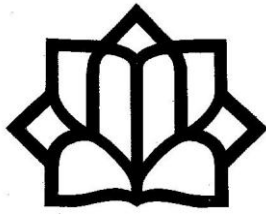


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



**دانشگاه کاشان**

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه مکانیک جامدات

## **پایان نامه**

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکانیک - طراحی کاربردی

عنوان :

**کنترل فعال در پایداری مقاوم ارتعاشات غیر خطی میکرو/نانو  
تیر میکروسکوپ نیروی اتمی**

استاد راهنما :

**دکتر کیوان ترابی**

به وسیله :

**مجید راهی**

**آبان ماه ۱۳۹۱**

تقدیم بہ:

خانوادہ عزیزم

مشکر و قدردانی:

از استاد گرامی و بزرگوار جناب آقای دکتر کیوان ترابی که راهنمایی اینجانب را در انجام این  
پایان نامه تقبل نموده اند کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم.

همچنین از تشریک مساعی آقایان دکتر قاسمی و دکتر وزیری اساتید داور، که این پایان نامه  
را مورد مطالعه قرار داده و همچنین استاد ناظر تحصیلات تکمیلی جناب آقای دکتر بانسیری که در  
جلسه دفاعیه شرکت نمودند تشکر می نمایم.

## چکیده :

در این پایان نامه حل تحلیلی بسته ارتعاشات عرضی اجباری غیر خطی و همچنین کنترل مقاوم میکرو/نانوتیر یک سرگردار میکروسکوپ نیروی اتمی مورد مطالعه قرار گرفته است. تحلیل پایداری تصویربرداری و اندازه‌گیری سطوح نیاز به بررسی دقیق تری از دینامیک تیر میکروسکوپ دارد، از اینرو تحلیل فرکانسی مجموعه مرتعش و همچنین کنترل فعال سیستم جهت حفظ وضعیت مطلوب از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. بدین منظور تحلیل ارتعاشی و کنترلی میکروسکوپ در سه حالت میکروتیر یکنواخت، میکروتیر غیر یکنواخت و نانوتیر یکنواخت انجام شده است. دینامیک هندسی غیر خطی میکروتیر به دلیل دامنه (تغییر شکل) بزرگ با استفاده از کرنش ون کارمن بیان شده است. نیروی تعاملی پوشش‌گر و سطح نمونه با دو فنر خطی و غیر خطی مدل شده است که می‌توان از آن به عنوان عامل دوم رفتار غیر خطی سیستم نام برد. به منظور استخراج معادلات حاکم بر مسئله از نظریه تیر اوپلر-برنولی بهره گرفته شده است. در بخش میکرو از روابط نیوتن و در بخش نانو از اصل هامیلتون و تئوری غیر محلی ارینگن برای بدست آوردن معادله دیفرانسیل پاره‌ای غیر خطی غیر همگن استفاده شده است. یکی از بهترین روش‌های آشفتگی، تکنیک چند متغیر زمانی است که روش حل ارتعاشات غیر خطی مسئله می‌باشد. از روش نظریه فیدبک کمی جهت پایداری در حضور نامعینی‌ها و اغتشاشات برای کنترل میکروسکوپ بهره برده شده است. بررسی جامعی بروی فرکانس‌ها و مود شکل‌های ارتعاشی خطی و غیر خطی صورت گرفته است، بعلاوه مطالعه چگونگی تاثیر میرایی ویسکوز و سازه‌ای تیر، میرایی میان پوشش‌گر و سطح، جرم و ممان اینرسی جرمی پوشش‌گر، سفتی تماس، نیروی تحریک پیزوالکتریک پایه و پاسخ فرکانسی مسئله نیز انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که پدیده جهش در تیر یک سرگردار میکروسکوپ اتفاق می‌افتد که به طور قابل ملاحظه‌ای بروی پاسخ فرکانسی و در نتیجه بر عملکرد کاری میکروسکوپ تاثیر گذار است.

**کلمات کلیدی :** میکرو/نانوتیر میکروسکوپ نیروی اتمی، ارتعاشات غیر خطی، کنترل مقاوم، حل تحلیلی، تئوری الاستیسیته غیر محلی ارینگن.

# فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	۱- فصل اول : مقدمه .....
۱	۱-۱- دیاچه .....
۲	۲-۱- چشم انداز .....
۷	۲- فصل دوم : میکروسکوپ نیروی اتمی AFM .....
۷	۱-۲- مقدمه .....
۸	۲-۲- تاریخچه .....
۱۴	۳-۲- مفاهیم اساسی .....
۱۴	۲-۳-۱- تعریف .....
۱۵	۲-۳-۲- روش کار .....
۱۸	۲-۳-۳-۱- حالت‌های کارکرد .....
۱۹	۲-۳-۳-۲- تماسی .....
۱۹	۲-۳-۳-۲- غیر تماسی .....
۲۰	۲-۳-۳-۲- شبه تماسی .....
۲۱	۲-۳-۴- کاربرد .....
۲۱	۲-۳-۵- مزایا .....
۲۱	۲-۳-۶- معایب .....
۲۲	۳- فصل سوم : نظریه فیدبک کمی QFT .....
۲۲	۱-۳- مقدمه .....
۲۴	۲-۳- طراحی سیستم‌های کنترل مقاوم به روش QFT برای سیستم‌های MISO .....
۲۸	۳-۲-۱- مثال .....
۴۱	۴- فصل چهارم : حل تحلیلی ارتعاشات غیر خطی اجباری تیر AFM .....
۴۱	۱-۴- مقدمه .....
۴۲	۲-۴- میکروتیر یکنواخت .....
۴۲	۲-۴-۱- مدل مسئله .....
۴۳	۲-۴-۲- معادلات حرکت .....

