

طراحی و ارزیابی تغییرات جنس و ابعاد الکترودهای تحریک و حسگر یک ژيروسکوپ ارتعاشی کوریولیس نیم‌کروی با تحریک خازنی و تاثیر آن بر ولتاژ اندازه‌گیری شده

رضا صدقاتی^{۱*}، مهرداد محمودیان^۲

^{۱*} گروه مهندسی برق، واحد بیضا، دانشگاه آزاد اسلامی، بیضا، ایران، sedaghati.r@biau.ac.ir
^۲ گروه مهندسی برق، مجتمع آموزش عالی فیروزآباد، ایران، mahmoodian.cc@fabad-ia.ac.ir

چکیده

ژيروسکوپ‌های ارتعاشی کوریولیس، یکی از انواع مدرن‌ترین ژيروسکوپ‌های موجود است که با بیشترین تفاوت در طراحی جرم آزمون مرتعش و تعلیق الاستیک، جایگزین ژيروسکوپ‌های معمول شده است. با توجه به ویژگی‌های مهمی که در تکنولوژی‌های تحریک خازنی نسبت به تحریک پیزو الکتریک در تعیین نوع ارتعاش سنسورها دیده می‌شود، اصول عملکرد و فرمول‌بندی آنها کاملاً تغییر می‌کند که نیازمند تحلیل دوبعدی و المان محدود، برای ارزیابی عملکرد بهینه آنها خواهد بود. به دلیل اینکه معمولاً محیط سنسورها به طور مداوم در حال ارتعاش هستند، در این مقاله یک فرمول‌بندی کلی ارائه می‌شود تا بتواند به طور کامل تاثیر پارمترهای موثر بر فرکانس مودهای کاری مختلف را تشریح کند. ایده اصلی ژيروسکوپ‌های ارتعاشی با جایگزینی چرخش مداوم روتور با ساختار ارتعاشی و استفاده از اثر کوریولیس است که باعث می‌شود حرکت ثانویه جرم حساس منطبق با سرعت زاویه ای خارجی تولید شود. در این مقاله آنالیز حساسیت ژيروسکوپ‌های ارتعاشی نیم‌کروی مورد بحث قرار می‌گیرد و تغییرات مکان الکترودها، ولتاژ حس شده در اطراف فرکانس رزونانس و جنس پیک آف و فورسرها نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در نهایت نتایج فرکانس رزونانس شبیه سازی شده با نتایج تئوری و ریاضیاتی مقایسه و اعتبارسنجی می‌شوند.

کلیدواژه

آنالیز عملکرد، ژيروسکوپ ارتعاشی، کوریولیس.

مقدمه

معطوف شده و کارهای علمی و فنی فراوانی توسط محققین در این زمینه انجام پذیرفته است و اصولاً زمینه ژيروسکوپ‌های ارتعاشی زمینه علمی جوانی محسوب می‌شود. آنچه که توجه گسترده ای به ژيروسکوپ‌های ارتعاشی کوریولیس جلب شده است، نه تنها رسیدن به دقت بهتر و کاربردهای هوا-فضایی آن، بلکه قیمت فوق العاده پائین آنها و درجه بعدی ابعاد و اندازه‌های کوچک آنها می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد. بعضی مزایای مهم این ژيروسکوپ‌ها که باعث شده محققین در زمینه‌های موشکی و هوا-فضایی به دنبال عملیاتی کردن این ژيروسکوپ‌ها در زمینه کاری خود باشند عبارت هستند از [۴-۶]:

- ۱- دارای زمان کوتاه راه اندازی هستند.
- ۲- به دلیل نداشتن محور گردنده نیاز به یاتاقان ندارند.
- ۳- نیاز به موتور ندارند.
- ۴- در صورت طراحی موثر طول عمر بسیار طولانی داشته و به نگهداری و تعمیرات نیاز ندارند.
- ۵- بسیار کوچک‌تر و سبک‌تر از ژيروسکوپ‌های سنتی می‌باشند.
- ۶- ارزان بودن از مزایای بسیار مهم این ژيروسکوپ‌هاست.
- ۷- پروسه ساخت راحت تری دارند.
- ۸- مصرف انرژی بسیار کمی دارند.

ژيروسکوپ‌های ارتعاشی^۱، ژيروسکوپ‌های مقیاس کوچک یک و یا دو محوره هستند که با تکنولوژی نیمه هادی‌ها و مدارات مجتمع ساخته می‌شوند. از لحاظ ساختاری شامل تراشه‌هایی هستند با زیرلایه کوارتزی^۲ با ابعاد از چند میلیمتر مربع تا میکرون، که به روش «طرح نگار نوری»^۳ و روش‌های مشابه آن به صورت سازه‌های ارتعاشی صفحه‌ای تهیه می‌شوند [۱]. به دلیل عدم امکان استفاده از ساختارهای یاتاقانی و موتورهای محرک از نوع ژيروسکوپ‌های کلاسیک (به خاطر ابعاد و اندازه‌های کوچک)، در ژيروسکوپ‌هایی با این تکنولوژی، از ساختارهای ارتعاشی با تکیه گاه‌های الاستیک یک سرگیردار یا دو سرگیردار استفاده می‌گردد. وجه مشترک این نوع ژيروسکوپ‌ها، استفاده از اندازه حرکت المان حساس^۴ و نیروی کوریولیس^۵ برای آشکار سازی سرعت زاویه‌ای پایه حامل ژيروسکوپ می‌باشد [۲-۳]. در سال‌های اخیر توجه بسیاری به ژيروسکوپ‌ها

¹ Vibrating Gyroscope

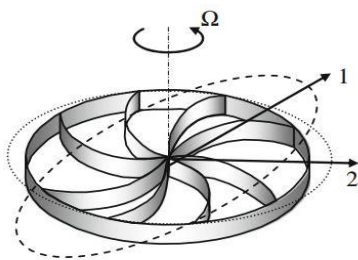
² Quartz layer

³ Photolithography

⁴ Proof Mass

⁵ Coriolis Force

HRG فوق الذکر، به وضوح ارزیابی نشده و مدل‌های تحریک و تشخیص سیگنال نیز نامشخص و مبهم می‌باشند. نویسندگان در [۱۶] معادلات دینامیکی برای CVG^9 را در حالت ایده‌آل ارائه کرده‌اند و به صورت ریاضیاتی نیز به آنالیز دینامیکی تحریک و تشخیص در آن پرداخته‌اند، اما مانند مرجع [۱۴]، محاسبه ضرایب کنترل و پارامترهای آن شفاف نیست. در مرجع [۱۷]، معادلات دینامیکی یک CVG بر اساس روابط لاگرانژ بسط داده شده است، اما ارتعاش‌ها و لرزش‌های پوسته رزوناتور، در غیاب سیستم تحریک و فقط با استفاده از معادله مشخصه انجام شده است. در [۱۸] پوسته نیم کروی ژيروسکوپ با یک ذره مدل شده است که آنالیز دو بعدی میرایی نوسانات نیز ارائه شده است. روش کنترلی تشخیص سیگنال هم ارائه شده است، اما از تعیین و محاسبه دقیق جرم معادل دستگاه نوسان و تحلیل سه بعدی آن چشم پوشی شده است. در مرجع [۱۹]، CVG را معادل با یک حلقه در نظر گرفته است که تاثیر پارامترهای مهم نظیر ضریب کیفیت (Q) رزوناتور نیز در مدل بررسی می‌گردد (شکل ۱). اما از تاثیر دینامیک ژيروسکوپ و معادلات حالت آن صرف نظر شده است. در مرجع [۲۰] معادلات دینامیک حرکت HRG توسط روش گالرکین-بابنوف^{۱۰} بیان شده است، اما تحلیل‌های ارائه شده برای ارزیابی فرکانس رزونانس غیر دقیق است و نتایج تئوری با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۲۱] و خروجی-های المان محدود^{۱۱} مراجع [۲۲-۲۳] بسیار متفاوت هستند. در نتیجه می‌توان معادلات ارائه شده را تقریبی دانست که تنها برای آنالیزهای سرعت بالا و سطحی کاربرد دارند. در مراجع [۲۴-۲۵] معادلات حالت حرکت یک رزوناتور HRG بر مبنای روابط لاگرانژ نوشته شده است، اما خطای کنترل به دست آمده، بر نتایج خروجی مرجع [۱۴] اشاره دارد و ناآراستگی پارامترها در محورهای فرکانس و میرایی همچنان غیر قابل درک است. جدول (۱)، مقایسه ای بین تکنولوژی‌های مختلف HRG و نحوه عملکرد آنها را بیان می‌کند.



