



نویسندگان

زهرا ثبات<sup>۱</sup>سمیه جلیلزاده آذر<sup>۲</sup>صدیقه صادق حسینی<sup>۳</sup>sadeghs@ripi.ir<sup>۴</sup>

## کاربردهای میکروسکوپ نیروی اتمی

### چکیده

میکروسکوپ نیروی اتمی<sup>۵</sup> ابزاری قدرتمند در بررسی و مطالعه‌ی گسترده‌ی متنوعی از مواد در مقیاس نانو است. به کمک این میکروسکوپ، بررسی ویژگی‌های ساختاری و فیزیکی مواد نظیر زبری، سختی، توپوگرافی و اندازه‌ی ذرات میسر است. تهیه‌ی تصویر از ذرات نانویی به‌ویژه مولکول‌های زیستی از قابلیت‌های AFM است که باعث به‌کارگیری گسترده‌ی این فناوری در حوزه‌های مختلف علوم می‌شود. همچنین این دستگاه قابلیت ایجاد تغییر و جابه‌جایی ذرات و سطوح را دارا است.

### واژه‌های کلیدی

میکروسکوپ نیروی اتمی، کاربرد میکروسکوپ نیروی اتمی، زبری، سختی، توپوگرافی، اندازه‌گیری ذرات.

### مقدمه

با اختراع میکروسکوپ نیروی اتمی، امکان تهیه‌ی تصویر و بررسی نمونه‌های گوناگون به‌ویژه نمونه‌های عایق و زیستی به‌وجود آمده است. این دستگاه با برخورداری از مزایای تهیه‌ی تصویر با توان تفکیک بالا، به‌کارگیری آسان، عدم نیاز به آماده‌سازی پیچیده‌ی نمونه، تهیه‌ی تصاویر سه‌بعدی و امکان بررسی توپوگرافی سطح به‌صورت ابزاری قابل قبول در حوزه‌های مختلف علوم و فناوری‌نانو درآمده و کاربردهای بسیار گسترده‌ای یافته است. این دستگاه بسته به مدل آن، قابلیت انجام آزمایش در شرایط خلاء محیط و مایع را داراست [۱].

با استفاده از دستگاه AFM می‌توان انواع مختلف زبری سطح را به روشی ساده در مقیاس نانو اندازه‌گیری نمود و از این طریق سطوح مختلف را به‌صورت کمی مقایسه کرد. باید توجه داشت که روش آماده‌سازی نمونه، روبش، پردازش و نیز نوع پروب مورد استفاده، در تعیین میزان زبری مؤثر بوده و لازم است این عوامل به هنگام بررسی نمونه‌های مختلف به‌منظور مقایسه، به‌صورت یکسان انتخاب شوند [۱ و ۲].

### کاربردهای AFM

میکروسکوپ نیروی اتمی در حوزه‌های مختلف نظیر شیمی، مواد، علوم زیستی، پزشکی و سایر موارد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله برخی از مهمترین کاربردهای دستگاه AFM به‌صورت مختصر توضیح داده می‌شود.

### اندازه‌گیری زبری سطح مواد

یکی از مشخصات مهم سطح ماده زبری است که با تحت تأثیر قرار دادن نیروی چسبندگی، ویژگی‌های الکترونی و نوری و نیز انرژی سطح، بر کیفیت ساختار سطح ماده اثرگذار است.

### اندازه‌گیری سختی سطح

میکروسکوپ نیروی اتمی با حساسیت و توان تفکیک بالا،



توانایی تشخیص عوامل در مقیاس نانو است [۱]. در مطالعه‌ای رفتار نانوتریبولوژیکی میکا در شرایط حضور و عدم حضور روان‌کارها به کمک روش میکروسکوپی AFM بررسی شده‌است. در این مطالعه، توپوگرافی و نیروی اصطکاک در محیط مایع اندازه‌گیری شده‌است. این مطالعه نشان می‌دهد، مقدار سیگنال اصطکاک برای میکا در حالت بدون حضور روان‌کار حدود ۵۰ بار بزرگ‌تر است از مقدار اصطکاک در حالتی که روان‌کار وجود ندارد. همچنین در این مطالعه مشخص شد که ضریب اصطکاک برای میکای روان‌کاری شده با روغن حاوی نانو مواد افزودنی در مقایسه با روغن پایه، پایین‌تر است [۶].

### تهیه‌ی تصویر فاز برای تشخیص طرح‌های روی سطح

تصویر فاز یا به‌طور دقیق‌تر تأخیر فاز را می‌توان در حالت ارتعاشی به‌دست آورد. در این حالت، مدار کنترل از افت دامنه نوسان تیرک برای تعیین حرکت عمودی روبشگر استفاده می‌کند. علاوه بر این وقتی سوزن به نمونه نزدیک می‌شود، فاز نوسان آن تغییر می‌کند. برای داشتن یک تصویر فاز باید حداقل دو جزء با جنس متفاوت در نمونه است. تصویربرداری فاز به خواص نمونه و سبندگی بین سوزن و نمونه حساس است. این بدین معنی است که بسیاری از مواد با تصویر فاز از هم تشخیص داده می‌شوند، اگر چه شناسایی مواد براساس سیگنال‌های فاز، شش ممکن نیست و وابسته به عوامل متعددی نظیر روش تنظیم دستگاه و عامل روبش است [۱].

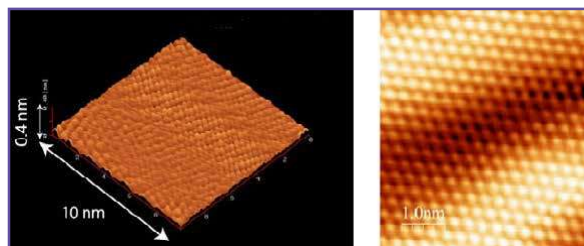
### اندازه‌گیری نانوذرات

بسیاری از خواص منحصر به فرد نانوذرات به‌طور مستقیم به اندازه‌ی آن‌ها مربوط است. با استفاده از میکروسکوپ AFM به سادگی می‌توان اندازه‌ی نانوذرات را اندازه‌گیری نمود. با قرار دادن مقدار کمی از سوسپانسیون نانوذرات روی سطوح صاف نظیر میکای

قابلیت اندازه‌گیری سختی سطح نمونه‌های مختلف را دارد. این توانایی به‌ویژه برای درک خواص مکانیکی پلیمرهای کامپوزیتی و تأثیر مواد افزودنی در خواص نظیر سختی و الاستیسیته حائز اهمیت است و امکان اندازه‌گیری عواملی نظیر مدول یانگ را فراهم می‌سازد [۱ و ۳].

### تصویربرداری از ساختار بلورها در مقیاس نانومتر

از جمله قابلیت‌های مهم دستگاه AFM، امکان تهیه‌ی تصویر از ساختار بلوری با توان تفکیک اتمی است. در شکل (۱)، تصاویری از ساختار بلوری میکا و لایه‌ی طلا (۱۱۱) نشان داده شده‌است که با استفاده از دستگاه AFM و با توان تفکیک اتمی تهیه شده‌است و با استفاده از آن می‌توان آرایش اجزاء سازنده‌ی سطح را مشاهده نمود.



