بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی ومهندسی

بخش مهندسی مکانیک

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک

گرایش طراحی کاربردی

تحلیل اثر میرایی ترموالاستیک بر ارتعاشات خمشی میکرو ـ نانو رزوناتورها در میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)

مؤلف :

مینا موسی پور

استاد راهنما :

دکتر محمد علی حاج عباسی

بهمن ماه ۱۳۹۰

تقدیم به:

به آستان آسمان دستان پر از ماه پدرم

زلال چشمه چشمان چشم به راه مادرم

ملکوت پر از سکوت و قنوط اساطیری استادم

و دوستانی که در صحیفه دلهاشان چیزی جز مهر ندیدم ...

تشکر و قدر دانی:

سر آغاز فصل آموختنم، با نام و یاد تو بود، ای محبوبترین معبود و پایانش را به امید شروعی دوباره، با نامت آغاز کردم.

حمد و سپاس بیکران از آن توست، که لحظه لحظه‌های زیستن و آموختنم، هر آنچه از علم و اراده و عمل که در وجودم ودیعه نهادی و یاری همراهانم، همه از لطف و مهربانی بی‌دریغ تو سرشار است.

مجموعه حاضر حاصلی است از تحقیق و تدوین یافته‌های مورد نظر و پژوهش در کشف و ارائه نتایجی هر چند خرد از بیکرانه‌های دانش، اما بی‌شک مرهون و مدیون همدلی‌ها و حمایت استادی است که دستان مرا در تکمیل این پایان‌نامه به هدایت گرفت تا این رساله بر پایه‌های استدلال و اندیشه قوام یابد و خود مرجعی باشد در گره‌گشایی خواسته‌های آیندگان.

از این جهت بر خود می دانم از راهنمایی‌های گرانقدر استاد فرهیخته‌ام جناب آقای دکتر محمدعلی حاج‌عباسی به عنوان استاد راهنما به جهت قرار دادن اطلاعات و دانسته‌های ارزشمند خویش در اختیارم صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از خانواده‌ام برای همکاری‌ها، حمایت‌ها و تشویق‌هایشان که هرگز توانایی جبران آن‌ها را نخواهم داشت سپاسگزارم.

چکیده:

در یک جامد ترموالاستیک، کوپل شدن میدان‌های کرنش و دما یک مکانیزم اتلاف انرژی را ایجاد می‌کند که میرایی ترموالاستیک نامیده می‌شود. دانستن اثرات کوپلینگ ترموالاستیک بر روی ویژگی‌های ارتعاشی از جمله فرکانس تشدید و حساسیت فرکانسی، برای طراحی سیستم‌های میکرو و نانوالکترومکانیکی ضروری است. از جمله رزوناتورهای مورد استفاده در چنین سیتسم‌هایی، می‌توان به تیر یک‌سرگیردار مورد استفاده در میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) اشاره کرد. در این پایان‌نامه اثر میرایی ترموالاستیک بر ارتعاشات رزوناتور AFM مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مدل رزوناتور یک تیر یک‌سرگیردار متصل به فنر است که فنر اثر سفتی سطح مربوط به جنس نمونه تحت آزمایش را در بر می‌گیرد. معادلات حاکم بر رفتار سیستم شامل معادله انتقال حرارت هدایت و معادلات حرکت ارتعاشی که به یکدیگر کوپل هستند، برای حالت سه بعدی استنتاج شده‌اند. در حل معادلات حاکم، با اتکا به روشهای تحلیلی و در نظر گرفتن فرضیات مناسب ابتدا معادله انتقال حرارت برای توزیع دمای سه بعدی در راستای ضخامت، عرض و طول میکروتیر حل می‌شود، سپس معادله حرکت ارتعاشی با لحاظ کردن کوپلینگ ترموالاستیک از طریق یک گشتاور وابسته به توزیع دما و همچنین اثر سفتی سطح نمونه آزمایشی برای مطالعه مود خمشی در راستای عمود بر سطح نمونه و ترکیب مود خمشی در جهت جانبی و پیچش حل می‌شود. در نهایت انتقال فرکانس، فاکتور کیفیت و حساسیت تحت اثرات میرایی ترموالاستیک و سفتی سطح به طور همزمان، برای ارتعاشات مود خمشی و ترکیب مود خمشی و مود پیچشی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. انتقال فرکانس بدست آمده در حالت‌های خاص با انتقال فرکانس حاصل از توزیع دمای دوبعدی مقایسه شده است، همچنین فاکتور کیفیت بدست آمده نیز با مدل‌های تحلیلی توزیع دمای یک‌بعدی مقایسه شده است. نتایج بدست‌آمده، نشان می‌دهد که مدل مطرح شده در این پایان‌نامه انطباق نسبتاً خوبی با سایر مدل‌ها دارد و اثر میرایی ترموالاستیک را بر رفتار میکرو – نانورزوناتورها به صورت دقیق‌تری پیش‌بینی می‌کند.