شکل ۱. CVG دایره ای شکل

در این مقاله ابتدا اساس تغییر حرکت و موقعیت در یک HRG و معادلات حاکم بر آن ارائه می‌شود. ابتدا فرکانس‌های نوسان طبیعی در مودهای مختلف محاسبه شده و سپس به طراحی ژيروسکوپ پرداخته می‌شود. در بخش بعد، ولتاژ حس شده توسط حسگرهای

در سال ۱۸۵۱، پیتر فوکو با استفاده از یک پاندول نوسانی دوران زمین را نشان داد. پاندول فوکو را می‌توان نمونه اولیه ژيروسکوپ‌های ارتعاشی دانست [۱۷]. در سال ۱۹۶۴، کوئیک تحلیلی از تار مرتعش به عنوان یک سنسور حرکت زاویه‌ای را ارائه کرد. ثابت بودن یک سر تار و حرکت طولی طرف دیگر باعث تحریک در مود اول ارتعاش می‌شد. کوئیک بیان می‌دارد که اگر تکیه‌گاه حول محور تار شروع به دوران کند، صفحه ارتعاش ثابت خواهد ماند. او در مقاله‌اش به بررسی شرایط پایداری، اثر نواقص، عدم تقارن میرایی و الاستیک پرداخته، اما هیچ گونه توضیح عملی یا نتایج آزمایشگاهی ارائه نداده است [۸]. این طرح نیز همانند پاندول فوکو، یک سنسور تعیین زاویه دوران بود. در اوایل دهه ۱۹۸۰، اولین نمونه ژيروسکوپ‌های ارتعاشی مبتنی بر تعیین سرعت زاویه ای ساخته شد [۹]. در این نمونه از ماده پیزوالکتریک کوآرتز استفاده گردید که دارای بازده و ضریب کیفیت بالا در فشار اتمسفر بود. به علاوه در سال ۱۹۹۱، شرکت ژاپنی موراتا دو طرح بسیار کم هزینه ارائه داد [۱۰]. آنها در یک طرح از تیر فولادی با مقطع مثلثی استفاده کردند که به وسیله المان‌های پیزوالکتریک متصل به سطوح تیر، تحریک شده و حس می‌گردید. رزوناتور دوم نیز، یک تیر چهارگوش پیزوالکتریک در نظر گرفته شده بود. در هر دو طرح، رزوناتورها در مود اول ارتعاشی، شبیه یک تیر دو سر آزاد ارتعاش می‌کردند که تکیه‌گاه‌ها روی نقاط گرهی قرار گرفته بودند.

طرح‌های ژيروسکوپ مبتنی بر رزوناتورهای تار، تیر مرتعش و پاندولی نسبت به شتاب‌های خطی حساس هستند. در صورتی که از یک رزوناتور متقارن مثل دیاپازون (معروف به چنگال) استفاده شود، عیب مذکور مرتفع می‌گردد. طرح اول دیاپازون مرتعش بوسیله بمستین ارائه شد [۱۱]. در این طرح، نیروهای کوریولیسی ناشی از دوران شاخک‌های مرتعش حول محور طولی دیاپازون، باعث نوسان پیچشی پایه می‌شود که دامنه آن با سرعت زاویه ای اعمال شده، متناسب است. طرح مذکور پر هزینه و حجیم بود و شاید دلیل اصلی بی نتیجه ماندن طرح‌های اولیه ژيروسکوپ‌های ارتعاشی را بتوان همین موضوع عنوان کرد، که با استفاده از فرآیندهای میکروماشین کاری و کوچک شدن ابعاد آنها، این نقیصه برطرف گردید. گام اصلی در این زمینه را شرکت سیستم‌های دایر برداشت [۱۲-۱۳].

فن‌آوری HRG^6 (ژيروسکوپ با رزوناتورهای نیم کره‌ای) همراه با هزینه و حجم کم و بازده بالا، امکان رقابت با ژيروسکوپ‌های دقیق نوری را فراهم کرد. در مرجع [۱۴]، یک ژيروسکوپ کوریولیسی ارتعاشی با معادلات حرکت توسعه یافته ارائه شده است که ناآراستگی^۷ در محورهای فرکانس تحریک و محورهای میراکننده^۸ نیز در نظر گرفته شده است. ارتعاش‌های ژيروسکوپ مورد مطالعه در این مرجع به همراه تغییرات جرم ارتعاش، بر اساس معادلات دینامیکی ارائه شده در استاندارد [۱۵]، راستی آزمایی شده است. اما محاسبه ضرایب کنترل

⁹ Coriolis Vibrating Gyroscope
¹⁰ Bubnov-Galerkin
¹¹ finite element

⁶ Hemispherical Resonator Gyro
⁷ misalignment
⁸ damping axis

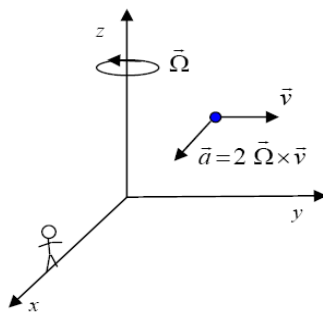
ترکیب آنها پرداخته خواهد شد. آنالیز حساسیت مشخصات فیزیکی و هندسی ژيروسکوپ تحت مطالعه و تاثیر آنها بر تغییرات فرکانس رزونانس و ولتاژ خروجی حس شده توسط پیک آفها نیز در قسمت آخر مقاله ارائه می گردد.

پیک آف موجود در اطراف فرکانس های نوسان اندازه گیری می شود. سپس جابجایی در مکان قراگیری الکترودهای پیک آف و فورس به همراه تغییرات اندازه و جنس آنها نیز آنالیز می شود. در قسمت بحث و نتیجه گیری، به مقایسه کلی ژيروسکوپ های پیزوالکتریک، خازنی و

جدول ۱. مقایسه تکنولوژی VC، Piezoelectric و Piezoresistive

پیزو الکتریک Piezo-Electric	پیزو مقاومتی Piezo-Resistive	خازن متغیر Variable Capacitance (VC)	
3 Hz – 30 kHz	0 – 6 kHz	0 – 6 kHz	فرکانس کاری
Up to 20000 g	Up to 2000 g	1 to 200 g	شتاب
-200 to 700 (°C)	-55 to 125 (°C)	-55 to 175 (°C)	دمای کاری
عالی	خوب	عالی	SNR
۱۰ %	۱۰ %	۰/۱ %	دقت اندازه گیری
حساس به تغییرات دما	حساس به تغییرات دما (به جبران سازی خارجی نیاز دارد)	پایدار نسبت به زمان و تغییرات دما	پایداری
No self-test	No self-test	True internal self-test	Self-test

حساسیت بهتر می تواند با افزایش سرعت تحریک المان حساس بدست آید. اما همان گونه که در قسمت های قبل اشاره شد، HRG می تواند سرعت ی ورودی و تغییرات مکان آن را با استفاده از اثرات نیروی کوریولیس اندازه گیری کند [۲۰-۲۲].



