

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک
گروه مکاترونیک

**تحلیل ارتعاشات غیر خطی بازوی نانوکامپوزیتی یک میکروروبات
تحت تأثیر نیروی الکتروستاتیک و پیزوالکتریک همزمان با در نظر گرفتن کشش
لایه میانی**

دانشجو: فریده چیت‌ساز یزدی

استاد راهنما:
دکتر امیر جلالی

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ماه ۱۳۹۲

تقدیم بہ پدر و مادر عزیز، مہربان و خداکارم
کہ پیوستہ جرعہ نوش جام تعلیم و تربیت، فضیلت و انسانیت آہا بودہ ام
و ہموارہ چراغ وجودشان روشنگر راہ من در سختی ہا و مشکلات بودہ است

تشکر و قدردانی

سپاس بی‌کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه‌چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت. با تشکر از خدای مهربان و عرض ادب به پیشگاه تمامی اساتید محترم که در تمام مراحل تحصیل از دانش ارزشمندشان بهره‌مند شده‌ام.

از استاد بزرگوار، جناب آقای دکتر جلالی که با راهنمایی‌های ارزشمندشان مرا در تمام مراحل انجام این تحقیق یاری نمودند، کمال تشکر را داشته و برای ایشان آرزوی توفیق و عزت روزافزون دارم. همچنین از زحمات پدر و مادر گرامی‌ام و تمامی کسانی که در دوران تحصیل همواره مشوق و پشتیبان اینجانب بوده‌اند، قدردانی می‌کنم.

در این پایان‌نامه به بررسی رفتار استاتیکی و دینامیکی غیرخطی یک بازوی میکروروبات مورد استفاده در پزشکی در حین عمل برش رگ، که به صورت یک میکروتیر مدل شده است، پرداخته می‌شود. برای دستیابی به ویژگی‌های برتری از جمله افزایش فرکانس طبیعی به منظور کوتاه شدن زمان پاسخ برای سیستم، میکروعملگر از پلیمر تقویت شده با نانولوله‌های کربنی تک جداره^۱ (SWCNT) در نظر گرفته شده است. بستر پلیمری میکروتیر، دارای خاصیت ویسکوالاستیک می‌باشد که از مدل کلوین-ویت^۲ برای مدل‌سازی آن استفاده می‌شود. هندسه‌ی میکروتیر یکنواخت و همگن، سطح مقطع آن مستطیلی و شرایط مرزی برای آن دو سر گیردار در نظر گرفته می‌شود. میکروتیر تحت تحریک میدان الکتریکی و لایه پیزوالکتریک^۳ PZT می‌باشد. تحریک الکتریکی با اعمال یک ولتاژ ثابت DC و یک ولتاژ هارمونیک کوچک AC بین الکتروود ثابت و میکروتیر، اعمال می‌شود. تحریک پیزوالکتریک نیز توسط یک ولتاژ ثابت DC بین دو سطح لایه پیزوالکتریک به سیستم اعمال می‌شود. معادلات حاکم بر حرکت، با در نظر گرفتن تئوری تیر اویلر-برنولی غیرخطی، اثر کشیدگی لایه‌ی میانی و نیروی محوری، از اصل هامیلتون^۴ استخراج می‌شوند. تغییر شکل استاتیکی و فرکانس طبیعی ارتعاش آزاد سیستم حول موقعیت استاتیکی، توسط روش گالرکین^۵ حاصل می‌شوند. پاسخ دینامیکی غیرخطی میکروتیر ویسکوالاستیک حول موقعیت استاتیکی در حالت تشدید اولیه، با استفاده از روش مقیاس‌های چندگانه^۶ در تئوری اغتشاشات و روش گالرکین با تقریب دو شکل متقارن اول به صورت نیمه‌تحلیلی بدست می‌آید. تأثیر پارامترهای مختلف طراحی از جمله ولتاژ الکتروستاتیک، ولتاژ و طول لایه پیزوالکتریک و نسبت ضخامت میکروتیر به لایه پیزوالکتریک بر

¹ Single Walled Carbon Nano-Tube

² Kelvin-Voigt

³ Piezoelectric

⁴ Hamilton Principle

⁵ Galerkin Method

⁶ Multiple Scale Method

روی تغییر شکل استاتیکی، فرکانس طبیعی و میرایی سیستم بررسی شده است. همچنین رفتار دینامیکی سیستم غیرخطی در حالت تشدید اولیه به ازای پارامترهای مختلف سیستم مورد بررسی قرار گرفته و علت تغییر رفتار ارتعاشی میکروتیر بر اثر تغییر پارامترها بیان شده است. در ادامه، محدوده‌ی پایدار و ناپایدار سیستم دینامیکی حول موقعیت استاتیکی برای نقطه‌ی تعادل، با تشکیل ماتریس ژاکوبین مطالعه و تحلیل شده است. افزایش میرایی به ازای افزایش ولتاژ تحریک الکتروستاتیک و لایه پیزوالکتریک، افزایش تغییر شکل استاتیکی و فرکانس طبیعی میکروتیر با افزایش ولتاژ اعمالی به لایه پیزوالکتریک و کاهش دامنه ارتعاشات غیرخطی سیستم بر اثر کاهش دامنه تحریک ولتاژ AC، از جمله نتایج بررسی در این پایان‌نامه می‌باشد.