- ۴۸..... ۳-۲-۴- معادلات بدون بعد
- ۴۹..... ۴-۲-۴- روش آشفتهگی
- ۵۰..... ۱-۴-۲-۴- روش چند متغیرهای زمانی MTSM
- ۵۱..... ۲-۴-۲-۴- حل مسئله مرتبه صفر
- ۵۲..... ۱-۲-۴-۲-۴- روش انتگرالی
- ۵۶..... ۲-۲-۴-۲-۴- پاسخ صریح مود شکل خطی
- ۵۷..... ۳-۲-۴-۲-۴- اعمال شرایط مرزی
- ۶۰..... ۳-۴-۲-۴- حل مسئله مرتبه یک
- ۶۱..... ۴-۴-۲-۴- حل مسئله مرتبه دو
- ۶۲..... ۳-۴- میکروتیر غیر یکنواخت
- ۶۲..... ۱-۳-۴- معادلات بدون بعد
- ۶۳..... ۲-۳-۴- روش آشفتهگی
- ۶۳..... ۱-۲-۳-۴- تکنیک MTSM
- ۶۴..... ۲-۲-۳-۴- حل مسئله مرتبه صفر
- ۶۴..... ۱-۲-۲-۳-۴- روش گالرکین
- ۶۸..... ۳-۲-۳-۴- حل مسئله مرتبه یک
- ۶۸..... ۴-۲-۳-۴- حل مسئله مرتبه دو
- ۶۹..... ۴-۴- نانوتیر یکنواخت
- ۷۰..... ۱-۴-۴- معادلات حرکت
- ۷۱..... ۲-۴-۴- تئوری غیر محلی برای نانوتیر
- ۷۱..... ۱-۲-۴-۴- روابط ساختاری
- ۷۳..... ۲-۲-۴-۴- تنش متعجه
- ۷۳..... ۳-۴-۴- معادلات بعد دار AFM
- ۷۴..... ۴-۴-۴- معادلات بدون بعد
- ۷۵..... ۵-۴-۴- روش آشفتهگی
- ۷۵..... ۱-۵-۴-۴- تکنیک MTSM
- ۷۷..... ۲-۵-۴-۴- حل مسئله مرتبه صفر
- ۷۷..... ۱-۲-۵-۴-۴- روش انتگرالی
- ۸۱..... ۲-۲-۵-۴-۴- پاسخ صریح مود شکل خطی

۸۲.....	۴-۴-۵-۲-۳- اعمال شرایط مرزی
۸۵.....	۴-۴-۵-۳- حل مسئله مرتبه یک
۸۶.....	۴-۴-۵-۴- حل مسئله مرتبه دو
۸۷.....	۴-۵- تحلیل ارتعاشات غیر خطی
۸۷.....	۴-۵-۱- پاسخ‌های مجانبی در حالت AM
۸۹.....	۴-۵-۲- پایداری پاسخ‌ها
۹۰.....	۴-۵-۱-۲- حالت اول برای پایداری
۹۰.....	۴-۵-۲-۲- حالت دوم برای پایداری
۹۰.....	۴-۵-۳- پاسخ اجباری غیر خطی
۹۱.....	۴-۵-۴- ارتعاشات آزاد
<b>۹۳.....</b>	<b>۵- فصل پنجم : کنترل مقاوم AFM به روش QFT</b>
۹۳.....	۵-۱- مقدمه
۹۴.....	۵-۲- اهداف کنترل
۹۵.....	۵-۳- مدل معادل پارامتر-انباشته برای میکروتیر یکنواخت
۹۵.....	۵-۳-۱- معادله دیفرانسیل پاره‌ای بی بعد
۹۵.....	۵-۳-۲- روش گالرکین
۹۷.....	۵-۴- مدل معادل پارامتر-انباشته برای میکروتیر غیر یکنواخت
۹۷.....	۵-۴-۱- معادله دیفرانسیل پاره‌ای بی بعد
۹۸.....	۵-۴-۲- روش گالرکین
۱۰۱.....	۵-۵- مدل معادل پارامتر-انباشته برای نانوتیر یکنواخت
۱۰۱.....	۵-۵-۱- معادله دیفرانسیل پاره‌ای بی بعد
۱۰۱.....	۵-۵-۲- روش گالرکین
۱۰۵.....	۵-۶- توابع انتقال
۱۰۵.....	۵-۶-۱- تابع انتقال معادلات غیر خطی بروش هرویتز
۱۰۶.....	۵-۶-۲- تابع انتقال AFM
۱۰۷.....	۵-۷- کنترل مقاوم AFM بروش QFT
<b>۱۱۱.....</b>	<b>۶- فصل ششم : بحث و بررسی نتایج</b>
۱۱۱.....	۶-۱- مقدمه
۱۱۳.....	۶-۲- نتایج ارتعاشات



۱۱۳.....	۱-۲-۶- تایید و اعتبارسنجی
۱۱۵.....	۲-۲-۶- میکروتیر یکنواخت
۱۱۵.....	۱-۲-۲-۶- بررسی مود شکل خطی
۱۲۱.....	۲-۲-۲-۶- بررسی فرکانس خطی
۱۲۶.....	۳-۲-۲-۶- بررسی ارتعاشات آزاد غیر خطی
۱۳۳.....	۴-۲-۲-۶- بررسی ارتعاشات اجباری غیر خطی
۱۴۲.....	۳-۲-۶- میکروتیر غیر یکنواخت
۱۴۲.....	۱-۳-۲-۶- بررسی مود شکل خطی
۱۴۵.....	۲-۳-۲-۶- بررسی فرکانس خطی
۱۵۱.....	۳-۳-۲-۶- بررسی ارتعاشات آزاد غیر خطی
۱۵۶.....	۴-۳-۲-۶- بررسی ارتعاشات اجباری غیر خطی
۱۶۰.....	۴-۲-۶- نانوتیر یکنواخت
۱۶۰.....	۱-۴-۲-۶- بررسی مود شکل خطی
۱۶۱.....	۲-۴-۲-۶- بررسی فرکانس خطی
۱۶۷.....	۳-۴-۲-۶- بررسی ارتعاشات آزاد غیر خطی
۱۷۲.....	۴-۴-۲-۶- بررسی ارتعاشات اجباری غیر خطی
۱۷۷.....	۳-۶- نتایج کنترل
۱۷۷.....	۱-۳-۶- میکروتیر یکنواخت
۱۸۲.....	۲-۳-۶- میکروتیر غیر یکنواخت
۱۸۵.....	۳-۳-۶- نانوتیر یکنواخت
<b>۱۹۰.....</b>	<b>۷- فصل هفتم : نتیجه گیری</b>
۱۹۰.....	۱-۷- جمع بندی
۱۹۴.....	۲-۷- پیشنهادات
<b>۱۹۵.....</b>	<b>منابع و مأخذ</b>

## فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۵- انواع مشخصات عملکرد مطلوب در جعبه ابزار QFT نرم افزار MATLAB	۱۰۸
جدول ۲-۵- مشخصات فیدبک برای سیستم‌های گسسته (کلاسیک) با $H = 1$	۱۰۹
جدول ۱-۶- پارامترهای عددی	۱۱۲
جدول ۲-۶- سه فرکانس اول بی بعد تیر یک سرگیردار با یک جرم اینرسی دار در انتهای تیر	۱۱۴
جدول ۳-۶- فرکانس اول بی بعد میکروتیر یک سرگیردار AFM با پویش‌گری در انتها	۱۱۵
جدول ۴-۶- پنج فرکانس اول بی بعد میکروتیر یک سرگیردار AFM	۱۱۵
جدول ۵-۶- پنج فرکانس اول بی بعد نانوتیر یک سرگیردار اویلر- برنولی	۱۱۶
جدول ۶-۶- پنج فرکانس خطی اول بی بعد میکروتیر یک سرگیردار اویلر- برنولی با $J_t = 10^{-8}$	۱۲۱
جدول ۷-۶- پنج فرکانس خطی اول بی بعد میکروتیر یک سرگیردار اویلر- برنولی با $M_t = 0.08$	۱۲۲
جدول ۸-۶- پنج فرکانس اول بی بعد میکروتیر یک سرگیردار AFM بر اساس تغییر سفتی تماس	۱۲۷
جدول ۹-۶- پنج فرکانس اول بی بعد میکروتیر یک سرگیردار AFM بر اساس تغییر جرم پویش‌گر	۱۲۷
جدول ۱۰-۶- پنج فرکانس اول بی بعد میکروتیر یک سرگیردار AFM بر اساس تغییر ممان اینرسی جرمی	۱۲۸
جدول ۱۱-۶- پنج فرکانس خطی اول بی بعد میکروتیر یک سرگیردار گوه‌ای ناقص AFM با $J_t = 10^{-8}$	۱۴۶
جدول ۱۲-۶- پنج فرکانس خطی اول بی بعد میکروتیر یک سرگیردار گوه‌ای ناقص AFM با $M_t = 0.08$	۱۴۶
جدول ۱۳-۶- فرکانس‌های غیر خطی میکروتیر گوه‌ای ناقص $p = q = 0.5$ بر اساس تغییر سفتی تماس	۱۵۱
جدول ۱۴-۶- فرکانس‌های غیر خطی میکروتیر گوه‌ای ناقص $p = q = 0.5$ بر اساس تغییر جرم پویش‌گر	۱۵۲
جدول ۱۵-۶- فرکانس‌های غیر خطی میکروتیر گوه‌ای ناقص $p = q = 0.5$ بر اساس تغییر ممان اینرسی	۱۵۲
جدول ۱۶-۶- فرکانس خطی اول بی بعد نانوتیر یک سرگیردار اویلر- برنولی AFM	۱۶۴
جدول ۱۷-۶- فرکانس خطی دوم بی بعد نانوتیر یک سرگیردار اویلر- برنولی AFM	۱۶۵
جدول ۱۸-۶- فرکانس خطی سوم بی بعد نانوتیر یک سرگیردار اویلر- برنولی AFM	۱۶۵
جدول ۱۹-۶- فرکانس خطی چهارم بی بعد نانوتیر یک سرگیردار اویلر- برنولی AFM	۱۶۵
جدول ۲۰-۶- فرکانس خطی پنجم بی بعد نانوتیر یک سرگیردار اویلر- برنولی AFM	۱۶۶
جدول ۲۱-۶- فرکانس‌های غیر خطی نانوتیر یک سرگیردار AFM بر اساس تغییر پارامتر مقیاس کوچک	۱۶۷
جدول ۲۲-۶- فرکانس‌های غیر خطی نانوتیر یک سرگیردار AFM بر اساس تغییر پارامتر سفتی تماس	۱۶۸

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۳.....	شکل ۱-۱- نمودار درختی پایان نامه .....
۱۴.....	شکل ۱-۲- یک نمونه از دستگاه تجاری AFM .....
۱۵.....	شکل ۲-۲- طرز کار شماتیک AFM .....
۱۹.....	شکل ۳-۲- منحنی شماتیک نیرو- فاصله .....
۲۴.....	شکل ۱-۳- ساختار فیدبک دو درجه آزادی .....
۲۷.....	شکل ۲-۳- فلوجارت روش طراحی کنترل مقاوم QFT .....
۳۴.....	شکل ۳-۳- مرز پایداری یا مرز-U .....
۴۲.....	شکل ۱-۴- مدل AFM (الف) نمایش شماتیک (ب) پارامترها و بارگذاری‌ها .....
۴۳.....	شکل ۲-۴- المان تیر اوپلر - برنولی مدل شده برای AFM .....
۴۴.....	شکل ۳-۴- نمایش نیرو گسترده .....
۴۶.....	شکل ۴-۴- المان تیر و میدان جابجائی طبق نظریه اوپلر - برنولی .....
۱۰۵.....	شکل ۱-۵- نمایش بلوکی تابع انتقال نامعین .....
۱۱۳.....	شکل ۱-۶- تیر گوه‌ای ناقص .....
۱۳۴.....	شکل ۲-۶- پدیده جهش در منحنی بک- بون .....
۱۳۵.....	شکل ۳-۶- شاخه‌های پایدار و ناپایدار منحنی بک- بون برای پاسخ فرکانسی AFM .....

