پایان‌نامه ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

عنوان پایان نامه:

بررسی ناپایداری Pull-In سیستم‌های نانو الکترو مکانیکی تیر شکل با استفاده از تئوری غیر موضعی

استاد راهنما:

دکتر یعقوب طادی بنی

استاد مشاور:

دکتر حسین گلستانیان

پژوهشگر:

سید محمد فاطمی

شهریور ماه ۱۳۹۳

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه‌ی آقای سید محمد فاطمی جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی با عنوان: بررسی ناپایداری Pull-In سیستم‌های نانوالکترومکانیکی تیر شکل با استفاده از تئوری غیر موضعی، در تاریخ ۱۳۹۳/۰۷/۱۴ با حضور هیأت داوران زیر بررسی و با نمره مورد تصویب نهایی قرار گرفت.

۱. **استاد راهنمای پایان نامه دکتر یعقوب طادی بنی با مرتبه علمی استادیار** **امضاء**

۲. **استاد مشاور پایان نامه دکتر حسین گلستانیان با مرتبه علمی دانشیار** **امضاء**

۳. **استاد داور پایان نامه دکتر احسان زمانی با مرتبه علمی استادیار** **امضاء**

۴. **استاد داور پایان نامه دکتر محسن بت شکنان با مرتبه علمی استادیار** **امضاء**

دکتر یعقوب طادی بنی

معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی

دانشکده فنی و مهندسی

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه شهرکرد است.

تقدیر و تشکر:

شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این پایان‌نامه را به پایان برسانم. از استادان فاضل و اندیشمند جناب آقای دکتر طادی به عنوان استاد راهنما و جناب آقای دکتر گلستانیان به عنوان استاد مشاور که همواره نگارنده را مورد لطف و محبت خود قرار داده‌اند، کمال تشکر را دارم.

این پایان‌نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می‌نمایم به:

محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم که به خاطر همه‌ی تلاش‌های محبت آمیزی که در دوران مختلف زندگی‌ام انجام داده‌اند و با مهربانی چگونه زیستن را به من آموخته‌اند.

استادان فرزانه و فرهیخته‌ای که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمودند.

به آنان که در راه کسب علم و دانش راهنمایم بودند.

به آنان که نفس خیرشان و دعای روح پرورشان بدرقه‌ی راهم بود.

الها به من کمک کن تا بتوانم ادای دین کنم و خواسته‌های آنان جامه‌ی عمل بپوشانم.

پروردگارا حسن عاقبت، سلامت و سعادت را برای آنان مقدر نما.

خدایا توفیق خدمتی سرشار از شور و نشاط و همراه و همسو با علم و دانش و پرورش جهت رشد و شکوفایی ایران کهنسال عنایت بفرما.

تقدیم به پدر بزرگوار و مادر عزیزم به خاطر زحمات بی‌دریغشان.

چکیده

در این پژوهش ناپایداری Pull-In نانو سوئیچ یکسر درگیر و دوسر درگیر تحت تاثیر اثر اندازه و نیروهای درون مولکولی شامل نیروی واندروالس و نیروی کازیمیر با استفاده از روش حل تفاضلات مربعی (DQM) بررسی می‌گردد. در این نانوعملگر، نیروی الکترواستاتیک به عنوان نیروی محرک بکار رفته و برای بررسی اثرات غیرخطی هندسی از جابجایی‌های غیر خطی وون-کارمن استفاده شده است. به منظور استخراج معادله‌ی غیر خطی حاکم به همراه شرایط مرزی مربوطه برای نانوتیر، از روش حساب تغییرات استفاده شده است. علاوه بر آن برای مطالعه‌ی اثر اندازه از تئوری الاستیسیته غیر موضعی استفاده شده است. در پایان پارامترهای شاخص Pull-In از جمله ولتاژPull-In، جابجایی تیر و تاثیر نیروهای بین مولکولی، ابعاد هندسی، اثر اندازه، میدان‌های لبه‌ای، کرنش‌های غیر خطی وون-کارمن بر رفتار ناپایداری استاتیکی نانوسوئیچ، بررسی می‌شود.

نتایج حاصل نشان می‌دهد که وجود نیروهای بین مولکولی و میدان‌های لبه‌ای باعث کاهش ولتاژ Pull-In می‌شوند و در بین نیروهای بین مولکولی در مقیاس نانو، نیروی کازمیر تاثیر بیشتری نسبت به نیروی واندروالس درکاهش ولتاژ Pull-In دارد. در مقایسه با تحلیل خطی، وجود جابجایی‌های غیر خطی وون-کارمن باعث کاهش جابجایی تیر و افزایش ولتاژ Pull-In به ویژه برای مقادیر بزرگتر مقدار (g/H) می‌شود. به عبارتی دیگر نانو سوئیچ در حالت غیر خطی رفتار سخت تری نسبت به حالت خطی از خود نشان می‌دهد. در نهایت می‌توان گفت با در نظر گفتن تئوری غیر موضعی و به عبارتی اثر اندازه در نانوسوئیچ، انحراف موجود بین نتایج تئوری کلاسیک و نتایج آزمایشگاهی از بین می-رود و خود این مطلب می‌تواند تاییدی بر موثر بودن بکارگیری تئوری‌های غیر کلاسیک در نانوساختارها باشد.

واژگان کلیدی: نانو سوئیچ، سیستم‌های نانوالکترومکانیکی، تئوری غیر موضعی، ناپایداری Pull-In ، DQM، هندسه‌ی غیرخطی.