شکل ۲. تفهیم اثر نیروی کوریولیس

$$\vec{F} = 2m\vec{\Omega} \times \vec{v} \quad (1)$$

قسمت دایره ای پوسته نیم کروی رزوناتور، در زمان ارتعاش، حرکات «دایره ای - بیضی افقی» و «دایره ای - بیضی عمودی» را به صورت ادامه دار تکرار می کند. مکان دامنه ماکزیمم و مکان قسمت غیر ارتعاش کننده به ترتیب با نام های «آنتی گره» و «گره» نام گذاری می شوند. نوسان HRG در زمان رزونانس ثانویه دو گره و دو آنتی گره دارد. لذا یک HRG می تواند به وسیله یک سیستم میراکننده (دمپر) نوسانات فتر و معادلات تبادل جرم نامتوازن مدل شود. خطاهای ایزوالاستیک سبب چند تکه شدن فرکانس و عدم تطابق میرایی باعث به وجود آمدن ضریب کیفیت (Q) نامطلوب می گردند. در نتیجه این مسائل از جمله موضوعات مهمی هستند که می توانند باعث به وجود آمدن خطا در عملکرد HRG شوند. حرکت انتقالی عنصر حساس بواسطه بکارگیری حرکت انتقالی برای هر دو نوسانات اولیه و ثانویه است. به

فرمول بندی HRG

مبنای عملکرد تمام ژيروسکوپ های ارتعاشی اثر کوریولیس است. ژيروسکوپ های ارتعاشی، دارای اجزاء غیر دوار هستند، که از اثر ناشی از شتاب کوریولیس جهت تعیین میزان دوران زاویه ای اینرسی استفاده می شود. شتاب کوریولیس که بخاطر چرخش دستگاه مختصات مرجع ظاهر می شود، شتابی است که از آن جهت توصیف حرکت دورانی دستگاه مرجع و محاسبه حرکت محوری استفاده می شود. اثر کوریولیس در پدیده های زیادی که دوران پیچیده ای دارند از جمله جریان هوا در بالای سطح زمین در نیم کره شمالی و جنوبی دیده می شود.

برای درک بهتر این اثر، ذره قرار گرفته در شکل (۲) را در نظر بگیرید که با سرعت ثابت \vec{v} در امتداد محور y حرکت می کند و ناظر قرار گرفته بر روی محور x به آن نگاه می کند. همان طور که در تصویر مذکور مشخص است، ناظر روی محور x سیستم در مختصات دکارتی قرار می گیرد. اگر در سیستم مختصاتی فوق دوران حول محور z با سرعت زاویه ای Ω صورت گیرد، ناظر مشاهده می کند که ذره نسبت به محور x با شتابی معادل $2\vec{\Omega} \times \vec{v}$ تغییر مسیر می دهد. نیروی حاصل از این شتاب در محور z ظاهر می شود، که بر صفحه در برگیرنده محور دوران و بردار سرعت ذره عمود بوده و مقدار آن با سرعت زاویه ای محور z متناسب می باشد. هر چند که در این حالت، نیروی واقعی ای بر ذره اعمال نشده است، اما از نظر ناظر، دوران دستگاه مرجع یک نیروی ظاهری را ایجاد می کند که مستقیماً متناسب با سرعت دوران می باشد. این اصل مبنای مشترک عملکرد ژيروسکوپ های ارتعاشی با انواع مختلف رزوناتور است. نهایتاً نیروی کوریولیس با استفاده از رابطه (۱) بدست می آید؛ که m جرم المان حساس، \vec{v} سرعت المان حساس و $\vec{\Omega}$ سرعت زاویه ای اندازه گیری شده می باشد. از آنجائی که نیروی کوریولیس متناسب با سرعت است،

$$I(n, h) = \int_{\varphi_0}^{\varphi_f} \frac{\tan^{2n}(\frac{\varphi}{2})}{\sin^3(\varphi)} h^3 d\varphi \quad (2)$$

$$J(n, h) = \int_{\varphi_0}^{\varphi_f} (n^2 + 1 + \sin^2(\varphi) + 2n \cos(\varphi)) * \sin(\varphi) \tan^{2n}(\frac{\varphi}{2}) h d\varphi \quad (3)$$

معادلات حاکم بر این رزوناتور در دستگاه سه بعدی کروی عبارتند از [۱۷-۱۵]:

$$D \left(\frac{\partial^3 \omega}{\partial \theta^3} + \frac{\mu}{\sin(\theta)^2} \frac{\partial^3 \omega}{\partial \theta \partial \varphi^2} + \frac{\cos(\theta)}{\sin(\theta)} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \theta^2} - \frac{\cos(\theta)(1+\mu)}{\sin(\theta)^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \varphi^2} + \frac{\sin(\theta)^2 - \cos(\theta)^2}{\sin(\theta)^3} \frac{\partial \omega}{\partial \theta} \right) \quad (4)$$

$$+ D_1 \left(\frac{1}{\sin(\theta)^2} \frac{\partial^3 \omega}{\partial \theta \partial \varphi^2} - \frac{\cos(\theta)}{\sin(\theta)^3} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \varphi^2} \right) = R^4 X$$

$$D \left(\frac{\partial^3 \omega}{\partial \theta^3} \frac{1}{\sin(\theta)^3} + \frac{\mu}{\sin(\theta)} \frac{\partial^3 \omega}{\partial \theta^2 \partial \varphi} + \frac{\cos(\theta)}{\sin(\theta)^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \theta \partial \varphi} + \frac{\cos(\theta)(1+\mu)}{\sin(\theta)^2} \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \right) \quad (5)$$

$$+ D_1 \left(\frac{1}{\sin(\theta)} \frac{\partial^3 \omega}{\partial \theta^2 \partial \varphi} + \frac{1}{\sin(\theta)^3} \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \right) = R^4 Y$$

$$D \left(\frac{\partial^4 \omega}{\partial \theta^4} + \frac{1}{\sin(\theta)^3} \frac{\partial^4 \omega}{\partial \varphi^4} + \frac{2\mu}{\sin(\theta)^2} \frac{\partial^4 \omega}{\partial \theta^2 \partial \varphi^2} + 2tg(\theta) \frac{\partial^3 \omega}{\partial \theta^3} - \frac{2\mu \cos(\theta)}{\sin(\theta)^3} \frac{\partial^3 \omega}{\partial \theta \partial \varphi^2} - \frac{1}{tg(\theta)^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \theta^2} + \frac{2(1+\mu)}{\sin(\theta)^4} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \varphi^2} + \left(\frac{2\cos(\theta)}{\sin(\theta)} + \frac{\cos(\theta)}{\sin(\theta)^3} \right) \frac{\partial \omega}{\partial \theta} \right) \quad (6)$$

$$+ D_1 \left(\frac{2}{\sin(\theta)^2} \frac{\partial^4 \omega}{\partial \theta^2 \partial \varphi^2} - \frac{2\cos(\theta)}{\sin(\theta)^3} \frac{\partial^3 \omega}{\partial \theta \partial \varphi^2} + \frac{2}{\sin(\theta)^4} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \varphi^2} \right) = R^4 Z$$

که در روابط فوق، R شعاع دایره است و برای محاسبه سایر مقادیر خواهیم داشت:

$$D = \frac{2Eh^3}{3(1-\mu^2)} \quad (7)$$

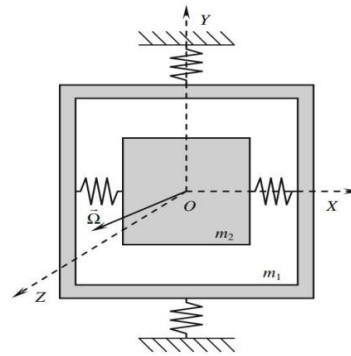
$$D_1 = \frac{2Eh^3}{3(1+\mu^2)}$$

با حل معادلات فوق توسط ترکیب نرم افزارهای MATLAB و COMSOL، فرکانس ارتعاشات و جابجایی‌های حس شده توسط سنسور مربوطه، محاسبه و تحلیل خواهد شد.

طراحی

شکل (۵) یک HRG با فورسز خازنی را به تصویر می‌کشد. در این حالت ۱۶ الکتروود فورسز (تحریک) در فواصل مساوی ۳۶۰/۱۶ یعنی ۲۲/۵ درجه (۲۰ درجه خود الکتروود و ۲/۵ درجه فاصله مجاور) قرار گرفته‌اند. به علاوه در این مدل، از هشت الکتروود پیک آف (سنس) نیز با فواصل ۳۶۰/۸ یعنی ۴۵ درجه (۴۰ درجه خود الکتروود و ۵ درجه

طور کلی عنصر حساس انتقالی به عنوان ژيروسکوپ LL اشاره دارد (حرکت اولیه خطی و حرکت ثانویه خطی). شکل (۳) شماتیکی از ساختار اجرایی نوع حرکات جرم آزمون نشان می‌دهد. در کلی‌ترین حالت، عنصر حساس شامل جرم آزمون m_2 ، قاب مجزای m_1 و مجموعه‌ای از عناصر الاستیکی (فنرها) برای اتصال جرم‌ها به یکدیگر و پایه می‌باشند. علاوه بر این، نوسانات اولیه تحریک در طول محور Y هستند و بنابراین نوسانات ثانویه در طول محور X رخ می‌دهند. از این رو محور سوم Z به عنوان محور حساس^{۱۲} در نظر گرفته می‌شود.