## فهرست نمودارها

عنوان	صفحه
نمودار ۳-۲-۱- نمودارهای بودی کران بالا و پایین حالت ایده ال مدل ردیابی.....	۳۰
نمودار ۳-۲-۲- نمودارهای بودی کران بالا و پایین حالت افزوده شده مدل ردیابی.....	۳۱
نمودار ۳-۲-۳- مشخصه‌های عملکرد ردیابی مطلوب در حوزه زمان.....	۳۱
نمودار ۳-۲-۴- نگاره‌های نامعینی در نمودار نیکولز.....	۳۳
نمودار ۳-۲-۵- کران‌های QFT (الف) مرز پایداری مقاوم (ب) کران ردیابی (ج) کران حذف اغتشاش ورودی (د) کران حذف اغتشاش خروجی.....	۳۷
نمودار ۳-۲-۶- کران مرکب QFT.....	۳۷
نمودار ۳-۲-۷- تابع تبدیل حلقه باز نامی.....	۳۸
نمودار ۳-۲-۸- تابع تبدیل حلقه بسته.....	۳۹
نمودار ۳-۲-۹- نمودار بود سیستم کنترل شده با پیش فیلتر.....	۳۹
نمودار ۳-۲-۱۰- پاسخ زمانی حلقه بسته.....	۴۰
نمودار ۳-۲-۱۱- پاسخ زمانی سیستم حلقه باز و بسته به ورودی اغتشاش ضربه.....	۴۰
نمودار ۶-۲-۱- پنج مود شکل خطی AFM در حالت نرمال شده.....	۱۱۶
نمودار ۶-۲-۲- مود شکل‌های خطی AFM بر اساس تغییر پارامتر سفتی تماس (الف) مود اول، (ب) مود دوم، (ج) مود سوم.....	۱۱۸
نمودار ۶-۲-۳- مود شکل‌های خطی AFM بر اساس تغییر پارامتر جرم پوشش‌گر (الف) مود اول، (ب) مود دوم، (ج) مود سوم.....	۱۱۹
نمودار ۶-۲-۴- مود شکل‌های خطی AFM بر اساس تغییر پارامتر ممان اینرسی جرمی پوشش‌گر (الف) مود اول، (ب) مود دوم، (ج) مود سوم.....	۱۲۰
نمودار ۶-۲-۵- اثر ضریب سفتی تماس بر نسبت مود اول فرکانس خطی به فرکانس تیر ساده (الف) $J_t = 10^{-8}$ (ب) $M_t = 0.03$ .....	۱۲۳
نمودار ۶-۲-۶- نسبت فرکانس خطی AFM به ازای تغییر نسبت جرمی برای پنج مود اول.....	۱۲۴
نمودار ۶-۲-۷- نسبت فرکانس خطی AFM به ازای تغییر ممان اینرسی جرمی برای پنج مود اول.....	۱۲۴
نمودار ۶-۲-۸- نسبت فرکانس خطی AFM به ازای تغییر سفتی تماس برای پنج مود اول.....	۱۲۶
نمودار ۶-۲-۹- فرکانس اساسی AFM به ازای تغییر سفتی تماس.....	۱۲۸
نمودار ۶-۲-۱۰- فرکانس اساسی AFM به ازای تغییر جرم پوشش‌گر.....	۱۲۹