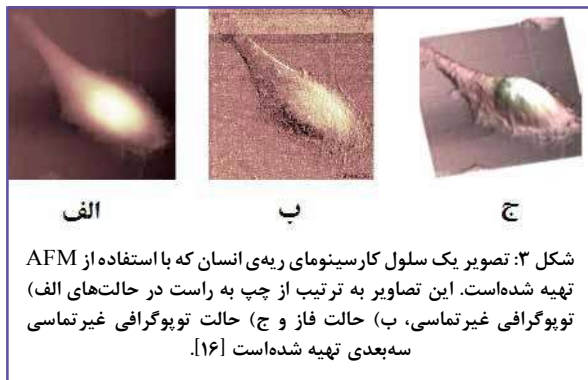
شکل ۱: دو نمونه از تصاویر با توان تفکیک اتمی. تصویر سمت چپ، مربوط به سطح میکا و تصویر سمت راست مربوط به سطح تک لایه‌ی طلا (۱۱۱) است [۴ و ۵].

### اندازه‌گیری نیروی اصطکاک

تعیین خواص اصطکاک و مشخصات مواد ناهمگن براساس خواص اصطکاک با استفاده از میکروسکوپ نیروی جانبی یا میکروسکوپ نیروی اصطکاک در مقیاس اتمی یا ماکروسکوپی میسر است. مزیت این روش، امکان مطالعه‌ی تریبولوژی در سطح اتمی و

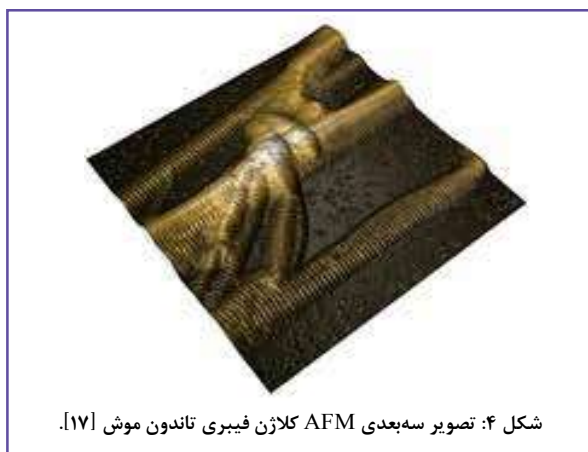
زیست شناسی و علوم دارویی بسیار با اهمیت است. AFM به دلیل توانایی تهیهی تصویر از نمونه‌های نرم در آب، توان تفکیک بالا و قابلیت تهیهی تصویر در شرایط فیزیولوژیکی برای مطالعهی مولکول‌های زیستی مناسب است.

تاکنون، با این روش گونه‌های مختلفی از باکتری‌ها نظیر استافیلوکوکوس، باسیل‌ها، استروپتوکوس‌ها و سالمونلا بررسی شده و تغییرات مورفولوژی آنها در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها مطالعه شده‌است [۱۲ و ۱۳]. همچنین، به کمک آن، تغییرات مورفولوژی و ایجاد حفره‌های کوچک روی غشای چربی به طور مسقیم مورد مطالعه قرار گرفته است [۱]. علاوه بر این، مطالعهی پاسخ سلول به سطح نانو ساختار و نیز برهم‌کنش سلول - سطح در زمان واقعی با سلول زنده نیز با این روش امکان پذیر است. همچنین می‌توان خواص کانیکایی سلول و تفاوت سختی<sup>۷</sup> بین قسمت‌های مختلف سلول‌های مشابه را با AFM اندازه‌گیری نمود. به عنوان مثال، بررسی تفاوت کانیکایی سلول‌های سالم و مریض، به راحتی با این میکروسکوپ قابل مطالعه است [۱، ۱۴ و ۱۵]. در شکل (۳)، تصاویر تهیه شده از سلول زنده‌ی حیوانی با استفاده از AFM نشان داده شده‌است.



شکل ۳: تصویر یک سلول کارسینومای ریه‌ی انسان که با استفاده از AFM تهیه شده‌است. این تصاویر به ترتیب از چپ به راست در حالت‌های الف) توپوگرافی غیرتماسی، ب) حالت فاز و ج) حالت توپوگرافی غیرتماسی سه بعدی تهیه شده‌است [۱۶].

کلاژن‌ها فراوان‌ترین پروتئین در طبیعت هستند و بیش از ۲۵ درصد کل بدن را تشکیل می‌دهند. کلاژن نوع میبری نیز بیش از همه در بدن جانوران یافت می‌شوند. نمونه‌ای از این نوع کلاژن که در تاندون موش یافت می‌شود، با AFM تصویربرداری شده‌است. شکل (۴) تصویر سه بعدی این کلاژن را نشان می‌دهد. در این تصویر چگونگی اتصال و قرار ری فیبرهای کلاژن به خوبی نمایان است [۱۷].



شکل ۴: تصویر سه بعدی AFM کلاژن فیبری تاندون موش [۱۷].

لایه‌برداری شده و خشک کردن آن، تصویر نانوذرات تهیه شده و سپس اندازه‌ی آنها سنجیده می‌شود. در شکل (۲)، نمونه‌هایی از تصاویر نانوذرات که به کمک AFM تهیه شده‌است، مشاهده می‌شود [۷ و ۸].



شکل ۲: نمونه‌ای از تصاویر نانوذرات، الف) کروی، ب) میله‌ای و ج) نانوذرات مثلثی [۸ و ۷].

خواص یکی برخی نانوذرات مانند نانولوله ای کربنی بسیار مورد توجه هستند. اندازه‌گیری این خواص به دلیل مشکلات مربوط به تثبیت نانوذره در دستگاه ای معمولی به راحتی امکان پذیر نیست ولی در AFM به سادگی قابل اجرا است. روش فشار عمودی، یکی از روش‌های بررسی ساختار نانولوله‌ها است که از طریق اتصال یا رشد نانولوله روی پروب و سپس فشار دادن آن روی سطح جامد و یا رشد توده‌ای ساختارهای نانولوله روی سطح و سپس استفاده از پروب برای فشردن کردن آن‌ها، انجام می‌شود [۹ و ۱۰].

ویژگی‌های الکتریکی نانوذرات نیز با استفاده از AFM قابل اندازه‌گیری است. به عنوان مثال، می‌توان خواص الکتریکی یک نانولوله کربنی<sup>۶</sup> منفرد را با AFM و از طریق قرار دادن یک الکتروود (پروب AFM هدایتی) در هر نقطه‌ی دلخواه در طول نانولوله بررسی نمود و برای تشخیص نقص‌های موجود در CNT اولیه و اندازه‌گیری اثر آن در خواص الکتریکی آن‌ها به کار برد [۱۰ و ۱۱].

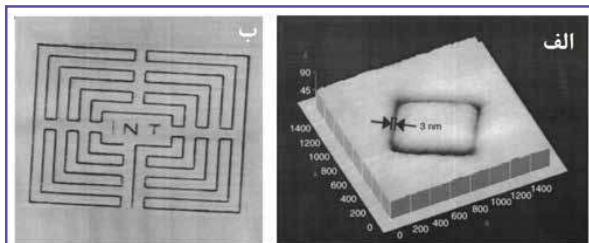
### ساخت نانوقطعات

با استفاده از AFM می‌توان قطعات نانویم مانند نانوسیم‌ها و نانوترانزیستورها را از اجزای کوچک اتمی یا مولکولی ساخت. به عنوان مثال، به کمک AFM می‌توان نانوذرات کوچک طلا را به صورت زنجیره‌ای از ذرات روی سطح مرتب نمود و به صورت هسته‌هایی به منظور رسیب بعدی طلا و تشکیل نانوسیم طلا به کار برد [۱].

