

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک

گروه جامدات

گرایش طراحی کاربردی

# تحلیل ارتعاشات تیر میکروسکوپ نیرو اتمی در حالت کوپل شدگی با استفاده از نظریه غیرموضعی

دانشجو: محسن احمدی

استاد راهنما:

دکتر اردشیر کرمی محمدی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۹۲



دانشگاه گیلان

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره:  
تاریخ:  
ویرایش:

### فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای محسن احمدی... رشته مهندسی مکانیک... گرایش طراحی کاربردی... تحت عنوان: تحلیل ارتعاشات تیر میکروسکوپ نیرو اتمی در حالت کوپل شدگی با استفاده از نظریه غیرموضعی... که در تاریخ ۱۳۹۹/۱۱/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

|                                |                                    |   |
|--------------------------------|------------------------------------|---|
| <input type="checkbox"/> مردود | <input type="checkbox"/> دفاع مجدد | <input checked="" type="checkbox"/> قبول (با درجه: <u>خوب</u> امتیاز <u>۱۷/۹۱</u> ) |
|--------------------------------|------------------------------------|---|

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷۹۹ - ۱۶)

۴- قابل قبول (۱۵۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

| اعضاء | مرتبه علمی | نام و نام خانوادگی     | عضو هیأت داوران                 |
|-------|------------|------------------------|---------------------------------|
|       | استادیار   | دکتر اردشیر کرمی محمدی | ۱- استادارهنما                  |
|       |            |                        | ۲- استاد مشاور                  |
|       | استادیار   | سید هادی نادری         | ۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی |
|       |            | ایمان                  | ۴- استاد ممتحن                  |
|       | استاد      | حبیبی                  | ۵- استاد ممتحن                  |

رئیس دانشکده:

امضاء



## تشکر و قدردانی:

شایسته است از زحمات خالصانه استاد ارجمند جناب آقای دکتر اردشیر گرمی محمدی که در طول تحقیق و تدوین پایان نامه، اینجانب را حمایت و راهنمایی نموده‌اند و همچنین از کمک‌ها و مشاوره‌های دوست عزیز جناب آقای محمد عباسی دانشجوی دوره دکترای دانشگاه صنعتی شاهرود کمال تشکر و قدردانی را نمایم.

# تعهد نامه

اینجانب ..... محسن احمدی..... دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ..... مهندسی مکانیک..... دانشکده ..... مهندسی مکانیک....  
دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه.... تحلیل ارتعاشات تیر میکروسکوپ نیرو اتمی در حالت کوپل شدگی با استفاده از  
نظریه غیر موضعی..... تحت راهنمایی..... دکتر اردشیر کرمی محمدی..... متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

## تاریخ

## امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

میکروسکوپ نیرو اتمی (Atomic Force Microscopy)، که به آنها تیر AFM نیز گفته می‌شود، یکی از پرکاربردترین دستگاهها در تهیه و تحلیل نقشه و تصویر از سطوح بسیار ریز در حد نانو می‌باشد. در این پایان‌نامه رفتارهای ارتعاشاتی تیر میکروسکوپ نیرو اتمی از طریق روش غیرموضعی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است و نتایج حاصل از این روش با روش کلاسیک مقایسه شده است. به دلیل مشکلات ناشی از طراحی و ساخت این دستگاه اتصال نوک تیر دقیقا در وسط تیر کاری دشوار و تقریبا غیر ممکن می‌باشد. تیر مورد بررسی همگن می‌باشد. حالت مورد بررسی ارتعاش خمشی عمود بر محور تیر می‌باشد. زمانی که نوک دقیقا در مرکز تیر قرار نگیرد تیر علاوه بر ارتعاش خمشی، ارتعاش پیچشی نیز خواهد داشت که اصطلاحا به این حالت کوپل‌شدگی می‌گویند. در ابتدا در حالت کلاسیک با استفاده از اصل همپلتون معادله مشخصه و شرایط مرزی تیر AFM در حالاتی که نوک دقیقا در مرکز قرار می‌گیرد (حالت بدون کوپل‌شدگی) و همچنین حالتی که نوک در مرکز قرار نمی‌گیرد (حالت کوپل‌شدگی) به دست آمده است. در ادامه نیز با استفاده از روش غیرموضعی و به کارگیری اصل همپلتون معادله مشخصه و شرایط مرزی تیر AFM در حالت بدون کوپل‌شدگی و همچنین حالت کوپل‌شدگی به دست آمده است. پارامترهای فرکانس و حساسیت به دست آمده از این دو روش در نمودارهای جداگانه رسم شده است و نتایج حاصل با هم مقایسه شده‌اند. همچنین در این پایان‌نامه تاثیر مقدار فاصله نوک تیر از مرکز سطح مقطع تیر مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نیز در نمودارهای جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است.