کلمات کلیدی: میرایی ترموالاستیک، رزوناتور، میکروسکوپ نیروی اتمی(AFM)

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول 1

مقدمه، مروری بر تحقیقات گذشته و معرفی موضوع پایان‌نامه 1

1-1- مقدمه 2

1-2- مروری بر تحقیقات گذشته 5

1-3- شرح موضوع پایان‌نامه 7

فصل دوم 9

میکرو – نانورزوناتورها 9

2-1- مقدمه 10

2-2- میرایی در MEMS و NEMS 10

2-2-1- میرایی ناشی از هوا ۱۱

2-2-2- اتلاف انرژی ناشی از شرایط تکیه‌گاهی ۱٤

2-2-3- میرایی ترموالاستیک ۱٥

2-2-4- اتلافات داخلی ۱٥

2-2-5- اتلافات مربوط به سطح ۱٥

2-3- آشنایی با میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) 16

2-4- حالت‌های کارکرد AFM 17

2-4-1- حالت استاتیکی ۱۷

2-4-2- حالت دینامیکی ۱۷

فصل سوم 20

اساس میرایی ترموالاستیک 20

3-1- مقدمه 21

3-2- میرایی ترموالاستیک 21

3-3- مدل استاندارد زنر برای یک جامد غیرالاستیک 23

فصل چهارم 29

میکروسکوپ نیروی اتمی(AFM) 29

4-1- مقدمه 30

4-2- معادلات حاکم 32

4-3- روش حل 38

4-4- بحث و نتیجه‌گیری 41

فصل پنجم 49

بررسی میرایی ترموالاستیک بر انتقال فرکانس‌ها و فاکتور کیفیت 49

5-1- مقدمه 50

5-2- معادلات حاکم 50

5-2-1- ارتعاشات کوپلینگ ترموالاستیک تیر ۵۰

5-2-2- تحلیل کوپلینگ ترموالاستیک ۵۷

5-2-2-1- معادله توزیع دمای سه بعدی 57

5-2-2-2- حل معادله توزیع دمای سه بعدی 59

5-2-3- ارتعاشات خمشی ترموالاستیک تیر ٦٨

5-2-4- حل معادله کوپلینگ ترموالاستیک ٦٩

5-3- ارائه یافته‌ها و نتایج 72

5-3-1- خطای نسبی انتقال فرکانس ۷۲

5-3-2- انتقال فرکانس ۷۳

5-3-3- فاکتور کیفیت ۷٤

5-3-4- تأثیر تغییرات سفتی سطح بر روی فرکانس‌های طبیعی و حساسیت‌های مودال با در نظر گرفتن ترم‌های کوپلینگ ترموالاستیک ۷۸

5-3-4-1- ارتعاشات خمشی در راستای عمود بر سطح نمونه 78

5-3-4-2- کوپلینگ ارتعاشات خمشی در جهت جانبی و پیچش 85

4-5- بحث و نتیجه‌گیری 93
فصل ششم 96
بحث و نتیجه‌گیری 96
6-1- مقدمه 97
6-2- نتایج حاصل از اثرات تغییرات سفتی سطح بر روی فرکانس رزونانس و حساسیت مودال 97
6-3- نتایج حاصل از اثر میرایی ترموالاستیک 98
6-4- پیشنهادات برای ادامه کار 100
مراجع 101

