دانشکده مهندسی مکانیک
گروه طراحی کاربردی

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

تحلیل رفتار دینامیکی و پایدارسازی یک میکروتیر FGP با استفاده از تحریک پیزوالکتریک

نگارنده:
سعید سلطانی خسروشاهی

استاد راهنما:
دکتر محمدرضا قضاوی خوراسگانی

استاد مشاور:
دکتر صابر عزیزی شیروانشاهی

اسفند ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحيم

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای سعید سلطانی خسروشاهی پایان نامه ٦ واحدی خود را **با عنوان تحلیل رفتار دینامیکی وپایدارسازی یك میکروتیرFGPبا استفاده از تحریك پیزوالکتریك** در تاریخ ۱۳۹۲/۱۲/۲۵ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - طراحی کاربردی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر محمدرضا قضاوی خوراسگانی	دانشیار	
استاد مشاور	دکتر صابر عزیزی شیروانشاهی		غایب
استاد ناظر	دکتر اکبر علی بیگلو	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر علی اصغر جعفری	استاد	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر اکبر علی بیگلو	دانشیار	

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب **سعید سلطانی خسروشاهی** دانشجوی رشته **مهندسی مکانیک-طراحی کاربردی** ورودی سال تحصیلی **۱۳۹۰** مقطع **کارشناسی ارشد** دانشکده **مهندسی مکانیک**، متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا:

تاریخ: ۹۴/۲/۱۱

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشـار پایان نامه (رسـاله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشـی دانشگاه است، بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:
«کتاب حاضـر، حاصـل پایان نامه کارشـناسی ارشد نگارنده در رشته مهندسی مکانیک-طراحی کاربردی است که در سال۱۳۹۲ در دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر محمدرضا قضاوی و مشاوره جناب آقای دکتر صابر عزیزی شیروانشاهی از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشـی از هزینه‌های انتشـارات دانشـگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشـجو تعهد و قبول می کند در صـورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضـایی مطالبه و وصـول کند؛ به علاوه به دانشـگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب **سعید سلطانی خسروشاهی** دانشجوی رشته **مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی** مقطع **کارشناسی ارشد** تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی:
سعید سلطانی خسروشاهی

تاریخ و امضا:
۹۳/۴/۱۱

تقدیم به:

پدرم

و

مادرم ، مادرم ، مادرم

آنان که

ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم

موهایشان سپید شد تا ما روسفید شویم

و عاشقانه سوختند تا گرما بخش وجود ما و روشنگر راهمان باشند

،

خواهران و برادرانم

عزیزانی که همواره با حمایت ها و محبت های بی دریغشان مایه دل گرمی من بودند

تقدیر و تشکر:

شکر و سپاس خداوند متعال را سزاست که هر چه داریم از اوست. بر خود لازم می دانم از تمام عزیزانی که بدون هم فکری و یاری ایشان، امکان به نتیجه رسیدن پایان نامه حاضر وجود نمی داشت، صمیمانه تشکر نمایم:

استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر محمدرضا قضاوی که راهنمایی این پایان نامه را بر عهده داشتند، و در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی از هیچ کمکی در این عرصه دریغ ننمودند. بدون شک اخلاق نیکوی ایشان نقش بسیار مهمی در پیشبرد این پایان نامه داشت. برای ایشان سلامتی و سعادت، و توفیق روز افزون از خداوند متعال خواستارم، و کمال تشکر را دارم.

استاد عزیزم جناب آقای دکتر صابر عزیزی که مشاوره پایان نامه حاضر را عهده دار بودند. بزرگواری که نقشی به مراتب فراتر از مشاوره را در پیشبرد پایان نامه ایفا نمودند و دلسوزانه و با خلوص نیت برای این مهم زحمت زیادی کشیدند. در کنار کمک های شایانی که در زمینه تخصصی پایان نامه از آنها بهره مند شدم، اخلاق و رفتار بسیار نیکوی ایشان مایه دل گرمی بنده در به انجام رساندن این پایان نامه بود. امیدوارم بتوانم ذره ای از حقی که به عنوان استاد بر گردنم دارند را ادا نمایم. از خداوند متعال برای ایشان سلامتی و عاقبت به خیری را خواستارم.