کلمات کلیدی:

میکروتیر نانو کامپوزیت، روش مقیاس‌های چندگانه، ویسکوالاستیک، لایه پیزوالکتریک، تحریک

الکتروستاتیک.

فهرست مطالب

۱	فصل ۱ مقدمه و مروری بر کارهای انجام شده
۲	۱-۱. مقدمه
۳	۲-۱. میکروتیر در سیستم‌های میکروالکترومکانیکی
۴	۳-۱. نانو کامپوزیت
۵	۱-۳-۱. نانولوله‌های کربنی
۶	۲-۳-۱. رفتار ویسکوالاستیک
۷	۴-۱. تحریک در سیستم‌های MEMS
۷	۱-۴-۱. تحریک الکتروستاتیک
۸	۲-۴-۱. پیزوالکتریک
۱۰	۵-۱. مروری بر مقالات
۱۰	۱-۵-۱. تحریک سیستم‌های میکروالکترومکانیکی
۱۰	۱-۱-۵-۱. تحریک الکتروستاتیک
۱۳	۲-۱-۵-۱. تحریک با لایه پیزوالکتریک
۱۴	۳-۱-۵-۱. تحریک هم‌زمان الکتروستاتیک و لایه پیزوالکتریک
۱۶	۲-۵-۱. جنبه ساختاری
۱۸	۳-۵-۱. روش حل
۱۸	۱-۳-۵-۱. حل عددی
۲۰	۲-۳-۵-۱. حل تحلیلی
۲۱	۳-۳-۵-۱. حل نیمه‌تحلیلی
۲۲	۶-۱. اهداف و ضرورت انجام تحقیق
۲۲	۷-۱. نوآوری
۲۳	۸-۱. تعریف مسأله
۲۵	فصل ۲ استخراج معادلات حرکت
۲۶	۱-۲. مقدمه
۲۶	۲-۲. استخراج معادلات با استفاده از اصل هامیلتون
۴۹	فصل ۳ تغییر شکل استاتیکی و فرکانس طبیعی
۵۰	۱-۳. تغییر شکل استاتیکی
۵۳	۲-۳. فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی سیستم
۵۵	فصل ۴ پاسخ دینامیکی سیستم تحت تحریک هارمونیک اولیه

۵۶	.....	۱-۴. مقدمه
۵۶	.....	۱-۴-۱. نگاهی بر تئوری اغتشاشات
۵۷	.....	۲-۴. به کارگیری روش مقیاس‌های چندگانه در مسأله مورد بررسی
۶۶	.....	۳-۴. پایداری سیستم

فصل ۵ بررسی نتایج

۷۱	.....
۷۲	.....	۱-۵. مقدمه
۷۳	.....	۲-۵. بررسی تغییر شکل استاتیکی
۷۹	.....	۳-۵. بررسی فرکانس طبیعی
۸۲	.....	۴-۵. بررسی پاسخ فرکانسی
۸۸	.....	۵-۵. بررسی میرایی
۹۰	.....	۶-۵. بررسی پایداری