فهرست مطالب

عنوان	شماره صفحه
فهرست شکل‌ها	۱
فهرست جداول	۳
فهرست نمادها	۴
فصل اول – مقدمه	۵
۱-۱سیستم‌های میکرو و نانوالکترومکانیکی	۶
۱-۱-۱ تاریخچه‌ی سیستم‌های نانو الکترو مکانیکی	۸
۱-۱-۲ مزایای سیستم‌های نانو الکترو مکانیکی	۹
۱-۱-۳ اجزای سیستم‌های میکرو/ نانو الکترومکانیکی	۱۰
۱-۱-۴ کاربردهای سیستم‌های الکترومکانیکی	۱۱
۱-۱-۴-۱ صنایع پزشکی	۱۲
۱-۱-۴-۲ صنایع هوا فضا	۱۲
۱-۱-۴-۵ رباتیک	۱۳
۱-۱-۵ انواع مختلف سیستم‌های الکترومکانیکی	۱۴
۱-۱-۵-۱ حسگرها	۱۴
۱-۱-۵-۲ عملگرها	۱۵
۱-۱-۶ مفاهیم کلی در مورد سیستم‌های نانوالکترومکانیکی	۱۶
۱-۱-۶-۱ روش های مختلف تحریک سیستم‌های مکانیکی	۱۶
۱-۱-۶-۲ نیروهای غیرخطی وابسته به جابجایی	۱۹
۱-۲ خواص مکانیکی مواد نانوساختار	۲۳
۱-۳ تئوری‌های الاستیسیته مرتبه بالا	۲۴
۱-۴ مطالعات پیشین	۲۵
۱-۵ اهداف پژوهش	۲۸
فصل دوم – مدلسازی و معادلات حاکم	۲۹
۲-۱ پیشگفتار	۲۹
۲-۲ خلاصه‌ای از نظریه تغییر شکل مکانیک محیط پیوسته	۳۰
۲-۳ معرفی تئوری الاستیسیته غیرموضعی	۳۲
۲-۳-۱ ورودی به نظریه غیر موضعی	۳۳

۲-۳-۲ صورت ریاضی قضیه غیر موضعی ۳۳
۲-۴ اصل کار مجازی ۳۵
۲-۵ تئوری تیر اویلر برنولی ۳۷
۲-۶ استخراج معادلات حاکم بر نانو تیر ۳۸
فصل سوم – حل معادلات ۴۳
۳-۱ پیشگفتار ۴۳
۳-۲ روش حل DQ ۴۳
۳-۳ معادلات و شرایط مرزی تبدیل یافته بر اساس روش DQ ۴۵
۳-۳-۱ معادله‌ی حرکت تبدیل یافته ۴۵
۳-۳-۲ تیر با شرایط تکیه‌گاهی یک سردرگیر ۴۶
۳-۳-۳ تیر با شرایط تکیه‌گاهی دو سردرگیر ۵۹
۳-۴ الگوریتم حل معادلات حاکم ۵۰
فصل چهارم – بررسی نتایج ۵۱
۴-۱ پیشگفتار ۵۱
۴-۲ رفتار الکترواستاتیک نانو سوئیچ یکسردرگیر ۵۲
۴-۳ بررسی رفتار خطی نانو سوئیچ دوسردرگیر ۵۸
۴-۴ رفتار آزاد ۶۰
۴-۵ تاثیر جابجایی غیر خطی وون-کارمن بر پارامترهای Pull-In ۶۳
فصل پنجم – جمع بندی و پیشنهادات ۷۰
۵-۱ جمع‌بندی نتایج ۷۰
۵-۲ پیشنهاداتی برای پروژه‌های آینده ۷۱
پیوست ۷۲
مراجع ۷۷

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل ۱-۱ (a) نمونه‌ی یک مدار مجتمع ساخته شده با تکنولوژی میکرو/نانوالکترومکانیک (b). نمونه-ی یک نانو ترانزیستور [۵]. ۷

شکل ۱- ۲ (a) تصویر یک میکرو سنسور مغناطیسی (b) تصویر یک میکرو رزوناتور [۱۲]. ۹

شکل ۱-۳ اجزای یک سیستم نانو الکترومکانیکی تیر شکل یک سر درگیر ۱۱

شکل ۱- ۴ دامنه‌ی کاربرد سیستم‌های میکرو/نانوالکترومکانیک [۱۶]. ۱۱

شکل ۱-۵ یکی از کاربردهای سیستم‌های میکرو/نانو الکترومکانیکی، در ساخت رباط پرنده. این میکرو رباط پرنده در ناسا ساخته شده است [۱۸]. ۱۳

شکل ۱-۶ نمونه‌ای از یک نانو ربات در حال تزریق پروتئین به گلبول قرمز[۲۰]. ۱۴

شکل ۱-۷ نمونه ای از یک میکروگریپر [۲۳]. ۱۵

شکل ۱-۸ تحریک گرمایی سوئیچ RF-MEMS بر اساس خمش باریکه [۲۴]. ۱۶

شکل ۱-۹ سوئیچ RF-MEMS با تحریک الکترو مغناطیس در حالت (a) روشن (b) خاموش [۲۶]. ۱۷

شکل ۱-۱۰ تصویری شماتیک از یک عملگر با تحریک الکترواستاتیک ۲۰

شکل۲-۱ نمایش حالت مرجع و جاری [۶۳]. ۳۰

شکل۲-۲ شرایط مرزی معمول ۳۵

شکل۲-۳ مدل تیر اویلر- برنولی ۳۷

شکل ۲-۴ ساختار یک سیستم نانوالکترومکانیکی تیرشکل (a) دوسردرگیر و (b) یکسر درگیر. ۳۸