**کلمات کلیدی:** میکروسکوپ نیرو اتمی، فرکانس تشدید، حساسیت، سختی تماسی عمودی، نظریه

غیرموضعی

## فهرست مطالب

|    |   |
|----|---|
| د  | تشکر و قدردانی  |
| و  | چکیده   |
| ۱  | فصل اول: مقدمه  |
| ۲  | ۱-۱ مقدمه   |
| ۳  | ۲-۱ نحوه کار میکروسکوپ نیرو اتمی                                  |
| ۷  | ۳-۱ پیشینه تحقیق  |
| ۱۱ | ۴-۱ اهداف   |
| ۱۳ | فصل دوم: ارتعاشات تیر میکروسکوپ نیرو اتمی                         |
| ۱۴ | ۱-۲ دینامیک تیر میکروسکوپ نیرو اتمی                               |
| ۱۷ | ۲-۲ بررسی تیر AFM از روش کلاسیک در حالت بدون کوپل شدگی            |
| ۲۷ | ۳-۲ بررسی تیر AFM از روش کلاسیک همراه با کوپل شدگی                |
| ۳۰ | ۱-۳-۲ پیچش تیر میکروسکوپ نیرو اتمی                                |
| ۴۸ | ۲-۳-۲ مقایسه نتایج  |
| ۵۱ | فصل سوم   |
| ۵۱ | بررسی ارتعاشات تیر میکروسکوپ نیرو اتمی با استفاده از روش غیرموضعی |
| ۵۲ | ۱-۳ معرفی روش غیرموضعی  |
| ۵۵ | ۲-۳ بررسی تیر AFM از روش غیرموضعی در حالت بدون کوپل شدگی          |
| ۶۸ | ۳-۳ بررسی تیر AFM از روش غیرموضعی در حالت کوپل شدگی               |
| ۸۴ | ۴-۳ درصد خطای نسبی  |
| ۸۹ | فصل چهارم   |
| ۸۹ | نتیجه گیری و پیشنهادات برای مطالعات آینده                         |
| ۹۰ | ۱-۴ نتیجه گیری  |
| ۹۱ | ۲-۴ مطالعات آینده   |
| ۹۳ | مراجع و منابع   |

## فهرست شکل‌ها و جداول

- شکل ۱-۱ مقایسه تیزی نوک‌های تیر میکروسکوپ نیرواتمی..... ۴
- شکل ۱-۲ اصول کار تیر میکروسکوپ نیرو اتمی..... ۶
- شکل ۱-۳ نمایی از تیر مورد بررسی توسط لین..... ۱۰
- جدول ۱-۱ مقادیر به دست آمده برای فرکانس سه مود اول توسط لین..... ۱۰
- شکل ۱-۲ اجزای تیر AFM..... ۱۴
- شکل ۲-۲ انواع تغییر شکل‌های تیر AFM..... ۱۵
- شکل ۲-۳ مود TR تیر AFM..... ۱۶
- شکل ۲-۴ مود LE تیر AFM..... ۱۶
- شکل ۲-۵ شماتیکی از تیر AFM در تماس با سطح نمونه..... ۱۷
- شکل ۲-۶ تیر قبل و بعد از خمش..... ۱۸
- جدول ۱-۲ پارامترهای مختلف تیر میکروسکوپ نیرو اتمی..... ۲۵
- شکل ۲-۷ فرکانس تشدید بی بعد سه مود اول به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$ ..... ۲۵
- شکل ۲-۸ حساسیت بی بعد سه مود اول به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$ ..... ۲۶
- شکل ۲-۹ نمایی از سطح مقطع تیر..... ۲۷
- شکل ۲-۱۰ نمایی از نوک تیر بعد از جابه جایی به اندازه W..... ۲۹
- شکل ۲-۱۱ سطح مقطع مستطیلی تیر میکروسکوپ نیرواتمی..... ۳۰
- شکل ۲-۱۲ تیر میکروسکوپ نیرواتمی در حال پیچش..... ۳۲
- شکل ۲-۱۳ فرکانس تشدید بی بعد مود اول به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$ ..... ۴۴
- شکل ۲-۱۴ فرکانس تشدید بی بعد مود دوم به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$ ..... ۴۵
- شکل ۲-۱۵ فرکانس تشدید بی بعد مود سوم به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$ ..... ۴۵
- شکل ۲-۱۶ فرکانس تشدید بی بعد مود چهارم به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$ ..... ۴۶
- شکل ۲-۱۷ فرکانس تشدید بی بعد مود پنجم به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$ ..... ۴۶
- شکل ۲-۱۸ حساسیت مود اول به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$ ، به ازای مقادیر D متفاوت..... ۴۷
- شکل ۲-۱۹ حساسیت مود دوم به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$ ، به ازای مقادیر D متفاوت..... ۴۸
- شکل ۲-۲۰ حساسیت مود سوم به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$ ، به ازای مقادیر D متفاوت..... ۴۸
- شکل ۲-۲۱ مقایسه فرکانس تشدید پنج مود اول به صورت تابعی از  $\beta_n$  در دو حالت کوپل‌شدگی و بدون کوپل‌شدگی..... ۴۹