### تصویربرداری از مولکول‌های زیستی

مولکول‌های زیستی، پایه و اساس حیات را تشکیل می‌دهند. بنابراین درک ساختار، عامل‌ها و برهم‌کنش آنها برای پیشرفت

در همین راستا، دانشمندان از توانمندی میکروسکوپ AFM در بررسی ترکیبات کلان‌های فیبردار برای معی قرنیه‌ی چشم استفاده نموده‌اند و جزئیات ساختاری آن را مورد مطالعه قرار داده‌اند. <sup>۱</sup> نیهی چشم قبلاً با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نیز بررسی شده بود، ولی به دلیل این که در بررسی‌های AFM نیازی به روکش کردن یا خشک کردن نمونه برای آماده‌سازی نیست و روش مطالعه‌ی AFM غیرمخرب است، نتایج به دست آمده از دقت بالاتری برخوردار است. در شکل (۵) تصویری از قرنیه‌ی چشم انسان نشان داده شده که با میکروسکوپ AFM به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهند که غشای پایه شامل آرای جعبه‌مانندی از فیبرها، برجستگی‌ها و منفذها در ابعاد نانومتری است. همچنین تصاویر نشان می‌دهند که گرچه اجزاء ساختاری در دو غشاء قدامی و دسمه مشابه یکدیگرند ولی این اجزا در غشاء دسمه در مقایسه با غشاء قدامی کوچک‌تر و فشرده‌تر هستند [۱۸].



شکل ۶: تصاویر AFM از شیارهای مستطیل شکلی که در دو وضعیت (الف) ساده و (ب) پیچیده با روش نانولیتوگرافی در حالت اعمال نیرو و با استفاده از AFM روی سطح میکا ایجاد شده‌است [۲۱].

### مطالعه‌ی چگونگی رشد بلور

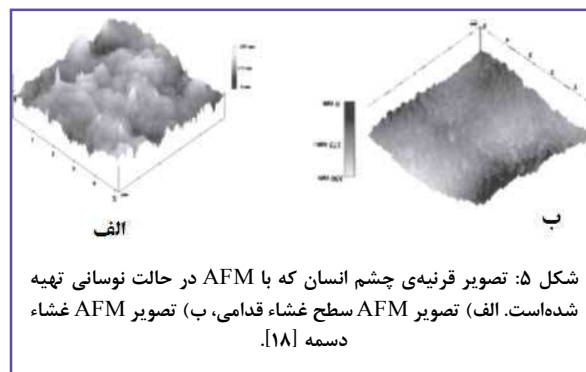
سلول واحد کوچکترین واحد هندسی بلور است. به هنگام تشکیل بلور، اتم‌ها در یک ساختار مشخص در فواصل منظم به‌گونه‌ای قرار می‌گیرند که برآیند نیروهای جاذبه و دافعه‌ی بین آنها صفر شود. با توجه به این که نیروهای جاذبه و دافعه‌ی بین اتم‌های مختلف با یکدیگر متفاوت است، سلول‌های واحد نیز به تعداد و نوع اتم‌های سازنده بستگی داشته و برای انواع مواد متفاوت هستند. ترکیبات بسیاری نظیر شیشه و مواد پلیمری اصولاً فاقد ساختار بلوری بوده و عمدتاً به‌صورت ساختار آمورف و یا ساختار چند بلوری تشکیل می‌شوند.

ساده‌ترین حالت برای تشکیل یک ساختار بلوری، تجمع مولکول روی سطح یک هسته‌ی اولیه و سپس پیوستن دیگر مولکول‌ها در سطوح بعدی است. در این فرایند جزایر دو چکی تشکیل شده که به تدریج به یکدیگر می‌پیوندند. در این حالت پله‌هایی روی سطح ایجاد می‌شود. در روشی دیگر، به هنگام تشکیل بلور پله‌های مارپیچی تشکیل می‌شود که می‌توانند در طول فرایند تشکیل بلور جابه‌جا شده و تپه‌های چندلایه‌ای را به وجود آورند.

با توجه به این که میکروسکوپ AFM علاوه بر امکان تهیه‌ی تصویر از سطوح رسانا توانایی تهیه‌ی تصویر از سطوح عایق و نیمه‌رسانا را نیز دارا است و همچنین می‌تواند در محیط‌های آبی و محلول‌های شفاف به‌خوبی عملیات تصویربرداری را انجام دهد، ابزار بسیار کارآمد برای مطالعه‌ی رشد بلور محسوب می‌شود. قابلیت تعیین بسیار دقیق اندازه‌ی ذرات و توانایی نشان دادن وجوه هندسی بلورها در سه بعد از دیگر مزیت‌های میکروسکوپ AFM در مطالعه‌ی بلورها است [۲۲ و ۲۳].

تاکنون ساختار بلوری ترکیبات مختلفی به کمک AFM مطالعه و چگونگی رشدشان بررسی شده‌است. به‌عنوان نمونه، در سال ۱۹۹۶، رشد بلور نمک NaCl با تصویربرداری از سطح (۰۰۱) به‌وسیله AFM انجام شد. شکل (۷)، تصویر AFM رشد این بلور را نشان می‌دهد.

در همین راستا، دانشمندان از توانمندی میکروسکوپ AFM در بررسی ترکیبات کلان‌های فیبردار برای معی قرنیه‌ی چشم استفاده نموده‌اند و جزئیات ساختاری آن را مورد مطالعه قرار داده‌اند. <sup>۱</sup> نیهی چشم قبلاً با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نیز بررسی شده بود، ولی به دلیل این که در بررسی‌های AFM نیازی به روکش کردن یا خشک کردن نمونه برای آماده‌سازی نیست و روش مطالعه‌ی AFM غیرمخرب است، نتایج به دست آمده از دقت بالاتری برخوردار است. در شکل (۵) تصویری از قرنیه‌ی چشم انسان نشان داده شده که با میکروسکوپ AFM به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهند که غشای پایه شامل آرای جعبه‌مانندی از فیبرها، برجستگی‌ها و منفذها در ابعاد نانومتری است. همچنین تصاویر نشان می‌دهند که گرچه اجزاء ساختاری در دو غشاء قدامی و دسمه مشابه یکدیگرند ولی این اجزا در غشاء دسمه در مقایسه با غشاء قدامی کوچک‌تر و فشرده‌تر هستند [۱۸].



شکل ۵: تصویر قرنیه‌ی چشم انسان که با AFM در حالت نوسانی تهیه شده‌است. (الف) تصویر AFM سطح غشاء قدامی، (ب) تصویر AFM غشاء دسمه [۱۸].

### نانولیتوگرافی

کلیدهای تغییراتی که با استفاده از سوزن میکروسکوپ پروبی روبشی در مقیاس نانو روی سطح ایجاد می‌شود، نانولیتوگرافی گفته می‌شود. با کمک این روش می‌توان به‌صورت کاملاً کنترل شده طرح‌های مختلفی با ابعاد نانومتری روی سطح ایجاد نمود. یکی از ابزارهای دقیق و کارآمد برای اجرای نانولیتوگرافی، دستگاه AFM است که علاوه بر ایجاد طرح امکان مشاهده و کنترل مستقیم تغییرات را نیز فراهم می‌آورد.