در پایان از پدر و مادر عزیزم به پاس فداکاری و محبت های بی دریغشان تشکر و قدردانی می نمایم. عزیزانی که در لحظه لحظه زندگی، همواره یاوری دلسوز و فداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده اند. پروردگارا، نه می توانم موهایشان را که در راه عزتم سفید گشت، سیاه کنم و نه بر دستان پینه بسته شان که ثمره تلاش برای افتخار من است مرهمی دارم. پس توفیقم ده که ثانیه های عمرم را در عصای دست بودنشان بگذرانم.

سعید سلطانی خسروشاهی

اسفند ۹۲

چکیده

در این پایان نامه، رفتار استاتیکی و دینامیکی یک میکروتیر دو سرگیردار FGP تحت تحریک هم‌زمان الکترواستاتیک و پیزوالکتریک مورد مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا مقدمه‌ای بر سیستم‌های میکروالکترومکانیکی ارائه شده، و تاریخچه و سیر تکاملی، کاربردها، تجارت، و اهمیت‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی این سیستم‌ها بیان شده است. در ادامه با توجه به مدل مورد مطالعه، به بررسی مهم‌ترین کارهای انجام شده در زمینه تحریک الکترواستاتیک، تحریک پارامتریک، و تحریک پیزوالکتریک در میکروساختارها پرداخته شده است. معادلات حاکم بر رفتار میکروتیر دو سرگیردار با ساختار مدرج تابعی پیزوالکتریک و سیلیکون، با استفاده از روش همیلتون استخراج شده است. با حل معادله استاتیکی، موقعیت‌های تعادل سیستم به دست آمده و پایداری آنها با استفاده از ماتریس ژاکوبین بررسی شده است. اثر پارامترهای مختلفی مانند سهم پیزوالکتریک در لایه بالایی، ولتاژ مستقیم تحریک پیزوالکتریک، کشش صفحه میانی در ولتاژ پولین استاتیکی مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه معادله دیفرانسیل حاکم بر حرکت مغشوش میکروتیر حول موقعیت تعادل استاتیکی، با استفاده از روش گلرکین گسسته سازی شده و به معادله متیو مستهلک شده تبدیل شده است. نواحی پایداری و ناپایداری معادله متیو، با استفاده از تئوری فلوکت و ماتریس منودرومی، رسم شده است. نتایج بدست آمده نشان داده است که در هر حالت ناپایدار، می‌توان رفتار ناپایدار سیستم را با اعمال دامنه ولتاژ متناوب و فرکانس تحریک مناسب در تحریک پیزوالکتریک، پایدارسازی نمود.

کلمات کلیدی: سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، میکروتیر، ناپایداری، پایدارسازی، تحریک پیزوالکتریک، تحریک پارامتریک، ولتاژ پولین.