شکل(۴-۱) همگرایی نتایج، به ازای تعداد نقاط N در روش DQ ۵۵

شکل(۴-۲) جابجایی خطی انتهای تیر یکسردرگیر بر حسب ولتاژ بی‌بعد شده‌ی β، زمانی که$\alpha =0.3$ باشد. ۵۵

شکل(۴-۳) تاثیر پارامتر غیر موضعی و نیروهای درون مولکولی بر جابجایی خطی تیر یکسر درگیر برای مقادیر $\beta =0.5$ ،$g/b=0.5$ و $\alpha=0.3$. ۵۶

شکل(۴-۴) نمودار جابجایی خطی نانو تیر یکسردرگیر با افزایش ولتاژ برای مقادیر $\alpha=0.7$، $n=3$،$g/b=0.5$ و $e=0.5$ ۵۷

شکل(۴-۵) نیروی خارجی و نتایج تنش برای نانوتیر زمانی که $\alpha=0.7$، $\beta=0.5$، $g/b=0.5$ و$n=3$. ۵۷

شکل(۴-۶) تاثیر نیروهای درون مولکولی و پارامتر غیر موضعی بر β^{PI}خطی برای نانوتیر یکسر درگیر ۵۸

شکل(۴-۷) جابجایی خطی نقطه‌ی میانی نانوتیر دوسر درگیر برحسب تابعی از β وبه ازای مقادیر مختلف پارامتر غیر موضعی زمانی که $\alpha=0$ باشد. ۵۹

شکل(۴-۸) توزیع نیروی خارجی و تنش در نانوتیر دوسر درگیر زمانی که $n=3,\ g/b=0.5,\ \beta=10$, ۵۹

شکل(۴-۹) تاثیر نیروهای درون مولکولی و پارامتر غیر موضعی بر روی β^{PI} برای نانو تیر دوسر درگیردر حالت خطی. ۶۰
شکل(۴-۱۰) تاثیر پارامتر غیر موضعی بر پارامتر α^{cr}_{n} در حالت آزاد برای نانو تیر یکسر درگیر. ۶۱
شکل (۴-۱۱) تاثیر پارامتر غیر موضعی برجابجایی بحرانی نوک تیر یکسردرگیر در حالت آزاد. ۶۲
شکل (۴-۱۲) تاثیر پارامتر غیر موضعی بر مقدار نیروی درون مولکولی بحرانی α^{cr}_{n} نانو تیر دوسر درگیر در حالت آزاد. ۶۲
شکل (۴-۱۳) تاثیر پارامتر غیر موضعی بر جابجایی بحرانی نقطه‌ی میانی نانو تیر دوسر درگیر در حالت آزاد. ۶۳
شکل (۴-۱۴) جابجایی نقاط مختلف نانوتیر یکسر درگیر به ازای مقادیر مختلف β برای $e=0.3, g/b=\alpha3=0.5$ و $f=37$. ۶۴
شکل(۴-۱۵) اثر میدان‌های لبه‌ای و ضریب اثر غیرخطی بر خیز نانوتیر با فرض $\beta=0.7$ و $\alpha4 = e=0.4$ ۶۴
شکل(۴-۱۶) مقایسه‌ی β^{PI} غیر خطی برای حالت $g/b=0,1$ به ازای مقادیر مختلف e با فرض $n=4$ $f=37.5$ ۶۵
شکل(۴-۱۷) مقایسه‌ی مقادیر β^{PI} غیر خطی برای مقادیر مختلف f و g/b زمانی که $e=0.2$ و $n=3$ باشد. ۶۵
شکل (۴-۱۸) خیز نانو تیر برای مقادیر مختلف e به ازای $g/b = \beta=0.5\ \alpha_4 =0.3$ ۶۶
شکل (۴-۱۹) تاثیر پارامتر اندازه بر β^{PI} به ازای مقادیر مختلف e با فرض $g/b=0$. در حالت غیر خطی مقدار f برابر ۱۰ در نظر گرفته شده است ۶۶
ش شکل (۴-۲۰) تاثیر جابجایی غیر خطی بر ولتاژ Pull-In نانو تیر دوسر درگیر. ۶۷
شکل (۴-۲۱) تاثیر نیروهای درون مولکولی بر جابجایی انتهای نانوتیر در حالت های خطی و غیر خطی. ۶۷
شکل(۴-۲۲) مقدار α^{cr} بر حسب پارامتر اندازه به ازای مقادیر مختلف f. ۶۸
شکل(۴-۲۳) مقایسه‌ی ولتاژpull-in تئوری و تجربی برای سیلیکون ,۱۱۰ ۶۹

فهرست جداول

عنوان	شماره صفحه
جدول (۴-۱) پارامترهای هندسی نانوتیر	۵۳
جدول (۴-۲) مقایسه‌ی مقادیر ولتاژ β^{pI} (Pull-in) با روش‌های حل مختلف	۵۳
جدول (۴-۳) مقایسه‌ی مقادیر خیز بی‌بعد نوک نانو تیر یکسر درگیر (ζ^{PI}) در روش‌های حل مختلف	۵۴
جدول (۴-۴) مقایسه‌ی مقادیر مقادیر ولتاژ β^{pI} (Pull-in) با روش‌های حل مختلف با حضور نیروی کازمیر	۵۴
جدول(۴-۵)مقایسه‌ی نتایج برای رفتار آزاد خطی نانو تیر یک سر درگیر، هنگامی که پارامتر غیرموضعی نادیده گرفته شود.	۶۱
جدول (۴-۶) مشخصات نانو تیر آزمایشگاهی.	۶۸

