





دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه : طراحی کاربردی - جامدات

پایان نامه :

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته ی مهندسی مکانیک-طراحی کاربردی

عنوان:

طراحی، تحلیل و بهینه سازی یک ژيروسکوپ ارتعاشی

میکروالکترومکانیکی (MEMS)

دانشجو :

امیر منافی

استاد راهنما:

دکتر اردشیر کرمی محمدی

شهریور ۹۲

ب



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

باسمه تعالی

شماره:

تاریخ:

ویرایش:

فرم صورت جلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) نتیجه ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای امیر منافی، رشته مهندسی مکانیک-گرایش طراحی کاربردی تحت عنوان طراحی، تحلیل و بهینه سازی یک ژيروسکوپ ارتعاشی میکروالکترومکانیکی MEMS که در تاریخ ۹۲/۶/۲۴ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

<input type="checkbox"/> قبول (با درجه : <u>خوب</u> امتیاز <u>۱۷/۱۶</u>)	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input type="checkbox"/> مردود
---	------------------------------------	--------------------------------

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	امیر منافی	استادیار	
۲- استاد مشاور			
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	رضا طریان	استادیار	
۴- استاد ممتحن	امیرجلیلی	استادیار	
۵- استاد ممتحن	ابلیخ		

رئیس دانشکده: محمد قیاری

امضاء



حمد و سپاس بدرگاه خداوند یگانه، خداوندی که منزه است و نورانی، خداوندی که امواج رحمتش فروزان است و انوار رحمتش تابان، حمد و ثنا پروردگاری را که بواسطهٔ لطف و کرمش دلها را هدایت نمود تا به آرامش ابدی برسند، آفریدگاری را که بواسطهٔ چراغ پرفروغ رسالت راهنمای راه انسانها شد.

اکنون که نگارنده در شرف دریافت درجهٔ کارشناسی ارشد می‌باشد بر خود واجب می‌داند از زحمات تمامی اساتید محترم گروه مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود قدردانی نماید. علی‌الخصوص از مساعدتهای استاد گرامی جناب آقای دکتر کرمی محمدی که در این گام راهنمای دلسوزی بودند که صد چندان سپاس می‌طلبد. اگر علاقه و محبت ایشان نبود، این کار یقیناً به فرجام نمی‌رسید.

در
۴

و

مادر

مهربانم

تعهد نامه

اینجانب **امیر منافی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک- گرایش طراحی کاربردی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان " طراحی، تحلیل و بهینه سازی یک ژيروسکوپ ارتعاشی

میکروالکترومکانیکی (MEMS)" تحت راهنمایی دکتر اردشیر کرمی محمدی می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده‌است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده‌است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده- است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده‌است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

فهرست مطالب

<u>شماره صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۸.....	پیشگفتار
۱۰.....	چکیده
۱۱.....	فصل اول : معرفی ژيروسکوپ ارتعاشی میکرو الکترو مکانیکی MEMS
۱۱.....	۱-۱- ژيروسکوپ
۱۳.....	۲-۱- تکنولوژی MEMS و ژيروسکوپ
۱۶.....	۳-۱- بازار میکرو ژيروسکوپ ارتعاشی
۱۸.....	۴-۱- مشخصات عملکردی میکرو حسگرها
۱۸.....	ضریب تقویت Scale Factor
۱۹.....	بایاس یا انحراف (Bias(zero rate output))
۱۹.....	محدوده ی کاری (Operating range(input rate limits))
۲۰.....	رزولوشن Resolution
۲۰.....	پهنای باند Bandwidth
۲۰.....	حساسیت محور متقاطع Cross – Axis Sensitivity
۲۱.....	غیر خطی بودن Non – linearity
۲۱.....	خطای اتفاقی Stochastic Error
۲۲.....	اشباع Saturation
۲۲.....	خروجی ورودی صفر Zero Input Output
۲۲.....	زمان پاسخ Reply Time
۲۳.....	انحراف خزنده Drift
۲۳.....	نسبت متری Ratio Metric
۲۳.....	ضریب کیفیت Quality Factor

۲۷	فصل دوم : اصول کلی طراحی مکانیکی ژيروسکوپ ارتعاشی MEMS
۲۷	مقدمه
۲۸	۱-۲- دینامیک ژيروسکوپ
۳۴	۲-۲- طراحی ژيروسکوپ MEMS ایده آل با جرم متمرکز
۳۴	۱-۲-۲ مشخصات رزوناتورها
۳۹	۲-۲-۲ مدلسازی و پاسخ ژيروسکوپ به سرعت زاویه‌ای ورودی
۳۹	عملکرد مد- تحریک
۴۱	پاسخ کریولیس
۴۳	طراحی نمونه ژيروسکوپ
۴۹	۳-۲-۲ انطباق مد و Δf
۵۸	۳-۲ ساختار مکانیکی ژيروسکوپ MEMS
۵۸	۱-۳-۲ طرح‌های ساختار مکانیکی میکرو ژيروسکوپ
۶۷	۲-۳-۲ اجزاء انعطاف پذیر خطی
۷۳	۴-۲ میرایی
۷۳	۱-۴-۲ میرایی ویسکوز
۷۴	میرایی فیلم لغزشی
۷۵	میرایی فیلم فشاری
۷۶	۲-۴-۲ میرایی ساختاری ذاتی
۷۹	فصل سوم: طراحی و بهینه سازی اجزاء محدود FEA مدل سه بعدی ژيروسکوپ MEMS
۸۰	۱-۳ طراحی میکرو ژيروسکوپ پاخرچنگی Crab – Leg
۸۲	۱-۱-۳ آنالیز و بهینه سازی مودال
۹۹	۳-۱-۲ آنالیز هارمونیک و پاسخ فرکانسی :
۱۰۱	۲-۲ طراحی میکرو ژيروسکوپ قابی سه درجه آزادی DOF – 3
۱۰۲	۱-۲-۳ اصول نوسانگرهای دو درجه آزادی DOF – 2

۱۰۷	..... 2 - DOF با مد- تشخیص دودرجه آزادی
۱۱۲	..... طراحی میکروژیروسکوپ با مد- تشخیص دو درجه آزادی
۱۱۴	..... آنالیز مودال و هارمونیک سیستم ژيروسکوپ با مد- تشخیص دو درجه آزادی
۱۱۸	..... 3 - DOF با مد- تحریک دودرجه آزادی 2 - DOF
۱۲۲	..... طراحی میکروژیروسکوپ با مد- تحریک دو درجه آزادی :
۱۲۳	..... آنالیز مودال و هارمونیک سیستم ژيروسکوپ با مد- تحریک دو درجه آزادی
۱۲۷	..... فصل چهارم : اصول کلی طراحی الکتریکی ژيروسکوپهای ارتعاشی MEMS
۱۲۷	..... مقدمه
۱۲۸	..... ۴-۱- اصول اساسی الکترودهای خازنی
۱۲۹	..... ۴-۲- تحریک الکترواستاتیک
۱۳۱	..... ۴-۳- تشخیص خازنی :
۱۳۱	..... ۴-۴- خازنهای گاف - متغیر
۱۳۲	..... ۴-۵- خازنهای سطح - متغیر
۱۳۴	..... فصل پنجم : نتایج و پیشنهادهای پژوهشی
۱۳۸	..... مراجع

- تصویر ۱.۱: نمونه هایی از ژيروسکوپ اولیه در سال 1800 ۱۳
- تصویر ۲.۱: مکانیزم تشخیص دوران توسط ارگانی موسوم به هالتر در حشرات ۱۴
- تصویر ۳.۱: نمونه ای واقعی از یک سازه عظیم و باور نکردنی ژيروسکوپ ارتعاشی MEMS ۱۵
- تصویر ۴.۱: اساس تشکیل نیروی کریولیس در جرم ارتعاشی ژيروسکوپ انتقالی ۱۵
- تصویر ۵.۱: آمار فروش MEMS در سال 2012 برای 30 شرکت برتر ۱۷
- تصویر ۶.۱: پیش بینی بازار مربوط به میکرو ژيروسکوپ ارتعاشی ۱۷
- تصویر ۸.۱: پاسخ فرکانسی یک نوسانگر یک درجه آزادی ۲۵
- تصویر ۱۰.۲: رابطه برداری برای حرکت کلی ژيروسکوپ ۲۸
- تصویر ۳.۲: دیاگرام بود از پاسخ فرکانسی یک رزوناتور یک درجه آزادی ۳۸
- تصویر ۴.۲: مدل ساده ای از ژيروسکوپ محور-Z ۳۹
- تصویر ۵.۲: حلقه کنترل بهره اتوماتیک (AGC) دامنه، که نوسانگر مد- تحریک را در حالت خود تشدید به حرکت درآورده و دامنه نوسان را تنظیم می کند. ۴۱
- تصویر ۶.۲: دامنه مد- تحریک بر حسب فرکانس ۴۵
- تصویر ۷.۲: زاویه فاز مد- تحریک بر حسب فرکانس ۴۵
- تصویر ۸.۲: دامنه مد- تشخیص بر حسب فرکانس ۴۶
- تصویر ۹.۲: زاویه فاز مد- تشخیص بر حسب فرکانس ۴۶
- تصویر ۱۰.۲: جابجایی راستای تحریک جرم نمونه، تحت بار هارمونیک با فرکانس تشدید ۴۷
- تصویر ۱۱.۲: پاسخ گذرای کریولیس (راستای تشخیص) ۴۷
- تصویر ۱۲.۲: تغییرات شدید بهره مد- تحریک بر اثر انحراف ضریب کیفیت این مد از مقدار نامی در ناحیه تشدید ۴۸
- تصویر ۱۳.۲: حساسیت دامنه سیستم به تغییرات شرایط محیط در وضعیت تشدید ۴۹
- تصویر ۱۴.۲: کاهش بهره پاسخ در اثر انحراف در اندازه فرکانس عملکرد از فرکانس تشدید ۵۰
- تصویر ۱۵.۲: ضریب کیفیت بالا با اینکه بهره بالایی تولید می کند، اما سیستم بسیار حساسی نسبت به تغییر فرکانس تولید می کند ۵۱
- تصویر ۱۶.۲: برای کاهش حساسیت پاسخ بهره و فاز به نوسانات فرکانسی، معمولاً فرکانس عملکردی با فاصله از فرکانس مد- تشخیص طراحی می شود. ۵۲
- تصویر ۱۷.۲: پاسخ کریولیس سیستم دو درجه آزادی با تغییر عدم انطباق سختی مدهای تشخیص و تحریک $\omega d \neq \omega s$ و $\omega d = \omega x$ ۵۴
- بالاترین پاسخ در حالت تطبیق کامل مدهای تحریک و تشخیص می باشد و با افزایش ناطبیقی، دامنه کاهش می یابد. ۵۴

- تصویر ۱۸.۲ الگوی نوسان وقتی $\omega d = \omega y$ باشد..... ۵۶
- تصویر ۱۹.۲: الگوی نوسان وقتی که $\omega d = \omega x$ و $\omega d \neq \omega y$ ۵۶
- تصویر ۲۰.۲: روابط فازی در جهات x و y ، باید توجه نمود که اختلاف فاز $\phi y - \phi x$ مستقل فرکانس تشدید راستای تحریک، ωx ، است و این اختلاف فاز صرفاً توسط $\omega d - \omega y$ تعیین می‌گردد. ۵۷
- تصویر ۲۱.۲: جرم نمونه، که بطور آزادانه در جهات تحریک و تشخیص نوسان می‌کند و ژيروسکوپ دو درجه آزادی را تشکیل می‌دهد..... ۵۹
- تصویر ۲۲.۲: ژيروسکوپ محور- Z ، جهت تحریک در امتداد محور- X و جهت تشخیص در امتداد محور- Y ۶۰
- تصویر ۲۳.۲: ژيروسکوپ محور- Y ، جرم نمونه باید یک حرکت در امتداد محور- X در داخل صفحه یک حرکت در جهت محور- Z در خارج از صفحه داشته باشد..... ۶۱
- تصویر ۲۴.۲: شامل مدل‌های بازو خرچنگی ($crab - leg$)..... ۶۲
- تصویر ۲۵.۲: شبه مار ($serpentine$)..... ۶۲
- تصویر ۲۶.۲: سنجاق سری ($hairpin$)..... ۶۳
- تصویر ۲۷.۲: نوع- H ۶۳
- تصویر ۲۸.۲: مدل فشرده سیستم اجرایی قاب تحریک با تیر- U ۶۴
- تصویر ۲۹.۲: مدل تعلیق تیر- U با سیستم اجرایی قاب تحریک، مولفه حقیقی حرکت تحریک در امتداد محور آشکار ساز تشخیص را کمینه می‌کند..... ۶۵
- تصویر ۳۰.۲: مدل فشرده سیستم اجرایی قاب تشخیص با تیر- U ۶۶
- تصویر ۳۱.۲: مدل تعلیق تیر- U با سیستم اجرایی قاب تشخیص تغییرات ظرفیت خازنی نامطلوب در الکترودهای تشخیص در اثر حرکت مد-تحریک، کمینه می‌گردد..... ۶۶
- تصویر ۳۲.۲: یک نمونه از پیاده سازی قاب دوپل، که مزایای قاب های تحریک و تشخیص را دارا می‌باشد..... ۶۷
- تصویر ۳۳.۲: تیر یک سر گیردار تحت تغییر شکل خطی..... ۶۸
- تصویر ۳۴.۲: سیستم تعلیق تیر چند لا (U -شکل) شامل دو تیر یک سر گیردار بطور سری که محدودیت بارگذاری محوری و غیر خطی تیر یک سر گیر دار تنها را حذف می‌کند..... ۷۰
- تصویر ۳۵.۲: تیر دولا تحت بارگذاری های محوری و جانبی، خمش تیر در اثر نیروی محوری نامطلوب است..... ۷۱
- تصویر ۳۶.۲: تیر تعلیق دولا-دوتایی که شامل دو تیر دولا است که بطور متقارن و موازی به یکدیگر متصل شده است..... ۷۲
- تصویر ۳۷.۲: مقایسه نیروی عکس العمل محور- y در تیرهای تنها، دولا و دولا-دوتایی..... ۷۳
- تصویر ۳۸.۲: میرایی فیلم لغزشی بین دو صفحه هنگام لغزش موازی دو صفحه بر روی هم..... ۷۴
- تصویر ۳۹.۲: میرایی فیلم فشاری بین دو صفحه که در هنگام حرکت نزدیکی دو صفحه ایجاد می‌شود..... ۷۵

- تصویر ۴۰.۲: منحنی ضریب کیفیت نوعی در مقابل فشار، که وقتی میرایی ویسکوز کاهش یابد Q محدود به میرایی ساختاری می‌شود ... ۷۸
- تصویر ۱.۳: طرح اولیه از جزئیات ابعادی میکرو ژيروسکوپ پاخرچنگی (**Crab – Leg**) ۸۱
- تصویر ۲.۳: مدول الاستیسیته سیلیکون و ژرمانیوم ۸۲
- تصویر ۳.۳: ابعاد هندسی مورد استفاده جهت بهینه سازی ۸۴
- تصویر ۴.۳: نمودار تغییرات فرکانس های مدهای تحریک و تشخیص بر حسب نقاط طراحی ۸۸
- تصویر ۵.۳: حساسیت پارامترهای خروجی (فرکانس) نسبت به پارامتر های ورودی (ابعاد هندسی) ۸۹
- تصویر ۶.۳: اثر دو پارامتر طولی بطور همزمان بر روی فرکانس طبیعی اول ۹۰
- تصویر ۷.۳: اثر دو پارامتر طولی بطور همزمان بر روی فرکانس طبیعی اول بفرم سه بعدی ۹۱
- تصویر ۸.۳: اثر دو پارامتر ضخامت تیر بطور همزمان بر روی فرکانس طبیعی اول ۹۲
- تصویر ۹.۳: اثر دو پارامتر عرض تیر بطور همزمان بر روی فرکانس طبیعی اول ۹۲
- تصویر ۱۰.۳: اثر دو پارامتر طولی و ضخامت تیر بطور همزمان بر روی فرکانس طبیعی اول بفرم سه بعدی ۹۳
- تصویر ۱۱.۳: اثر دو پارامتر ضخامت و عرض تیر بطور همزمان بر روی فرکانس طبیعی اول بفرم سه بعدی ۹۳
- تصویر ۱۲.۳: اثر دو پارامتر طولی بطور همزمان بر روی فرکانس طبیعی دوم ۹۴
- تصویر ۱۳.۳: اثر دو پارامتر ضخامت و عرض تیر بطور همزمان بر روی فرکانس طبیعی دوم ۹۵
- تصویر ۱۴.۳: شکل مد نوسانی اول ۹۷
- تصویر ۱۵.۳: شکل مد نوسانی دوم ۹۷
- تصویر ۱۶.۳: شکل مد نوسانی سوم ۹۸
- تصویر ۱۷.۳: پاسخ فرکانسی در جهت مد- تحریک ۱۰۰
- تصویر ۱۸.۳: پاسخ فرکانسی در جهت مدتشخیص ۱۰۰
- تصویر ۱۹.۳: توزیع تنش فون مایز در سیستم ژيروسکوپ در فرکانس تشدید ۱۰۱
- تصویر ۲۱.۳: پاسخ فرکانسی یک نوسانگر دو درجه آزادی ۱۰۶
- تصویر ۲۲.۳: مدل جرم - فنر - دمپر متمرکز و سیستم پاسخ ژيروسکوپی مد 2 درجه آزادی برای نوسانگر مد- تشخیص. فرکانس تشدید مد- تحریک به گونه‌ای طراحی می‌شود که در مرکز ناحیه صاف مد- تشخیص قرار گیرد ۱۰۷
- تصویر ۲۳.۳: طرح اجرایی از سیستم دو درجه آزادی برای نوسانگر مد- تشخیص ۱۰۸
- تصویر ۲۴.۳: پارامترهای طراحی ۱۱۳
- تصویر ۲۵.۳: شکل مد اول، نوسان هم‌فاز مد- تشخیص ۱۱۵

- تصویر ۲۶.۳: شکل مد دوم، نوسان مد- تحریک ۱۱۵
- تصویر ۲۷.۳: شکل مد سوم، نوسان ناهم‌فاز مد- تشخیص ۱۱۶
- تصویر ۲۸.۳: پاسخ فرکانسی مد- تحریک یک درجه‌آزادی ۱۱۷
- تصویر ۲۹.۳: پاسخ فرکانسی جرم m_2 در مد- تشخیص دودرجه‌آزادی ۱۱۷
- تصویر ۳۰.۳: مدل متمرکز جرم- فنر- دمپر برای سیستم دو درجه‌آزادی (2-DOF) برای نوسانگر مد- تحریک. ۱۱۸
- تصویر ۳۱.۳: طرح اجرایی از سیستم دو درجه‌آزادی برای نوسانگر مد- تحریک. ۱۱۸
- تصویر ۳۲.۳: پارامترهای طراحی ۱۲۲
- تصویر ۳۳.۳: شکل مد اول، نوسان هم‌فاز مد- تحریک ۱۲۴
- تصویر ۳۴.۳: شکل مد دوم، نوسان مد- تشخیص ۱۲۴
- تصویر ۳۵.۳: شکل مد سوم، نوسان ناهم‌فاز مد- تحریک ۱۲۵
- تصویر ۳۶.۳: پاسخ فرکانسی مد- تحریک دو درجه‌آزادی ۱۲۶
- تصویر ۳۷.۳: پاسخ فرکانسی مد- تشخیص یک درجه‌آزادی ۱۲۶
- تصویر ۱.۴: مدل خازن صفحه موازی ۱۲۹
- تصویر ۲.۴: مدل محرک الکترواستاتیک سطح- متغیر ۱۳۱
- تصویر ۳.۴: مدل الکتروود خازنی گاف- متغیر، که انحراف جابجایی یک تغییر در گاف d ایجاد می‌کند. ۱۳۲
- تصویر ۴.۴: مدل الکتروود ظرفیت خازنی سطح متغیر ۱۳۳

پیشگفتار

با ادغام سیستم‌های الکتریکی و مکانیکی در مقیاس میکرو، سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی (MEMS)، در تکنولوژی سنسورهای اینرسی تحول بزرگی ایجاد شده است. از زمان طراحی اولین ژيروسکوپ میکروماشین کاری شده توسط لابراتوار دراپر در سال ۱۹۹۱، طرح‌ها وساختارهای متنوعی از ژيروسکوپ‌های میکروماشین کاری شده توسط روش‌های میکروماشین کاری سطحی، میکروماشین کاری حجمی، میکروماشین کاری ترکیبی سطحی - حجمی ساخته و گزارش شده است. موفقیت‌های حاصل شده در عرصه‌ی تولید شتاب سنج‌های میکرو، محققان بسیاری را بر آن داشته که در حوزه‌ی طراحی، تولید، بسته بندی، تعیین موقعیت و روش‌های آشکارسازی در مورد ژيروسکوپ‌های ارتعاشی میکروماشین کاری شده‌ی تجاری، نوآوری‌های بسیاری داشته باشند. بنابراین ژيروسکوپ‌های ارتعاشی میکرو که از اجزاء مرتعش، جهت‌القاء و آشکارسازی نیروی کریولیس استفاده می‌کنند با فرایندهای تولید انبوه بر پایه‌ی میکروماشین کاری اجرا و ساخته شده‌اند. اگرچه دستیابی به محصول مقاوم در مقابل تغییرات و نوسانات شرایط حین تولید و محیط هنوز به عنوان بزرگترین چالش در تجاری کردن و تولید انبوه این نوع از ژيروسکوپ‌ها باقیمانده است.

با توجه به روند روبه رشد صنایع بر پایه میکرو و نانو این نوع از ژيروسکوپها چشم انداز تجاری، اقتصادی و پژوهشی بسیار امیدوار کننده ای را دارا می‌باشند. ژيروسکوپ‌های ارتعاشی سیستم‌هایی برای اندازه گیری سرعت زاویه‌ای، تشخیص موقعیت، ناوبری و هدایت در وسایل حمل نقل فضایی، هوایی، زمینی و دریایی می‌باشند.

طرح‌های مرسوم بر پایه‌ی انطباق یا نزدیک هم بودن فرکانس تشدید مدهای تحریک و تشخیص می‌باشند که به تغییرات پارامترهای نوسانی سیستم کاملاً حساس هستند. بنابراین دستیابی به ژيروسکوپ ارتعاشی پایدار و قابل اطمینان با حساسیت بالا در مقابل دگرگونی‌های تولیدی و محیطی کاملاً دشوار می‌باشد.

در این پایان‌نامه بعد از مروری بر تکنولوژی سیستم‌های میکرو الکترو مکانیکی (MEMS) یک بازنگری به پدیده‌ی کریولیس، اصول و تعاریف مربوط پارامترهای سنسورهای سرعت زاویه‌ای خواهیم داشت و در ادامه به تدوین دانش فنی و اصول عملکرد ژيروسکوپ‌های ارتعاشی میکرو (MEMS)، طراحی‌های مکانیکی و الکتریکی می‌پردازیم. همچنین اثرات مزاحم الکتریکی و مکانیکی همچون عیوب ساختاری و تحلیل تاثیر آنها بر روی اجزاء دینامیکی تشخیص بحث خواهند شد. در نهایت به بررسی و طراحی نمونه‌های واقعی و عملی ژيروسکوپ خواهیم پرداخت، در این مسیر بر روی امکان حذف پیچیدگی کنترل الکتریکی و انتقال عملکرد کنترلی سیستم بر روی سازه‌ی مکانیکی تمرکز می‌کنیم، که ایده‌ای کاملاً جدید در طراحی میکرو ژيروسکوپ بوده و طراحی را از

ساختارهای دو درجه آزادی مرسوم به ساختارهای قابی چند جرمی و چند درجه آزادی انتقال می‌دهد. اصول این روش بر اساس طراحی و ساخت ساختارها و سیستم‌های دینامیکی است که به طور ذاتی در مقابل تغییرات محیطی و ساختاری مقاوم باشند. در این قسمت به منظور بدست آوردن مقاومت کلی سیستم ابتدا به دستیابی بر روی ناحیه پایدار بهره و فاز در پاسخ فرکانسی مدهای تحریک و تشخیص می‌پردازیم. عملکرد سیستم در این ناحیه فرکانسی تحریک و تشخیص، پایداری بایاس، پایداری دمایی و ایمنی سیستم در مقابل تغییرات محیطی و شرایط تولید را بهبود می‌بخشد.

تکنولوژی‌های نظیر سیستم‌های MEMS/NEMS، تکنولوژی‌هایی نو بوده و اصطلاحاً از حوزه High Tech محسوب می‌شوند و برای صنایع تجاری و دفاعی یک کشور با توجه به مزایا و قابلیت‌هایشان نقش راهبردی و حیاتی دارند. از این رو نبود تعداد کارهای پژوهشی قابل توجه و عملیاتی در کشورمان و نیاز مبرم و بی‌تردید در جهت نیل به منافع ملی و اهداف اقتصادی و امنیتی از یک طرف، و ماهیت انحصاری این صنعت در کشورهای پیشرفته و تحریم‌های شدید مرتبط با آن از سوی دیگر اینجانب را بر آن داشت تا در این پایان‌نامه با دید کاربردی و اجرایی نمونه‌های عملی از ژيروسکوپ ارتعاشی MEMS را مورد مطالعه و بررسی قرار داده و بر اساس آن به طراحی ژيروسکوپ بپردازم.

از این رو، این پروژه پایه‌ای اساسی و تا حدی کامل در مبانی و اصول تئوری، طراحی و اجرای ژيروسکوپ‌های ارتعاشی MEMS را فراهم می‌کند. انتظار این است که این طبقه از ژيروسکوپ‌های میکرو ماشین‌کاری شده قابلیت هدایت اعتمادپذیر، مقاوم و با کارایی بالا ضمن تولید انبوه با کاهش هزینه‌ی تولید، متناسب و توانا در بسیاری از کاربردهای هوایی-فضایی/دفاعی، اتومبیل‌سازی، بازار مصرفی و صنعت الکترونیک را داشته باشد.

چکیده:

در این پایان نامه به بررسی اصول علمی ، طراحی و بهینه سازی مهندسی ژيروسکوپ‌های ارتعاشی میکروالکترومکانیکی MEMS پرداخته می‌شود. این پایان‌نامه پس از مروری مختصر بر فناوری MEMS به بررسی پارامتر های مهم در ساختار این نوع از وسایل می پردازد و در ادامه ژيروسکوپ‌های ارتعاشی معرفی شده و به اصول طراحی کلی و عمومی مکانیکی و الکتریکی ژيروسکوپ‌های ارتعاشی MEMS پرداخته می‌شود. مسئله انطباق مدهای تحریک و تشخیص، عوامل موثر بر کارایی همچون فرکانس های تشدید، پهنای باند، میرایی و ضریب کیفیت بررسی شده و مدلسازی های مختلفی انجام و مورد بحث قرار می‌گیرد. این پایان‌نامه با رویکرد مقاوم سازی مکانیکی ژيروسکوپ در مقابل تغییرات محیطی و ساختاری، به عنوان یک ایده و روش جدید، سعی در بهینه سازی سیستم ژيروسکوپ دارد.

فصل اول : معرفی ژيروسکوپ ارتعاشی میکرو الکترو مکانیکی MEMS

۱-۱- ژيروسکوپ

به عبارت ساده ، ژيروسکوپ^۱ حسگری است که برای اندازه گیری نرخ دوران اجسام به کار می رود. کلمه "ژيروسکوپ" را لئون فوکولت^۲ از ترکیب دو کلمه ی یونانی "gyros" به معنی دوران و کلمه ی "skopeein" به معنی دیدن ایجاد کرد [۲]. ژيروسکوپ عضو اصلی سیستم‌های هدایت اینرسی است، و عمدتاً برای اندازه گیری مقدار دوران ، سرعت دوران و ایجاد محورهای مختصات مرجع در وسایل نقلیه‌ی هوایی ، فضایی ، دریایی و زمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ژيروسکوپ‌ها را می‌توان بر اساس عملکردشان به انواع ژيروسکوپ‌های مکانیکی و ژيروسکوپ‌های نوری تقسیم بندی کرد.

تمام ژيروسکوپ های اولیه و تعداد زیادی از ژيروسکوپ‌های مدرن دارای یک چرخ دوار متصل به سازه‌ی تراز خود هستند (تصویر ۱.۱). چرخ دوار چندین عیب دارد که ابتدایی ترین آن فرسایش و اصطکاک یاتاقان ها

^۱ - Gyroscopes

^۲ - Leon Foucault

است. ژيروسکوپ های مرتعش مکانیکی، مانند ژيروسکوپ HRG^3 و ژيروسکوپ $FORK^4$ یک راه حل موثر برای مشکل فرسایش یاتاقان باحذف بخش دوار ارائه می‌دهد و نیز تکنولوژی‌های پیشرفته نظیر FOG^5 و RLG^6 بر پایه ی اثر ساگاناک⁷ توسعه یافته‌اند.

در وسایل و سیستم‌های مکانیکی یک ژيروسکوپ معمولی دارای ساختاری شامل یک روتور که برای چرخیدن به یک محور متصل شده است، ژورنال‌های روتور بر روی یک حلقه داخلی نصب شده، و حلقه داخلی برای نوسان بر روی یک حلقه خارجی که خود برای نوسان به یک تکیه گاه وصل شده است، نصب شده‌است. حلقه خارجی همچنین برای لولا بودن به حول یک محور که بر روی صفحه خودش که توسط تکیه گاه مشخص می‌شود نصب می‌گردد. حلقه خارجی یک درجه آزادی چرخش دارد و محورش هم هیچ آزادی ندارد. حلقه داخلی به طوری بر روی حلقه خارجی نصب می‌شود که بر روی یک محور در صفحه خودش که همیشه بر محور حلقه خارجی عمود است لولا می‌شود.

محور چرخ دوار، محور چرخش را تعریف می‌کند. حلقه داخلی دو درجه آزادی چرخش دارد و محورش هم یک درجه آزادی دارد. روتور برای چرخش به محوری متصل است که همیشه به محور حلقه داخلی عمود است. بنابراین روتور سه درجه آزادی چرخش دارد و محورش هم دو درجه دارد. چرخ به نیروی وارد بر محور ورودی با نیروی عکس العمل به محور خروجی پاسخ می‌دهد.

حرکت ژيروسکوپی هنگامی رخ می‌دهد که محوری که جسم حول آن می‌چرخد، خود حول محور دیگری دوران کند. اگر ژيروسکوپ را در حلقه های معلق قرار دهیم، گشتاور های خارجی بر آن وارد نمی‌شوند و محور آن، قطع نظر از دوران سازه ای که ژيروسکوپ به آن متصل شده است، در جهت ثابتی در فضا باقی خواهد ماند. از اینرو، از ژيروسکوپ برای سیستم‌های هدایت مبتنی بر خاصیت اینرسی و سایر دستگاه های کنترل جهت استفاده می‌شود.

³ - Hemispherical Resonator Gyroscope

⁴ - Tuning-Fork Gyroscopes

⁵ - Fiber-Optic Gyroscope

⁶ - Ring Laser Gyroscope

⁷ -Sagnac effect

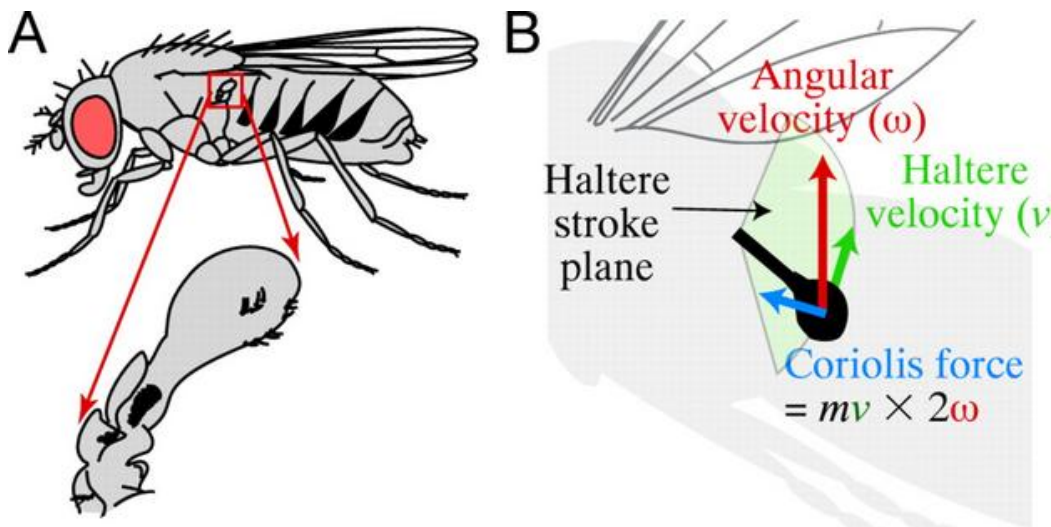


تصویر ۱.۱: نمونه هایی از ژيروسکوپ اولیه در سال 1800

۲-۱- تکنولوژی MEMS و ژيروسکوپ

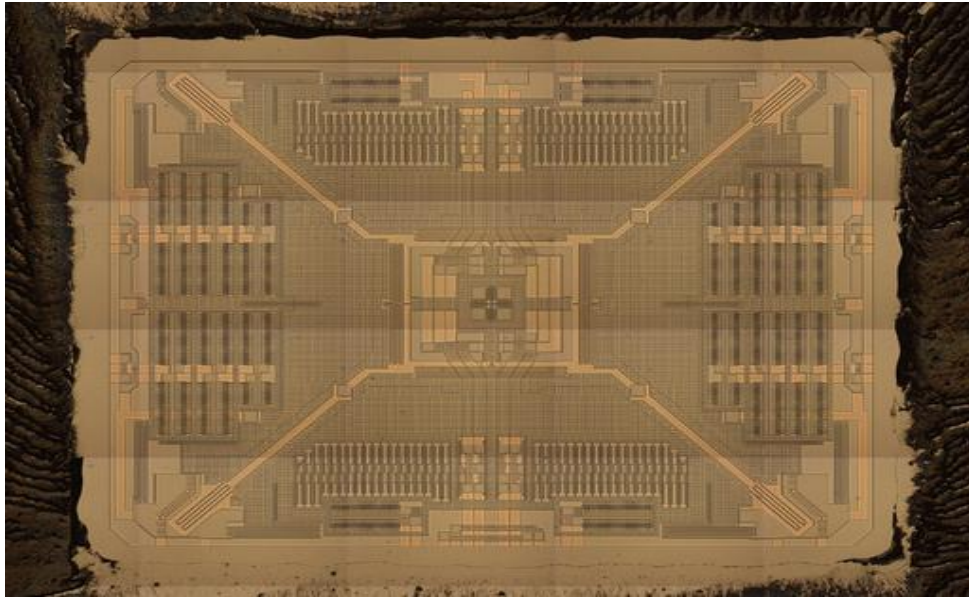
وسایل پرنده بزرگ نظیر هواپیما به طور آیرودینامیکی پایدارند و به علت حجم زیاد، امکان بهره مندی از سیستم‌های موقعیت را دارند، اما زمانی که مکانیزم پرنده کوچک و نیازمند توقف در فضا باشد. (مشابه پرواز بالگرد، ولی در ابعاد بسیار کوچکتر)، خاصیت مذکور کارایی خود را از دست می‌دهد. در طبیعت، حشرات الگوی واقعی این مکانیزم هستند. این موجودات که با توجه به جثه، چالاکی، سرعت و مصرف انرژی عملکرد موثری از خود نشان می‌دهند، از اصولی بهره می‌برند که با اکثر ساخته‌های دست بشر تفاوت اساسی دارد. آن‌ها دوران بدنشان را در فضا به وسیله ی ارگان‌های مخصوصی موسوم به هالتر^۱ تصویر (۲.۱) حس می‌کنند. این ارگان یک جفت زائده صلب است که در دو طرف بدن حشره با فرکانسی در حدود 130 Hz در فاز مقابل بال‌ها ارتعاش می‌کند. هنگام دوران در فضا، یک نیروی کوریولیس تناوبی به نوک هالترها اعمال می‌شود که حشره آنرا حس می‌کند. مکانیزم مذکور، الگوی طبیعی ژيروسکوپ‌های ارتعاشی است. این نوع از ژيروسکوپ‌ها، ابزار اندازه گیری سرعت زاویه‌ای هستند که اساس عملکردشان (مشابه ژيروسکوپهای مکانیکی با جرم دوار) اصل کوریولیس است.

^۱-Halter



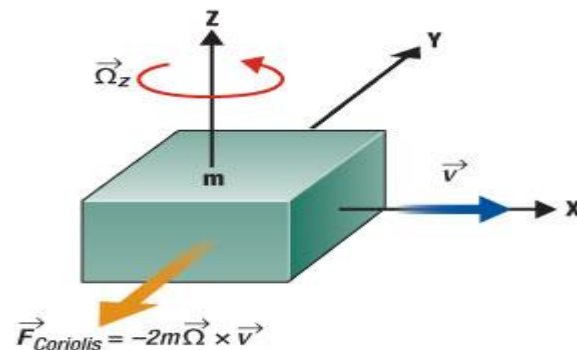
تصویر ۲.۱: مکانیزم تشخیص دوران توسط ارگانی موسوم به هالتر در حشرات

اما تفاوت اصلی در آن است که به جای جرم دوار (اصل بقای اندازه ی حرکت زاویه ای)، از اندازه ی حرکت خطی استفاده می شود. ماهیت عملکرد این دسته از ژيروسکوپ ها، ویژگی منحصر به فرد را ممکن می سازد. به عنوان مثال، به علت نداشتن قطعه ی متحرک (عدم سایش)، بی نیاز از موتور و یاتاقان و بنابراین نسبت به اکثر متغیرهای تاثیر گذار محیطی غیر حساس و دارای کارکرد طولانی بدون نیاز به تعمیر و نگهداری هستند. از امتیازات دیگر، می توان به زمان کوتاه پاسخگویی (کمتر از یک ثانیه)، دریافت و نویز کم، دقت و حساسیت عالی، مصرف ناچیز انرژی و کاهش فوق العاده ی حجم با استفاده از فن آوری میکرو ماشین کاری اشاره کرد. بنابراین در مقایسه با ژيروسکوپ های مکانیکی و نوری (که گران و حجیم هستند) بسیار ارزان ترند و حجم بسیار کمی اشغال می کنند. تلاش اولیه در طراحی این نوع ژيروسکوپ در مواردی نظیر پایداری و هدایت موشک و مهمات هوشمند از صنایع نظامی آغاز شد، اما اخیراً در صنایع غیر نظامی نظیر اتومبیل سازی (سیستم ترمز پیشرفته برای جلوگیری از لغزیدن خودرو)، دوربین دستی (به منظور پایداری تصویر) و صنعت رباتیک کاربرد پیدا کرده است. در مجموع هر چه تکنولوژی پیشرفت می کند، امکان ساخت ژيروسکوپ های ارتعاشی کوچکتر، ارزانتر و دقیقتر فراهم می شود و استفاده از آنها گسترش بیشتری می یابد. [۳].



تصویر ۳.۱: نمونه ای واقعی از یک سازه عظیم و باور نکردنی ژيروسکوپ ارتعاشی MEMS

اصول عملکرد ژيروسکوپ میکرو بر اساس القاء نیروی کریولیس سینوسی در اثر ترکیب حرکت ارتعاشی جرم و سرعت زاویه‌ای ورودی متعامد می‌باشد. جرم ارتعاشی معمولاً از یک زیر لایه توسط تیرهای انعطاف پذیر بصورت معلق نگه داشته می‌شود. به طور کلی سیستم دینامیکی از نوع دو درجه آزادی ($DOF - 2$) جرم-فنر-دمپر (دو مد نوسانی تحریک و تشخیص) بوده و نیروی کریولیس ایجاد شده که موجب انتقال انرژی به مد-تشخیص می‌شود متناسب با سرعت زاویه‌ای ورودی است. در اغلب ژيروسکوپ‌های طراحی شده، جرم توسط نیروی خارجی سیستم الکترواستاتیک یا الکترومغناطیس در فرکانس تشدید مد-تحریک، تحریک می‌شود. وقتیکه ژيروسکوپ تحت یک سرعت زاویه‌ای متعامد قرار می‌گیرد، یک نیروی کریولیس در فرکانس تحریک و عمود بر هر دو محور نوسانات مد-تحریک و محور سرعت زاویه‌ای ورودی در جهت مد-تشخیص ایجاد می‌شود.



تصویر ۴.۱: اساس تشکیل نیروی کریولیس در جرم ارتعاشی ژيروسکوپ انتقالی

به طور ایده آل مطلوب است تا در هر دو مد- تحریک و تشخیص به منظور دستیابی به بیشترین بهره و حساسیت پاسخ ممکن از فرکانس تشدید استفاده کنیم. برای رسیدن به این هدف لازم است سیستم به گونه ای طراحی و تنظیم شود که فرکانس مدهای تحریک و تشخیص بر روی هم بیفتند. درحالیکه برای بهبود مقاومت و پایداری حرارتی ناچاراً نیاز داریم تا اندکی مد- تشخیص را از مد- تحریک با علم به اینکه حساسیت و بهره کاهش خواهند یافت، دور کنیم .

اگرچه افزایش فاصله بین فرکانسهای تحریک و تشخیص اثر تغییرات نامطاب پارامترهای نوسانی را با جابجایی مقادیر میرایی و فرکانسهای طبیعی کاهش می دهد با این وجود هنوز خطاهایی وجود دارند که نیازمند مقایسه با سیستم کنترل پیشرفته و پردازش سیگنال می باشند.

۱-۳- بازار میکرو ژيروسکوپ ارتعاشی

تولید سیستم‌ها MEMS به عنوان یکی از نیازهای اساسی در ساختار تکنولوژی و صنعت دنیا مطرح بوده و سالانه بودجه‌هایی دولتی صرف شده به این حوزه و درآمدهای حاصل از آن به روشنی بیانگر این مطلب است که در آینده صرفاً بخشی از صنعت متعلق به سیستم‌های مبتنی بر فناوری نانو و میکرو نبوده بلکه این فناوری کل صنعت و دانش بشری را بخود اختصاص خواهد داد .

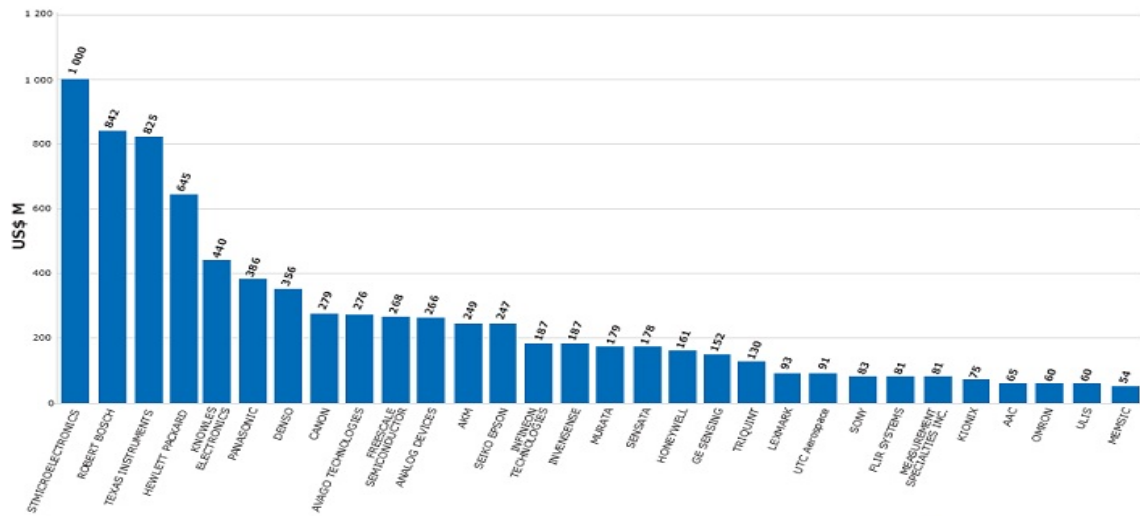
برای آگاهی از میزان درآمد و پیش بینی آن برای سال های آتی می توان به گزارشهای منتشر شده از

انجمن Yole Developpement و مجله i – Micronews اشاره کرد. در تصویر (۵.۱) بازار تجاری مربوط به میزان فروش وسایل میکرو الکترومکانیکی، در ۳۰ شرکت برتر در سال ۲۰۱۲ نشان داده شده است.

همچنین در تصویر (۶.۱) میزان بازار مربوط به میکرو ژيروسکوپ آمده است که متاسفانه بدلائل مالی و داشتن جنبه پیش بینی، شرکت گزارش دهنده فعلاً حاضر به مطرح کردن آن بصورت رایگان نبوده ولی با توجه به سایر گزارشات مشابه و شکل کیفی نمودارها می توان حدس زد که این گزارش هم بیانگر بازار بسیار قابل توجه و سود دهی خواهد بود.

Top 30 MEMS Players - 2012 Sales

(Source: Status of the MEMS Industry report, Yole Développement, to be released Q2, 2013)



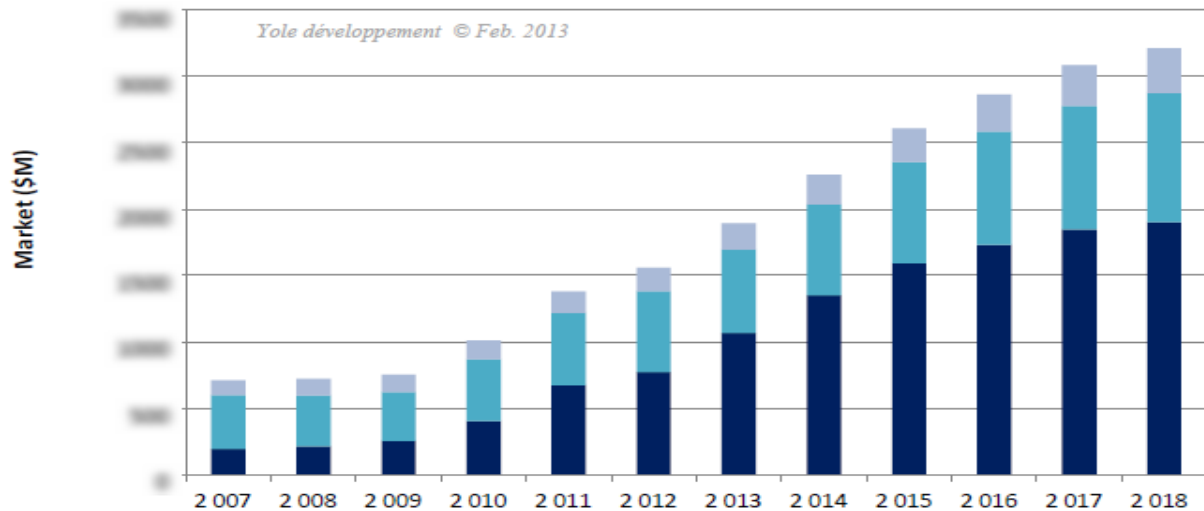
YOLE
Développement

© April 2013

تصویر ۵.۱: آمار فروش MEMS در سال 2012 برای 30 شرکت برتر [۴]

MEMS Gyroscope - 2007 - 2018 market (\$M)

(standalone gyros + combos with gyros)



تصویر ۶.۱: پیش بینی بازار مربوط به میکرو ژيروسکوپ ارتعاشی [۴]

۱-۴- مشخصات عملکردی میکرو حسگرها [۴۰]

در این بخش به تعریف مشخصات مهم در تعیین کارایی میکرو حسگرهای اینرسی که تقریباً برای تمام میکرو حسگرها کاربرد دارد، پرداخته می‌شود. البته به علت نبود یک استاندارد مشخص، مشخصات کارایی میکرو حسگرها در شرکت های تولید کننده مختلف از هماهنگی لازم برخوردار نیست و هر کدام از عواملی متفاوتی نام برده اند. در زیر تعریف چند نمونه از مشخصه‌های مهم سنسورهای اینرسی بیان شده است.

ضریب تقویت *Scale Factor*:

نسبت تغییر در خروجی به تغییر در ورودی اندازه گیری شده تعریف می‌شود و نیز به عنوان شیب خط راست حداقل مربعات برازش شده برای داده های ورودی و خروجی تعریف می‌شود.

در بعضی از موارد هنگام تعیین کارایی، از حساسیت بجای ضریب تقویت استفاده می‌شود. حسگرهای مبتنی بر حالت جامد و MEMS، خروجی بر حسب ولتاژ مشخص می‌شود. بطور مثال برای یک میکروژيروسکوپ که وظیفه اندازه گیری سرعت دورانی را دارد واحد ضریب تقویت بصورت $(mV/^\circ/sec)$ در نظر گرفته می‌شود.

مشخصات خطای مقیاس گذاری شامل موارد زیر است :

خطای خطی : انحراف خروجی از خط حداقل مربعات داده های ورودی - خروجی معمولاً بصورت درصدی از مقیاس کل یا درصد خروجی بیان می‌شود.

غیرخطی بودن : انحراف سیستماتیک از خط راست که رابطه ی ورودی - خروجی نامی (ظاهری) را مشخص می‌کند.

خطای عدم تقارن : اختلاف بین مقیاس اندازه گیری شده با ورودی مثبت و ورودی منفی که با کسری از مقیاس اندازه گیری شده در طول بازه ی ورودی مشخص می‌شود.

پایداری مقیاس : تغییر مقیاس فاکتور در طول زمان عملکرد پیوسته از جمله تغییر در دمای محیط ، توان مصرفی و سایر فاکتورها .

بایاس یا انحراف (*Bias(zero rate output)*) :

میانگین خروجی اندازه گیری شده در طول زمان و شرایط عملکرد مشخص که به دوران ورودی بستگی ندارد. انحراف یا بایاس به طور معمول با واحد های $^{\circ}/\text{sec}$ یا $^{\circ}/\text{hr}$ بیان می شود. در حسگرهای میکروماشین کاری شده زمانی که ورودی یا همان کمیت مورد اندازه گیری صفر باشد، خروجی حسگر در یک سطح معین قرار داده می شود. این سطح معمولاً نصف ولتاژ تغذیه می باشد. بطور مثال اگر ولتاژ تغذیه 5 ولت باشد، بایاس بر روی 2.5 ولت تنظیم می شود. تغییرات در بایاس سبب تغییر در خروجی حسگر می شود.

مشخصات نرخ بایاس به شرح زیر است :

- نرخ انحراف تصادفی : مولفه متغیر با زمان تصادفی نرخ انحراف می باشد که معمولاً با مولفه های واریانس آلان به قرار زیر تعریف می شوند :

الف) زاویه گام تصادفی : خطای زاویه ای که در اثر وجود نویز سفید در سرعت زاویه ای ایجاد می شود و با واحد $^{\circ}/\sqrt{\text{hr}}$ یا $^{\circ}/\text{s}/\sqrt{\text{hr}}$ بیان می شود.

ب) ناپایداری بایاس : تغییر تصادفی در بایاس که در فاصله ی زمان های محدود و متوسط به وسیله $f/1$ چگالی توان طیفی تعیین شده و با واحد $^{\circ}/\text{hr}$ بیان می شود.

ج) نرخ گام تصادفی : انحراف نرخ خطای ایجاد شده با زمان که در اثر وجود نویز سفید در شتاب زاویه ای بوجود می آید و با واحد $^{\circ}/\text{hr}/\sqrt{\text{hr}}$ بیان می شود.

- نرخ انحراف حساسیت محیطی : مولفه ی نرخ انحراف وابسته به پارامتر های محیطی ، شامل حساسیت شتاب ، حساسیت دما ، حساسیت گرادیان دما ، پسماند (هیسترزیس) دمایی و حساسیت ارتعاش است .

محدوده ی کاری (*Operating range(input rate limits)*) :

محدوده ی کاری به معنای محدوده ی سرعت زاویه ای ورودی یا ناحیه ی مثبت و منفی سرعت زاویه ای که می توان بدون اشباع شدن آشکار کرد . محدوده کاری را در MEMS دامنه دینامیکی نیز می نامند.

دامنه دینامیکی محدوده ای از ورودی است که حسگر می‌تواند با توجه به مشخصات کارائی در آن عمل کند و آن را اندازه گیری نماید. شرایط در فراتر از محدوده دینامیکی باعث از کار افتادن حسگر یا کاهش کارائی آن می‌شود. واحد دامنه دینامیکی همان واحد کمیت مورد اندازه گیری می‌باشد.

رزولوشن *Resolution* :

حداقل تغییرات در ورودی، کمیت مورد اندازه گیری که می‌تواند بطور صحیح بوسیله حسگر تشخیص داده شود، را رزولوشن یا ریزنگری گویند. بهترین دقت در میکرو حسگرها معمولاً بیشترین مقدار اغتشاش موجود فرض می‌شود. دقت در میکروژيروسکوپ معمولاً بصورت $^{\circ}/\text{sec}$ تعریف می‌شود.