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل 1-2 تغییر فاکتور کیفیت یک رزوناتور Tang را با فشار [23] 12
شکل 2-2- (الف) میرایی در اثر جریان کوئت بین دو صفحه که به صورت موازی نسبت به یکدیگر حرکت می‌کنند، 13
(ب) میرایی در اثر فیلم فشرده برای دو صفحه که در جهت مخالف با یکدیگر حرکت می‌کنند. 13
شکل 1-3- مکانیزم میرایی ترموالاستیک در یک تیر در ارتعاشات خمشی 23
شکل 2-3- مدل مکانیکی معادل برای یک جامد غیرالاستیک استاندارد 24
شکل 3-3- تغییرات اتلاف 1/Q نسبت به فرکانس تحریک ω_n، در مدل زنر برای یک جامد غیرالاستیک استاندارد 27
شکل 4-3- تغییرات اتلاف 1/Q نسبت به ξ ، در مدل راکس و لیفشیتز 27
شکل 5-3- مقایسه تغییرات اتلاف 1/Q نسبت به ξ ، در مدل‌های زنر و راکس و لیفشیتز 28
شکل 1-4- چهار مدل تغییر شکل ممکن برای یک میکروتیر یک‌سرگیردار در AFM 31
شکل 2-4- مدل‌سازی سطح نمونه بوسیله سه فنر و دمپر در راستاهای x,y,z 32
شکل 3-4- دیاگرام شماتیک یک میکروسکوپ نیروی اتمی، مدل‌سازی نیروهای برهم‌کنش بین نوک میکروتیر و سطح نمونه بوسیله سه فنر خطی K_n، K_l و K_t 33
شکل 4-4 - فرکانس رزونانس پنج مود ارتعاشی اول به عنوان تابعی از سفتی تماسی نرمال، β_n 43
شکل 5-4 - فرکانس رزونانس پنج مود ارتعاشی اول به عنوان تابعی از سفتی تماسی مماسی، β_l 43
شکل 6-4 - حساسیت مودال پنج مود ارتعاشی اول به عنوان تابعی از سفتی تماسی نرمال، β_n 44
شکل 7-4 - حساسیت مودال پنج مود ارتعاشی اول به عنوان تابعی از سفتی تماسی مماسی، β_l 44
شکل 8-4- فرکانس رزونانس مود ارتعاشی اول به عنوان تابعی از سفتی تماسی نرمال، β_n و نسبت طول نوک میکروتیر به طول میکروتیر، H/L 46
شکل 9-4- فرکانس رزونانس مود ارتعاشی اول به عنوان تابعی از سفتی تماسی مماسی، β_l و نسبت طول نوک میکروتیر به طول میکروتیر، H/L 46
شکل 10-4- حساسیت مودال مود ارتعاشی اول به عنوان تابعی از سفتی تماسی نرمال، β_n و نسبت طول نوک میکروتیر به طول میکروتیر، H/L 47
شکل 11-4- حساسیت مودال مود ارتعاشی اول به عنوان تابعی از سفتی تماسی مماسی، β_l و نسبت طول نوک میکروتیر به طول میکروتیر، H/L 48
شکل 1-5- دیاگرام شماتیک یک میکروسکوپ نیروی اتمی 51
شکل 2-5- برآیند نیروها و گشتاورهای اعمال‌شده بر روی المانی از تیر 53
شکل 3-5- تغییرات خطای نسبی ε_k مربوط به حل تکراری معادله (63-5) برای انتقال فرکانس 73