فهرست نمادها

بردار جابجایی در راستای محور x	u
بردار جابجایی در راستای محور z	w
تانسور تنش کوشی	σ
تانسور کرنش	ε_{ij}
تابع کرنل	k
ضرب دو نقطه	$:$
انرژی کرنش	U
حجم المان	V
طول بی‌بعد شده	η
جابجایی بی بعد شده	ζ
طول تیر	L
عرض تیر	b
ضخامت تیر	H
ممان دوم سطح حول محور x	I
مساحت مقطع	A
نیروی محوری مکانیکی	N
ممان خمشی تیر	M
گرادیان	∇
نیروی واندر والس	q_{van}
نیروی کازمیر	q_{Cas}
نیروی الکترواستاتیک	q_{elect}
ولتاژ اعمالی	V
فاصله بیت تیر و الکترودهای ساکن	g
ضریب گذردهی خلا	ε_0
ثابت پلانک	h
سرعت نور	c
کار نیروی خارجی	W
ضرب هادامارد	o
نیروی درون مولکولی بی‌بعد شده	α
نیروی الکترواستاتیک بی‌بعد شده	β
اثر اندازه غیر موضعی	e
نسبت فاصله جدایی به عرض تیر	γ

فصل اول

مقدمه

فناوری نانو[1] یا نانوتکنولوژی رشته‌ای از دانش کاربردی و فناوری است که شاخه‌های گسترده‌ای را پوشش می‌دهد. موضوع اصلی آن نیز مهار ماده یا دستگاه‌هایی است که حداقل یکی از ابعاد آن کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشد. . در واقع نانو تکنولوژی فهم و به کارگیری خواص جدیدی از مواد و سیستم‌هایی در این ابعاد است که اثرات فیزیکی جدیدی، عمدتاً متاثر از غلبه خواص کوانتومی بر خواص کلاسیک از خود نشان می‌دهند. نانوفناوری یک دانش به شدت میان‌رشته‌ای است و به رشته‌هایی چون مهندسی مواد، پزشکی، داروسازی، دامپزشکی، زیست شناسی، فیزیک کاربردی، ابزارهای نیم رسانا، شیمی ابرمولکول و حتی مهندسی مکانیک، مهندسی برق و مهندسی شیمی نیز مربوط می‌شود. تحلیل‌گران بر این باورند که فناوری نانو، فناوری زیستی[2] وفناوری اطلاعات[3] سه قلمرو علمی هستند که انقلاب سوم صنعتی را شکل می‌دهند. نانو تکنولوژی می‌تواند به عنوان ادامه دانش کنونی یا طرح‌ریزی دانش کنونی بر پایه‌هایی جدیدتر و امروزی‌تر باشد [۱].

شاید این سوال در ذهن پدید آید که چه چیزی در مقیاس نانو وجود دارد که یک تکنولوژی بر پایه آن بنا نهاده شده است. آنچه باعث ظهور نانوتکنولوژی شده، نسبت سطح به حجم بالای نانو مواد است. این موضوع یکی از مهمترین خصوصیات مواد تولید شده در مقیاس نانو است. در مقیاس نانو اشیاء شروع به تغییر رفتار می‌کنند و رفتار سطوح بر رفتار توده‌ای ماده غلبه می‌کند. در این مقیاس برخی روابط فیزیکی که برای مواد معمولی کاربرد دارند نقض می شوند. برای مثال یک سیم یا اجزای یک مدار در مقیاس نانو لزوماً از قانون اهم پیروی نمی‌کنند. قانون اهم به جریان، ولتاژ و مقاومت بستگی دارد. اما در مقیاس نانو وقتی عرض سیم فقط به اندازه یک یا چند اتم باشد الکترون‌ها لزوماً باید در صف و به ترتیب و یک به یک از سیم رد شوند. بنابراین ممکن است قانون اهم در این مقیاس تا حدودی نقض شود. در حقیقت در این مقیاس قوانین فیزیک کوانتوم وارد صحنه می‌شوند و امکان کنترل خواص ذاتی ماده از جمله دمای ذوب، خواص مغناطیسی، ظرفیت، بار و حتی رنگ مواد، بدون تغییر در ترکیب شیمیایی ماده وجود خواهد داشت [۲]. بنابراین بسیاری از قوانین حاکم بر مواد و اجسام در مقیاس نانو یا بطور کلی با قوانین حاکم در مقیاس ماکرو متفاوت است و یا اینکه برای رسیدن به یک توجیه رفتاری مناسب نیاز به اصلاح این قوانین در مقیاس نانو داریم. این احساس نیاز از سوی دانشمندان آن‌ها را بر آن داشت تا شاخه‌ی جدیدی از علم با عنوان فناوری نانو پایه‌گذاری کنند و هرگونه مطالعه‌ی مواد و ساختارهای مکانیکی در این مقیاس را به این شاخه نسبت دهند. سیستم‌های میکرو و نانوالکترومکانیکی[4] نیز از این قاعده مستثنی نیستند. کاربرد این سیستم‌ها در علوم مختلف نظیر ارتباطات، الکترونیک، پزشکی، هوافضا، علوم نظامی، رباتیک، شیمی و اپتیک منجر به تحولات جدیدی در این علوم شده است. تا جایی که پیش‌بینی می‌شود در هر سیستم الکتریکی ساخته‌ی بشر، سیستم‌های میکرو/