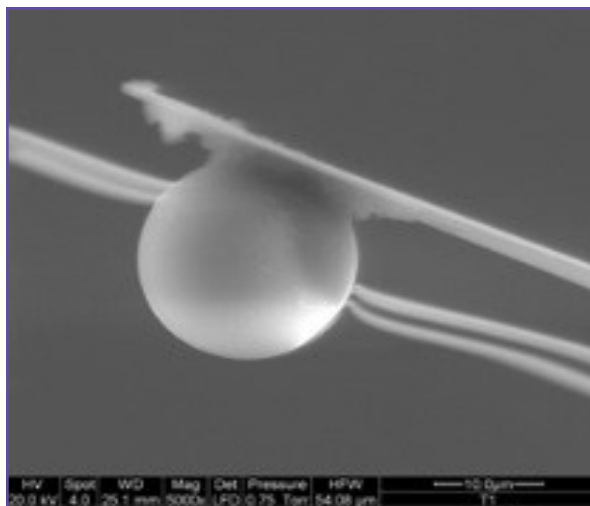
نانولیتوگرافی به دو روش متفاوت مکانیکی و الکتریکی انجام می‌شود. در روش مکانیکی، سوزن با نیرویی قابل کنترل بر سطح فشار آورده و از این طریق خراش ایجاد می‌کند و برای سطوح نرم و قابل انعطاف مناسب است. در روش الکتریکی با برقراری یک ولتاژ القا، بین سوزن و سطح، جریان الکتریسته از سوی سوزن هادی به منطقه‌ای مشخص از سطح منتقل شده و شرایط را برای اکسیداسیون منطقه‌ای فراهم می‌کند. بدین ترتیب طرح مورد نظر از طریق رشد لایه‌ی اکسیدی در محل برقراری ولتاژ به‌وجود می‌آید. روش‌های متنوع دیگری مانند جابه‌جایی اتم‌ها، اعمال نیرو، روش رومکانیکی، اکسیداسیون موضعی، واکنش شیمیایی موضعی، قلم آغشته،<sup>۱</sup> قلم دارای روزنه<sup>۲</sup> و پیوندزنی با نیروی بالا<sup>۳</sup> نیز برای انجام

میکروسکوپ AFM با قابلیت اندازه ریز مستقیم نیروهای سطحی بین مواد می‌تواند اندازه‌گیری نیروهای چسبندگی را به خوبی انجام دهد. برای این منظور، ابتدا سوزن‌های AFM با موادی که می‌خواهیم نیروی چسبندگی آن را مورد ارزیابی قرار دهیم، آغشته شده و یا به صورت شیمیایی عامل‌دار می‌شوند. سوزن آماده شده به صورت متناوب به سطح نمونه نزدیک شده و سپس از آن دور می‌شود. با توجه به مشخص بودن ثابت فنر تیرک، نیروی اعمالی از طرف سوزن به سطح نمونه در نقاط مختلف سطح اندازه‌گیری می‌شود.

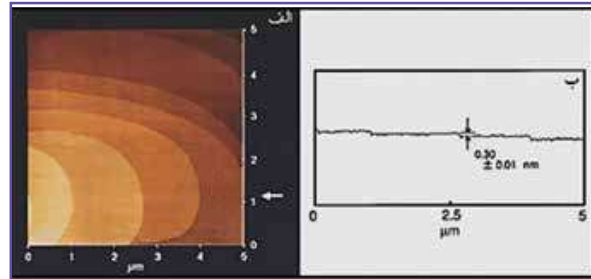
به هر حال باید توجه داشت که آماده‌سازی سوزن باید براساس منشأ نیروی چسبندگی انجام شود و اندازه‌گیری صحیح نیروی چسبندگی، نیازمند تعریف درستی از هندسه‌ی تماس، تمیز بودن سطح و استفاده از خلاء بسیار بالا است. دستیابی به وضوح بالا معمولاً با استفاده از سوزن‌های بسیار تیز امکان‌پذیر است ولی در مورد اندازه‌گیری نیروی چسبندگی به دلیل ایجاد فشار بسیار زیاد در محل تماس و وابستگی شدید سطح تماس به جهت دندان‌ها ناهمواری‌ها، نمی‌توان از این نوع سوزن‌ها استفاده نمود.

برای رفع این مشکل استفاده از پروب‌های کلوئیدی پیشنهاد شده‌است. در این نوع پروب‌ها یک ذره‌ی کروی شکل به نوک سوزن چسبانده می‌شود و بدین ترتیب امکان اندازه‌گیری نیروی چسبندگی برای یک ذره‌ی خاص و مجزا فراهم می‌شود. با این روش همچنین می‌توان تأثیر عوامل محیطی نظیر رطوبت، زبری سطح و شکل ذره را روی نیروی چسبندگی تعیین نمود [۲۴].

در شکل (۹)، تصویر یک پروب کلوئیدی مشاهده می‌شود که در آن یک ذره‌ی کروی شکل سیلیکا به انتهای تیرک چسبانده شده‌است. از این پروب کلوئیدی برای اندازه‌گیری نیروی چسبندگی روی ویفر سیلیکونی پوشیده شده با لایه‌ی نازک اکسیدی، استفاده شده‌است. منحنی نیرو - فاصله این اندازه‌گیری در شکل (۱۰) نشان داده شده‌است [۲۵].

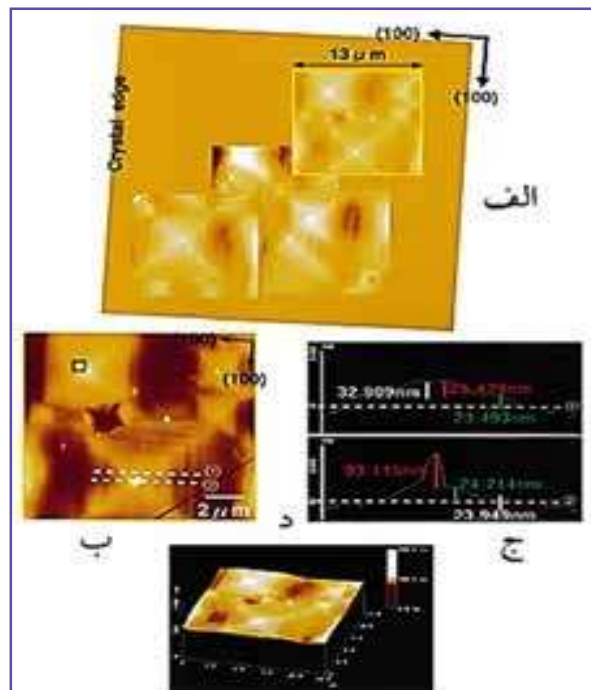


شکل ۹: تصویر SEM پروب کلوئیدی که در آن یک ذره‌ی کروی سیلیکا به انتهای سوزن چسبانده شده‌است [۲۴].



شکل ۷: تصویر سطح بلور NaCl (۰۰۱) و چگونگی رشد آن [۲۲].

در مطالعه‌ی دیگر تک بلور LTA که در شرایط هیدروترمال سنتز شده‌است، به کمک AFM بررسی و تصویربرداری شد. شکل (۸)، تصویر AFM سطح (۱۰۰) این بلور را نشان می‌دهد.



شکل ۸: تصویر AFM از سطح (۱۰۰) تک بلور LTA در محلول آبی (الف) تصاویر AFM از سطح (۱۰۰) تک بلور LTA در محلول آبی (۰/۱ نرمال NaOH (ب) تصویر AFM از سطح (۱۰۰) تصویر «الف»: (ج) سطح مقطع عرضی در راستای خطوط (۱) و (۲) تصویر «ب»: (د) تصویر سه‌بعدی AFM برای تصویر «ب» [۲۳].

### اندازه‌گیری نیروی چسبندگی سطح نانومواد

نیروهایی که مولکول‌های یک ماده در سطح بر یکدیگر وارد می‌آورند و چگونگی برهم‌کنش این نیروها بر هم، بسیاری از فرایندهای فیزیکی و شیمیایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. علاوه بر این، اصطکاک سطح و ساختار ناهمواری‌های سطح نیز تحت تأثیر این نیرو هستند. همچنین در فناوری‌ی پیشرفته برای به کار ریز پلیمرهای رسانا در قطعات الکترونیکی، لازم است نیروهای سطحی این ترکیبات در مقیاس نانو به خوبی مورد ارزیابی قرار گیرند.