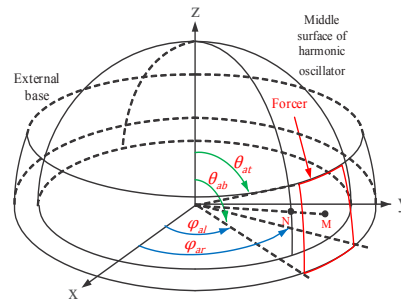


شکل ۳. حرکات خطی جرم آزمون

تحلیل سه بعدی و المان محدود ارتعاش HRG

فرض کنید یک HRG در مختصات کروی مطابق با شکل (۴) موجود باشد. ثابت های E ، ρ و μ را به ترتیب ضریب ماژول یانگ، چگالی هوا و نرخ پواسون در نظر می‌گیریم. R و h نیز به ترتیب شعاع و ضخامت رزوناتور خواهند بود. اگر تغییرات نیروی کوریولیس را با معادلات شتاب زوایه‌ای ترکیب نماییم، فرکانس مودهای مختلف HRG با استفاده از رابطه (۱) به دست می‌آید [۱۴-۱۵]:

$$\omega = \frac{n(n^2 - 1)}{r^2} \sqrt{\frac{E \cdot I(n, h)}{3(1 + \mu)\rho J(n, h)}} \quad (1)$$



شکل ۴. یک HRG ترسیم شده در مختصات کروی با تحریک خازنی.

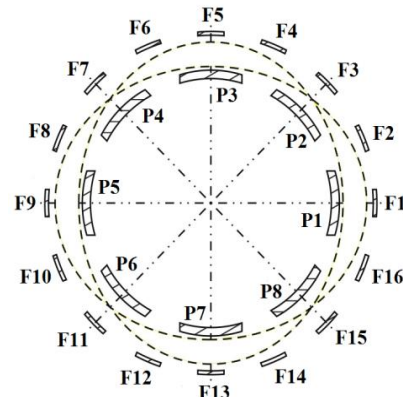
در شکل فوق، φ زاویه تشکیل شده از نقطه مد نظر با محور X+ و θ زاویه تشکیل شده از نقطه مد نظر با محور Z+ می‌باشد. در رابطه (۱)، ω فرکانس مودهای مختلف تحریک و n شماره مود تحریک می‌باشند. همچنین داریم [۱۷-۱۵]:

¹² sensitive axis

جدول ۲. مکان قرارگیری فورسرها در HRG

الکترودها	φ		θ	
	از زاویه (درجه)	تا زاویه (درجه)	از زاویه (درجه)	تا زاویه (درجه)
الکترودها ۱	۰	۴۰	۱۰۰	۱۱۰
الکترودها ۲	۴۵	۸۵	۱۰۰	۱۱۰
الکترودها ۳	۹۰	۱۳۰	۱۰۰	۱۱۰
الکترودها ۴	۱۳۵	۱۷۵	۱۰۰	۱۱۰
الکترودها ۵	۱۸۰	۲۲۰	۱۰۰	۱۱۰
الکترودها ۶	۲۲۵	۲۶۵	۱۰۰	۱۱۰
الکترودها ۷	۲۷۰	۳۱۰	۱۰۰	۱۱۰
الکترودها ۸	۳۱۵	۳۵۵	۱۰۰	۱۱۰

فاصله مجاور) استفاده شده است. جدول (۱) مکان قرارگیری ۱۶ الکترودها فورسرها و جدول (۲) نیز مکان قرارگیری ۸ الکترودها پیک آف را نشان می دهد. در این حالت ولتاژ اعمال شده به فورسرها را متناوب، با دامنه V_0 و با نصف فرکانس مود مرتبه دوم رزونانس (ω_2) در نظر می گیریم که با رابطه (۸) نمایش داده می شود.



شکل ۵. جانمایی الکترودهای پیک آف و فورسرها.

جدول ۱. مکان قرارگیری پیک آفها در HRG

الکترودها	φ		θ	
	از زاویه (درجه)	تا زاویه (درجه)	از زاویه (درجه)	تا زاویه (درجه)
الکترودها ۱	۰	۲۰	۱۰۰	۱۱۰
الکترودها ۲	۲۲/۵	۴۲/۵	۱۰۰	۱۱۰
الکترودها ۳	۴۵	۶۵	۱۰۰	۱۱۰
الکترودها ۴	۶۷/۵	۸۷/۵	۱۰۰	۱۱۰
الکترودها ۵	۹۰	۱۱۰	۱۰۰	۱۱۰
الکترودها ۶	۱۱۲/۵	۱۳۲/۵	۱۰۰	۱۱۰
الکترودها ۷	۱۳۵	۱۵۵	۱۰۰	۱۱۰
الکترودها ۸	۱۵۷/۵	۱۷۷/۵	۱۰۰	۱۱۰
الکترودها ۹	۱۸۰	۲۰۰	۱۰۰	۱۱۰
الکترودها ۱۰	۲۰۲/۵	۲۲۲/۵	۱۰۰	۱۱۰
الکترودها ۱۱	۲۲۵	۲۴۵	۱۰۰	۱۱۰
الکترودها ۱۲	۲۴۷/۵	۲۶۷/۵	۱۰۰	۱۱۰
الکترودها ۱۳	۲۷۰	۲۹۰	۱۰۰	۱۱۰
الکترودها ۱۴	۲۹۲/۵	۳۱۲/۵	۱۰۰	۱۱۰
الکترودها ۱۵	۳۱۵	۳۳۵	۱۰۰	۱۱۰
الکترودها ۱۶	۳۳۷/۵	۳۵۷/۵	۱۰۰	۱۱۰

$$V = \begin{cases} 0 & \text{else} \\ V_0 \cos\left(\frac{\omega_2 t}{2}\right) & \varphi_{al} < \varphi < \varphi_{ar} ; \theta_{at} < \theta < \theta_{ab} \end{cases} \quad (8)$$

فرکانس برق اعمالی را نصف فرکانس رزونانس رزوناتور در مود دوم در نظر می گیریم تا مطمئن شویم که تشدید مرتبه دوم رخ نمی دهد. حال به دلیل اینکه خازن کروی ایجاد شده ی موجود در سطح میکرون می باشد، و این سطح این خازن در مقابل شعاع رزوناتور بسیار کوچک است، لذا می توان این خازن را با خازن تخت تقریب زد. یعنی از انحنا رزوناتور چشم پوشی می شود. بنابراین نیروی الکترواستاتیک اعمال شده به رزوناتور عبارت است از:

$$F_{ES} = -\frac{\epsilon_0 V^2}{2d^2} = -\frac{\epsilon_0 V_0^2}{2d^2} f(\theta, \varphi) \cos^2\left(\frac{\omega_2 t}{2}\right) \quad (9)$$

که در آن، f را می توان این گونه توصیف نمود:

$$f = \begin{cases} 0 & \text{else} \\ 1 & \varphi_{al} < \varphi < \varphi_{ar} ; \theta_{at} < \theta < \theta_{ab} \end{cases} \quad (10)$$

در واقع تابع f یک متغیر باینری خواهد بود که مشخص می کند نیرو در ناحیه مورد نظر اعمال شده است یا خیر. حال با تبدیل مثالتی:

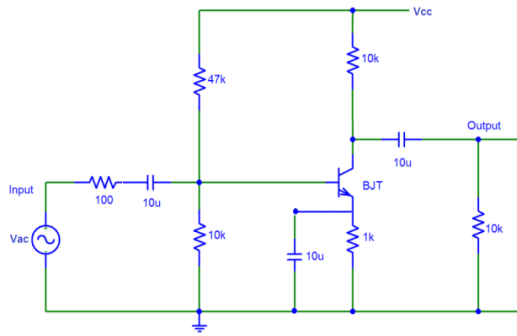
$$\cos^2(x) = \frac{1}{2} (\cos(2x) + 1) \quad (11)$$

می توان نیرو را به شکل زیر ساده نمود.