برای ورودی های بزرگتر از سطح نویز ، تغییری که در خروجی تولید می‌شود برابر حداقل ۵۰٪ خروجی است که با ورودی نامی مقیاس شده ، انتظار می‌رود.

پهنای باند *Bandwidth* :

پهنای باند ، محدوده فرکانسی است که در آن وسیله قادر به اندازه گیری دقیق و صحیح ورودی می‌باشد. برای مثال اگر یک میکروژيروسکوپ دارای پهنای باند صد هرتز باشد، این وسیله می‌تواند سرعت دوران یک دیسک که با سرعت پنجاه هرتز حرکت دارد را اندازه گیری کند و در سرعت های نوسان بالاترین این توانایی را ندارد. پهنای باند در سازه های مرتعش مکانیکی با عکس ضریب کیفیت رابطه دارد. به دیگر سخن هر چه ویسکوزیته در سازه بالا رود پهنای باند بیشتر خواهد شد. بطور کلی پهنای باند دلالت بر محدوده فرکانس کارائی در حسگر دارد.

حساسیت محور متقاطع *Cross – Axis Sensitivity* :

زمانی که یک حسگر اینرسی در جهت های دیگری علاوه بر جهت اندازه گیری مورد نظر حرکت داشته باشد، شتاب خطی، شتاب های کریولیس و دیگر شتاب ها سبب القاء یک خروجی در حسگر می‌گردند که ممکن است موجب کاهش دقت اندازه گیری شود. این کمیت بصورت درصدی از حساسیت اصلی

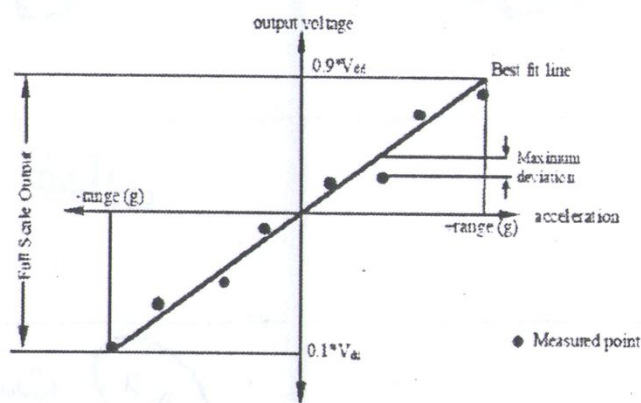
بیان می‌شود. بطور مثال حساسیت محور متقاطع برای حسگری که جهت x را اندازه گیری می‌کند عبارت است از:

$$S_{xxCross} = \frac{\sqrt{S_{xy}^2 + S_{xz}^2 + S_{yz}^2}}{S_{xx}} \times 100 \quad (1.1)$$

که در این معادله S حساسیت خروجی نسبت به دو محور حرکتی می‌باشد.

غیر خطی بودن *Non - linearity*:

بیشتر حسگرها براساس رابطه خطی بین ورودی و خروجی کار می‌کنند. یعنی خروجی آن با کمیت مورد اندازه گیری تناسب دارد. غیر خطی بودن انحراف از رابطه خطی بین ورودی و خروجی است. و به صورت درصدی از کل دامنه مشخص می‌شود. در شکل زیر نحوه محاسبه غیر خطی بودن نشان داده شده است.



$$Non - linearity = \frac{Maximum\ deviation(V)}{Full\ Scale\ Output(V)} \times 100\%$$

تصویر ۷.۱: نحوه محاسبه غیر خطی بودن در کارائی حسگر

خطای اتفاقی *Stochastic Error*:

این خطا بیانگر افزایش خروجی حسگر با زمان بخاطر وجود اغتشاش سفید در وسیله است. واحد این خطا بصورت $\circ/s/\sqrt{Hz}$ برای میکروژيروسکوپ می باشد. از دیگر خطاهای اتفاقی می توان به ناپایداری بایاس اشاره کرد.

اشباع *Saturation* :

اگر ورودی از یک اندازه بیشتر شود دیگر خروجی حسگر متناسب با آن افزایش پیدا نمی کند و می گویند حسگر به حالت اشباع رسیده است.

انحراف بایاس وابسته به دما *Bias Variation Over Temperature* :

بطور کلی دما بر متغیرهای گوناگونی نظیر بایاس، ضریب تقویت، کمیت خروجی و غیره تاثیر می گذارد. البته اکثر خطاهای ناشی از دما بصورت منظم می باشند و می توان آنها را با استفاده حسگرهای دمایی، فیلترها مناسب و سیستم های کنترلی جبران نمود.

خروجی ورودی صفر *Zero Input Output* :

خروجی ورودی صفر بیانگر خروجی حسگر در غیاب ورودی می باشد. این خروجی مجموع دو اثر اغتشاش سفید و تابع متغیر آرام می باشد. اغتشاش سفید با واحد $\circ/s/\sqrt{Hz}$ دقت را مشخص می سازد و ماکزیمم به ماکزیمم مقدار تابع متغیر آرام، انحراف خزنده وسیله را مشخص می نماید.

زمان پاسخ *Reply Time* :

حسگرها می تواند بصورت حلقه باز یا حلقه بسته عمل کنند. در حالت حلقه باز، پاسخ آنی نمی باشد و مدتی طول می کشد که دامنه مود پاسخ به حالت پایدار برسد. این زمان برای یک میکرو حسگر ارتعاشی تقریباً برابر با $\frac{2Q}{\omega_n}$ می باشد (که ω_n فرکانسی تشدید و Q ضریب کیفیت می باشد) که این زمان پهنای باند حسگر را تا چند هرتز محدود می کند. برای بدست آوردن پهنای باند بیشتر حسگر می تواند

با یک انحراف کوچک در فرکانسهای تحریک و پاسخ کار کند که خود، باعث کاهش حساسیت حسگر ارتعاشی می‌شود.

انحراف خزنه *Drift* :

انحراف تغییرات یک کمیت در مدت زمان بزرگ را گویند بطور مثال انحراف بایاس تغییرات بایاس را پس از گذشت زمان نسبتاً طولانی می‌گویند و معمولاً بر حسب واحد کمیت اندازه‌گیری به زمان محاسبه می‌شود. آزمایش اندازه‌گیری انحراف زمان‌گیر است و برای کاربردهای همچون ناوبری اندازه‌گیری می‌شود.

نسبت متری *Ratio Metric* :

اگر بایاس خروجی و ضریب تقویت با ولتاژ تغذیه متناسب باشد می‌گویند حسگر دارای نسبت متری است. برای مثال اگر در ولتاژ تغذیه 5 درصد تغییر بوجود آید به همان نسبت در ضرب تقویت و بایاس نیز تغییر نتیجه شود. تنظیم ولتاژ تغذیه در یک سطح خاص در دامنه کارکرد و با توجه به شرایط گوناگون بسیار مشکل و هزینه‌آور است ولی اگر حسگر دارای نسبت متری باشد براحتی می‌توان اثر تغییرات ولتاژ تغذیه را بر روی ضریب تقویت و بایاس بدست آورد.

ضریب کیفیت *Quality Factor* :

این ضریب بیشتر در مورد سازه‌های ارتعاشی در نظر گرفته می‌شود و مربوط به ساختمان داخلی سازه و شرایط مرزی آن است. هر چه ضریب کیفیت بالاتر باشد. ضریب تقویت یا حساسیت بالاتر می‌رود و در نتیجه کارایی افزایش می‌یابد. زمانی که یک سازه به تشدید نزدیک می‌شود، دامنه ارتعاش آن افزایش پیدا می‌کند و در نقطه تشدید بیشترین دامنه را دارد. ضریب کیفیت Q نسبت انرژی ذخیره

شده یک سازه ارتعاشی به مقدار انرژی تلف شده در یک سیکل نوسان را گویند و به شکل زیر محاسبه می‌شود.

$$Q = 2\pi(E_M / E_O) = 2 \left| \frac{\text{Im}(\omega)}{\text{Re}(\omega)} \right| \quad (2.1)$$

$$Q_\infty = \frac{1}{2\zeta} \omega_n \frac{\omega_n}{BW_{3db}} \quad (3.1)$$

که در این معادله متغیرها بصورت زیر تعریف می‌شوند :

E_M بیشترین انرژی ذخیره شده در یک سیکل نوسان

E_O انرژی تلف شده توسط نوسانگر در یک سیکل نوسان

ζ ضریب دمپینگ

ω_N فرکانس تشدید

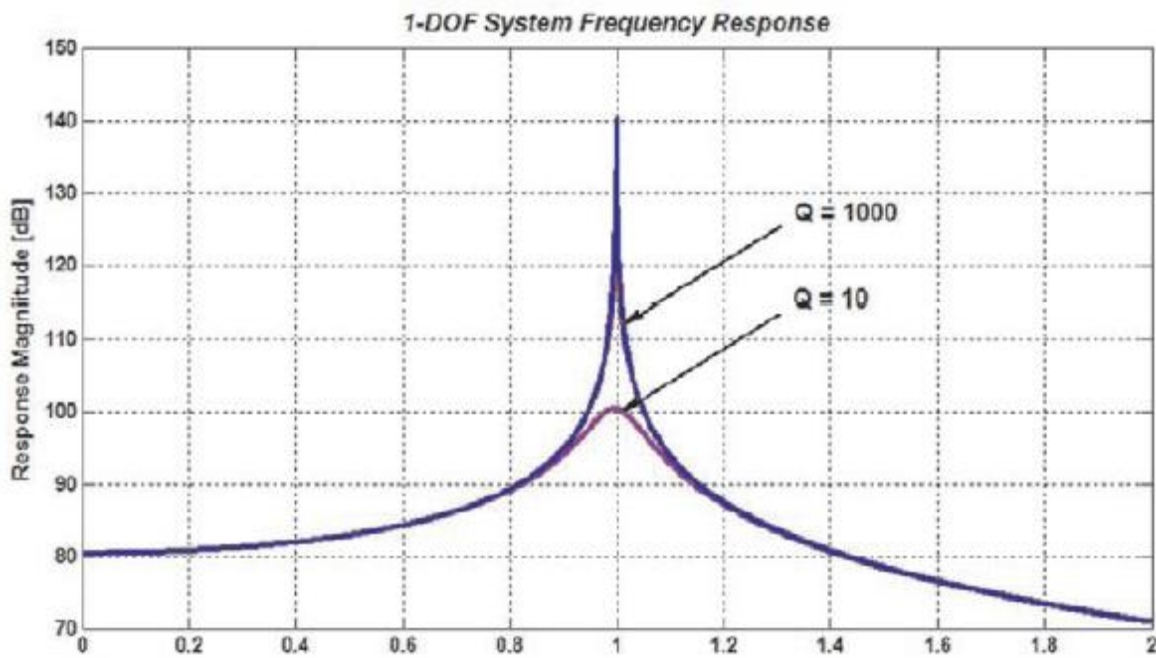
BW_{3db} پهنای باند در ۳db پایین تر از بیشترین دامنه

ω فرکانس نوسان

همانطور که در تصویر زیر نشان داده شده است هر چه نمودار دامنه-نسبت فرکانس برای یک نوسانگر

تیزتر باشد ضریب کیفیت بالاتر و در نتیجه حساسیت و دقت نوسانگر بالاتر است. ضریب کیفیت با

نسبت دمپینگ و پهنای باند رابطه عکس دارد.



تصویر ۸.۱: پاسخ فرکانسی یک نوسانگر یک درجه آزادی

بهبود عملکرد میکرو حسگرهای تشدیدی مستلزم درک صحیحی از اتلاف انرژی در سیکل نوسان که تاثیر مهمی بر روی کارایی حسگر دارد، می باشد. مکانیزم های گوناگونی در اتلاف انرژی در نوسان گر ها وجود دارند. برخی از این عوامل داخلی و بخش دیگر خارجی می باشند. از مکانیزم های داخلی اتلاف انرژی می توان به اتلاف ترموالاستیک، اتلاف ویسکوالاستیک، اتلاف سطح، اتلاف فونون، الکترون و غیره نام برد. از عوامل خارجی می توان به دمپینگ هوایی و اتلاف پایه اشاره نمود. نکته اساسی در فهم اتلاف انرژی در ابعاد میکرو یا نانو، مشخص نمودن مکانیزم اتلاف حاکم در این مقیاس ها می باشد. در ابعاد میکرو معمولاً دمپینگ های هوایی، ترموالاستیک و پایه از اهمیت بیشتری نسبت به دیگر مکانیزم ها برخوردار هستند. با جادهی میکروژیروسکوپ در محفظه خلا می توان ضریب کیفیت ناشی از اتلاف هوایی را بسیار افزایش داد. بطور کلی ضریب کیفیت کلی را می توان بر حسب ضریب کیفیت های ناشی از مکانیزم های مختلف اتلاف انرژی با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\frac{1}{Q_{Total}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{Q_i} \quad (4.1)$$

که در این معادله Q_i ضریب کیفیت برای ائتلاف های مختلف در یک نوسانگر می باشد. در فصل های آینده به بررسی بیشتری از ضریب کیفیت خواهیم پرداخت.

فصل دوم : اصول کلی طراحی مکانیکی ژيروسکوپ ارتعاشی MEMS

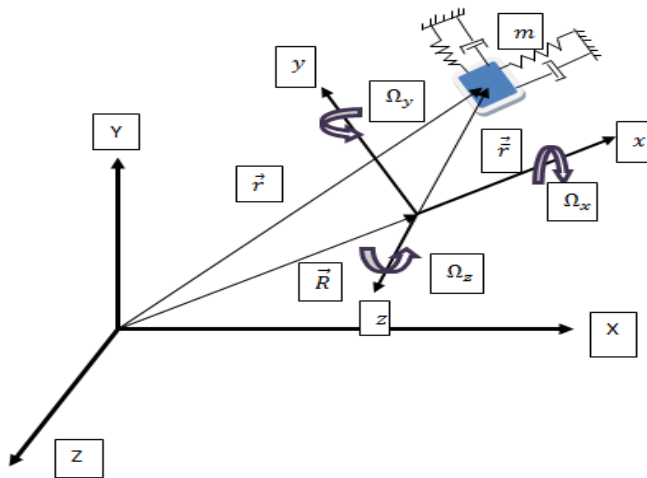
مقدمه

به طور کلی بدنبال طراحی سیستمی هستیم که دوران را تشخیص داده و به آن واکنش نشان دهد. نیروی کریولیس یکی از شاخص ترین اثراتی است که دوران سیستم آن را ایجاد می کند و عامل قابل استفاده موثری است. در سیستم میکرو ژيروسکوپ برای ایجاد مکانیزم دینامیکی مورد نظر از یک سیستم ارتعاشی استفاده می شود تا بجای استفاده از بقاء اندازه حرکت زاویه ای برای انتقال انرژی بین مدهای حرکتی از بقاء اندازه حرکت خطی استفاده کنیم. این راهکار علاوه بر حذف اصطکاک که در سیستم های میکرو عامل بسیار مهم استهلاک انرژی است، قابلیت ساخت به روش های میکروماشین کاری سطحی، حجمی و نیز کارایی بالا را ممکن می سازد.

با توجه به اطلاعات و شناختی که در فصل اول و دوم از ژيروسکوپ های ارتعاشی و حسگرهای میکرو به عمل آمد، در این فصل به بررسی اصول کلی حاکم بر دینامیک و طراحی ژيروسکوپ های ارتعاشی میکروماشین کاری شده و اجزاء اساسی آن به عنوان یک حسگر سرعت زاویه ای میکرو خواهیم پرداخت، و اصول عملکرد آنها ارائه خواهد شد. تحلیل دینامیکی، پاسخ کریولیس و اصول اجرایی ژيروسکوپ های ارتعاشی میکرو را با بحث بر روی محدودیت های روش های موجود ادامه خواهیم داد.

۱-۲- دینامیک ژيروسکوپ

مدل دینامیکی مورد نظر از یک جرم متمرکز تشکیل یافته که توسط اجزاء فنر و دمپر از یک چارچوب دوار به حالت تعلیق در آمده است، در این بخش به دینامیک کلی سیستم پرداخته و سپس با استفاده از فرضیات ساده کننده به مدل دو درجه آزادی که برای مقاصد طراحی مفید می باشد دست خواهیم یافت. مدل جرم- فنر- دمپر این نوع سیستم در شکل زیر نشان داده شده است. با استفاده از روش معادلات حرکت نیوتن (جرم - نیرو - شتاب) معادلات حرکت را بدست می آوریم.



تصویر ۱.۲: رابطه برداری برای حرکت کلی ژيروسکوپ

$$\vec{r} = \vec{R} + \vec{r}'$$

$$\dot{\vec{r}} = \dot{\vec{R}} + \dot{\vec{r}}' + \vec{\Omega} \times \vec{r}'$$

$$\ddot{\vec{r}} = \ddot{\vec{R}} + \ddot{\vec{r}}' + \dot{\vec{\Omega}} \times \vec{r}' + \vec{\Omega} \times \dot{\vec{r}}' + \dot{\vec{\Omega}} \times \vec{r}' + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}')$$

$$= \ddot{\vec{R}} + \ddot{\vec{r}}' + \dot{\vec{\Omega}} \times \vec{r}' + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}') + 2\vec{\Omega} \times \dot{\vec{r}}'$$

که بردارهای روابط فوق بصورت زیر تعریف می شوند :

$$\vec{r}' = \text{بردار جابجایی جرم نسبت به مختصات مرجع اینرسی}$$

$\ddot{\vec{r}} =$ بردار شتاب جرم نسبت به مختصات مرجع اینرسی

$\vec{R} = X\hat{I} + Y\hat{J} + Z\hat{K}$ بردار جابجایی انتقالی مبدا مختصات مرجع دوار نسبت به مختصات مرجع اینرسی

$\ddot{\vec{R}} = \ddot{X}\hat{I} + \ddot{Y}\hat{J} + \ddot{Z}\hat{K}$ بردار شتاب انتقالی مبدا مختصات مرجع دوار نسبت به مختصات مرجع اینرسی

$\vec{r} = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}$ بردار جابجایی جرم m نسبت به مختصات مرجع دوار

$\dot{\vec{r}} = \dot{x}\hat{i} + \dot{y}\hat{j} + \dot{z}\hat{k}$ بردار سرعت نسبی جرم m نسبت به مختصات مرجع دوار

$\ddot{\vec{r}} = \ddot{x}\hat{i} + \ddot{y}\hat{j} + \ddot{z}\hat{k}$ بردار شتاب نسبی جرم m نسبت به مختصات دوار

$\vec{\Omega} = \Omega_x\hat{i} + \Omega_y\hat{j} + \Omega_z\hat{k}$ بردار سرعت زاویه‌ای ژيروسکوپ

$\dot{\vec{\Omega}} = \dot{\Omega}_x\hat{i} + \dot{\Omega}_y\hat{j} + \dot{\Omega}_z\hat{k}$ بردار شتاب زاویه‌ای ژيروسکوپ

$\vec{a}_{cor} = \dot{\vec{\Omega}} \times \vec{r}$ شتاب کریولیس جرم m

$\vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r})$ مولفه عمودی شتاب

$\dot{\vec{\Omega}} \times \vec{r}$ مولفه مماسی شتاب

با بسط روابط فوق و جایگزاری در رابطه شتاب مطلق جرم و مرتب کردن جملات به معادله شتاب زیر می‌رسیم:

$$\begin{aligned} \ddot{\vec{r}} = & \left(\ddot{x} + (\dot{\Omega}_y z - \dot{\Omega}_z y) + \Omega_x(\Omega_y y - \Omega_z z) - (\Omega_y^2 + \Omega_z^2)x + 2(\Omega_y \dot{z} - \Omega_z \dot{y}) \right) \hat{i} \\ & + \left(\ddot{y} + (\dot{\Omega}_z x - \dot{\Omega}_x z) + \Omega_y(\Omega_z z - \Omega_x x) - (\Omega_z^2 + \Omega_x^2)y + 2(\Omega_z \dot{x} - \Omega_x \dot{z}) \right) \hat{j} \\ & + \left(\ddot{z} + (\dot{\Omega}_x y - \dot{\Omega}_y x) + \Omega_z(\Omega_x x - \Omega_y y) - (\Omega_x^2 + \Omega_y^2)z + 2(\Omega_x \dot{y} - \Omega_y \dot{x}) \right) \hat{k} \\ & + \ddot{X}\hat{I} + \ddot{Y}\hat{J} + \ddot{Z}\hat{K} \end{aligned}$$

(۱.۲)

از آنجائیکه محورهای مختصات متصل به ژيروسکوپ چرخان هستند، نیاز داریم توسط تبدیلات تانسوری بردارهای یکه دو دستگاه اینرسی و دوار را به یکدیگر مرتبط سازیم ولی با توجه به اینکه حرکت خطی چارچوب ژيروسکوپ توسط سیستم کنترل حذف می‌شود و ژيروسکوپ صرفاً دوران را اندازه گیری می‌کند بنابراین می‌توان از شتاب‌های \ddot{X} ، \ddot{Y} و \ddot{Z} صرف‌نظر کرد.

بعد از محاسبات سینماتیکی و بدست آوردن شتاب سیستم به تحلیل سینتیکی می‌پردازیم که باید نیروهای موثر بر جرم را تعیین کنیم. با فرض وجود الاستیسیته و دمپینگ خطی در ماده، نیروها را در سه راستای x ، y و z بصورت زیر بیان می‌کنیم:

$$F_x = f_{ex} - k_x x - c_x \dot{x}$$

$$F_y = f_{ey} - k_y y - c_y \dot{y} \quad (2.2)$$

$$F_z = f_{ez} - k_z z - c_z \dot{z}$$

که f_{ex} ، f_{ey} و f_{ez} نیروهای خارجی وارد بر سیستم (مانند نیروهای الکترواستاتیک) می‌باشند و سایر جملات مربوط به نیروهای الاستیک و دمپینگ می‌باشد، که ضریب k بیانگر سختی کلی سیستم در جهت اندیس و ضریب c بیانگر ضریب میرایی کلی در جهت اندیس مربوط به خود می‌باشد.

بنابراین معادله حرکت را بصورت زیر تشکیل می‌دهیم:

$$m\ddot{\vec{r}} = F_x \hat{i} + F_y \hat{j} + F_z \hat{k} \quad (3.2)$$

معادلات را نسبت به محورها جداسازی کرده و داریم:

$$\begin{aligned}
m\ddot{x} + c_x\dot{x} + k_x x &= -m \left((\dot{\Omega}_y z - \dot{\Omega}_z y) + \Omega_x (\Omega_y y - \Omega_z z) - (\Omega_y^2 + \Omega_z^2) x \right. \\
&\quad \left. + 2(\Omega_y \dot{z} - \Omega_z \dot{y}) \right) + f_{ex}
\end{aligned}
\tag{۴.۲}$$

$$\begin{aligned}
m\ddot{y} + c_y\dot{y} + k_y y &= -m \left((\dot{\Omega}_z x - \dot{\Omega}_x z) + \Omega_y (\Omega_z z - \Omega_x x) - (\Omega_z^2 + \Omega_x^2) y \right. \\
&\quad \left. + 2(\Omega_z \dot{x} - \Omega_x \dot{z}) \right) + f_{ey}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m\ddot{z} + c_z\dot{z} + k_z z &= -m \left((\dot{\Omega}_x y - \dot{\Omega}_y x) + \Omega_z (\Omega_x x - \Omega_y y) - (\Omega_x^2 + \Omega_y^2) z \right. \\
&\quad \left. + 2(\Omega_x \dot{y} - \Omega_y \dot{x}) \right) + f_{ez}
\end{aligned}$$

در ادامه این فصل با فرض یکسری ساده سازی های انجام شده در روابط فوق به بررسی اصول کلی و طراحی رزوناتور ها خواهیم پرداخت و در فصل بعد با طراحی نمونه عملی از ژيروسکوپ به جزئیات دقیق تر و بیشتری می پردازیم.

با توجه به اینکه ورودی سرعت زاویه ای سیستم در مقایسه با فرکانس طبیعی سیستم کوچک هستند (در سیستمهای MEMS به علت اندازه بسیار کوچک اجزاء فرکانس های طبیعی بسیار بزرگ هستند) از عبارت های دارای ترم Ω_i^2 و $\Omega_i \Omega_j$ می توان صرف نظر کرد. همچنین اکثر ژيروسکوپ ها صرفاً در یک جهت تحریک می شوند و راستاهای دیگر مربوط به جهات تشخیص هستند بنابراین نیروهای f_{ex} و f_{ey} را نادیده گرفته و عامل تحریک در جهت x را هارمونیک و با فرکانس زاویه ω_d فرض می کنیم و روابط زیر را بدست می آوریم که معروف به معادلات حرکت ژيروسکوپ دو محوره می باشد :

$$f_{ex} = F. \sin(\omega_d t)$$

$$\begin{aligned}
m\ddot{x} + c_x\dot{x} + k_x x &= -m \left((\dot{\Omega}_y z - \dot{\Omega}_z y) + 2(\Omega_y \dot{z} - \Omega_z \dot{y}) \right) + F. \sin(\omega_d t)
\end{aligned}$$

$$m\ddot{y} + c_y\dot{y} + k_y y = -m \left((\dot{\Omega}_z x - \dot{\Omega}_x z) + \nu(\Omega_z \dot{x} - \Omega_x \dot{z}) \right) \quad (5.2)$$

$$m\ddot{z} + c_z\dot{z} + k_z z = -m \left((\dot{\Omega}_x y - \dot{\Omega}_y x) + \nu(\Omega_x \dot{y} - \Omega_y \dot{x}) \right)$$

معمولاً ژيروسکوپها را برای تشخیص یک جهت دوران طراحی می‌کنند و برای تعیین دوران سایر جهات به جای یک ژيروسکوپ از چند ژيروسکوپ استفاده می‌کنند در این حالت از دوران سایر جهات صرفنظر می‌شود و نیز حرکت راستای Z ژيروسکوپ را مقید می‌کنند در این حالت به یک سری معادلات تحت عنوان معادلات ژيروسکوپ محور- Z یا ژيروسکوپ تک محوره می‌رسیم که دوران حول محور Z را اندازه‌گیری می‌کند.

$$\Omega_x = \Omega_y = z = 0$$

$$m\ddot{x} + c_x\dot{x} + k_x x = m \left((\dot{\Omega}_z y) + \nu(\Omega_z \dot{y}) \right) + F \sin(\omega_d t) \quad (6.2)$$

$$m\ddot{y} + c_y\dot{y} + k_y y = -m \left((\dot{\Omega}_z x) + \nu(\Omega_z \dot{x}) \right)$$

با اضافه کردن فرض ثابت بودن سرعت زاویه‌ای ورودی به سیستم به ترتیب به روابط بسیار معروف ژيروسکوپ دو محور- x/y و تک محوره- z می‌رسیم :

$$m\ddot{x} + c_x\dot{x} + k_x x = -m \left(\nu(\Omega_y \dot{z} - \Omega_z \dot{y}) \right) + F \sin(\omega_d t)$$

$$m\ddot{y} + c_y\dot{y} + k_x y = -m \left(\nu(\Omega_z \dot{x} - \Omega_x \dot{z}) \right) \quad (7.2a)$$

$$m\ddot{z} + c_z\dot{z} + k_z z = -m \left(\nu(\Omega_x \dot{y} - \Omega_y \dot{x}) \right)$$

$$m\ddot{x} + c_x\dot{x} + k_x x = m(\ddot{r}(\Omega_z \dot{y})) + F. \sin(\omega_d t) \quad (7.2b)$$

$$m\ddot{y} + c_y\dot{y} + k_x y = -m(\ddot{r}(\Omega_z \dot{x}))$$

منشاء این فرض از ماهیت میکرو بودن سیستم سرچشمه می‌گیرد و علت آن زیاد بودن فرکانس تحریک در مقایسه با فرکانس سرعت زاویه‌ای ورودی می‌باشد و از اینرو دامنه مشتق زمانی سرعت زاویه‌ای در مقایسه با فرکانس تحریک که به چندین کیلوهرتز می‌رسد بسیار کوچک می‌باشد.

در دستگاه معادلات فوق عبارت $m(\ddot{r}(\Omega_z \dot{y}))$ و $m(\ddot{r}(\Omega_y \dot{z} - \Omega_z \dot{y}))$ در مقایسه با نیروی هارمونیک f_{ex} بسیار کوچک است و قابل صرفنظر کردن می‌باشد با این فرض معادلات ژيروسکوپ دو محوره و تک محوره را بصورت زیر می‌نویسیم

$$m\ddot{x} + c_x\dot{x} + k_x x = F. \sin(\omega_d t)$$

$$m\ddot{y} + c_y\dot{y} + k_y y = -m(\ddot{r}(\Omega_z \dot{x} - \Omega_x \dot{z})) \quad (8.2a)$$

$$m\ddot{z} + c_z\dot{z} + k_z z = -m(\ddot{r}(\Omega_x \dot{y} - \Omega_y \dot{x}))$$

$$m\ddot{x} + c_x\dot{x} + k_x x = F. \sin(\omega_d t)$$

$$m\ddot{y} + c_y\dot{y} + k_y y = -m(\ddot{r}(\Omega_z \dot{x})) \quad (8.2b)$$

دستگاه معادلات اخیر ماهیت و کلیت سیستم ژيروسکوپ را بخوبی نشان می‌دهد و اساس اکثر مقالات موجود می‌باشد. این معادلات بیان می‌کنند که چگونه عامل تحریک خارجی، f_{ex} ، در مد- تحریک منجر به تولید عامل تحریک کریولیس درمدهای تشخیص می‌شود و پاسخ به این عامل کریولیس منجر به آشکارسازی سرعت زاویه‌ای ورودی و تعیین میزان دوران و تشکیل محورهای مختصات می‌گردد. دستگاه معادلات ژيروسکوپ محوره- z امکان مناسبی جهت بررسی و طراحی پارامتریک سیستم ژيروسکوپ را فراهم می‌کند.

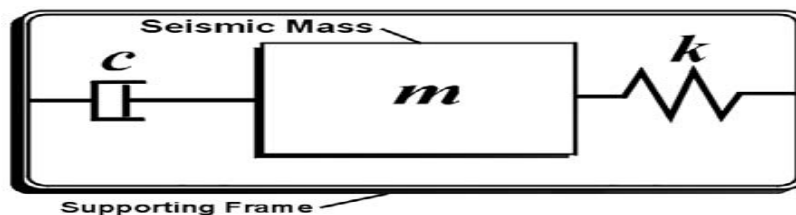
در این بخش تاثیر ساده سازی های مختلف بر روی سیستم را بررسی کرده و به شکل معادلات متفاوتی دست یافتیم که در ادامه پاسخ این معادلات را بررسی می کنیم.

۲-۲- طراحی ژيروسکوپ MEMS ایده آل با جرم متمرکز

در این بخش به طراحی و بررسی یکی از ساده ترین مدل های ژيروسکوپ MEMS می پردازیم. برخی از مفاهیم مربوط به این نوع سیستم در فصل قبل به تفصیل بیان شده است و در این بخش ابتدا به بررسی اصول کلی حاکم بر نوسانگر ها خواهیم پرداخت و سپس پاسخ ژيروسکوپ را که ترکیبی از این نوسانگر ها می باشد را بدست می آوریم. طرح های بیان شده در این بخش، مدل های پایه و اساسی بوده و قابل تعمیم به مدل های پیچیده تر می باشند به همین علت اکثر مقالات و پژوهش های صورت گرفته در حوزه ی ژيروسکوپ MEMS مربوط به ساختار جرم متمرکز دو درجه آزادی است.

۱-۲-۲ مشخصات رزوناتورها

در بسیاری از ژيروسکوپ های ارتعاشی هر یک از جهات و مدهای ارتعاشی تشخیص و تحریک به عنوان رزوناتور یک درجه ی آزادی عمل می کنند. بنابراین شناسایی و تحلیل مشخصات دینامیک و پاسخ رزوناتور یک درجه ی آزادی در طراحی نوسانگر مدهای تحریک و تشخیص ژيروسکوپ ارتعاشی بسیار حیاتی است.



تصویر ۲.۲: مدل جرم - فنر - دمپر نوسانگر یک درجه آزادی

دینامیک سیستم تحت اعمال نیروی هارمونیک $F(t)$ و با تعریف ضرایب m به عنوان جرم سیستم، k ضریب سختی فنر و c به عنوان ضریب میرایی سیستم با معادله زیر تعیین می شود:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (9.2)$$

با تعریف فرکانس طبیعی نامیرا ω_n و نسبت میرایی ζ بعنوان نسبت ضریب میرایی به میرایی بحرانی $(2\sqrt{km})$ معادله حرکت را بشکل زیر خواهیم داشت:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = \frac{F(t)}{m} \quad (10.2)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (11.2)$$

$$\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{km}} = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (12.2)$$

در حوزه ی لاپلاس تابع تبدیل رزوناتور یک درجه آزادی را به فرم زیر داریم :

$$(13.2)$$

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{\frac{1}{m}}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

با تحریک هارمونیک رزوناتور با نیروی $F = F \sin(\omega t)$ در فرکانس ω پاسخ حالت ماندگار و اجزاء آن بصورت زیر خواهند بود :

$$x = x_0 \sin(\omega t + \phi) \quad (14.2)$$

$$x_0 = \frac{\frac{F_0}{k}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right]^2}} \quad (15.2)$$

$$\phi = -\tan^{-1} \frac{2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (16.2)$$

که x دامنه ی پاسخ حالت ماندگار و ϕ زاویه فاز آن می باشد.

در حضور میرایی قابل توجه دامنه ماکزیمم در فرکانس زیر رخ می دهد :

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2} \quad (17.2)$$

برای مقادیر میرایی بسیار کوچکتر ، $\zeta \ll 1$ ، دامنه در فرکانس تشدید (طبیعی) ω_n به ماکزیمم مقدار خود می رسد و مقدار آن برابر است با :

$$|x_0|_{res} = \frac{F_0}{2k\zeta} = \frac{F_0}{c\omega_n} \quad (18.2)$$

در اینجا ضریب کیفیت، سیستم را به عنوان نسبت دامنه ماکزیمم به جابجایی استاتیک $\left(\frac{F_0}{k}\right)$ تعریف می کنیم و مقدار آن برای حالت نسبت میرایی بسیار کوچک ($\zeta \ll 1$) برابر است با :

$$Q = \frac{1}{2\zeta} = \frac{m\omega_n}{c} \quad (19.2)$$

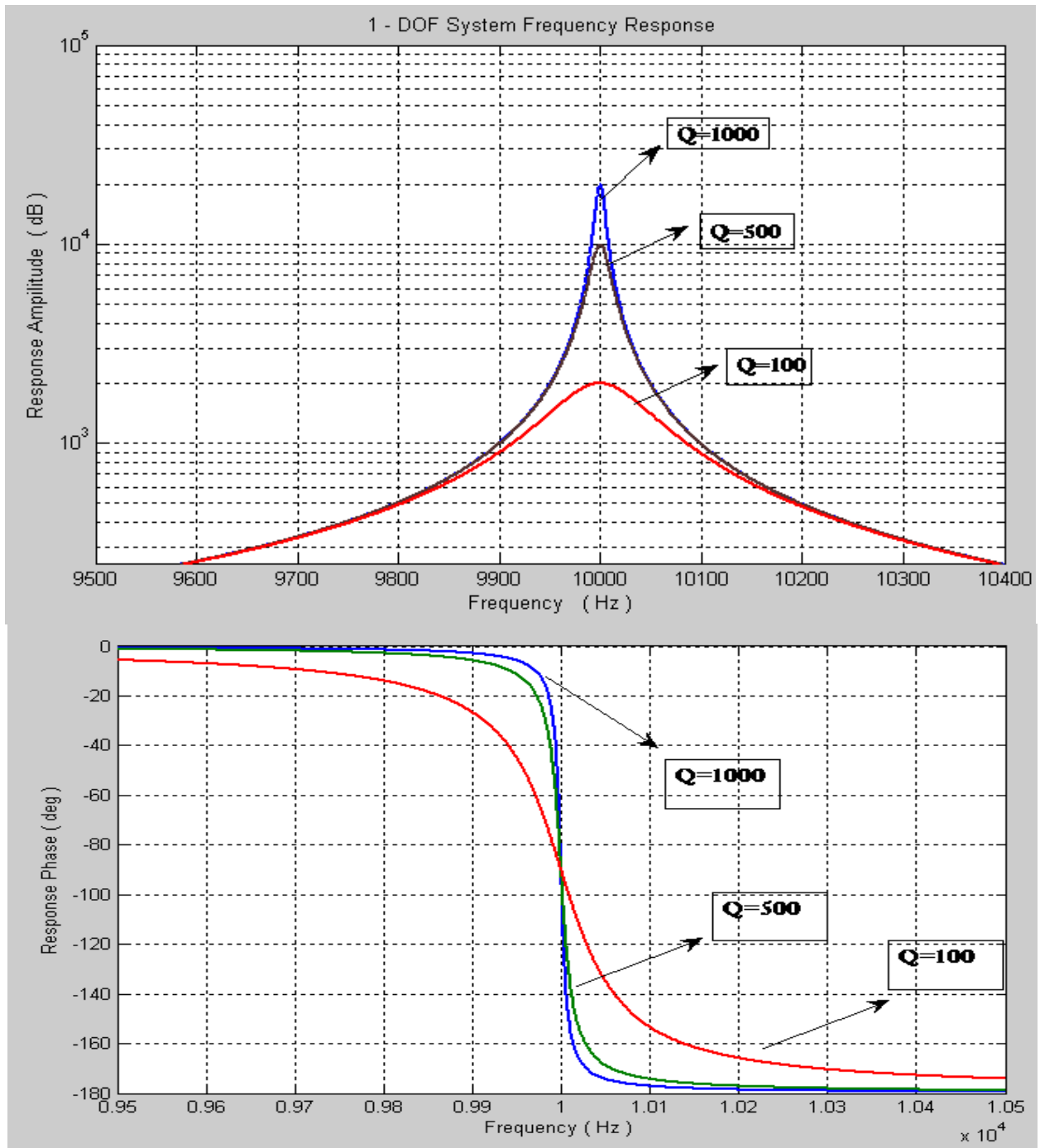
همانطور که در فصل قبل توضیح داده شد ضریب کیفیت یکی از مهمترین پارامترهای نوسانی در هر رزوناتور می باشد و بطور مستقیم دامنه نوسان را مقیاس بندی می کند . به عنوان مثال برای یک مقدار Q مشخص دامنه نوسان در حالت تشدید عبارت است از :

$$|x_0|_{res} = Q \frac{F_0}{k} \quad (20.2)$$

در فرکانس تشدید، فاز سیستم از فاز تابع نیرو به مقدار 90° - فاصله پیدا می‌کند. در فرکانس های تحریک پایینتر از فرکانس تشدید، فاز سیستم به سمت 0° میل می‌کند، به این معنا که موقعیت فاز حرکت جرم به فاز تابع نیرو نزدیک می‌شود. در فرکانسهای بالاتر از فرکانس تشدید فاز سیستم به سمت 180° - میل می‌کند. در گذر از 0° تا 180° - در اطراف فرکانس تشدید و در مقادیر بزرگ ضریب کیفیت Q تغییرات فاز سیستم بسیار ناگهانی رخ می‌دهد (تصویر ۳.۲). برای مقادیر نسبت میرایی کوچک رابطه‌ی پهنای باند به شکل زیر می‌باشد:

$$BW \approx \frac{\omega_n}{Q} \quad (21.2)$$

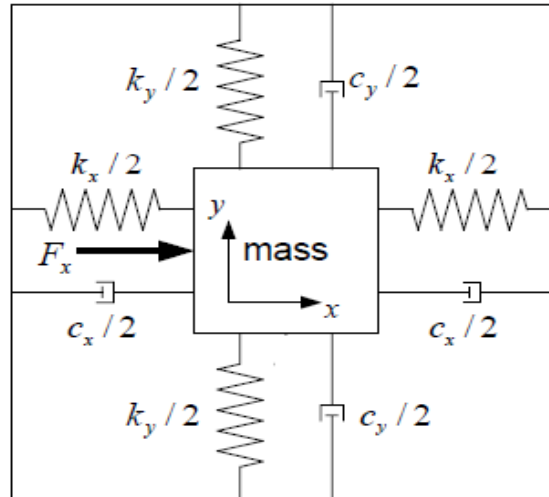
تحلیل انجام شده، پایه و یادآوری برای بحث های پیرامون دینامیک و پاسخ نوسانگر مدهای تحریک و تشخیص در ژيروسکوپ ارتعاشی MEMS می‌باشد.



تصویر ۳.۲: دیاگرام بود از پاسخ فرکانسی یک رزوناتور یک درجه آزادی

۲-۲-۲- مدلسازی و پاسخ ژيروسکوپ به سرعت زاویه‌ای ورودی

ابتدا مطابق تصویر (4.2) مدل معروف و ساده ای از ژيروسکوپ محور-Z را در نظر می‌گیریم که متشکل از یک جرم نمونه به عنوان اینرسی سیستم و رابط‌های متعامد متصل به جرم و زیرلایه که به عنوان تامین کننده الاستیسته و میرایی مدل هستند.



تصویر ۴.۲: مدل ساده ای از ژيروسکوپ محور-Z

با توجه به معادلات (۸.۲ b)، هدف از ژيروسکوپ MEMS دو درجه آزادی با شرایط گفته شده محاسبه سرعت زاویه Ω_z است که در نتیجه آن، جابجایی زاویه‌ای حسگر حول محور-Z محاسبه می‌شود.

عملکرد مد- تحریک :

چون ماهیت و وجود اثر کریولیس بر اساس بقاء مومنتم است، در هر سیستم ژيروسکوپ به مکانیزمی جهت تولید مومنتم نیازمندیم. در ژيروسکوپ‌های ارتعاشی MEMS، نوسانگر مد- تحریک، که شامل یک جرم به حرکت درآمده با نوسان هارمونیک است، منبع مومنتم می‌باشد. نوسانگر مد- تحریک معمولاً یک رزوناتور یک درجه‌ی آزادی که بصورت جرم-فنر-دمپر مدل شده است، می‌باشد. با تعریف اندیس d برای پارامترهای نوسانی معرفی شده در بخش قبل (برای شناسایی مد- تحریک)، معادلات حرکت مشابهی به فرم زیر برای مد- تحریک می‌نویسیم :

$$m_d \ddot{x} + c_d \dot{x} + k_d x = F_d \sin(\omega t) \quad (۲۲.۲)$$

$$x_0 = \frac{F_d}{k_d \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_d}\right)^2\right]^2 + \left[\frac{1}{Q_d} \frac{\omega}{\omega_d}\right]^2}} \quad (23.2)$$

$$\phi_d = -\tan^{-1} \frac{\frac{1}{Q_d} \frac{\omega}{\omega_d}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_d}\right)^2} \quad (24.2)$$

$$\omega_d = \sqrt{\frac{k_d}{m_d}} \quad (25.2)$$

$$Q_d = \frac{m_d \omega_d}{c_d} \quad (26.2)$$

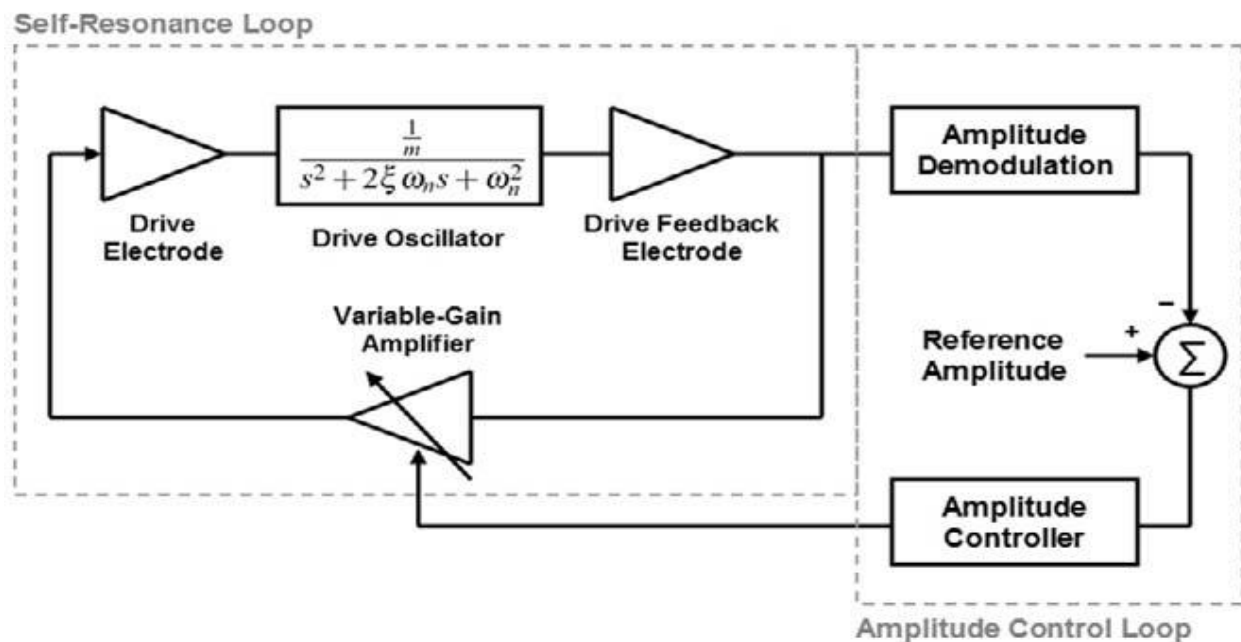
ضریب تقویت ژيروسکوپ بطور مستقیم متناسب با دامنه مد- تحریک نوسانی است. فاز و فرکانس نوسانات تحریک مستقیماً فاز و فرکانس نیروی کریولیس و به دنبال آن پاسخ مد- تشخیص را تعیین می‌کنند. بنابراین حفظ دامنه، فاز و فرکانس نوسانات مد- تحریک در یک حالت پایدار و مشخص بسیار مهم می‌باشد.

برای این منظور تقریباً در تمام ژيروسکوپهای گزارش شده، مد- تحریک دقیقاً برای عملکرد در فرکانس تشدید طراحی می‌شود. در حالت تشدید، فاز پاسخ مد- تحریک 90° می‌شود و دامنه بطور ساده از عبارت زیر بدست می‌آید:

$$x_{0res} = Q_d \frac{F_d}{m_d \omega_d^2} \quad (27.2)$$

مکانیزم خود تشدید با استفاده از حلقه ی فیدبک مثبت تنظیم کننده دامنه، روشی معمول و مرسوم برای دستیابی به دامنه و فاز مد- تحریک پایدار می‌باشد (تصویر 5.2). حلقه ی فیدبک مثبت رزوناتور را ناپایدار

ساخته، و فرکانس کاری را در فرکانس تشدید مد- تحریک قفل می‌کند. این عمل سیستم را دقیقاً در اختلاف فاز ۹۰ از سیگنال تحریک تنظیم می‌کند. یک حلقه کنترل بهره اتوماتیک (AGC) دامنه نوسان را شناسایی کرده، و آن را با دامنه ی سیگنال مرجع مقایسه می‌کند، و سپس بهره فیدبک مثبت را جهت یکسان شدن با دامنه مرجع تطبیق می‌دهد. قرار دادن مد- تحریک سیستم در فرکانس تشدید همچنین ولتاژ تحریک را در طول عملکرد حالت ماندگار مینیمم می‌کند [۱].



تصویر ۵.۲: حلقه کنترل بهره اتوماتیک (AGC) دامنه، که نوسانگر مد- تحریک را در حالت خود تشدید به حرکت درآورده و دامنه نوسان را تنظیم می‌کند. [۱]

پاسخ کریولیس:

با فرض کارکرد مد- تحریک در فرکانس تشدید ω_d پاسخ مد- تشخیص به نیروی کریولیس را بررسی می‌کنیم. با این فرض برای پاسخ مد- تحریک خواهیم داشت:

$$x = x_0 \sin(\omega_d t + \phi_d) \quad (28.2)$$

نیروی کریولیس که به نوسانگر مد- تشخیص اعمال می‌شود مطابق رابطه ی زیر خواهد بود:

$$F_c = -2m_c \Omega_z \dot{x} = -2m_c \Omega_z x_0 \omega_d \cos(\omega_d t + \phi_d) \quad (29.2)$$

که m_c بخشی از جرم محرک است که در نیروی کریولیس اثر می گذارد. در یک طرح ساده ی تک جرمی m_c معمولاً با m_d برابر است. در عبارت فوق واضح است که دامنه نیروی کریولیس بطور مستقیم با دامنه مد-تحریک مقیاس (تقویت) شده است بنابراین برای دستیابی به ضریب تقویت پایدار، باید دامنه تحریک به خوبی تنظیم شده باشد.

مشابه نوسانگر مد- تحریک ، مد- تشخیص نیز اغلب نوسانگر یک درجه آزادی فرض می شود. دلیل اصلی استفاده از نوسانگر یک درجه آزادی برای رزوناتور مد- تشخیص، تقویت مکانیکی پاسخ به نیروی کریولیس با استفاده از اثر تشدید می باشد. معادله حرکت این رزوناتور به فرم زیر خواهد بود :

$$m_s \ddot{y} + c_s \dot{y} + k_s y = -2m_c \Omega_z x_0 \omega_d \cos(\omega_d t + \phi_d) \quad (30.2)$$

در اینجا نیز مانند قبل و این بار از اندیس S برای شناسایی پارامترهای نوسانی مد- تشخیص استفاده می کنیم. دوباره برای یک طراحی ساده m_d ، m_c و m_s برابر فرض می شوند.

در یک سیستم خطی پارامترهای پاسخ حالت ماندگار به نیروی کریولیس بصورت زیر تعریف می شوند.

$$y_0 = \Omega_z \frac{m_c m_d}{m_s \omega_s^2} \frac{2x_0}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega_d}{\omega_s}\right)^2\right]^2 + \left[\frac{1}{Q_s} \frac{\omega_d}{\omega_s}\right]^2}} \quad (31.2)$$

$$\phi_s = -\tan^{-1} \frac{\frac{1}{Q_s} \frac{\omega_d}{\omega_s}}{1 - \left(\frac{\omega_d}{\omega_s}\right)^2} + \phi_d \quad (32.2)$$

$$\omega_s = \sqrt{\frac{k_s}{m_s}} \quad (33.2)$$

$$Q_s = \frac{m_s \omega_s}{c_s} \quad (34.2)$$

که y دامنه پاسخ می باشد.

برای دستیابی به بیشترین بهره ی ممکن در مد- تشخیص، معمولاً رزوناتور باید عملکردی در حوالی نقطه اوج منحنی دامنه داشته باشد، برای رسیدن به این نقطه کاری باید تا حد ممکن فرکانس های تشدید مدهای تحریک و تشخیص بر هم منطبق گردند. وقتی ژيروسکوپ در فرکانس تشدید مد- تشخیص عمل می کند ($\omega_d = \omega_s$) زاویه فاز مد- تشخیص از رابطه سرعت تحریک 90° - می شود و دامنه به شکل زیر ساده می شود :

$$y_{0res} = \Omega_z \frac{2Q_s x_0 m_c}{m_s \omega_s} \quad (35.2)$$

با بررسی دامنه تشدید پاسخ کریولیس مد- تشخیص، حساسیت ژيروسکوپ به سرعت زاویه ای ورودی Ω_z به وسیله ملاحظات زیر بهبود می یابد :

- افزایش دامنه نوسانگر مد- تحریک x .
- افزایش Q_s با کاهش میرایی ، معمولاً بوسیله بسته بندی خلاء حاصل می شود
- افزایش جرم m_c که نیروی کریولیس تولید می کند، همزمان با کاهش جرم کلی m_s که توسط نیروی کریولیس تحریک می شود.

طراحی نمونه ژيروسکوپ :

همانطور که در بخش قبل ذکر شد برای دستیابی به بیشترین بهره پاسخ در مدهای تحریک و تشخیص باید فرکانس زاویه ای نیروی تحریک را منطبق بر فرکانس طبیعی مد- تحریک نمود و فرکانس طبیعی مد- تشخیص را تا حد امکان نزدیک به فرکانس نیروی تحریک طراحی کرد. برای طراحی ایده آل با فرض انطباق کامل مدی پاسخ ژيروسکوپ به ورودی سرعت زاویه ثابت $10^\circ/min$ ، را محاسبه کرده و سپس تاثیر پارامتر

های محیطی و ساختاری را بر روی سیستم بررسی می‌کنیم. مقدار مشخصات نوسانی سیستم در جدول ۱.۲ آورده شده‌اند.