با استفاده از روابط مربوطه محاسبه می‌شود.

برای نمونه‌های نظیر سلول‌ها و بافت‌های نرم که کوچک و غیرهموزن هستند، از AFM به‌عنوان خراش‌دهنده نرم نانویی استفاده می‌شود و از این طریق الاستیسیته این ترکیبات مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [۲۹ - ۲۶].

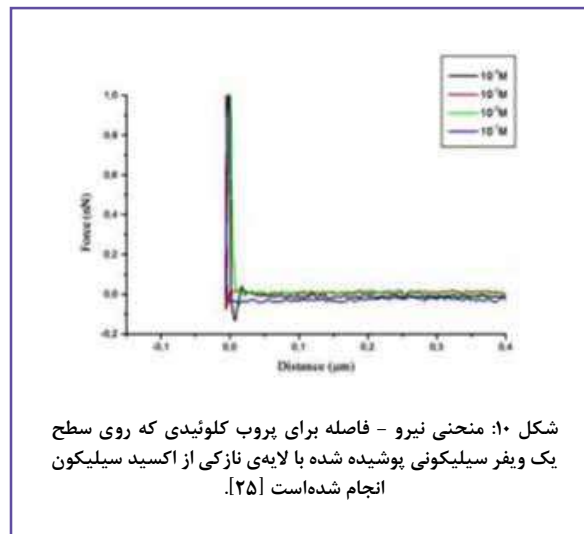
### مطالعه‌ی رفتار حرارتی مواد در ابعاد نانومتر

یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد یک ماده، خواص حرارتی آن است که روی ویژگی‌های الکتریکی ترکیبات نیز تاثیر می‌گذارد و اندازه‌گیری و بررسی چگونگی رفتار آن در رکیبات نانویی اهمیت خاصی یافته است. برای بررسی این اثر از روش تجزیه‌ی حرارتی استفاده می‌شود که این روش خود به روش مختلفی مانند کالریمتری روبشی تفاضلی<sup>۱۱</sup>، روش مدول دمایی کالریمتری روبشی تفاضلی<sup>۱۲</sup>، روش تجزیه ترمومکانیکی<sup>۱۳</sup> و روش تجزیه دینامیک - مکانیکی<sup>۱۴</sup> قابل اجراست.

در روش‌های معمول تجزیه‌ی حرارتی، مقدار اندکی از نمونه‌ی مورد نظر داخل یک کوره‌ی الکتریکی قرار گرفته و تغییرات حرارتی آن در مقابل تغییرات حرارتی پودر  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  که به‌عنوان ونه‌ی شاهد مورد استفاده قرار می‌گیرد، ثبت می‌شود. به هر حال در این روش، ویژگی حرارتی به‌صورت میانگین برای حجم معینی از نمونه بدست می‌آید و امکان حذف کامل اثر آلودگی در این روش تقریباً وجود ندارد. برای دستیابی به دقت بالا و یافتن خواص حرارتی به‌صورت مرتبط با مورفولوژی سطح و همچنین امکان انتخاب منطقه‌ی مشخصی برای بررسی نمونه، روش تجزیه‌ی حرارتی با روش میکروسکوپی AFM تلفیق شده‌است. در این حالت از یک پروب حرارتی در میکروسکوپ استفاده می‌شود که توانایی برقراری جریان الکتریسیته برای تولید حرارت را داشته باشد. تغییرات موضعی هدایت گرمایی سطح نمونه باعث ایجاد تغییر در جریان الکتریکی می‌شود. در این روش، تصویر توپوگرافی و تصویر حرارتی سطح نمونه به‌صورت هم‌زمان ثبت شده و نمودار تغییرات گرمایی در مقیاس نانو رسم می‌شود. این سیستم به‌گونه‌ای طراحی شده‌است که گرمایش موضعی در آن می‌تواند با سرعتی بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بر دقیقه تغییر کند.

در شکل (۱۱) تصویر AFM، آنالیز ریزحرارتی<sup>۱۵</sup> به‌همراه نمودار تجزیه‌ی حرارتی در دو نقطه‌ی انتخابی روی نواحی تاریک و روشن تصویر MTA نشان داده شده‌است. پیک شدید مشاهده شده در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد نشان‌دهنده‌ی حالت استحاله ذوب است.

در این روش علاوه بر سنجش خواص حرارتی نمونه، می‌توان بهره گرفتن از روش‌های کروماتوگرافی و طیف‌سنجی جرمی، گازهای شیمیایی که بر اثر حرارت از سطح نمونه خارج می‌شوند را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد و از این طریق امکان تجزیه‌ی شیمیایی موضعی سطح نمونه را نیز فراهم آورد. ایجاد جوش و اتصال در ترکیبات پلیمری و حکاکی روی نانو‌ساختارهای پلیمری از دیگر توانمندی‌های این روش است [۳۳ - ۳۰].



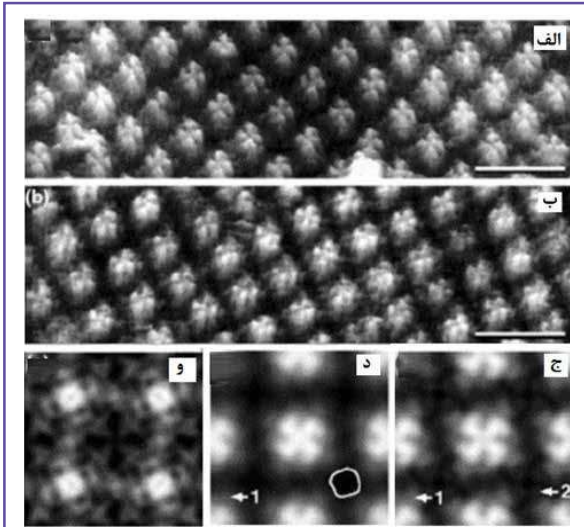
شکل ۱۰: منحنی نیرو - فاصله برای پروب کلونیدی که روی سطح یک ویفر سیلیکونی پوشیده شده با لایه‌ی نازکی از اکسید سیلیکون انجام شده‌است [۲۵].

روش اندازه‌گیری نیروی چسبندگی در علوم زیستی به ویژه سنجش عملکرد آنتی‌بیوتیک‌ها و اجزای پیوندی بسیار حائز اهمیت است. این روش در بررسی رفتار پلیمرهای هادی که امروزه به‌عنوان واختمانی بنیادی در فناوری الکترونیک مولکولی کاربرد یافته‌اند نیز نقش مهمی ایفا می‌کند.