- نمودار ۶-۲-۱۱- نسبت فرکانس غیر خطی به فرکانس خطی AFM به ازای تغییر دامنه ارتعاش ..... ۱۲۹
- نمودار ۶-۲-۱۲- اثر پارامتر میرایی بر مود اول دامنه ارتعاش غیر خطی بر حسب زمان ..... ۱۳۰
- نمودار ۶-۲-۱۳- اثر پارامتر جرمی بر مود اول دامنه ارتعاش غیر خطی بر حسب زمان ..... ۱۳۱
- نمودار ۶-۲-۱۴- فاز ارتعاش غیر خطی بر حسب زمان ..... ۱۳۱
- نمودار ۶-۲-۱۵- پاسخ ارتعاش آزاد غیر خطی میکروتیر AFM در موقعیت پویش گر بر اساس تغییر پارامتر میرایی ویسکوز (الف)  $c_v = 0.001$ ، (ب)  $c_v = 0.003$ ، (ج)  $c_v = 0.005$  و (د)  $c_v = 0.01$  ..... ۱۳۲
- نمودار ۶-۲-۱۶- پاسخ ارتعاش آزاد غیر خطی میکروتیر AFM در موقعیت پویش گر بر اساس تغییر پارامتر سفتی تماس (الف)  $k_1 = 0.01$ ، (ب)  $k_1 = 0.1$ ، (ج)  $k_1 = 0.5$  و (د)  $k_1 = 1$  ..... ۱۳۳
- نمودار ۶-۲-۱۷- پاسخ گذرا و (ب) منحنی فازی برای یک نقطه مرکزی ..... ۱۳۶
- نمودار ۶-۲-۱۸- منحنی بک- بون میکروتیر AFM جهت مقایسه و معتبر کردن نتایج ..... ۱۳۷
- نمودار ۶-۲-۱۹- منحنی پاسخ فرکانسی میکروتیر AFM برای چندین مقدار پارامتر دامنه تحریک با  $\beta = 0.1$  و  $\gamma = 0.5$  ..... ۱۳۷
- نمودار ۶-۲-۲۰- منحنی پاسخ فرکانسی میکروتیر AFM برای چندین مقدار پارامتر میرایی با  $q = 0.2$  و  $\gamma = 0.5$  ..... ۱۳۸
- نمودار ۶-۲-۲۱- منحنی پاسخ فرکانسی میکروتیر AFM برای چندین مقدار پارامتر غیر خطی با  $\beta = 0.1$  و  $q = 0.2$  ..... ۱۳۹
- نمودار ۶-۲-۲۲- منحنی پاسخ فرکانسی میکروتیر AFM برای چندین مقدار ضریب میرایی ویسکوز ..... ۱۳۹
- نمودار ۶-۲-۲۳- منحنی پاسخ فرکانسی میکروتیر AFM برای چندین مقدار ضریب سفتی تماس ..... ۱۴۰
- نمودار ۶-۲-۲۴- منحنی پاسخ فرکانسی میکروتیر AFM برای چندین مقدار جرم پویش گر ..... ۱۴۱
- نمودار ۶-۲-۲۵- منحنی پاسخ فرکانسی میکروتیر AFM برای چندین مقدار پهنای تیر ..... ۱۴۱
- نمودار ۶-۲-۲۶- منحنی پاسخ فرکانسی میکروتیر AFM برای چندین مقدار طول تیر ..... ۱۴۲
- نمودار ۶-۲-۲۷- پنج مود شکل خطی AFM گوه‌ای ناقص در حالت نرمال شده ..... ۱۴۳
- نمودار ۶-۲-۲۸- مود شکل‌های خطی AFM در حالت نرمال شده برای سه میکروتیر (الف) مود اول، (ب) مود دوم، (ج) مود سوم، (د) مود چهارم ..... ۱۴۳
- نمودار ۶-۲-۲۹- مود شکل دوم خطی میکروتیر گوه‌ای ناقص در ازای تغییر (الف) پارامتر سفتی تماس، (ب) نسبت جرمی، (ج) پارامتر ممان اینرسی جرمی ..... ۱۴۴
- نمودار ۶-۲-۳۰- مقایسه نسبت فرکانس‌های سه میکروتیر AFM ..... ۱۴۷
- نمودار ۶-۲-۳۱- فرکانس‌های سه میکروتیر AFM در ازای تغییر سفتی تماس با  $M_t = 0.02$  و  $J_t = 10^{-8}$  ..... ۱۴۸
- نمودار ۶-۲-۳۲- فرکانس‌های سه میکروتیر AFM در ازای تغییر نسبت جرمی با  $\beta_1 = 0.5$  و  $J_t = 10^{-8}$  ..... ۱۴۸

- نمودار ۶-۲-۳۳- فرکانس‌های سه میکروتیر AFM در ازای تغییر ممان اینرسی جرمی با  $\beta_1 = 0.5$  و  $M_t = 0.02$  ..... ۱۴۹
- نمودار ۶-۲-۳۴- پنج فرکانس اول میکروتیر گوه‌ای ناقص در ازای تغییر نسبت جرمی ..... ۱۵۰
- نمودار ۶-۲-۳۵- پنج فرکانس اول میکروتیر گوه‌ای ناقص در ازای تغییر ممان اینرسی جرمی ..... ۱۵۰
- نمودار ۶-۲-۳۶- پنج فرکانس اول میکروتیر گوه‌ای ناقص در ازای تغییر سفتی تماس ..... ۱۵۱
- نمودار ۶-۲-۳۷- فرکانس اول میکروتیر گوه‌ای ناقص در ازای تغییر سفتی تماس در حالت خطی و غیر خطی ..... ۱۵۳
- نمودار ۶-۲-۳۸- فرکانس اول میکروتیر گوه‌ای ناقص در ازای تغییر جرم پوشش‌گر در حالت خطی و غیر خطی ..... ۱۵۳
- نمودار ۶-۲-۳۹- فرکانس اول میکروتیر گوه‌ای ناقص در ازای تغییر ممان اینرسی جرمی پوشش‌گر در حالت خطی و غیر خطی ..... ۱۵۴
- نمودار ۶-۲-۴۰- پاسخ ارتعاش آزاد غیر خطی میکروتیر گوه‌ای ناقص AFM در موقعیت پوشش‌گر بر اساس تغییر (الف) میرایی ویسکوز، (ب) سفتی تماس و (ج) جرم پوشش‌گر ..... ۱۵۵
- نمودار ۶-۲-۴۱- منحنی بک- بون میکروتیر گوه‌ای ناقص در ازای تغییر پارامتر دامنه تحریک ..... ۱۵۶
- نمودار ۶-۲-۴۲- منحنی بک- بون میکروتیر گوه‌ای ناقص در ازای تغییر ضریب میرایی ویسکوز ..... ۱۵۷
- نمودار ۶-۲-۴۳- منحنی بک- بون میکروتیر گوه‌ای ناقص در ازای تغییر ضریب سفتی تماس ..... ۱۵۷
- نمودار ۶-۲-۴۴- منحنی بک- بون میکروتیر گوه‌ای ناقص در ازای تغییر جرم پوشش‌گر ..... ۱۵۸
- نمودار ۶-۲-۴۵- منحنی بک- بون میکروتیر گوه‌ای ناقص در ازای تغییر پارامتر هندسی پهنای تیر ..... ۱۵۹
- نمودار ۶-۲-۴۶- منحنی بک- بون میکروتیر گوه‌ای ناقص در ازای تغییر پارامتر هندسی طول تیر ..... ۱۵۹
- نمودار ۶-۲-۴۷- پنج مود شکل خطی نانوتیر AFM در حالت نرمال شده ..... ۱۶۱
- نمودار ۶-۲-۴۸- مود شکل‌های خطی نانوتیر AFM بر اساس تغییر پارامتر سفتی تماس با  $\alpha = 0.05$  (الف) مود اول، (ب) مود دوم، (ج) مود سوم ..... ۱۶۲
- نمودار ۶-۲-۴۹- مود شکل‌های خطی نانوتیر AFM بر اساس تغییر پارامتر مقیاس کوچک با  $\beta_1 = 1$  (الف) مود اول، (ب) مود دوم، (ج) مود سوم ..... ۱۶۳
- نمودار ۶-۲-۵۰- جابجائی انتهای نانوتیر AFM در مود اول بر حسب تغییر پارامتر سفتی تماس برای چند مقدار پارامتر مقیاس کوچک ..... ۱۶۴
- نمودار ۶-۲-۵۱- نسبت فرکانس نانوتیر یکسرگیردار AFM در ازای تغییر پارامتر مقیاس کوچک با  $\beta_1 = 1$  (الف) مود اول، (ب) مود دوم تا پنجم ..... ۱۶۶
- نمودار ۶-۲-۵۲- نسبت فرکانس نانوتیر AFM در ازای تغییر پارامتر سفتی تماس با  $\alpha = 0.1$  ..... ۱۶۷