فهرست مطالب

فهرست مطالب ..... أ

فهرست علائم و نشانه‌ها ..... ج

فهرست شکل‌ها ..... ه

فهرست جدول‌ها ..... ز

فصل ۱- مقدمه ۱

۱-۱- معرفی سیستم‌های میکروالکترومکانیکی ۲

۱-۲- تاریخچه و سیر تکامل ۳

۱-۳- مواد و روش‌های ساخت ۷

۱-۴- کاربردها ۸

۱-۵- تجارت و بازار MEMS ۱۰

۱-۶- اهمیت مدل‌سازی و شبیه‌سازی ۱۴

۱-۷- ساختار پایان نامه ۱۵

فصل ۲- پیشینه تحقیق ۱۷

۲-۱- مقدمه ۱۸

۲-۲- تحریک الکترواستاتیک ۱۸

۲-۳- تحریک پارامتریک ۲۴

۲-۴- تحریک پیزوالکتریک ۲۸

۲-۴-۱- تحریک پیزوالکتریک در ساختارهای لایه‌ای ۲۸

۲-۴-۲- تحریک پیزوالکتریک در ساختارهای با مواد مدرج تابعی ۳۳

۲-۵- نتیجه‌گیری ۳۷

فصل ۳- مدل مورد مطالعه و معادلات حرکت ۳۸

۳-۱- مقدمه ۳۹

۳-۲- مزیت میکروتیرهای دو سرگیردار ۳۹

۳-۳- تعریف مساله ۴۰

۳-۳-۱- روابط خصوصیات هندسی و مکانیکی میکروتیر ۴۰

۳-۳-۲- روش‌های تحریک و بارگذاری ۴۳

۳-۳-۳- فرضیات حاکم ۴۳

۳-۴- استخراج معادلات حرکت میکروتیر با استفاده از روش انرژی ۴۴

۳-۴-۱- روابط کرنش محوری ۴۴

۳-۴-۲- انرژی پتانسیل کرنشی ۴۸

۳-۴-۳- انرژی جنبشی ۵۰
۳-۴-۴- کار انجام شده توسط نیروهای الکترواستاتیک ۵۱
۳-۴-۵- انرژی تلف شده در اثر استهلاک ۵۳
۳-۴-۶- تغییرات انرژی‌ها ۵۴
۳-۴-۷- معادلات و شرایط مرزی حاکم بر میکروتیر دو سرگیردار ۵۶
۳-۵- نتیجه‌گیری ۵۹
فصل ۴- نتایج و بحث ۶۰
۴-۱- مقدمه ۶۱
۴-۲- مشخصات هندسی و مکانیکی میکروتیر ۶۱
۴-۳- تحلیل استاتیکی ۶۴
۴-۳-۱- مقدمه ۶۴
۴-۳-۲- حل معادله استاتیکی ۶۴
۴-۳-۳- تحلیل پایداری استاتیکی ۶۸
۴-۳-۴- بررسی اثر تغییرات سهم پیزوالکتریک در لایه بالایی بر ولتاژ پولین استاتیکی ۷۲
۴-۳-۵- بررسی اثر تغییرات ولتاژ مستقیم تحریک پیزوالکتریک بر ولتاژ پولین استاتیکی ۷۳
۴-۳-۶- بررسی اثر کشش صفحه میانی بر ولتاژ پولین استاتیکی ۷۴
۴-۴- تحلیل دینامیکی ۷۷
۴-۴-۱- مقدمه ۷۷
۴-۴-۲- استخراج معادله حرکت مغشوش حول موقعیت تعادل استاتیکی میکروتیر ۷۷
۴-۴-۳- اعمال تئوری فلوکت و بدست آوردن ماتریس منودرومی ۸۲
۴-۴-۴- تحلیل پایداری با اعمال ولتاژ تحریک پیزوالکتریک ۸۴
۴-۴-۵- تحلیل پایداری با اعمال همزمان ولتاژ تحریک پیزوالکتریک و ولتاژ الکترواستاتیک ۹۲
۴-۵- صحت سنجی ۱۰۱
فصل ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۰۳
۵-۱- نتیجه گیری ۱۰۴
۵-۲- پیشنهادات ۱۰۵
مراجع ۱۰۶
پیوست الف: حل معادله مقدار ویژه خطی ۱۱۳

فهرست علائم و نشانه‌ها

مفهوم	علامت
عرض میکروتیر	a
ضریب استهلاک	$\tilde{C}$
ضریب پیزوالکتریسیته	e_{31}
مدول الاستیسیته	E
نیروی محوری معادل ناشی از تحریک پیزوالکتریک	$(F_p)_{eq}$
فاصله اولیه مابین میکروتیر و الکترود	g_0
ارتفاع میکروتیر	h
طول میکروتیر	l
سهم پیزوالکتریک در لایه میانی میکروتیر	P_{p0}
سهم پیزوالکتریک در لایه بالایی و پایینی میکروتیر	P_{pu}
سهم سیلیکون در لایه میانی میکروتیر	P_{s0}
سهم سیلیکون در لایه بالایی و پایینی میکروتیر	P_{su}
دامنه متناظر با تابع شکل	$q_i(t)$
انرژی جنبشی سیستم	T
جابجایی ناشی از خمش	u_b
انرژی کرنشی ناشی از خمش و کشش صفحه میانی	U_b
انرژی کرنشی ذخیره شده ناشی از تحریک پیزوالکتریک	U_p
دامنه ولتاژ متناوب تحریک پیزوالکتریک	V_{AC}
ولتاژ مستقیم تحریک پیزوالکتریک	V_{DC}
ولتاژ تحریک الکترواستاتیک	V_{es}
ولتاژ ترکیبی پیزوالکتریک	V_p
ولتاژ پولین	$V_{pull-in}$
خیز میکروتیر در راستای محور z	w

