توده ای (Bulk) نیاز به چندین هفته زمان برای نازکسازی نمونه دارد. - نیاز به خلاء بسیار بالا، حداقل زمان تهیه تصویر را چندین ساعت می سازد.	- چندین ساعت برای رسیدن به خلاء بالا مورد نیاز است.	- وابسته به مد از چند دقیقه تا چند ساعت - در حالت عادی نمونه آماده سازی نمی خواهد - برای بررسی پودرها و نمونه های بیولوژیک باید فرآیند تثبیت این مواد به زیر لایه صورت گیرد. - اندازه گیری در محیط خلاء نیاز به مدت زمان تخلیه محفظه دارد.	سرعت اندازه گیری و آماده سازی نمونه

<p style="text-align: center;">محدودیت</p>	<p>- محدودیت بنیادینی بر روی نوع ماده یا محیط آن وجود ندارد و بر حسب شرایط از مد مناسب استفاده می شود.</p> <p>- تنها محدودیت این روش عدم توانایی بررسی ساختار سوراخ‌هایی با عمقی بیش از طول سوزن است (حدود ۱۰ میکرومتر)</p>	<p>- سطح مورد بررسی حتماً باید رسانا باشد.</p> <p>- برای بررسی سطوح عایق باید سطح با لایه نازکی از ماده رسانا پوشانده شود که علاوه بر زمانبر بودن باعث تغییر مورفولوژی می شود و تفکیک پذیری را به چندین نانومتر کاهش می دهد.</p> <p>- وابستگی جریان به عواملی غیر از فاصله سوزن از سطح از جمله چگالی حالات الکترونها، ولتاژبایاس، و شدت جریان (اثرات غیر خطی) موجب پیچیدگی تحلیل و توضیح نتایج می شود.</p>	<p>- سطح مورد بررسی حتماً باید رسانا باشد.</p> <p>- تهیه تصاویر سه بعدی فرآیند سرراست و استاندارد نیست و نیاز به کالیبراسیونهای پیچیده دارد.</p> <p>- تصاویر را بصورت دو بعدی تهیه می کند (عمق ندارد)</p> <p>- برای بررسی سطوح عایق باید سطح با لایه نازکی از ماده رسانا پوشانده شود که علاوه بر زمانبر بودن باعث تغییر مورفولوژی می شود و تفکیک پذیری را به چندین نانومتر کاهش می دهد.</p>
<p style="text-align: center;">مزیت</p> <p style="text-align: center;">توانمندی و</p>	<p>- امکان عمل دستگاه در محیطهای هوا، خلاء و مایع (در نتیجه امکان بررسی ذرات وموادى که در خلاء تصعید می شوند یا ذرات معلق در مایع)</p> <p>- تصاویر را بصورت سه بعدی تهیه می کند</p> <p>- بررسی جنس نقاط مختلف سطح و توزیع خواص سطحی ممکن است.</p>	<p>- دقت زیر آنگستروم</p> <p>- حساسیت زیاد جریان به فاصله سوزن از سطح [بیشتر از ۹۰٪ جریان الکتریکی گذرنده از سوزن (سیگنال) از تک ملکول نوک سوزن و نزدیکترین نقطه سطح می گذرد که باعث ناچیز بودن جریان بقیه نقاط سطح و کم شدن تداخل اطلاعات ناشی از بقیه نقاط می شود. این مساله به افزایش دقت تعیین فاصله سوزن از سطح می انجامد.]</p>	<p>- ساختار سه بعدی سوراخ‌های عمیق سطح هم قابل بررسی هستند.</p> <p>- بررسی جنس نقاط مختلف سطح و توزیع خواص سطحی ممکن است.</p>

ضمیمه ۱- لیست SPM های موجود در کشور

اسم دستگاه		میکروسکوپ پروب روبشی (Scanning probe Microscopy)	
ردیف	دانشگاه	مدل	نوع عضویت
۱	مرکز تحقیقات کاتالیست صنعت نفت	Solver P47H	عضو
۲	مرکز تحقیقات فیزیک پلاسما	-	رزرو