فصل ۶ نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

۹۳	.....
۹۴	.....	۱-۶. مقدمه
۹۴	.....	۲-۶. نتیجه‌گیری‌ها
۹۵	.....	۳-۶. پیشنهادها

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱. نمودار انتخاب ماده برای میکروعملگر [۱۱]..... ۶
- شکل ۱-۲. طرح شماتیک مدل کلون-ویت..... ۶
- شکل ۱-۳. شماتیک تیر تغییر شکل یافته تحت تحریک الکتروستاتیک..... ۷
- شکل ۱-۲. جابه‌جایی طولی و عرضی میکروتیر و دستگاه مختصات ثابت و محلی..... ۲۶
- شکل ۲-۲. میکروتیر تحت تحریک میدان الکتروستاتیک و لایه پیزوالکتریک..... ۲۷
- شکل ۲-۳. a. سطح مقطع میکروتیر و لایه پیزوالکتریک اصلی، b. سطح مقطع معادل سیستم..... ۲۹
- شکل ۵-۱. تغییرات خیز استاتیکی نسبت به تغییرات x برای میکروتیر با لایه پیزوالکتریک به طول $l_2 - l_1 = L$ در تحریک الکتروستاتیک $\eta v_{dc}^2 = 10$ و $\eta v_{dc}^2 = 30$ ۷۳
- شکل ۵-۲. مقایسه ماکزیمم تغییر شکل استاتیکی نسبت به تغییرات ηv_{dc}^2 برای میکروتیر سیستم مورد بررسی، با میکروتیر در [۶۳] همراه با لایه پیزوالکتریک به طول $l_2 - l_1 = 0.8L$ ۷۴
- شکل ۵-۳. تأثیر تغییر طول لایه پیزوالکتریک بر تغییر شکل استاتیکی مرکزی میکروتیر به ازای ηv_{dc}^2 مختلف..... ۷۵
- شکل ۵-۴. تأثیر تغییر مقدار $\gamma_1 v_p$ بر تغییر شکل استاتیکی مرکزی میکروتیر با لایه پیزوالکتریک به طول $l_2 - l_1 = 0.5L$ به ازای ηv_{dc}^2 مختلف..... ۷۶
- شکل ۵-۵. تأثیر تغییر مقدار β_1 بر تغییر شکل استاتیکی مرکزی میکروتیر با لایه پیزوالکتریک به طول $l_2 - l_1 = 0.8L$ به ازای ηv_{dc}^2 مختلف..... ۷۷
- شکل ۵-۶. تأثیر تغییر ضخامت لایه پیزوالکتریک بر تغییر شکل استاتیکی مرکزی میکروتیر با لایه پیزوالکتریک به طول $l_2 - l_1 = L$ به ازای ηv_{dc}^2 مختلف..... ۷۷
- شکل ۵-۷. بررسی تغییر شکل استاتیکی مرکزی میکروتیر نسبت به تغییرات $\gamma_1 v_p$ ۷۸
- شکل ۵-۸. بررسی تغییر شکل استاتیکی مرکزی میکروتیر نسبت به تغییرات β_1 ۷۹
- شکل ۵-۹. تأثیر تغییر طول لایه پیزوالکتریک بر فرکانس طبیعی میکروتیر به ازای تغییرات ηv_{dc}^2 ۸۰
- شکل ۵-۱۰. تأثیر تغییر مقدار $\gamma_1 v_p$ بر فرکانس طبیعی میکروتیر با لایه پیزوالکتریک به طول $l_2 - l_1 = 0.5L$ به ازای ηv_{dc}^2 مختلف..... ۸۰
- شکل ۵-۱۱. تأثیر تغییر مقدار β_1 بر فرکانس طبیعی میکروتیر با لایه پیزوالکتریک به طول $l_2 - l_1 = 0.8L$ به ازای ηv_{dc}^2 مختلف..... ۸۱
- شکل ۵-۱۲. تأثیر تغییر ضخامت لایه پیزوالکتریک بر فرکانس طبیعی میکروتیر با لایه پیزوالکتریک به طول $l_2 - l_1 = L$ به ازای ηv_{dc}^2 مختلف..... ۸۱
- شکل ۵-۱۳. بررسی تغییرات فرکانس طبیعی سیستم نسبت به تغییرات $\gamma_1 v_p$ ۸۲
- شکل ۵-۱۴. بررسی تغییرات فرکانس طبیعی سیستم نسبت به تغییرات β_1 ۸۲
- شکل ۵-۱۵. مقایسه نتایج پاسخ دینامیکی برای میکروتیر مورد بررسی با نتایج در [۳۷] در $\eta v_{dc}^2 = 20$ ۸۳
- شکل ۵-۱۶. تغییرات a_0 نسبت به تغییرات σ برای میکروتیر با لایه پیزوالکتریک به طول $l_2 - l_1 = L$ ۸۳
- شکل ۵-۱۷. تغییرات a_0 نسبت به تغییرات σ برای میکروتیر به ازای $\eta v_{dc}^2 = 20$ برای طول‌های مختلف لایه پیزوالکتریک..... ۸۴
- شکل ۵-۱۸. تغییرات a_0 نسبت به تغییرات σ برای میکروتیر با لایه پیزوالکتریک به طول $l_2 - l_1 = 0.5L$ ۸۵