جدول ۱.۲: مشخصات نوسانی سیستم ژيروسکوپ محور - Z

مشخصات	مقادیر
m جرم ژيروسکوپ	$6 \times 10^{-9} \text{ Kg}$
f_d فرکانس طبیعی مد- تحریک	29.98 KHz
f_s فرکانس طبیعی مد- تشخیص	29.98 KHz
f فرکانس تحریک	29.98 KHz
Q_d ضریب کیفیت مد- تحریک	۱۰۰۰
Q_s ضریب کیفیت مد- تشخیص	۱۰۰۰
F دامنه نیروی تحریک	$1 \mu\text{N}$

در این طرح ساده پهنای باند مدل بصورت زیر بدست می‌آید :

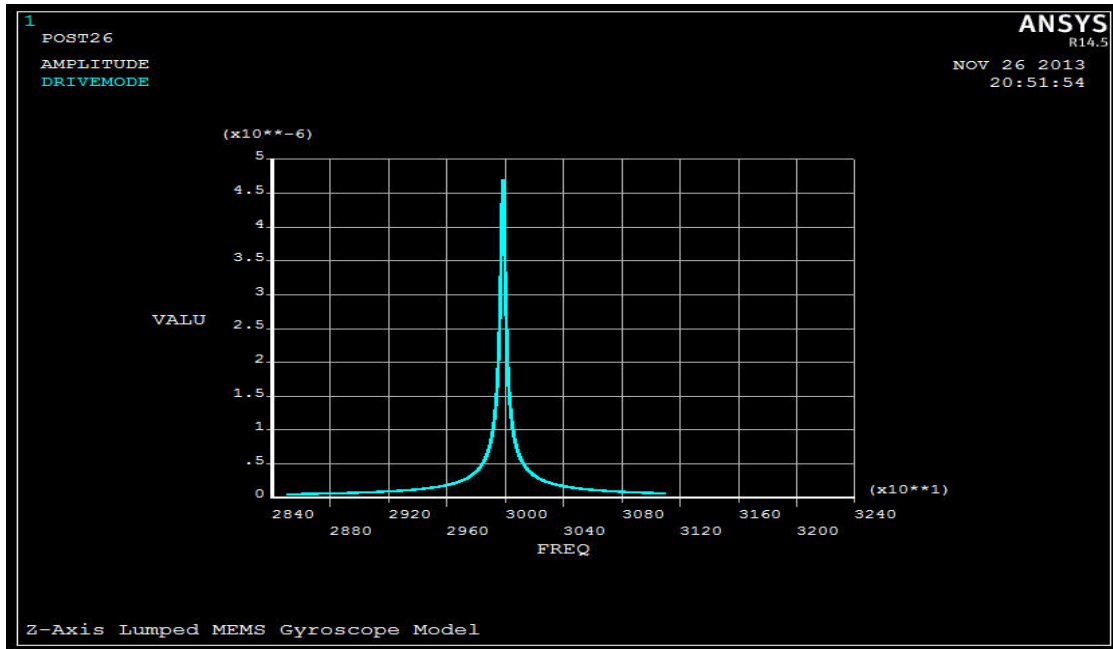
$$BW = \frac{f_d}{Q_d} = \frac{29987}{1000} \approx 30 \text{ Hz}$$

با توجه به داده های جدول فوق محاسبات را برای تعیین ضرایب سختی و میرایی بصورت زیر انجام می دهیم :

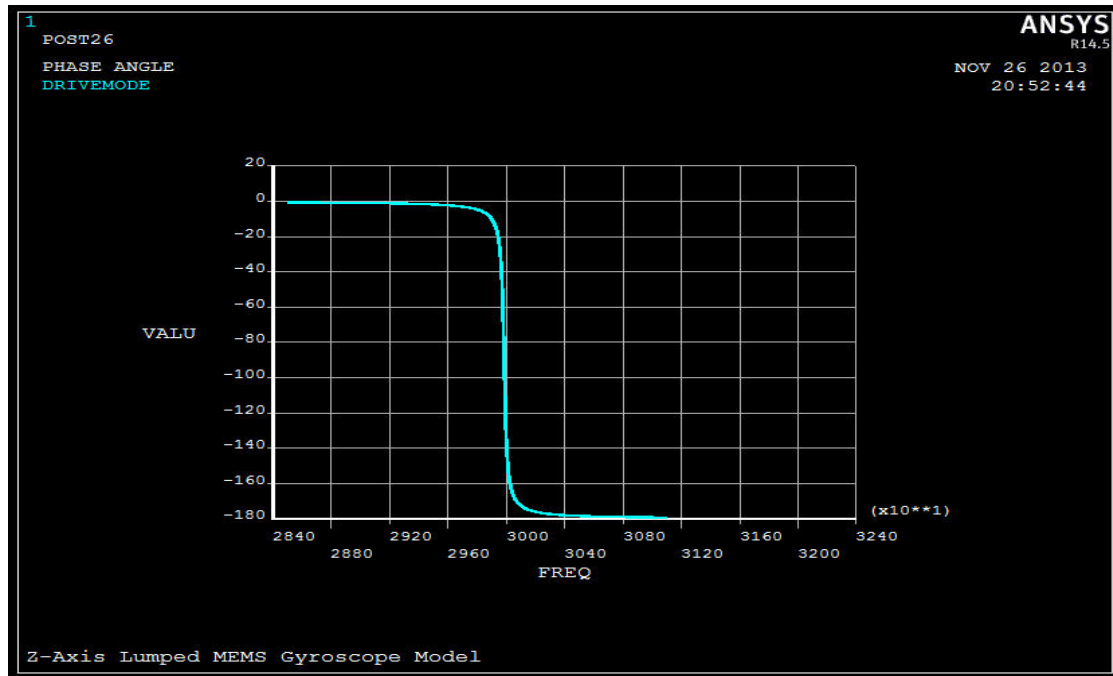
$$K_d = K_s = 213 \text{ N / m}$$

$$C_x = C_y = 1.1304 \times 10^{-6} \text{ N.s / m}$$

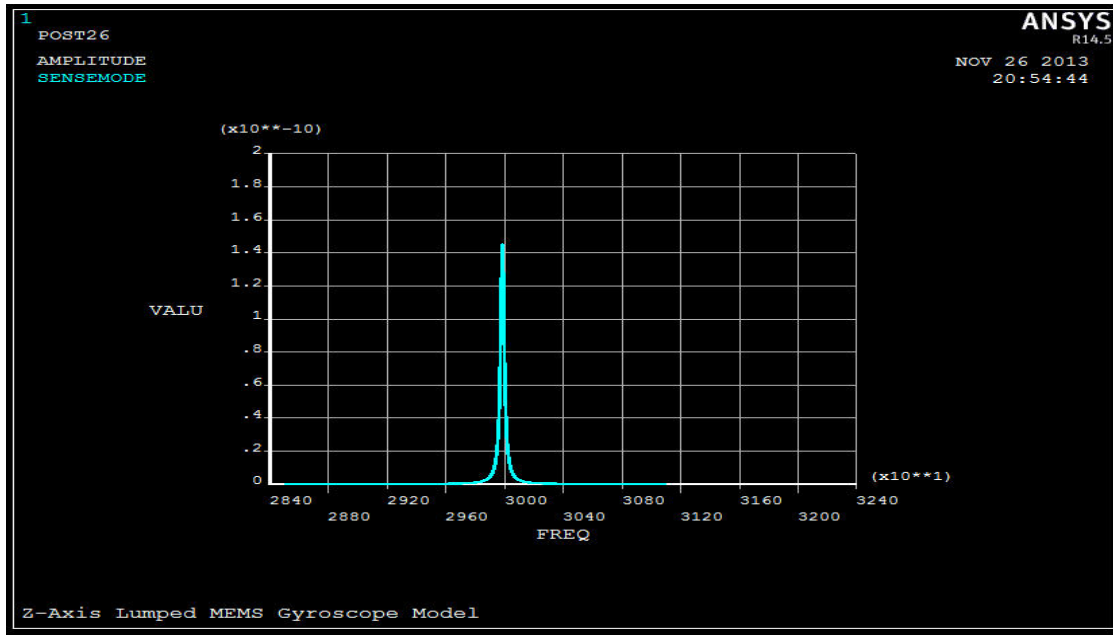
شکل پاسخ فرکانسی سیستم در نرم افزار ۱۴.۵ ANSYS و با استفاده از المان ۱۴ COMBINE، با حل هارمونیک شکل کلی معادلات حاکم، مطابق تصاویر زیر می‌باشد.



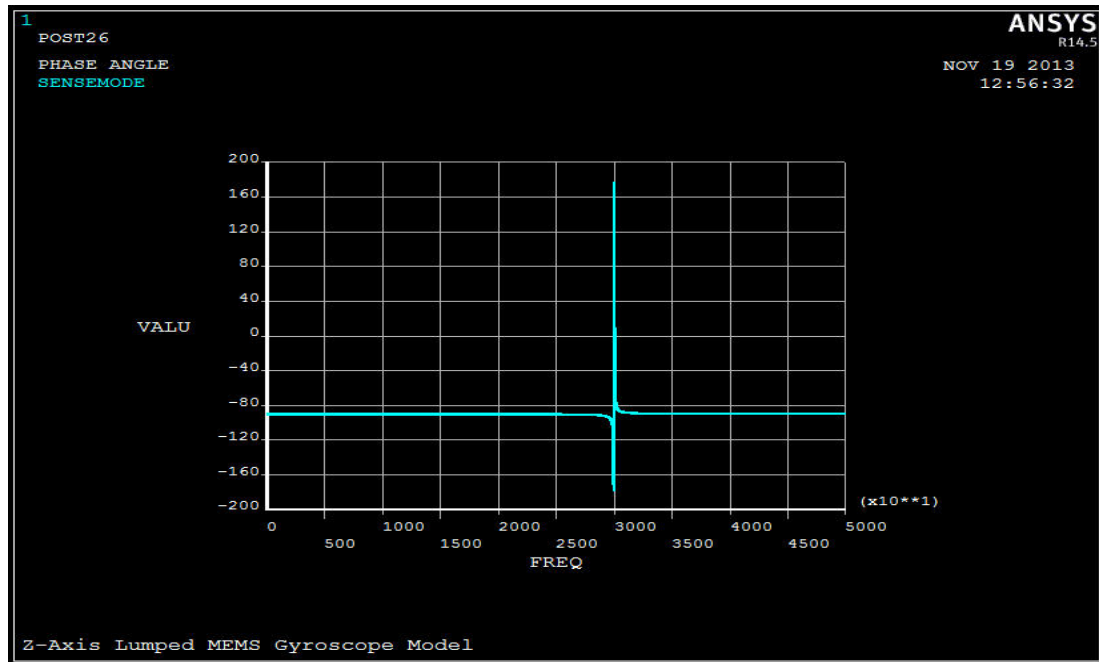
تصویر ۶.۲: دامنه مد - تحریک بر حسب فرکانس



تصویر ۷.۲: زاویه فاز مد - تحریک بر حسب فرکانس

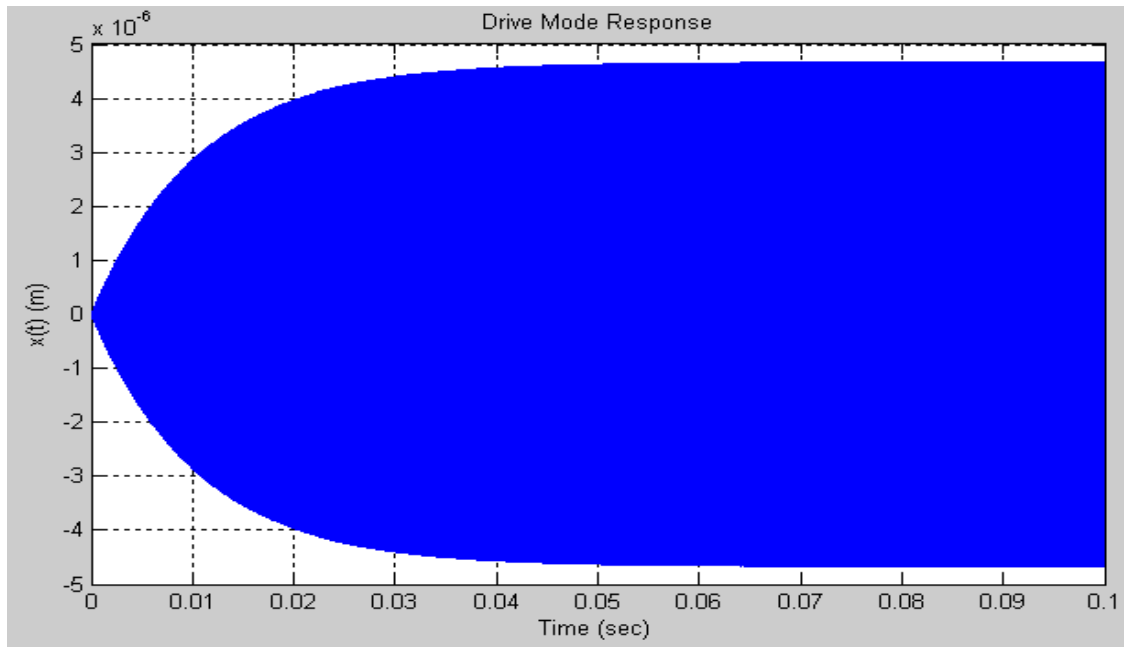


تصویر ۸.۲: دامنه مد- تشخیص بر حسب فرکانس

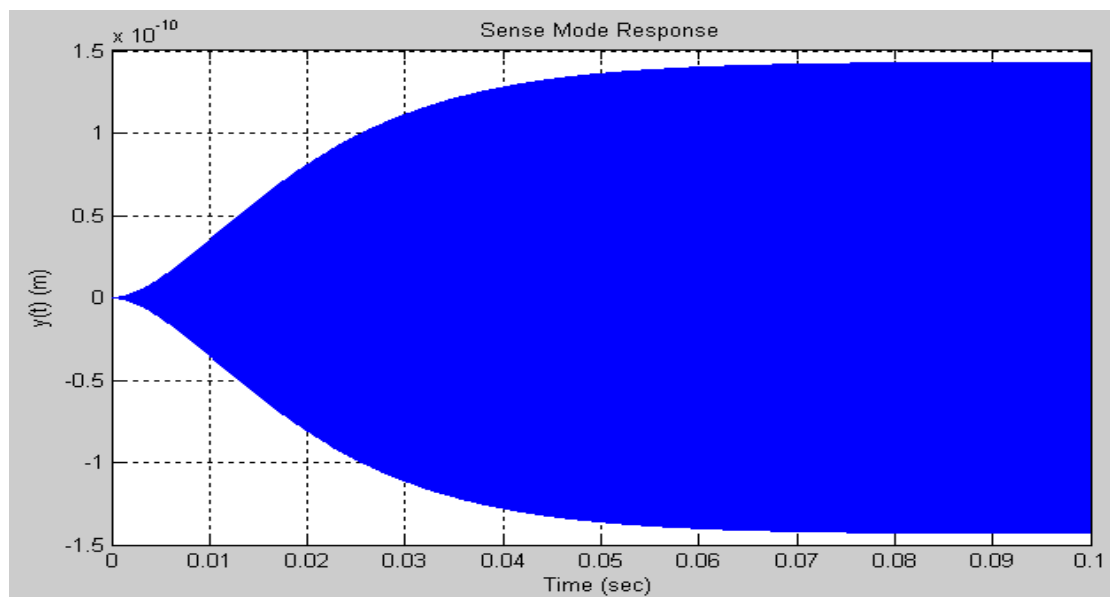


تصویر ۹.۲: زاویه فاز مد- تشخیص بر حسب فرکانس

پاسخ گذرای سیستم تحت اعمال بار هارمونیک در حالت تشدید با حل عددی دستگاه معادلات دیفرانسیل (۹.۲b) به روش رانج-گوتا در نرم افزار MATLAB بصورت زیر بدست می آید :



تصویر ۱۰.۲ : جابجایی راستای تحریک جرم نمونه، تحت بار هارمونیک با فرکانس تشدید

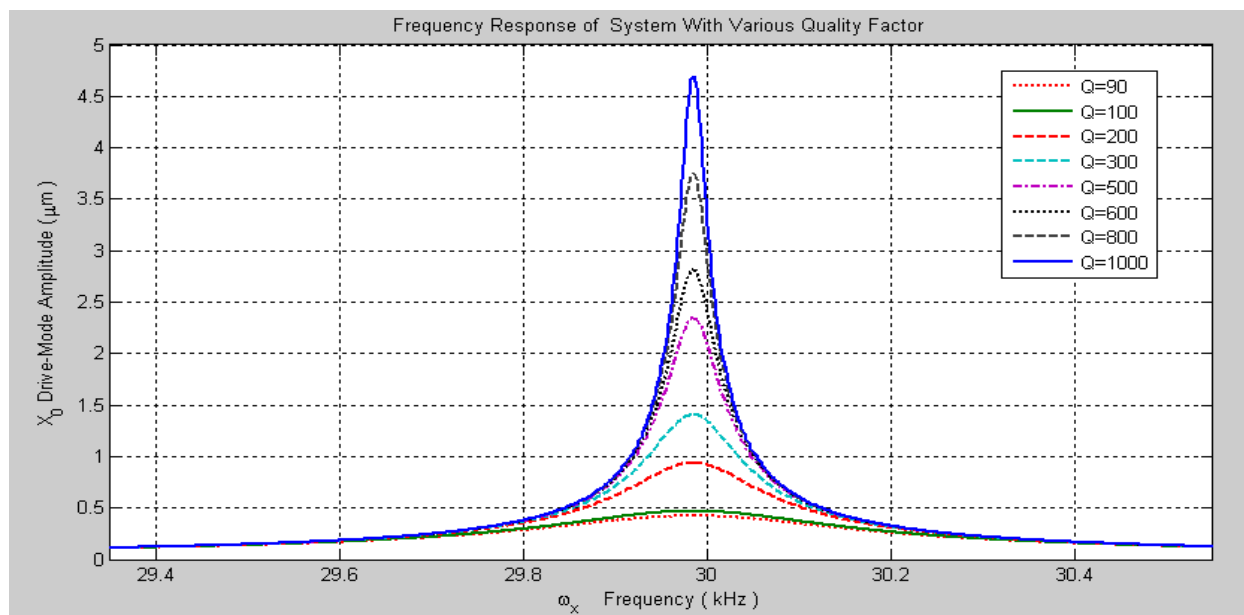


تصویر ۱۱.۲ : پاسخ گذرای کریولیس (راستای تشخیص)

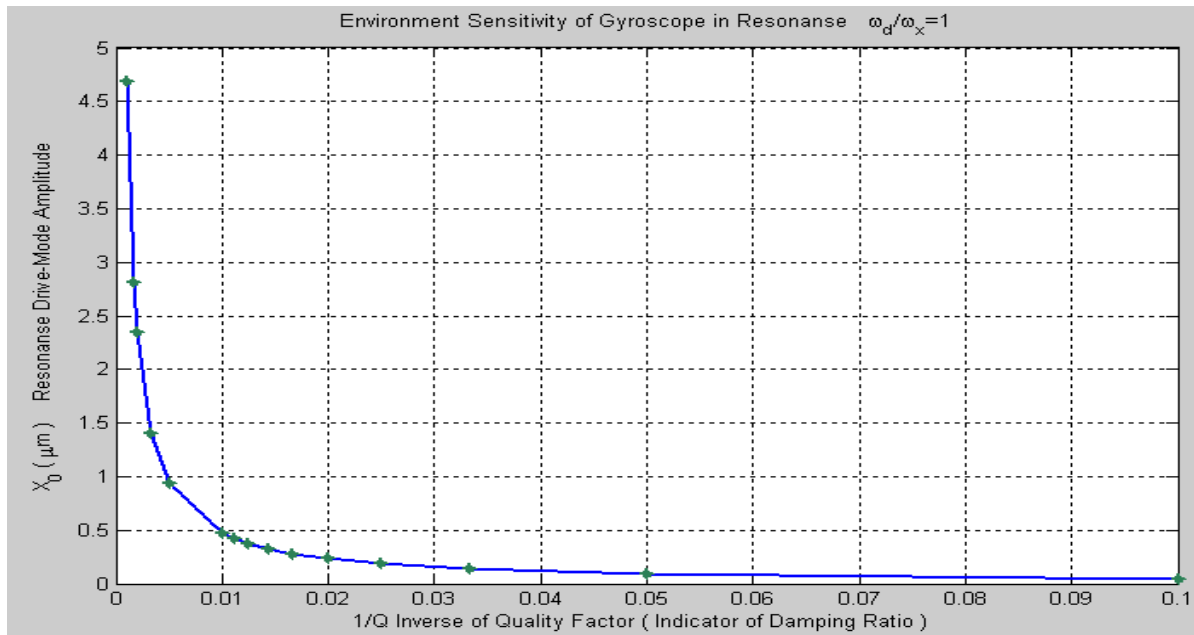
پاسخ حالت ماندگار سیستم با حل مدل معادلات کلی برای مد-تحریک و تشخیص به ترتیب برابر است با $4.6929 \mu m$ و $1.4482 \times 10^{-4} \mu m$ که در مقایسه با حل دستگاه معادلات $8.2b$ که برابرند با $4.5634 \mu m$ و $1.3695 \times 10^{-4} \mu m$ ، به ترتیب 2.76% و 5.43% اختلاف دارد و لذا ساده سازی های صورت گرفته منطقی بوده و تاثیری قابل توجهی بر روی پاسخ سیستم ندارد.

حساسیت :

هرچند کارکرد سیستم در شرایط ذکر شده در تحلیل فوق حداکثر بازده سیستم را به همراه دارد ولی سیستم را به تغییر پارامتر های نوسانی بسیار حساس می سازد. می دانیم که تغییر شرایط محیط و عیوب ناشی از مرحله تولید غیر قابل اجتناب هستند. تغییرات دما و فشار هوا بر روی میرایی سیستم اثر گذاشته و ضریب کیفیت بالای سیستم را دچار انحراف می کند. این رخداد در نزدیکی فرکانس تحریک سیستمهای تشدیدی، بهره سیستم را به شدت تغییر می دهد. در طول زمان عملکرد این سیستمها، نوسانات در دما و فشار محیط خطای قابل توجهی به سیستم اعمال می کند. در تصاویر ۱۲.۲ و ۱۳.۲ تاثیر تغییر ضریب کیفیت بر روی بهره سیستم بررسی شده و حساسیت سیستم تشدیدی را به این تغییرات نشان می دهد.



تصویر ۱۲.۲: تغییرات شدید بهره مد- تحریک بر اثر انحراف ضریب کیفیت این مد از مقدار نامی در ناحیه تشدید



تصویر ۱۳.۲: حساسیت دامنه سیستم به تغییرات شرایط محیط در وضعیت تشدید

از نمودارهای فوق مشخص است که هرچه فرکانس زاویه‌ای و نیز ضریب کیفیت افزایش یابد، حساسیت نیز افزایش می‌یابد به نحوی که در موقعیت $\omega = \omega_d$ به حداکثر حساسیت می‌رسیم. اما به علت تشدید، پایداری سیستم کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به شرایط عملکرد سیستم، تنظیم اختلاف بین ω و ω_d (توازن بین حساسیت و پایداری) مهم است. هر چه از نسبت $\omega = \omega_d$ دور شویم حساسیت کاهش می‌یابد. این وضعیت در شرایطی که سیستم به عللی مثل تغییرات شرایط خلاء (در نتیجه آب بندی نامناسب) با تغییر ضریب کیفیت مواجه است، مفید است.

۲-۲-۳- انطباق مد و Δf

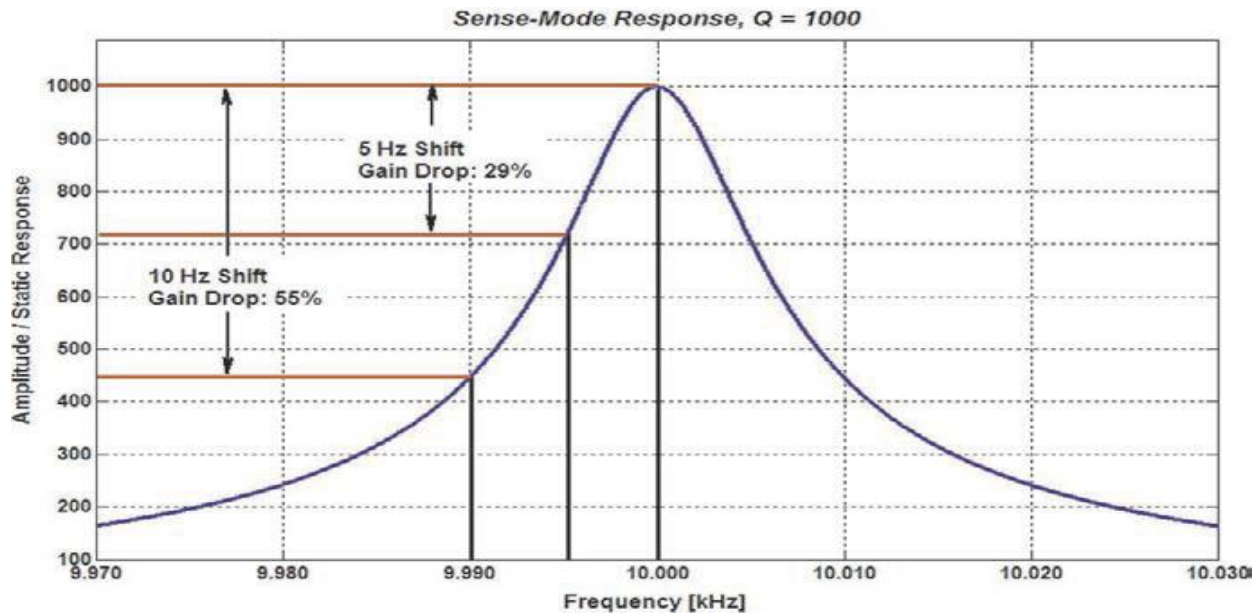
اگرچه انطباق فرکانس های تشدید مدهای تحریک و تشخیص، پاسخ مکانیکی مد- تشخیص به سرعت زاویه‌ای ورودی را بشدت افزایش می‌دهد (افزایش بهره سیستم)، با اینحال معایب زیادی نیز دارد. عملکرد سیستم نزدیک قله تشدید مد- تشخیص، سیستم را به تغییرات پارامترهای نوسانی بسیار حساس می‌سازد که به موجب تغییر فرکانس های تشدید یا میرایی اتفاق می‌افتد.

برای نشان دادن این اثر، یک سیستم مد- تشخیص را با فرکانس تشدید $\omega_s = 10 \text{ kHz}$ و ضریب کیفیت $Q_s = 1000$ (تصویر ۱۴.۲) در نظر می‌گیریم. وقتی فرکانس عملکرد منطبق بر فرکانس تشدید ω_s می‌شود ضریب بزرگنمایی برابر با ضریب کیفیت، ۱۰۰۰ است. اگر تنها 5 Hz انحراف نسبی بین فرکانس عملکرد و فرکانس

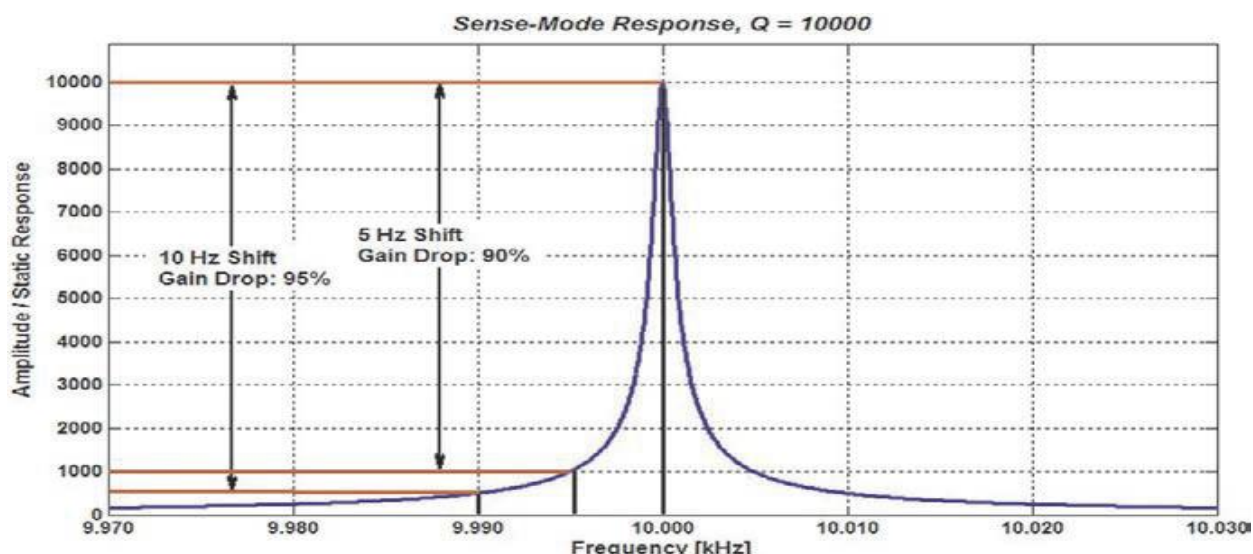
تشدید وجود داشته باشد، بهره حدود ۲۹.۳٪ افت پیدا خواهد کرد. و نیز برای ۱۰ Hz انحراف نسبی، بهره ۵۵٪ افت می‌کند. [۱]

تحت شرایط ضریب کیفیت بالا، بهره سیستم افزایش می‌یابد در حالیکه پهنای باند باریکتر می‌شود. به عنوان مثال برای سیستم تشخیص فوق اگر ضریب کیفیت را به مقدار $Q_s = 10000$ افزایش دهیم (تصویر ۱۵.۲) ضریب بزرگنمایی در فرکانس تشدید مستقیماً به مقدار ۱۰۰۰۰ افزایش پیدا خواهد کرد اگرچه پهنای باند طبق رابطه زیر ۱ Hz می‌شود.

$$BW = \frac{\omega_s}{Q_s} = \frac{10000}{10000} = 1Hz$$



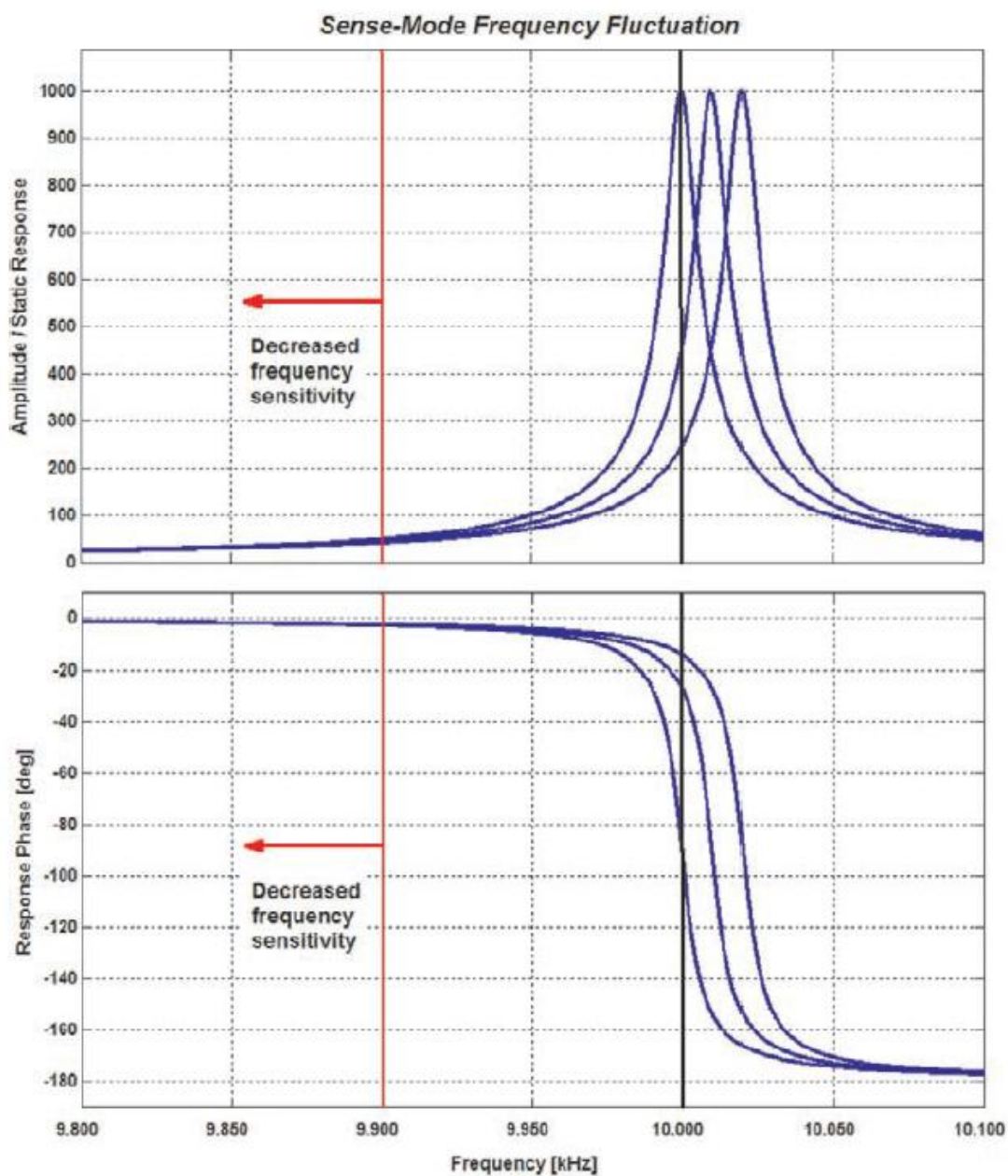
تصویر ۱۴.۲: کاهش بهره پاسخ در اثر انحراف در اندازه فرکانس عملکرد از فرکانس تشدید [۱]



تصویر ۱۵.۲ : ضریب کیفیت بالا با اینکه بهره بالایی تولید می کند ، اما سیستم بسیار حساسی نسبت به تغییر فرکانس تولید می کند [۱]

این بدان معناست که تنها 0.5 Hz عدم تطبیق مدی ، افت 29.3% در بهره ایجاد می کند. اگر عدم تطابق به 5 Hz که 0.05% از 10 kHz فرکانس تشدید است برسد بهره افت 90% را تجربه می کند. بنابراین در بسته بندی های خلاء به طور ویژه موقعیت فرکانس تشدید مد- تشخیص نسبت به فرکانس عملکردی با دقت بسیار بالا کنترل می شود.

عیوب ساختاری ناشی از فرایند تولید و نیز خواص مواد و هندسه سیستم MEMS اجتناب ناپذیر می باشند. در میکروماشین کاری سطحی ضخامت اجزاء تعلیق توسط فرایند رسوب دهی تعیین می شود و عرض اجزاء تحت تاثیر فرایند حکاکی است. بعلاوه، مدول یانگ سازه متاثر از شرایط رسوب دهی خواهد بود [۳]. در میکرو ماشینکاری حجمی ، عرض و سطح مقطع تیرهای تعلیق اغلب در نتیجه ی حکاکی سرتاسر- جانبی تغییر می کنند. تغییرات در این پارامترها موجب تفاوت فرکانس تشدید از سیستمی به سیستم دیگر می گردد. علاوه بر موارد ذکر شده، نوسان های دمای محیط و تنش های ایجاد شده موجب نوسانات فرکانسی در حین عملکرد سیستم می گردد.



تصویر ۱۶.۲: برای کاهش حساسیت پاسخ بهره و فاز به نوسانات فرکانسی، معمولاً فرکانس عملکردی با فاصله از فرکانس مد- تشخیص طراحی می‌شود. [۱]

مجموع اثرات ساختاری و محیطی که در نتیجه آن تغییرات بزرگی در فرکانس های تشدید ایجاد می‌شود، کنترل تطبیق فرکانس های مدهای تحریک و تشخیص با دقت مورد نیاز را بسیار مشکل می‌کند. بنابراین یک راهکار عملی دور ساختن فرکانس تشدید مد- تشخیص، و انتقال آن به ناحیه ای است که تغییرات فرکانس تاثیر کمی بر روی بهره و فاز خروجی سیستم داشته باشد (تصویر ۱۶.۲). برای این منظور فرکانس مد- تشخیص ω_s را

با فاصله ای مشخص از فرکانس مد- تحریک ω_d قرار می دهیم. این جدایش فرکانسی معمولاً بصورت زیر تعریف می شود :

$$\Delta = f_s - f_d = \frac{1}{2\pi}(\omega_s - \omega_d) \quad (36.2)$$

علاوه بر تغییرات فرکانسی، بهره سیستم، تاثیر مهمی از روی نوسانات میرایی بر می دارد. این یک عامل مهمی است، چون با وجود آن کنترل ضریب کیفیت پاسخ مد- تشخیص به دشواری صورت می گیرد.

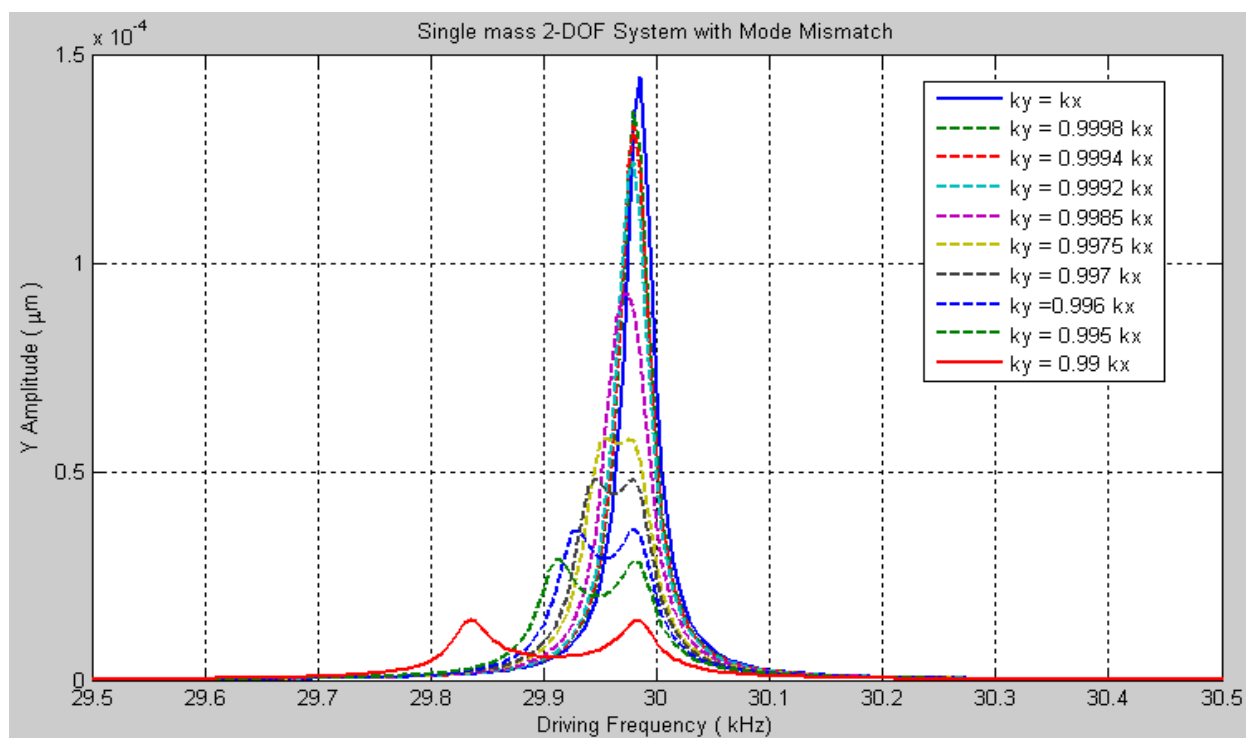
بنابراین حفظ فشار ثابت با استفاده از بسته بندی با درز های هوا بند بسیار با اهمیت است. با این حال میرایی متاثر از تغییرات دما نیز می باشد. برای دستیابی پایداری بایاس دمایی خوب، عملکرد سیستم دور از قله تشدید راه حل عملی است.

انطباق مد برای میکروژيروسکوپ نمونه :

همانطور که گفته شد ، ضخامت ژيروسکوپ متاثر از فرایند رسوب دهی و عرض اجزای آن متاثر از عملیات حکاکی می باشد. مدول الاستیسیته سازه از ضخامت تاثیر می پذیرد. تغییر در این پارامترها تاثیر شدیدی بر روی پاسخ دینامیکی ژيروسکوپها دارد. معمولاً سیستمهای کنترل خیلی پیشرفته برای محدود کردن عملکرد در ناحیه تشدید مورد استفاده قرار می گیرد [۳].

سیستم دینامیکی دو درجه آزادی، دو فرکانس تشدید مستقل از هم خواهد داشت که عبارتند از فرکانس جهت تحریک ، $\omega_d = \sqrt{k_d/m}$ ، و فرکانس جهت تشخیص ، $\omega_s = \sqrt{k_s/m}$. وقتی مقادیر سختی در جهات تحریک و تشخیص برابر باشند ، $k_d = k_s$ ، دو مد تشدید با یکدیگر منطبق می شوند، $\omega_d = \omega_s$. با این وجود، عیوب تولید اجتناب ناپذیر هستند و هر دو عامل هندسه و خواص مواد MEMS از فرایند حکاکی، رسوب دهی و تنش های پسماند اثر می پذیرند که بشدت اجزاء تعلیق را تحت تاثیر قرار می دهد. نتایج تجربی نشان می دهند که امکان یک انحراف سختی از مقدار طراحی شده تا بیش از ۲۰٪ وجود دارد [۳]. معمولاً سیستم کنترل الکتریکی پیشرفته جهت تنظیم فرکانس های تشدید مورد استفاده قرار می گیرد.

نیروی کریولیس القاء شده توسط دوران، $m(\ddot{\Omega}_z \dot{x})$ ، که متناسب با دامنه نوسانات جهت تحریک است، تنها نیروی تحریک در جهت تشخیص می‌باشد. می‌توان مشاهده کرد که دامنه جهت تشخیص متناسب با نیروی کریولیس و در نتیجه متناسب با دامنه جهت تحریک می‌باشد. اگر $\omega = \omega_s$ ، سیستم در جهت تشخیص، تشدید می‌شود و یک دامنه تشخیص بالا قابل انتظار است و نیز اگر $\omega = \omega_d$ ، این مسئله برای جهت تحریک صادق است و در پی آن مجدداً یک دامنه بالا برای جهت تشخیص در اثر افزایش نیروی کریولیس وجود دارد. بنابراین، وقتی $\omega_d \neq \omega_s$ باشد، پاسخ فرکانسی سیستم دو درجه آزادی دو قله تشدید دارد، یکی در ω_d ، و یکی دیگر در ω_s . وقتی $\omega_d = \omega_s$ شود، پاسخ فرکانسی سیستم دو درجه آزادی یک قله تشدید مرکب دارد، که به تولید یک دامنه پاسخ بسیار بزرگتر در نتیجه منطبق شدن دو پدیده باهم منجر می‌شود (تصویر (۱۷.۲)). البته برای افزایش پهنای باند و نیز افزایش حساسیت گاهاً مقدار ناچیزی عدم تطابق بین فرکانس های تحریک و تشخیص در نظر می‌گیرند.



تصویر ۱۷.۲: پاسخ کریولیس سیستم دو درجه آزادی با تغییر عدم انطباق سختی مدهای تشخیص و تحریک $\omega_d \neq \omega_s$ و $\omega_d = \omega_x$. بالاترین پاسخ در حالت تطبیق کامل مدهای تحریک و تشخیص می‌باشد و با افزایش ناتطبیقی، دامنه کاهش می‌یابد.

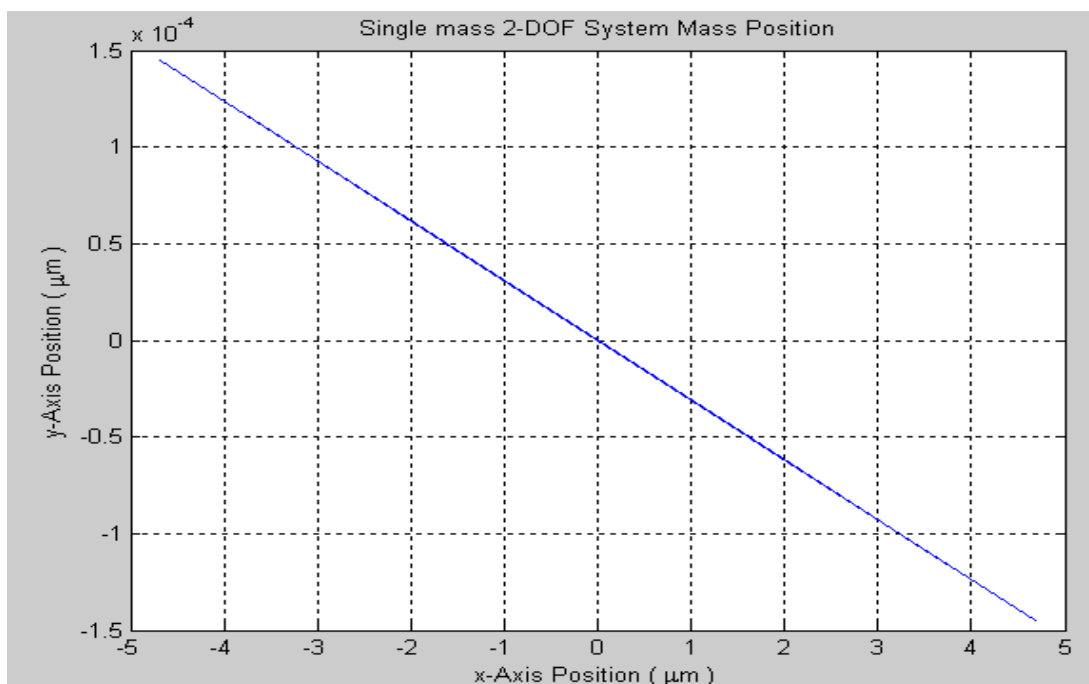
روابط فازی و مسیر حرکت جرم نمونه در ژيروسکوپ :

در یک میکرو ژيروسکوپ تک - جرمی ایده آل ، الگوی نوسانی جرم در صفحه زیر لایه بستگی به اختلاف فاز بین پاسخ های جهات تحریک و تشخیص دارد. پاسخ حالت ماندگار سیستم ساده شده دو درجه آزادی یک جفت پاسخ هارمونیک زیر است :

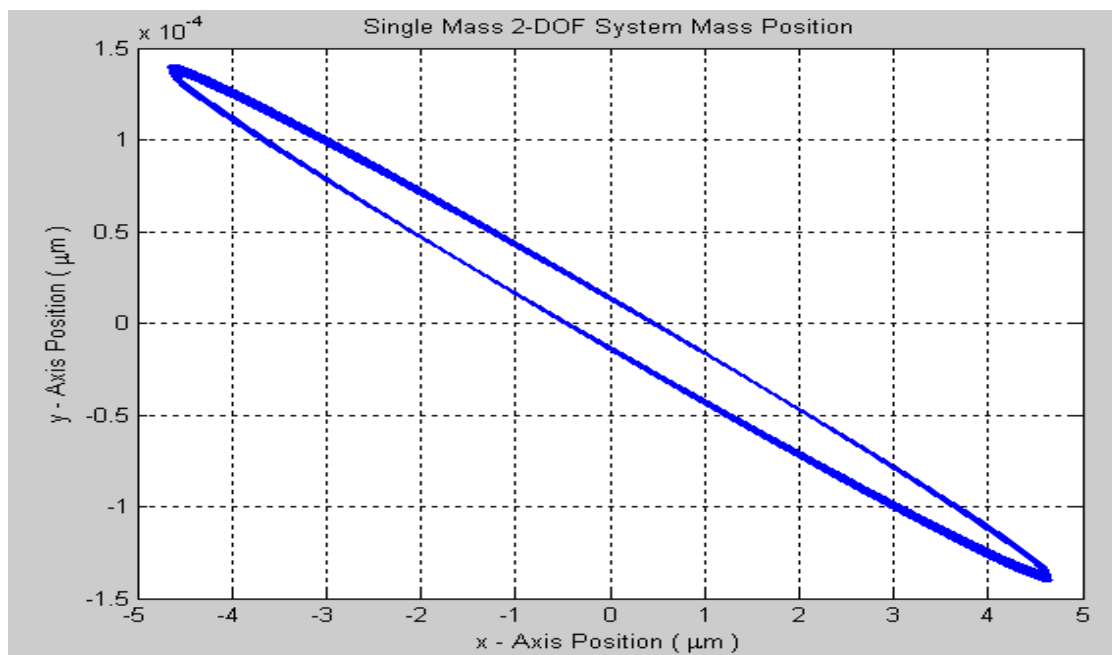
$$x(t) = X. \sin(\omega_d t + \phi_x) \quad (37.2)$$

$$y(t) = Y. \sin(\omega_d t + \phi_y) \quad (38.2)$$

که X_0 و Y_0 به ترتیب دامنه مد- تحریک و مد- تشخیص می باشند. و ϕ_x و ϕ_y فاز پاسخ تحریک و تشخیص می باشند. اگر $\phi_y - \phi_x = 180^\circ$ شود، مسیر حالت ماندگار جرم یک خط راست است (تصویر ۱۸.۲) که این رفتار صرفاً از یک ژيروسکوپ ایده آل انتظار می رود. شیب خط راست تنها به نیروی کریولیس بستگی داشته از این جهت به نرخ دوران ورودی وابسته است. چون Y_0 متناسب با نیروی تحریک کریولیس، F_c ، است که آن نیز متناسب با دامنه X_0 می باشد و در نتیجه شیب خط راست نوسانی وابسته به دامنه نوسان مد- تحریک نیست. اگر $\phi_y - \phi_x \neq 180^\circ$ ، مسیر حرکت جرم به بیضی تبدیل می شود و در نتیجه بیشترین مقدار برای دو مولفه جابجایی x و y همزمان اتفاق نمی افتد. تصویر ۱۹.۲ الگوی نوسان جرم را برای انحراف ۲ % ضریب سختی راستای تشخیص از راستای تحریک نشان می دهد . بنابراین مسیر نوسان از مسیر مستقیم منحرف می شود. دامنه جهت تشخیص بیضی بوجود آمده متناسب با نیروی کریولیس یا سرعت دوران ورودی به سیستم است.

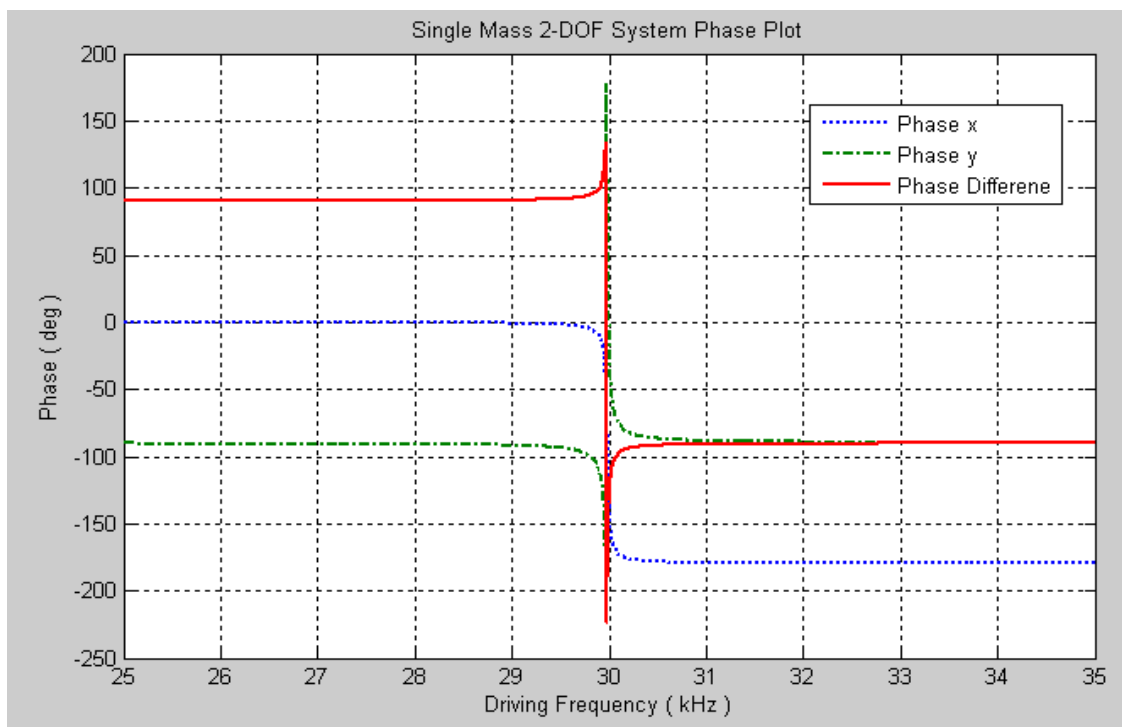


تصویر ۱۸.۲: الگوی نوسان وقتی $\omega_d = \omega_y$ باشد



تصویر ۱۹.۲: الگوی نوسان وقتی که $\omega_d = \omega_x$ و $\omega_d \neq \omega_y$

وقتی سیستم در جهت x با نیروی تحریک دامنه ثابت در فرکانس زاویه‌ای ω_d ، تحریک می‌شود، یک اختلاف فاز ϕ_x مابین جابجایی و نیروی تحریک ایجاد می‌شود. این فاز وابسته به موقعیت نسبی فرکانس تحریک و فرکانس قله تشدید دارد، یعنی مقدار $\omega_d - \omega_x$. اگر $\omega_d = \omega_x$ شود سیستم در جهت تحریک تشدید می‌شود، و اختلاف فاز، ϕ_x ، مابین منحنی جهت تحریک و نیروی تحریک 90° خواهد بود (تصویر ۲۰.۲).