- نمودار ۶-۲-۵۳- فرکانس‌های خطی و غیر خطی اساسی نانوتیر AFM در ازای تغییر سفتی تماس با  $\alpha = 0.08$  ..... ۱۶۸
- نمودار ۶-۲-۵۴- فرکانس‌های خطی و غیر خطی نانوتیر AFM در ازای تغییر پارامتر مقیاس کوچک با  $\beta_1 = 1$  ..... ۱۶۹
- (الف) مود اول و (ب) مود دوم ..... ۱۶۹
- نمودار ۶-۲-۵۵- نسبت فرکانس غیر خطی به خطی مود اول نانوتیر AFM بر حسب دامنه ارتعاش (الف) به ازای مقادیر مختلفی از سفتی تماس با  $\alpha = 0.01$  و (ب) به ازای مقادیر مختلفی از مقیاس کوچک با  $\beta_1 = 0.5$  ..... ۱۶۹
- نمودار ۶-۲-۵۶- منحنی دامنه بر حسب زمان با تغییر پارامتر (الف) بی بعد میرایی ویسکوز و (ب) مقیاس کوچک، منحنی فاز بر حسب زمان با تغییر پارامتر (ج) بی بعد میرایی ویسکوز و (د) مقیاس کوچک ..... ۱۷۰
- نمودار ۶-۲-۵۷- جابجائی انتهای نانوتیر AFM بر حسب زمان برای مقادیر مختلفی از میرایی ویسکوز بی بعد (الف)  $\mu = 0.1$ ، (ب)  $\mu = 0.3$ ، (ج)  $\mu = 0.5$  و (د)  $\mu = 0.9$  ..... ۱۷۱
- نمودار ۶-۲-۵۸- جابجائی انتهای نانوتیر AFM بر حسب زمان برای مقادیر مختلفی از سفتی تماس (الف)  $\beta_1 = 0.1$ ، (ب)  $\beta_1 = 1$ ، (ج)  $\beta_1 = 5$  و (د)  $\beta_1 = 20$  ..... ۱۷۲
- نمودار ۶-۲-۵۹- جابجائی انتهای نانوتیر AFM بر حسب زمان برای مقادیر مختلفی از پارامتر مقیاس کوچک ..... ۱۷۳
- نمودار ۶-۲-۶۰- پاسخ فرکانسی نانوتیر یکنواخت AFM در ازای تغییر پارامتر دامنه تحریک ..... ۱۷۴
- نمودار ۶-۲-۶۱- منحنی بک- بون نانوتیر در ازای تغییر سفتی تماس (الف) سخت کاری و (ب) نرم کاری ..... ۱۷۴
- نمودار ۶-۲-۶۲- منحنی بک- بون نانوتیر AFM در ازای تغییر ضریب میرایی ویسکوز ..... ۱۷۵
- نمودار ۶-۲-۶۳- پاسخ فرکانسی نانوتیر در ازای تغییر پارامتر مقیاس کوچک ..... ۱۷۶
- نمودار ۶-۲-۶۴- منحنی بک- بون AFM در ازای تغییر نسبت طول به ضخامت نانوتیر ..... ۱۷۶
- نمودار ۶-۳-۱- (الف) پاسخ زمانی و (ب) پاسخ فرکانسی مطلوب سیستم حلقه بسته ..... ۱۷۸
- نمودار ۶-۳-۲- کران‌های (الف) مرز پایداری مقاوم، (ب) ردیابی، (ج) حذف اغتشاش ورودی، (د) حذف اغتشاش خروجی و (ه) مرکب ..... ۱۷۹
- نمودار ۶-۳-۳- نمودار نیکولز تابع تبدیل جبران شده ..... ۱۸۰
- نمودار ۶-۳-۴- نمودار بودی سیستم جبران شده با پیش فیلتر ..... ۱۸۰
- نمودار ۶-۳-۵- تحلیل مسئله پایداری مقاوم ..... ۱۸۱
- نمودار ۶-۳-۶- تحلیل مسئله اغتشاش مقاوم (الف) ورودی و (ب) خروجی ..... ۱۸۱
- نمودار ۶-۳-۷- پاسخ زمانی سیستم (الف) حلقه بسته با ورودی پله واحد و (ب) حلقه باز و بسته نامی با ورودی ضربه واحد ..... ۱۸۱