- ۸۵ و به ازای $\eta v_{dc}^2 = 20$ برای $\gamma_1 v_p$ های مختلف
- شکل ۵-۱۹.** تغییرات a_0 نسبت به تغییرات σ برای میکروتیر با لایه پیزوالکتریک به طول
- ۸۶ $l_2 - l_1 = 0.8L$ و به ازای $\eta v_{dc}^2 = 20$ برای β_1 های مختلف
- شکل ۵-۲۰.** تغییرات a_0 نسبت به تغییرات σ برای میکروتیر با لایه پیزوالکتریک به طول $l_2 - l_1 = L$ ، به
- ۸۷ ازای $\eta v_{dc}^2 = 65$ ، برای نسبت ضخامت‌های مختلف لایه پیزوالکتریک به میکروتیر
- شکل ۵-۲۱.** تغییرات a_0 نسبت به تغییرات σ برای میکروتیر با لایه پیزوالکتریک به طول $l_2 - l_1 = L$
- ۸۸ و به ازای $\eta v_{dc}^2 = 10$ برای مقادیر مختلف ولتاژ هارمونیک v_{ac}
- شکل ۵-۲۲.** تغییرات مقدار میرایی ویسکوالاستیک نسبت به تغییرات ηv_{dc}^2 به ازای برای میکروتیر با لایه
- ۸۸ پیزوالکتریک به طول $l_2 - l_1 = 0.8L$ به ازای $C = 0.001$
- شکل ۵-۲۳.** تغییرات مقدار میرایی ویسکوالاستیک نسبت به تغییرات β_1 در $\eta v_{dc}^2 = 20$ به ازای
- ۸۹ $C = 0.001$
- شکل ۵-۲۴.** تغییرات مقدار میرایی ویسکوالاستیک نسبت به تغییرات γ_1 در $\eta v_{dc}^2 = 20$ به ازای
- ۸۹ $C = 0.001$
- شکل ۵-۲۵.** تغییرات a_0 نسبت به تغییرات σ برای میکروتیر با لایه پیزوالکتریک به طول
- ۹۰ $l_2 - l_1 = 0.8L$ و به ازای $\eta v_{dc}^2 = 30$ برای مقادیر مختلف μ
- شکل ۵-۲۶.** بررسی پایداری سیستم به ازای نمودار تغییرات F بر حسب a_0
- ۹۱

فهرست جداول

- جدول ۵-۱. مشخصات ماده و هندسه میکروتیر و لایه پیزوالکتریک ۷۲
- جدول ۵-۲. مقادیر پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی ۷۳

فهرست علائم

$M(s)$	جرم بر واحد طول سیستم
H_{l_i}	تابع پله
ρ_1, ρ_2	به ترتیب چگالی جرمی میکروتیر و لایه پیزوالکتریک
t_1, t_2	به ترتیب ضخامت میکروتیر و لایه پیزوالکتریک
w_c	عرض میکروتیر و لایه پیزوالکتریک
V, W	به ترتیب جابه جایی طولی و عرضی میکروتیر
K	انرژی جنبشی سیستم
U	انرژی پتانسیل سیستم
F_u	کار نیروهای خارجی سیستم
σ_1, σ_2	به ترتیب تنش محوری میکروتیر و لایه پیزوالکتریک
ε_s	کرنش نرمال میکروتیر و لایه پیزوالکتریک
\bar{C}	ضریب ویسکوالاستیک میکروتیر در مدل کلین-ویت
P	فاصله تار خنثی تا مرکز میکروتیر، برای میکروتیر همراه با لایه پیزوالکتریک
d_{31}	ثابت کرنش لایه پیزوالکتریک
v_p	ولتاژ اعمالی به لایه پیزوالکتریک
e	کرنش ناشی از کشش لایه میانی
k	انحنای خمشی میکروتیر تغییر شکل یافته در صفحه SZ
A_1, A_2	به ترتیب سطح مقطع میکروتیر و لایه پیزوالکتریک
A_3	ممان اول سطح برای سطح مقطع لایه پیزوالکتریک حول تار خنثی
I_1	ممان اینرسی سطح مقطع میکروتیر حول تار خنثی برای $s > l_2$ و $s < l_1$
I_2	ممان اینرسی سطح مقطع لایه پیزوالکتریک حول تار خنثی برای $l_1 < s < l_2$
I_3	ممان اینرسی سطح مقطع میکروتیر برای $l_1 < s < l_2$
$B_1(s), B_3(s)$	به ترتیب سختی محوری و خمشی سیستم
$B_2(s), B_4(s)$	به ترتیب نیروی محوری و گشتاور خمشی به علت اثر پیزوالکتریک
$B_5(s), B_6(s)$	به ترتیب ضریب نیروی محوری و گشتاور خمشی در سطح مقطع به خاطر ساختار ویسکوالاستیک
h	فاصله هوایی میکروتیر و صفحه الکترودی
v_{dc}	ولتاژ dc اعمالی بین میکروتیر و صفحه الکترودی
v_{ac}	دامنه ولتاژ تحریک هارمونیک بین میکروتیر و صفحه الکترودی
$\hat{\Omega}$	فرکانس ولتاژ هارمونیک اعمالی بین میکروتیر و صفحه الکترودی
ε_0	ثابت دی الکتریک در خلأ
\hat{f}	جابه جایی محوری ثابت اعمالی به یک انتهای میکروتیر
t	زمان
C	شکل بی بعد ضریب میرایی ویسکوالاستیک در مدل کلین-ویت
T	مقیاس زمانی
τ	زمان در حالت بی بعد
x	مکان در حالت بی بعد
α	ضریب ناشی از بار محوری در معادله حرکت بی بعد