---

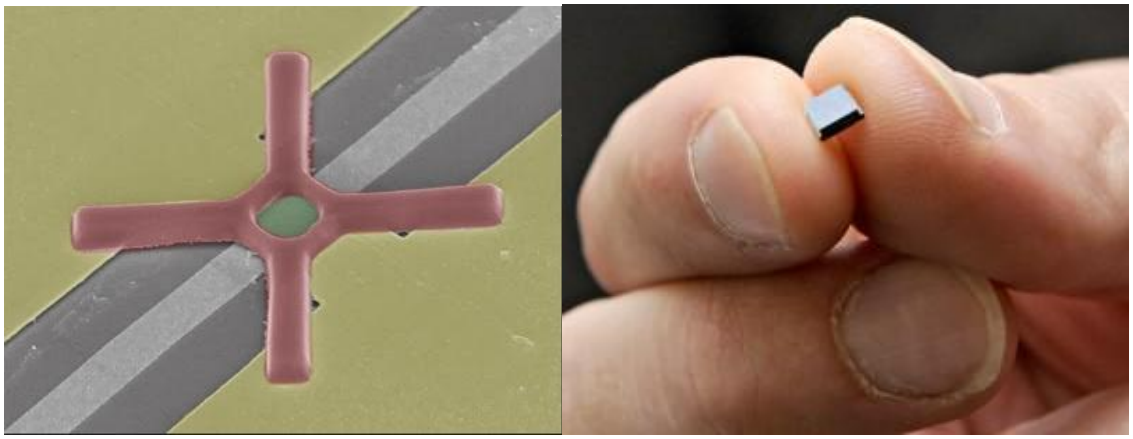
[1]- Nano Science
[2] -Biotechnology
[3] -IT
[1] - MEMS&NEMS(Micro Electro Mechanical System & Nano Electro Mechanical system)

نانوالکترومکانیکی نقش اساسی را ایفا کنند. از اینرو شناخت و پیش‌بینی رفتار این ادوات اهمیت ویژه‌ای دارد [۲].

هزینه‌های بالا از لحاظ زمانی و مالی ایجاب می‌کند که موتور جمبوجت قبل از آزمایش در شرایط واقعی در کامپیوتر مدلسازی شده و تست شود. این وضعیت برای(NEMS/ MEMS) نیز صادق است. لذا، هزینه بالای مالی و زمانی موجب می‌شود تا هر دستگاه قبل از ساخته شدن مدلسازی شود. به همین دلیل در این پروژه بر آن شدیم تا با استفاده از یک مدل ریاضی مناسب رفتار مکانیکی یک NEMS را بررسی کنیم و تمامی عوامل دخیل در این رفتار را که ناشی از کاهش ابعاد در حد نانو است مورد مطالعه قرار دهیم [۳].

۱-۱ سیستم‌های میکرو و نانوالکترومکانیکی

ریچارد فاینمن[۱] در سال ۱۹۵۹ به طور غیر مستقیم بیان کرد، باید منتظر انقلابی عظیم در عرصه‌ی علم و فناوری باشیم. او اعلام کرد دوست دارد همه‌ی دانشنامه‌ها را در نوک سوزنی جای دهد. هدف فاینمن از این کار به حرکت درآوردن چرخ‌های دانشگاه‌ها و آزمایشگاه‌ها و حتی خطوط تولید صنعتی بود [۴]. این همان چیزی است که اکنون با جرأت می‌توان گفت امکان پذیر است و فناوری نانو چنین جسارتی را به دانشمندان می‌دهد تا اینچنین ادعاهایی را بیان کنند. در این میان طرح این سوال دور از انصاف نخواهد بود که نقش مهندسی مکانیک در کمک به این انقلاب علمی و صنعتی چیست؟



(a) (b)

شکل ۱-۱ (a) نمونه‌ی یک مدار مجتمع ساخته شده با تکنولوژی میکرو/نانوالکترومکانیک .(b) نمونه‌ی یک نانو ترانزیستور [۵].

سیستم‌های میکرو/ نانوالکترومکانیکی را می‌توان اینگونه تعریف کرد که ابزارها و ساختارهای الکترونیکی- مکانیکی‌ای هستند که با کمک تکنولوژی‌های جدید، در مقیاس نانو و میکرو ساخته می‌شوند. نوع این سیستم‌ها می‌تواند در حالتی ساده، ابزاری بدون قطعه‌ی متحرک، و یا در حالت‌های پیچیده، دارای

[2] - Richard Feinman

اجزاء متحرک متعددی باشد که با سیستم‌های کنترل الکترونیکی هدایت می‌شوند. سیستم‌های الکتریکی فقط با سیگنال‌های الکتریکی سروکار دارند. اگر این سیستم‌ها کار مکانیکی هم انجام دهند سیستم الکترومکانیکی نامیده می‌شوند. حال اگر ابعاد این سیستم‌ها به محدوده نانومتر برسد سیستم‌های نانو الکترومکانیکی خوانده می‌شوند. اسم اینگونه سیستم‌ها در مناطق مختلف دنیا متفاوت می‌باشد. در ایالات متحده دقیقا از همین نام، سیستم‌های میکرو و نانوالکترومکانیکی استفاده می‌شود، در حالی که در برخی نقاط دیگر دنیا، این سیستم‌ها را با عناوینی چون "تکنولوژی میکروسیستم‌ها، نانو سیستم‌ها[1] " یا " ابزارهای میکروماشین کاری شده[2]" می‌شناسند. اگرچه چهار زیر مجموعه‌ی اصلی سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، شامل میکرو ساختارها، میکروحسگرها[3]، میکروعملگرها[4] و میکروالکترونیک[5] است، مهم‌ترین و شاید جذاب‌ترین آن‌ها میان جوامع علمی، میکرو حسگرها و میکروعملگرها می‌باشند. میکروحسگرها و میکروعملگرها از جنبه‌ای دیگر، در مجموعه‌ای دیگر تحت عنوان مبدل‌های الکترونیکی قرار می‌گیرند که عبارتند از ابزارهایی که انرژیی را از حالتی به حالتی دیگر تبدیل می‌کنند. به عنوان مثال، نانوحسگرها[6] ابزارهایی هستند که سیگنال‌های مکانیکی را به سگنال های الکتریکی تبدیل می‌کنند. در مقابل نانو عملگرها ابزارهایی هستند که انرژی الکتریکی را به مکانیکی تبدیل می‌کنند. این سیستم‌ها با هزینه کم و سرعتی بالا و اغلب با کمک فناوری ساخت مدارات مجتمع ساخته می‌شوند. در واقع این سیستم‌ها را می‌توان چشم و بازوی تراشه‌های کامپیوتری دانست. به بیان دیگر این سیستم‌ها پدیده‌های مختلفی همچون گشتاور، سرعت، فشار، دما و غیره را حس کرده و پس از تصمیم گیری، موارد کنترلی لازم را اعمال نموده ویا مخابره می‌نمایند [۶].