- نمودار ۶-۳-۸- کران‌های (الف) مرز پایداری مقاوم، (ب) ردیابی، (ج) حذف اغتشاش ورودی، (د) حذف اغتشاش خروجی و (ه) مرکب ..... ۱۸۲
- نمودار ۶-۳-۹- نمودار نیکولز تابع تبدیل جبران شده ..... ۱۸۳
- نمودار ۶-۳-۱۰- نمودار بودی سیستم جبران شده با پیش فیلتر ..... ۱۸۳
- نمودار ۶-۳-۱۱- تحلیل مسئله پایداری مقاوم ..... ۱۸۴
- نمودار ۶-۳-۱۲- تحلیل مسئله اغتشاش مقاوم (الف) ورودی و (ب) خروجی ..... ۱۸۵
- نمودار ۶-۳-۱۳- پاسخ زمانی سیستم (الف) حلقه بسته با ورودی پله واحد و (ب) حلقه باز و بسته نامی با ورودی ضربه واحد ..... ۱۸۵
- نمودار ۶-۳-۱۴- کران‌های (الف) مرز پایداری مقاوم، (ب) ردیابی، (ج) حذف اغتشاش ورودی، (د) حذف اغتشاش خروجی و (ه) مرکب ..... ۱۸۶
- نمودار ۶-۳-۱۵- نمودار نیکولز تابع تبدیل جبران شده ..... ۱۸۷
- نمودار ۶-۳-۱۶- نمودار بودی سیستم جبران شده با پیش فیلتر ..... ۱۸۷
- نمودار ۶-۳-۱۷- تحلیل مسئله پایداری مقاوم ..... ۱۸۸
- نمودار ۶-۳-۱۸- تحلیل مسئله اغتشاش مقاوم (الف) ورودی و (ب) خروجی ..... ۱۸۸
- نمودار ۶-۳-۱۹- پاسخ زمانی سیستم (الف) حلقه بسته با ورودی پله واحد و (ب) حلقه باز و بسته نامی با ورودی ضربه واحد ..... ۱۸۹



# فصل اول

## مقدمه

### ۱-۱- دیباچه

میکروسکوپ نیروی اتمی یا به اختصار<sup>۱</sup> AFM ابزاری کارآمد و سودمند برای اندازه‌گیری‌های مستقیم از نیروهای بین مولکولی با تفکیک پذیری اتمی است که در طیف وسیعی از کاربردها از جمله سیستم‌های نانو بکار گرفته می‌شود. دلایل توجه ویژه و روبه رشد به AFM در حوزه‌های مختلف تکنولوژی کاربردی اعم از الکترونیک، هوافضا، خودروسازی، علم مواد، بیولوژی، ارتباطات از راه دور، انرژی، داروسازی، لوازم آرایشی، پتروشیمی و... از قرار ذیل می‌باشد: دقت بالا، عدم محدودیت در بررسی سطوح در شرایط محیطی مختلف، عدم نیاز به آماده سازی نمونه در اغلب موارد، سرعت بالای اندازه‌گیری، تهیه تصاویر سه بعدی، توانایی بررسی انواع خواص سطحی، بررسی کیفیت ساختار و خواص ادوات ساخته شده، بررسی تحولات ساختار و خواص ادوات با گذشت زمان و در شرایط مختلف.

---

1 -Atomic Force Microscope

منظور دانشمندان از پیگیری این اهداف، آگاهی از اصول بهینه سازی روش‌های ساخت و پارامترهای مربوطه، افزایش کارآیی مجموعه و زیادتر شدن طول عمر ادوات است. تحلیل پایداری تصویربرداری و پاسخ ارتعاشی پروب نیاز به بررسی دقیق تری از دینامیک میکروتیر دارد. از اینرو یافتن فرکانس‌های طبیعی و تحلیل فرکانسی مجموعه مرتعش و همچنین مقاوم بودن سیستم در مواجهه با نامعینی‌ها و کنترل فعال آن جهت حفظ وضعیت مطلوب در برابر اغتشاش و نویز از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است و دامنه وسیعی از پژوهش‌ها را به خود اختصاص داده است.