- شکل ۳-۱ فرکانس تشدید بی بعد مود اول به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$  به ازای مقادیر  $e$  متفاوت..... ۶۳
- شکل ۳-۲ فرکانس تشدید بی بعد مود دوم به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$  به ازای مقادیر  $e$  متفاوت..... ۶۴
- شکل ۳-۳ فرکانس تشدید بی بعد مود سوم به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$  به ازای مقادیر  $e$  متفاوت..... ۶۵
- شکل ۳-۴ فرکانس تشدید بی بعد مود چهارم به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$  به ازای مقادیر  $e$  متفاوت..... ۶۵
- شکل ۳-۵ حساسیت مود اول به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$ ، به ازای مقادیر  $e$  متفاوت..... ۶۶
- شکل ۳-۶ حساسیت مود دوم به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$ ، به ازای مقادیر  $e$  متفاوت..... ۶۶
- شکل ۳-۷ حساسیت مود سوم به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$ ، به ازای مقادیر  $e$  متفاوت..... ۶۷
- شکل ۳-۸ حساسیت مود چهارم به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$ ، به ازای مقادیر  $e$  متفاوت..... ۶۷
- شکل ۳-۹ فرکانس تشدید بی بعد مود اول به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$  به ازای مقادیر  $D$  متفاوت..... ۷۹
- شکل ۳-۱۰ فرکانس تشدید بی بعد مود دوم به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$  به ازای مقادیر  $D$  متفاوت..... ۷۹
- شکل ۳-۱۱ فرکانس تشدید بی بعد مود سوم به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$  به ازای مقادیر  $D$  متفاوت..... ۸۰
- شکل ۳-۱۲ فرکانس تشدید بی بعد مود چهارم به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$  به ازای مقادیر  $D$  متفاوت..... ۸۰
- شکل ۳-۱۳ فرکانس تشدید بی بعد مود پنجم به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$  به ازای مقادیر  $D$  متفاوت..... ۸۱
- شکل ۳-۱۴ حساسیت مود اول به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$ ، به ازای مقادیر  $D$  متفاوت..... ۸۲
- شکل ۳-۱۵ حساسیت مود دوم به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$ ، به ازای مقادیر  $D$  متفاوت..... ۸۳
- شکل ۳-۱۶ حساسیت مود سوم به صورت تابعی از سختی تماسی عمودی  $\beta_n$ ، به ازای مقادیر  $D$  متفاوت..... ۸۳

شکل ۳-۱۷ درصد خطای نسبی مود اول بین فرکانس به دست آمده از دو روش کلاسیک و غیرموضعی  
با  $D = 0.1$  ..... ۸۵

شکل ۳-۱۸ درصد خطای نسبی مود دوم بین فرکانس به دست آمده از دو روش کلاسیک و غیرموضعی  
با  $D = 0.1$  ..... ۸۶

شکل ۳-۱۹ درصد خطای نسبی مود اول بین حساسیت به دست آمده از دو روش کلاسیک و غیرموضعی  
با  $D = 0.1$  ..... ۸۷

شکل ۳-۲۰ درصد خطای نسبی مود دوم بین حساسیت به دست آمده از دو روش کلاسیک و  
غیرموضعی با  $D = 0.1$  ..... ۸۸