تصویر ۲۰.۲: روابط فازی در جهات x و y ، باید توجه نمود که اختلاف فاز $\phi_y - \phi_x$ مستقل فرکانس تشدید راستای تحریک، ω_x ، است و این اختلاف فاز صرفاً توسط $\omega_d - \omega_y$ تعیین می‌گردد.

بطور مشابه، چون نیروی کریولیس F_c ، عامل تحریک در جهت تشخیص است، منحنی فاز در جهت تشخیص وابسته به موقعیت نسبی فرکانس تحریک و فرکانس قله تشدید جهت تشخیص دارد، یعنی مقدار $\omega_d - \omega_y$.

اگر $\omega_d = \omega_y$ ، سیستم در جهت تشخیص تشدید می‌شود، و اختلاف فاز، ϕ_y ، مابین منحنی جهت تشخیص و نیروی کریولیس 90° خواهد بود. همچنین باید توجه نمود که نیروی کریولیس F_c ، متناسب با سرعت جهت تحریک \dot{x} ، بوده همواره با \dot{x} همفاز است. بنابراین، F_c ، همیشه 90° ، با جابجایی جهت تحریک x ، بدن توجه به فرکانس تحریک اختلاف فاز دارد.

در نتیجه، اختلاف فاز مابین پاسخ های تحریک و تشخیص $(\phi_y - \phi_x)$ مستقل از موقعیت فرکانس تحریک نسبت به ω_x می باشد. به عبارت دیگر، مسیر حرکت جرم مستقل از مقدار $\omega_d - \omega_x$ می باشد. تنها رابطه فرکانسی تعیین کننده مسیر حرکت عبارت $\omega_d - \omega_y$ است. اگر $\omega_d = \omega_y$ باشد آنگاه اختلاف فاز تحریک و تشدید، $(\phi_y - \phi_x) = 180^\circ$ ، خواهد بود چون 90° اختلاف فاز مابین F_c و $x(t)$ وجود دارد و 90° اختلاف فاز به علت تشدید مد- تشخیص با نیروی تحریک کریولیس. پس وقتی سیستم در فرکانس طبیعی مد- تشخیص تحریک می شود مسیر حرکت به شکل خط راست است. وقتی فرکانس تحریک ω_d از مقدار ω_y دور می شود، مسیر به شکل بیضی در می آید.

۴-۳- ساختار مکانیکی ژيروسکوپ MEMS

در این قسمت اجزاء مکانیکی اساسی در طراحی مکانیکی ژيروسکوپ ارتعاشی بر پایه MEMS شرح داده می شود. با بحث بر روی طراحی اولیه سیستم ارتعاشی، دینامیک سیستم درک می شود. تحلیل سیستم های منعطف مختلف با بحث بر روی انیزوالاستیسیته و خطای مربعی در نتیجه عیوب مکانیکی ادامه داده می شود.

در نهایت مسئله میرایی بررسی شده، خواص مهم مکانیکی سلیکون بیان می شود و طراحی مکانیکی برای دستیابی به اجزاء تشخیص مقاوم بررسی می شود.

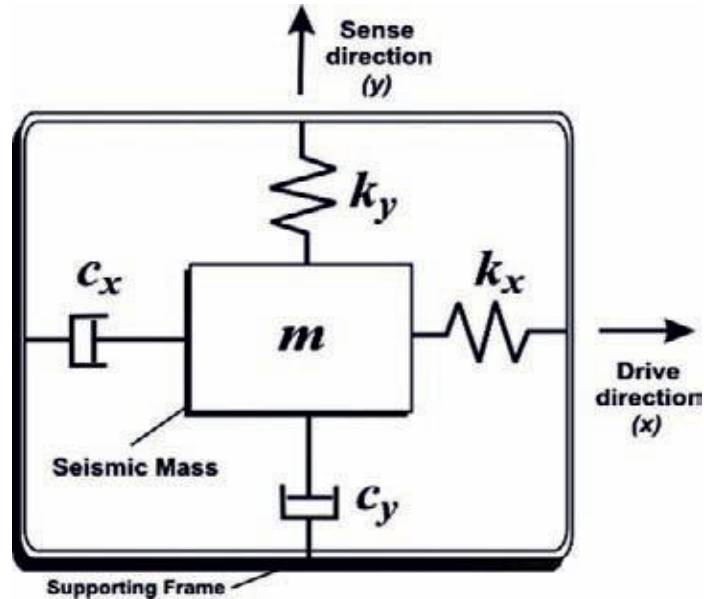
۴-۳-۱- طرح های ساختار مکانیکی میکرو ژيروسکوپ

طرح ساختارهای مکانیکی فراوانی برای ژيروسکوپ MEMS در مقالات مختلف ارائه شده است هدف مشترک تمام ساختارها دستیابی به نوسانگر تحریکی است که مومنتم ثابت و پایداری تولید کند و نیز دستیابی به شتاب سنج مد- تشخیص که، نیروی کریولیس را اندازه گیری کند.

بسیاری از ژيروسکوپ های میکرو از نوسانگرهای تحریک و شتاب سنج های تشخیص بدون جرم و یا مرکب از جرمهای به حالت تعلیق در آمده بوسیله تیرهای انعطاف پذیر بر روی زیر لایه تشکیل شده است. نیروی کریولیس ایجاد شده روی جرم در اثر ارتعاشات مد- تحریک و سرعت زاویه ای ورودی، در یک مد متعامد نسبت به مد- تحریک به مد- تشخیص منتقل می شود. بنابراین حداقل یک جرم برای هر دو مد بصورت مشترک مورد نیاز می باشد.

هدف اولیه و اساسی از تشکیل ساختار و سازه مکانیکی کوپل کردن سیستم های دینامیکی تحریک و تشخیص جهت ایجاد درجات آزادی لازم برای جرمها است. معمولاً هر دو سیستم (مد) دینامیکی تحریک و

تشخیص از نوسانگر های یک درجه آزادی تشکیل می‌شوند. بنابراین در کل ژيروسکوپ با دو درجه آزادی مدل می‌شود که مدهای دینامیکی مذکور توسط اثر کریولیس کوپل می‌شوند (تصویر 21.2).



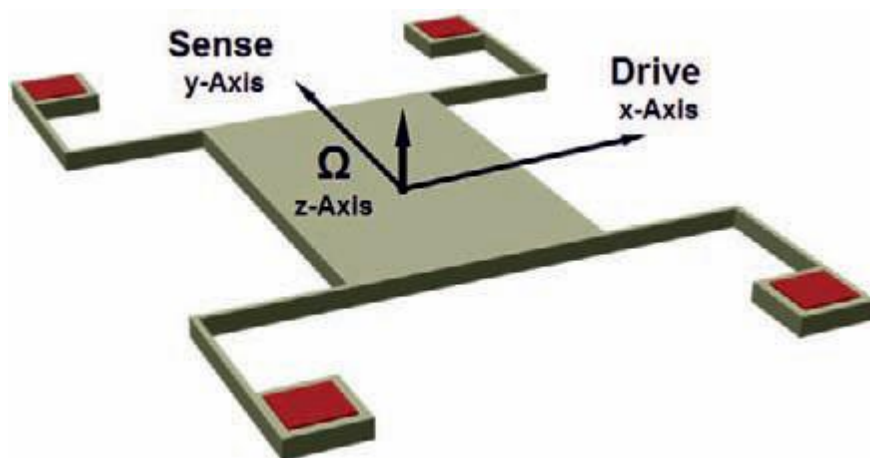
تصویر ۲۱.۲: جرم نمونه، که بطور آزادانه در جهات تحریک و تشخیص نوسان می‌کند و ژيروسکوپ دو درجه آزادی را تشکیل می‌دهد

هر دو مد- تحریک و تشخیص می‌توانند هم بر اساس حرکت خطی و حرکت پیچشی باشند. در مورد ژيروسکوپ ارتعاشی خطی، بقاء مومنتم خطی موجب انتقال انرژی از محور تحریک به محور تشخیص است، در حالی که در ژيروسکوپ پیچشی انتقال انرژی حاصل بقاء مومنتم زاویه‌ای خواهد بود. در ادامه شمای کلی از اصول طراحی هر دو نوع ژيروسکوپ ارائه خواهد شد.

سیستم‌های ارتعاشی انتقالی:

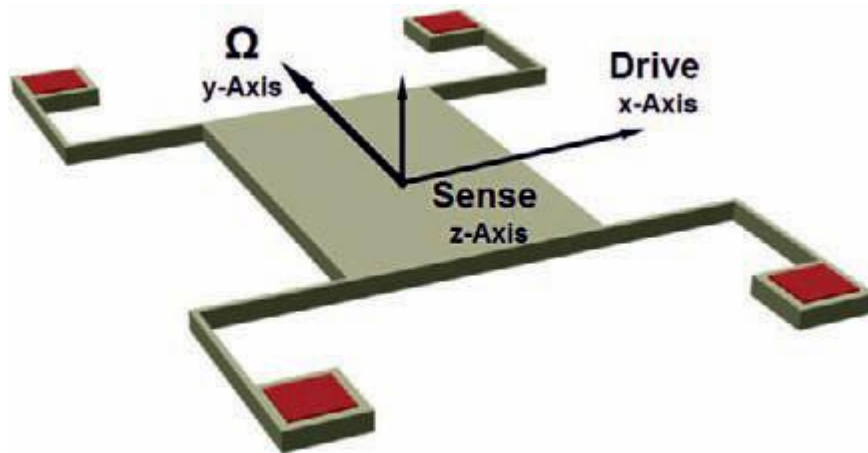
ژيروسکوپ ارتعاشی میکرو با سیستم خطی یا انتقالی بر اساس بر پاداشتن نوسان تحریک خطی و آشکارسازی پاسخ مد- تشخیص به نیروی کریولیس سینوسی در حضور سرعت زاویه‌ای ورودی می‌باشد. چون نیروی کریولیس القاء شده در تعامد با ارتعاشات مد- تحریک است، لازم است که جرم نمونه ژيروسکوپ بطور آزاد در دو جهت متعامد خطی نوسان کند. و نیز مطلوب است نوسان سایر مود های ارتعاشی محدود گردد. طراحی سیستم تعلیق جهت دستیابی به این اهداف بسیار مهم و حیاتی است.

محورهای تحریک و تشخیص اساساً از روی محور سرعت زاویه‌ای دلخواه تعیین می‌گردد. برای مثال در یک ژيروسکوپ محور- Z (تصویر ۲۲.۲) جرم نمونه باید برای ارتعاش در دو جهت متعامد درون صفحه ای آزاد باشد. جهت تحریک در امتداد محور- x و جهت تشخیص در امتداد محور- y است. جرم نمونه که تولید نیروی کوپلینگ کریولیس می‌کند مجاز است تا در طول هر دو محور نوسان کرده و سیستم دو درجه آزادی تشکیل دهد.



تصویر ۲۲.۲: ژيروسکوپ محور- Z ، جهت تحریک در امتداد محور- x و جهت تشخیص در امتداد محور- y

در یک ژيروسکوپ درون صفحه ای محور - y (تصویر ۲۳.۲)، جرم نمونه باید یک حرکت در امتداد محور- x در داخل صفحه یک حرکت در جهت محور- Z در خارج از صفحه داشته باشد. محورهای تحریک و تشخیص بسته به مکانیزم های تحریک و آشکار سازی می‌توانند با هم تعویض شوند. در یک ژيروسکوپ محور- x یکی از جهات تحریک یا تشخیص در امتداد محور- y قرار می‌گیرد و از اینرو در بسیاری از موارد یک ژيروسکوپ محور- y می‌تواند با دوران 90 درجه در صفحه به عنوان ژيروسکوپ محور- x مطرح گردد.



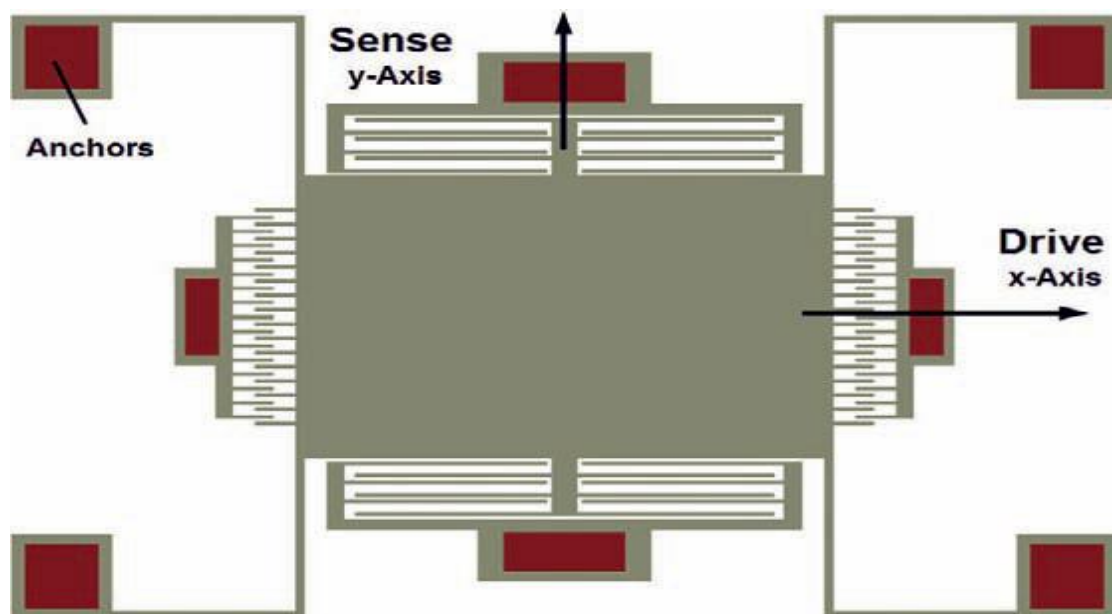
تصویر ۲۳.۲: ژيروسکوپ محور y ، جرم نمونه باید یک حرکت در امتداد محور x در داخل صفحه یک حرکت در جهت محور z در خارج از صفحه داشته باشد

سیستم‌های تعلیق خطی :

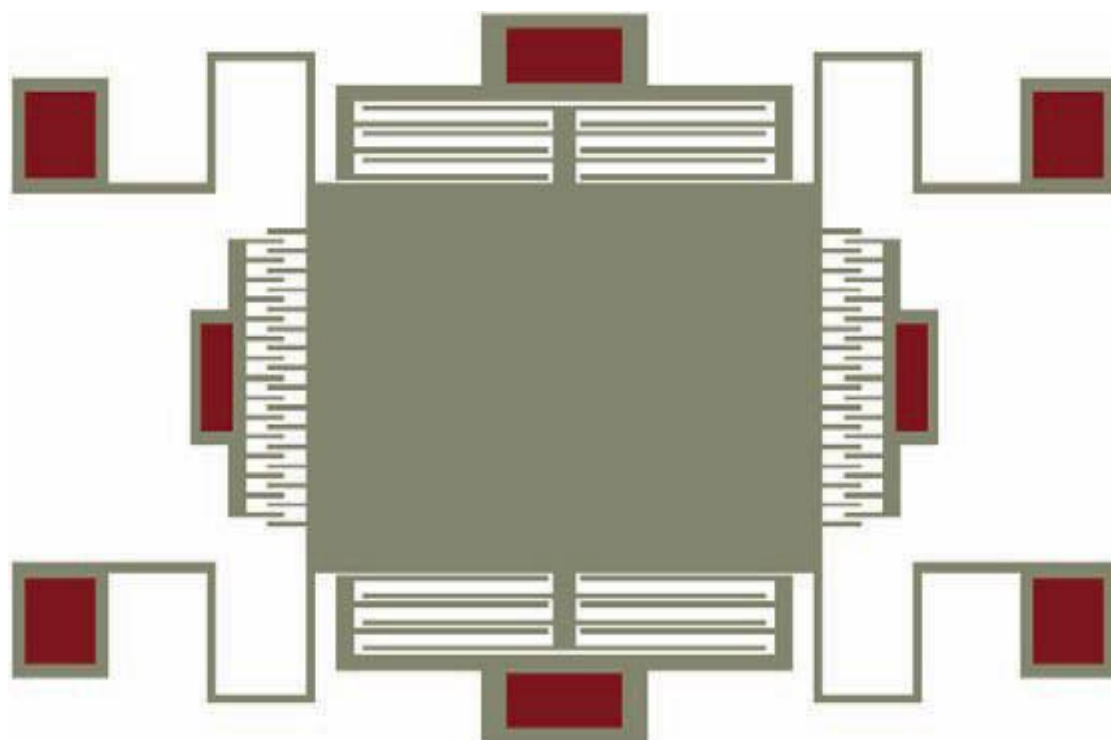
سیستم‌های منعطف که جرم را بر روی زیر لایه بصورت معلق نگه می دارد شامل تیرهای نازک قابل انعطاف است که از همان جنس سازه مشابه جرم نمونه تشکیل یافته است. تیرها به گونه ای جهت دهی شده‌اند که از جهات حرکتی تحریک و تشخیص تبعیت کند. ساختارهای تعلیق معمول برای استفاده در ژيروسکوپ‌های $MEMS$ محور z شامل مدل‌های بازوخرچنگی (*crab-leg*) (تصویر (۲۴.۲))، شبه مار (*serpentine*) (تصویر (۲۵.۲))، سنجاق سری (*hairpin*) (تصویر (۲۶.۲))، نوع H ($H-type$) (تصویر (۲۷.۲))، تیر U ($U-beam$) (تصاویر (۲۹.۲) و (۳۱.۲)).

این سیستم‌های تعلیق بصورت گسترده برای هر دو ساختار ژيروسکوپ محور z با تحریک و تشخیص درون صفحه ای و ژيروسکوپ محور x/y با یک مود درون صفحه ای و یک مد خارج از صفحه استفاده می‌شوند. ژيروسکوپ‌هایی با یک مد خارج از صفحه معمولاً جهت ایجاد تغییر شکل‌های خارج از صفحه در تیرها با لایه‌های ساختاری نازکتر نسبت به ژيروسکوپ‌های با مدهای درون صفحه ای استفاده می‌شود، در حالیکه در ژيروسکوپ‌های درون صفحه ای به منظور ممانعت از حرکات خارج از صفحه از تیرهایی با لایه‌های ضخیم تر استفاده می‌شود.

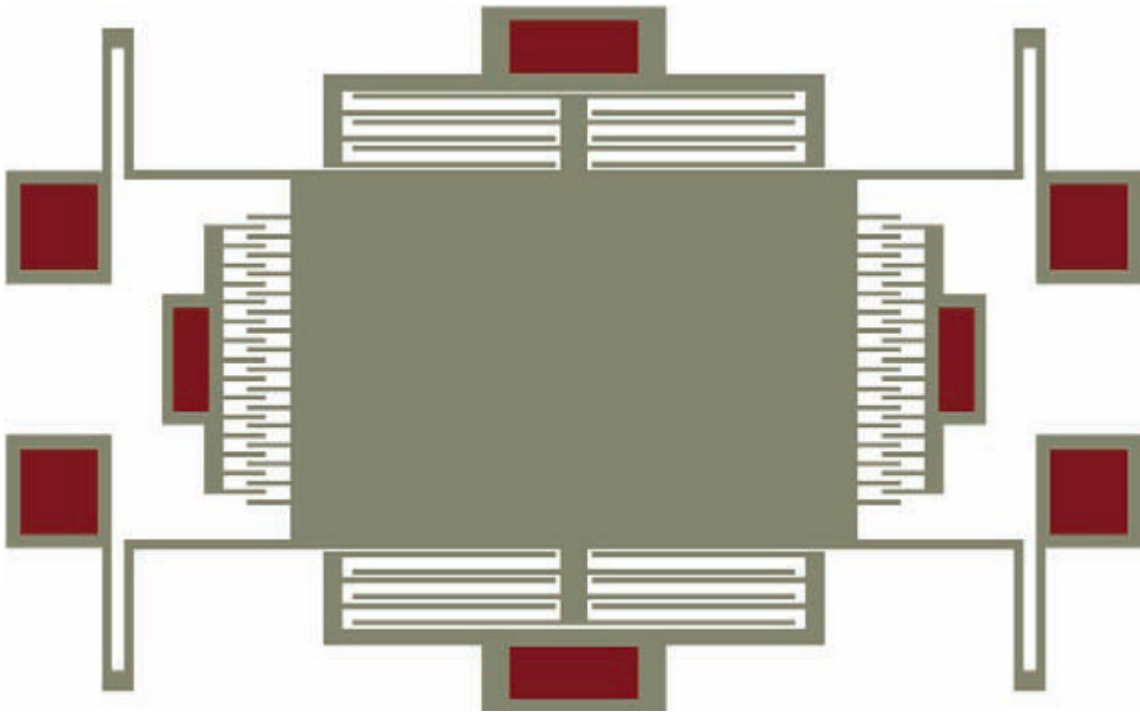
مدل‌های تعلیق پاخرچنگی (*crab-leg*) و نوع H ($H-type$) با ساختار متقارن بهتر نسبت به مدهای تحریک و تشخیص شناخته شده هستند که به آسانی مدهای تحریک و تشخیص را نزدیک هم قرار می‌دهد.



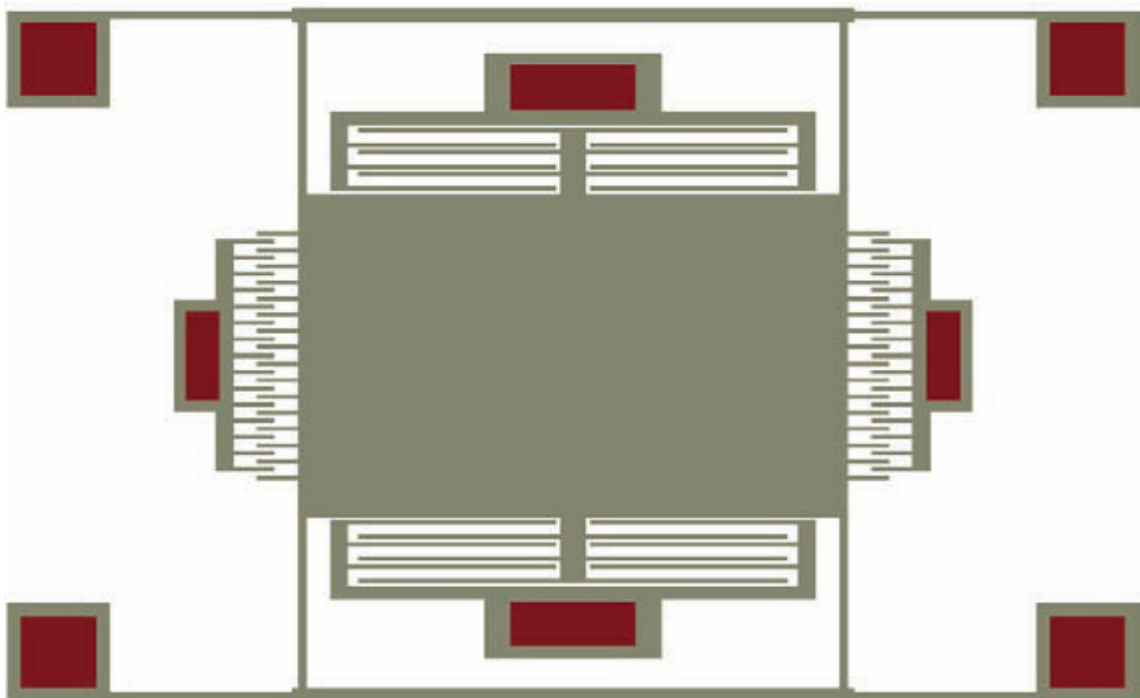
تصویر ۲۴.۲: شامل مدل‌های بازو خرچنگی (*crab - leg*) [۱]



تصویر ۲۵.۲: شبه مار (*serpentine*) [۱]



تصویر ۲۶.۲: سنجاق سری (*hairpin*) [۱]

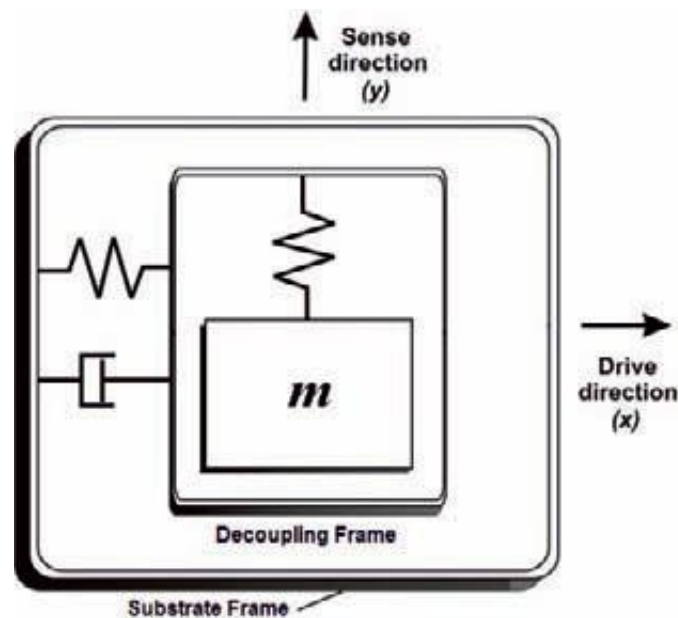


تصویر ۲۷.۲: نوع - H [۱]

در سیستم‌های تعلیق بازوخرچنگی (*crab - leg*)، شبه مار (*serpentine*) و سنجاق سری (*hairpin*) حرکات مد- تحریک باعث تغییر شکل تیرهای مد- تشخیص نیز می‌گردد، که در اثر این تغییر شکل اغلب انرژی انتقال یافته به مد- تشخیص نامطلوب است. بنابراین سیستم‌های نوع- H و بویژه تیر- U (*U - beam*) با سازه های قابی دی کوپل کننده، مدهای دی کوپل شده ی بهتری تولید می‌کنند که بعداً در این مورد بحث خواهد شد.

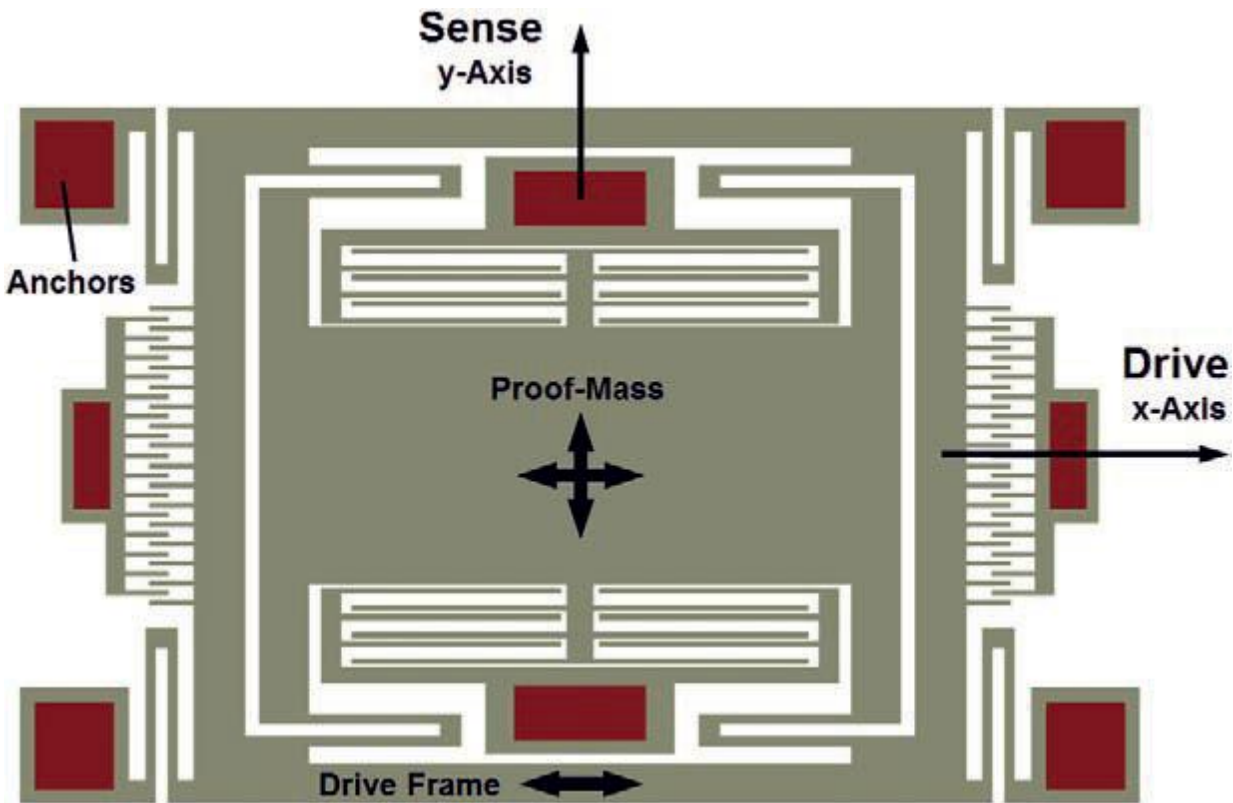
ساختارهای قابی :

سیستم‌های تعلیق مانند بازوخرچنگی (*crab - leg*)، شبه مار (*serpentine*) و سنجاق سری (*hairpin*) در دو جهت متعامد متبع هستند. تیرهای مشابه در اثر کوپلینگ نامطلوب بین دو مد- تحریک و تشخیص در هر دو مد تغییر شکل می‌یابند. چون دامنه مد- تحریک از مرتبه اندازه بزرگتری نسبت مد- تشخیص است، اغلب ضروریست تا حرکات آن از حرکات مد- تشخیص ایزوله گردد. همچنین مطلوب است تا جهات تغییر شکل الکترودهای تحریک و تشخیص محدود گردد. چون الکترودهای تحریک و تشخیص باید تنها در جهات نظیرشان تغییر شکل یابند. این کار دقت و پایداری مکانیزم های عملگری و آشکار سازی الکترودها را افزایش می‌دهد.



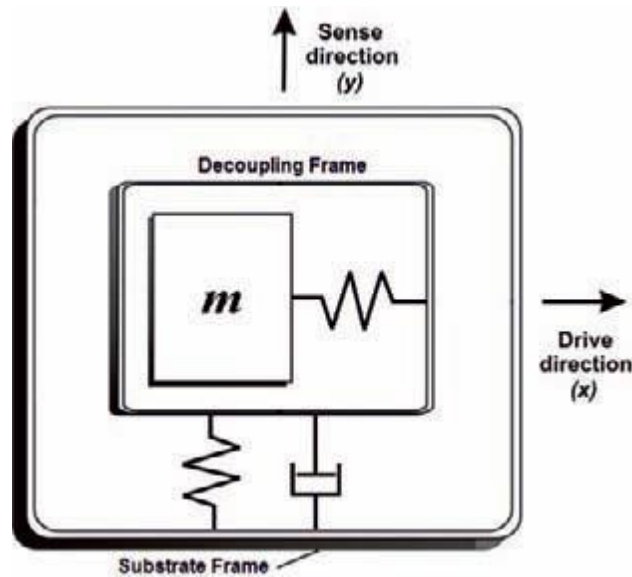
تصویر ۲۸.۲: مدل فشرده سیستم اجرایی قاب تحریک با تیر- U

بمنظور دی کوپل کردن حرکات تحریک و تشخیص مرسوم است از ساختارهای قابی استفاده شود. در طراحی ساختارهای قابی دو روش اصلی وجود دارد ۱- طراحی بر پایه قاب تحریک (تصویر 29.2) ۲- طراحی بر پایه قاب تشخیص (تصویر 31.2). در پیاده سازی سیستم بر پایه قاب تحریک جرم نمونه داخل یک قابی قرار می گیرد که تنها مقید به حرکت در جهت تحریک است. با این روش مطمئن می شویم که حرکت تحریک به خوبی توسط محور تحریک تنظیم شده و مولفه ی حقیقی حرکت در محور آشکار سازی مد- تشخیص کمینه می گردد و همچنین پایداری جانبی بهبود یافته نیروهای مزاحم جهت تشخیص در محرک های تحریک کمینه می گردد.

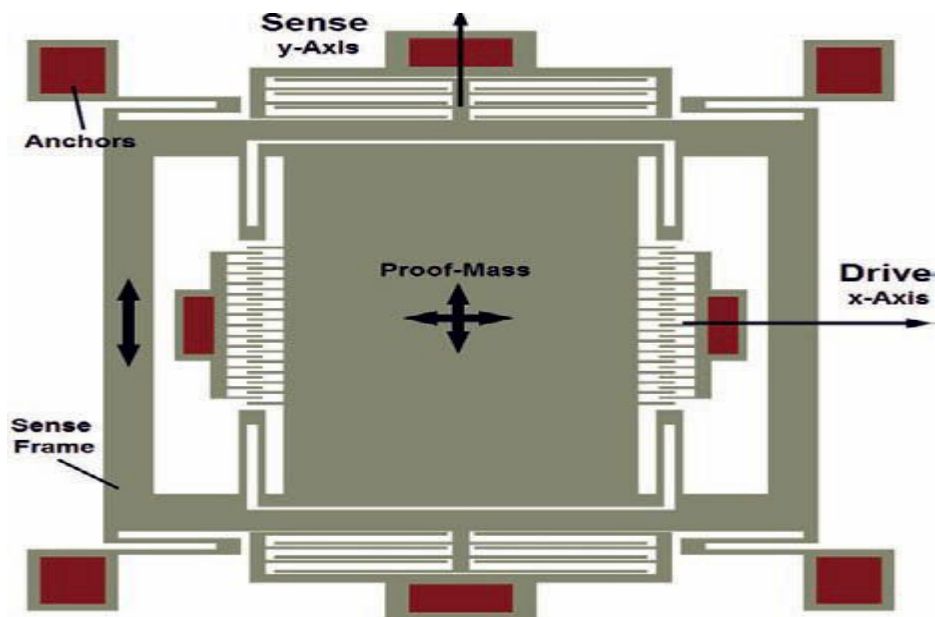


تصویر ۲۹.۲: مدل تعلیق تیر-U با سیستم اجرایی قاب تحریک، مولفه حقیقی حرکت تحریک در امتداد محور آشکار ساز تشخیص را کمینه می کند. [۲۳]

در طراحی بر پایه قاب تشخیص جرم نمونه درون قابی قرار می گیرد که تنها مقید به حرکت در جهت تشخیص است. الکترودهای تشخیص به قاب متصل شده واز حرکت نسبی الکترودها و از حرکت نسبی آنها در راستای جهت تشخیص ممانعت می شود. در این روش تغییرات ظرفیت خازنی نامطلوب در الکترودهای تشخیص در اثر حرکت مد- تحریک ، کمینه می گردد.



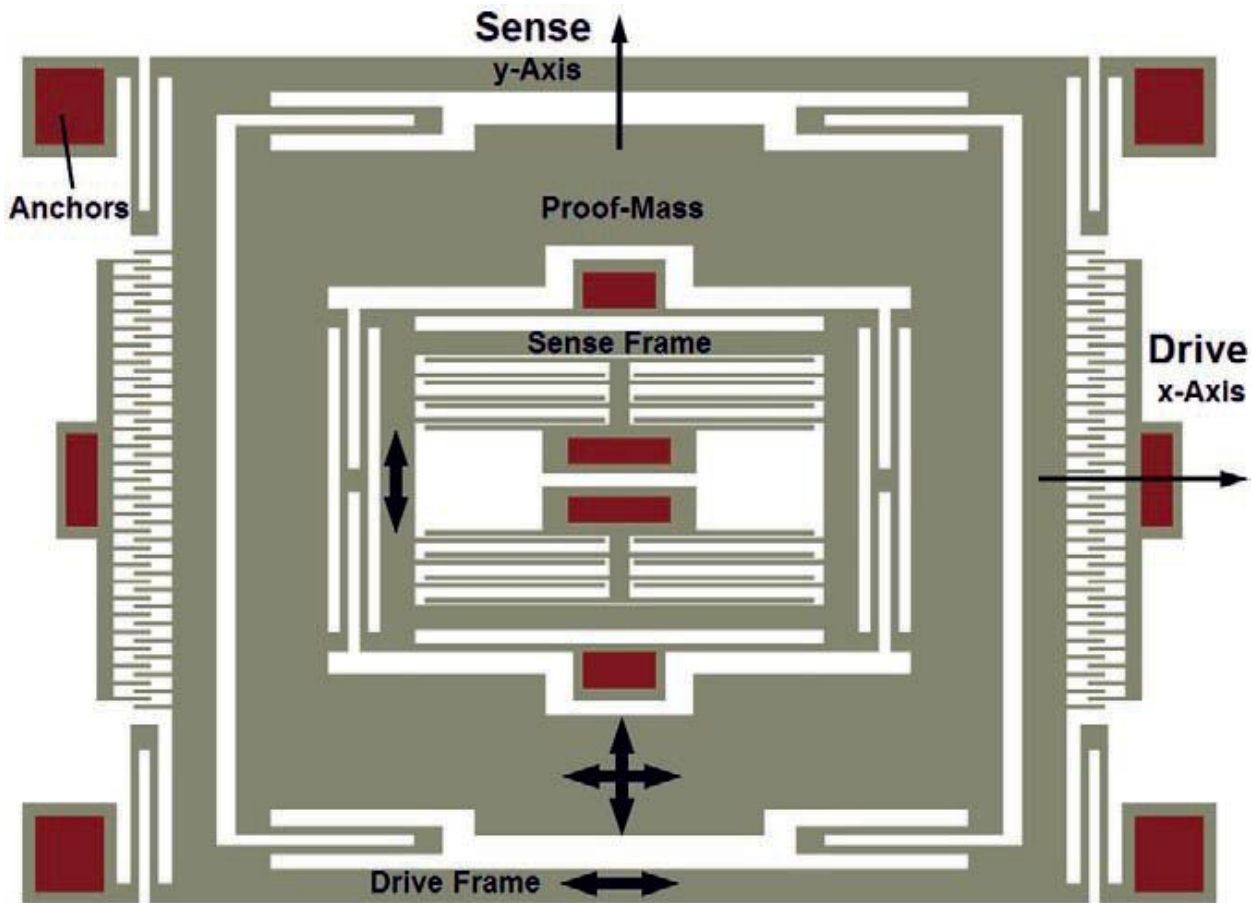
تصویر ۳۰.۲: مدل فشرده سیستم اجرایی قاب تشخیص با تیر- U



تصویر ۳۱.۲: مدل تعلیق تیر- U با سیستم اجرایی قاب تشخیص تغییرات ظرفیت خازنی نامطلوب در الکترودهای تشخیص در اثر حرکت مد- تحریک ، کمینه می‌گردد

سازه های قابی چند جانبه و پیشرفته بسیاری وجود دارند که استفاده از مزایای هر دو نوع پیاده سازی قابی را ممکن می‌سازد. برای مثال، ژيروسکوپ محور z در [۱۲] توسط شرکت بوش به این نحو طراحی شده است که

قاب تحریک در اطراف جرم نمونه تنها در جهت تحریک نوسان می‌کند، و یک قاب تشخیص درون جرم نمونه ثابت شده و در جهت تشخیص نوسان می‌کند (تصویر 32.2).

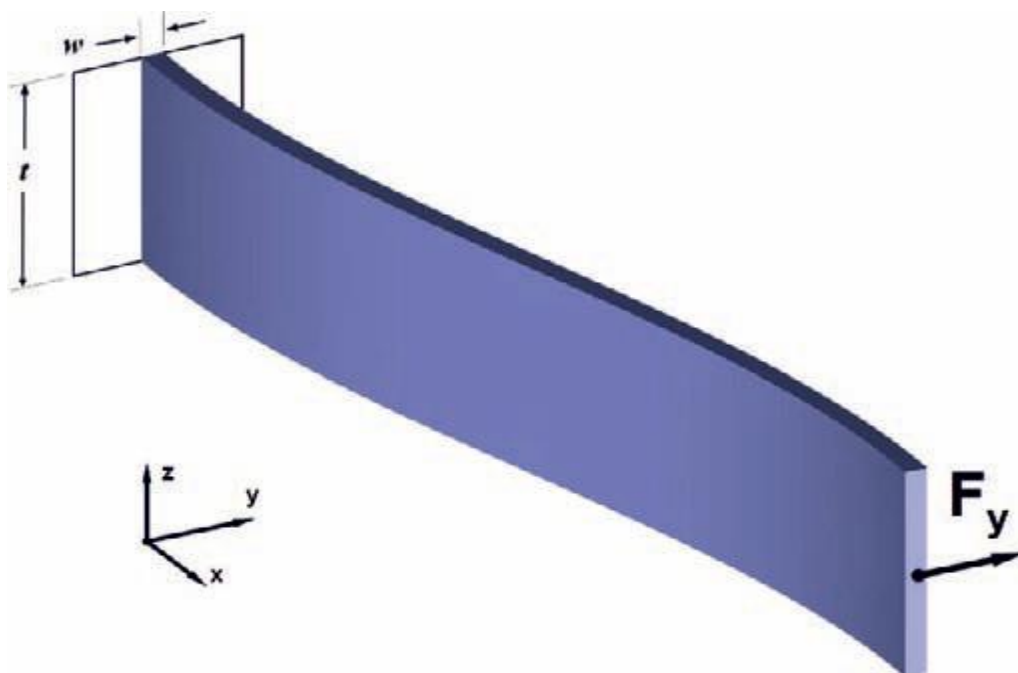


تصویر ۳۲.۲: یک نمونه از پیاده سازی قاب دو بل ، که مزایای قاب های تحریک و تشخیص را دارا می‌باشد [۳۳]

با این سازه قابی دو بل، نوسانات تحریک در محور تحریک خیلی خوب تنظیم تنظیم شده است، مولفه‌های مزاحم نیروهای تحریک در جهت تشخیص حذف می‌شود و حرکت الکترودهای تشخیص در جهت تحریک از بین می‌رود.

۲-۳-۲- اجزاء انعطاف پذیر خطی

در ژيروسکوپ‌های میکروماشین کاری شده خطی، سیستم‌های تعلیق معمولاً برای حرکت در راستای مشخص مطلوب طراحی می‌شوند، و برای جهات دیگر خمش ناپذیر می‌مانند. اکثر سیستم‌های تعلیق از تیرهای نازک به عنوان اجزاء منعطف اساسی استفاده می‌شود. مطابق تصویر (۳۳.۲) بعد باریک تیر در راستای عمود بر جهت حرکت تنظیم می‌شود.



تصویر ۳۳.۲: تیر یک سرگیردار تحت تغییر شکل خطی

در مدهای انتقالی خالص، شرایط مرزی تیرهای اتصال دهنده ی اجزای ژيروسکوپ معمولاً یک سرگیردار فرض می‌شود (تصویر ۳۳.۲) که انتهای متحرک تیر بطور موازی با انتهای ثابت باقی می‌ماند. تعداد زیادی از سیستمهای تعلیق کامل در ژيروسکوپها می‌تواند بصورت ترکیبی از تیرهای یک سرگیردار مدل می‌شود.

اگر طول تیر را در امتداد محور - x ، L ، عرض آنرا در امتداد محور - y ، w ، و ضخامت آن در امتداد محور - z ، t ، تعریف کنیم، ممان اینرسی سطحی تیر در راستای y و z بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$I_y = \frac{1}{12} t w^3 \quad (39.2)$$

$$I_z = \frac{1}{12} w t^3 \quad (40.2)$$

برای یک تیر یک سرگیردار تنها، سختی انتقالی برای حرکت در جهات متعامد بر محور تیر با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۰۶].

$$k_{y,z} = \frac{1}{2} \frac{3EI_{y,z}}{\left(\frac{L}{2}\right)^3} \quad (41.2)$$

که E مدول الاستیسیته تیر است. بنابراین مقادیر سختی تیر یک سرگیردار در راستای سه محور اصلی بصورت زیر می‌شود:

$$k_x = E \frac{wt}{L} \quad (42.2)$$

$$k_y = E \frac{tw^3}{L^3} \quad (43.2)$$

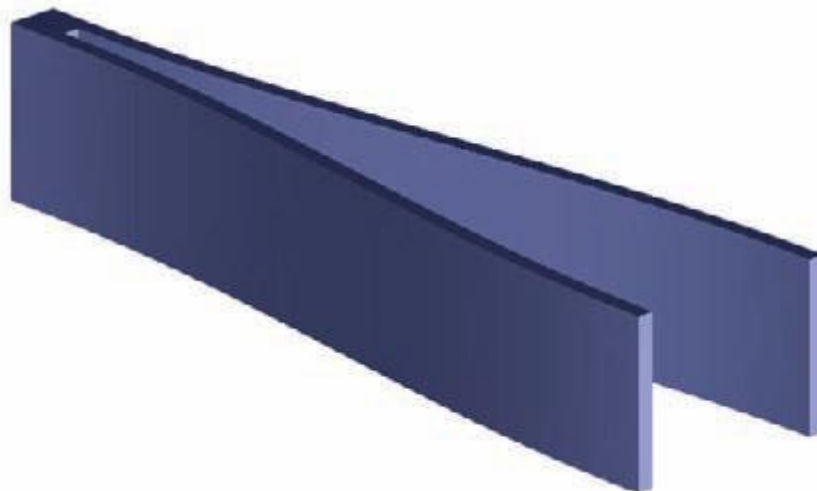
$$k_z = E \frac{wt^3}{L^3} \quad (44.2)$$

باید به نسبت مقادیر سختی در طول محوره‌های z و y توجه کرد که: $\frac{k_z}{k_y} = \left(\frac{t}{w}\right)^2$. بنابراین، ضخامت بزرگ عامل کلیدی در جلوگیری از تغییر شکل خارج از صفحه می‌باشد. نسبت سختی محوری به سختی محور- y برابر است با $\frac{k_x}{k_y} = \left(\frac{L}{w}\right)^2$. این نسبت می‌تواند کاملاً وابستگی شدیدی به طراحی تیر، بمنظور تولید حرکت متعامد در سیستم تعلیق ایده آل داشته باشد.

اگر چه عبارات تحلیلی می‌تواند در طراحی عملی اجزاء تیر مورد استفاده قرار گیرد با اینحال شبیه سازی های تحلیل اجزاء محدود (FEA) در تعیین خصوصیات انعطافی در نواحی غیر خطی حوزه ی تعریف مسئله ضروری است. برای مثال برای یک تیر یک سرگیردار با ابعاد $L = 500 \mu m$ ، $w = 10 \mu m$ و $t = 100 \mu m$ و با فرض مدول الاستیسیته $E = 130 GPa$ ، نتایج اجزاء محدود نشان می‌دهد که برای $1 \mu m$ تغییر شکل خالص محور- y ، نیروی عکس العمل محور- y ، $142 \mu N$ می‌شود در نتیجه $k_y = 142 N/m$ خواهد بود. در حالیکه

برای $10\ \mu m$ تغییر شکل نیروی عکس العمل به مقدار $1980\ \mu N$ افزایش پیدا می کند بنابراین $k_y = 198\ N/m$ می شود. این موضوع خواص غیر خطی تیر با افزایش تغییر شکل را نشان می دهد.

نتایج تحلیل اجزاء محدود (FEA) بر روی تیر یک سرگیردار محدودیت های اصلی این نوع سیستم تعلیق را نشان می دهد. نیروی عکس العمل محور- x برای انحراف $1\ \mu m$ محور- y $410\ \mu N$ می باشد. برای $10\ \mu m$ تغییر شکل، نیروی عکس العمل محور- x بیش از $40400\ \mu N$ افزایش می یابد. این نیروی فوق العاده بزرگ بیانگر این حقیقت است که تیر همزمان با افزایش نیروی جانبی، تحت بارگذاری محوری قرار می گیرد. بنابراین تیرهای یک سرگیردار تنها نباید برای اجزاء منعطف با تغییر شکل بزرگ همچون سیستم تعلیق راستای تحریک مورد استفاده قرار گیرد.



تصویر ۳۴.۲: سیستم تعلیق تیر چند لا (U- شکل) شامل دو تیر یک سر گیردار بطور سری که محدودیت بارگذاری محوری و غیر خطی تیر یک سر گیر دار تنها را حذف می کند.

سیستم تعلیق تیر چند لا (U - شکل) با اتصال دو تیر یک سرگیردار در حالت سری محدودیت بارگذاری محوری و غیر خطی تیر یک سر گیر دار تنها را حذف می کند (تصویر ۳۴.۲). دو نقطه اتصال در ناحیه تعلیق در یک طرف تیر قرار دارد و انحراف جانبی منجر به بارگذاری محوری نمی گردد. سختی معادل تیر دولا به صورت سری بصورت زیر محاسبه می شود :

$$\frac{1}{k_{folded}} = \frac{1}{k_y} + \frac{1}{k_y} \quad (45.2)$$

$$k_{folded} = E \frac{tw^3}{2L^3} \quad (46.2)$$

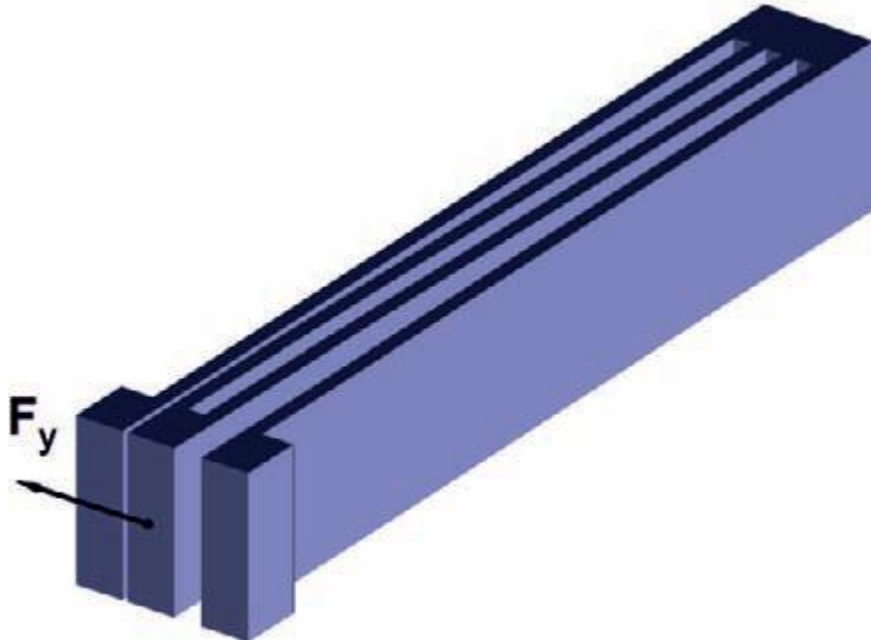
یکی از عیوب تیر چندلا کاهش سختی محوری می باشد. فاصله بین دو تیر بازوی گشتاور تولید کرده و تحت بار محوری باعث خمش تیر می گردد (تصویر ۳۵.۲). این موضوع در موقع طراحی سیستم استوار حرکت محوری یک ضعف محسوب می شود.