شکل 4-5- مقایسه انتقال فرکانس محاسبه شده با استفاده از مدل سه بعدی توزیع دما و مدل دوبعدی بیان شده در مرجع [36] 74
شکل 5-5- مقایسه فاکتور کیفیت محاسبه شده با استفاده از مدل موجود با مدل‌های زنر و راکس و لیفشیتز 75
شکل 6-5- فاکتور کیفیت محاسبه شده با استفاده از مدل توزیع دمای سه بعدی برای تیر دوسرگیردار با نسبت پواسون میانگین ν=0/25 76
شکل 7-5- تغییرات فاکتور کیفیت برای تیر دوسرگیردار در مقادیر مختلف نسبت عرض به ضخامت، D/h و طول ثابت L=200μm 76
شکل 8-5- تغییرات فاکتور کیفیت برای تیر دوسرگیردار در مقادیر مختلف نسبت عرض به ضخامت، D/h و طول ثابت L=200μm 77
شکل 9-5- تغییرات فاکتور کیفیت در طول‌های مختلف برای تیر دوسرگیردار در دو مود ارتعاشی اول 78
شکل 10-5- ارتعاشات خمشی میکروتیر AFM در راستای عمود بر سطح نمونه 79
شکل 11-5- فرکانس رزونانس ایزوترمال سه مود ارتعاشی اول در ارتعاشات خمشی به عنوان تابعی از سفتی تماسی نرمال، β_n 81
شکل 12-5- انتقال فرکانس رزونانس ناشی از اثرات کوپلینگ ترموالاستیک سه مود ارتعاشی اول در ارتعاشات خمشی به عنوان تابعی از سفتی تماسی نرمال، 82
شکل 13-5 - حساسیت مودال ارتعاشات خمشی ایزوترمال سه مود ارتعاشی اول به عنوان تابعی از سفتی تماسی نرمال، β_n 83
شکل 14-5- تغییر حساسیت ناشی از اثرات کوپلینگ ترموالاستیک سه مود ارتعاشی اول در ارتعاشات خمشی به عنوان تابعی از سفتی تماسی نرمال، β_n 84
شکل 15-5- کوپلینگ ارتعاشات خمشی میکروتیر AFM در جهت جانبی و پیچش 85
شکل 16-5- فرکانس رزونانس ایزوترمال سه مود ارتعاشی اول به عنوان تابعی از سفتی تماسی مماسی، β_l 88
شکل 17-5- انتقال فرکانس رزونانس ناشی از اثرات کوپلینگ ترموالاستیک سه مود ارتعاشی اول در کوپلینگ ارتعاشات خمشی و پیچش به عنوان تابعی از سفتی تماسی مماسی، β_l 90
شکل 18-5 - حساسیت مودال کوپلینگ ارتعاشات خمشی و پیچش ایزوترمال سه مود ارتعاشی اول به عنوان تابعی از سفتی تماسی مماسی، β_l 91
شکل 19-5- تغییر حساسیت ناشی از اثرات کوپلینگ ترموالاستیک سه مود ارتعاشی اول در کوپلینگ ارتعاشات خمشی و پیچش به عنوان تابعی از سفتی تماسی مماسی β_l 92

فصل اول

مقدمه

مروری بر تحقیقات گذشته

معرفی موضوع پایان‌نامه

1-1- مقدمه

امروزه واژه MEMS که به معنای سیستم‌های میکروالکترومکانیکی[1] است، تبدیل به عبارتی معروف و کاربردی در فناوری برتر و تلفیقی دنیا شده است. این فناوری برای ساخت وسایل بسیار ریز (در ابعاد میلی‌متری تا میکرومتری) به کار می‌آید. سیستم‌های MEMS از دو بخش مکانیکی و الکتریکی تشکیل شده‌اند. بخش مکانیکی برای حس کردن یک کمیت از محیط اطراف (فشار، شتاب، تغییر سرعت زاویه ای و غیره) یا برای تحریک کردن[2] مثلاً بستن یا باز کردن یک میکروشیر و بخش الکتریکی، برای تبدیل سیگنال مکانیکی به الکتریکی و پردازش آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. تحقیقات اولیه در این زمینه، در سال‌های آغازین دهه هفتاد قرن بیستم میلادی شروع شد و طی دو دهه و با پیشرفت حیرت‌انگیز نانوتکنولوژی، واژه جدید NEMS در کنار MEMS پدیدار شد. NEMS یا سیستم‌های نانو – الکترومکانیکی[3] در واقع همان قابلیت‌های MEMS را در ابعاد بسیار کوچک‌تر بکار می‌گیرند. از اجزای مکانیکی مورد استفاده در سیستم‌های میکرو و نانو الکترومکانیکی، رزوناتورهای مکانیکی هستند.