### اندازه‌گیری مدول الاستیسیته مواد نانو ساختار

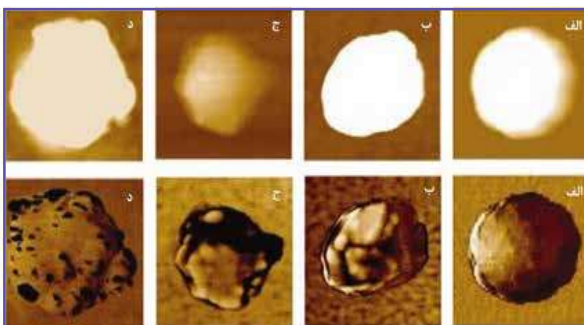
میکروسکوپ آکوستیک نیروی اتمی یکی از انواع AFM و وسیله بسیار مناسب برای اندازه‌گیری مدول الاستیسیته است. مدول الاستیسیته در واقع نسبت تنش به کرنش یک ماده بوده و برای هر ماده یک مقدار ثابت است. از مدول الاستیسیته به‌عنوان یکی از راه‌های شناسایی مواد مختلف استفاده می‌شود. در این نوع میکروسکوپ با ایجاد ارتعاش مافوق صوت در تیرک مورد استفاده و براساس پیر طیف نوسان تیرک، ویژگی‌های مکانیکی ماده سنجیده می‌شود. برای کمی نمودن این اندازه‌گیری معمولاً از مدل‌سازی براساس تئوری تماس هرگز استفاده می‌شود. برای این منظور، ابتدا ابعاد طول و عرض و ضخامت و همچنین شعاع نوک سوزن با استفاده از کالیبراسیون و تهیه تصویر SEM محاسبه می‌شود. سپس نمونه‌ی مورد نظر به کمک همان سوزن روبش شده و نمودار نیرو و نمودار نوسان تیرک برحسب فرکانس ارتعاش سوزن رسم می‌شود. در پایان مدول یانگ یا همان مدول الاستیسیته با تعیین نیروی ایجاد شده در فرکانس رزونانس نمونه و با کمک روابط موجود، محاسبه می‌شود.

برای اندازه‌گیری مدول یانگ با کمک میکروسکوپ AFM، به‌ویژه برای ترکیباتی که امکان تهیه‌ی نمونه با ابعاد استاندارد برای آنها وجود ندارد، می‌توان از روش آزمون خمش استفاده نمود. در این روش نمونه به رشته‌های بسیار باریکی تبدیل شده و اندازه‌گیری مدول یانگ روی این رشته‌ها انجام می‌شود. رشته‌ها با استفاده از یک نگه دارنده به پیژوالکتریک متصل شده و پیژوالکتریک با حرکت عمودی به سمت بالا و پایین، نیروی عمودی اعمال شده به سر رشته را اندازه‌گیری کرده و بدین ترتیب، میزان خمیدگی رشته



شکل ۱۲: تصاویر AFM از آکوابورین (AQP1) انسانی و چگونگی عملکرد دارو روی این پروتئین. الف) تصویر بلورهای AQP1 قبل از این که در مواجهه با کربوکسی پپتیداز Y قرار گیرند. ب) بعد از مواجهه با کربوکسی پپتیداز Y. ج) متوسط همبستگی متقارن یک ساختار آسیاب شکل را در ارتفاع ۱/۵nm نشان می‌دهد. د) متوسط همبستگی متقارن AQP1 بعد از این که در معرض کربوکسیلات قرار گیرد که به نظر می‌رسد ساختار آسیاب شکل بدون تغییر باقی مانده است. و) اختلاف بین تصاویر توپوگرافی بین تصاویر AQP1 هضم نشده و هضم شده که نشان‌دهنده تأثیر دارو است [۳۵].

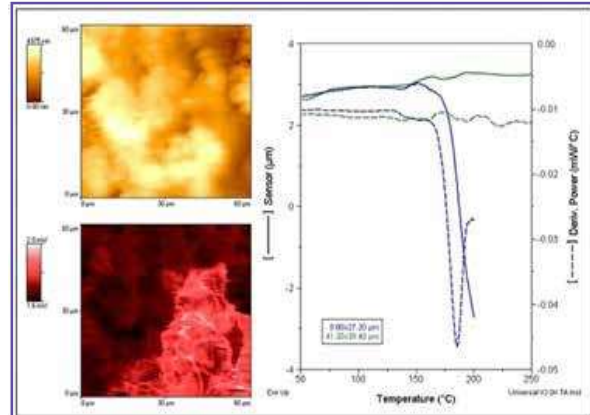
در شکل (۱۳) نیز چگونگی تأثیرگذاری داروی پلی (D, L-لاکتید) (PLA) و پلی ایلن گلیکول (PEG) روی سلول پرو بین به کمک AFM به تصویر کشیده شده است [۳۵].



شکل ۱۳: تصاویر AFM که در حالت نوسانی از چگونگی تأثیرگذاری نانوذرات دارویی روی سلول پروتئین تهیه شده است. تصاویر ردیف اول تصاویر توپوگرافی و تصاویر ردیف دوم تصاویر فاز هستند. الف) PLA، ب) PEG 1% -g-PLA، ج) PEG 5% -g-PLA، د) (PLA-PEG-PLA) n [۳۵].

### صنعت نیمه‌هادی‌ها

به منظور ایجاد قابلیت بررسی و تهیهی تصویر از قطعات الکترونیکی در مقیاس نانومتری، از ابزارهای ویژه‌ای برای اندازه‌گیری ویژگی‌های الکترونیکی استفاده می‌شود. به عنوان نمونه در شکل (۱۴)، تصویر ساختار خازن سیلیکونی BiCMOS



کل ۱۱: تصویر AFM (سمت چپ بالا) و تصویر حرارتی (سمت چپ پایین) و نمودارهای آلیز ریزحرارتی در دو نقطه‌ی انتخابی از نواحی تاریک و روشن تصویر MTA [۳۲].

### ثبت صدای حشرات زنده

میکروسکوپ AFM با برخورداری از حساسیت بالا در ثبت نوسانات زیر نانومتر با دامنه‌ی کمتر از اندازه‌ی یک اتم در فرکانس‌های بالا (حداکثر تا ۱۰۰۰ هرتز)، بلیت ثبت صداهای حشراتی مانند پشه و کفشدوزک را دارد. برای انجام ثبت صدای حشره، پروب AFM در تماس با سطح بدن حشره قرار می‌گیرد. انتظار می‌رود نتایج حاصل از این مطالعات در شناخت بیشتر فیزیولوژی حشرات و کنترل آفت‌های ناشی از حشرات موثر باشد [۳۴].

### کاربرد در صنعت

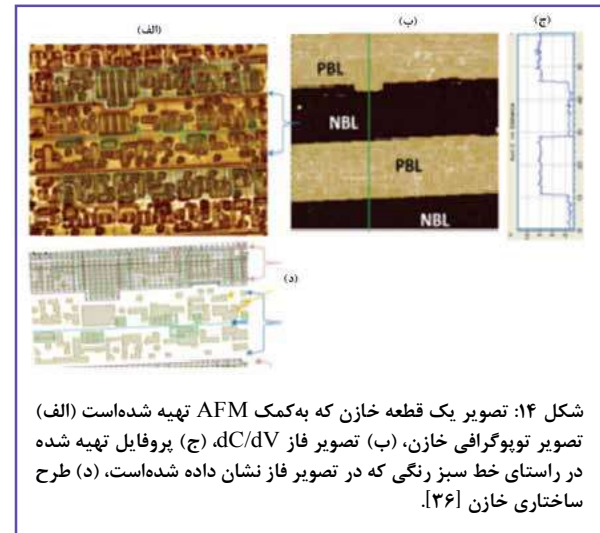
تولیدکنندگان در برخی از صنایع از دستگاه AFM برای مطالعه‌ی کیفیت محصولات و بهبود آنها بهره می‌گیرند. محصولات فراوانی نظیر را تنیس، توپ گلف، محصولات آرایشی و لباس، زمانی که دارای اجزای نانومتری باشند عملکرد بهتری نشان می‌دهند و از این رو مطالعه‌ی اجزای نانویی آنها و بررسی عملکردشان می‌تواند در ارتقاء کیفی محصولات مؤثر باشد. صنایع پیشرفته مانند صنایع تولید صفحات نمایش گر، سامانه‌های میکروالکترومکانیک<sup>۱۶</sup>، حسگرهای زیستی، صنایع مربوط به نیمه‌هادی‌ها و ذخیره‌سازی اطلاعات دیجیتال نیز برای حل مشکلات خود از AFM بهره می‌گیرند [۱].