تصویر ۳۵.۲: تیر دولای تحت بارگذاری های محوری و جانبی، خمش تیر در اثر نیروی محوری نامطلوب است

مشکل خمش تیر دولای را می توان با ایجاد تقارن محوری برطرف کرد. تیر تعلیق دولای- دوتایی شامل دوتیر دولای است که بطور متقارن به یکدیگر متصل شده است. چون دو تیر دولای را می توان بصورت موازی به یکدیگر متصل کرد سختی معادل تیر تعلیق دولای دوتایی بصورت زیر بدست می آید:

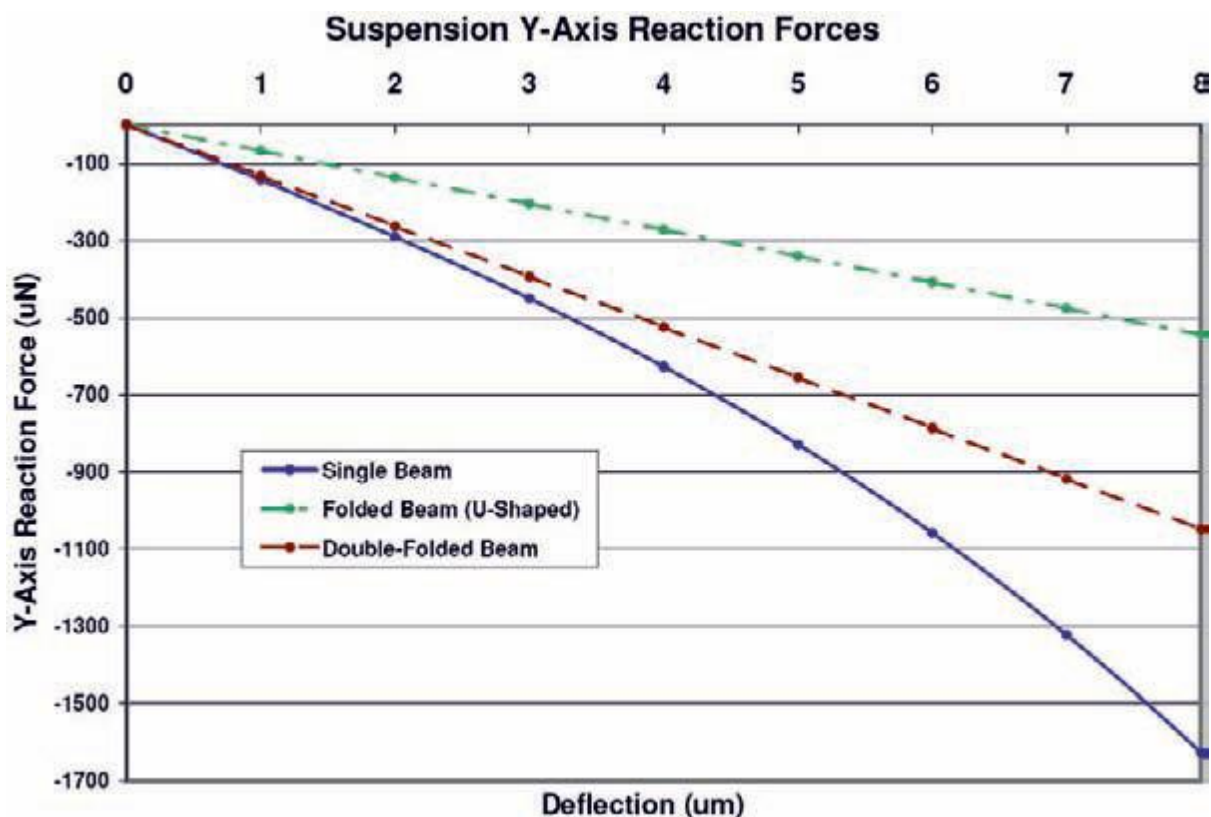
$$k_{double-folded} = 2k_{folded} = E \frac{tw^3}{L^3} \quad (47.2)$$



تصویر ۳۶.۲: تیر تعلیق دولا-دوتایی که شامل دو تیر دولا است که بطور متقارن و موازی به یکدیگر متصل شده است

خلاصه برای تغییر شکل های کوچک تیر دولا نصف سختی تیر یک سرگیردار را تولید می کند در حالی که تیر دولا-دوتایی همان سختی تیر یک سرگیردار را داراست. برای تغییر شکلهای بزرگتر در مقایسه با ابعاد تیر یک سرگیردار، همانطور که در تصویر ۳۷.۲ مشاهده می شود تیر غیر خطی می شود.

در سیستم های تعلیق کامل یک سری از اجزاء منعطف به جرم نمونه متصل می شوند. سختی کلی در جهتی معین به تقریب می تواند با مجموع تمام مقادیر سختی در آن جهت برابر باشد. اگرچه در این تقریب اثرپذیری جرم نمونه، سازه قابی، و اجزا انعطاف پذیر از سایر جهات ناچیز فرض شده است. در حقیقت این عوامل بشدت باعث کاهش سختی کلی سیستم می گردد. بنابراین تحلیل مودال اجزاء محدود (FEA) نرم افزاری برای تعیین دقیق و طراحی فرکانس های تشدید کاملاً ضروری می باشد.



تصویر ۲۷.۲: مقایسه نیروی عکس العمل محور y در تیرهای تنها، دولا و دولا-دوتایی [1]

۴-۲- میرایی

در یک سیستم نوسانی، اثر اتلاف انرژی با میرایی تعریف می‌شود. در سیستم‌های ارتعاشی میکروماشین کاری شده مانند ژيروسکوپ، مکانیزم‌های اتلاف زیادی باهم میرایی کلی را تشکیل می‌دهند. در ادامه یک بررسی از پدیده‌های میرایی شناخته شده همچون میرایی ویسکوز و میرایی ساختاری خواهیم داشت.

۴-۲-۱- میرایی ویسکوز

در حضور گاز در اطراف سازه ارتعاشی یک ژيروسکوپ، مکانیزم میرایی اصلی در سیستم دینامیکی ژيروسکوپ اثر ویسکوزیته گاز محبوس شده مابین سطوح جرم نمونه و سطوح ثابت می‌باشد. میرایی ساختاری مواد معمولاً از مرتبه اندازه پایین تر از میرایی ویسکوز می‌باشد مگر در شرایط خلاء زیاد.

میرایی ویسکوز حاکم بر سیستم دینامیکی ژيروسکوپ بوسیله اصطکاک درونی گاز مابین جرم نمونه، زیرلایه، شانه‌های تحریک و انگشتی‌های خازنی تشخیص، صورت می‌گیرد. این اثر میرایی ویسکوز در دو مدل عمومی: میرایی فیلم لغزشی و میرایی فیلم فشاری بررسی می‌شود.

میرایی فیلم لغزشی :

میرایی فیلم لغزشی، یا میرایی جانبی وقتی اتفاق می افتد که دو صفحه به سطح A ، با فاصله y_0 از یکدیگر جدا شوند و بطور موازی بر روی هم بلغزند (تصویر ۴۷.۴). در فشار های پایین و وقتی میانگین مسیر آزاد گاز، مشابه یک شکاف باشد. اثرات ترقیق گاز را می توان با کمیت ویسکوزیته موثر گاز μ_{eff} مدل کرد. با فرض گاز نیوتنی، ضریب میرایی جانبی به صورت عبارت زیر قابل تعریف است :

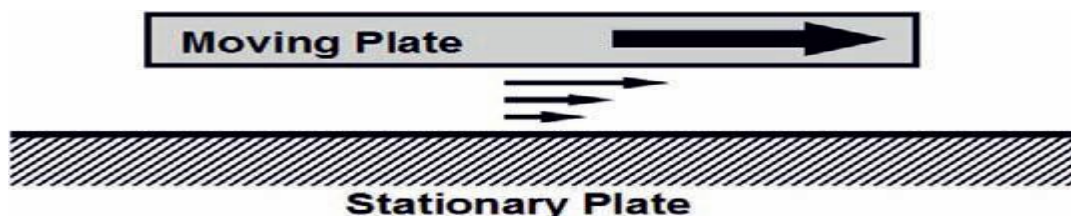
$$C_{slide} = \mu_{eff} \frac{A}{d} \quad (48.2)$$

که A سطح روی هم قرار گیری دو صفحه و d فاصله بین دو صفحه می باشد. تقریب ویسکوزیته موثر μ_{eff} در مرجع [۱۰۹] با رابطه زیر آمده است :

$$\mu_{eff} = \frac{\mu}{1 + 2K_n + 0.2K_n^{0.788} e^{-K_n/10}} \quad (49.2)$$

عدد نودسن K_n اندازه اثر ترقیق گاز است که تابعی از میانگین مسیر آزاد گاز λ و d :

$$K_n = \frac{\lambda}{d} \quad (50.2)$$



تصویر ۳۸.۲: میرایی فیلم لغزشی بین دو صفحه هنگام لغزش موازی دو صفحه بر روی هم

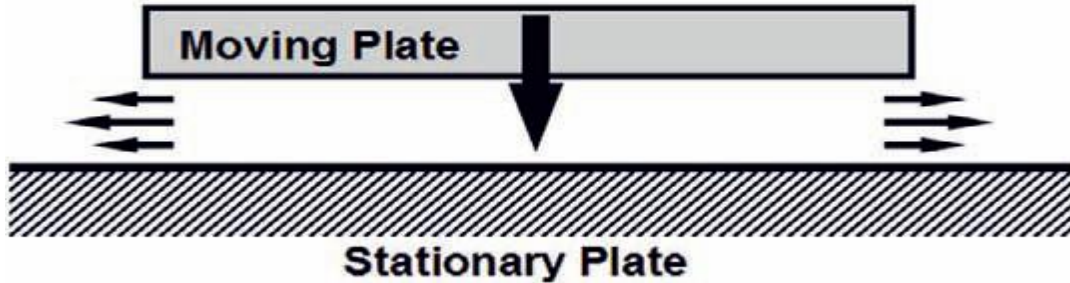
وابستگی به فشار در ویسکوزیته گاز از روی میانگین مسیر آزاد گاز بدست می آید و برای هوا از رابطه زیر قابل محاسبه می باشد.

$$P\lambda = 5.1 \times 10^{-5} \text{ Torr.m}$$

(۵۱.۲)

میرایی فیلم فشاری :

میرایی فیلم فشاری ، وقتی اتفاق می افتد که دو صفحه موازی به طرف هم حرکت کنند و فیلم سیال بین آنها فشرده شود. (تصویر ۳۹.۲). پدیده میرایی فیلم فشاری کاملاً پیچیده بوده و می توان نشان داد که هر دو اثر سختی و میرایی به تراکم پذیری سیال بستگی دارد.



تصویر ۳۹.۲ : میرایی فیلم فشاری بین دو صفحه که در هنگام حرکت نزدیکی دو صفحه ایجاد می شود.

برای مدل سازی اثر ترقیق گاز، ویسکوزیته موثر μ_{eff} در میرایی فیلم فشاری طبق [۲۵]، بصورت زیر تعریف می شود :

$$\mu_{eff} = \frac{\mu}{1 + 9.638 K_n^{1.159}} \quad (۵۲.۲)$$

حل معادله رینولدز خطی شده منجر به یک نیروی هم فاز و یک نیروی خارج از فاز با جابجایی می شود. نیروی هم فاز در اثر میرایی فیلم فشاری نیروی فنری است و نیروی خارج از فاز نیروی میرایی است. نیروی میرایی فیلم فشاری F_c و نیروی فنری F_k در مرجع [۱۱۱] با روابط زیر گزارش شده است :

$$\frac{F_c}{z} = \frac{64\sigma P_a A}{\pi^6 d} \sum_{m, n \text{ odd}} \frac{m^2 + c^2 n^2}{(mn)^2 \left[(m^2 + c^2 n^2)^2 + \sigma^2 / \pi^4 \right]} \quad (۵۳.۲)$$

$$\frac{F_k}{z} = \frac{64\sigma^2 P_a A}{\pi^8 d} \sum_{m, n \text{ odd}} \frac{1}{(mn)^2 \left[(m^2 + c^2 n^2)^2 + \sigma^2 / \pi^4 \right]} \quad (54.2)$$

که Z انحراف صفحه ، P_a فشار محیط ، m و n اعداد صحیح فرد ، $c = w/l$ و $A = wl$ برای صفحه به ضخامت w و طول l تعریف می‌شوند. عدد فشردگی σ تابعی از فرکانس ω است.

$$\sigma = \frac{12\mu_{eff} w^2}{P_a d^2} \omega \quad (55.2)$$

بحث های جزئی تر درباره میرایی فیلم لغزشی و فیلم فشاری در ساختارهای میکروماشین کاری شده با پدیده های پیچیده همچون اثرات غیر خطی، مدل گاز جنبشی، حرکت پخشی سیال با کاهش دامنه تند و شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی در مراجع [۲۳، ۲۵، ۲۷، ۲۸] آمده است.

۲-۴-۲- میرایی ساختاری ذاتی

اگرچه با حضور گاز در محیط اطراف ژيروسکوپ، میرایی ویسکوز مکانیزم میرایی غالب بشمار می رود اما میرایی کلی در سیستم ژيروسکوپ ترکیبی از چندین اثر میراکننده می‌باشد. وقتی سیستم ژيروسکوپ در خلاء بالا طراحی گردد سایر مولفه‌های میرایی غیر از ویسکوز عامل محدود کننده ضریب کیفیت Q خواهد بود.

تحت شرایط خلاء، میرایی ترموالاستیک یکی از اصلی ترین مکانیزم های میرایی خواهد بود. میرایی ترمو-الاستیک ، میرایی ذاتی ماده است و زمانی پدید می‌آید که در نتیجه تغییر شکل الاستیک، اتلاف انرژی حرارتی صورت گیرد. در یک تیر ارتعاشی، کرنش های کششی و فشاری عرضی جریان حرارتی بازگشت ناپذیر را موجب شده که می‌توان گفت معادل یک مکانیزم میرایی موثر عمل می‌کند و در نتیجه آن اتلاف انرژی ارتعاشی بوجود می‌آید [۱۰۳]. گزارش ها حاکی از آن است که میرایی ترموالاستیک ضریب کیفیت Q در ژيروسکوپ‌های بسته بندی شده بصورت خلاء را محدود به مقادیر ۱۰۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰۰ می‌کند.

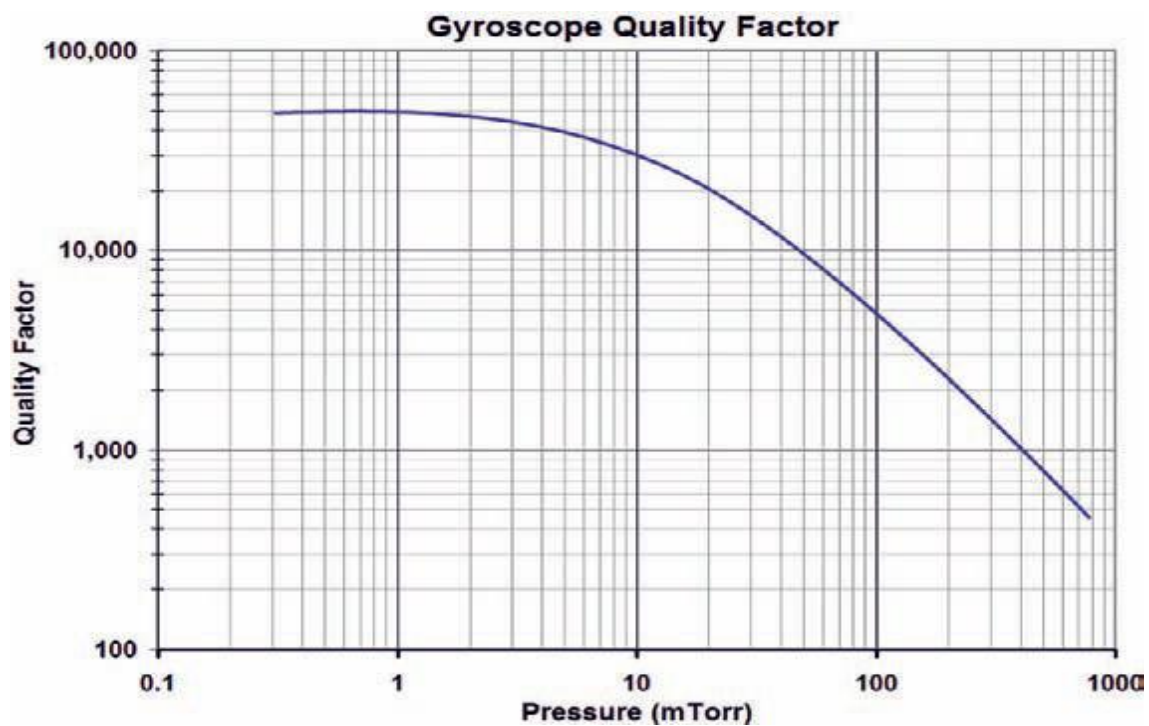
بسیاری از عوامل دیگر همچون اتلافات پایه میرایی کلی سیستم را در ژيروسکوپ ارتعاشی تشکیل می دهند. می‌توان ضریب کیفیت کلی سیستم را با ترکیب این اثرات میرایی بصورت زیر فرمول بندی کرد [۱۷]:

$$\frac{1}{Q_{total}} = \frac{1}{Q_{viscous}} + \frac{1}{Q_{TED}} + \frac{1}{Q_{anchor}} + \frac{1}{Q_{electronics}} + \frac{1}{Q_{other}} \quad (۶۵.۲)$$

که Q_{TED} ناشی از میرایی ترموالاستیک ، $Q_{electronics}$ ناشی از میرایی الکترونیکی که از مرتبه 10^{11} می باشد، Q_{other} باقیمانده میرایی را در برمی گیرد که در حدود ۲۵۰۰۰۰ برآورد می شود [۱۷]. Q_{anchor} ناشی از اتلافات پایه بوده که وابسته به نوع و ماده پایه می تواند به کوچکی ۱۰۰۰۰ باشد. سیستم های ناهم فاز که بطور محلی مانع تزریق ارتعاش به پایه می شوند Q_{anchor} بسیار بالایی دارند.

معمولاً برای سیستم های ژيروسکوپی پیچیده تعیین میرایی ویسکوز و سایر مولفه های میرایی ذاتی بسیار دشوار است. در این صورت مرسوم است تا ضریب Q کلی در مدهای تحریک و تشخیص بطور تجربی بوسیله فرکانس پاسخ یا آزمون حلقه پایین اندازه گیری شود.

منحنی ضریب Q در مقابل فشار مطابق تصویر ۴۰.۲ معمولاً راهنمایی جهت بدست آوردن فشار مورد نیاز بسته بندی ژيروسکوپ استفاده می شود. در فشار های به اندازه کافی پایین معمولاً ضرایب کیفیت شروع به همگرایی محدود به میرایی ساختاری کلی می کنند که بستگی به ویژگی های هندسی وسیله و ساختار پایه دارد. برای کاهش اثرات تغییرات فشار، مطلوب است وسیله در ناحیه تخت منحنی کار کند.



تصویر ۴۰.۲: منحنی ضریب کیفیت نوعی در مقابل فشار، که وقتی میرایی ویسکوز کاهش یابد Q محدود به میرایی ساختاری می‌شود [۱]

فصل سوم:

طراحی و بهینه سازی اجزاء محدود (FEA) مدل سه بعدی ژيروسکوپ MEMS

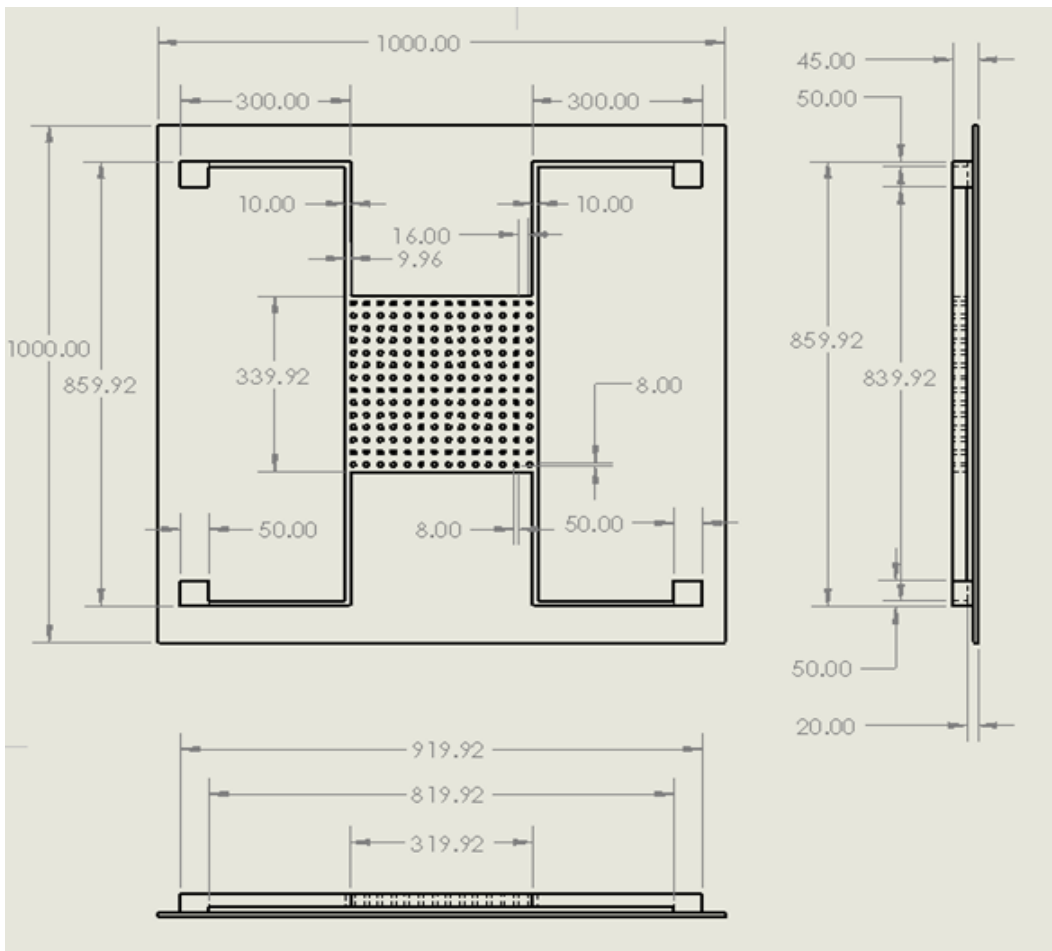
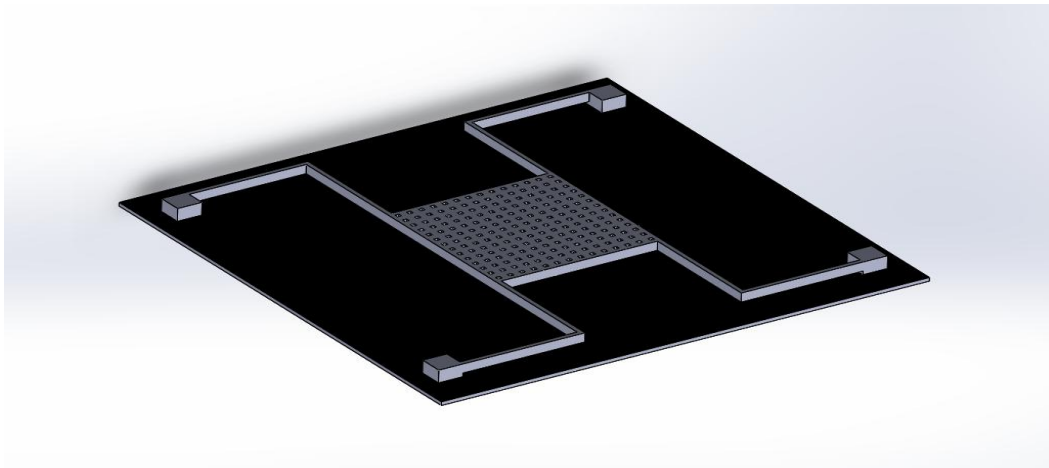
در فصل های پیش با معادلات دینامیکی، اصول اساسی و نیز طراحی ژيروسکوپ با مدل ساده شده جرم متمرکز آشنا شدیم. در این فصل به کمک این قواعد اساسی به طراحی نمونه واقعی ژيروسکوپ می پردازیم و پاسخ این ژيروسکوپ به سرعت زاویه ای ورودی را بررسی خواهیم کرد. همانطور که ذکر گردید یکی از بزرگترین چالش های طراحی در ژيروسکوپ های ارتعاشی میکرو الکترومکانیکی مرسوم تطبیق مدهای نوسانی و فرکانس های طبیعی متناظر با این مدها می باشد. به همین علت در این فصل بعد از بحثی در ارتباط با فاکتور های طراحی نمونه ژيروسکوپ واقعی به طراحی مدل های ساختاری مختلف می پردازیم که در این راستا کار را از مدل هایی با تقارن هندسی بهتر که به انطباق فرکانس های طبیعی و بهینه شدن طرح کمک می کند شروع می کنیم . در ادامه به طراحی مدل های پیچیده تر ساختار قابی و مدل مقاوم چند درجه آزادی با فرکانس های طبیعی غیر یکسان خواهیم پرداخت . چندین کار پژوهشی صورت گرفته در داخل کشور عموماً محدود به طراحی جرم متمرکز و یا

در حد مدل‌سازی تیر یکسر گیر دار می‌باشد و به این جهت تا کنون تحقیقی در جهت طراحی و مدل‌سازی نمونه واقعی صورت نگرفته است لذا امید است که نتایج بدست آمده گامی باشد در جهت کاربری این وسایل مدرن.

۳-۱- طراحی میکرو ژيروسکوپ پاخرچنگی Crab – Leg [۶۴]

یکی از ساختارهای مرسوم در طراحی میکرو ژيروسکوپ مدل ژيروسکوپ پاخرچنگی (Crab – Leg) می‌باشد. در این بخش به مدل‌سازی این نوع ژيروسکوپ و تحلیل عددی اجزاء محدود (FEA) آن می‌پردازیم. یک مدل اولیه از این نوع ژيروسکوپ در طراحی زیر همراه با جزئیات آن نشان داده شده است. ابعاد این طرح به گونه ای انتخاب شده است که بیشترین تقارن هندسی و در نتیجه کاهش اثرات انیزوالاستیسیته را در بر داشته باشد. با بررسی پاسخ دینامیکی این مدل و تحلیل حساسیت طرح به تغییرات هندسی که در عمل در پروسه تولید بوجود می‌آید به طرح نهایی بهینه می‌رسیم. علاوه بر حساسیت ابعادی، به تاثیرات محیطی بر روی ضریب کیفیت و میرایی سیستم نیز خواهیم پرداخت. اثر معیارهای شکست را بر روی توزیع تنش و کرنش بر روی ژيروسکوپ بررسی کرده و در کل یک تحلیل و بررسی جامع را دنبال می‌کنیم تا به طراحی بهینه شده دست یابیم.

جهت کاهش میرایی فیلم فشاری و نیز افزایش سرعت عملکرد سیستم در سوئیچ‌های MEMS معمولاً سوراخ‌های در ابعاد ($3 - 8 \mu m$) در سطح جرم یا تیرها ایجاد می‌گردد. مجموع سطح کل سوراخ‌ها می‌تواند تا بیش از ۶۰٪ سطح جسم تشکیل را دهد. سوراخ‌ها می‌توانند تنش‌های پس ماند در جسم ایجاد کرده و باعث کاهش مدول الاستیسیته آن گردند [۹].



تصویر ۱.۳: طرح اولیه از جزئیات ابعادی میکرو ژيروسکوپ پاخرچنگی (Crab - Leg) [μm]

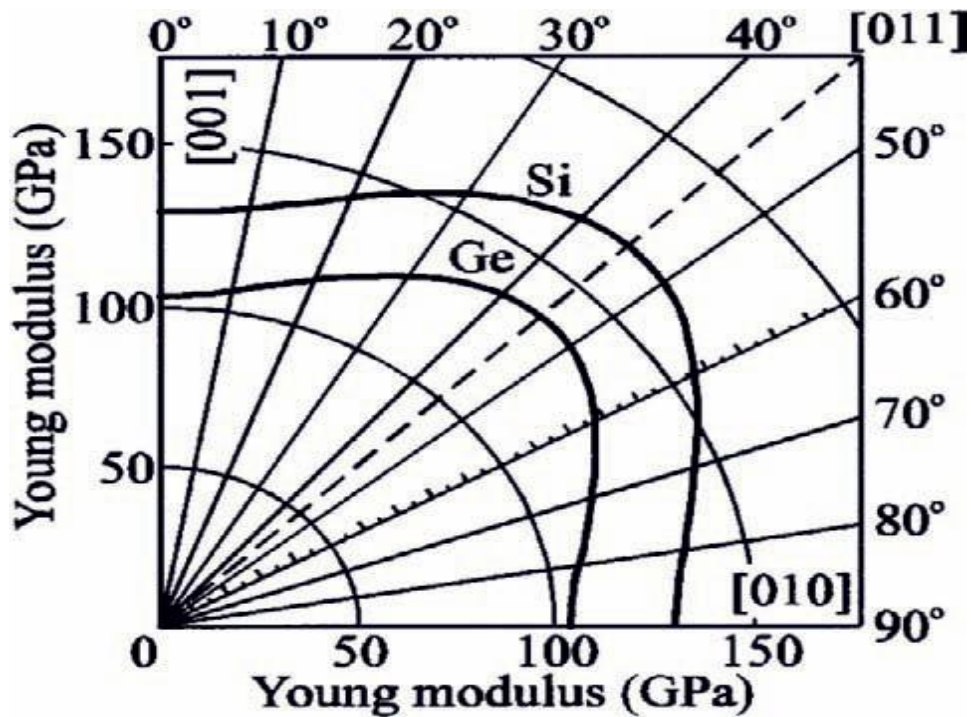
۳-۱-۱- آنالیز و بهینه سازی مودال :

در ارتعاشات آزاد، برای محاسبه فرکانس طبیعی باید معادله زیر را حل کرده و فرکانس ها را بیابیم.

$$([K] - \omega_n^2 [M])\Psi_n \quad (۱.۳)$$

در معادله بالا $[K]$ ماتریس سختی سازه، ω_n فرکانس طبیعی، $[M]$ ماتریس جرم و Ψ_n شکل مد متناظر با فرکانس می باشد.

برای انجام این تحلیل جنس ماده تشکیل دهنده ژيروسکوپ را سیلیکون انیزوتروپیک در نظر می گیریم. تغییرات مدول الاستیسیته این ماده در جهات کریستالی متفاوت مطابق تصویر زیر می باشد.



تصویر ۲.۳: مدول الاستیسیته سیلیکون و ژرمانیوم [۳۲]

این رفتار به اضافه سایر خواص ذکر شده در فصل قبل را در نرم افزار ۱۴.۵ Workbench تعریف کرده و اساس محاسبات قرار می دهیم.

المان در نظر گرفته شده برای تحلیل اجزا محدود (FEA) المان ۱۸۶ SOLID موجود در کتابخانه المان های نرم افزار خواهد بود.

برای سیستم ژيروسکوپ نشان داده شده در تصویر (۱.۳) با مشخصات فیزیکی و هندسی گفته شده که از محل تکیه گاههایش در سیستم مختصات دوار ثابت شده است، شش فرکانس طبیعی اول با در نظر گرفتن جرم نمونه $6 \times 10^{-9} \text{Kg}$ بصورت زیر بدست می آید. که سه فرکانس اول به ترتیب متعلق به مدهای جهات متعامد مورد نیاز می باشد.

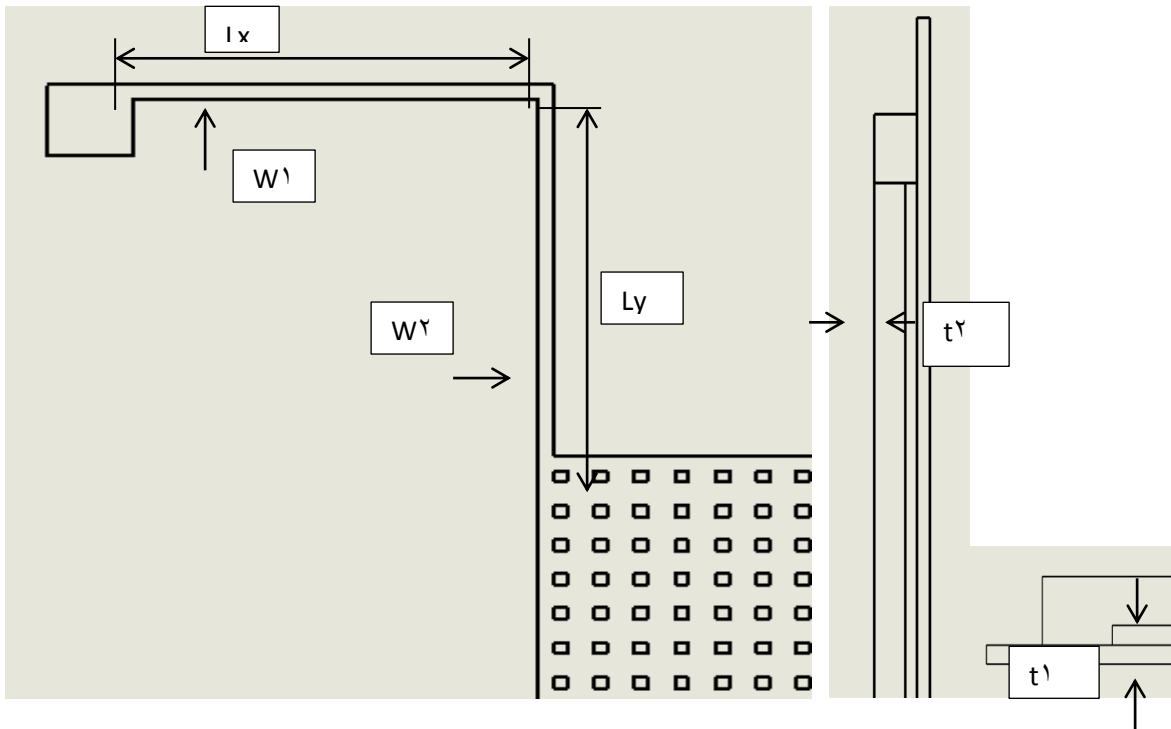
جدول ۱.۳: شش فرکانس طبیعی اول برای ژيروسکوپ (Crab – Leg) بر حسب [kHz]

$f_1 = f_d$	$f_2 = f_s$	$f_3 = f_z$	f_4	f_5	f_6
46.551	47.113	50.98	86.339	111.19	179.41

همانطور که در فصل های گذشته گفته شد در بین فرکانس های فوق انطباق دو فرکانس اول در ژيروسکوپ های محور-Z و سه فرکانس اول در ژيروسکوپ های چند محوره از اهمیت ویژه ای برخوردار است. نزدیک بودن مقادیر مربوط به این سه مد ارتعاشی در جدول مشخص است. انحراف موجود در بین این فرکانس ها تابعی از ابعاد هندسی طراحی، تغییرات موجود در جنس و خواص ماده و نیز مشکلات و عیوب ناشی از مرحله تولید بوجود می باشد.

برای بهینه سازی و حداقل کردن انحراف بین فرکانسهای طبیعی ذکر شده و نیز سنجش حساسیت سیستم به تغییر پارامتر های نوسانی لازم است تا آنالیز مودال را برای تغییر هر کدام از این پارامتر ها و با در نظر گرفتن بازه تغییرات آنها مجدداً حل کرد.

پارامتر های هندسی ورودی سیستم در تصویر زیر نشان داده شده‌اند. علاوه بر پارامتر های هندسی، چگالی ، مدول الاستیسیته و نیز ضریب پواسون از فاکتور های تعیین کننده عملکرد سیستم می‌باشند.



تصویر ۳.۳: ابعاد هندسی مورد استفاده جهت بهینه سازی

به علت تقارن مدل صرفاً یک چهارم آن در تصویر فوق نشان داده شده است. حال روند بهینه سازی را برای بدست آوردن متغیر های خروجی بهینه یعنی سه فرکانس طبیعی منطبق شده اول انجام می دهیم. محدوده تغییرات متغیر های ورودی مطابق جدول زیر است.

جدول ۲.۳: محدوده پارامترهای متغیر ورودی جهت تعیین نقاط طراحی

L_x	$225 - 275 \mu m$
L_y	$225 - 275 \mu m$
t_1	$9 - 11 \mu m$
t_2	$9 - 11 \mu m$
W_1	$22.5 - 27.5 \mu m$
W_2	$22.5 - 27.5 \mu m$

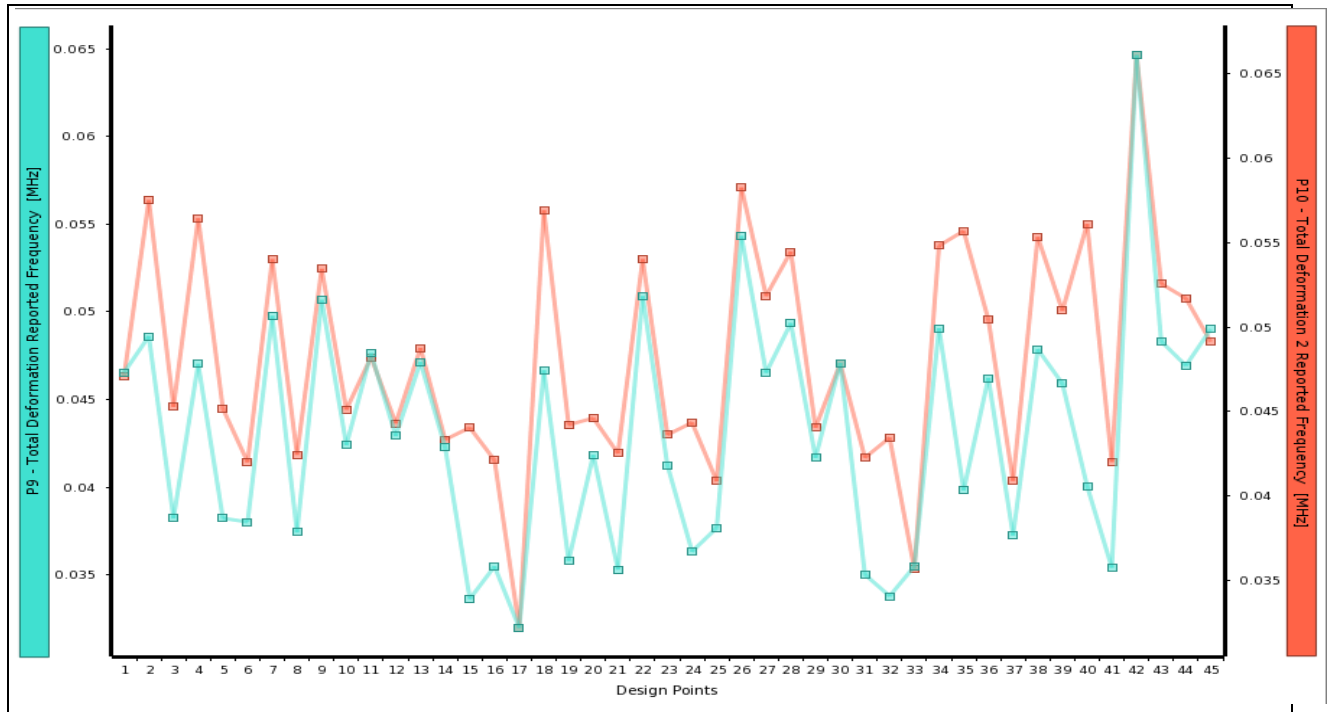
نتایج محاسبات فرکانسهای طبیعی در ۴۵ قطه طراحی برای پارامترهای هندسی ذکر شده مطابق جدول زیر می باشد :

جدول ۳.۳: مقادیر پارامترهای ورودی و خروجی در نقاط طراحی

نقاط	L_y	L_x	w_1	w_2	t_2	t_1	$f_d[Mpa]$	$f_s[Mpa]$	$f_z[Mpa]$
۱	۲۵۰	۲۵۰	۱۰	۱۰	۲۵	۲۵	۰.۰۴۶۶	۰.۰۴۷۱	۰.۰۵۱
۲	۲۱۰	۲۵۰	۱۰	۱۰	۲۵	۲۵	۰.۰۴۸۶	۰.۰۵۷۵	۰.۰۵۸۲
۳	۲۹۰	۲۵۰	۱۰	۱۰	۲۵	۲۵	۰.۰۳۸۲	۰.۰۴۵۳	۰.۰۴۵۷
۴	۲۵۰	۲۱۰	۱۰	۱۰	۲۵	۲۵	۰.۰۴۷	۰.۰۵۶۴	۰.۰۵۹۱
۵	۲۵۰	۲۹۰	۱۰	۱۰	۲۵	۲۵	۰.۰۳۸۲	۰.۰۴۵۲	۰.۰۴۵۹
۶	۲۵۰	۲۵۰	۸	۱۰	۲۵	۲۵	۰.۰۳۸	۰.۰۴۲	۰.۰۴۷۹
۷	۲۵۰	۲۵۰	۱۲	۱۰	۲۵	۲۵	۰.۰۴۹۸	۰.۰۵۴	۰.۰۵۵۷
۸	۲۵۰	۲۵۰	۱۰	۸	۲۵	۲۵	۰.۰۳۷۴	۰.۰۴۲۴	۰.۰۴۸۴
۹	۲۵۰	۲۵۰	۱۰	۱۲	۲۵	۲۵	۰.۰۵۰۷	۰.۰۵۳۴	۰.۰۵۴۷
۱۰	۲۵۰	۲۵۰	۱۰	۱۰	۲۰	۲۵	۰.۰۴۲۴	۰.۰۴۵۱	۰.۰۴۵۲
۱۱	۲۵۰	۲۵۰	۱۰	۱۰	۳۰	۲۵	۰.۰۴۷۶	۰.۰۴۸۲	۰.۰۵۴۸
۱۲	۲۵۰	۲۵۰	۱۰	۱۰	۲۵	۲۰	۰.۰۴۲۹	۰.۰۴۴۳	۰.۰۴۴۵

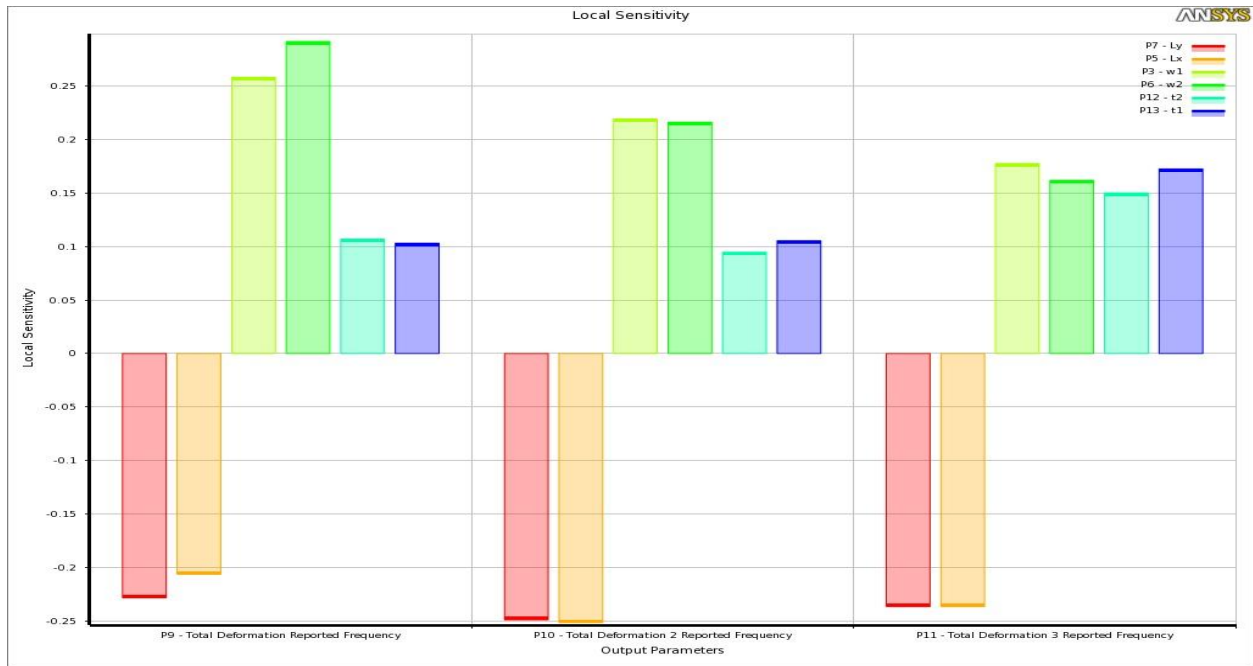
13	25.	25.	1.	1.	25	3.	..471	..488	..554
14	226.1791	226.1791	1.144	1.144	22.1.99	22.1.99	..423	..433	..476
15	273.12.9	226.1791	1.144	1.144	22.1.99	27.19.1	..336	..44	..451
16	226.1791	273.12.9	1.144	1.144	22.1.99	27.19.1	..355	..421	..478
17	273.12.9	273.12.9	1.144	1.144	22.1.99	22.1.99	..32	..322	..365
18	226.1791	226.1791	11.156	1.144	22.1.99	27.19.1	..467	..569	..582
19	273.12.9	226.1791	11.156	1.144	22.1.99	22.1.99	..358	..442	..515
20	226.1791	273.12.9	11.156	1.144	22.1.99	22.1.99	..418	..446	..453
21	273.12.9	273.12.9	11.156	1.144	22.1.99	27.19.1	..353	..425	..449
22	226.1791	226.1791	1.144	11.156	22.1.99	27.19.1	..5.9	..54	..566
23	273.12.9	226.1791	1.144	11.156	22.1.99	22.1.99	..413	..436	..462
24	226.1791	273.12.9	1.144	11.156	22.1.99	22.1.99	..363	..443	..5.6
25	273.12.9	273.12.9	1.144	11.156	22.1.99	27.19.1	..377	..4.9	..436
26	226.1791	226.1791	11.156	11.156	22.1.99	22.1.99	..543	..583	..6.1
27	273.12.9	226.1791	11.156	11.156	22.1.99	27.19.1	..465	..518	..612
28	226.1791	273.12.9	11.156	11.156	22.1.99	27.19.1	..494	..545	..58
29	273.12.9	273.12.9	11.156	11.156	22.1.99	22.1.99	..417	..44	..446

30	226.1791	226.1791	1.144	1.144	27.19.01	27.19.01	..471	..478	..602
31	273.12.9	226.1791	1.144	1.144	27.19.01	22.1.99	..35	..423	..465
32	226.1791	273.12.9	1.144	1.144	27.19.01	22.1.99	..338	..434	..453
33	273.12.9	273.12.9	1.144	1.144	27.19.01	27.19.01	..355	..357	..467
34	226.1791	226.1791	11.156	1.144	27.19.01	22.1.99	..491	..548	..565
35	273.12.9	226.1791	11.156	1.144	27.19.01	27.19.01	..398	..557	..568
36	226.1791	273.12.9	11.156	1.144	27.19.01	27.19.01	..462	..504	..569
37	273.12.9	273.12.9	11.156	1.144	27.19.01	22.1.99	..373	..409	..435
38	226.1791	226.1791	1.144	11.156	27.19.01	22.1.99	..479	..553	..567
39	273.12.9	226.1791	1.144	11.156	27.19.01	27.19.01	..459	..51	..549
40	226.1791	273.12.9	1.144	11.156	27.19.01	27.19.01	..401	..561	..561
41	273.12.9	273.12.9	1.144	11.156	27.19.01	22.1.99	..354	..42	..436
42	226.1791	226.1791	11.156	11.156	27.19.01	27.19.01	..646	..661	..678
43	273.12.9	226.1791	11.156	11.156	27.19.01	22.1.99	..483	..526	..586
44	226.1791	273.12.9	11.156	11.156	27.19.01	22.1.99	..469	..517	..597
45	273.12.9	273.12.9	11.156	11.156	27.19.01	27.19.01	..49	..491	..527



تصویر ۳.۳: نمودار تغییرات فرکانس های مدهای تحریک و تشخیص بر حسب نقاط طراحی

نمودار میله ای زیر میزان حساسیت پارامترهای خروجی (فرکانس) نسبت به پارامتر های ورودی (ابعاد هندسی) را نشان می دهد.

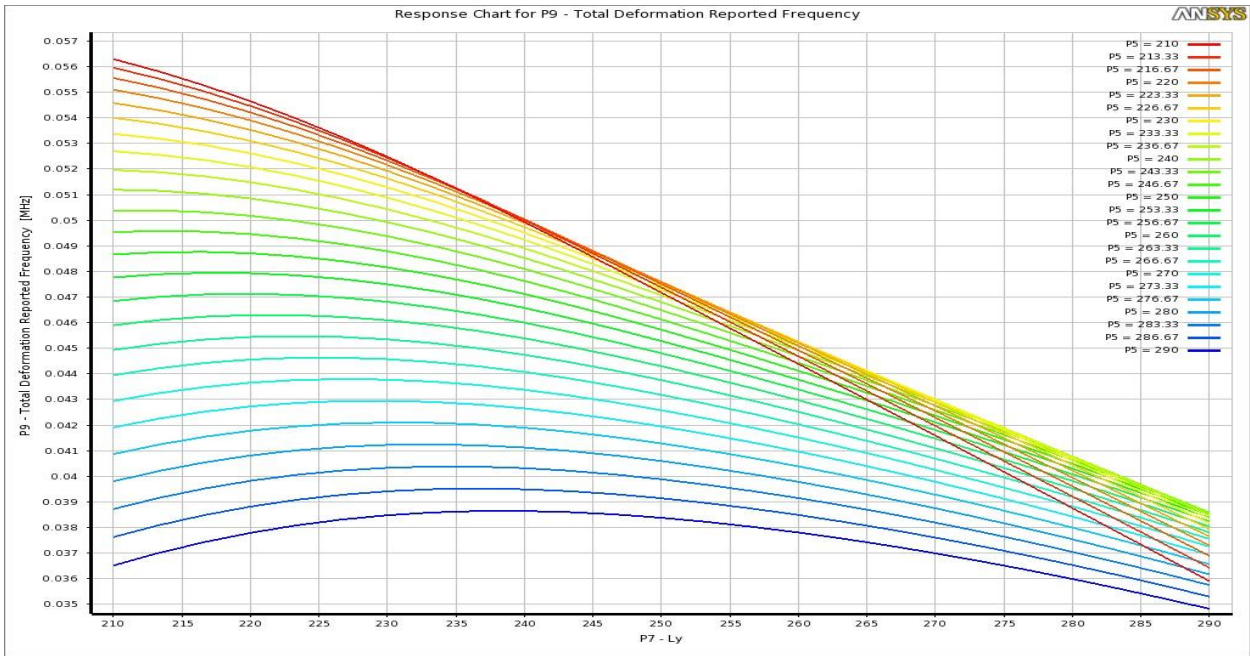
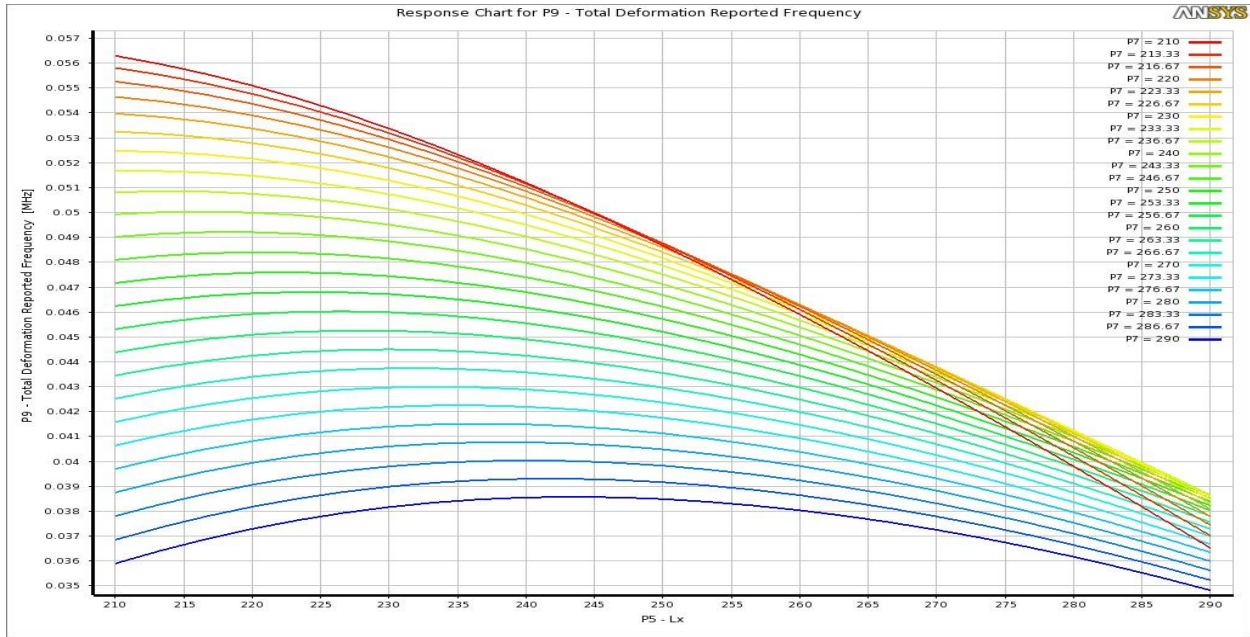


تصویر ۴.۳: حساسیت پارامترهای خروجی (فرکانس) نسبت به پارامترهای ورودی (ابعاد هندسی)

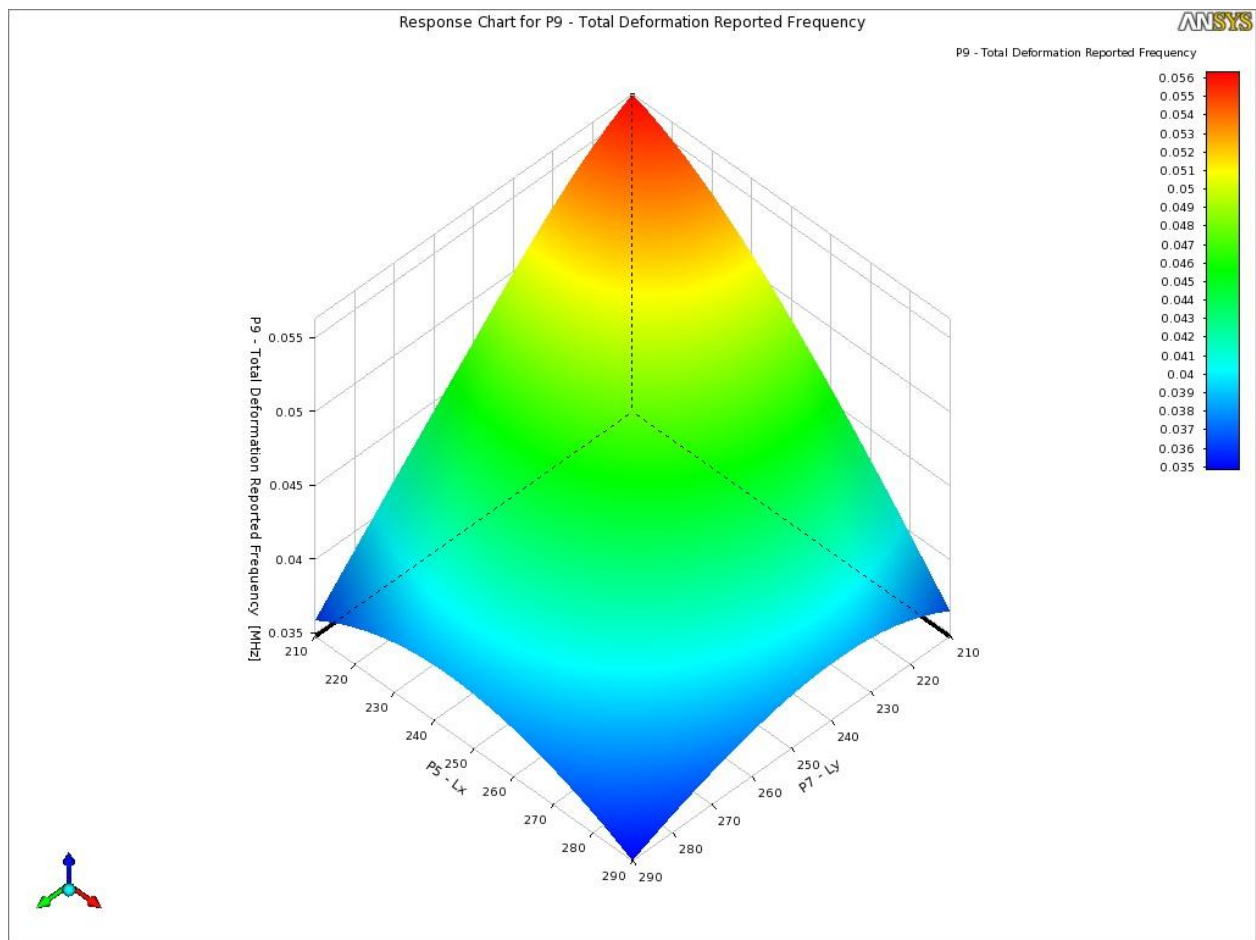
از این نمودار نکات زیر بدست می‌آید:

- فرکانس‌های طبیعی با طول‌های L_x و L_y رابطه معکوس دارد (با افزایش این طول‌ها فرکانس‌های طبیعی کاهش می‌یابند).
- فرکانس‌های طبیعی با ضخامت و عرض تیرهای تعلیق رابطه مستقیم دارد.
- در فرکانس‌های اول و دوم حساسیت به طول تیرها و عرض آنها بیشتر از ضخامت تیرها می‌باشد.
- در فرکانس سوم حساسیت تقریباً یکسانی نسبت به تغییر پارامترهای نوسانی وجود دارد.