۱- ۱-۱ تاریخچه‌ی استفاده از سیستم‌های میکرو/ نانوالکترومکانیک

دوران استفاده از سیستم‌های میکروالکترونی به سال ۱۹۵۸ یعنی توسعه‌ی اولین مدار مجتمع یک پارچه در شرکت تگزاس اینسترومنت[7] باز می‌گردد [۷]. در سال ۱۹۶۷ ناتنسون[8] و همکارانش اولین دستگاه میکرومکانیکی سیلیکونی[9] را ارائه نمودند که ترانزیستور دروازه‌ای مرتعش[10] نامیده می‌شد. متاسفانه این دستگاه هرگز تجاری نگردید. در پایان دهه‌ی ۷۰ بود که چند مورد از این ادوات تجاری تولید شدند و کم کم مورد استفاده قرار گرفتند. خلاصه‌ای از اولین دستگاه‌های میکروالکترومکانیکی ساخته شده توسط پترسون[11] در مرجع [۸] معرفی شده است. سیستم‌های میکروالکترومکانیکی به طور جدی از اواسط دهۀ ۱۹۸۰ ایجاد

1- Micro/Nano systems technology
2- Micro machin tools
3- Micro Sensors
4- Micro operator
5- Micro electronic
6- Nano sensor
2- Texas Instruments
3- Nathanson
4- Micro Nano Silicon
5- Resonant Gate Transistor
6- Petersen

گردیدند. در همین راستا انجمن MEMS برخی تولیدات واقعاً شگفت‌آور را ارائه داده است که از پروژکتورهای دیجیتالی شامل میلیون‌ها میکروآیینه[۱] الکتریکی گرفته تا میکروحسگرهای حساس به حرکت قابل استفاده در کیسه‌ی هوای ماشین‌ها، شامل می‌شوند. البته برخی از این سیستم‌ها مانند میکرو عملگرهای خازنی، دارای مشکلاتی مانند ناپایداری هستند که به دلیل وجود تحریک الکترواستاتیک[۲] در آن‌ها ایجاد می شود [۹].

اولین مورد تجاری شده‌ی سیستم‌های میکروالکترومکانیکی در سال ۱۹۹۱ به بازار آمد که یک شتاب سنج میکروالکترومکانیکی بود [۱۰]. ژیروسکوپ‌های[۳] میکروالکترومکانیکی نمونه‌های دیگری بودند که از آن‌ها به عنوان حسگرهای لختی[۴] استفاده می‌شد. مزیت این ژیروسکوپ‌ها در قابلیت استفاده‌ی آن‌ها در موارد جدیدی مانند هدایت دستی و میکروماهواره‌ها است. یعنی دقیقا جایی که ژیروسکوپ‌های معمولی مناسب نیستند [۴]. اولین محصولNEMS نیز نوک میکروسکوپ اتمی ساخته شده توسط IBM[۵] بود که باعث بالا بردن حساسیت میکروسکوپ نسبت به لرزش‌ها، نیروها و سیگنال‌های شیمیایی در سطح اتمی شد [۸]. در زمینه ارتباطات از راه دور، سیستم میکرو/ نانوالکترومکانیکی دستگاه‌های متنوعی را برای جایگزینی اجزای نیمه‌هادی قدیمی فراهم نموده‌اند. دانشمندان و مهندسانی که در زمینه اتصالات میکروحسگرها و ابزارهای دیگر تحقیق می‌کنند، با استفاده از آزمایشگاه‌ها و ایده‌های نو، گستره‌ی جدیدی در این زمینهٔ ایجاد کرده‌اند. ابزارهای این دانشمندان به مرزهای بسیار دور نیز اعمال می‌گردد، از اعماق دریا و پوسته زمین گرفته تا مناطق دوردست فضا و سیارات دوردست.

میکرو سوییچ‌ها و میکرو نوسانگرها[۶] امروزه در مجموعه کاربردهای وسیعی از تلفن همراه و شبکه‌های بی سیم گرفته تا ارتباطات فیبر نوری و شبکه‌های مخابراتی ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰و۱۱].

(a) (b)

شکل ۱- ۲ (a) تصویر یک میکرو سنسور مغناطیسی (b) تصویر یک میکرو نوسانگر [۱۲].

وظایف اصلی این سیستم‌ها عبارتند از: قطع و وصل کردن جریان[۷]، جداسازی[۸] و میزان سازی[۱].