### صنعت تولید دارو

در سال‌های اخیر روش میکروسکوپی AFM برای تهیهی اطلاعات در مورد ساختار و رفتار انواع مولکول‌های دارویی در محیط‌های فیزیولوژی، کاربرد وسیعی یافته است. به عنوان نمونه، در یک کار بیقاتی چگونگی اثرگذاری دارو روی پروتئین آکوابورین<sup>۱۷</sup> موسوم به کانال‌های آبی که یک پروتئین غشایی و مسئول به وجود آمدن خلل و فرج در غشاهای سلولی است، بررسی شده است. در شکل (۱۲) نتایج این مطالعه ارائه شده است [۳۵].

اطلاعات ارزشمندی در مورد مواد آرایشی و داروی استفاده شده نیز کسب نمود. بررسی آثار برجای مانده از شلیک گلوله و اثر انگشت از دیگر مزایای این روش در حوزه پزشکی قانونی است [۳۷].

متشکل از لایه‌های مختلف و نواحی فعال گوناگون تهیه شده با استفاده از میکروسکوپ AFM، نشان داده شده است [۳۶].



شکل ۱۴: تصویر یک قطعه خازن که به کمک AFM تهیه شده است (الف) تصویر توپوگرافی خازن، (ب) تصویر فاز  $dC/dV$ ، پروفایل تهیه شده در راستای خط سبز رنگی که در تصویر فاز نشان داده شده است، (د) ساختاری خازن [۳۶].

### نتیجه‌گیری

بررسی اجمالی کاربردهای میکروسکوپ نیروی اتمی نشان می‌دهد که این دستگاه به دلیل استفادهی راحت و امکان تحت پوشش قرار دادن بسیاری از ترکیبات، از جمله مواد عایق و مولکول‌های زیستی، نفوذ و دامنه‌ی کاربرد بسیار وسیعی در علوم مرتبط با مواد و سطح یافته است به طوری که مطالعه‌ی بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی و ساختاری ترکیبات با این دستگاه امکان‌پذیر شده است. علاوه بر این، ماهیت غ رتخریبی این روش سبب شده که در حوزه‌ی علوم زیستی نیز این دستگاه جایگاه ویژه و متمایز بیابد. از سوی دیگر، توان تفکیک بالا و توانمندی این دستگاه در ایجاد خراش و نیز جابه‌جایی ذرات نانویی باعث افزایش تقاضای استفاده این دستگاه در صنعت ابزارهای الکترونیکی شده است. به هر حال، بهبود عملکرد دستگاه و ارتقاء کیفیت سوزن‌ها و نیز کاهش هزینه در آینده سبب خواهد شد که کاربرد این میکروسکوپ در مؤسسات تحقیقاتی و صنعتی با استقبال بیشتری مواجه شود.

### پی‌نوشت

۱. کارشناس ارشد شیمی فیزیک، پژوهشگاه صنعت نفت
۲. کارشناس ارشد میکروبیولوژی، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران
۳. کارشناس ارشد شیمی تجزیه، پژوهشگاه صنعت نفت
۴. عضو کارگروه تخصصی میکروسکوپ پروبی روبشی شبکه آزمایشگاهی

5. Accelerated Solvent Extraction
6. Atomic force microscopy (AFM)
7. Carbon Nanotube (CNT)
8. Stiffness
9. Dip-Pen Nanolithography (DPN)
10. Aperture Pen Nanolithography (APN)
11. High Force Nano-grafting (HFN)
12. Differential Scanning Calorimetric (DSC)
13. Modulated Temperature DSC (MTDSD)
14. Thermo mechanical Analysis (TMA)
15. Dynamic Mechanical Analysis (DMA)
16. Microelectromechanical Systems (MEMS)
17. Aquaporin

### متالورژی و خوردگی

روش میکروسکوپی AFM به دلیل توانایی در اندازه‌گیری زبری سطح و بررسی حفرات موجود در آن، ابزاری عالی در مطالعه‌ی سطوح مختلف است. که تحت عملیات متالورژی نظیر آسیاب، پرس، رسوب‌گیری و آنیل قرار گرفته و یا دچار خوردگی شده و حفره‌ها یا ترک‌های میکروسکوپی روی آنها پدید آمده را می‌توان با میکروسکوپ AFM مطالعه کرد. همچنین بر روی کیفیت پوشش‌ها و روکش‌ها نیز با آن به خوبی قابل تعیین است. حتی با کمک روش AFM الکتروشیمیایی می‌توان جزئیات تغییرات شیمیایی را که در ناحیه خوردگی روی می‌دهد، بررسی نمود [۳۷].

### کاتالیست‌ها

در بیشتر کاتالیست‌های هتروژن، کارایی عملکرد کاتالیست به میزان زیادی به ز سطح کاتالیست و میزان خلل و فرج آن بستگی دارد و به همین دلیل روش میکروسکوپی AFM در بررسی کیفیت و ساختار کاتالیست‌ها نقش عمده‌ای را ایفا می‌کند. بررسی سطح یک کاتالیست از حیث تعیین نوع دره‌ها، برجستگی‌ها، شکاف‌ها، صفحات جابه‌جا شده، فرورفتگی‌ها و دهانه‌ها و میزان تراکم آنها بسیار مورد توجه است. از سوی دیگر به کمک میکروسکوپ AFM می‌توان کاتالیست‌های استفاده شده و فرسوده و ساختار کاتالیست‌های آنزیمی را نیز با این روش میکروسکوپی مورد مطالعه قرار داد [۳۷].

### پزشکی قانونی

قابلیت بررسی توپوگرافی در روش AFM، این روش را در تحقیقات پزشکی قانونی پرکاربرد ساخته است. این روش به تجزیه و تحلیل DNA محدود نمی‌شود، بلکه بررسی مو، ضخامت و نوع پوست، زاویه و شیب بریدگی‌ها را نیز در بر می‌گیرد. همچنین با این روش می‌توان