در نمودارهای زیر تاثیر متغیرهای ورودی بر پارامترهای خروجی و همچنین نوع رفتار متغیر خروجی را به صورت تابع و دقیقتر نشان داده می‌شود.



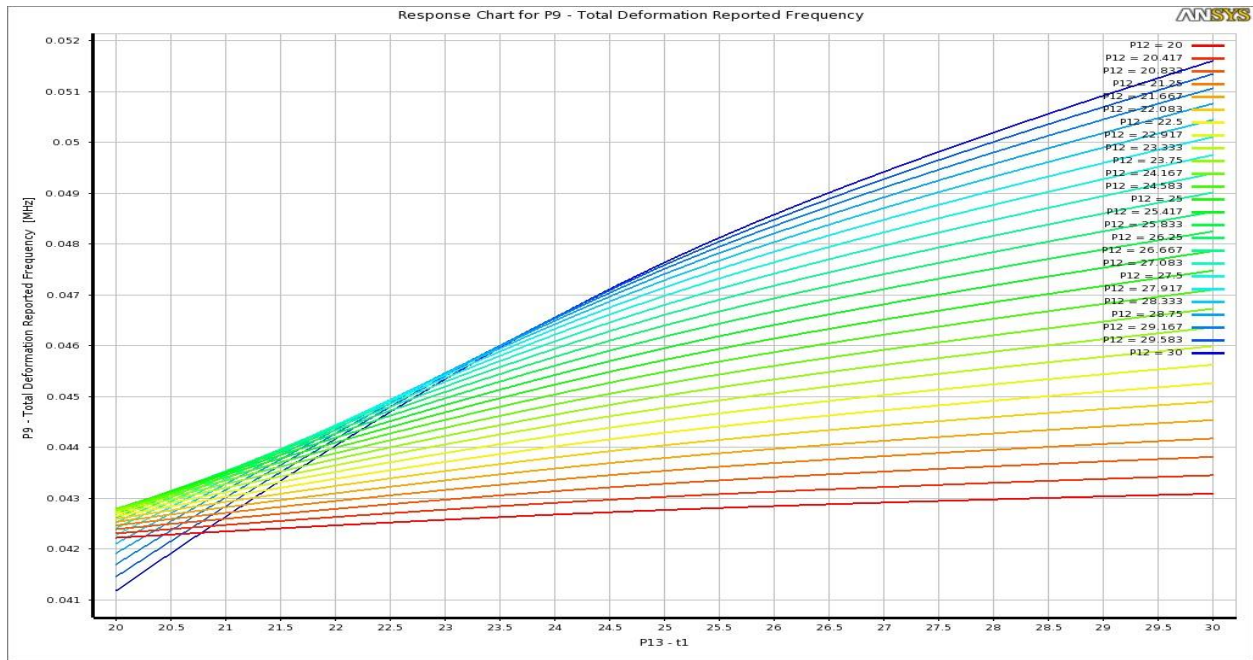
تصویر ۵.۳: اثر دو پارامتر طولی بطور همزمان بر روی فرکانس طبیعی اول



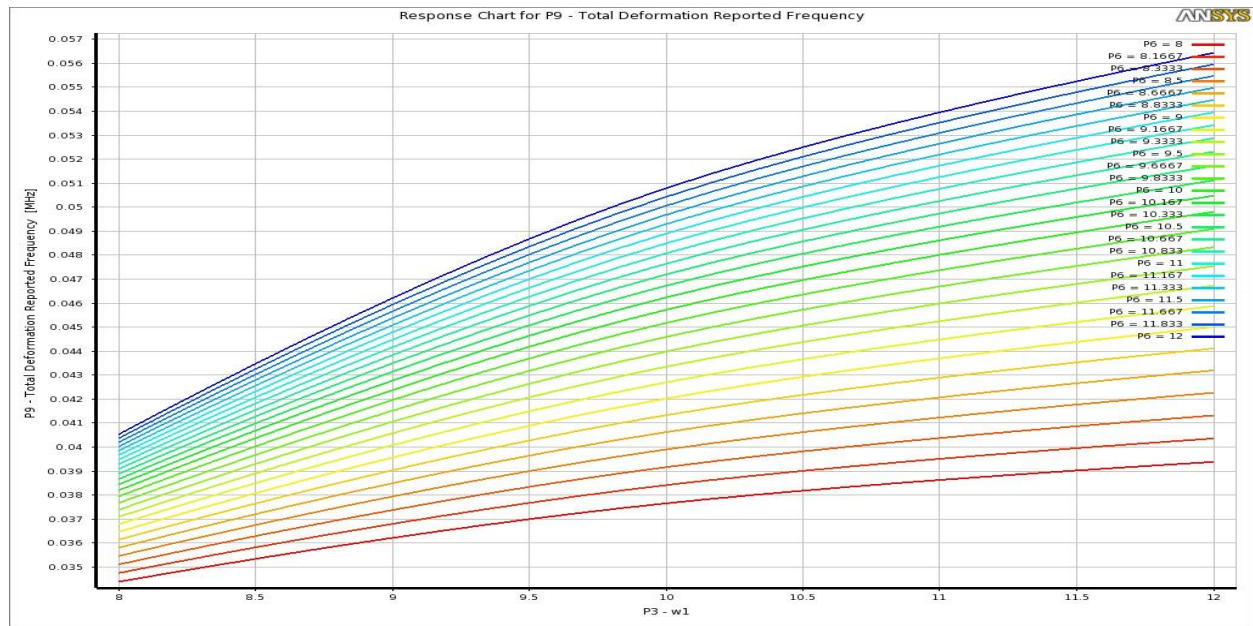
تصویر ۶.۳: اثر دو پارامتر طولی بطور همزمان بر روی فرکانس طبیعی اول بفرم سه بعدی

با توجه به دیاگرام های فوق با افزایش طول بازو های افقی و عمودی در تیرهای تعلیق از نقطه ای به بعد فرکانس طبیعی کاهش می یابد طول این نقطه در هر کدام از تیرهای عمودی یا افقی بستگی به تیر دیگر دارد بطوریکه با کاهش طول تیر دیگر نقطه تغییر شیب نمودار فرکانس - طول کاهش می یابد و رفتار کاهش فرکانس طبیعی هموارتر می گردد. نمودار دو بعدی فوق نشان می دهند که برای تیر افقی در محدوده طراحی از نقطه $L_x = 245 \mu m$ به بعد نمودار همواره نزولی بوده و با کاهش طول تیر عمودی این مقدار کاهش می یابد.

این قضیه بطور مشابه به ازای $L_y \geq 240 \mu m$ ، برای تیر عمودی صادق است. برای بررسی اثر ضخامت و عرض تیرها نیز تحلیل مشابهی انجام می شود.

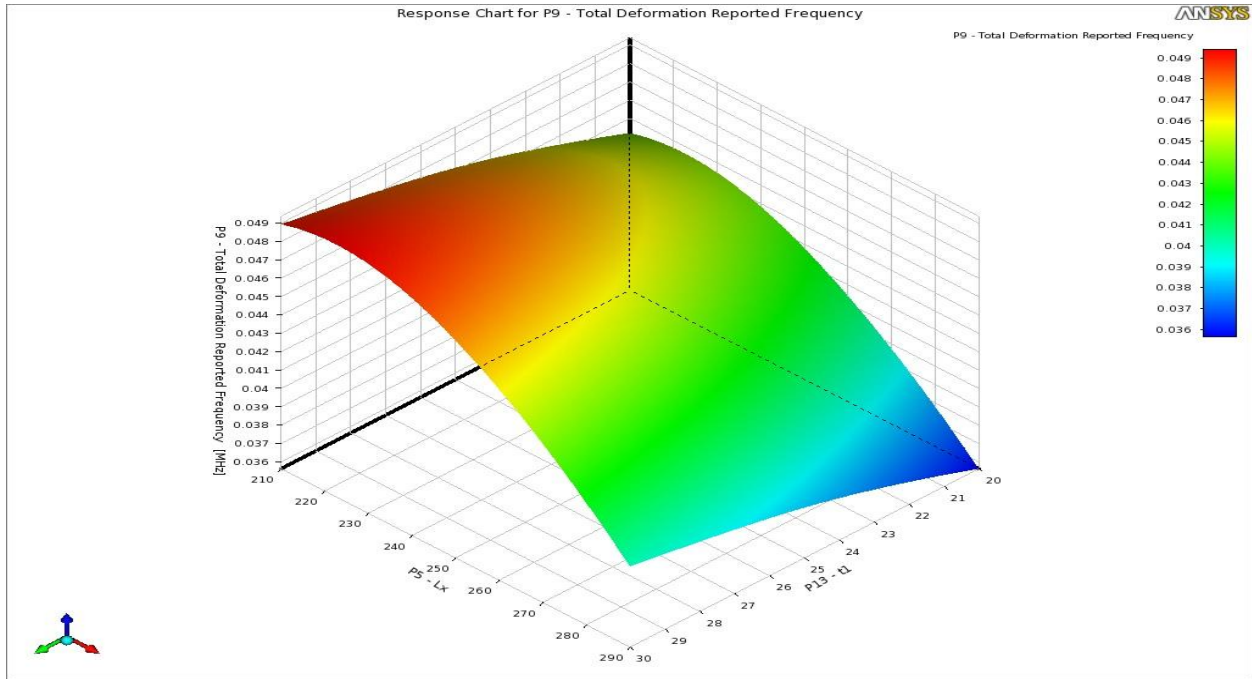


تصویر ۷.۳: اثر دو پارامتر ضخامت تیر بطور همزمان بر روی فرکانس طبیعی اول

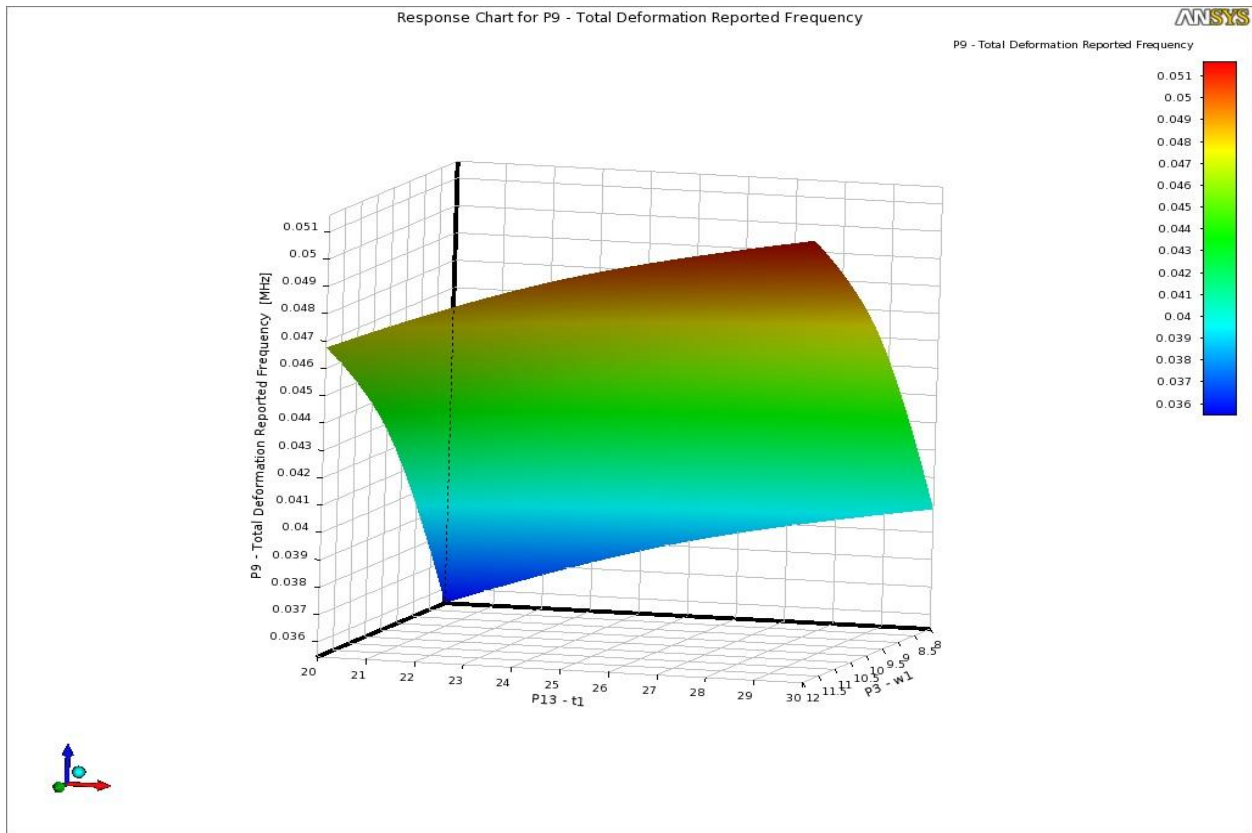


تصویر ۸.۳: اثر دو پارامتر عرض تیر بطور همزمان بر روی فرکانس طبیعی اول

با توجه به نمودار های فوق اثر مستقیم پارامترهای سطح مقطع تیر مشخص است. دیاگرام های سه بعدی زیر به درک بهتر اثرات هندسی در فرکانس طبیعی اول نشان می دهد.

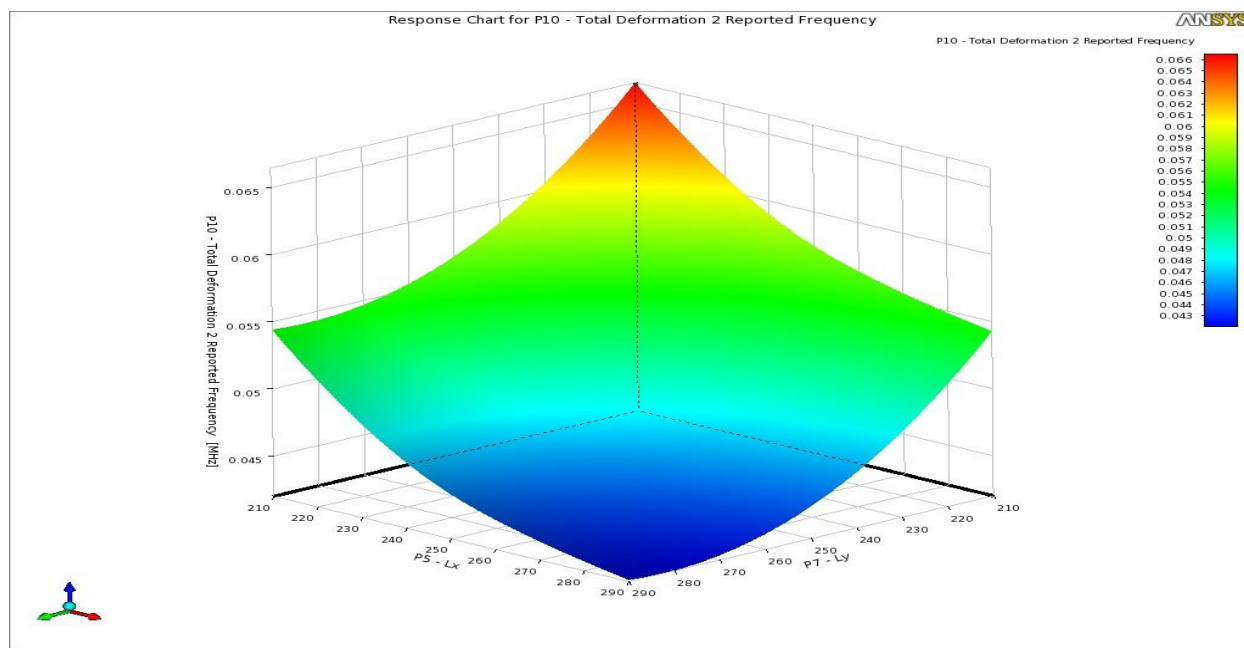
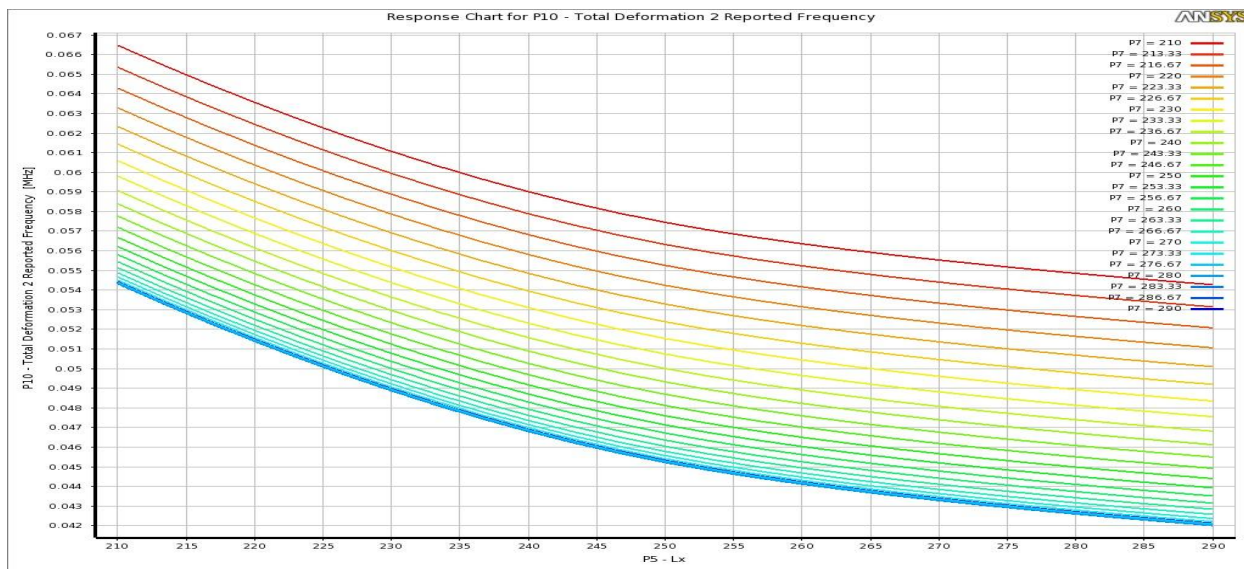


تصویر ۹.۳: اثر دو پارامتر طولی و ضخامت تیر بطور همزمان بر روی فرکانس طبیعی اول بفرم سه بعدی



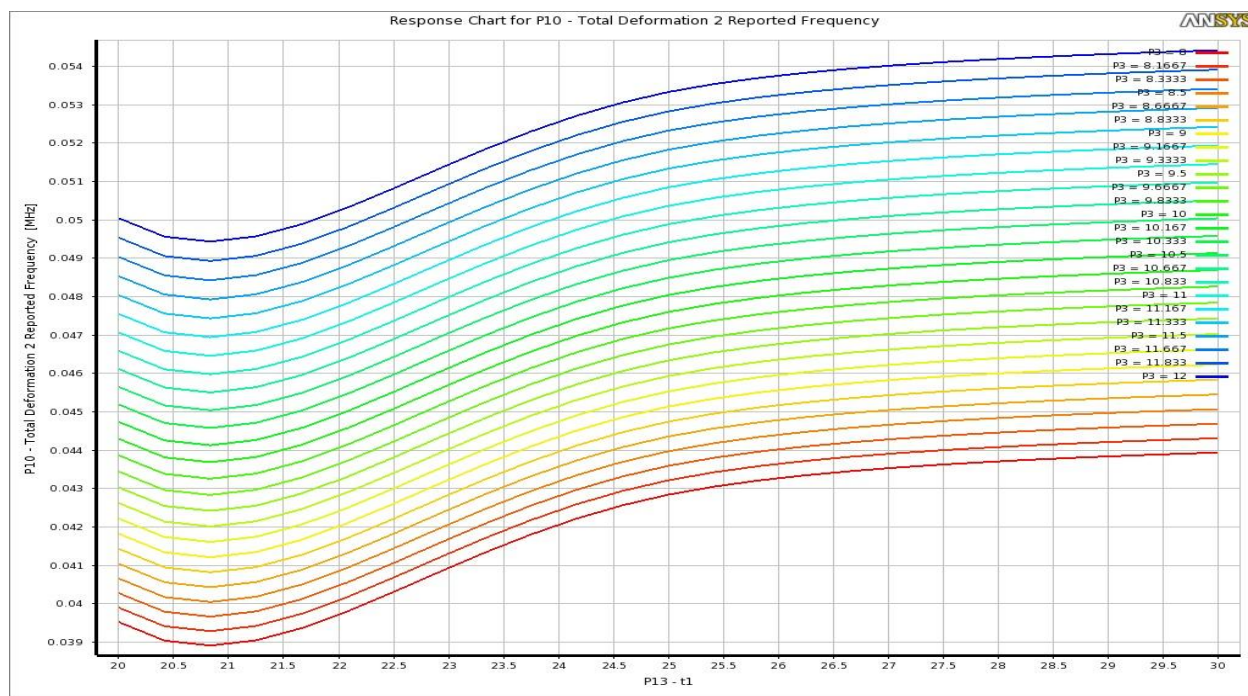
تصویر ۱۰.۳: اثر دو پارامتر ضخامت و عرض تیر بطور همزمان بر روی فرکانس طبیعی اول بفرم سه بعدی

برای فرکانس های طبیعی دوم و سوم نیز تحلیل های مشابهی می توان انجام داد و نتایج تقریباً یکسان بدست آورد. داده مربوط موجود بوده و به علت محدودیت فضا از آوردن این نتایج خوداری می کنیم، و تنها به بررسی فرکانس طبیعی دوم به لحاظ اهمیت فوق العاده زیاد آن می پردازیم.



تصویر ۱۱.۳: اثر دو پارامتر طولی بطور همزمان بر روی فرکانس طبیعی دوم

مشاهده می شود که در مد نوسانی دوم، فرکانس طبیعی همواره سیر نزولی دارد.



تصویر ۱۲.۳: اثر دو پارامتر ضخامت و عرض تیر بطور همزمان بر روی فرکانس طبیعی دوم

از تحلیل های فوق، فرکانس های طبیعی سه گانه سیستم در فضای طراحی بدست آمده اند ، معیار بهینه سازی به حداقل رساندن اختلاف این فرکانس ها می باشد. با توجه به مقادیر بدست آمده در جدول ۴.۳ برای فرکانس های طبیعی، برای ژيروسکوپ محور Z- تطبیق دو فرکانس اول نکته طراحی می باشد . مقادیر محاسبه شده برای طرح اولیه در جدول ۱.۳ در حدود ۵۶۲ Hz اختلاف دارند که این اختلاف برای نقطه طراحی ۴۵ به مقدار ۱۰۰ Hz می رسد. با افزایش محدوده طراحی و نیز نقاط طراحی می توان به نتایج مطلوب تری رسید که مستلزم صرف زمان و هزینه بیشتر جهت بهبود امکانات سخت افزاری است.

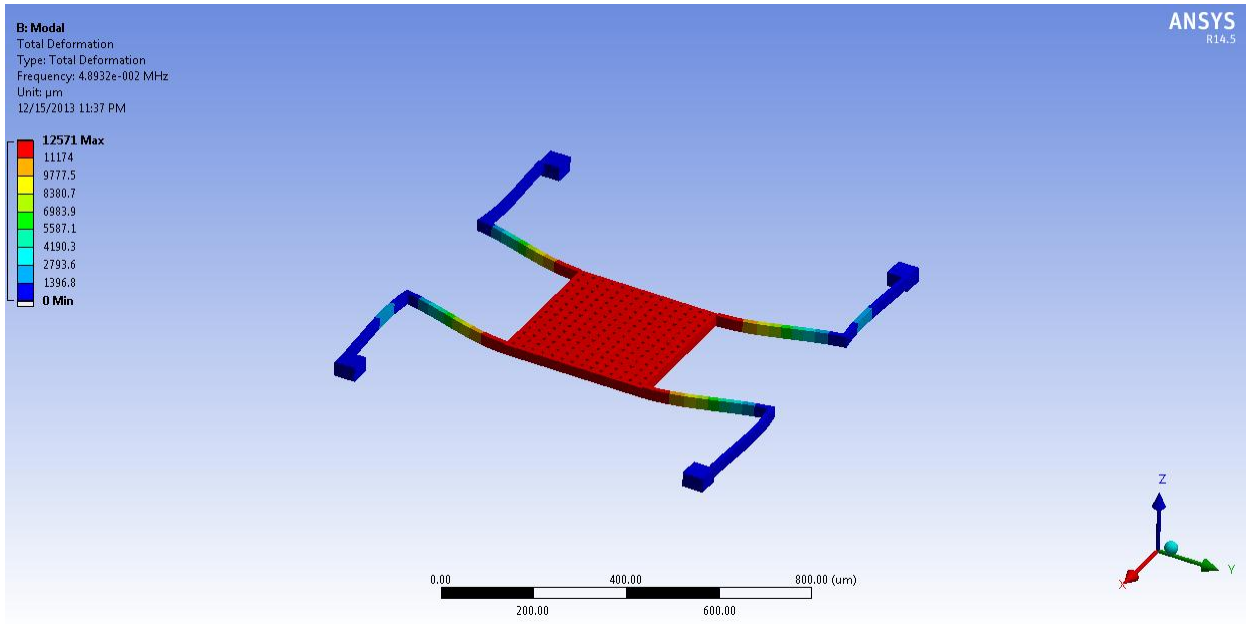
با ابعاد بدست آمده در نقطه طراحی بهینه شده ۴۵، مدلسازی سیستم را مجدداً انجام می دهیم.

جدول ۴.۳: مشخصات نقطه طراحی بهینه برای ژيروسکوپ محور Z-

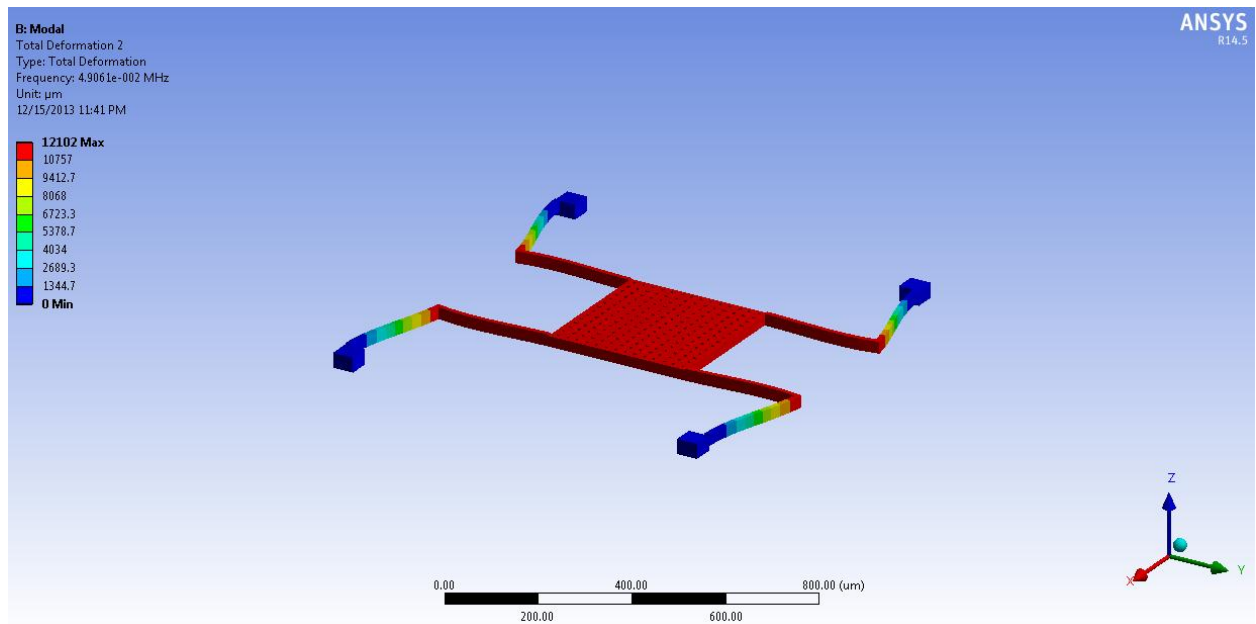
نقطه طرح بهینه	L_x (μm)	L_y (μm)	w_1 (μm)	w_2 (μm)	t_2 (μm)	t_1 (μm)	f_d (KHz)	f_s (KHz)	f_z (KHz)
۴۵	۲۷۳.۱۲۰۹	۲۷۳.۱۲۰۹	۱۱.۱۵۶	۱۱.۱۵۶	۲۷.۸۹۰۱	۲۷.۸۹۰۱	۴۹.۰	۴۹.۱	۵۲.۷

در ژيروسکوپ‌های درون صفحه ای مطلوب است تا حرکت جرم محدود به یک صفحه در برگیرنده جرم باشد و از ارتعاشات خارج از صفحه جلوگیری گردد. در ژيروسکوپ محور Z- برای این مقصود باید ضخامت تیرها تا حد ممکن زیاد باشد. با توجه مقادیر بدست آمده برای نقطه طراحی ضخامت تیرها نیز اندکی افزایش یافته که از این نظر نیز طرح مطلوب بدست آمده است.

مشخصات ابعادی نشان داده شده در طرح اولیه باید با ابعاد نشان داده شده در جدول فوق اصلاح گردند. شکل مدهای نوسانی مربوط به سه فرکانس طبیعی اول در تصاویر زیر نشان داده شده است.



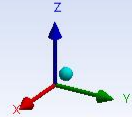
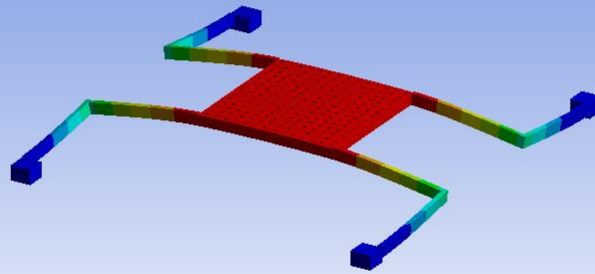
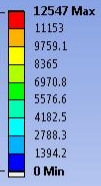
تصویر ۱۳.۳: شکل مد نوسانی اول



تصویر ۱۴.۳: شکل مد نوسانی دوم

B: Modal
Total Deformation 3
Type: Total Deformation
Frequency: 5.2711e-002 MHz
Unit: μm
12/15/2013 11:43 PM

ANSYS
R14.5



تصویر ۱۵.۳: شکل مد نوسانی سوم

۳-۱-۲- آنالیز هارمونیک و پاسخ فرکانسی :

هر نیروی متناوب سینوسی بر روی یک سازه پاسخ نوسانی منظم ایجاد می‌کند. این آنالیز معمولاً پس از انجام آنالیز مودال انجام می‌گیرد. زیرا دانستن محدوده فرکانس های طبیعی سازه (توسط آنالیز مودال)، جهت بررسی رفتار سازه در این محدوده توسط آنالیز هارمونیک ضروری می‌باشد. این آنالیز نیز به شکل تقریبی مقدار فرکانس های طبیعی را ارائه می‌دهد. روش محاسبه بر اساس پاسخ پایدار و در حالت خطی میباشد و سپس به تحلیل مسئله بر اساس فرکانس های تحریک متفاوت (فرکانس سینوسی اعمال نیرو) می پردازد. و در انتها میتوان بصورت نمودار پاسخ های شامل جابجایی، تنش ها و ... را نسبت به فرکانس تحریک رسم نمود و رفتار مدل را در نواحی مربوط به فرکانس شدید بررسی نمود.

پاسخ فرکانسی مد - تحریک به نیروی نوسانی :

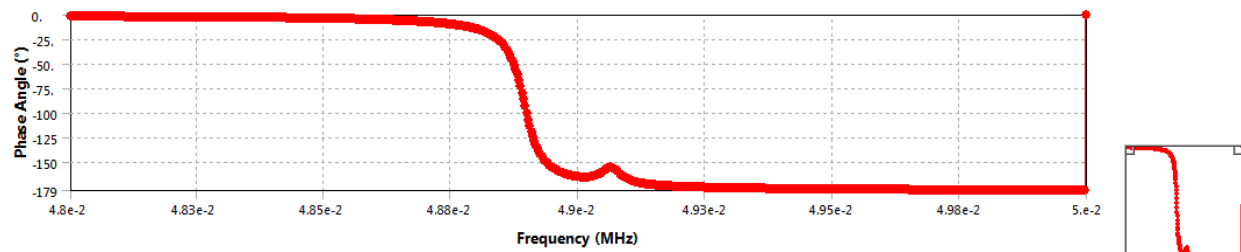
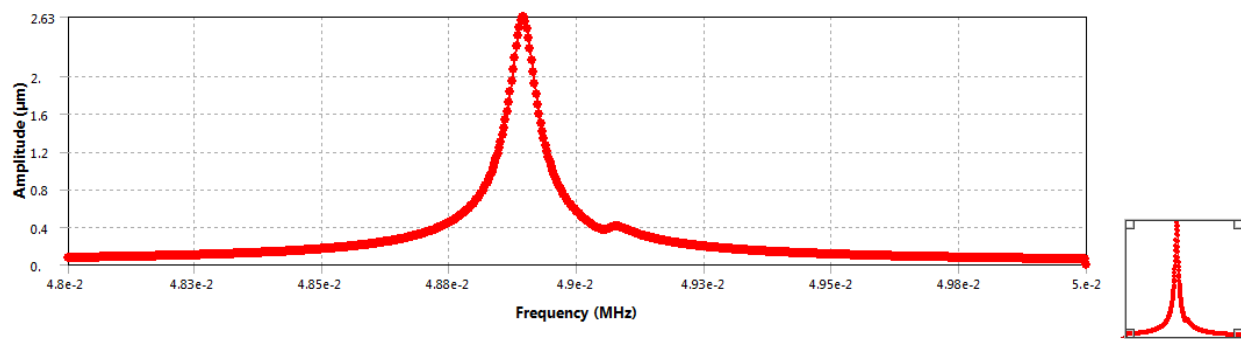
مشخصات هندسی سیستم را مطابق نتایج بدست آمده از آنالیز مودال بهینه سازی شده، اصلاح کرده و نیروی خارجی الکترواستاتیک و نیز سرعت زاویه‌ای در راستای محور Z را به سیستم اعمال می‌کنیم و در نهایت پاسخ ها و عکس العمل های سیستم را نسبت به تغییر فرکانس نیروی خارجی تعیین می‌کنیم.

مقادیر ارائه شده برای سرعت زاویه‌ای ورودی ، نیروی خارجی و نیز مشخصات فیزیکی سیستم را مطابق جدول زیر فرض می‌کنیم.

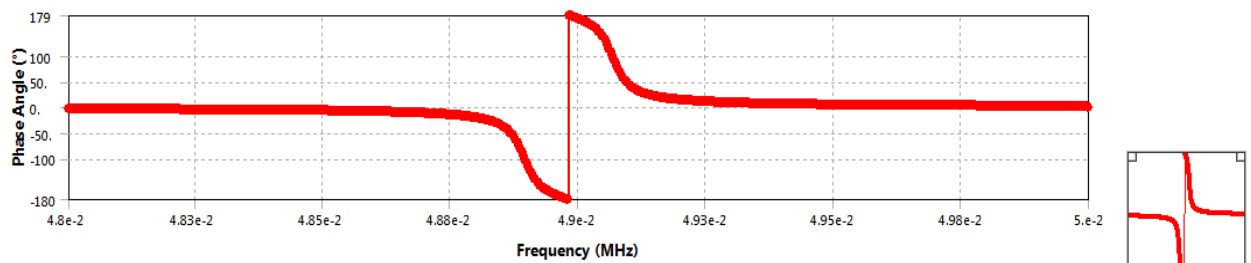
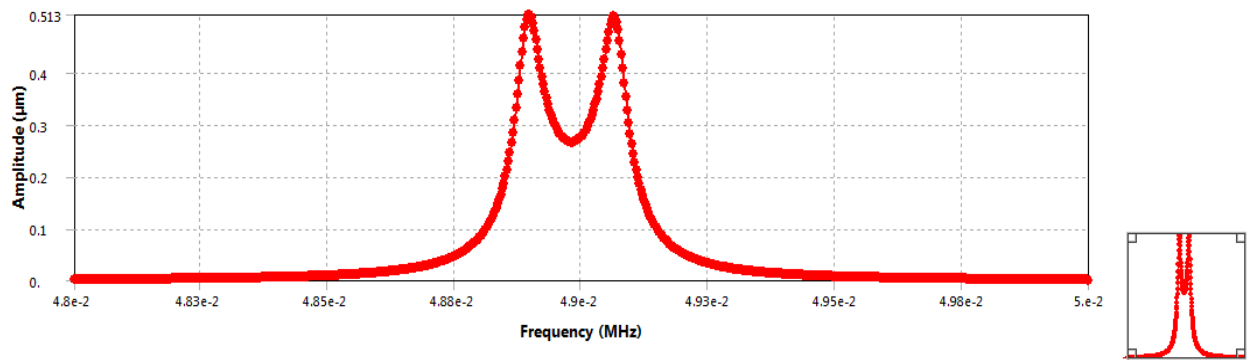
جدول ۵.۳: مشخصات نیرو ، سرعت زاویه‌ای ورودی و جرم موثر

سرعت زاویه‌ای Ω_z	10 deg/min
دامنه نیرو خارجی F .	$1.64 \mu N$
جرم نمونه m	$6 \times 10^{-9} \text{ Kg}$

برای مشخصات فیزیکی جرم نمونه از کتابخانه نرم افزار سیلیکون انیزوتروپیک را انتخاب می‌کنیم. برای عملکرد سیستم تحت شرایط گفته شده نتایج فرکانسی زیر را بدست می‌آوریم.



تصویر ۱۶.۳: پاسخ فرکانسی در جهت مد- تحریک



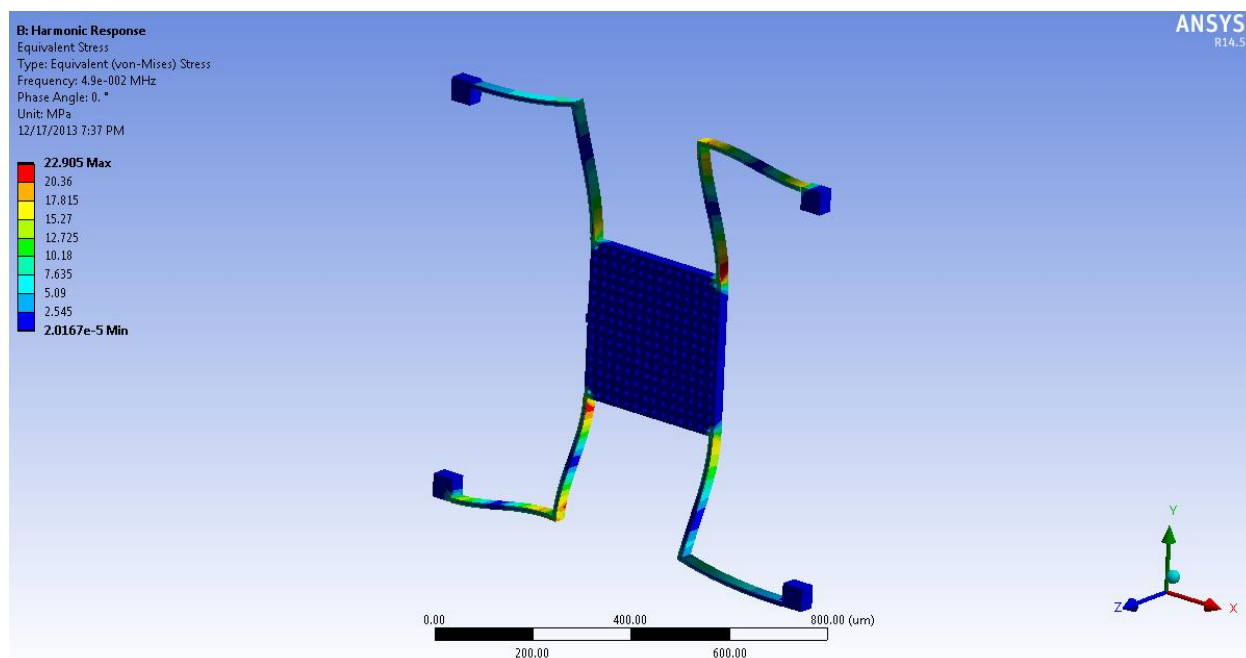
تصویر ۱۷.۳: پاسخ فرکانسی در جهت مدتشخیص

از پاسخ های فرکانسی فوق بوضوح مشخص است که عدم انطباق کامل مدی بین فرکانس های مد- تحریک و تشخیص وجود دارد و علت آن همانطور که گفته شد به ابعاد هندسی ژيروسکوپ مربوط می شود. البته

در طراحی ژيروسکوپ همواره یک فاصله بسیار جزئی بین فرکانس های دو مد وجود دارد تا ضمن افزایش پهنای باند از حساسیت ژيروسکوپ به تغییرات ناشی از مشکلات تولید و ناطبیتی بوجود آمده در آن کاهش یابد.

در ژيروسکوپ های میکرو ماشینکاری شده، اکثر مکانیزم های شکست ناشی از شکست شوک می باشند. سیلیکون کریستالین ماده ای بشدت ترد است، و تا رسیدن به بالاترین حد تنش در نقطه شکست تغییر شکل الاستیک می دهد. اگر چه استحکام شکست سیلیکون ۷ GPa است، در ادبیات فن مقادیر دیگری نیز گزارش شده است.

برای کاهش احتمال شکست در یک سطح خاص از شوک، معمولاً در طراحی، حداکثر تنش فون مایزر را کمتر از ۱ GPa در نظر می گیرند. در تصویر زیر توزیع تنش با شرایط بارگذاری گفته شده در ژيروسکوپ نشان داده شده است.



تصویر ۱۹.۳: توزیع تنش فون مایزر در سیستم ژيروسکوپ در فرکانس شدید

۳-۲- طراحی میکرو ژيروسکوپ قابی سه درجه آزادی (DOF - 3)

از آنجایی که پاسخ میکرو ژيروسکوپ ارتعاشی به علائم خارجی (سرعت زاویه‌ای) از پاسخ هر سیستم میکرو الکترو مکانیکی دیگر کوچکتر است، به شدت تحت تاثیر اثرات ناخواسته قرار می‌گیرد. بنابراین برای پایداری و مقاومت ژيروسکوپ نیازمند سیستم بهینه سازی شده هستیم.

برای بهینه سازی ذاتی سیستم ژيروسکوپ لازم است تا نقش کنترلرهای جبران‌ساز الکتریکی را به ساختار مکانیکی انتقال داده و طراحی مدل را به گونه ای انجام دهیم تا حساسیت ژيروسکوپ به تغییر پارامترهای هندسی در اثر عیوب مرحله تولید و نوسانات شرایط محیطی حداقل گردد. در این بخش با ارائه دو مدل از ساختارهای قابی چند درجه‌آزادی مقاوم به طراحی و تحلیل آنها خواهیم پرداخت.

۳-۲-۱- اصول نوسانگرهای دو درجه‌آزادی (2 - DOF):

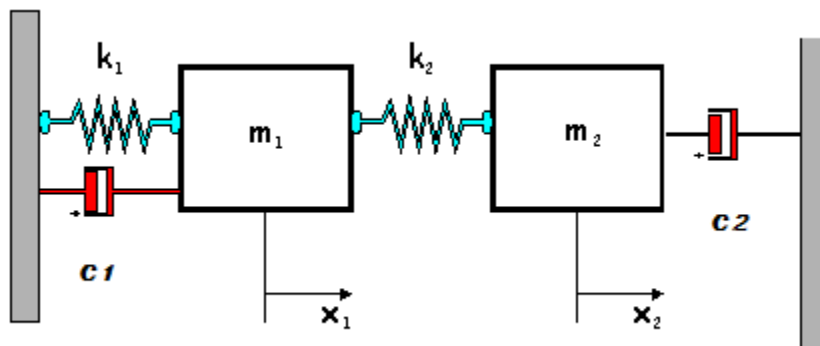
همانطور که در بخش قبل ملاحظه شد ، میکروژيروسکوپ ارتعاشی بر اساس ، اصول کریولیس در جرم نمونه مرتعش که بر روی زیرلایه به حالت تعلیق در آمده کار می‌کند. در این نمونه از میکرو ژيروسکوپ ، جرم نمونه بطور آزادانه در دو جهت متعامد- تحریک و تشخیص نوسان می‌کند و سیستم دارای دو درجه‌آزادی می‌باشد که در حالت تشدید در جهت تحریک ، تحریک می‌شود.

عملکرد سیستم‌های ژيروسکوپی با مد- تحریک یک درجه‌آزادی و مد- تشخیص یک درجه‌آزادی به تغییرات پارامترهای سیستم بسیار حساس است. این حساست زیاد باعث جابجایی فرکانس های تشدید تشخیص و تحریک می‌گردد. بویژه تحت شرایط ضریب کیفیت بالا اگرچه با نزدیک شدن مدها به مقدار بهره زیادی دست می‌یابیم ولی تغییرات بسیار کوچک فرکانسی باعث تغییر ناگهانی بهره و فاز می‌گردد. بعلاوه نوسانات در شرایط میرایی مستقیماً بر روی بهره و فاز اثر گذار است. در پیاده‌سازی‌های عملی بمنظور دستیابی به پاسخ پایدار، فرکانس‌های مدهای تشخیص و تحریک تعمداً جداسازی می‌کنند.

$$\Delta f = f_s - f_d \quad (۲.۳)$$

مفاهیم طراحی ژيروسکوپ چند درجه آزادی که در این بخش معرفی شده است پاسخ های فرکانسی مد- تشخیص و/یا تحریک در یک ناحیه فرکانسی عملکردی مسطح را تولید می‌کند که بر خلاف ژيروسکوپ های سیستم تشدید قبلی، بهره پاسخ و فاز پایدار دارند. (بنابراین اجزاء سیستم های تشخیص بطور ذاتی در مقابل تغییرات پارامترهای محیطی و ساختاری مقاوم می‌باشند و نیاز کمتری به تمهیدات جبران‌سازی دارند.

سیستم‌های دینامیکی با دو جرم نمونه کوپل شده با دو قله تشدید در مدهای هم‌فاز و ناهم‌فاز شناخته می‌شوند. در فرکانس طبیعی مد هم‌فاز، جرم‌ها باهم و در یک جهت یکسان نوسان می‌کنند، درحالی‌که در فرکانس مد ناهم‌فاز جرم‌ها در جهت خلاف هم ارتعاش می‌کنند. در یک نوسانگر دودرجه‌آزادی معمول که از دو جرم m_1 و m_2 تشکیل شده است. (مطابق تصویر ۲۰.۳). جرم m_1 را جرم اولیه و جرم m_2 را جرم ثانویه می‌نامیم. فرض می‌کنیم نیروی تحریک F_d به جرم اولیه m_1 اعمال شود، در اینصورت معادلات حرکت را می‌توان بصورت زیر بیان کرد.