کار کلی انجام شده توسط نیروی الکترواستاتیک	W_{el}
محور مختصات در راستای طول میکروتیر	x
محور مختصات در راستای ارتفاع میکروتیر	z
ضریب گذردهی هوا	ε_0
کرنش ناشی از خمش	ε_b
کرنش ناشی از کشش صفحه میانی	ε_s
کرنش کلی	ε_T
تابع شکل میکروتیر	$\varphi_i(x)$
فرکانس تحریک پیزوالکتریک	ω
چگالی	ρ

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱ اندازه موارد مختلف بر حسب متر ۳

شکل ۱-۲ سهم ادوات مختلف MEMS در تجارت جهانی. الف: سال ۲۰۱۱ ب: پیش بینی سال ۲۰۱۷ .....۱۳

شکل ۳-۱ شماتیک میکروتیر FGP تحت تحریک الکترواستاتیک و پیزوالکتریکی ۴۱

شکل ۳-۲ المانی از میکروتیر قبل و بعد از تغییر شکل ۴۵

شکل ۳-۳ شماتیک تار خنثی میکروتیر قبل و بعد از تغییر شکل ۴۷

شکل ۳-۴ میکروتیر تحت تحریک الکترواستاتیک ۵۲

شکل ۴-۱ توزیع مدول الاستیسیته در امتداد ضخامت میکروتیر ۶۲

شکل ۴-۲ توزیع چگالی در امتداد ضخامت میکروتیر ۶۳

شکل ۴-۳ توزیع ضریب پیزوالکتریسیته در امتداد ضخامت میکروتیر ۶۳

شکل ۴-۴ خیز بی‌بعد نقطه وسط میکروتیر بر حسب ولتاژ الکترواستاتیک ($P_{pu}=0.5$) ۷۱

شکل ۴-۵ خیز بی‌بعد نقطه وسط میکروتیر بر حسب ولتاژ الکترواستاتیک و مقادیر P_{pu} مختلف ۷۲

شکل ۴-۶ تغییرات ولتاژ پولین استاتیکی بر حسب ولتاژ مستقیم پیزوالکتریک ۷۳

شکل ۴-۷ اثرگذاری در نظر گرفتن کشش صفحه میانی بر ولتاژ پولین استاتیکی، بر حسب نسبت $\frac{g_0}{h}$ ۷۵

شکل ۴-۸ اثرگذاری در نظر گرفتن کشش صفحه میانی بر ولتاژ پولین استاتیکی، بر حسب نسبت P_{pu} ۷۶

شکل ۴-۹ نواحی پایدار و ناپایدار $P_{pu}=0.25$ (نواحی پایدار سفید رنگ) الف: $V_{DC}=-3$(V)، ب: $V_{DC}=0$(V) ، ج: $V_{DC}=+3$(V) ۸۶

شکل ۴-۱۰ نواحی پایدار و ناپایدار $P_{pu}=0.50$ (نواحی پایدار سفید رنگ) الف: $V_{DC}=-3$(V)، ب: $V_{DC}=0$(V) ، ج: $V_{DC}=+3$(V) ۸۷

شکل ۴-۱۱ نواحی پایدار و ناپایدار $P_{pu}=0.75$ (نواحی پایدار سفید رنگ) الف: $V_{DC}=-3$(V)، ب: $V_{DC}=0$(V) ، ج: $V_{DC}=+3$(V) ۸۸

شکل ۴-۱۲ نواحی پایدار و ناپایدار $P_{pu}=1.00$ (نواحی پایدار سفید رنگ) الف: $V_{DC}=-3$(V)، ب: $V_{DC}=0$(V) ، ج: $V_{DC}=+3$(V) ۸۹