## فصل اول

### مقدمه

## ۱-۱ مقدمه

نانومتر واحد بسیار بسیار کوچکی برای اندازه گیری طول است که در ابعاد اتمی و مولکولی کاربرد دارد. یک نانومتر فاصله‌ی بسیار کوچکی است و به عنوان مثال مولکول آب با آن سنجیده می‌شود. برای درک میزان کوچکی این واحد طول خوب است بدانیم که تار موی انسان حدوداً ۸۰ هزار نانومتر قطر دارد، بنابراین برای مشاهده پدیده‌ها و درک اثراتی که در این اندازه بسیار کوچک وجود دارد نه تنها به چشم غیرمسلح نمی‌توان تکیه کرد بلکه حتی از میکروسکوپ‌های معمولی که در آزمایشگاه‌ها وجود دارند نیز، نمی‌توان استفاده کرد چراکه با این میکروسکوپ‌ها فقط تا ابعاد "میکرومتر" را می‌توان دید. به همین دلیل دانشمندان با پیشرفت علم و فنون به فکر ساختن وسایلی افتادند که بتوانند ابعاد اتمی را هم اندازه گیری کنند. وسایل زیادی با روش‌های مختلف برای این منظور ساخته شده است که خیلی از آنها کامل شده نمونه‌های قبلی است. اما میکروسکوپ نیرو اتمی جزو جدیدترین دستاوردهای دانشمندان در زمینه اندازه گیری در ابعاد و مقیاس نانو است که در پاییز سال ۱۳۶۳ یعنی حدود ۳۰ سال پیش توسط جرد بینینگ، کریستوف جربس و کوایت ساخته شد. دستگاهی که بینینگ و همکارانش ساخته بودند از نظر عملکرد کاملاً مشابه میکروسکوپ‌های نیرو اتمی امروزی بود و در طی این بیست سال تنها دقت و روش حس نهایی اندازه‌ها پیشرفت کرده است. با این دستگاه می‌شد طول‌هایی تا حدود "۳۰۰ آنگستروم" یا "۳۰ نانومتر" را اندازه گرفت. با گذشت زمان این دستگاه کامل‌تر شد و امروزه می‌توان با دقتی بیش از ۵۰۰ برابر دقت میکروسکوپ بینینگ سطوح مواد را مشاهده نمود.

می‌دانیم که تمامی اجسام هراندازه هم که به ظاهر صاف و صیقلی باشند، باز هم در سطح خود دارای پستی و بلندی و ناصافی‌هایی هستند. به عنوان مثال سطح شیشه بسیار بسیار صاف و صیقلی به نظر می‌رسد، اما اگر در مقیاس خیلی کوچک به آن نگاه کنیم، خواهیم دید که سطح شیشه پر از ناصافی‌ها یا به عبارتی "دست انداز" است. کار میکروسکوپ نیرو اتمی نشان دادن این ناصافی‌ها و اندازه‌گیری

عمق آنهاست. ثبت چگونگی قرارگیری و نشان دادن عمق و ارتفاع پستی و بلندی‌ها در یک سطح خاص از ماده را "توپوگرافی" می‌نامند.

## ۱-۲ نحوه کار میکروسکوپ نیرو اتمی

می‌دانیم که نیروهای بسیار کوچکی به صورت جاذبه و دافعه بین اتم‌های باردار وجود دارند، (درست مثل دو سر غیرهم‌نام آهنربا که باعث دفع و جذب می‌شوند). چنین نیروهایی بین نوک میکروسکوپ و اتم‌های سطح ایجاد می‌گردد. با اندازه‌گیری نیروی بین اتم‌ها در نقاط مختلف سطح، می‌توان محل اتم‌ها روی آن را مشخص کرد.

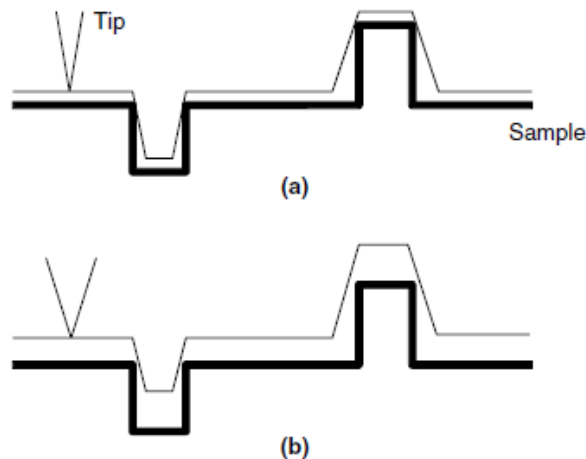
میکروسکوپ نیرو اتمی از اجزا و قطعات مختلفی تشکیل شده است که مهم‌ترین بخش آن مجموعه "انبرک و نوک" می‌باشد و در واقع قسمت اصلی برای شناخت سطوح به شمار می‌آید. جنس انبرک معمولاً از سیلیسیم و نوک از یک تک اتم (معمولاً اتم الماس) تشکیل شده است. انبرک می‌تواند شکل‌های متفاوتی داشته باشد از جمله تیرهای V شکل، خنجری شکل، بازو مثلثی و تخته گونه.

بسته به مود مورد استفاده AFM و خاصیت مورد اندازه‌گیری از نوک‌های مختلفی استفاده می‌شود. جنس نوک‌ها معمولاً از سیلیسیم یا نیتريد سیلیسیم می‌باشد. زمانی که فرایند اندازه‌گیری مستلزم وارد کردن نیروهای فوق‌العاده زیاد از جانب نوک به سطح باشد از نوک‌های الماسی استفاده می‌شود.

از روکش‌هایی نظیر Pt و Cr-Au برای محافظت از نوک در برابر شرایط خشن محیطی استفاده می‌شود. در اندازه‌گیری خواص مغناطیسی نقاط سطح از نوک‌هایی با روکش مواد فرو مغناطیس مانند Co, Ni, Fe استفاده می‌شود.