تصویر ۲۰.۳: مدل معمول از نوسانگر دو درجه آزادی

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 &= k_2 (x_2 - x_1) + F_d & (3.3) \\
 m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 &= k_2 x_1
 \end{aligned}$$

اگر نیروی تحریک یک نیروی سینوسی دامنه ثابت به فرم $F_d = F_0 \sin(\omega t)$ فرض شود، پاسخ حالت ماندگار جرم‌های نوسانگر دودرجه‌آزادی با عبارت زیر بیان می‌شود:

$$X_1(j\omega) = \frac{F_0}{k_1} \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2 + j\omega \frac{c_2}{k_2}}{\left[1 + \frac{k_2}{k_1} - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 + j\omega \frac{c_1}{k_1}\right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2 + j\omega \frac{c_2}{k_2}\right] - \frac{k_2}{k_1}} \quad (4.3)$$

$$X_2(j\omega) = \frac{F_0}{k_1} \frac{1}{\left[1 + \frac{k_2}{k_1} - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 + j\omega \frac{c_1}{k_1}\right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2 + j\omega \frac{c_2}{k_2}\right] - \frac{k_2}{k_1}} \quad (5.3)$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}} \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}} \quad (6.3)$$

که ω_2 و ω_1 به ترتیب فرکانس‌های تشدید در سیستم‌های ایزوله شده با جرم‌های m_1 و m_2 می‌باشند. فرکانس‌های تشدید هم‌فاز ω_{ip} و ناهم‌فاز ω_{ap} نوسانگر را می‌توان با برابر صفر قرار دادن مخرج پاسخ سیستم نامیرا بدست، در نتیجه خواهیم داشت:

$$\omega_{ip} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \mu + \frac{1}{\gamma^2} - \sqrt{\left(1 + \mu + \frac{1}{\gamma^2} \right)^2 - \frac{4}{\gamma^2}} \right)} \omega_2 \quad (7.3)$$

$$\omega_{ap} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \mu + \frac{1}{\gamma^2} + \sqrt{\left(1 + \mu + \frac{1}{\gamma^2} \right)^2 - \frac{4}{\gamma^2}} \right)} \omega_2 \quad (8.3)$$

$$\mu = \frac{m_2}{m_1} \quad \gamma = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \sqrt{\frac{k_2 m_1}{k_1 m_2}} \quad (9.3)$$

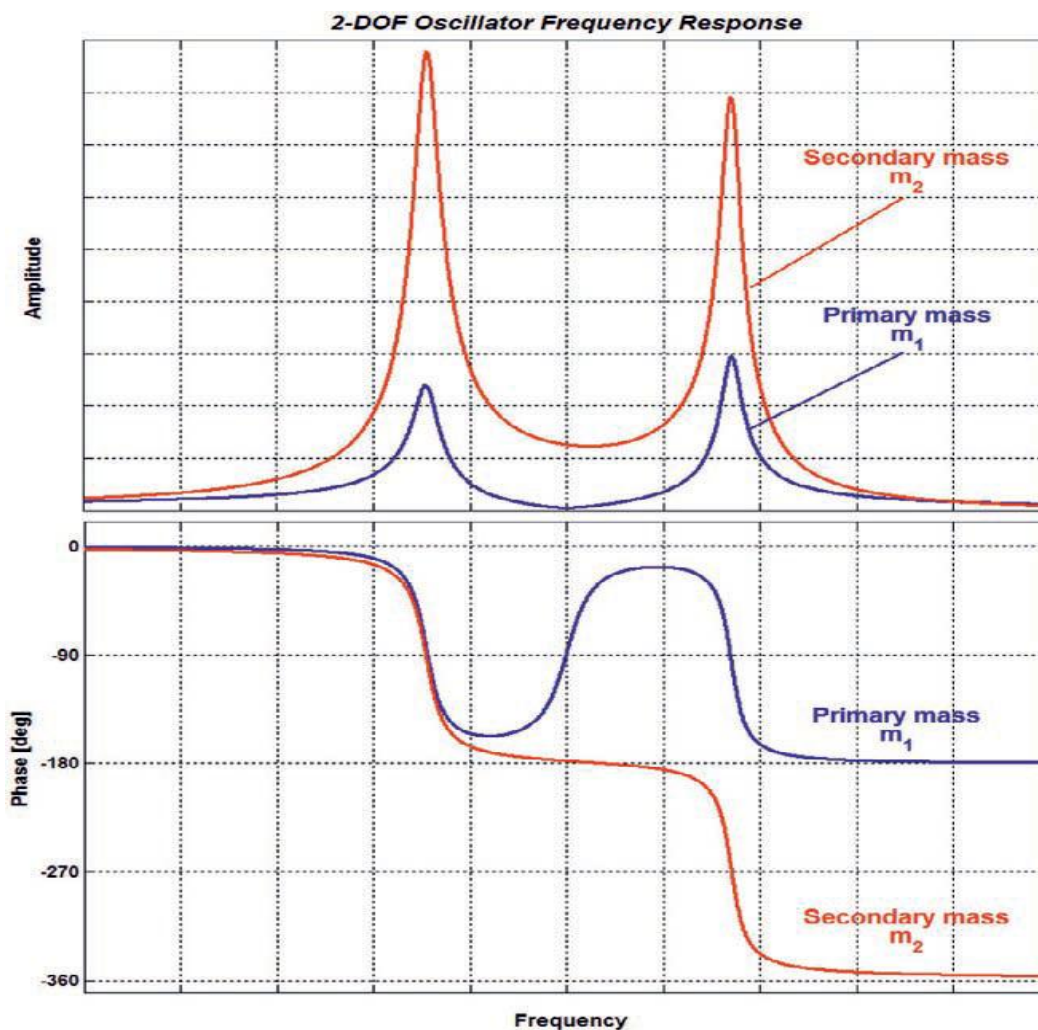
که μ نسبت جرم و γ نسبت فرکانس‌های تشدید سیستم جرم و فنر ایزوله شده با جرم‌های اولیه و ثانویه می‌باشد [۹۳].

وقتی نواسانگر در فرکانس تشدید جرم و فنر، با جرم ثانویه تحریک، شود، یعنی $\omega_d = \omega_p$ ، جرم ثانویه به طور کامل اثر حرکت جرم فعال (اولیه) را که نیروی F_d به آن اثر می‌کند را حذف می‌کند، مشابه جاذب ارتعاش، و دامنه نوسان جرم اولیه حداقل می‌گردد. این فرکانس، که از آن تقویت دینامیکی حداکثر بدست می‌آید را فرکانس ضد تشدید می‌نامند.

پاسخ‌های فرکانسی دامنه و فاز جرم‌های اولیه و ثانویه در تصویر (۲۱.۳)، نشان داده شده است. نتایج مهم زیر از این پاسخ فرکانسی بدست می‌آیند:

- یک ناحیه تخت در هر دو پاسخ فرکانسی دامنه و فاز جرم ثانویه بین دو فرکانس تشدید وجود دارد.
- هنگام عملکرد سیستم در ناحیه تخت، تغییرات فرکانس اعمالی اثر ناچیزی بر روی دامنه و فاز نوسان جرم ثانویه دارد.
- دامنه جرم ثانویه بطور قابل توجه از جرم اولیه بزرگتر است، به این مفهوم که جرم ثانویه ارتعاش جرم اولیه را تقویت می‌کند.

این واقعیت که انحراف و تغییرات در فرکانس عملکردی حداقل اثر را بر روی بهره و فاز را دارد همچنین به این معنا است که در ناحیه هموار، تغییرات پارامتر در سیستم که فرکانس طبیعی سیستم را انتقال می‌دهد، حداقل اثر را بر عملکرد سیستم دارد.



تصویر ۲۱.۳: پاسخ فرکانسی یک نوسانگر دو درجه آزادی

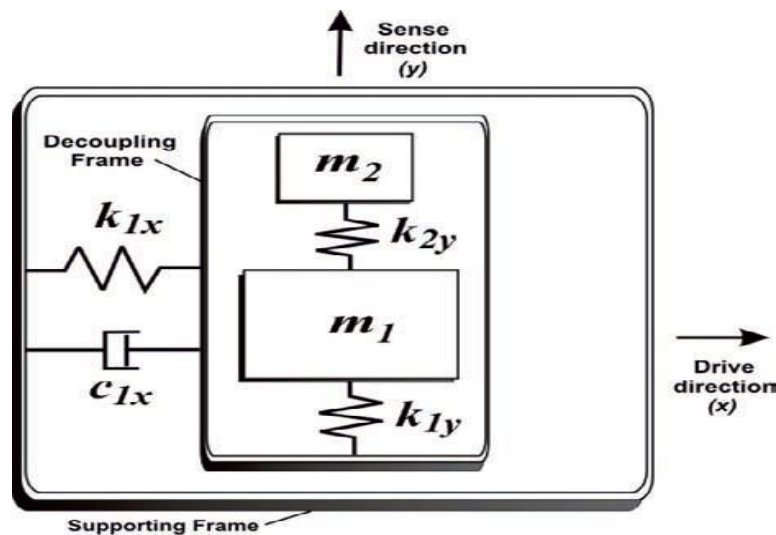
این مشخصات مقاوم در نوسانگر دو درجه آزادی در صورت استفاده در سیستم میکروژیروسکوپ می‌تواند مزیت‌های بسیاری ایجاد کند. در ادامه این بخش، ساختارهای سیستم ژيروسکوپ که ترکیبی از مکانیزم‌های دو درجه آزادی را شامل می‌شود به عنوان یک ایده جدید در طراحی و ساخت میکرو ژيروسکوپ مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۳-۲-۲- میکرو ژيروسکوپ سه درجه آزادی (3 - DOF) با مد- تشخیص دودرجه آزادی (2 - DOF):

در این نوع از معماری، برای سازه‌ی مد- تشخیص از نواسانگر دو درجه آزادی استفاده می‌شود و ناحیه مسطح در پاسخ فرکانسی مد- تشخیص بدست می‌آید. سیستم همانند ژيروسکوپ های ارتعاشی عادی با مد- تحریک یک درجه آزادی و در فرکانس تشدید آن کار می‌کند. این سیستم اجازه می‌دهد تا از تکنیک های کنترل مد- تحریک بخوبی استفاده کنیم تا بهره و فاز مقاوم در مد- تشخیص داشته باشیم.

سیستم دینامیکی ژيروسکوپ در کل سه درجه آزادی بوده که شامل دو درجه آزادی مد- تشخیص و یک درجه آزادی مد- تحریک می‌باشد. مد- تشخیص مطابق تصویر (۲۲.۳) از دو جرم نمونه تشکیل یافته است.

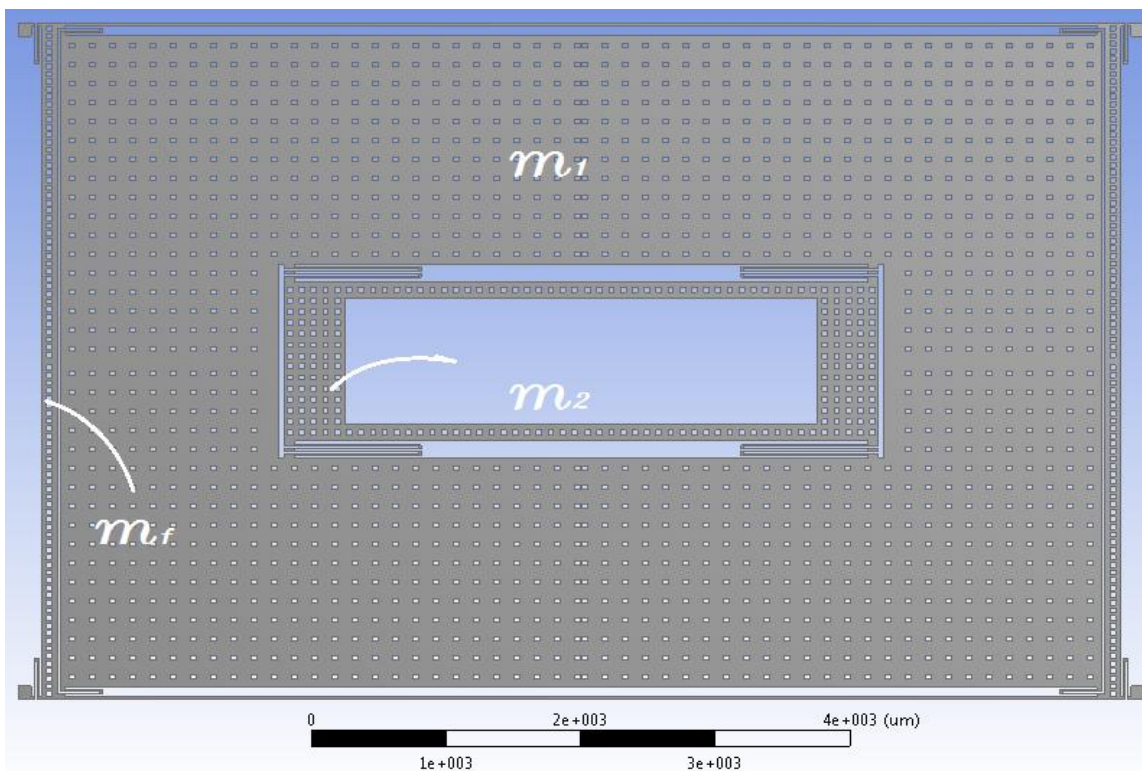
جرم اولیه m_1 آزاد است تا در هر دو جهت تشخیص و تحریک نوسان کند و در جهت تحریک، تحریک می‌شود. جرم ثانویه m_2 در جهت تحریک نسبت به جرم اولیه محدودیت حرکت دارد. بنابراین m_2 ، جرم ثانویه در نواسانگر دو درجه آزادی مد- تشخیص را تشکیل می‌دهد و بعنوان یک جاذب ارتعاش عمل می‌کند تا بطور دینامیکی نوسانات جرم m_1 را دفع نماید. m_1 و m_2 در جهت تحریک با هم نوسان می‌کنند و یک نوسانگر تشدیدی یک درجه آزادی را تشکیل می‌دهند.



تصویر ۲۲.۳: مدل جرم - فنر - دمپر متمرکز و سیستم پاسخ ژيروسکوپی مد 2 درجه آزادی برای نوسانگر مد- تشخیص. فرکانس تشدید مد- تحریک به گونه‌ای طراحی می‌شود که در مرکز ناحیه صاف مد- تشخیص قرار گیرد.

چون سازه ژيروسکوپ در جهت مد- تحریک بصورت یک نوسانگر یک درجه آزادی عمل می‌کند، پاسخ فرکانسی دستگاه در این مد دارای یک قله تشدید می‌باشد. دستگاه در مد- تحریک با استفاده از حلقه خود نوسانی و حلقه کنترل بهره اتوماتیک (AGC) در فرکانس تشدید عمل می‌کند و مانند سیستم های مرسوم، کنترل دامنه ارتعاش می‌کند.

در طراحی سازه ژيروسکوپ، برای دیکوپل سازی مکانیکی نوسانات جهت تحریک و تشخیص جرم m_1 از ساختار قابی استفاده می‌شود. ساختار قابی به حداقل سازی خطای تربیعی و نیروهای الکترواستاتیکی در مد- تشخیص کمک می‌کند. این اثرات نامطلوب در نتیجه عیوب محرک مد- تحریک ایجاد می‌شود. وقتی m_1 مطابق تصویر (۲۱.۵) در داخل قاب مد- تحریک m_f قرار می‌گیرد، نوسانات جهت تشخیص قاب مقید شده و نوسانات جهت تحریک بصورت بهینه طراحی و تنظیم می‌شوند.



تصوی ۲۳.۳: طرح اجرایی از سیستم دو درجه آزادی برای نوسانگر مد- تشخیص

دینامیک ژيروسکوپ :

در طراحی سازه ژيروسکوپ، برای دیکوپل سازی مکانیکی نوسانات جهت تحریک و تشخیص جرم m_1 از ساختار قابی استفاده می شود. ساختار قابی به حداقل سازی خطای تربیعی و نیروهای الکترواستاتیکی در مد- تشخیص کمک می کند. این اثرات نامطلوب در نتیجه عیوب محرک مد- تحریک ایجاد می شود. وقتی m_1 مطابق تصویر (۲۱.۵) در داخل قاب مد- تحریک قرار می گیرد، نوسانات جهت تشخیص قاب مقید شده و نوسانات جهت تحریک بصورت بهینه طراحی و تنظیم می شوند.

با اجرای ساختار قابی تحریک و قیود بوجود آمده، مشخصات دینامیک سه درجه آزادی سیستم با دو درجه آزادی مد- تشخیص به این صورت تعیین می گردد : سازه در مقابل حرکات خارج از صفحه سخت است، بردار موقعیت قاب گیرکوپل ساز صرفاً در جهت تحریک محدود می شود، نوسانات خالص جرم m_1 نسبت به قاب دیکوپل کننده در جهت تشخیص می باشد، m_1 و m_2 در جهت تحریک با هم حرکت می کنند و m_2 نسبت به m_1 به طور خالص در جهت تشخیص نوسان می کند. بنابراین معادلات حرکت تجزیه شده m_1 و m_2 در جهات تحریک و تشخیص بصورت زیر خواهند بود :

$$\begin{aligned} (m_1 + m_2 + m_f) \ddot{x}_1 + c_{1x} \dot{x}_1 + k_{1x} x_1 &= (m_1 + m_2 + m_f) \Omega_z^2 x_1 + F_d(t) & (10.3) \\ m_1 \ddot{y}_1 + c_{1y} \dot{y}_1 + k_{1y} y_1 &= k_{2y} (y_2 - y_1) + m_1 \Omega_z^2 y_1 - 2m_1 \Omega_z \dot{x}_1 - m_1 \dot{\Omega}_z x_1 \\ m_2 \ddot{y}_2 + c_{2y} \dot{y}_2 + k_{2y} y_2 &= k_{2y} y_1 + m_2 \Omega_z^2 y_2 - 2m_2 \Omega_z \dot{x}_1 - m_2 \dot{\Omega}_z x_1 \end{aligned}$$

که Ω_z سرعت زاویه ای محور Z، m_f جرم قاب دیکوپل کننده و $F_d(t)$ نیروی محرکه الکترواستاتیک در فرکانس ω_d می باشد. نیروی کریولیس که در جهت تشخیص، m_1 و m_2 را تحریک می کند $2m_1 \Omega_z \dot{x}_1$ می باشد و پاسخ کریولیس m_2 در جهت تشخیص γ_2 برای اندازه گیری سرعت زاویه ای، آشکار سازی می گردد.

پاسخ کریولیس :

با فرض ثابت بودن سرعت زاویه ای ورودی و محدود شدن آن به اندازه های بسیار کوچک نسبت به فرکانس اعمالی به سیستم ژيروسکوپ، دینامیک دو درجه آزادی مد- تشخیص بصورت زیر ساده می شود.

$$m_1 \ddot{y}_1 + c_{1y} \dot{y}_1 + (k_{1y} + k_{2y}) y_1 = k_{2y} y_2 - 2m_1 \Omega_z \dot{x}_1 \quad (11.3)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 + c_{2y} \dot{y}_2 + k_{2y} y_2 = k_{2y} y_1 - 2m_2 \Omega_z \dot{x}_1$$

بر اساس تحلیل های آدام اسکافیلد فرض می شود که فرکانس عملکردی در نقطه میانی بین دو فرکانس قله مد تشخیص یعنی ω_{yip} و ω_{yap} قرار گیرد :

$$\omega_{yi,ap} = \omega_d \mp \frac{\Delta}{2} \quad (12.3)$$

که ω_d فرکانس عملکردی و Δ فضای بین دو قله مد- تشخیص است که بصورت $\Delta = \omega_{ap} - \omega_{ip}$ تعریف می شود. بنابراین سه فرکانس ویژه سیستم تنها با استفاده از فرکانس عملکردی ω_d و فاصله بین قله ای مد- تشخیص Δ بیان می شود.

با تعریف پارامتر های ساختاری مد- تشخیص بصورت زیر، موقعیت مدهای تشخیص هم فاز و ناهم فاز بوسیله حل معادله مقدار ویژه دو درجه آزادی مطابق رابطه (14.3) محاسبه می شود.

$$\omega_a^2 = \frac{k_{1y} + k_{2y}}{m_1} \quad \& \quad \omega_b^2 = \frac{k_{2y}}{m_2} \quad \& \quad \omega_c^2 = \frac{k_{2y}}{\sqrt{m_1 m_2}} \quad \& \quad \mu^2 = \frac{m_2}{m_1} \quad (13.3)$$

$$\omega_{ip,ap}^2 = \frac{1}{2} \left(\omega_a^2 + \omega_b^2 \pm \sqrt{\omega_a^4 + \omega_b^2 - 2\omega_a^2 \omega_b^2 + 4\mu^2 \omega_b^2} \right) \quad (14.3)$$

بهره مکانیکی و پهنای باند مد- تشخیص دو درجه آزادی ژيروسکوپ وابسته به ناحیه دامنه ثابت مابین قله های پاسخ فرکانسی مد- تشخیص دو درجه آزادی است. چون این ناحیه غیر تشدیدی است، کران بالای بهره و کران پایین پهنای باند را می توان با صفر قرار دادن میرایی سیستم تعیین کرد. با شروع از معادلات حرکت مد- تشخیص، توابع تبدیل بصورت زیر بدست می آیند :

$$H_1(s) = \frac{s^2 + (1 + \mu^2)\omega_b^2}{s^4 + (\omega_a^2 + \omega_b^2)s^2 - \mu^2\omega_b^2 + \omega_a^2\omega_b^2} \quad (15.3)$$

$$H_2(s) = \frac{s^2 + \omega_a^2 + \omega_b^2}{s^4 + (\omega_a^2 + \omega_b^2)s^2 - \mu^2\omega_b^2 + \omega_a^2\omega_b^2} \quad (16.3)$$

که ورودی شتاب کریولیس اعمال شده بر هر دو جرم است و خروجی به ترتیب جابجایی های جرم های تشخیص m_1 و m_2 با فرض صفر بودن میرایی سیستم است.

بهرحال بهره مکانیکی و پهنای باند دستگاه تنها بستگی به جرم m_2 دارد که برای آشکار سازی مورد استفاده قرار می گیرد. با جایگذاری $s = j\omega$ و بدست آوردن مقدار مطلق آن بهره جرم m_2 مطابق عبارت زیر بدست می آید.

$$G_2(\omega) = \frac{\omega^2 - 2\omega_d^2 - \frac{\Delta^2}{2}}{\left(\omega^2 - \left(\omega_d - \frac{\Delta}{2}\right)^2\right)^2 \left(\omega^2 - \left(\omega_d + \frac{\Delta}{2}\right)^2\right)^2} \quad (17.3)$$

بهره مد- تشخیص G_y ، به عنوان دامنه جرم m_2 در فرکانس عملکردی تعریف می شود، $G_y(\omega_d)$ ، به طور خاص در نهایت علاقمندیم تا ضریب تقویت دستگاه تعیین گردد. با جایگذاری $\omega = \omega_d$ در رابطه (17.5) عبارت زیر بدست می آید.

$$G_y(\omega_d) = \frac{\omega_d^2 + \frac{\Delta^2}{4}}{\left(\omega_d^2 - \frac{\Delta^2}{4}\right)\Delta^2} \quad (18.3)$$

اگر فرض شود که محدوده اطراف قله بسیار کوچکتر از فرکانس عملکردی باشد (بطور معمول در سیستم های دو درجه آزادی)، $\omega_d \gg \Delta$ ، در اینصورت عبارت فوق را می توان به فرم ساده زیر نشان داد :

$$G_y(\omega_d) \approx \frac{1}{\Delta^2} \quad (19.3)$$

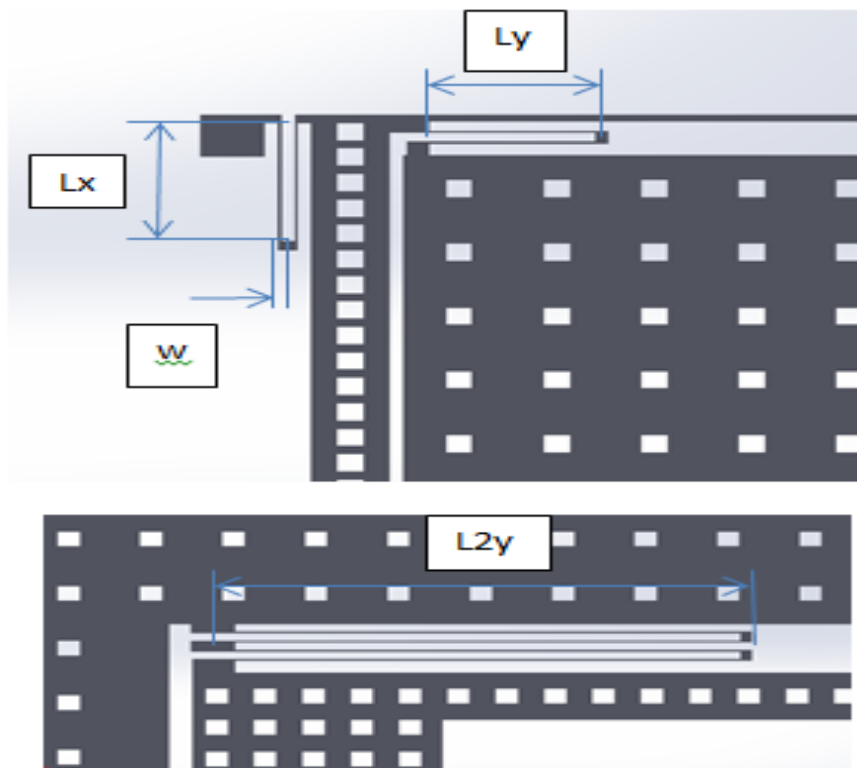
بنابراین از رابطه (۱۶.۳) معلوم است که اصلی ترین پارامتر تاثیر گذار بر روی بهره مد- تشخیص در ژيروسکوپ با مد- تشخیص چند درجه آزادی، محدوده فضای بین قله ها است. اندازه کوچک این ناحیه صرفنظر از اندازه فرکانس عملکردی منجر به مقادیر بزرگتر بهره می گردد.

اگر فرض کنیم که حرکت محرک سینوسی با دامنه ثابت x تنظیم شود، دامنه پاسخ مد- تشخیص برای یک سرعت زاویه ای ورودی Ω_z مطابق رابطه زیر می باشد.

$$y_0 = \frac{2x_0\omega_d}{\Delta^2} \Omega_z \quad (20.3)$$

طراحی میکروژيروسکوپ با مد- تشخیص دو درجه آزادی :

در این بخش به توصیف اجرای طراحی مکانیکی میکروژيروسکوپ با مد- تشخیص دو درجه آزادی (۲-DOF) می پردازیم. با توجه شمای کلی سیستم تعلیق این ژيروسکوپ در تصویر (۲۲.۳) مشخصات هندسی و فیزیکی ژيروسکوپ به شرح جدول (۶.۳) می باشد.



تصویر ۲۴.۳: پارامترهای طراحی

جدول ۶.۳

L_x	$278 \mu m$
L_{1y}	$256 \mu m$
L_{2y}	$920 \mu m$
t	$40 \mu m$
w	$5 \mu m$
m_1	$2.952 \times 10^{-6} kg$
m_2	$1.848 \times 10^{-7} kg$
m_f	$1.43 \times 10^{-7} kg$
جنس	سیلیکون انیزوتروپیک

اجزای تعلیق از تیرهای دو-لا برای مد- تحریک و و دو-لای دوتایی برای مد- تشخیص تشکیل یافته است. تیرهای دولا محدودیت غیرخطی شدن و تحت بار مرکزی واقع شدن در تیرهای یکسرگیردار را مرتفع کرده و باعث ایجاد مدهای نوسانی مستقل می‌شوند. یکی از معایب این نوع از تیرها پایین بودن سختی محوری آنها به

علت فاصله ایجاد شده بین محور دو تیر می‌باشد که برای رفع آن در مواضع مورد نیاز از تیرهای دو- لای دوتایی که دارای تقارن هستند استفاده می‌شود. برای سختی اجزای تعلیق ذکر شده در میکرو ژيروسکوپ داریم :

$$k_{1x} = 4 \left(\frac{Etw^3}{2L_{1x}^3} \right) = 61.2N / m \quad (21.3)$$

$$k_{1y} = 4 \left(\frac{Etw^3}{2L_{1y}^3} \right) = 78.4N / m \quad (22.3)$$

$$k_{2y} = 4 \left(\frac{Etw^3}{L_{2y}^3} \right) = 3.36N / m \quad (23.3)$$

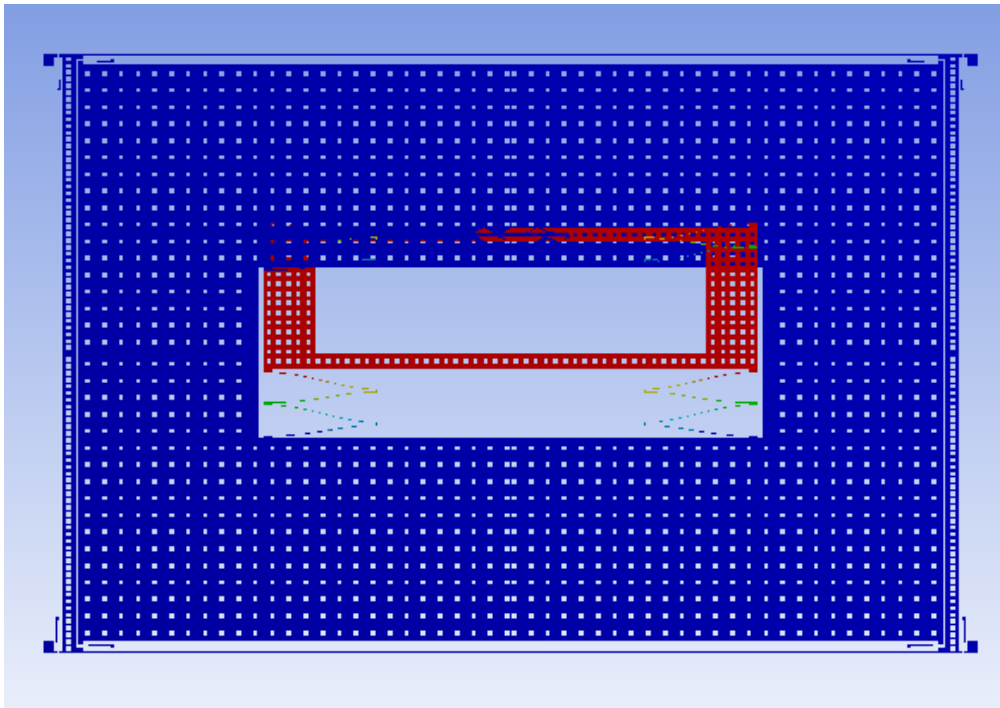
آنالیز مودال و هارمونیک سیستم ژيروسکوپ با مد- تشخیص دو درجه آزادی :

با بکاربردن شرایط مرزی ثابت در محل تکیه گاه‌های مدل و انجام تحلیل مودال ، فرکانس‌های طبیعی سیستم بدست می‌آیند. در جدول زیر سه فرکانس طبیعی اول سیستم و مقایسه آنها با مقادیر تحلیلی نشان داده شده‌اند.

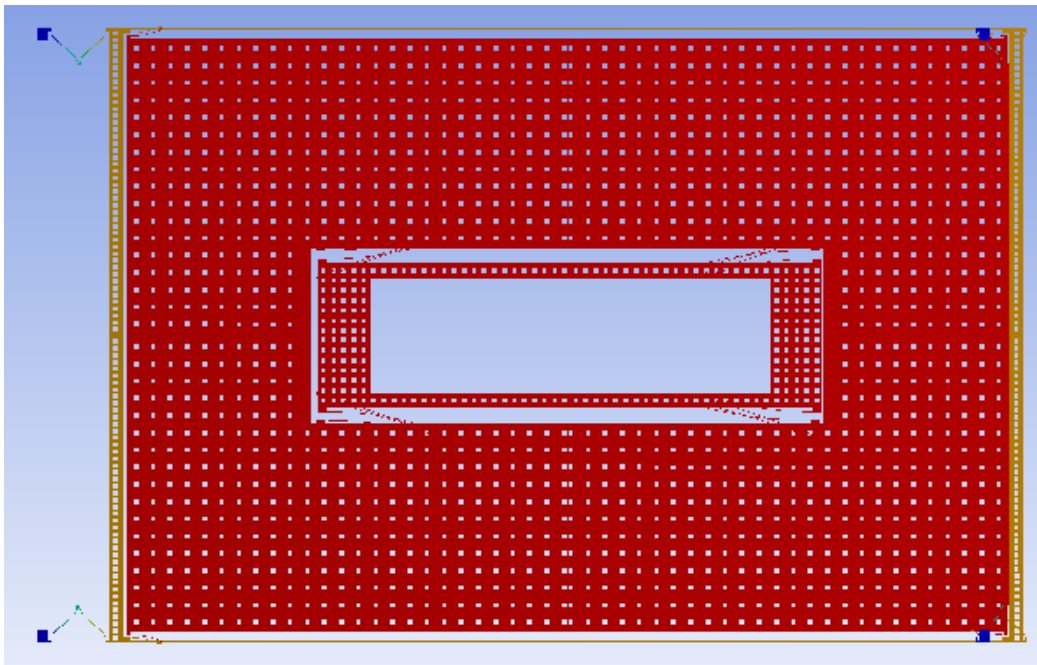
جدول ۷.۳

فرکانس‌ها	f_{ip} [Hz]	f_d [Hz]	f_{ap} [Hz]
FEM	۳۳۴.۱۹	۷۰۳	۸۶۳.۸۸
نئوری	۶۴۳	۶۹۰	۸۶۴.۷۳

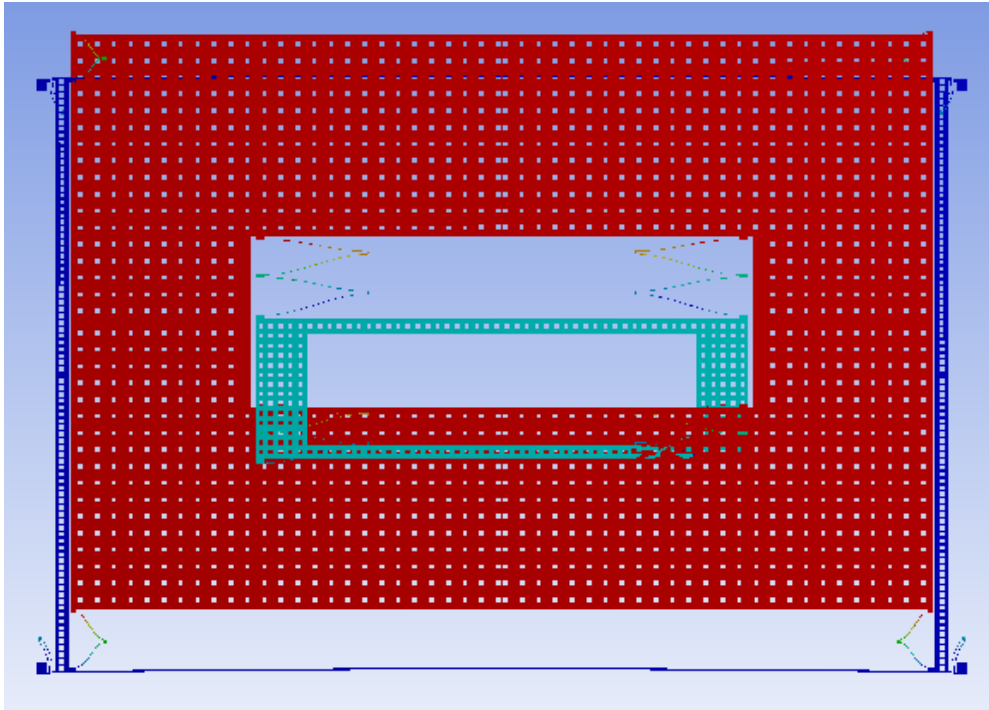
که فرکانس‌های طبیعی اول و سوم به ترتیب مربوط به مدهم‌فاز و نهم‌فاز نوسانگر جهت‌تشخیص دودرجه‌آزادی می‌باشند. فرکانس دوم نیز فرکانس طبیعی جهت تشخیص و یا فرکانس عملکردی می‌باشد و مطابق انتظار بخوبی در ناحیه هموار مابین دو فرکانس تشدید مد- تشخیص واقع شده است. در تصاویر زیر شکل مدهای این سه حالت نوسانی نشان داده شده است.



تصویر ۲۵.۳: شکل مد اول، نوسان هم‌فاز مد - تشخیص



تصویر ۲۶.۳: شکل مد دوم، نوسان مد - تحریک

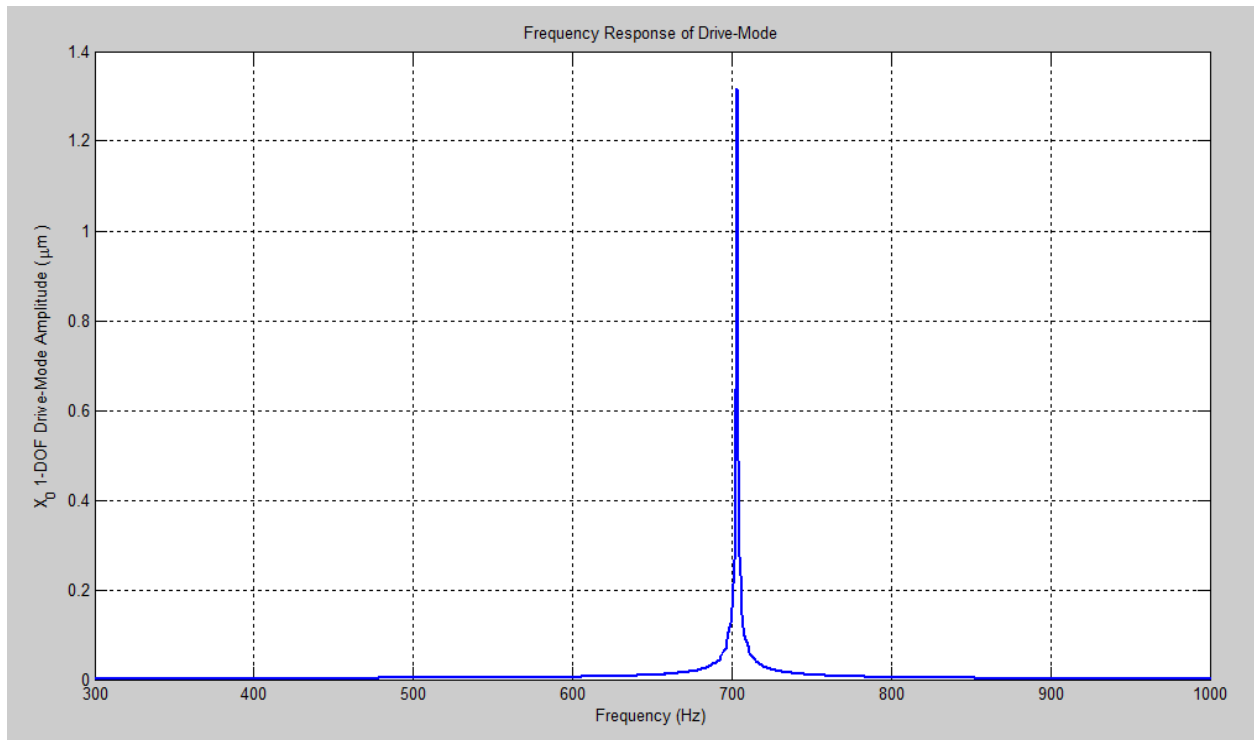


تصویر ۲۷.۳: شکل مد سوم، نوسان ناهم فاز مد - تشخیص

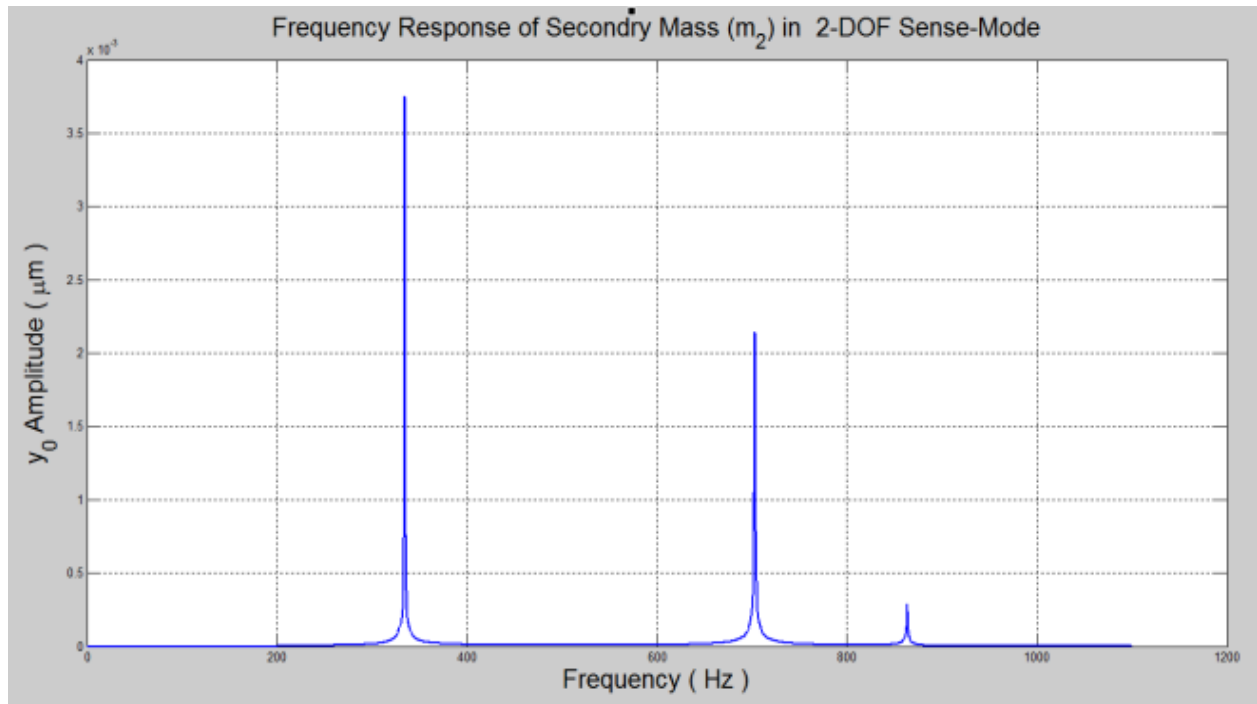
برای تعیین عملکرد میکروژیروسکوپ، پاسخ فرکانسی سیستم را تحت بارگذاری نیروی هارمونیک الکترواستاتیکی و ورودی سرعت زاویه‌ای بررسی می‌کنیم. در جدول زیر مقادیر بارگذاری ذکر شده‌اند.

جدول ۸.۳

Ω_z [deg/sec]	F. [μN]
۱۰۰	۰.۱



تصویر ۲۸.۳: پاسخ فرکانسی مد-تحریک یک درجه آزادی

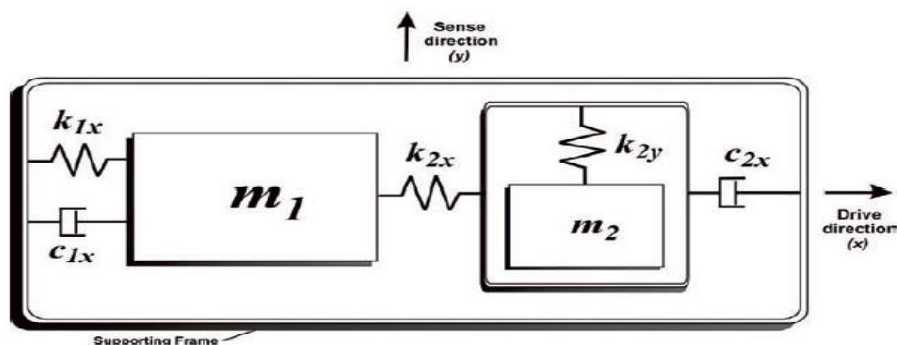


تصویر ۲۹.۳: پاسخ فرکانسی جرم m_2 در مد-تشخیص دودرجه آزادی

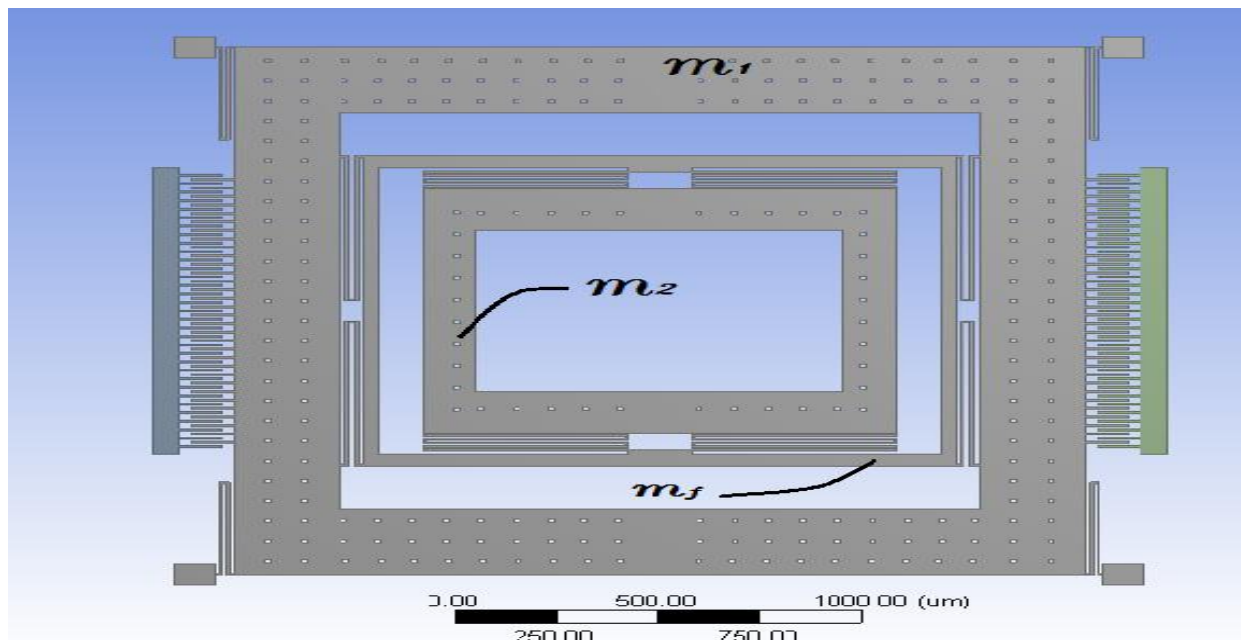
در تصویر بالا پاسخ کریولیس جرم m_2 به سرعت زاویه‌ای نشان داده شده است، قله ایجاد شده در این پاسخ مابین فرکانس های تشدید مد- تشخیص در ناحیه غیر تشدید مسطح واقع شده و از این جهت مقدار آن نسبت به تغییرات و انحرافات ساختاری و محیطی غیرحساس می‌باشد، در نتیجه عملکرد پایدار و مقاومی خواهیم داشت.

۳-۲-۳- میکرو ژيروسکوپ سه درجه آزادی (3 - DOF) با مد- تحریک دودرجه آزادی (2 - DOF):

در این سیستم، ژيروسکوپ سه درجه آزادی (3-DOF) از سه جرم متصل به هم و یک درجه آزادی در مد- تشخیص و دو درجه آزادی در مد- تحریک تشکیل می‌شود (تصویر ۳۰.۳)



تصویر ۳۰.۳: مدل متمرکز جرم - فنر - دمپر برای سیستم دو درجه آزادی برای نوسانگر مد- تحریک.



تصویر ۳۱.۳: طرح اجرایی از سیستم دو درجه آزادی برای نوسانگر مد- تحریک.

جرم m_1 بطور الکترواستاتیکی توسط محرک‌های شانه‌ای صرفاً در جهت تحریک (محور- x) به ارتعاش در می‌آید. جرم m_2 قادر است در هر دو جهت تحریک (محور- x) و تشخیص (محور- y) نوسان کند. ترکیبی از جرم‌های m_1 ، m_2 و m_f در جهت تحریک، نوسانگر دو درجه‌آزادی (2-DOF) را تشکیل می‌دهند و جرم m_2 در جهت تشخیص یک نوسانگر یک درجه‌آزادی (1-DOF) را تشکیل می‌دهد. جرم m_1 ، جرم فعال و جرم $m_2 + m_f$ جرم غیرفعال را در ژيروسکوپ تشکیل می‌دهد. در اینجا نیز جرم غیرفعال عملکرد جاذب ارتعاش را از خود نشان می‌دهد و از آنجایی که الکترودهای تشخیص در به جرم m_2 متصل هستند تقویت دینامیکی حاصل شده باعث بهبود و تقویت دامنه پاسخ مد- تشخیص می‌گردد. در طراحی نشان داده در تصویر ۳۱.۳ نوسانگرهای مد- تحریک و تشخیص بطور مکانیکی توسط قاب‌های دیکوپلینگ تک بعدی (جرم m_f و تیرهای تعلیقی) دیکوپل شده‌اند. با استفاده از این سیستم تعلیق مستقل از کوپلینگ دینامیکی بین مدهای تحریک و تشخیص جلوگیری شده و از عدم انتقال ناهماهنگی از مدی به مد دیگر مطمئن می‌شویم.

ژيروسکوپ ارائه شده در فرکانس تشدید مد- تشخیص عمل خواهد کرد. نوسانگر دو درجه‌آزادی (2-DOF) مد- تحریک در پاسخ فرکانسی خود دو قله تشدید با یک ناحیه هموار بین آن دو دارد. این ناحیه همانند قبل معروف به ناحیه فرکانسی عملکردی است که دامنه پاسخ حساسیت کمتری به تغییرات پارامتری دارد. فرکانس تشدید مد- تشخیص یک درجه‌آزادی (1-DOF) به گونه‌ای طراحی می‌شود تا در ناحیه فرکانسی عملکردی قرار گرفته و در نتیجه پاسخ مقاوم و پایداری داشته باشد.

در تصویر (۲۷.۳) مدل جرم متمرکز سه درجه‌آزادی میکروژيروسکوپ نشان داده شده است. دینامیک ژيروسکوپ در چارچوب غیر اینرسیال متصل به ژيروسکوپ بدست می‌آید. برای استخراج روابط دینامیکی فرض می‌کنیم، جرم‌ها صلب هستند، سازه ژيروسکوپ درمقابل حرکات خارج از صفحه سخت باشد، جرم m_1 صرفاً در جهت تحریک ارتعاش کند، جرم m_2 و m_f باهم در جهت تحریک حرکت کنند، جرم m_2 نسبت به m_f بطور خالص در جهت تشخیص ارتعاش داشته باشد.

معادلات حرکت برای جرم فعال m_1 ، جرم غیرفعال $m_2 + m_f$ و جرم تشخیص و سرعت زاویه‌ای ورودی عبارتند از :

$$\begin{aligned}
m_1 \ddot{x}_1 + c_{1x} \dot{x}_1 + k_{1x} x_1 &= k_{2x} (x_2 - x_1) + m_1 \Omega_z^2 x_1 + F_d(t) \\
(m_2 + m_f) \ddot{x}_2 + c_{2x} \dot{x}_2 + k_{2x} (x_2 - x_1) &= (m_2 + m_f) \Omega_z^2 x_2 \\
m_2 \ddot{y}_2 + c_{2y} \dot{y}_2 + k_{2y} y_2 &= m_2 \Omega_z^2 y_2 - 2m_2 \Omega_z \dot{x}_2 - m_2 \dot{\Omega}_z x_2
\end{aligned} \tag{۲۴.۳}$$

با فرض ثابت و کوچک بودن سرعت زاویه‌ای ورودی معادلات به شکل زیر ساده می‌شوند.

$$\begin{aligned}
m_1 \ddot{x}_1 + c_{1x} \dot{x}_1 + k_{1x} x_1 &= k_{2x} (x_2 - x_1) + F_d(t) \\
(m_2 + m_f) \ddot{x}_2 + c_{2x} \dot{x}_2 + k_{2x} (x_2 - x_1) &= 0 \\
m_2 \ddot{y}_2 + c_{2y} \dot{y}_2 + k_{2y} y_2 &= -2m_2 \Omega_z \dot{x}_2
\end{aligned} \tag{۲۵.۳}$$

پاسخ حالت ماندگار مد- تحریک دو درجه‌آزادی به نیروی هارمونیک اعمال شده بر روی جرم فعال بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$x_{10} = \frac{F_0}{k_{1x}} \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{2x}} \right)^2 + j\omega \frac{c_{2x}}{k_{2x}} \right) \left[\left\{ 1 + \frac{k_{2x}}{k_{1x}} - \left(\frac{\omega}{\omega_{1x}} \right)^2 + j\omega \frac{c_{1x}}{k_{1x}} \right\} \left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{2x}} \right)^2 + j\omega \frac{c_{2x}}{k_{2x}} \right\} - \frac{k_{2x}}{k_{1x}} \right]^{-1} \tag{۲۶.۳}$$

$$x_{20} = \frac{F_0}{k_{1x}} \left[\left\{ 1 + \frac{k_{2x}}{k_{1x}} - \left(\frac{\omega}{\omega_{1x}} \right)^2 + j\omega \frac{c_{1x}}{k_{1x}} \right\} \right]^{-1} \left[\left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{2x}} \right)^2 + j\omega \frac{c_{2x}}{k_{2x}} \right\} - \frac{k_{2x}}{k_{1x}} \right]^{-1} \tag{۲۷.۳}$$

که $\omega_{1x} = \sqrt{k_{1x}/m_1}$ و $\omega_{2x} = \sqrt{k_{2x}/(m_f + m_r)}$ به ترتیب فرکانس‌های تشدید سیستم‌های جرم فعال و غیرفعال- فنر ایزوله شده هستند. وقتی فرکانس تحریک، $\omega_d = \omega_{2x}$ ، حرکت جرم غیرفعال دقیقاً نیروی وارده بر جرم فعال را حذف کرده و حداکثر تقویت دینامیکی حاصل می‌شود. چون نیروی کریولیس $F_C = 2m\Omega_z \dot{x}_r$ مستقیماً متناسب با نوسانات جرم غیرفعال در جهت تحریک است، دامنه نوسان بزرگ این جرم منجر به افزایش حساسیت وسیله در جهت تشخیص می‌گردد.