رزوناتورهای[4] مکانیکی در ابعاد میکرو و نانو به این دلیل که حساسیت خیلی بالایی دارند، بسیار سریع پاسخ می‌دهند، بنابراین در سطح گسترده‌ای به عنوان سنسورها و مدولاتورها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در تکامل سیستم‌های مکانیکی تخمین مشخصه‌های میرایی، در واقع یکی از ضروری‌ترین و مهم‌ترین گام‌ها در فرآیند طراحی است زیرا این مشخصه‌ها، بویژه در مورد میکرو- نانوسیستم‌ها، عملکرد دینامیکی سیستم را تعیین می‌کنند. به دو دلیل باید اتلاف انرژی ناشی از میرایی در MEMS و NEMS به حداقل مقدار خود برسد:

1. آسان نبودن تأمین انرژی برای میکرو و نانوسیستم‌ها
2. استفاده از ارتعاشات رزونانس در بسیاری از میکرورزوناتورها و عملگرها[5] برای افزایش حساسیت یا دامنه جابجایی [1]، زیرا اثر اصلی میرایی بر سیستم های نوسانی عبارت است از محدود کردن دامنه پاسخ در حالت تشدید.

---

[1] - microelectromechanical system (MEMS)

[2] -actuation

[3] - nanoelectromechanical system (NEMS)

[4] - Resonators

[5] - actuators

بنابراین دانستن اینکه چه پارامترهایی و چگونه بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی میکرو-نانورزوناتورهای مکانیکی تأثیر می‌گذارند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در مورد رزوناتورها تمایل زیادی به طراحی و ساخت سیستم‌هایی با حداقل اتلاف انرژی یا حداکثر فاکتور کیفیت وجود دارد. متأسفانه مشاهده شده است که با کاهش اندازه، اتلاف انرژی به صورت پیوسته افزایش می‌یابد- حتی زمانی که رزوناتورها از مواد تک‌کریستالی خالص ساخته شده باشند-[2] .

برای طراحی میکرو –نانورزوناتورهایی با حداکثر فاکتور کیفیت، باید تمام مکانیزم‌های اتلاف انرژی که منجر به کاهش فاکتور کیفیت می‌شوند، مورد بررسی قرار بگیرند. این مکانیزم‌ها به دو دسته خارجی و ذاتی تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته اول مکانیزم‌های خارجی هستند که اصلی‌ترین آن‌ها اتلاف ناشی از هوا[6] است که می‌تواند بوسیله طراحی و شرایط محیطی مناسب به حداقل مقدار خود برسد. دسته دوم مکانیزم‌های ذاتی هستند که به سادگی مکانیزم‌های خارجی قابل کنترل نیستند.

محققان زیادی، مکانیزم‌های اتلافی متفاوتی که در MEMS و NEMS مطرح است را مورد بررسی قرار داده‌اند. نظیر اتلافات ناشی از ناخالصی‌ها[7]، اتلافات مربوط به شرایط تکیه‌گاهی[8]، میرایی ترموالاستیک[9]، اثر آخزیر[10] و تابش انرژی از رزوناتور به محیط اطراف.

میهالویچ[11] و مک دونالد[12]، برای مشخص کردن مکانیزم اتلافی حاکم در میکرورزوناتورهای سیلیکونی تک‌کریستالی، در شرایط خلاء مکانیزم‌های مختلف اتلاف انرژی را اندازه‌گیری کردند. آنها سه منبع ممکن اتلافات مکانیکی شامل اتلافات ناشی از ناخالصی‌ها، اتلافات در ارتباط با شرایط تکیه‌گاهی و اتلافات سطحی[13] را مورد آزمایش قرار دادند [3]. زانگ[14] و همکاران، اثر میرایی ناشی از هوا[15]را روی پاسخ فرکانسی و فاکتور کیفیت[16] رزوناتور

---

[6] - air damping

[7] - doping impurities losses

[8] - support-related losses

[9] - thermoelastic damping (TED)

[10] - Akhiezer

[11] - Mihailovich

[12] - MacDonald

[13] - surface-related losses

[14] - Zhang

از نوع میکروتیر ماشینکاری شده[17] را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که میرایی ناشی از هوا در حالت کلی باعث انتقال فرکانس رزونانس و کاهش فاکتور کیفیت می‌شود و اثر آن، با کاهش ابعاد تیر افزایش می‌یابد [4].

هارینگتون[18] و همکاران، اتلافات مکانیکی را در میکرورزوناتورهای گالیم ارسنید تک‌کریستالی که در مودهای پیچشی و خمشی ارتعاش می‌کردند، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که فرکانس رزونانس با دما تغییر می‌کند [5]. هاستون[19] و همکاران، اهمیت میرایی ترموالاستیک را برای MEMS با پایه سیلیکون مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که اصطکاک داخلی بوجود آمده از این مکانیزم، هنگامی که اندازه سازه به مقادیر کمتر از 50 nm میل می‌کند همچنان وجود دارد و با کاهش اندازه، میزان آن قوی‌تر می‌شود [6]. لیفشیتز[20]، مکانیزم‌های اتلافی که در آن‌ها فونون‌ها نقش اساسی داشتند[21]، را در سیستم‌های مکانیکی در ابعاد کوچک، مورد بررسی قرار داد [7].