برای این‌که میکروسکوپ نیرو اتمی بتواند برجستگی‌ها و فرورفتگی‌ها را در ابعاد نانومتر حس کند لازم است نوک تیز انبرک ظرافت اتمی داشته باشد. همان‌طور که ما با دستکش کار نمی‌توانیم زبری یا نرمی یک سطح را حس کنیم. انواع شکل نوک عبارتند از: نوک مخروطی، نوک تخت، نوک کروی، نوک T شکل، نوک تیز.

پارامترهای هندسی نوک که نوع کارایی نوک 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 ۱-۱- مقایسه تیزی نوک‌های تیر میکروسکوپ نیرواتمی

شکل (۱-۱) به مقایسه تیزی نوک‌های تیر میکروسکوپ نیرو اتمی می‌پردازد. همانطور که از شکل مشخص است هر چقدر تیزی بیشتر باشد، دقت بیشتر است.

نوک های T شکل برای نقشه برداری و آشکار سازی فرورفتگی های موجود در بخش های دیواره مانند ( شبیه به دیوار) سطح نمونه به کار می رود. این در حالی است که نوک های نوک تیز این قابلیت را ندارند. از نوکهای تخت هم برای بررسی اصطکاک نواحی مختلف سطح استفاده می شود. چرا که آنچه در عمل به صورت اصطکاک نمایان می شود رفتار جمعی مجموعه از اتم های سطح است و نه یک نقطه به اندازه یک اتم. نوکهای کروی به دلیل سطح تماس بسیار بزرگی که با سطح نمونه مورد بررسی دارند نیروی وارد برواحد سطح بسیار ناچیزی به سطح وارد می کند، در نتیجه نمونه های بسیار نرم و حساس با این روش قابل بررسی می باشند.

از آنجا که تصاویر مربوط به اندازه‌های اتمی روی یک سطح با چشم غیرمسلح یا حتی مسلح به قوی-ترین عدسی‌ها قابل مشاهده نیست، به کمک ابزارهای پیشرفته، حرکات عرضی لمس شده توسط

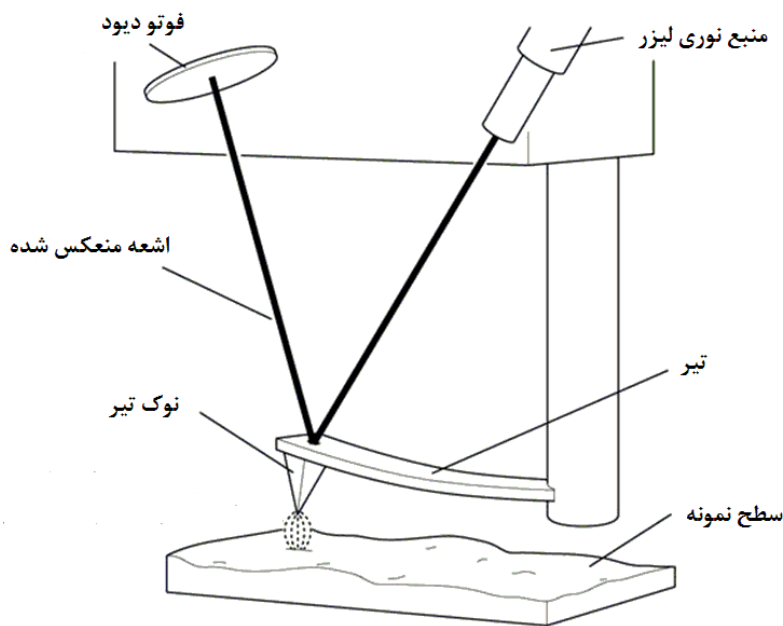
انبرک و نوک ویژه میکروسکوپ را به تصاویر ویدئویی تبدیل می‌کنند تا امکان مشاهده آرایش اتم‌های سطح، در صفحه رایانه امکان‌پذیر باشد.

درواقع کل فرآیند "جاروکردن سطح" به وسیله همان انبرک نوک‌دار صورت می‌گیرد. انبرک به راحتی در پستی و بلندی‌ها بالا و پایین می‌رود و انتهای آن هم به قسمتی متصل است که به جابجایی عرض انبرک بسیار حساس است و این تغییر فاصله‌ها را ثبت کرده و به علائمی تبدیل می‌کند که برای رایانه قابل فهم باشد. علائم گفته شده که "سیگنال" نام دارد توسط رایانه پردازش می‌شود تا نحوه قرار-گیری اتم‌ها در کنارهم، بر روی صفحه نمایشگر، نشان داده شود.