$$F_{ES} = -\frac{\epsilon_0 V^2}{2d^2} = -\frac{\epsilon_0 V_0^2}{4d^2} f(\theta, \varphi) (\cos(\omega_2 t) + 1) \quad (12)$$

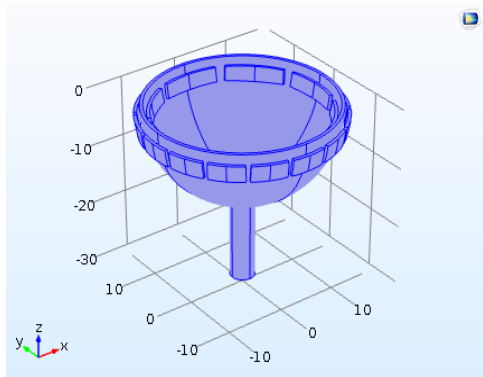
اگر از قسمت ثابت آن صرف نظر نماییم، خواهیم داشت:

$$F_{ES} = -\frac{\epsilon_0 V^2}{2d^2} = -\frac{\epsilon_0 V_0^2}{4d^2} f(\theta, \varphi) \cos(\omega_2 t) \quad (13)$$

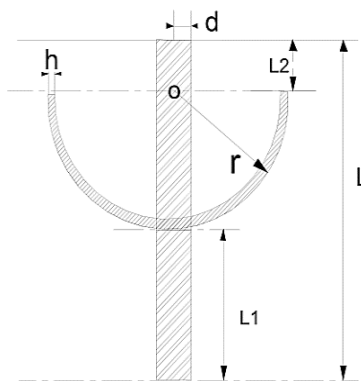


شکل ۶. مدار تحریک ژيروسکوپ HRG

نمایی از طراحی HRG شده به صورت سه بعدی در نرم افزار کامسول با مشخصات $d = 2.5 \text{ mm}$, $h = 0.8 \text{ mm}$ $r = 12.5 \text{ mm}$ و $L = 39 \text{ mm}$ و $\rho = 2651$ را می توان در شکل (۷) مشاهده نمود. نمای دو بعدی آن در شکل (۸) ترسیم شده است.



شکل ۷. ژيروسکوپ ارتعاشی کوریولیسی شبیه سازی شده در نرم افزار COMSOL



شکل ۸. نمایی از HRG تحت شبیه سازی

جابجایی و فرکانس تحریک موده های مختلف

در این قسمت فرکانس تحریک و جابجایی رزوناتور HRG در موده های مختلف بررسی شده و نتایج آن در جدول (۴) آورده می شود. این جدول نشان دهنده فرکانس تحریک HRG با استفاده از نرم افزار و روابط (۱) تا (۳) خواهد بود. تصویر پرسپکتیو و سه بعدی HRG در موده های کاری ۲ تا ۵ نیز در شکل (۹) آورده شده است.

بنابراین نیروی مفیدی که به رزوناتور وارد می شود، فقط مولفه عمودی خواهد داشت و از مولفه مماسی آن صرف نظر می کنیم.

جنس الکترودها

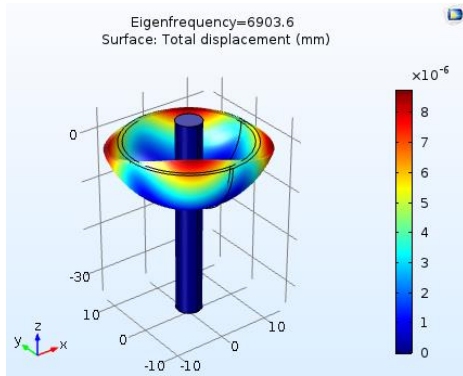
جنس الکترودها، نوع نیروی محرکه و ابعاد آنها به همراه مشخصات رزوناتور در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳. جنس الکترودها، نوع نیروی محرکه و ابعاد آنها

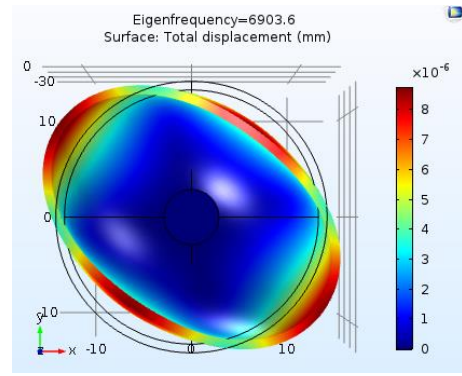
پارامتر	جنس	تحریک	ابعاد و تعداد
پیک آف ها	Iron	-	۸ الکترودها با زاویه طولی (φ) ۴۵ درجه (۴۰ درجه خود الکترودها) و ۵ درجه فاصله مجاور) و زاویه ارتفاعی (θ) ۱۰ درجه با شعاع ۱۴ میلی-متر و ضخامت ۰/۵ میلی-متر
فورسرها	Iron	$V_0 \cos\left(\frac{\omega_2 t}{2}\right)$ که همان فرکانس تحریک در مود دوم است.	۱۶ الکترودها با زاویه طولی (φ) ۲۲/۵ درجه (۲۰ درجه خود الکترودها) و ۲/۵ درجه فاصله مجاور) و زاویه ارتفاعی (θ) ۱۰ درجه با شعاع ۱۶ میلی-متر و ضخامت ۰/۵ میلی-متر
رزوناتور	Fused Quartz	-	یک نیم کره با شعاع داخلی ۱۵ میلی-متر و شعاع خارجی ۱۵/۵ میلی-متر

طراحی مدار تحریک

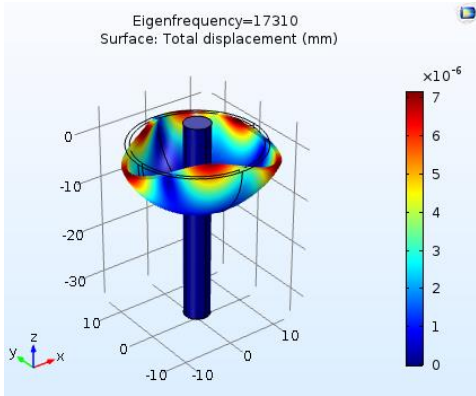
در نرم افزار کامسول، به منظور تحریک AC که سیگنالی وابسته به زمان است، نمی توان به طور مستقیم، ولتاژ را به الکترودهای فورسرها اعمال نمود و حتما باید یک مدار خارجی طراحی گردد تا بتوان الکترودها تحت بررسی را قسمتی از آن مدار در نظر گرفت. از این رو می توان از مدار تحریک زیر به منظور اعمال ولتاژ به فورسرها استفاده نمود. نمای این مدار تحریک در شکل (۶) دیده می شود. شایان ذکر است که این مدار، یک مدار تقویت کننده چند کیلوهرتز می باشد. V_{CC} را ۱۰ V در نظر می گیریم تا پالس مورد نیاز به گیت جهت روشن شدن ترانزیستور را تامین کند. فرکانس ولتاژ برق AC را ۳۴۵۱،۵ هرتز در نظر می گیریم تا مطمئن شویم نزدیکی های مود مرتبه دوم قرار ندارد (برای جلوگیری از رزونانس فرکانس برق اعمالی را نصف فرکانس مود مرتبه دوم قرار می دهیم). فرکانس مود دوم نیز توسط نرم افزار کامسول قبلا ۶۹۰۳ هرتز محاسبه شده است. ولتاژ دامنه ورودی برق AC را نیز حدود ۱ ولت در نظر خواهیم گرفت.