باور بر این است که میرایی ترموالاستیک[22] مهم‌ترین مکانیزم اتلافی ذاتی در دمای معمولی، میکرو – نانورزوناتورهای مکانیکی است. بنابراین برای بهبود عملکرد رزوناتورهای با فاکتور کیفیت بالا، مدل‌سازی دقیق و پیش‌بینی اتلاف ناشی از میرایی ترموالاستیک یک نیاز اساسی خواهد بود. اگرچه بیشتر مطالعات در مورد فاکتور کیفیت ترموالاستیک به صورت تحلیلی انجام شده است اما این تحلیل‌ها بر مبنای فرض‌های بسیار محدودکننده‌ای استوار است و به اندازه کافی رفتار یک مدل سه بعدی را به صورت دقیق پیش‌بینی نمی‌کند.

---

[15] - air damping

[16] - quality factor

[17] - micro-machined beam

[18] - Harrington

[19] - Houston

[20] - Lifshitz

[21] -phonon -mediated

[22] - thermoelastic damping

2-1- مروری بر تحقیقات گذشته

در ابتدا زنر در سال 1937 وجود میرایی ترموالاستیک را پیش‌بینی کرده بود [8 و9] و سپس به سرعت مفاهیم اساسی این تئوری را به صورت آزمایشگاهی نشان داد [10]. مجدداً آزمایش‌های شامل تئوری زنر بوسیله بری[23] در سال 1955 برای α-Brass انجام شدند، بری میرایی را به عنوان تابعی از فرکانس در دمای معمولی مورد بررسی قرار داد [11]. رزهارت[24] در سال 1990 پدیده میرایی ترموالاستیک را در دمای معمولی در میکرو- رزوناتورهای سیلیکونی تک‌کریستالی مشاهده کرد [12]. یاسومورا[25] همکاران، همچنین در سال 2000 گزارش‌هایی راجع به این پدیده در دمای معمولی برای میکرو- رزوناتورهای با جنس نیترید سیلیکون ارائه دادند، اما نتایج اندازه‌گیری شده آنها کمتر از مقادیری بود که رزهارت گزارش کرده بود [13]. لیفشیتز و راکس[26]در سال 2000 یک بیان تحلیلی برای میرایی ترموالاستیک تیر با سطح مقطع مستطیلی بدست آوردند. آنها دریافتند که بعد از پیک دبای[27]، میرایی ترموالاستیک با افزایش اندازه، ضعیف می‌شود [2]. فوتیادیس[28]و همکاران، در سال 2002، یک مدل ساده برای پیش‌بینی اتلاف میرایی ترموالاستیک در حالت کلی برای نوسانگرهای آزاد MEMS/NEMS پیشنهاد کردند. آن‌ها اصطکاک داخلی نوسانگر double paddle را به صورت تابعی از دما اندازه‌گیری کردند. نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها با مدل پیش‌بینی شده یکسان بود. همچنین آنها نشان دادند که اصطکاک داخلی برای دماهای بالاتر از 150 K وجود دارد [14].

جیسین[29]و همکاران، در سال 2004، فرکانس رزونانس ω و اصطکاک داخلی Q^{-1} را برای مود اول تیر یکسرگیردار سیلیکونی در ابعاد میکرو و در محدوده دمایی 15-300 K اندازه‌گیری کردند. به دلیل اینکه ضریب انبساط گرمایی α_T به دما بستگی دارد، آنها انتظار داشتند که میرایی ترموالاستیک در 20 K و 125 K به صفر برسد. مینیمم اصطکاک داخلی در 20 K مشاهده شد،