β	ضریب جمله غیرخطی ناشی از کشش لایه میانی در معادله حرکت بی‌بعد
η	ضریب جمله ناشی از تحریک الکتریکی در معادله حرکت بی‌بعد
γ_{P1}, γ_{P2}	به ترتیب ضرایب جملات ناشی از اثر محوری و خمشی پیزوالکتریک در معادله حرکت بی‌بعد
$H_{1n}(x)$	ضریب جمله خطی ناشی از انحنای خمشی در معادله حرکت بی‌بعد
$H_{2n}(x)$	ضریب جمله خطی ناشی از اثر ویسکوالاستیک در معادله حرکت بی‌بعد
$H_{3n}(x)$	ضریب جمله غیر خطی ناشی از اثر ویسکوالاستیک در معادله حرکت بی‌بعد
$M_n(x)$	جرم بر واحد طول سیستم در حالت بی‌بعد
Γ	عملگری که به صورت $\int_0^L \frac{\partial a}{\partial x} \frac{\partial b}{\partial x} dx$ بیان می‌شود
w_s	تغییر شکل استاتیکی سیستم
$u(x, \tau)$	جابه‌جایی دینامیکی سیستم
φ	شکل مودهای ارتعاش سیستم خطی حول موقعیت استاتیکی
ω	فرکانس طبیعی ارتعاش سیستم حول موقعیت استاتیکی
$R_{s[i]}$	ضرایب گالرکین بدست آمده برای توابع مقایسه‌ای برای بدست آوردن w_s
$R_{d[i]}$	ضرایب گالرکین بدست آمده برای توابع مقایسه‌ای برای بدست آوردن φ
ε	پارامتر بی‌بعد کوچک bookkeeping
$\phi(x)$	تابع شکل مودهای نرمال شده
$A(T_2), \bar{A}(T_2)$	به ترتیب عبارت مختلط حاوی دامنه و فاز پاسخ سیستم و مختلط آن
δ_{li}	تابع دلتای کرونکر
$\psi_1(x), \psi_2(x)$	توابع ظاهر شده در پاسخ دینامیکی سیستم
$c.c.$	مزدوج مختلط
$N.S.T.$	بیان‌گر جملات غیرسکولار در معادله
χ^v	ضرایب ناشی از میرایی ویسکوالاستیک میکروتیر
F	ضریب جمله حاصل از تحریک AC
S_q^G, S_c^G	به ترتیب ضریب ناشی از جمله‌های غیرخطی هندسی مرتبه ۲ و ۳
S_q^e, S_c^e	به ترتیب ضریب ناشی از جمله‌های غیرخطی الکتریکی مرتبه ۲ و ۳
S	ضرایب ناشی از جملات غیرخطی
a, \mathcal{G}	توابع معرف دامنه و فاز پاسخ سیستم
μ	ضریب ناشی از فاکتور کیفیت ویسکوالاستیک
r_1, r_2	به ترتیب بخش حقیقی و موهومی پاسخ سیستم
a_0	دامنه ارتعاشات پاسخ سیستم حول موقعیت استاتیکی
σ	اختلاف فرکانس تشدید غیرخطی با فرکانس طبیعی سیستم
λ	مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین

فصل ۱

مقدمه و مروری بر کارهای انجام

شده

۱-۱. مقدمه

چندین دهه از کشف و توسعه‌ی سیستم‌های میکروالکترومکانیکال یا MEMS^۱ گذشته است. سیستم‌های میکروالکترومکانیکال، تکنولوژی برجسته‌ای هستند که برای به وجود آوردن دستگاه‌ها و ادوات یکپارچه (مجتمع) با ترکیب مجموعه‌ای از میکرو حسگرها، میکرو عملگرها، اجزای مکانیکی و قطعات الکترونیکی به کار می‌روند که به کمک فناوری ساخت تراشه‌های میکرونی تولید شده‌اند. MEMS در سال‌های اخیر انقلابی ایجاد کرده و با جهش غیرقابل تصویری همراه بوده است. سیستم‌های میکروالکترومکانیکی با داشتن ویژگی‌هایی از جمله وزن سبک، اندازه‌ی کوچک، حساسیت بالا، مصرف کم انرژی، سازگاری با مدارهای مجتمع (IC) و کاهش عوامل نویز، تکنولوژی جدیدی را عرضه نمودند که به علت کاربرد گسترده‌ی آنها در انواع بخش‌های صنعتی، از جمله مکانیک، هوا فضا، رباتیک، حمل و نقل و ارتباطات، بررسی عملکرد اینگونه سیستم‌ها مورد توجه بسیاری از مهندسان و پژوهشگران قرار گرفته است. از کاربردهای برجسته‌ی این سیستم‌ها، می‌توان به پرینترهای جوهرافشان، میکروپمپ‌ها، سیستم‌های اندازه‌گیری و تنظیم اتوماتیک و تزریق دارو اشاره کرد. امروزه این تکنولوژی به سطح قابل قبولی رسیده است، به طوری که بشر در این زمینه به تکنولوژی ساخت شتاب‌سنج‌هایی کوچک‌تر از یک میلی‌متر، موتورهایی که تنها به کمک میکروسکوپ دیده می‌شوند، چرخ‌دنده‌هایی کوچکتر از موی انسان و سوزن‌هایی بسیار باریک که می‌توانند ماده‌ی دارویی را تزریق کنند، بدون این‌که به اعصاب آسیبی برسانند و صدها مورد دیگر دست پیدا کرده است. اخیراً MEMS در زمینه‌های مختلفی از جمله زیست‌شناسی، بیوشیمی، پزشکی و رباتیک کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است.