شکل ۴-۱۳ الف: رفتار سیستم در نقطه A $V_{AC}=5$(V), $\omega=2.25\times10^5(rad/s)$, $P_{pu}=1.0$، الف: تاریخچه زمانی، ب: فضای فاز ۹۰

شکل ۴-۱۴ الف: رفتار سیستم در نقطه A $V_{AC}=5$(V), $\omega=2.25\times10^5(rad/s)$, $P_{pu}=0.75$، الف: تاریخچه زمانی، ب: فضای فاز ۹۰

شکل ۴-۱۵ الف: رفتار سیستم در نقطه B $V_{AC}=5$(V), $\omega=1.75\times10^5(rad/s)$, $P_{pu}=1.0$، الف: تاریخچه زمانی، ب: فضای فاز ۹۲

شکل ۴-۱۶ نواحی پایدار و ناپایدار $V_{es}=0(V)$ (نواحی پایدار سفید رنگ) الف: $\hat{C}=0.0$، ب: $\hat{C}=0.03$ ، ج: $\hat{C}=0.06$ ۹۴

شکل ۴-۱۷ نواحی پایدار و ناپایدار (نواحی پایدار سفید رنگ) برای $V_{es}=5(V)$ الف: $\hat{C}=0.0$، ب: $\hat{C}=0.03$ ، ج: $\hat{C}=0.06$ ۹۵

شکل ۴-۱۸ نواحی پایدار و ناپایدار (نواحی پایدار سفید رنگ) برای $V_{es}=10(V)$ الف: $\hat{C}=0.0$، ب: $\hat{C}=0.03$ ، ج: $\hat{C}=0.06$ ۹۶

شکل ۴-۱۹ نواحی پایدار و ناپایدار (نواحی پایدار سفید رنگ) برای $V_{es}=15(V)$ الف: $\hat{C}=0.0$، ب: $\hat{C}=0.03$ ، ج: $\hat{C}=0.06$ ۹۷

شکل ۴-۲۰ نواحی پایدار و ناپایدار (نواحی پایدار سفید رنگ) برای $V_{es}=V_{pull-in}$ الف: $\hat{C}=0.0$، ب: $\hat{C}=0.03$ ، ج: $\hat{C}=0.06$ ۹۸

شکل ۴-۲۱ الف: رفتار سیستم در نقطه A $V_{AC}=10(V)$ $\omega=3.25\times10^5(rad/s)$, $\hat{C}=0.0$، الف: تاریخچه زمانی، ب: فضای فاز ۹۹

شکل ۴-۲۲ الف: رفتار سیستم در نقطه A $V_{AC}=10(V)$ $\omega=3.25\times10^5(rad/s)$, $\hat{C}=0.03$، الف: تاریخچه زمانی، ب: فضای فاز ۹۹

شکل ۴-۲۳ الف: رفتار سیستم در نقطه A $V_{AC}=10(V)$ $\omega=3.25\times10^5(rad/s)$, $\hat{C}=0.06$، الف: تاریخچه زمانی، ب: فضای فاز ۱۰۰

شکل ۴-۲۴ نواحی پایدار و ناپایدار $P_{pu}=1.00$ (نواحی پایدار سفید رنگ) $V_{DC}=0(V)$ ۱۰۲

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۱ پیش بینی ارزش تجارت جهانی MEMS با تفکیک کاربردها(واحد اعداد: میلیون دلار) ۱۲
جدول ۴-۱ مشخصات هندسی میکروتیر ۶۱
جدول ۴-۲ مشخصات مکانیکی میکروتیر ۶۲