---

[23] - Berry

[24] - Roszhardt

[25] - Yasumura

[26] - Roukes

[27] - Debye peak

[28] - Photiadis

[29] - Gysin

در حالی که مینیمم اتلافی که در 125 K ظاهر شده بود، بوسیله اثرات دیگر اتلاف انرژی ناچیز در نظر گرفته می‌شد. ماکزیمم اصطکاک داخلی در 160 K مشاهده شد که این میزان حداکثر به دلیل پراکندگی فونون‌هایی است، که بوسیله عیوب در ابعاد اتمی بوجود آمده است [15]. گولدینگ[30] و همکاران، در سال 1973 میرایی و فرکانس رزونانس را در ارتعاشات تیرهای نازک با جنس Euo تک‌کریستالی، در مودهای خمشی بین 0/4 و 2/8 kHz مورد بررسی قرار دادند. مشاهدات آزمایشگاهی آنها بر حسب فرآیندهای ترموالاستیک و اتلافات بحرانی بود. آن‌ها دریافتند که پروسه میرایی ترموالاستیک در فرکانس‌های پایین ناچیز خواهد بود [16].

هاستون و همکاران، در سال 2004 مکانیزم میرایی ترموالاستیک را برای سازه‌هایی که ارتعاشات پیچشی دارند یا در حالت کلی برای شکل مودهای غیر بدیهی، مورد بررسی قرار دادند. پیش‌بینی آنها به خوبی با اصطکاک داخلی اندازه گرفته شده برای ابعاد بزرگ نوسانگر double paddle سیلیکونی تک کریستالی (با ضخامت 30 μm) در دمای 130-300 K مطابقت داشت. نتایج آنها نشان داد که اصطکاک داخلی ناشی از این مکانیزم قوی است و می‌تواند برای MEMS با پایه سیلیکون ($Q < 10^4$) اهمیت زیادی داشته باشد [17].

زنر با توجه به این فرض که سرعت انتقال حرارت در تیر بی‌نهایت است، از تئوری کلاسیک ترموالاستیک استفاده کرد. در حالی‌که سان[31] و همکاران، در سال 2006 برای بدست آوردن حل دقیق معادلات کوپلینگ ترموالاستیک و برای اصلاح تئوری زنر، از تئوری ترموالاستیک عمومی با یک زمان آسایش [32] استفاده کردند و اثر اندازه تیر و شرایط مرزی مکانیکی و حرارتی مختلفی را در دو انتهای تیر در نظر گرفتند. و در نهایت با مقایسه اثر میرایی ناشی از هوا و اثر میرایی ترموالاستیک، برای رزوناتور از نوع میکروتیر[33] دریافتند که در دمای معمولی، اثر میرایی ترموالاستیک برای این رزوناتورها بزرگتر از اثر میرایی ناشی از هوا است [18].

وانگ[34] و همکاران، در سال 2006، میرایی ترموالاستیک را در ارتعاشات درون صفحه‌ای[35] رینگ‌های سیلیکونی با سطح مقطع مستطیلی، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها ضریب میرایی

---

[30] - Golding

[31] - Yuxin sun

[32] - relaxation time

[33] - micro-beam resonators

[34] - Wong

ترموالاستیک بدست آمده بوسیله زنر و لیفشیتز و راکس را تعمیم دادند تا ارتعاشات خمشی درون صفحه‌ای رینگ‌های نازک را نیز در بر بگیرد. بیان Q^{-1} بدست آمده بوسیله وانگ و همکاران، به جز در مقدار طول مشخصه، که بر طبق شکل رزوناتورها تغییر می‌کند، همان بیانی بود که بوسیله لیفشیتز و راکس، برای تیرها بدست آمده بود[19].

ماسلاس[36] و کالپاکیادیس[37] در سال 1984 ارتعاشات ترموالاستیک را برای تیر تیموشنکو و تیر اولر- برنولی تحت تأثیر شار حرارتی پله‌ای، مورد بررسی قرار دادند. تحلیل ریاضی آن‌ها بر اساس تبدیل انتگرالی، روش مولر برای حل معادلات جبری و قضیه بسط هویساید[38] بود [20].

افشار و همکاران، در سال 2008 به بررسی ارتعاشات کوپلینگ ترموالاستیک تیرها، بر اساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه سوم تحت تأثیر شوک حرارتی پرداخته‌اند.آن‌ها از حل همزمان معادله حرکت و معادله انرژی برای به دست آوردن مؤلفه‌های جابجایی و توزیع دما در تیر استفاده کردند [21].