دو روش کلی برای جاروکردن سطح وجود دارد که عبارتند از روش تماسی و روش غیرتماسی. در روش تماسی که برای بیشتر سطوح کارایی دارد، نوک انبرک در فاصله‌ای بسیار بسیار کم از سطح قرار می‌گیرد و به محض رسیدن به پستی یا بلندی به دلیل جابجایی که در انبرک ایجاد می‌شود، امکان نمایش توپوگرافی برای رایانه فراهم می‌گردد. درواقع نیرویی که بین سطح و نوک انبرک وجود دارد، با نزدیک شدن این دو به هم زیاد شده و با دورشدنشان از هم، کم می‌شود، این مساله باعث مشاهده غیرمستقیم آرایش اتم‌ها می‌گردد.

روش غیرتماسی بیشتر برای سطوح کثیف و آلوده مورد استفاده قرار می‌گیرد، در این شیوه ابتدا انبرک را با نوسانی دقیق به تحرک در می‌آوریم و آن را روی سطح هدایت می‌کنیم. انبرک خاصیت ارتجاعی و فنری دارد و به راحتی در عرض بالا و پایین می‌شود. در این حالت نیرویی که بین سطح و نوک انبرک وجود دارد، در نوسان انبرک تأثیر می‌گذارد و به این وسیله آرایش اتمی سطح مشخص می‌شود.

البته اندازه‌گیری ساختارهای بسیار ریز که موجب جابجایی بسیار کوچکی در انبرک می‌شود، خود بحث مفصلی است که این کار امروزه به وسیله تغییر جهت انعکاس نوری که از یک منبع بالای انبرک روی آن می‌تابانند، مشاهده می‌شود.



شکل ۱-۲ اصول کار تیر میکروسکوپ نیرو اتمی

به این معنی که سطح انبرک به گونه‌ای صیقل داده می‌شود که توانایی بازتابش نور را به خوبی داشته باشد. منبع نوری اشعه مرئی را به قسمت صیقل داده شده می‌تاباند و گیرنده آن را دریافت می‌کند. به محض جابجایی عرضی انبرک، اشعه کمی منحرف می‌شود که با توجه به میزان انحراف ثبت شده در دستگاه، دانشمندان نقشه پستی و بلندی (توپوگرافی) را دقیق‌تر ترسیم می‌کنند. شکل (۱-۲) نحوه کار تیر میکروسکوپ نیرو اتمی را نشان می‌دهد.

نکته دیگری که در مورد کارکرد میکروسکوپ نیرو اتمی باید بدانیم آن است که پستی‌ها و بلندی‌ها در هر سه محور طول و عرض و ارتفاع توسط این دستگاه گزارش می‌شود. در نمونه‌های ابتدایی چون امکان نشان دادن بعد ارتفاع در رایانه نبود، این کار با رنگ‌ها انجام می‌شد. به این صورت که رنگ‌های تیره برای عمق‌های کم و رنگ‌های روشن برای عمق‌های زیاد به کار می‌رفتند. اما امروزه با استفاده از نرم افزارهای سه بعدی دیداری می‌توان توپوگرافی سطح را در هر سه بعد نشان داد.



پس از معرفی میکروسکوپ نیرو اتمی و روش کار آن، خوب است بدانیم که بشر با اختراع این وسیله پیشرفت‌های بسیاری در علم مواد و شناخت سطوح پیدا کرده است که در بسیاری از صنایع از جمله الکترونیک، ارتباطات، خودرو، فضاوردی و انرژی تأثیرگذار بوده‌اند. در واقع اختراع میکروسکوپ نیرو اتمی فصل جدیدی در پیشرفت فناوری نانو و کاربردهای صنعتی آن می‌باشد [۱-۲].

### ۱-۳ پیشینه تحقیق

میکروسکوپ نیرو اتمی<sup>۱</sup> در سال ۱۹۸۶ توسط بینینگ اختراع شد [۳]. این وسیله یکی از پرکاربردترین دستگاه‌ها در تهیه و تحلیل نقشه و تصاویر سه‌بعدی از سطوح بسیار ریز در حد نانو می‌باشد [۴-۶]. میکروسکوپ نیرو اتمی مدل پیشرفته میکروسکوپ جریان روبشی<sup>۲</sup> می‌باشد که نقش بسزایی در تهیه تصاویر سه‌بعدی از سطوح اجسام، تعیین ویژگی‌های مکانیکی مواد و اندازه‌گیری نیروهای بین مولکولی ایفا نموده است [۷-۸]. این دستگاه همچنین در MEMS و NEMS نیز کاربردهای فراوانی دارد [۹-۱۰].