---

[7]-Micro Mirror
[8]- Electroststic Actuation
[9]- Gyroscopes
[10]- Inertial Sensors
[5]-International Business Machines Corporation
[1]- Micro resonatore
[2]- Switching
[3]- Filtering

۱-۱-۲ مزایای سیستم‌های میکرو/نانوالکترومکانیکی

تکنولوژی نانو توانایی ساخت سازه‌های ریز مقیاس قابل حرکت و قابل کنترل و همچنین جایگزینی دستگاه‌های بزرگ قدیمی با دستگاه‌های کوچک مناسب، با قیمت ارزانتر را دارند. مزیت این فناوری را می-توان در یکپارچه و چند منظوره، قابل اعتماد و دقیق بودن آن خلاصه نمود. همچنین این سیستم‌ها قابلیت حمل، مصرف انرژی کمتر، نگهداری آسانتر برای محیط ابزارهای میکروالکترومکانیکی را امکان‌پذیر ساخته‌اند [۱۳].

ابزارهای میکرومکانیکی نوید انقلابی جدید در اندازه‌گیری جابجایی‌های فوق‌العاده کوچک و نیروهای فوق‌العاده ضعیف، به خصوص در مقیاس مولکولی را می‌دهند. در واقع با فنون نانو ماشین کاری[۲] موجود، جرم NEMS در حدود چند (۱۰-۱۸) آتوگرم[۳] و عرض مقطع آن در حدود ۱۰ نانومتر می‌باشد [۱۳]. جرم و اندازه‌ی کوچک NEMS منجر به ایجاد پتانسیل بسیار زیادی برای کاربردهای جدید و اندازه‌گیری‌های بنیادی می‌گردد. سیستم‌های مکانیکی در فرکانس طبیعی[۴] خود، ω_0، نوسان می‌کنند. اگر اندازه‌ی ابزار مکانیکی را به‌گونه‌ای کاهش دهیم که شکل کلی آن‌ها حفظ گردد، در این صورت همان‌طور که بعد خطی[۵]،کاهش می‌یابد، فرکانس طبیعی، نیز کاهش می‌یابد. این موضوع از این لحاظ حائز اهمیت است که عکس‌العمل با فرکانس بالا منجر به زمان سریع عکس‌العمل به نیروی اعمالی می‌گردد. نتیجهٔ دیگری که به دست می‌آید آن است که می‌توان بدون نیاز به ساختاری زمخت، به پاسخی سریع دسترسی داشت. ویژگی مهم دیگر NEM، تلفات بسیار اندک انرژی در آن‌ها می‌باشد و از آن جا که به مکانیزم نیروی بیرونی بسیار حساس می‌باشد، این امر برای ساخت گونه‌های مختلفی از حسگرها بسیار مهم می‌باشد [۱۴].

مزیت دیگر NEMS آن است که همچون MEMS می‌توان آن‌ها را توسط سیلیکون[۶]، آرسنید گالیم[۷] و آرسنید ایندیم[۸] (عناصر اصلی صنایع الکترونیک) با سایر مواد سازگار با آن‌ها ساخت. در نتیجه هر عنصر الکترونیکی کمکی مانند مبدل‌ها و ترانزیستورها را روی همان تراشه و به عنوان یک عنصر مکانیکی، می‌توان ساخت [۱۳]. اگر طراحی به گونه‌ای باشد که تمام عناصر اصلی NEMS بر روی یک تراشه باشند، مدار مجتمعی به وجود خواهد آمد، به این ترتیب به مشکل سرهم‌بندی عناصر مختلف در مقیاس نانومتری نیز برخورد نخواهیم کرد.

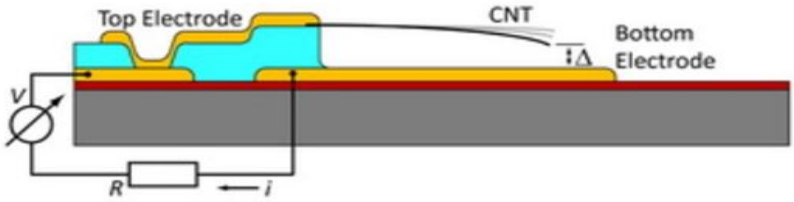
۱-۱-۳ اجزای سیستم‌های میکرو/ نانو الکترومکانیکی

سیستم‌های میکرو/نانوالکترومکانیکی معمولا از دو بخش کوپل شده‌ی مکانیکی و الکتریکی تشکیل می‌شوند. بخش مکانیکی برای حس کردن یک کمیت از محیط اطراف (فشار، شتاب، تغییر سرعت زاویه ای و ...) یا برای تحریک، مثلا بستن یا باز کردن یک شیر در ابعاد نانو و میکرو به کار می‌رود. این بخش معمولا الاستیک

---

[4]- Balancing
[2]- Nano Machining
[1]- Atho
[2]- Natural Frequency
[3]- Linear Dimension
[4] - Silicon
[5] - GaAs
[6] - AsIn