3-1- شرح موضوع پایان‌نامه

هنگامی که یک جامد الاستیک شروع به حرکت می‌کند و از حالت تعادل خارج می‌شود، در انرژی جنبشی و پتانسیل تغییراتی بوجود می‌آید. چنانچه جامد الاستیک خطی، کامل[39] و ایزوترمال باشد، تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل و تبدیل آنها به یکدیگر اجتناب‌ناپذیر است و همین امر اسباب اتلاف انرژی مکانیکی را بوجود می‌آورد. به عبارتی در مواد جامد ترموالاستیک، کوپل شدن میدان کرنش با میدان دما به یک مکانیزم اتلاف انرژی منتهی می‌شود که نتیجه برگشت به حالت تعادل و آسایش[40] سیستم است. آسایش جامد ترموالاستیک از طریق کوپلینگ جریان گرمای برگشت‌ناپذیر (که بوسیله گرادیان دمای موضعی بوجود آمده است) با میدان کرنش انجام

---

[35] - in-plane

[36] - Masslas

[37] - Kalpakidis

[38] - Heaviside

[39] - perfect

[40] - relax

می‌شود. این فرآیند اتلاف انرژی که اساساً منحصربفرد است میرایی ترموالاستیک نامیده می‌شود و این در حالیست که α_T - که به عنوان ثابت کوپلینگ عمل می‌کند- مخالف صفر باشد. میرایی ترموالاستیک حد بالایی را برای فاکتور کیفیت کامل‌ترین رزوناتورهای طراحی و ساخته شده،ارائه می‌دهد [2].

در کار حاضر تمرکز اصلی بر میکروتیر مورد استفاده در میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) است. با توجه به اینکه پارامترهای ارتعاشی یک رزوناتور از جمله فرکانس طبیعی آن، در میکروتیر AFM علاوه بر اینکه تحت تأثیر میرایی ترموالاستیک قرار دارند، تحت اثر نیروهای برهم‌کنش با سطح نیز هستند. بنابراین تحلیل‌ها در این پایان‌نامه به دو بخش کاملاً مجزا تقسیم می‌شوند. در بخش اول تأثیرات نیروهای برهم‌کنش با سطح بر فرکانس طبیعی و حساسیت فرکانسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش دوم برای به دست آوردن اثرات کوپلینگ ترموالاستیک و تأثیرات نیروهای برهم‌کنش با سطح به طور همزمان، توابع شکل در روش گالرکین با توجه به کار انجام شده در مرجع [36]، اصلاح شده‌اند.

بنابراین کار انجام شده در پایان‌نامه حاضر به فصل‌های زیر تقسیم‌بندی می‌شود:

- فصل اول، مقدمه‌ای بر آنچه که در این پایان‌نامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت، مروری بر تحقیقاتی که در گذشته انجام شده است و معرفی جامعی از موضوع پایان‌نامه.
- فصل دوم، میکرو – نانورزوناتورها، بررسی مختصری از مکانیزم‌های اتلاف انرژی که در MEMSها رخ می‌دهد و در ادامه آشنایی با حالت‌های کارکرد یک AFM.
- فصل سوم، اساس میرایی ترموالاستیک، اهمیت میرایی ترموالاستیک توضیح داده می‌شود و مرور مختصری بر دو روش کلاسیک خواهد شد و در پایان مختصری از آخرین کارهای انجام شده در این زمینه آورده شده است.
- فصل چهارم میکروسکوپ نیروی اتمی، در این فصل ارتعاشات کوپلینگ خمشی در دو راستای عمودی و جانبی و پیچشی میکروتیر AFM مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در حالی که تنها تأثیرات نیروهای برهم‌کنش با سطح مدنظر است و از اثرات میرایی ترموالاستیک چشم‌پوشی شده است.
- فصل پنجم، بررسی میرایی ترموالاستیک بر انتقال فرکانس‌ها و فاکتور کیفیت، بدست آوردن معادلات حاکم بر ارتعاشات ترموالاستیک تیر و حل معادله کوپلینگ توزیع دمای سه بعدی و در پایان یافته‌ها و نتایج به صورت نمودار ارائه شده است.

فصل دوم

میکرو – نانورزوناتورها[41]

[41] - Micro/Nano-Resonators