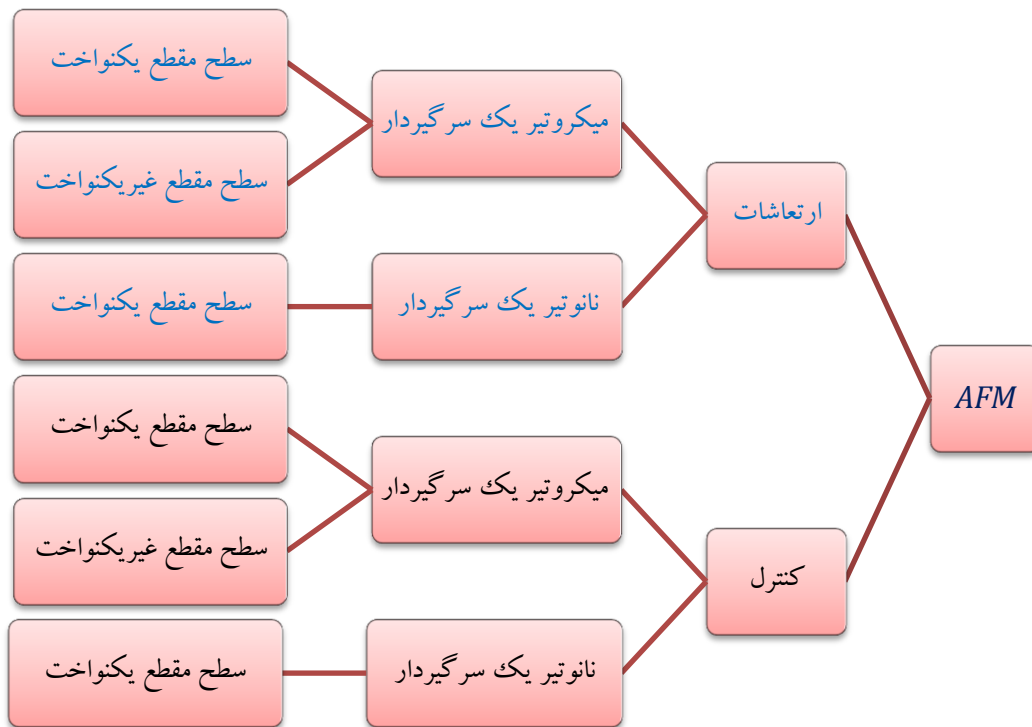
## ۱-۲- چشم انداز

در این پایان نامه، کنترل فعال در پایداری مقاوم ارتعاشات غیر خطی میکرو/نانوتیر میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی شده است. این مطالعه به حل تحلیلی ارتعاشات غیر خطی اجباری میکرو/نانوتیر یک سرگیردار AFM با هندسه سطح مقطع یکنواخت و غیر یکنواخت، حفظ پایداری و عملکرد مطلوب سیستم در حضور نامعینی‌ها، اغتشاشات و نویزهای وارده پرداخته است. در بررسی جامع رفتار دینامیکی AFM، پروژه به دو قسمت کلی تحلیل ارتعاشات غیر خطی و کنترل مقاوم فیدبک دار تفکیک می‌شود. در هر قسمت سه حالت حل شده است: میکروتیر یکنواخت، میکروتیر غیر یکنواخت و نانوتیر یکنواخت، که در شکل ۱-۱ بیان شده اند.

تیر یک سرگیردار AFM با تئوری اوپلر-برنولی مدل شده است که در انتهای تیر پوشش گرا<sup>۱</sup> سیستم قرار دارد. به منظور در نظر گرفتن مدلی کامل نسبت به سایر تحقیقات انجام شده، تیپ دارای جرم و ممان اینرسی جرمی است. همچنین تعامل نیرویی میان تیپ تیر و سطح نمونه برداری با نیروی واندروالس شبیه سازی شده است، که در مدل ریاضی به صورت دو فنر خطی و غیر خطی مدلسازی شده است. به علاوه اثر میرایی بین تیپ و سطح نمونه مورد آزمایش با قرار دادن یک دمپر ویسکوز لحاظ شده است.

---

1 -Probe



شکل ۱-۱- نمودار درختی پایان نامه

گذشته از این بواسطه نوع کارکرد AFM پایه تیر در معرض تحریک هارمونیک قرار دارد تا باعث شده نیرویی اجباری در معادلات حرکت حضور پیدا نماید. میرایی تیر یک سرگیردار AFM ناشی از دو منبع متفاوت است، منبع اول میرایی سیستم نامیده می‌شود که خود نتیجه‌ی اتلاف انرژی داخلی در تیر است و با میرایی ساختاری یا هیسترسیس<sup>۱</sup> بیان شده است. منبع دوم میرایی محیط پیرامون تیر است که با میرایی ویسکوز<sup>۲</sup> در معادلات حاکم قرار داده شده است، که هر دو در کل طول تیر به طور یکسان اثر می‌کنند (البته منبع سوم میرایی بین پوشش‌گر و سطح ماده است که محدود به یک ناحیه کوچک در انتهای تیر است).

موضوع اساسی که می‌بایست به آن پرداخته شود و یکی از اولین انگیزه‌های تعریف این پایان نامه هم می‌باشد، دینامیک به طور ذاتی غیر خطی تیر یک سرگیردار AFM است. رفتار غیر خطی AFM به دلیل ماهیت غیر خطی تعامل پوشش‌گر و سطح نمونه می‌باشد که توسط نیروی

1 -Hystersis damping

2 -Viscous damping

واندروالس<sup>۱</sup> بیان می‌شود. همچنین بواسطه این تعامل تیر خم شده و تغییر شکل‌های بزرگی انجام می‌دهد که سبب غیر خطی شدن هندسه تیر می‌گردد. در تمامی تحقیقات انجام شده در ارتباط با AFM رفتار تیر در اثر نیروی تعاملی خطی فرض شده است که با طبیعت غیر خطی AFM متناسب نیست. به همین دلیل در تحقیق حاضر کرنش تیر از نوع هندسی غیر خطی ون کارمن<sup>۲</sup> و نیروی تعاملی پویش‌گر و سطح نمونه از نوع واندروالس (در مدل ریاضی با دو فنر خطی و غیر خطی) فرض شده است. البته شایان توجه است که ارتعاشات هندسی غیر خطی را می‌توان به دو دسته کلی ارتعاشات با تغییر شکل بزرگ اما کرنش کوچک<sup>۳</sup> و ارتعاشات تحت کرنش محدود<sup>۴</sup> تقسیم کرد. ارتعاشات با تغییر شکل بزرگ به طور معمول با استفاده از فرضیه ون کارمن مدل می‌شوند. مطلب دیگری که می‌بایست به آن اشاره نمود این است که اکثر تحقیقاتی که تاکنون ارائه شده‌اند محدود به سازه‌هایی با سطح مقطع یکنواخت می‌باشند و برای بررسی سیستم AFM با سازه‌های غیر یکنواخت تحقیقات محدودی صورت گرفته است. حال آنکه در تکنولوژی ساخت AFM تیر آن دارای سطح مقطع غیر یکنواخت می‌باشد که این مسئله نیز یکی دیگر از انگیزهای تعریف این پایان‌نامه می‌باشد.

از کنترل مقاوم سیستم به عنوان انگیزه سوم این پروژه می‌توان نام برد. در زمینه تحقیقات صورت گرفته راجع به AFM موارد بسیار نادری از تحلیل کنترلی سیستم وجود دارد. در همین راستا یکی از بهترین روش‌های کنترل سیستم‌ها، کنترل مقاوم به روش نظریه فیدبک کمی<sup>۵</sup> QFT برای تحلیل پایداری سیستم در حضور نامعینی‌ها<sup>۶</sup>، اغتشاشات مزاحم<sup>۷</sup> و اجرای مسئله تعقیب (ردیابی)<sup>۸</sup> و تنظیم<sup>۹</sup>، در این کار استفاده شده است.

---

1 - Waals Van der

2 - Von-Karman

3 - Large deformation but small strain

4 - Finite strain

5 - Quantitative feedback theory

6 - Uncertainties

7 - Disturbances

8 - Problem Tracking

9 - Regulation problem