با حل معادله مقدار ویژه، فرکانس‌های طبیعی مد- تحریک به فرم رابطه (۲۸.۵) محاسبه می‌شود [۱].

$$f_{x_{ip,ap}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \mu_x + \frac{1}{\gamma_x^2} \pm \sqrt{\left(1 + \mu_x + \frac{1}{\gamma_x^2} \right)^2 - \frac{4}{\gamma_x^2}} \right)} \left(\frac{\omega_{2x}}{2\pi} \right) \quad (28.3)$$

که

$$\omega_{1x} = \sqrt{\frac{k_{1x}}{m_1}} \quad (29.3)$$

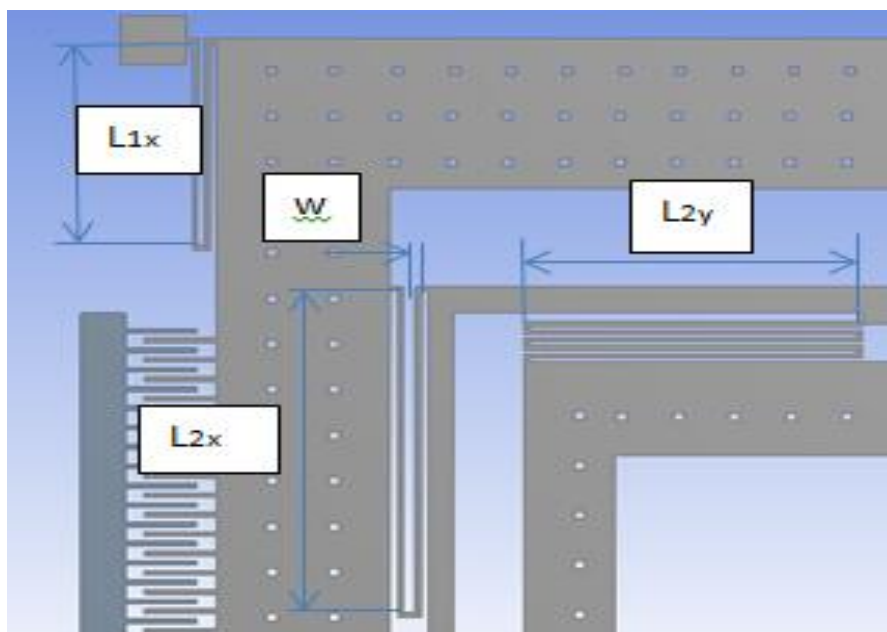
$$\omega_{2x} = \sqrt{\frac{k_{2x}}{(m_2 + m_f)}} \quad (30.3)$$

$$\gamma_x = \frac{\omega_{2x}}{\omega_{1x}} \quad (31.3)$$

$$\mu_x = \frac{(m_2 + m_3)}{m_1} \quad (32.3)$$

طراحی میکروژیروسکوپ با مد- تحریک دو درجه آزادی :

در این بخش به توصیف اجرای طراحی مکانیکی میکروژیروسکوپ با مد- تحریک دو درجه آزادی (۲-DOF) می‌پردازیم. با توجه شمای کلی سیستم تعلیق این ژيروسکوپ در تصویر (۳۱.۳) مشخصات هندسی و فیزیکی ژيروسکوپ به شرح جدول (۹.۳) می‌باشد.



تصویر ۳۲.۳ : پارامترهای طراحی

جدول ۹.۳

L_{1x}	$410 \mu m$
L_{2x}	$650 \mu m$
L_{2y}	$502 \mu m$
t	$20 \mu m$
w	$8 \mu m$
m_1	$3.86 \times 10^{-7} kg$
m_2	$1.346 \times 10^{-7} kg$
m_f	$4.8 \times 10^{-8} kg$
E_{Nickel}	$214 Gpa$
ν_{Nickel}	0.31
ρ_{Nickel}	$8908 kg/m^3$

در طراحی این ژيروسکوپ برای تشکیل اجزاء تعلیق مقاوم و مستقل از هشت تیر دو-لا برای مد- تحریک و چهار تیر پنج- لا برای مد- تشخیص استفاده می‌شود. بنابراین برای سختی اجزای تعلیق داریم:

$$k_{1x} = 4 \left(\frac{Etw^3}{2L_{1x}^3} \right) = 63.59 N / m \quad (33.3)$$

$$k_{2x} = 4 \left(\frac{Etw^3}{2L_{2x}^3} \right) = 15.96 N / m \quad (34.3)$$

$$k_{2y} = \frac{4}{5} \left(\frac{Etw^3}{L_{2y}^3} \right) = 13.8 N / m \quad (35.3)$$

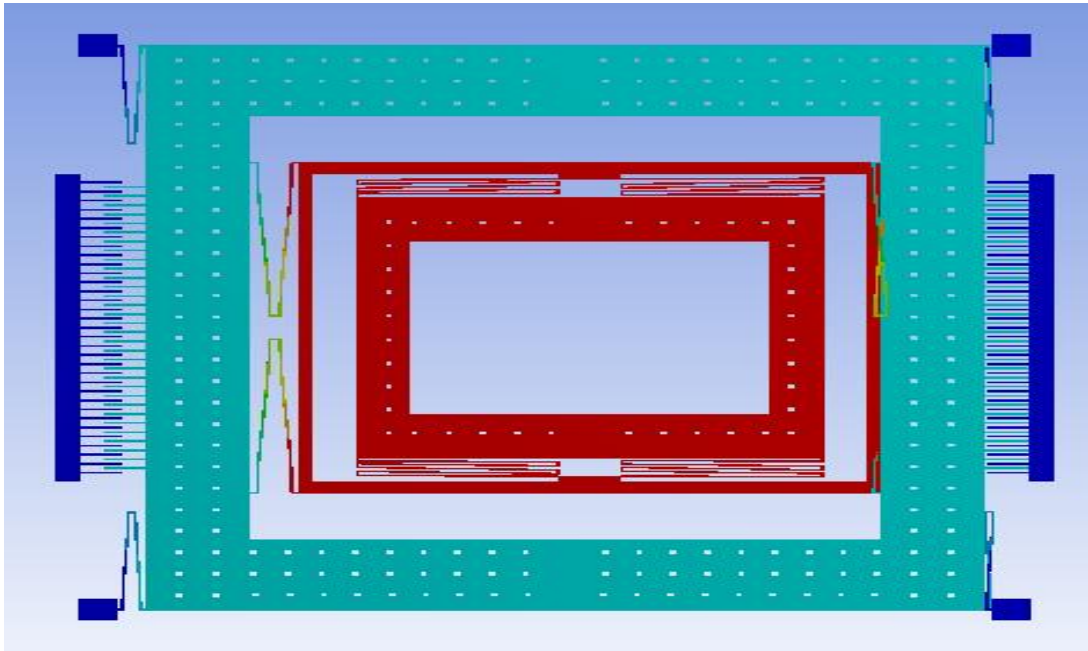
آنالیز مودال و هارمونیک سیستم ژيروسکوپ با مد- تحریک دو درجه آزادی:

برای این سیستم نیز مانند سیستم قبل آنالیز مودال را انجام می‌دهیم با این تفاوت که در این مدل فرکانس‌های تشدید هم‌فاز و ناهم‌فاز در نوسانگر جهت تحریک واقع می‌شود و نیز ناحیه مسطح فرکانسی عملکردی در پاسخ فرکانسی مد-تحریک قرار می‌گیرد. در این سیستم عملکرد تشدید در طرف مد- تشخیص واقع شده و همانطور که نتایج نشان می‌دهند فرکانس طبیعی مد- تشخیص یک درجه‌آزادی مابین دو فرکانس طبیعی مد- تحریک واقع می‌گردد و در نتیجه پاسخ نسبت به تغییرات دامنه مد - تحریک غیر حساس می‌شود و این موضوع پایداری و مقاومت سیستم را به همراه دارد. نتایج و مقایسه آنها در جدول زیر آمده است [۲].

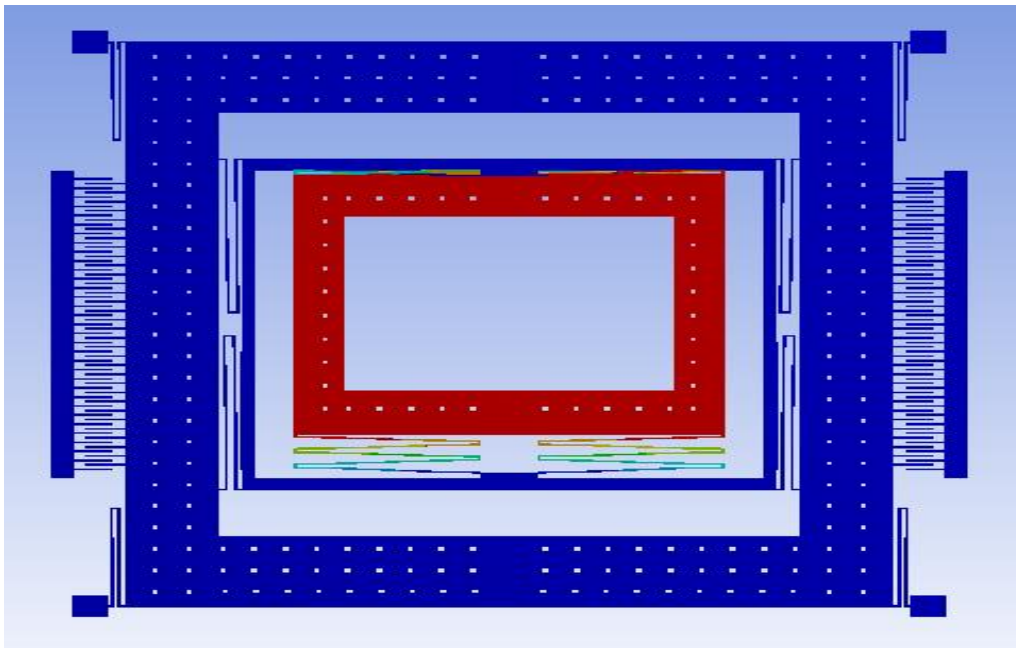
جدول ۱۰.۳

فرکانس‌ها	f_{ip} [Hz]	f_d [Hz]	f_{ap} [Hz]
FEM	۱۲۷۹	۱۸۳۲	۲۴۰۹
تئوری	۱۱۶۰	۱۶۳۹	۲۳۴۰
شبیه سازی سطحی	۱۰۴۶	۱۴۰۷	۲۰۴۲
تجربی	۷۵۴	۱۸۶۸	۲۱۷۰

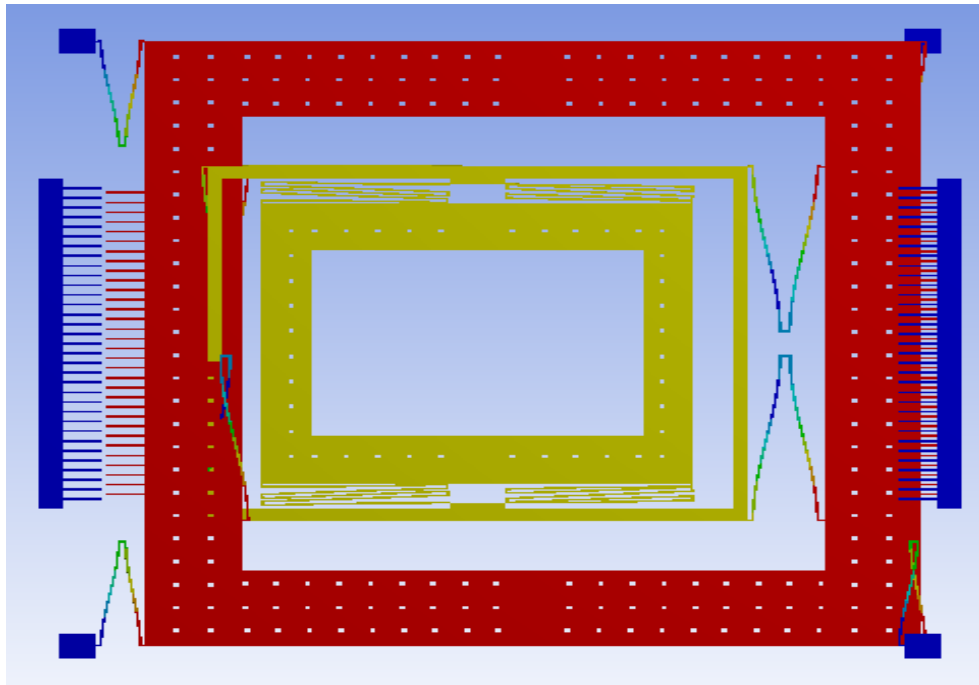
در تصاویر زیر شکل مدهای این سه حالت نوسانی نشان داده شده است.



تصویر ۳۳.۳: شکل مد اول، نوسان هم‌فاز مد - تحریک

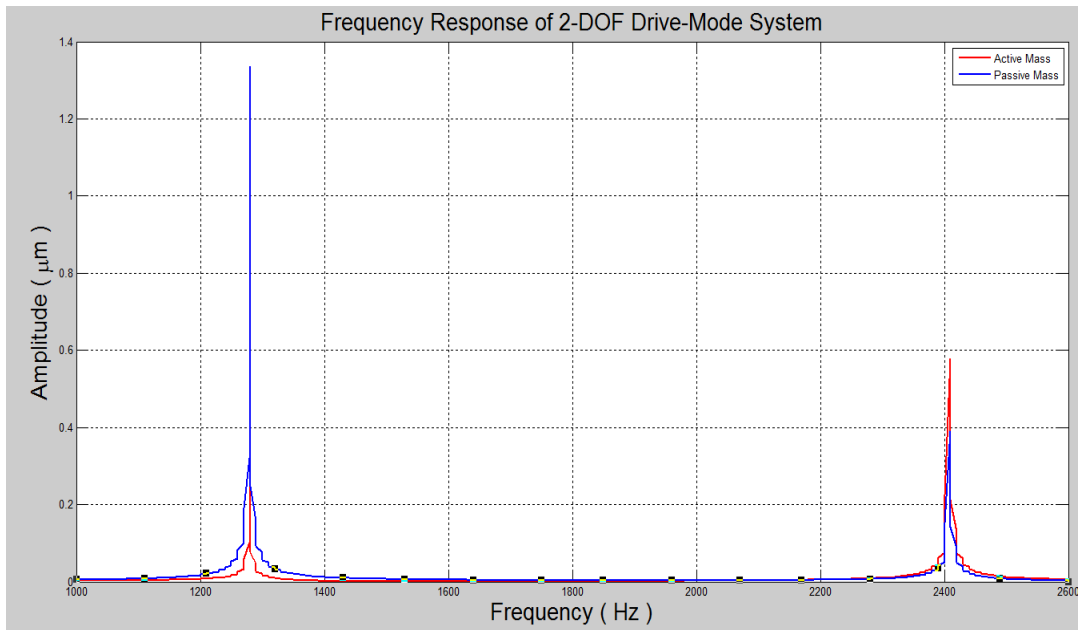


تصویر ۳۴.۳: شکل مد دوم، نوسان مد - تشخیص

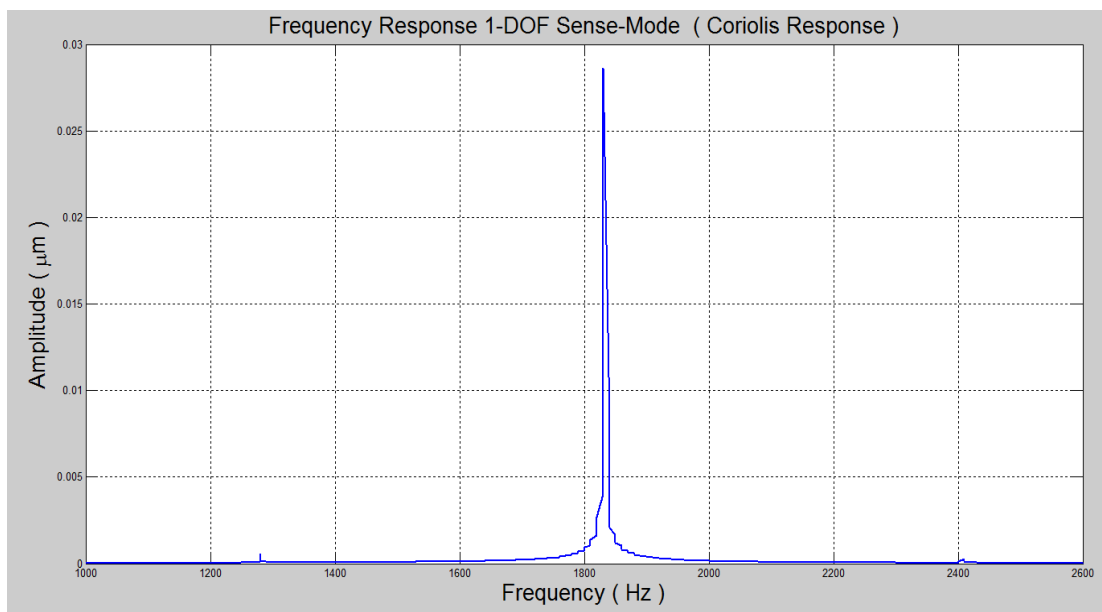


تصویر ۳۵.۳: شکل مد سوم، نوسان ناهم فاز مد- تحریک

حداکثر مقاومت به تغییرات پارامتری در سیستم با طراحی عملکرد نوسانگر مد- تشخیص در ناحیه بین دو قله تشدید مد- تحریک دو درجه آزادی می باشد. در این ناحیه بهره سیستم حساسیت کمتری نسبت به تغییرات پارامتری از خود نشان می دهد. منطقه وسیع عملکردی مابین دو قله تشدید باعث می شود تا نیازی به سیستم های کنترل و فیدبک دار جهت جبران سازی معایب تولید نامطلوب نداشته باشیم. این معایب در اثر عدم تقارن ساختاری در سیستم های تعلیق و جدایش فرکانس های تشدید بوجود می آیند. در تصویر زیر پاسخ کریولیس جرم m_2 به سرعت زاویه ای نشان داده شده است، قله ایجاد شده در این پاسخ مابین فرکانس های تشدید مد- تحریک در ناحیه غیر تشدیدی مسطح واقع شده و از این جهت مقدار آن نسبت به تغییرات و انحرافات ساختاری و محیطی غیر حساس می باشد. نمودار زیرهای پاسخ ژيروسکوپ و ناحیه عملکرد آن را به خوبی نشان می دهند.



تصویر ۳۶.۳: پاسخ فرکانسی مد-تحریک دو درجه آزادی



تصویر ۳۷.۳: پاسخ فرکانسی مد-تشخیص یک درجه آزادی

روشن است که پاسخ کریولیس در فاصله مابین دو قله تشدید واقع شده است که ناحیه غیرحساس و مقاوم در مقابل تغییرات پارامتری است.

فصل چهارم :

اصول کلی طراحی الکتریکی ژيروسکوپ‌های ارتعاشی MEMS

مقدمه

در این فصل درباره موضوع طراحی واحد های الکتریکی در سیستم‌های ارتعاشی میکروالکترومکانیکی در حالت عام بحث می‌کنیم تا به شناختی کامل از سیستم ژيروسکوپ دست بیابیم. ابتدا اصول روش های تحریک و تشخیص الکترواستاتیک خازنی پوشش داده می‌شود. بنابراین جزئیات کامل از مشخصات ژيروسکوپ MEMS، شامل بخش داده گیر پاسخ فرکانسی، شناسایی سیستم، تقویت کننده و آشکارساز سیگنال کریولیس واستخراج کننده سیگنال نرخی، ارائه می‌شوند.

ژيروسکوپ میکروماشین کاری شده دستگاه فعالی می‌باشد که نیازمند هر دو مکانیزم محرکه و آشکارساز است. ژيروسکوپ‌های MEMS گوناگون، با روش های آشکار سازی و تحریک مختلف در ادبیات فن گزارش شده‌اند. برای نوسانگر مد- تحریک ژيروسکوپ، روش های تحریک غالباً الکترواستاتیک، پیزوالکتریک، و حرارتی می‌باشند و

نیز اغلب روش های آشکارسازی پاسخ کریولیس شامل خازنی، پیزوالکتریک، پیزومقاومتی، اپتیکال و مغناطیسی می باشند.

در بسیاری از کاربردهای MEMS، روش های آشکارسازی خازنی و تحریک الکترواستاتیک دارای مزایایی نسبت به روش های دیگر، مخصوصاً در سهولت پیاده سازی و اجرا می باشند. روش های خازنی هیچ نیازی به مجتمع سازی مواد خاص ندارد، که آنرا برای اکثر فرایندهای تولیدی مناسب می سازد. همچنین این روش پاسخ DC و عملکرد در مقابل نویز، خوبی تولید می کند و قابلیت حساسیت بالا، انحراف کم و حساسیت دمایی پایین را دارا می باشد [۴، ۴۲].

۴-۱- اصول اساسی الکترودهای خازنی

پیکربندی های مختلف صفحه موازی خازنی، بطورگسترده برای هر دو نوع، محرک های الکترواستاتیک و خازن های آشکارساز در دستگاه های MEMS، مورد استفاده قرار می گیرد. در اکثر ژيروسکوپ های میکروماشین کاری شده، الکترودهای تحریک و تشخیص می تواند از ترکیب صفحات متحرک خازنی که بطور موازی روبروی هم قرار گرفته اند تشکیل شوند.

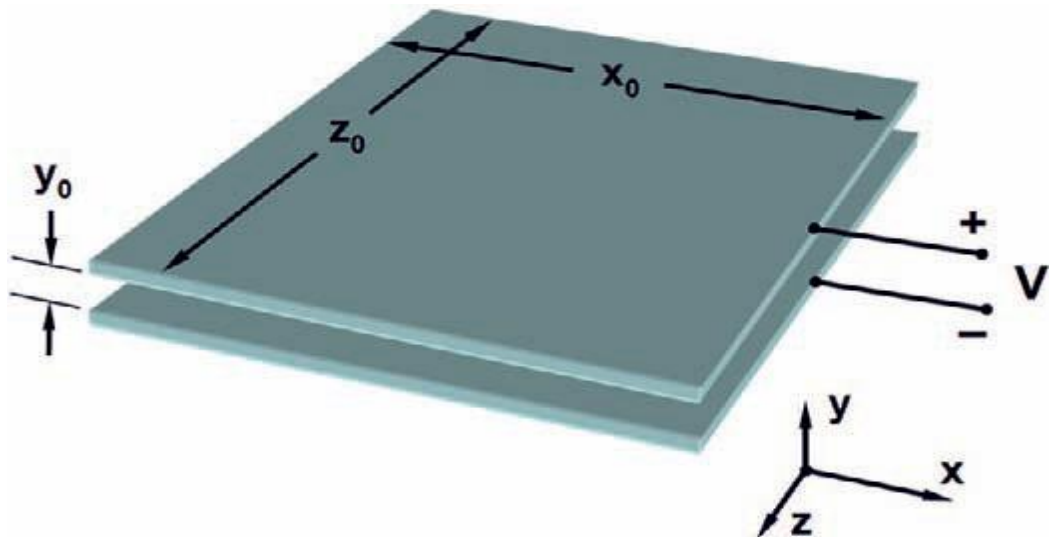
عبارت خازن اشاره به دستگاهی دارد که هنگام اعمال ولتاژ به پایانه های آن بار الکتریکی را در خود ذخیره می کند. برای خازن های خطی، مانند صفحه- موازی، ظرفیت خازن C ثابت تناسب بین بار ذخیره شده و ولتاژ اعمالی می باشد. بنابراین رابطه بین این کمیت ها بصورت زیر خواهد بود:

$$Q = CV \quad (1.4)$$

برای یک الکتروده صفحه - موازی همانند تصویر (۱.۶) ظرفیت بین دو صفحه موازی بصورت زیر بیان می شود:

$$C = \epsilon_0 \frac{A_{overlap}}{y_0} = \epsilon_0 \frac{x_0 z_0}{y_0} \quad (2.4)$$

که $\epsilon = 8.854 \times 10^{-12} F/m$ گذردهی فضای آزاد است، $A_{overlap} = x.z$ سطح کلی هم پوشی می باشد و y فاصله شکاف بین دو صفحه است.



تصویر ۱.۴: مدل خازن صفحه موازی

عبارت $W(Q)$ ، انرژی ذخیره شده در خازن را بعنوان تابعی از بار الکتریکی نشان می‌دهد و همچنین عبارت $W^*(V)$ ، همین مقدار انرژی برای خازنهای خطی را بصورت تابعی از ولتاژ اعمال شده نشان می‌دهد.

$$W(Q) = \frac{Q^2}{2C} \quad (۳.۴)$$

$$W^*(V) = \frac{CV^2}{2} \quad (۴.۴)$$

۴-۲- تحریک الکترواستاتیک

در الکترودهای تحریک صفحه - موازی، نیروی الکترواستاتیک در اثر تشکیل میدان نیروی پایستار الکترواستاتیک مابین صفحات تولید می‌شود. در حالتی که ولتاژ ما بین صفحات در خازن کنترل می‌شود، نیروی الکترواستاتیک را می‌توان بصورت گرادیان تابع انرژی $W^*(V)$ ذخیره شده در خازن بیان کرد:

$$F = \nabla W^*(V) = \frac{\nabla C(x, y, z) V^2}{2} = \nabla \left(\frac{x_0 z_0}{y_0} \right) \frac{\epsilon_0 V^2}{2} \quad (۵.۴)$$

الکترودهای تحریک صفحه - موازی معمولاً برای اعمال یک نیروی الکترواستاتیک در یک جهت خاص طراحی می‌شوند، بطوریکه برای درجه آزادی و جهت حرکت جرم تحریک شده تنظیم می‌شوند. عبارت نیروی الکترو

استاتیک را می‌توان با مشتق گرفتن از ظرفیت خازن نسبت به جهت حرکت ساده تر کرد. عبارت بسیار متداول برای نیروی الکترو استاتیک در یک جهت بردار حرکت خاص \hat{e} ، که نشان دهنده جابجایی در طول جهت e است بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_e = \frac{\partial W^*(V)}{\partial e} = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial e} V^2 \hat{e} \quad (۶.۴)$$

دو نوع اصلی الکتروادهای تحریک صفحه-موازی، محرک های سطح-متغیر و گاف-متغیر می‌باشند. به علت استفاده وسیع از محرک های سطح متغیر برای تحریک سیستم‌های MEMS در این فصل صرفاً به بررسی محرک های سطح متغیر می‌پردازیم.

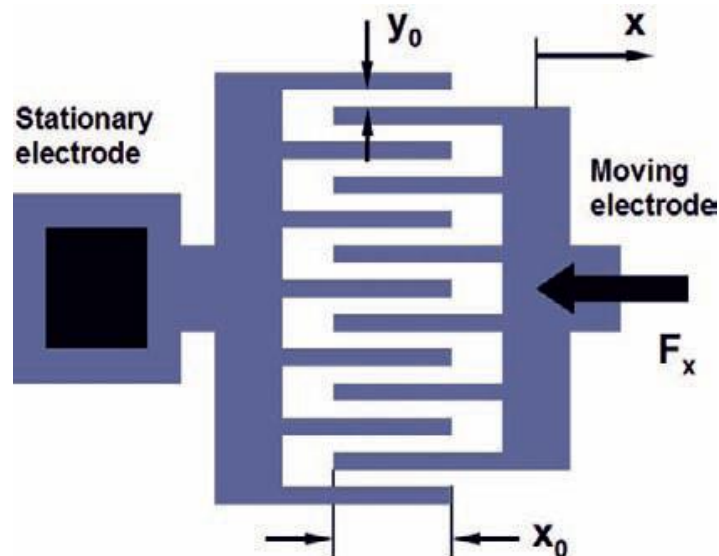
محرک های سطح-متغیر به خطی سازی تغییرات ظرفیت خازن در مقابل جابجایی کمک می‌کند، به همین علت می‌توان به نیروی الکترواستاتیک مستقل از جابجایی دست یافت. ساختار محرکهای سطح-متغیر شانه ای به هم جفت شده به گونه ای می‌باشد که بر اساس تولید نیروی الکترواستاتیک در طول یک سری از صفحات موازی بدون تغییر فاصله گاف بر روی یکدیگر می‌لغزند، عمل می‌کنند.

نیروی الکترواستاتیک تولید شده در جهت x برای دو صفحه موازی مطذاتابق تصویر (۴.۶) بصورت عبارت زیر محاسبه می‌شود.

$$F_x = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial e} V^2 = \frac{1}{2} \frac{\partial (x_0 - x)}{\partial x} \frac{\epsilon_0 z_0}{y_0} V^2 \quad (۷.۴)$$

$$F_x = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 z_0}{y_0} V^2 \quad (۸.۴)$$

باید توجه نمود که این نیرو مستقل از جابجایی در جهت x و طول همپوشی شده صفحات خازنی است.



تصویر ۲.۴: مدل محرک الکترواستاتیک سطح - متغیر

۴-۳- تشخیص خازنی :

خازن‌های صفحه موازی در طرح‌های مختلف برای تشخیص جابجایی ماشینکاری می‌شوند. برای یک الکتروود صفحه - موازی معمول با یک فاصله گاف d و سطح روی هم افتادگی $A_{overlap}$ ، ظرفیت الکتروود برابر است با :

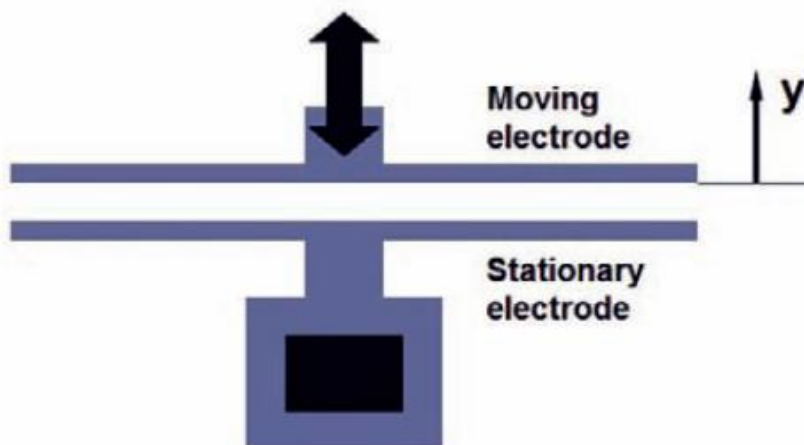
$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A_{overlap}}{d} \quad (9.4)$$

که ϵ_r ، ثابت دی الکتریک ماده بین صفحات می‌باشد.

هر کدام از پارامترهای موجود در این عبارت می‌تواند بوسیله یک جابجایی تنظیم و یا اصطلاحاً مدوله شده و در نتیجه ظرفیت خازن تغییر یابد. در خازن‌های گاف - متغیر، حرکت عمود بر صفحات موازی است، و گاف d با جابجایی تغییر می‌کند. در خازن‌های سطح - متغیر، حرکت صفحات بطور موازی و در امتداد هم می‌باشند که در نتیجه سطح $A_{overlap}$ ، تغییر می‌کند. بوسیله جابجایی یک رسانه متحرک بین صفحات، ثابت دی الکتریک ϵ_r می‌تواند با جابجایی مدوله شود. معمولترین نوع الکتروود در سنسورهای اینرسی، الکتروودهای خازنی گاف-متغیر و سطح - متغیر که بطور خلاصه در زیر بررسی می‌شوند.

۴-۴- خازن‌های گاف - متغیر

خازن‌های گاف - متغیر گسترده ترین نوع الکترودهای استفاده شده برای تشخیص جابجایی های کوچک می‌باشند. وقتی صفحات موازی در راستای عمود بر هم برای حرکت جهت دهی می‌شوند، جابجایی صفحات منجر به یک تغییر در گاف d می‌گردد. گاف الکتروده معمولاً توسط حداقل گاف مورد نیاز در فرایند تولید تعیین می‌شود و می‌تواند از چندین میکرون تا ابعاد زیر میکرون باشد. بنابراین ، تغییرات کوچک گاف می‌تواند باعث تغییرات بزرگی در ظرفیت خازن گردد که در نهایت به تولید حساسیت ظرفیتی بسیار شدیدی می‌انجامد.



تصویر ۳.۴: مدل الکتروده خازنی گاف - متغیر ، که انحراف جابجایی یک تغییر در گاف d ایجاد می‌کند.

باید توجه نمود که در خازن‌های گاف - متغیر ظرفیت یک تابع غیر خطی از جابجایی می‌باشد اگرچه ، برای انحراف های بسیار کوچک نیبت به گاف اولیه ، تغییرات ظرفیت رفتار خطی از خود نشان می‌دهد. با نشان دادن جابجایی در جهت حرکت با عبارت y و فرض $y \ll d$ ، تغییرات ظرفیت در یک خازن گاف - متغیر با یک طول هم پوشانی L بصورت زیر می‌شود :

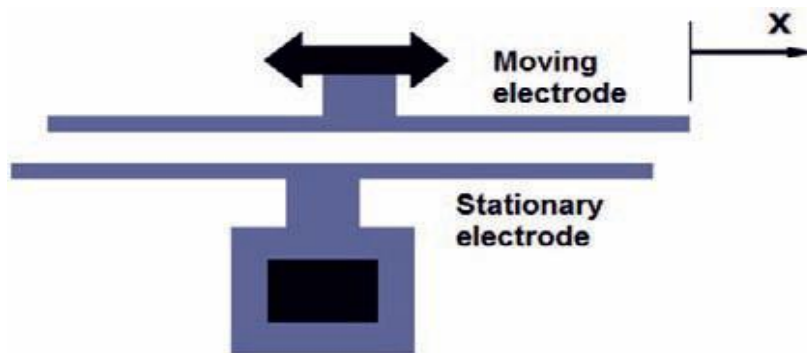
$$\Delta C = \epsilon_0 \frac{tL}{d-L} - \epsilon_0 \frac{tL}{d} \approx \epsilon_0 \frac{tL}{d^2} y \quad (۱۰.۴)$$

۴-۵- خازن‌های سطح - متغیر

خازن‌های سطح - متغییر وقتی برای آشکار سازی مناسب هستند که اندازه حرکت بزرگتر بوده و خازن‌های گاف - متغیر بشدت غیر خطی می‌شوند یا اندازه انحرافها از کوچکترین گاف موجود در سیستم بزرگتر باشند. چون سطح همپوشانی شده صفحات متناسب با هر دو بعد ورق می‌باشد، تغییرات ظرفیت بطور خالص نسبت به حرکت موازی صفحات خطی بوده و تغییر ظرفیت خازن بصورت عبارت زیر محاسبه می‌شود :

$$\Delta C = \epsilon_0 \frac{t(L+x)}{d} - \epsilon_0 \frac{tL}{d} = \epsilon_0 \frac{t}{d} x \quad (11.4)$$

نسبت حساسیت خازن‌های گاف - متغیر به خازن‌های سطح - متغیر با اندازه‌های مشخه مشابه برابر است با L/d . این نسبت نشان می‌دهد که در خازن‌های گاف - متغیر با استفاده از انگشتی های الکترودی بلند به حساسیت بسیار زیادی می‌توان دست یافت.



تصویر ۴.۴: مدل الکتروود ظرفیت خازنی سطح متغیر

فصل پنجم : نتایج و پیشنهادهای پژوهشی

در این پروژه اصول کلی و اساسی طراحی کاربردی میکرو ژيروسکوپ ارتعاشی به عنوان یکی از سیستم های میکرو الکترو مکانیکی (MEMS) مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. محدودیتها و چالش های پیش روی طراحی علمی این سیستم مشخص شد.

در کل افزایش حساسیت، عملکرد و بازده سیستم را بالا برده و دقت و رزولوشن را افزایش می دهد ولی از طرفی دیگر موجب ناپایدار شدن سیستم در مقابل تغییرات پارامتر های نوسانی می گردد. در نتیجه در این نوع از ساختارهای ژيروسکوپی به یک سیستم بسیار پیشرفته کنترلی نیازمندیم.

دو عامل بسیار مهم در طراحی و ساخت ژيروسکوپ عیوب تولید و متغیرهای محیطی را مورد بررسی قرار داده و در نهایت به نتایج زیر دست یافتیم .

۱- عیوب و مشکلات موجود در مرحله تولید منجر به تغییر پارامتر های هندسی و خواص ماده و در نهایت منجر به تغییر پارامتر های نوسانی و جابجا شدن فرکانس مدهای تحریک و تشخیص می گردد.

- ۲- با عملکرد سیستم در فرکانس تشدید جهات تحریک و تشخیص، حساسیت سیستم به تغییر پارامترهای نوسانی و شرایط محیط بالا می‌رود.
- ۳- با افزایش ضریب کیفیت، Q ، حساسیت سیستم به تغییر پارامترهای نوسانی سیستم و شرایط محیط زیاد می‌شود.
- ۴- با افزایش افزایش ضریب کیفیت، Q ، و کاهش فاصله اختلاف فرکانس‌های طبیعی سیستم بازده و بهره سیستم افزایش پیدا می‌کند.
- ۵- با افزایش افزایش ضریب کیفیت، Q ، پهنای باند به شدت باریک می‌شود و از طرفی حساسیت و دقت آن به دوران ورودی افزایش پیدا می‌کند.
- ۶- مسیر نوسان جرم ژيروسکوپ صرفاً به اختلاف فرکانس نیروی تحریک و فرکانس طبیعی مد- تشخیص بستگی دارد و مستقل از فرکانس طبیعی مد- تحریک است.
- ۷- اثرات انیزو الاستیسیته یا کوپلینگ محورهای متقاطع منجر به خطای بزرگی در عملکرد سیستم می‌شود و در نتیجه آن ژيروسکوپ نیازمند سیستم کنترل پیشرفته‌ای می‌باشد.
- ۸- ژيروسکوپ ارتعاشی با مدل بازو خرچنگی مورد بررسی و طراحی قرار گرفت با افزایش نقاط طراحی به حالت انطباق مدی نسبی دست یافتیم.
- ۹- اثر پارامترهای هندسی بر روی آنالیز مودال و در نهایت پاسخ هارمونیک ساختار بازو خرچنگی مشاهده شد.
- ۱۰- دو نمونه میکروژيروسکوپ ارتعاشی غیر تشدیدی سه درجه‌آزادی (۳-DOF) با دو درجه‌آزادی در (۲-DOF) مد- تشخیص (مد- تحریک) و یک درجه‌آزادی (۱-DOF) در مد- تحریک (مد- تشخیص) ارائه شد. در پاسخ فرکانسی این دو سیستم پهنای باند وسیعی در هر دو مد ارتعاشی نشان داده شد که با عملکرد سیستم در این منطقه حساسیت سیستم به تغییرات پارامتری خنثی شده و سیستم عملکرد پایدار و مقاومی خواهد داشت. پاسخ‌های آنالیز مودال FEM هر دو سیستم با مقادیر تئوری و تجربی برای سیستم دو درجه‌آزادی مد- تحریک تطبیق خوبی داشتند. با طراحی سیستم‌های مقاوم و پایدار ذاتی در مقابل تغییرات پارامتری ناشی از عیوب تولید و شرایط محیط، می‌توان نقش جبرانسازی الکتریکی از سیستم‌های کنترلی را به سازه مکانیکی انتقال داد.

با توجه به نو و پیشرفته بودن تکنولوژی طراحی و ساخت ژيروسکوپ میکرو، کارهای پژوهشی چندانی در داخل کشور صورت نگرفته است. سیستمهای MEMS به جهت عملکردشان در میدان های فیزیکی چندگانه دارای محدودیت ها و پیچیدگی های فراوانی هستند که نیازمند صرف فرصت های مطالعاتی زیادی هستند به این علت انجام برنامه ریزی پژوهشی و کار گروهی هدفمند بسیار ضروری می باشد. در ادامه این پروژه انجام پژوهش های زیر می تواند مکمل باشند.

موضوعات همچون طراحی بهینه الکترودهای تحریک و تشخیص الکترواستاتیکی و خازنی، پردازش سیگنال ، طراحی سیستم های پیچشی، طراحی کنترلر و جبران ساز ، بررسی هایی جهت کاهش خطای تریبیعی و اثر انیزو الاستیسیته، پایداری بایاس ، روشهای بهینه سازی ژنتیک و عصبی ، تهیه نمونه آزمایشگاهی و اعتبار سنجی طرح های تحلیلی و عددی می توانند فرصت های پژوهشی مفیدی جهت تکمیل پروسه طراحی باشند.

در ادامه عنوان های پیشنهادی برای ادامه تحقیق ذکر شده است.

فرصت های پژوهشی آتی :

- ۱- ساخت و تهیه نمونه آزمایشگاهی مدل میکرو ژيروسکوپ مقاوم و چند درجه آزادی و اعتبار سنجی نتایج عددی و تحلیلی
- ۲- طراحی مکانیزم های تحریک و تشخیص الکترواستاتیکی و خازنی و بررسی های پردازش سیگنال در انواع سیستم های انتقالی و پیچشی
- ۳- بررسی روش های الکتریکی برای اندازه گیری رفتار دینامیکی و خطاهای تریبیعی و اثرات انیزو الاستیسیته در میکرو ژيروسکوپ
- ۴- اثر سنجی عددی و آزمایشگاهی ضریب کیفیت و میرایی ترمو الاستیک بر روی رفتار دینامیکی
- ۵- کنترل و مقاوم سازی ژيروسکوپ میکرو در مقابل اغتشاشات محیطی و تغییرات بوجود آمده در پروسه تولید از سیستمی به سیستم دیگر
- ۶- استفاده از الگوریتم های همچون ژنتیک و یا شبکه های عصبی جهت بهینه سازی عملکرد دینامیکی و الکتریکی سیستم میکرو ژایرو

۷- طراحی و استفاده از کنترلر های فازی ، مقاوم و تطبیقی جهت جبران سازی و حذف اثرات کوپلینگ محوهای متقاطع و انیزوالاستیسیته و مقایسه نتایج

۸- بررسی اثرات انواع مکانیزم های میرایی فیم فشاری ، فیلم لغزشی ، میرایی ترموالاستیک، میرایی پایه ، میرایی الکتریکی و طراحی کنترلر متناسب جهت حذف اغتشاشات میرایی

۹- طراحی کنترلر های دیجیتال و آنالوگ بهینه شده برای ژيروسکوپ میکرو الکترو مکانیکی

۱۰- طراحی و بررسی دینامیکی و الکتریکی سیستم میکرو ژيروسکوپ ارتعاشی با مدل مکانیکی پیچشی و مقایسه پاسخ آن با نتیج حاصل از مدل انتقالی

۱۱- طراحی و کنترل سیستم میکرو ژيروسکوپ ارتعاشی با ساختارهای دارای آرایه چند جرمی و مقایسه عملکرد این سیستم با سیستم چند درجه آزادی خطی و پیچشی

۱۲- بکار بردن روش های تحلیلی برای بهینه سازی پارامتر های سیستم جهت حداکثر کردن عملکرد سنسور و مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی در میکرو ژيروسکوپ ارتعاشی

۱۳- طراحی و ساخت مدل میکرو ژيروسکوپ چهار درجه آزادی پیچشی و انتقالی و مقایسه عملکرد و پاسخ آنها در نهایت پیشنهاد کنترلر فازی

۱۴- بررسی اثرات انواع اغتشاشات دمایی ، فشار هوا بر روی پایداری بایاس

۱۵- پیشنهاد انواع راهکارهای کاهش قیمت تولید و افزایش عملکرد سیستم

۱۶- پیشنهاد انواع راهکارهای بومی سازی و انتقال تکنولوژی ساخت تجهیزات MEMS به داخل کشور و بازاریابی

۱۷- بررسی و طراحی انواع روش های کنترل جهت جبران سازی خطای تربیعی ناشی از کوپلینگ محورهای متقاطع مابین جهات تحریک و تشخیص در سیستم چهار درجه آزادی و ارائه روابط فازی و انیزوالاستیسیته

- [١]. Cenk Acar and Andrei Shkel MEMS Vibratory Gyroscopes Structural Approaches to Improve Robustness ٢٠٠٩ Springer Science+Business Media, LLC
- [٢]. Kashif Riaz*, Shafaat A. Bazaz, M. Mubasher Saleem, Rana I. Shakoor Design, damping estimation and experimental characterization of decoupled ٣-DoF robust MEMS gyroscope Received ٦ April ٢٠١١
- [٣]. Cenk Acar, Design Concept and Preliminary Experimental Demonstration of ٤-DOF MEMS Gyroscopes, March ٧, ٢٠٠٢
- [٤]. Yole Développement's report, MEMS Markets, Status of the MEMS Industry ٢٠١٣ report
- [٥]. C. Acar, A.M. Shkel, Inherently robust micromachined gyroscope with ٢-DoF sense-mode oscillator, Journal of Microelectromechanical, Systems ١٥ (April) (٢٠٠٦) ٣٨٠-٣٨٧..
- [٦]. Steven Nasiri, A Critical Review of MEMS Gyroscopes Technology and Commercialization Status, Santa Clara, California ٩٥٠٥٤, ٢٠٠٧.
- [٧]. M. Gyimesi, I. Avdeev, D. Ostergaard, Finite-element simulation of microelectromechanical systems (MEMS) by strongly coupled electromechanical transducers, IEEE Transactions on Magnetics ٤٠ (March) (٢٠٠٤) ٥٥٧-٥٦٠.
- [٨]. N. Barbour, and G. Schmidt. Inertial Sensor Technology Trends. IEEE Sensors Journal, Vol. ١, No. ٤, Dec ٢٠٠١, pp. ٣٣٢-٣٣٩.
- [٩]. RF MEMS THEORY , DESIGN, AND TECHNOLOGY, Gabriel M Rebeiz John Wiley & Sons ٢٠٠٣
- [١٠]. C. Acar, and A. Shkel. Inherently Robust Micromachined Gyroscopes with ٢-DOF Sense-Mode Oscillator. Journal of Microelectromechanical Systems. Vol. ١٥, No. ٢, pp. ٣٨٠-٣٨٧, ٢٠٠٦.
- [١١]. C. Acar, and A. Shkel. An Approach for Increasing Drive-Mode Bandwidth of MEMS Vibratory Gyroscopes. Journal of Microelectromechanical Systems. Vol. ١٤, No. ٣, pp. ٥٢٠-٥٢٨, ٢٠٠٥.
- [١٢]. C.W. Dyck, J. Allen, R. Hueber. Parallel Plate Electrostatic Dual Mass Oscillator. Proceedings of SPIE Conference on Micromachining and Microfabrication, Vol. ٣٨٧٦, CA, ١٩٩٩, pp. ١٩٨-٢٠٩.

[13]. S. V. Iyer, Y. Zhou and T. Mukherjee. Analytical Modeling of Cross-axis Coupling in Micromechanical Springs International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, (MSM). pp. 632-635, April 19-21, 1999, San Juan, PR, USA.

[14]. Geiger, W.; Folkmer, B.; Merz, J.; Sandmaier, H.; Lang, W.. A New Silicon Rate Gyroscope The Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, 1998. 20-29 Jan 1998 pp. 610 – 620.

[15]. S. Gnithner, K. Kapser, M. Rose, B. Hartmann, M. Kluge, U. Schmid, and H. Seidel. Analysis of Piezoresistive Read-out Signals for a Silicon Tuning Fork Gyroscope IEEE Sensors Conference, 2004. Vienna, Austria, Oct. 2004, pp. 1411-1414.

[16]. Weinberg, M.S.; Kourepenis, A. Error sources in in-plane silicon tuning-fork MEMS gyroscopes Journal of Microelectromechanical Systems. Volume 10, Issue 3, June 2006, pp. 479 - 491.

[17]. A. Duwel, M. Weinstein, J. Gorman, J. Borenstein, P. Ward. Quality Factors of MEMS Gyros and the Role of Thermoelastic Damping International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2002. Las Vegas, NV, January 2002, pp. 2142-219. 202 References

[18]. C. Zener. Internal Friction in Solids II. General Theory of Thermoelastic Internal Friction. Physical Review, 1938. Vol. 53, pp. 90-99.

[19]. W. C. Tang. Electrostatic Comb-Drive for Resonant Sensor and Actuator Applications. Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley, 1990.

[20]. B.E. Boser. Electronics For Micromachined Inertial Sensors. Proceedings of Transducers, 1997.

[21]. W.C. Young. Roark's Formulas for Stress and Strain. McGraw-Hill, Inc., pp. 93-106, 1989.

[22]. M.J. Madou. Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization. CRC Press., Second Edition, 2002.

[23]. W. Kuehnel. Modeling of the Mechanical Behavior of a Differential Capacitor Acceleration Sensor. Sensors and Actuators A, Vol. 48, 1990, pp. 101-108.

[24]. T. Veijola, and M. Turowski. Compact Damping Models for Laterally Moving Microstructures with Gas-Rarefaction Effects. Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 10, No.2, June 2001, pp. 263-273.

[25]. T. Veijola, H. Kuisma, J. Lahdenpera and T. Ryhenen. Equivalent Circuit Model of the Squeezed Gas Film in a Silicon Accelerator. Sensors and Actuators A, Vol. 48, 1990, pp. 239-248.

[26]. J.J. Blech. On Isothermal Squeeze Films. Journal of Lubrication Technology, Vol. 100, 1983, pp. 610-620.

[27]. Y.H. Cho, B.M. Kwak, A.P. Pisano, and R.T. Howe. Slide Film Damping in Laterally Driven Microstructures. Sensors and Actuators A, Vol. 40, 1994, pp. 31-39.

[28]. C. Bourgeois, F. Parret, and A. Hoogerwerf. Analytical Modeling of Squeeze-Film Damping in Accelerometers. International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago, IL, June 1997, pp. 1117-1120.

[29]. <http://www.analogdevices.com>.

[30]. T.N. Juneau, A.P. Pisano, J.H. Smith. Dual Axis Operation of a Micromachined Rate Gyroscope. Ninth International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago, IL, June 1997.

[31]. S.E. Alper, and T. Akin. A Planar Gyroscope Using Standard Surface Micromachining Process. Conference on Solid-State Transducers, Copenhagen, Denmark, 2000, pp. 387-390.

[32]. J. J. Wortman and R. A. Evans. Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio in Silicon and Germanium. Journal of Applied Physics, 1960. 36, 103.

[33] US 6,691,071. Willig et al. Rotational Speed Sensor. February 2004.

[34]. <http://www.polytecpi.com>.

[35]. <http://www.mmr.com/tmpd.htm>

[36]. M. Handtmann, R. Aigner, A. Meckes, and G.K.M. Wachutka. A Sensitivity Enhancement of MEMS Inertial Sensors Using Negative Springs and Active Control. Sensors and Actuators A, Vol. 97, 2002, pp. 103-110.

[37]. A. Lawrence. Modern Inertial Technology. Springer, 1998.

[38]. T. Hirano, T. Furuhashi, K.J. Gabriel, and H. Fujita. Design, Fabrication and Operation of Submicron Gap Comb-Drive Microactuators. Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 1, 1992, pp. 02-09.

[39]. F. Ayazi, and K. Najafi. High Aspect-Ratio Combined Poly and Single-Crystal Silicon

(HARPSS) MEMS Technology Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 9, 2000, pp. 288-294.

[40]. S. Pourkamali, F. Ayazi. SOI-Based HF and VHF Single-Crystal Silicon Resonators With Sub-100 Nanometer Vertical Capacitive Gaps. Proceedings of Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 2003, pp. 837-840.

[41]. <http://www.microsensors.com>

[42]. <http://www.mems-exchange.org>

[43]. <http://www.suss.com>

[44]. Smith, J.H.; Montague, S.; Sniegowski, J.J.; Murray, J.R.; McWhorter, P.J. Embedded micromechanical devices for the monolithic integration of MEMS with CMOS. International Electron Devices Meeting, 1990., pp. 609-612, 10-13 Dec 1990.
References 253

[45] تحلیل دینامیکی و بررسی عملکرد میکروژیروسکوپ ارتعاشی، مهدی اسمعیلی، پایاننامه دکتری، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۵.

[46] تئوری و طراحی ژيروسکوپهای ارتعاشی میکروالکترو مکانیکی (MEMS) در صنایع هوایی، امیر منافی، پژوهشکده صنایع هوایی، ۱۳۹۲.

ABSTRACT

This thesis examines the scientific principles, Design and Optimization of MEMS Vibratory Gyroscopes. This thesis first deals short overview on MEMS technology and the most important parameter in this type of construction equipment . Then the vibratory gyroscopes is introduced, and the design principles of MEMS vibratory gyroscopes are discussed in general mechanical and electrical. The adaptation of drive and sense modes, effective factors such as resonant frequency, bandwidth, damping and quality factor Is explained and different models and their dynamic equations is investigated. This thesis approaches the gyroscope mechanical retrofitting against structural and environment changes, as an idea and a new way, trying to optimize the system's gyroscope.



Shahrood University

Faculty of Mechanical Engineering

Subject:

**Design, Analysis & Optimization of A MicroElectroMechanical(MEMS)
Vibratory Gyroscope**

Amir Manafi

Supervisor :

Dr. Ardeshir karami Mohammadi

۲۰۱۳