فصل ۱- مقدمه

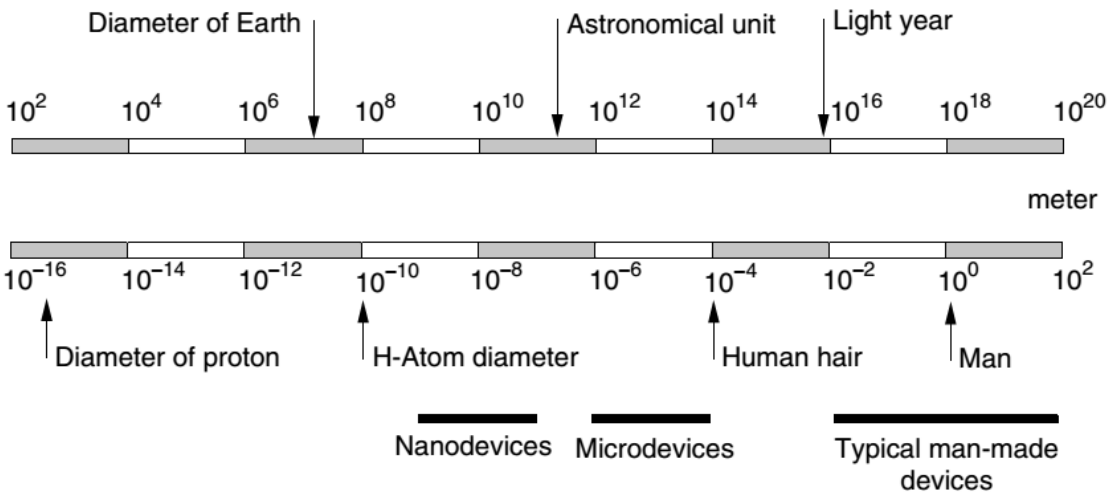
۱-۱- معرفی سیستم‌های میکروالکترومکانیکی

MEMS[1] فناوری ساخت ادوات بسیار کوچک الکترومکانیکی است که در مقیاس نانو با سیستم‌های نانوالکترومکانیکی[2] (NEMS) ، تلفیق می‌شود. این فناوری، در اروپا با نام "فناوری میکروسیستم" (MST[3]) ، در ژاپن با عنوان میکروماشین[4]، و در آمریکا و به طور فزاینده‌ای در بقیه نقاط دنیا، با نام سیستم‌های میکروالکترومکانیکی یا MEMS شناخته می‌شوند[۱].

راحت‌ترین راه برای معرفی MEMS مراجعه به سرنام[5] MEMS و معنی آن است. MEMS مخفف سیستم‌های میکروالکترومکانیکی است. بنابراین، آنها ادواتی در مقیاس "میکرو" هستند که یک یا چند بعد از آنها در گستره میکرومتر قرار دارد. قسمت "الکترو" نشان می‌دهد که آنها از توان الکتریکی استفاده می‌کنند، به عنوان مثال برای تحریک یا حسگری، تقویت یا فیلتر کردن سیگنال‌ها و همچنین برای هدف‌های کنترلی. عبارت "مکانیکی" به این معنی است که این ادوات، بر اساس نوعی از حرکت، کنش و مکانیزم مکانیکی عمل می‌کنند. واژه "سیستم" به این حقیقت بر می‌گردد که آنها به صورت سیستم‌های مجتمع[6]، طراحی و تولید می‌شوند و عمل می‌کنند، نه به صورت اجزای مستقل از هم[۲].

شکل ۱-۱ مرتبه بزرگی موارد مختلف را نشان می‌دهد. دستگاه‌های متداول ساخت بشر، معمولا در گستره اندازه 10^{-2} تا 10^{2} متر قرار دارند. با توجه به گستره اندازه ادوات MEMS در شکل ۱-۱، مقیاس این ادوات با دستگاه‌های متداول ساخت بشر، اختلافی در حد 10^{-4} برابر دارد.

[1] Micro-Electro-Mechanical-Systems
[2] Nano-Electro-Mechanical-Systems
[3] Micro-System-Technology
[4] Micromachine
[5] Acronym
[6] Integrated



شکل ۱-۱ اندازه موارد مختلف بر حسب متر [۳]