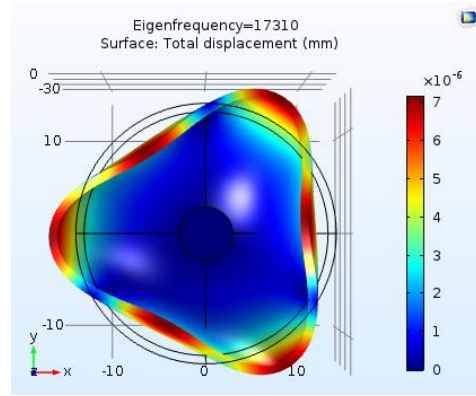
ب: مود دوم - پرسپکتیو



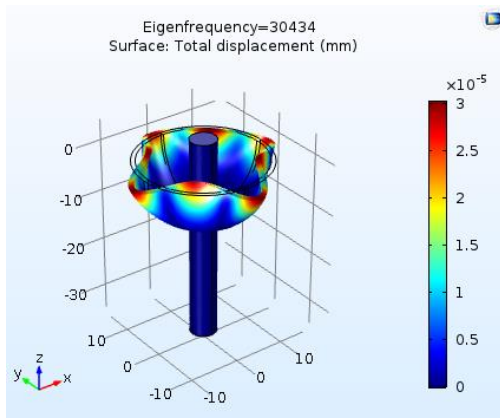
الف: مود دوم - نمای از بالا



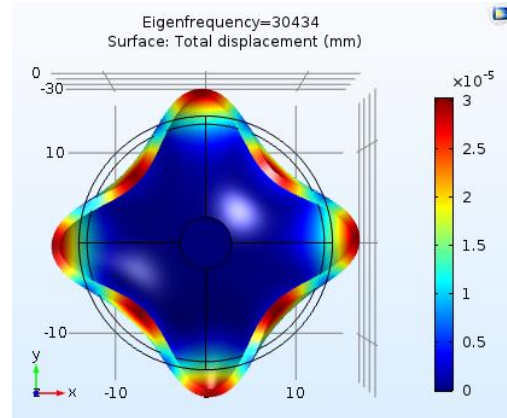
ت: مود سوم - پرسپکتیو



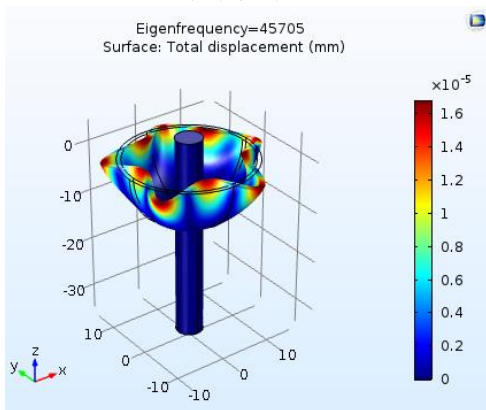
پ: مود سوم - نمای از بالا



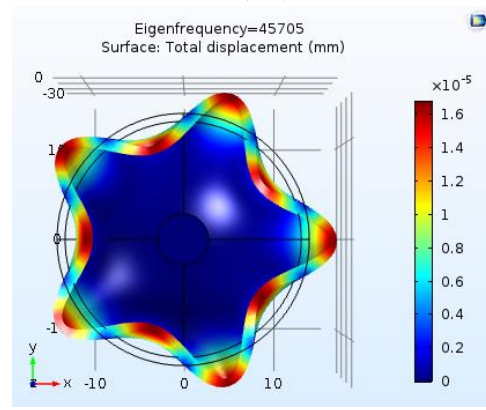
ب: مود چهارم - پرسپکتیو



الف: مود چهارم - نمای از بالا



ت: مود پنجم - پرسپکتیو



پ: مود پنجم - نمای از بالا

شکل ۹. نمایش جایجایی و فرکانس تحریک مدهای چهارم و پنجم

جدول ۴. مقایسه فرکانسهای محاسبه شده و اندازه گیری شده

شماره مود	فرکانس اندازه گیری شده	فرکانس محاسبه شده
مود دوم	6903 [Hz]	6899 [Hz]
مود سوم	17310 [Hz]	17301 [Hz]
مود چهارم	30434 [Hz]	30427 [Hz]
مود پنجم	37095 [Hz]	37281 [Hz]

جدول ۶. ولتاژ حس شده بر حسب مکان عرضی الکترودها (تغییرات زاویه (φ))

V_{sense} [V]	محدوده (θ)		محدوده (φ)		نوع حساسیت
	تا	از	تا	از	
۵.۱۹۶	۱۱۰	۱۰۰	۲۰	۰	حالت پایه فورسرها
			۴۰	۰	حالت پایه پیک آف
۵.۲۲۳	۱۱۰	۱۰۰	۲۱	۰	حالت ۱
۵.۴۰۱	۱۱۰	۱۰۰	۲۲	۰	حالت ۲
۵.۱۷۹	۱۱۰	۱۰۰	۱۹	۰	حالت ۳
۵.۱۶۱	۱۱۰	۱۰۰	۱۸	۰	حالت ۴

آنالیز حساسیت پیک آفها و فورسرها HRG

در واقع به دلیل اینکه الکترودها در فضای کروی توزیع شده اند، منظور از افزایش طول و عرض آنها، تغییرات در زوایای عرضی (φ) و ارتفاعی (θ) آنها می باشد که در ادامه طبق جداول زیر محاسبه شده اند. جدول (۵) تغییرات زاویه (θ) را بررسی می کند و در جدول (۶) تغییرات زاویه (φ) را خواهیم داشت. همان گونه که ملاحظه می گردد، تغییرات فقط برای الکترودها شماره ۱ یا الکترودها در نظر گرفته شده است و برای مابقی الکترودهای فورسرها، تعداد ۱۶ عدد و برای الکترودهای پیک آف، تعداد ۸ عدد منظور می گردد. شایان ذکر است تغییرات برای هر زاویه ۴ درجه (دو درجه بالاتر و دو درجه پایین تر از حالت پایه) در نظر گرفته شده است و نتایج خروجی به شرح زیر اعلام می گردد. هر چه الکترودهای فورسرها و پیک آف به ابتدای لبه نزدیک تر باشند و سطح بیشتری را محصور کنند، ولتاژ خروجی بیشتر خواهد شد. همچنین لازم به ذکر است که تغییرات ارتفاعی الکترودهای پیک آف و فورسرها باهم اعمال شده است.

آنالیز حساسیت تغییرات ضخامت الکترودهای HRG

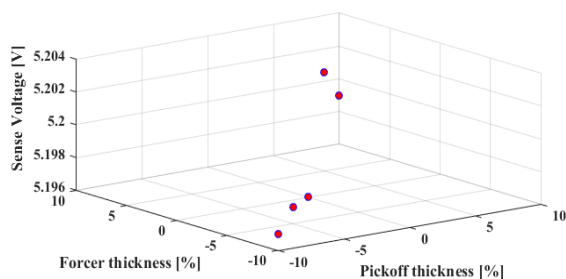
در این قسمت تغییرات ضخامت الکترودها را بررسی می کنیم. در این حالت فرض می شود که هم پیک آفها و هم فورسرها همزمان نسبت به حالت مبنا تغییر یابند. در این زمان مقدار ولتاژ سنس شده نیز تغییر می کند که در جدول (۷) نشان داده شده است. نمودار سه بعدی (۱۰) نیز تغییرات ولتاژ حس شده را طبق تغییرات ضخامت الکترودهای پیک آف و فورسرها نشان می دهد.

جدول ۷. ولتاژ حس شده بر حسب درصد افزایش یا کاهش ضخامت الکترودها

V_{sense} [V]	درصد افزایش (+) یا کاهش (-) ضخامت الکترودها		نوع حساسیت
	فورسرها	پیک آف	
۵.۱۹۶	۰	۰	حالت پایه
۵.۲۰۲	+ ۵ %	+ ۵ %	حالت ۱
۵.۱۹۷	- ۵ %	- ۵ %	حالت ۲
۵.۱۹۹	+ ۱۰ %	+ ۱۰ %	حالت ۳
۵.۱۹۷	- ۱۰ %	- ۱۰ %	حالت ۴

جدول ۵. ولتاژ حس شده بر حسب مکان ارتفاعی الکترودها (تغییرات زاویه (θ))

V_{sense} [V]	محدوده (θ)		محدوده (φ)		نوع حساسیت
	تا	از	تا	از	
۵.۱۹۶	۱۱۰	۱۰۰	۲۰	۰	حالت پایه فورسرها
			۴۰	۰	حالت پایه پیک آف
۵.۲۲۳	۱۱۰	۱۰۰	۲۱	۰	حالت ۱
۵.۴۰۱	۱۱۰	۱۰۰	۲۲	۰	حالت ۲
۵.۱۷۹	۱۱۰	۱۰۰	۱۹	۰	حالت ۳
۵.۱۶۱	۱۱۰	۱۰۰	۱۸	۰	حالت ۴



شکل ۱۰. ولتاژ حس شده بر حسب تغییرات ضخامت الکترودهای پیک آف و فورسرها

ملاحظه می گردد که هر چقدر الکترودها پهن تر باشند، ولتاژ سنس شده افزایش می یابد و این موضوع به دلیل افزایش ظرفیت خازنی خواهد بود. می توان دریافت که با افزایش دو درجه در قسمت عرضی الکترودها، ولتاژ سنس شده حدود ۴ درصد افزایش خواهد یافت.