با توجه به این‌که ربات‌ها توانایی انجام کارهای سخت، تکراری و همچنین امکان حضور در محیط‌های غیرقابل دسترس و یا خطرناک برای انسان را دارند، دامنه‌ی کاربردی بالایی از جمله در پزشکی به خود اختصاص داده‌اند. پیشرفت تکنولوژی، حضور ربات‌ها در مقیاس میکرو به منظور انجام

^۱ Micro Electro Mechanical System

فعالیت‌های متعددی را فراهم کرده است. امکان استفاده از میکروروبات‌ها برای اولین بار در دهه‌ی ۱۹۷۰ توسط دانشمندان مورد بررسی قرار گرفت. تکنولوژی مورد نیاز برای خلق میکروروبات‌ها، سیستم‌های میکروالکترومکانیکی نامیده می‌شود. شتاب‌سنج‌ها، ژيروسکوپ‌ها، نوسان‌سازها به عنوان دستگاه‌های MEMS استفاده شده در میکروروبات‌ها می‌باشند. ربات‌های MEMS پتانسیل و توانایی بالایی در مسیریابی و حرکت در نواحی که دسترسی به آن به سختی صورت می‌گیرد، دارند. از این جمله می‌توان میکروروبات‌های صنعتی به منظور جابه‌جایی و اسمبلی نانوروبات‌ها و نانوماشین‌ها، میکروروبات‌های شناگر MEMS که در ارسال دارو به قسمت خاصی از بدن، جراحی، آنژیوپلاستی^۱، تشخیص و بررسی توده‌های سرطانی و به عنوان پروب‌های^۲ بدون درد در معاینات پزشکی استفاده می‌شوند را نام برد. با توجه به این‌که ربات‌ها برای انجام اکثر عملیات خود نیازمند یک عملگر مانند بازو می‌باشند، مشاهده می‌شود که انواع مختلف ربات‌ها از جمله ربات کارت‌زین، اسکارا، هنرمند و... هرکدام با ترکیب متفاوتی از بازو و نوع مفصل - مفصل آن می‌تواند کشویی و یا لولایی باشد - فضای کاری و عمل خاصی را به خود اختصاص می‌دهند. بازوی ربات توانایی انجام عملیات از پیش برنامه‌ریزی شده‌ی متنوعی را دارد. در انتخاب بازوی مکانیکی، آنچه اهمیت دارد این است که ساده‌ترین نمونه ممکن که بتواند وظیفه محوله را در زمان مطلوب انجام دهد، گزینش گردد.

در بین تمامی مدل‌های مورد استفاده برای میکروادوات، میکروتیرها کاربردهای بیشتر و مناسب‌تری دارند [۱].

۱-۲. میکروتیر در سیستم‌های میکروالکترومکانیکی

میکروتیرها بخاطر ویژگی‌های برجسته‌شان همچون، ساختار ساده‌ی آن، به سادگی قرار گرفتن در یک مدار مجتمع، توانایی سرد یا گرم شدن در مدت زمان چند میکروثانیه و امکان استفاده از آن در محیط‌های خلأ، هوا یا مایع بسیار مورد توجه می‌باشند [۲]. میکروتیرها بلوک اصلی بسیاری از

¹ Angioplasty

² Probe

سیستم‌های میکروالکترومکانیکی موجود از جمله رزوناتورها^۱، سنسورها، عملگرها، فیلترها و میکروسوئیچ‌ها می‌باشند. مسأله‌ی ارتعاشات این میکروتیرها به علت کاربرد وسیع و تطبیق‌پذیری بالای آنها در ساختارهای مختلف، در کاربردهای صنعتی و زیستی مورد توجه فراوان قرار گرفته است. به علت طبیعت میکرومقیاس بودن این سیستم، دامنه‌ی تحریک نقش مهمی را ایفا می‌کند، زیرا ممکن است حتی یک تغییر کم در دامنه‌ی تحریک، ارتعاشات و شیفت فرکانسی قابل ملاحظه‌ای را در بر داشته باشد [۳]. میکروتیرها در اکثر سیستم‌های میکروالکترومکانیکی از جمله میکروروبات‌ها، به عنوان ادوات حسگر و عملگر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

از میکروتیرها به عنوان سنسور در تشخیص یون‌ها، مولکول‌های کوچک، اندازه‌گیری غلظت یا تراکم پروتئین، تشخیص و شناسایی DNA، شناسایی باکتری و پادتن [۴-۶] و تشخیص رفتار بسیاری از تومورهای سرطانی استفاده شده است [۷].