۱-۲- تاریخچه و سیر تکامل

سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، حاصل تلفیق اجزای مکانیکی، حسگرها، محرک‌ها و قطعات الکترونیکی به کمک فناوری ساخت تراشه‌های میکرونی است. این سیستم‌ها برای اولین بار در اواخر دهه ۱۹۶۰، با ارائه اولین سیستم میکروالکترومکانیکی بر مبنای سیلیکون توسط وستینگهاوس[1] و شرکت IBM ، مورد توجه قرار گرفتند. اما توجه جدی به آنها به دهه ۱۹۸۰ بر می‌گردد که فناوری میکروماشین‌کاری با تکنیک‌های جدید تولید، باعث ایجاد یک انقلاب صنعتی شد، به طوری که ساخت ادوات بسیار کوچک در مقیاس میکرو و با دقت بالا به امری ممکن تبدیل شد. پیشرفت ادوات MEMS ، نوید خصوصیات جدیدی را داد که در ادوات متداول با ابعاد ماکرو[2] وجود نداشت. از جمله این خصوصیات می‌توان به اندازه بسیار کوچک، وزن سبک، عملکرد کم‌هزینه، مصرف کم انرژی، سازگاری با فرآیندهای مدارهای مجتمع، حساسیت بالا، و کاهش عوامل اغتشاش اشاره کرد[۴].

[1] Westinghouse
[2] Macro

تلاش‌های اولیه در زمینه MEMS ، توسط چندین شخص در مکان‌های مختلف، انجام شده است. فناوری‌های جدید MEMS و کاربردهای آنها، هر روز در حال توسعه و پیشرفت می‌باشند. در ادامه خلاصه‌ای از مهم‌ترین تلاش‌های انجام شده در راستای توسعه MEMS و سیر تحول سیستم‌های میکروالکترومکانیکی به ترتیب سال، ارائه می‌شود[۵, ۶].

دهه ۱۹۴۰	**دهه ۱۹۴۰**	**توسعه نیمه هادی‌های خالص (ژرمانیم[1] و سیلیکون)، که به خاطر توسعه رادار در طی جنگ جهانی دوم، به وجود آمدند.**
	سال ۱۹۴۷	اختراع ترانزیستور اتصال نقطه ای[2] ، که خبر از آغاز صنعت مدارهای نیمه هادی می‌داد.
	سال ۱۹۴۹	توانایی رشد دادن سیلیکون تک بلور خالص، عملکرد ترانزیستورهای نیمه هادی را بهبود بخشید، ولی هزینه آنها و همچنین قابلیت اطمینان، هنوز به طور کامل رضایت بخش نبود.
دهه ۱۹۵۰	سال ۱۹۵۴	انتشار مقاله‌ای در مورد خاصیت پیزومقاومتی ژرمانیم و سیلیکون[3]
	سال ۱۹۵۸	ساخت اولین مدار مجتمع توسط کیلبی[4] عرضه کرنش‌سنج های سیلیکونی به صورت تجاری
	سال ۱۹۵۹	ارائه سخنرانی تحت عنوان "*There's Plenty of Room at the Bottom*" توسط ریچارد فاینمن[5] در موسسه فناوری کالیفرنیا[6]. وی در

[1] Germanium
[2] Point-contact transistor
[3] C. S. Smith, "Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon," *Physical Review*, vol. 94, pp. 42-49, 1954.
[4] J.S. Kilbey
[5] Richard Feynman
[6] California Institute of Technology

		این سخنرانی، تصور کلی از ساختن ادوات بسیار کوچکی را ترسیم کرد که پتانسیل ایجاد انقلابی در گستره وسیعی از فناوری را دارا بودند. این ایده به مدت چند سال مسکوت باقی ماند[۷].
دهه ۱۹۶۰	سال ۱۹۶۱	ساخت اولین فشارسنج سیلیکونی
	سال ۱۹۶۷	اختراع میکروماشین‌کاری سطحی. ساخت ترانزیستور اثر میدان، توسط شرکت وستینگهاوس.
دهه ۱۹۷۰	سال ۱۹۷۰	ساخت اولین شتاب سنج سیلیکونی
	سال ۱۹۷۱	اختراع میکروپردازنده[۱]
	سال ۱۹۷۹	اختراع نازل[۲] جوهر افشان[۳] میکروماشین‌کاری شده شرکت HP
دهه ۱۹۸۰	سال ۱۹۸۲	ساخت مبدل فشار خون.

[1] Microprocessor
[2] Nozzle
[3] Ink jet