تغییرات جنس الکترودها در ژبروسکوپ HRG

حال می توان جنس پیک آف ها و فورسرها را نیز تغییر داد و تاثیر آن را بر ولتاژ سنس شده مشاهده نمود. بدین منظور با استفاده از سه جنس مختلف پرکاربرد، جدول (۸) به دست آمده است.

جدول ۸. ولتاژ حس شده بر حسب تغییرات جنس الکترودها

جنس الکترودها	[V]
حالت ۱ Soft Iron	۵،۱۹۷
حالت ۲ Copper	۵،۲۴۶
حالت ۳ Silicon Carbide	۴،۹۵۸

بحث و مقایسه

در حالتی که از تکنولوژی پیزو استفاده می شود، مواد مورد استفاده باید حتما ضریب کیفیت بالایی داشته باشند. لذا رسیدن به فرم ایده آل هزینه ها را افزایش می دهد و همچنین، تکنولوژی پیزو می تواند با مواد ارزان تری نیز ساخته شود. ولی در این حالت باید حلقه های کنترلی بیشتری به مدار افزوده شود. از معایب پیزو می توان به گرم شدن رزوناتور در مکان های اتصال الکترودهای پیزو به آن اشاره نمود. این حرارت در بلند مدت می تواند باعث تغییر شکل آن و بازدهی پایین شود. به علاوه زمانی که از تکنولوژی پیزو استفاده می کنیم، خود آن الکترودها باعث بهم ریختن بالانس شکل می شود که اگر بخواهیم به طور دقیق دینامیک سیستم را محاسبه نماییم، با مشکل مواجه خواهیم شد. لذا پذیرفتن مقداری خطا در این حالت قابل توجیه می باشد. تکنولوژی پیزو را می توان هم با برق مستقیم و هم برق متناوب بهره برداری نمود. اما به دلیل تماس الکترودها با رزوناتور، پایین بودن ضریب کیفیت مواد مورد استفاده برای کاهش هزینه، زیاد شدن حلقه های کنترلی، افزایش حرارت در نقاط اتصال و... این مورد از ضعف زیادی برخوردار است. دامنه ولتاژ DC در این حالت بین ۱ تا ۲۰ ولت و دامنه ولتاژ AC نیز حدود چندان محدودیتی ندارد و باید با توجه به حرارت تولید شده تعیین گردد. به منظور حل این مشکلات یا باید در چیدمان الکترودها تغییر حالت داده شود (مثلا اریب شوند یا تکه تکه شوند و...) یا از سیگنال های کمکی AGC به منظور کنترل اتوماتیک بهره سیستم استفاده شود. گرچه این تکنولوژی قابل پیاده سازی روی ژبروسکوپ های دیپازونی^{۱۳} نیز خواهد بود.

اگر تکنولوژی خازنی به نحوی باشد که الکترودهای پیک آف و فورسرها در کنار یکدیگر و بیرون رزوناتور قرار گیرند، حتما باید یک ولتاژ مستقیم به رزوناتور متصل شود تا بایاس گردد. همچنین حتما باید از هر دو نمونه ولتاژ مستقیم و متناوب استفاده گردد. استفاده از ولتاژ

مستقیم به منظور بایاس الکترودها و استفاده از ولتاژ متناوب به منظور اعمال سیگنال درایو خواهد بود. در این حالت سیگنال سنس باید در ۴۵ درجه ای سیگنال درایو قرار بگیرد. سایر الکترودهای موجود نیز به منظور تیون کردن و بالانس کردن سیگنال الکتریکی درایو و سنس مورد استفاده قرار می گیرند. دامنه ولتاژ مورد استفاده در این حالت برای ولتاژ DC حدود صفر تا ۱۰۰ ولت و برای ولتاژ AC حدود ۲۰ تا ۸۰ میلی ولت کافی خواهد بود. به دلیل اینکه فرکانس رزونانس معمولا بالا می باشد، اثرات گرما (تلفات توان ترموالاستیکی) غیر قابل اغماض خواهد بود. بنابراین این مسئله باید در طراحی ها لحاظ گردد. مقدار Q_{TED}^{14} یا گرمایش ترموالاستیک، به طور مستقیم بر انتخاب ماده اثر می گذارد. به طور مثال می توان ملاحظه نمود که سیلیکون اکسید بر مستحکم تر از بقیه خواهد بود. البته می توان دید که پلی سیلیکون با ضخامت ۱ میکرومتر هم می تواند قابلیت های بالایی داشته باشد. لذا این دو ماده کاندیدای استفاده در ساخت HRG می باشند. بنابراین در این تکنولوژی (البته برای میکرو HRG) رزوناتورها و الکترودهای موجود از مواد مشتقات سیلیکون و نیتروژن ساخته می شوند تا عملکرد مناسبی را در فضای نیمه رساناها از خود نشان دهند.

لذا در حالتی که پیک آف و فورسرها مجاور هم باشند، می توان برای هر دو از جنس پلی سیلیکون ساخت. در واقع در این وضعیت پیک آف و فورسرها به خود رزوناتور جوش می خورند و هم جنس نیز می باشند. لایه بین (فضای خالی) هر دو الکترودها را سیلیکون نیتريد استفاده می کنند.

در تکنولوژی ترکیب خازن و پیزو، عملکرد ردیابی سیگنال مرجع به طور قابل قبولی توصیف شده است. دامنه ولتاژ حدود ۵ ولت DC می باشد که به پیزو ها منتقل می شود. در اینجا الکترودهای خازنی فقط برای سنس ظرفیت خازنی مورد استفاده قرار می گیرند و تماما نقش پیک آف را بازی می کنند. کنترل سیگنال و تیون کردن آنها به عهده ۸ الکترودهای پیزوی بیرونی می باشد. این تکنولوژی علی رغم داشتن معایب حالت اول، اما نتایج مناسبی را به دست می دهد. ماده مورد استفاده در این حالت برای رزوناتور Ni43CrTi (3J53) می باشد و المان های پیزو الکتریکی نیز PZT-5A انتخاب شده اند. این ماده الایسیسته و ضریب کیفیت بالایی دارد. این مورد نیز نیاز به حلقه های کنترلی زیادی دارد که قبلا بحث شده است. استفاده از تکنولوژی پیزو و خازن همزمان تجهیزات آزمایشگاهی زیادی را نسبت به سایر روش ها می طلبد که از معایب آن است. در این حالت به منظور کنترل سیستم، از سیگنال انرژی استفاده می شوند.

در تکنولوژی خازنی خالص، اگر تماما از الکترودهای خازنی استفاده شود که پیک آف ها درون رزوناتور و فورسرها بیرون آن قرار گیرند، بهترین عملکرد برای HRG حاصل خواهد شد. زیرا استفاده از ۱۶ الکترودها برای فورسرها این امکان را به ما می دهد که به آسانی سیگنال های درایو و کنترل را با دامنه و فرکانس معین به آن اعمال نماییم.

¹⁴ TED=Thermoelastic Damping

¹³ Tuning Fork

ضرایب بهینه در معادلات دیفرانسل انتگرال همزمان گالرکین-بابنو امکان پذیر است. در نهایت اگر ضرایب بهینه انتخاب شده، حلقه‌های کنترلی را از هم مجزا کنند، بهترین عملکرد HRG را شاهد خواهیم بود. اعمال ولتاژ با دامنه و فرکانس پایین نیز از مزایای این سیستم است. در این سیستم دقت بالا می‌رود، خطاهای ناشی از شتاب و نویز حذف می‌گردند، قیمت تمام شده کاهش می‌یابد و وزن سیستم نیز سبک می‌شود. استفاده از موادی با ضریب کیفیت بسیار بالا و ایده آل نیز ضرورتی نخواهد داشت. به طور خلاصه می‌توان جدول (۹) را تدوین نمود.