به دلیل مشکلات ناشی از طراحی و ساخت این دستگاه، اتصال نوک<sup>۳</sup> تیر دقیقاً در وسط سطح مقطع کاری بسیار دشوار می‌باشد. حالت مورد بررسی در این مقاله ارتعاش خمشی عمود بر محور تیر اولر-برنولی می‌باشد. زمانی که نوک دقیقاً منطبق بر مرکز سطح مقطع نباشد تیر علاوه بر ارتعاش خمشی، ارتعاش پیچشی نیز خواهد داشت. بنابراین علاوه بر معادله حرکت ارتعاش خمشی، معادله حرکت ارتعاش پیچشی نیز خواهیم داشت. در ادامه خواهیم دید که در شرایط مرزی به دست آمده برای معادلات حرکت، پارامترهای مربوط به خمش و پیچش با هم در یک رابطه ظاهر می‌شوند و به عبارتی با یکدیگر کوپل (جفت) شده‌اند که به آن کوپل‌شدگی نیز می‌گویند.

---

<sup>۱</sup> Atomic force microscope  
<sup>۲</sup> Scanning probe microscope  
<sup>۳</sup> tip

نظریه غیرموضعی توسط ارینگن پایه‌گذاری شده است. بیشتر نظریه‌های کلاسیک بر اساس روابط ساختاری می‌باشند که در آنها فرض بر این است که تنش در یک نقطه از محیط پیوسته تابعی از کرنش‌ها در همان نقطه است. در صورتی که در نظریه غیرموضعی فرض بر این است که تنش در یک نقطه از محیط پیوسته تابعی از کرنش‌ها در تمام نقاط محیط پیوسته می‌باشد. این قبیل نظریه‌ها شامل اطلاعاتی در مورد نیروهای بین اتمی می‌باشند [۱۱-۱۳]. پدیسون، ژانگ، وانگ و همکاران معادلات ساختاری الاستیسیته را برای مطالعه ارتعاش و کماتش لوله‌های در مقیاس نانو از جنس کربن، با استفاده از نظریه غیرموضعی به دست آورده‌اند [۱۴-۱۶]. ردی از روش غیرموضعی مدل‌هایی را برای نظریه‌های مختلف تیر از جمله تیر اولربرنولی، تیموشنکو، ردی و لوینسون به دست آوردند [۱۷]. ردی همچنین حل‌های تحلیلی را برای خمش، ارتعاش آزاد و کماتش از روش غیرموضعی ارائه کرده است. آنتونیو نیز یک مدل غیرموضعی را برای خمش تیر ارائه کرد [۱۸].

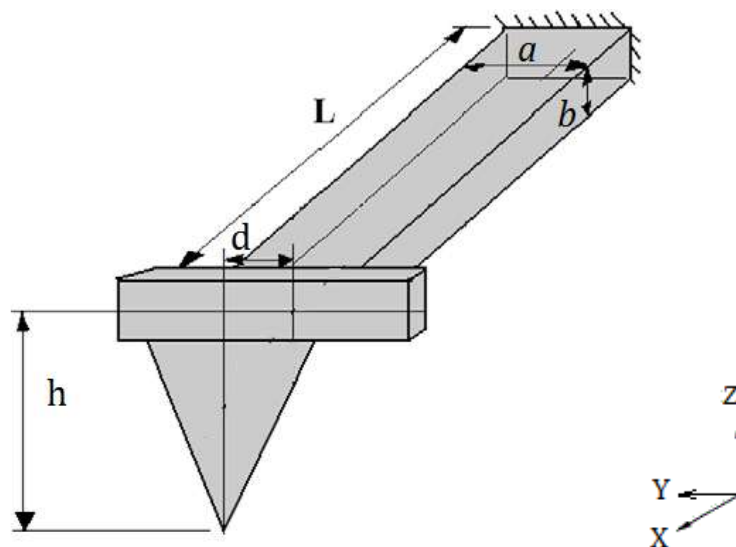
نویسنکی نظریه غیرموضعی را برای مطالعه ارتعاش طولی در یک میله دایروی به کار برد [۱۹]. کیانی و مهري با استفاده از نظریه غیرموضعی به مطالعه ساختار لوله‌های نانو تحت حرکت جزئی پرداختند [۲۰]. انصاری و سهمانی لوله‌های نانو از جنس کربن را برای شرایط مرزی مختلف بر اساس نظریه غیر موضعی تیرها بررسی کردند [۲۱]. همچنین کیانی و وانگ لوله‌های نانو از جنس کربن را با استفاده از روش غیرموضعی ارائه شده برای تیرهای ریلی و تیموشنکو، مطالعه کردند [۲۲]. لیم و همکاران نیز ارتعاشات پیچشی آزاد لوله‌های نانو را با استفاده از نظریه تنش غیرموضعی مطالعه کرد [۲۳].