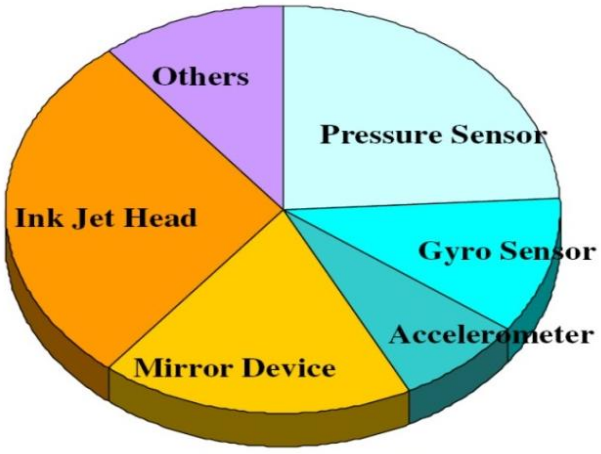
در نظر گرفته می‌شود. بخش الکتریکی (زیر ساخت) برای تبدیل سیگنال مکانیکی به الکتریکی و پردازش آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل (۱-۳) نمونه‌ی یک NEMS تیر شکل را نشان می‌دهد. با اعمال اختلاف پتانسیل بین دو صفحه، صفحه الاستیک تغییر شکل یافته و به سمت صفحه‌ی دیگر که صلب و ثابت می‌باشد حرکت می‌کند. بنابراین با اعمال ولتاژ حرکت به وجود می‌آید. نحوه‌ی کار سنسورهای الکترواستاتیک به اینگونه است که ابتدا یک ولتاژ مستقیم به دو صفحه اعمال شده و سپس با تغییر فاصله‌ی مابین دو صفحه، ظرفیت خازن و در نتیجه اندازه جریان تغییر می‌کند. پس از آن می‌توان جریان خروجی را به یک تقویت کننده هدایت کرده و مقدار تغییر فاصله را به‌دست آورد. شتاب‌سنج‌ها بر همین اساس کار می‌کنند [۱۵].



شکل ۱-۳ اجزای یک سیستم نانو الکترومکانیکی تیر شکل یک سر درگیر

۱-۱-۴ کاربردهای سیستم‌های الکترومکانیکی

در دهه اخیر فناوری ساخت ابزار دقیق در ابعاد بسیار ریز رشد فزآینده‌ای پیدا کرده و استفاده از حسگرها و عملگرهای نانومتری در حوزه‌های فراوانی گسترش یافته است. از جهت رشد و موفقیت در بازار، موفق‌ترین سنسورها در این حوزه فشار سنج‌ها و پس از آن‌ها، شتاب سنج‌ها می‌باشند. شکل(۱-۴) دامنه‌ی کاربرد این سیستم‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱- ۴ دامنه‌ی کاربرد سیستم‌های میکرو/نانوالکترومکانیک [۱۶].

یک MEMS/NEMS ممکن است کاربردهای گوناگونی در صنایع مختلف پیدا کند. MEMSها و NEMSها در زمینه های پزشکی، ارتباطات، هوا فضا و مینیاتور کردن، کاربردهای زیادی پیدا کرده‌اند که در ذیل به برخی از آن‌ها اشاره می‌کنیم [۱۷]:

۱-۱-۴-۱ صنایع پزشکی

با ورود علم نانو به عرصه‌ی پزشکی روش‌های جدیدی برای تشخیص و درمان بیماری‌ها معرفی شده‌است که به برخی از آن‌ها به طور مختصر اشاره می‌شود:

الف- LAB-ON-A-CHIP:

یک چیپ که به نسبت بسیار بالایی میکرو ماشینی شده است و درواقع یک آزمایشگاه روی یک چیپ قرار گرفته است که دارای ابعاد ۳×۲۰×۳۷ میلیمتر می‌باشد.

ب- PHARMACY-ON-A –CHIP:

در اینجا یک داروخانه روی یک چیپ قرار گرفته است که در ارتباط با بدن قرار می‌گیرد و مایعات بدن را اندازه‌گیری می‌کند و درصورت نیاز بدن، مایع به طور خودکار تزریق می‌شود .این وسیله برای تنظیم انسولین بیماران دیابتی، هورمون و مسکن درد استفاده می‌شود.

ج – PAC MAN:

این وسیله هنوز در مراحل اولیه ساخت در آزمایشگاه ملی ساندی[1] در حال تحقیق و بررسی می‌باشد و شامل دندان‌های سیلیکونی بسیار ریزی است که مانند یک فک باز و بسته می‌شود و تعداد گلبول‌های قرمز را از طریق یک کانال ۲۰ میکرومتری اندازه می‌گیرد و برای رسیدن به مقدار مطلوب، آن‌ها را می‌گیرد و یا رها می‌سازد. هدف نهایی که برای این وسیله در نظر گرفته‌اند سوراخ کردن سلول‌ها و تزریق DNA، پروتئین و دارو به داخل آن‌ها می‌باشد تا از این طریق تعادل ژنتیکی برقرار کنند.

۱-۱-۴-۲ صنایع هوا فضا

نیاز سیستم‌های فضایی به تجهیزات دقیق، بسیار کوچک، کم حجم و با قابلیت اطمینان بالا، باعث عجین شدن میکرو/نانوتکنولوژی با صنایع فضایی گردیده است. از دستاوردهای این علم در زمینه‌ی علوم نظامی می‌توان به حسگر خورشید مبتنی بر تکنولوژی میکروالکترومکانیکی، میکرو نوسانگر ارتعاشی، نشانگرهای کابین خلبان، ابزار خروج اضطراری خلبان[2]، اندازه‌گیرهای تونل هوا، میکرو ماهواره، میکرو/نانو حسگرها، شتاب سنج‌ها، حافظه‌های مکانیکی و بسیاری موارد دیگر اشاره کرد. نکته‌ی جالب در مورد میکرو/نانوسوییچ‌ها این است که این ادوات پس از ۶۰ میلیارد سیکل هیچ آثار خستگی از خود نشان نمی‌دهند.

---

[1] -Sandia National Laboratories
[2] -Ejection