در [۸-۱۰] از میکروتیر به عنوان عملگر در سیستم‌های میکروالکترومکانیکی استفاده شده است.

۳-۱. نانوکامپوزیت

طراحی میکروعملگرها و میکرو حسگرهای قابل اطمینان و با عملکرد بالا، در توسعه و پیشرفت سیستم‌های میکروالکترومکانیکی از اهمیت بالایی برخوردار است. سختی ساختاری عملگر، تعیین‌کننده‌ی نیروی مورد نیاز برای تغییر شکل مشخص سیستم می‌باشد و فرکانس طبیعی ارتعاشات، معیاری از پاسخ زمانی است [۱۱]. در نتیجه در ارتعاشات سیستم‌های MEMS و از جمله برای میکروعملگرها و میکرو حسگرها، سختی پایین و فرکانس طبیعی یا سرعت موج طولی بالا، مورد نیاز می‌باشد [۱۲]. مطابق با آزمایش‌های انجام شده در [۱۱]، با توجه به شکل (۱-۱) که سرعت موج طولی مواد مختلف را بر حسب مدول یانگ آنها نشان می‌دهد، بهترین ماده برای این منظور، پلیمرهای تقویت شده با الیاف و ایجاد ماده‌ی کامپوزیتی می‌باشند.

¹ Resonator

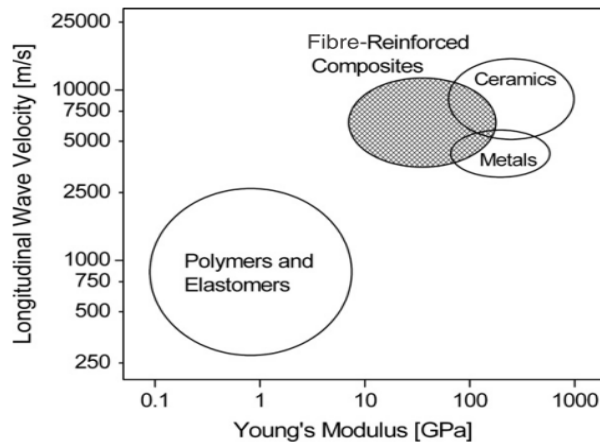
نیازهای تکنولوژی جدید، وجود مواد کامپوزیتی را الزامی کرده است. مواد کامپوزیتی به واسطه داشتن خواص منحصر به فردی مانند نسبت مقاومت مکانیکی به وزن بالا در عین قابلیت انعطاف و شکل پذیری عالی، مقاوم در برابر خوردگی و سایش، طول عمر بالا، دمپینگ بالا، عایق بودن حرارتی و صوتی و ... طی سال‌های اخیر به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۳]. با در نظر گرفتن ابعاد میکروسیستم‌ها، می‌توان از نانولوله‌های کربنی که کاملاً مناسب برای کاربرد در مقیاس میکرو می‌باشند، استفاده و نانوکامپوزیت ایجاد کرد. نانوکامپوزیت‌ها گروه جدید پراتیه‌ای از مواد ساختاری برای قطعات مکانیکی در سیستم‌های میکروالکترومکانیکی می‌باشند. سه نوع متفاوت از کامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله‌ی کربنی وجود دارد: نانولوله‌های کربن تک جداره (SWNT)، نانولوله‌های کربن چند جداره (MWNT) و آرایه‌ای از نانولوله‌های کربن تک جداره.

نانوکامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با نانولوله‌ی کربنی تک جداره، به عنوان بهترین گزینه برای میکروعملگرها و میکورزوناتورها، بخاطر خواص برتر آنها نسبت به سرامیک‌ها و فلزها شناسایی شده‌اند [۱۲].

۱-۳-۱. نانولوله‌های کربنی

کشف نانولوله‌های کربن توسط ایجیما^۱ در سال ۱۹۹۲ نقطه‌ی عطف جدیدی در علم مواد بوجود آورد [۱۴]. نتایج آزمایشگاهی حاکی از این واقعیت هستند که تنها با افزودن ۱٪ وزنی نانولوله‌ی کربن به رزین پلی‌استر، مدول یانگ کامپوزیت حاصل به میزان ۳۵٪ تا ۴۲٪ رشد نشان می‌دهد [۱۵]. با توجه به این که بستر میکروتیر نانوکامپوزیتی، پلیمر می‌باشد، در نتیجه دارای ساختار ویسکوالاستیک خواهد بود.