- [1] صدیقه صادق حسنی، جمال الدین افضلی و مریم خسروی، میکروسکوپ نیروی اتمی، ۱۳۹۳.
- [2] Tak, Y.-H.; Kim, K.-B.; Park, H.-G.; Lee, K.-H.; Lee, J.-R. (2002). Criteria for ITO (indium-tin oxide) thin film as the bottom electrode of an organic light emitting diode. *Thin Solid Films*, 411 (1), 12–16.
- [3] Bischel, M. S.; VanLandingham, M. R.; Eduljee, R. F.; Gillespie, J. W.; Schultz, J. M., On the use of Nano scale indentation with the AFM in the identification of phases in blends of linear low density polyethylene and high density polyethylene. *Journal of Materials Science* 2000, 35 (1), 221–28.
- [4] Kuwahara, Y., Comparison of the surface structure of the tetrahedral sheets of muscovite and phlogopite by AFM. *Physics and Chemistry of Minerals* 2001, 28 (1), 1–8.
- [5] Jaschke, M.; Schonherr, H.; Wolf, H.; Butt, H.-J.; Bamberg, E.; Besocke, M. K.; Ringsdorf, H., Structure of alkyl and perfluoroalkyl disulfide and azobenzenethiol monolayers on gold (111) Revealed by atomic force microscopy. *Journal of Physical Chemistry* 1996, 100 (6), 2290–2301.
- [6] Ebrahimpoor Ziaie, E.; Rashtcian, D.; Sadegh Hassani, S. (2008). Atomic force microscopy as a tool for comparing lubrication behavior of lubricants. *Material science: An Indian journal*, 4 (2), 111-115.
- [7] Vinelli, A.; Primiceri, E.; Brucale, M.; Zuccheri, G.; Rinaldi, R.; Samori, B. (2008). Sample preparation for the quick sizing of metal nanoparticles by atomic force microscopy. *Microscopy Research and Technique*, 71 (12), 870–79.
- [8] Garcia, P.; Eaton, P.; Geurts, H. P. M.; Sousa, M.; Gameiro, P.; Feiters, M. C.; Nolte, R. J. M.; Pereira, E.; de Castro, B., AFM and electron microscopy study of the unusual aggregation behavior of metallosurfactants based on iron(II) complexes with bipyridine ligands. *Langmuir* 2007, 23 (15), 7951–57.
- [9] Yap, H. W.; Lakes, R. S.; Carpick, R. W., Mechanical instabilities of individual multiwalled carbon nanotubes under cyclic axial compression. *Nano Letters* 2007, 7 (5), 1149–54.
- [10] He, J. H.; Ho, S. T.; Wu, T. B.; Chen, L. J.; Wang, Z. L., Electrical and photoelectrical performances of Nanophotodiode based on ZnO nanowires. *Chemical Physics Letters* 2007, 435 (1–3), 119–22.
- [11] Erts, D.; Polyakov, B.; Dalyt, B.; Morris, M. A.; Ellingboe, S.; Boland, J.; Holmes, J. D., High density germanium nanowire assemblies: contact challenges and electrical characterization. *Journal of Physical Chemistry B* 2006, 110 (2), 820–26.
- [12] Braga, P. C.; Ricci, D., Differences in the susceptibility of *Streptococcus pyogenes* to rokitamycin and erythromycin A revealed by morphostructural atomic force microscopy. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy* 2002, 50 (4), 457–60.
- [13] Jonas, K.; Tomenius, H.; Kader, A.; Normark, S.; Romling, U.; Belova, L.; Melefors, O., Roles of curli, cellulose and BapA in *Salmonella* biofilm morphology studied by atomic force microscopy. *BMC Microbiology* 2007, 7, 70.
- [14] Murphy, M. F.; Lalor, M. J.; Manning, F. C. R.; Lilley, F.; Crosby, S. R.; Randall, C.; Burton, D. R., Comparative study of the conditions required to image live human epithelial and fibroblast cells using atomic force microscopy. *Microscopy Research and Technique* 2006, 69 (9), 757–65.
- [15] Domke, J.; Dannohl, S.; Parak, W. J.; Muller, O.; Aicher, W. K.; Radmacher, M., Substrate dependent differences in morphology and elasticity of living osteoblasts investigated by atomic force microscopy. *Colloids and Surfaces B: Bio interfaces* 2000, 19 (4), 367–79.
- [16] K. Tomankova, H. Kolarova, M. Vujtek, H. Zapletalova, Study of Cancer Cells Used Atomic Force Microscopy, *Modern Research and Educational Topics in Microscopy*, 2007, 23-28.
- [17] AFM imaging of type I collagen fibrils AN00955, <https://www.nanosurf.com>

- [18] Julie A. Last, Paul Russell, Paul F. Nealey, and Christopher J. Murphy, The Applications of Atomic Force Microscopy to Vision Science, IOVS, December 2010, Vol. 51, No. 12.
- [19] صدیقه صادق حسنی، زهرا ثبات (۱۳۸۶). کاربرد میکروسکوپ نیروی اتمی در نانو لیتوگرافی - ماهنامه‌ی فناوری نانو سال ششم - شماره‌ی ۱۲۵ - صفحات ۷۳۸-۵۳۵.
- [20] Sadegh Hassani, S., Sobat, Z., Studying of various nanolithography methods by using Scanning Probe Microscope. Int .J. Nano .Dim 2011, 1(3), 159-175.
- [21] X.N. Xie , H.J. Chung, C.H. Sow, A.T.S. Wee, Nanoscale materials patterning and engineering by atomic force microscopy nanolithography, Materials Science and Engineering R 54 (2006) 1-48.
- [22] Ichicawa, K., Yamada, M."Atomic resolution for non-equilibrium structures in the steady state and for structural transformations at the interface between NaCl and water", J. Phys. Condens. Matter, 8, 1996, 150-160.
- [23] Sugiyama Ono, S.; Matsuoka, O. & Yamamoto, S. (2001). Surface structures of zeolites studied by atomic force microscopy. Micropor. Mesopor. Mat. 48, 103-110.
- [24] Louey, M.D.; Mulvaney, P.; tewart, P.J.S. (2001). haracterisation of adhesional properties of lactose carriers using atomic force microscopy, Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis 25, 559-567.
- [25] G. Pucci, M. P. De Santo, G. Carbone, R. Barberi G. Pucci, M. P. De Santo, G. Carbone, R. Barberi, A novel method to prepare probes for atomic force spectroscopy, Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 2006, 1(3): 99-103.
- [26] Choi, D.; Jeon, J.; Lee, P.; Hwang, W.; Lee, K.; Park, H. (2007). Young's modulus measurements of nanohoneycomb structures by flexural testing in atomic force microscopy", J. Composite Structures 79, 548-553.
- [27] Mege, F., Volpi, F., Verdier, M. (2009). "Mapping of elastic modulus at sub-micrometer scale with acoustic contact resonance", J. Microelectronic Engineering, Article in Press, Corrected Proof, Note to users.
- [19] ارنست مایر، هانست ژوزف هاگ، رولند بنوتیز، ترجمه‌ی علیرضا ذوالفقاری، محمد الماسی، پیروز مرعشی، مهرداد نجبا و امید سیفی (۱۳۸۵). «میکروسکوپ پروبی روبشی، آزمایشگاهی روی نوک سوزن».
- [29] Geiss, R.H.; Kopycinska-Müller M.; Hurley, D.C. (2005).Wear of Si Cantilever Tips used in Atomic Force Acoustic Microscopy", J. Microsc Microanal 11(Suppl 2), 364-365.
- [30] Price D. M.; Reading M.; Hammiche A.; Pollock H. M. (1999). Micro-thermal analysis: scanning thermal microscopy and localised thermal analysis, International Journal of Pharmaceutics, 192, 85-96.
- [31] Lever T. J.; Price D. M. (1998). Using microthermal analysis to characterize the nanoworld, American Laboratory, 30 (16) 15-18.
- [32] Pollock H. M.; Hammiche A. (2001). Micro-thermal analysis: techniques and applications J. Phys. D: Appl. Phys. 34, R23-R53.
- [33] Fonseca, L.; Pérez-Murano F.; Calaza C.; Rubio R.; Santander J.; Figueras E.; Gràcia I.; Canéa C.; Morenob M.; Marcob S. (2004). AFM thermal imaging as an optimization tool for a bulk micromachined thermopile, Sensors and Actuators A, 115, 440-446.
- [34] Bhattacharyy, A.; Bhaumik, A.; Usha Rani, P.; Mandal, S.; Epiidi, T. T. (2010). Nano-particles - A recent approach to insect pest control, African Journal of Biotechnology Vol. 9(24), pp. 3489-3493, 14.
- [35] Uroš Maver, Tomaž Velnar , Miran Gaberšček , Odon Planinšek , Matjaž Finšgar, Recent progressive use of atomic force microscopy in biomedical applications, Trends in Analytical Chemistry 80 (2016) 96-111
- [36] S. Wu et al. SMM Imaging of Dopant Structures of Semiconductor Devices Application
- [37] Gerd Kaupp, Atomic Force Microscopy, Scanning Nearfield Optical Microscopy and Nanoscratching Application to Rough and Natural Surfaces, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.