با فرض اینکه تیر AFM و سطح نمونه موازی یکدیگرند تورنر و وین حساسیت مودهای ارتعاشی تیر AFM را بررسی کردند [۲۴]. چانگ مودهای ارتعاشی و خمشی تیر AFM مستطیل شکل را بررسی کرد [۲۵]. وو و همکاران تاثیر طول نوک و سختی تماسی جانبی و عمودی را روی پاسخ‌های ارتعاش خمشی تیر مستطیلی بررسی کردند [۲۶]. لی حساسیت خمشی تیرهای AFM، V شکل را با در نظرگرفتن شیب تیر و سختی تماسی جانبی و عمودی مطالعه کرد [۲۷]. با در نظر گرفتن اینرسی

دورانی و تغییر شکل برشی تیر و همچنین جرم و ممان اینرسی نوک تیر، مهدوی و فرشیدیانفر مدل کاملتری را برای AFM پیشنهاد کردند [۲۸]. چانگ حساسیت چهار مود اول خمش تیر AFM را با استفاده از سه پارامتر بی بعد بررسی کرد [۲۹]. رین استدلر و همکاران در سال ۲۰۰۳ معادلات حرکت ارتعاش خمشی و پیچشی در حالت کوپل شدگی را برای تیر میکروسکوپ نیرو اتمی به دست آوردند [۳۰]. سانگ و همکاران در سال ۲۰۰۶ کوپل شدگی مودهای مختلف تیر میکروسکوپ نیرو اتمی را بررسی کرده اند [۳۱]. چانگ و همکاران نیز در سال ۲۰۰۸ به بررسی کوپل شدگی مودهای خمشی و پیچشی تیر میکروسکوپ نیرو اتمی پرداخته اند [۳۲]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۰۹ کوپل شدگی مودهای خمشی و پیچشی را در حالتی که نوک دقیقاً منطبق بر مرکز سطح مقطع نیست، بررسی کرده اند [۳۳].

همانطور که گفته شد به دلیل مشکلات ناشی از طراحی و ساخت این دستگاه، اتصال نوک تیر دقیقاً در وسط سطح مقطع کاری بسیار دشوار می باشد. حالت مورد بررسی ارتعاش خمشی عمود بر محور تیر می باشد. زمانی که نوک دقیقاً منطبق بر مرکز سطح مقطع نباشد تیر علاوه بر ارتعاش خمشی، حول محور تیر نیز ارتعاش پیچشی خواهد داشت. بنابراین علاوه بر معادله حرکت خمشی، معادله حرکت پیچشی نیز خواهیم داشت. در ادامه خواهیم دید که در شرایط مرزی به دست آمده برای معادلات حرکت، پارامترهای مربوط به خمش و پیچش با هم در یک رابطه ظاهر می شوند و به عبارتی با یکدیگر کوپل (جفت) شده اند که به آن کوپل شدگی نیز می گویند. که این امر به خاطر همان فاصله  $d$  نوک از مرکز سطح مقطع می باشد. بنابراین معادلات حرکت حاکم بر سیستم فوق شامل دو معادله حرکت ارتعاش خمشی و معادله حرکت ارتعاش پیچشی می باشد.

لین و همکارانش در سال ۲۰۰۷ به بررسی اثر خروج از مرکز نوک تیر میکروسکوپ نیرو اتمی روی فرکانس تشدید پرداختند.



شکل ۳-۱ نمایی از تیر مورد بررسی توسط لین

شکل (۳-۱) نمایی از تیر مورد بررسی توسط لین را نشان می‌دهد. لین به بررسی ارتعاش خمشی تیر فوق حول محور  $X$ ، که دارای خروج از مرکز به اندازه  $d$  می‌باشد، پرداخت. مقادیر پارامترهای در نظر گرفته شده توسط لین به این صورت می‌باشد:  $a = 45\mu m$ ،  $b = 3.5\mu m$ ،  $L = 200\mu m$ ،  $h = 6\mu m$ ،

$$\rho = 2.5 \times 10^3 \frac{kg}{m^3} \text{ و } E = 70.3 \times 10^9 \text{ pa}, m_{tip} = 3.18 \times 10^{-18}$$

نتایج به دست آمده توسط لین در جدول زیر آمده است:

جدول ۱-۱ مقادیر فرکانس به دست آمده برای فرکانس سه مود اول توسط لین

| $d(\mu m)$ | Mode 1 | Mode 2  | Mode 3   |
|------------|--------|---------|----------|
| 0          | 74.356 | 466.03  | 1305.024 |
| 4          | 74.356 | 466.03  | 1305.022 |
| 8          | 74.356 | 466.03  | 1305.017 |
| 12         | 74.356 | 466.03  | 1305.008 |
| 16         | 74.356 | 466.03  | 1304.996 |
| 20         | 74.356 | 466.029 | 1304.981 |