^۱ Iijima



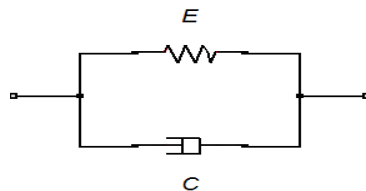
شکل ۱-۱. نمودار انتخاب ماده برای میکروعملگر [۱۱]

۱-۳-۲. رفتار ویسکوالاستیک

در ماده‌ی الاستیک، با حذف نیروی خارجی، تغییر شکل ایجاد شده قابل برگشت است، ولی در سیال ویسکوز، سیال تحت نیروی خارجی جریان پیدا می‌کند. ویسکوالاستیسیته خاصیت برخی از مواد، از جمله پلیمرها است که هر دو خصوصیت شبه جامد و شبه سیال را با هم دارند و رفتار میانی مواد ویسکوزیته و الاستیسیته را در هنگام تغییر شکل، از خود بروز می‌دهند.

از جمله مدل‌های مکانیکی برای توصیف مواد ویسکوالاستیک می‌توان به مدل ماکسول، مدل کلونین-ویت و مدل زنر اشاره کرد.

مدل کلونین-ویت یکی از کامل‌ترین و در عین حال ساده‌ترین مدل‌ها می‌باشد. این مدل شامل یک فنر موازی با دمپر است و به خوبی رفتار خزشی را توصیف می‌کند.



شکل ۱-۲. طرح شماتیک مدل کلونین-ویت

رابطه‌ی کلی تنش-کرنش در این مدل به صورت معادله (۱-۱) می‌باشد:

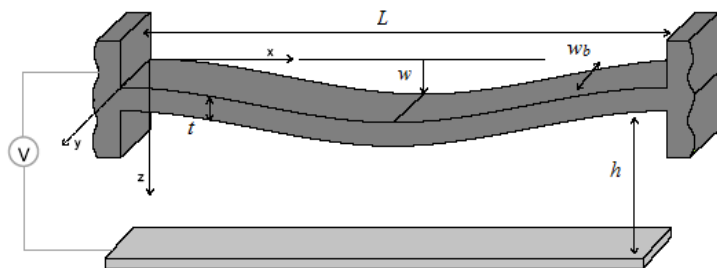
$$\sigma = E\varepsilon + C\dot{\varepsilon} \quad (1-1)$$

۴-۱. تحریک در سیستم‌های MEMS

فیزیک عملکردی سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، در حالت کلی ترکیب پیچیده‌ای از پدیده‌های مکانیکی و الکتریکی است که بصورت غیرقابل اجتنابی با یکدیگر کوپل شده‌اند. در نتیجه برای استفاده از آنها، می‌بایست به شناخت دقیقی نسبت به هر دو زمینه دست یافت. همان‌طور که بیان شد، المان اصلی سیستم‌های میکروالکترومکانیکی معمولاً یک میکروتیر است که به روش‌های مختلف الکتریکی، الکترومغناطیسی، پیزوالکتریک، نوری، حرارتی و ... تحریک می‌شوند. با توجه به اهمیت حسگر و عملگر در سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، در این تحقیق از تحریک الکتریکی و پیزوالکتریک بخاطر خصوصیات مناسب‌تر آنها استفاده شده است.

۱-۴-۱. تحریک الکتروستاتیک

تحریک الکتروستاتیک به دلیل سرعت بالا، امکان ساخت و تحقق راحت‌تر در کنار المان‌های کوچک، قابلیت تغییر شکل زیاد خصوصاً در مقابل تغییرات محیطی و دمایی، مصرف توان بسیار کم - در حد صفر- و تکیه بر انرژی ذخیره شده برای حفظ حالت دلخواه المان، به عنوان رایج‌ترین روش تحریک مطرح می‌گردد.



شکل ۱-۳. شماتیک تیر تغییر شکل یافته تحت تحریک الکتروستاتیک

تحریک الکتریکی در سیستم‌های میکروالکترومکانیکی مشابه با اثر خازنی می‌باشد. ساخت یک خازن با قرار دادن دو صفحه موازی در مجاورت هم و اعمال اختلاف پتانسیل بین آنها انجام می‌شود. با اعمال ولتاژ الکتریکی بین میکروتیر و الکتروود ثابتی که در سمت مقابل آن قرار دارد، میدان الکتریکی بوجود می‌آید که منجر به جابه‌جایی نسبی دو صفحه می‌گردد. چون موقعیت صفحه‌ی الکتروود ثابت