همچنین نبود اتصال بین الکترودها و بدنه رزوناتور نیز معایب پیرو الکترونیک را از بین می‌برد. تنها عامل بازدارنده مهم در این حالت، تاثیر پذیرفتن رزوناتور از شتاب سیستم است که آن هم با استفاده از روش‌های کنترلی ارائه شده قابل حل خواهد بود. فرکانس برق اعمالی در این حالت نصف فرکانس رزونانس مرتبه دوم می‌باشد. این موضوع تداخل تشدید را به طور کامل از بین می‌برد. استفاده از ولتاژهای مختلف با فرکانس یکسان و دامنه‌های متفاوت نیز می‌تواند یک سیستم کنترل حلقه بسته مناسبی را فراهم نماید که البته باید برای بهبود عملکرد HRG این حلقه‌ها روی هم اثر نگذارند و دکوپله شوند. دکوپله‌سازی حلقه‌های کنترلی با استفاده از آنالیز مودال و تعیین

جدول ۹. مقایسه پارامترهای مهم ژيروسکوپ بر حسب انواع تحریک

پارامتر	پیرو	خازنی تک‌محوره	خازنی و پیرو	خازنی دو محوره
قیمت	ارزان	گران	گران	متوسط
کنترل پذیری	دارد	دارد	دارد	دارد
محدوده ولتاژ DC	۱ تا ۲۰ ولت	۰ تا ۱۰۰	حدود ۵ ولت	تا ۱۰۰ ولت و بالاتر
محدوده ولتاژ AC	تا ۱۰۰ ولت و بالاتر	۲۰ تا ۸۰ میلی ولت	تا ۱۰۰ ولت و بالاتر	تا ۱۰۰ ولت و بالاتر
	استفاده از موادی با ضریب کیفیت بالا؛			
	حلقه‌های کنترلی زیاد؛	استفاده از یک ولتاژ DC برای بایاس رزوناتور؛	الکترودهای پیرو فقط فورسرها هستند و	اعمال ولتاژ بالا؛
ضعف	گرم شدن رزوناتور در محل اتصال پیروها و نهایتاً تغییر شکل رزوناتور در طولانی مدت؛	الزام وجود الکترودهای tune و بالانس؛	الکترودهای خازنی فقط پیک‌آف می‌باشند؛	تاثیر پذیری عملکرد ژيروسکوپ از شتاب سیستم؛
	بهم ریختن بالانس مکانیکی؛	پدید آمدن تلفات ترموالاستیک و محدود بودن انتخاب جنس مواد؛	استفاده از حلقه‌های کنترلی زیاد؛	
	چند تکه کردن یا ارباب کردن پیک‌آف‌ها و فورسرها برای کنترل بهتر؛			

نتیجه گیری

اندازه‌گیری، کدام طراحی بهینه را انتخاب کند. مقایسه‌های انتهایی مقاله نیز نشان داد که استفاده از تکنولوژی تحریک خازنی نسبت به حالت پیرو که به طور سنتی مورد استفاده قرار می‌گرفته است، نتایج مطلوب‌تری ارائه می‌کند و بیشتر معایب پیرو را مرتفع خواهد نمود.

مراجع

- [1] P. LYNCH, "In Retrospect Replication of Foucault's pendulum experiment in Dublin, " Proceedings of the Royal Irish Academy, Vol. 116C, pp. 1-15, 2016.
- [2] W.H. Quick, "Theory of the vibrating string as an angular motion sensor, " Journal of Applied Mechanics, Vol. 31, No. 3, pp. 523-534, 2011.
- [3] T. Tullio, "Magneto-electric motion detecting transducer, " U.S. Patent No. 3,129, 347. 14, 1964.
- [4] A. Trusov, D.M. Rozelle, and D.D. Lynch, "Hemispherical resonator gyroscope, " U.S. Patent Application, No. 15/296,774, 2018.

در این مقاله فرمول‌بندی کلی برای آنالیز تحریک دو بعدی و سه بعدی ژيروسکوپ‌های ارتعاشی کوریولیسی مبتنی بر تحریک خازنی ارائه گردید. شبیه‌سازی‌های خروجی، اعتبار سنجی روابط ارائه شده را نشان دادند و این موضوع، بیان‌گر مدل سازی دقیق HRG خواهد بود. شبیه سازی المان محدود مدل‌سازی‌ها با استفاده از نرم افزار کامسول نشان داد که تغییرات پارامترهای مختلف و تاثیر گذار بر فرکانس رزونانس HRG، می‌تواند طراحی بهینه را به شدت تحت تاثیر قرار دهند. آنالیز حساسیت مشخصات فیزیکی و هندسی ژيروسکوپ تحت مطالعه نیز بر تغییرات فرکانس رزونانس و ولتاژ خروجی حس شده توسط پیک‌آف‌ها دلالت دارد. جنس پیک‌آف‌ها و فورسرها نیز در این مطالعه آهن سخت در نظر گرفته شده است تا از خوردگی در مقابل تغییرات میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی اعمال شده به ژيروسکوپ جلوگیری کند. آنالیز حساسیت مکان ارتفاعی و عرضی الکترودهای پیک آف و فورسرها این امکان را در اختیار کاربر قرار می‌دهد که با توجه به درصد خطای قابل

- [15] IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros. Available online: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=9606> (accessed on 8 April 2019).
- [16] V. Apostolyuk, "Coriolis Vibratory Gyroscopes Theory and Design," 1st ed., Springer International Publishing: New York, NY, USA, 2016.
- [17] M. Y. Shatalov, S. V. Joubert, C. E. Coetzee, I. A. Fedotov "Free Vibration of Rotating Hollow Spheres Containing Acoustic Media". *J. Sound Vib.*, vol. 322, pp. 1038–1047, 2009.
- [18] S. Gao, "Analysis and Design of Hemispherical Resonator Gyro." Ph.D. Thesis, Harbin Engineering University, Harbin, China, 2008.
- [19] W. Li, "Measurement Method and Error Mechanism Analysis of Hemispherical Resonator Gyro." Ph.D. Thesis, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, 2013.
- [20] H. Zhao, S. Ren, W. Li, "Establishment of Dynamics Equation of HRG Resonator and Calculation of Natural Frequency." *J. Harbin Inst. Technol.*, vol. 42, pp. 1702–1706, 2010.
- [21] B. Yu, Z. Fang, C. Jiang, "Finite Element Analysis Based on Optimized HRG Resonator. Piezoelectr." *Acoustoopt.*, vol. 37, pp. 561–564, 2015.
- [22] W. Li, "Measurement Error Analysis of Hemisphere Resonant Gyro." Master's Thesis, Chongqing University, Chongqing, China, 2010.
- [23] B. Shen, "Satellite Attitude Determination Based on HRG and Star Sensor." Ph.D. Thesis, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, 2010.
- [24] X. Wang, "Error Modeling Compensation and Forces to Rebalanance Control Methods Study for Hemispherical Resonator Gyro." Ph.D. Thesis, National University of Defense Technology, Hunan, China, 2012.
- [25] X. Wang, W. Wu, B. Luo, Z. Fang, Y. Li, Q. Jiang, "Force to Rebalance Control of HRG and Suppression of Its Errors on the Basis of FPGA." *Sensors*, vol. 11, pp. 11761–11773, 2011.
- [5] Q. Shen, et al, "Bias contribution modeling for a symmetrical micromachined Coriolis vibratory gyroscope," *IEEE Sensors journal*, Vol.16, No. 3, pp. 723-733, 2016.
- [6] R.E. Stewart, D.M. Rozelle, and C.A. Lee, "Bias and scale-factor error mitigation in a Coriolis vibratory gyroscope system," *U.S. Patent No. 9,702,697*. 11, 2017.
- [7] H. Cetin, and G.G. Yaralioglu, "Analysis of vibratory gyroscopes: drive and sense mode resonance shift by coriolis force," *IEEE Sensors Journal*, Vol.16, No. 2, pp. 347-358, 2017.
- [8] Q. Shen, et al., "Turn-on bias behavior prediction for micromachined Coriolis vibratory gyroscopes," *Measurement*, Vol. 131, pp. 380-393, 2019.
- [9] Apostolyuk, Vladislav, "Coriolis Vibratory Gyroscopes: Theory and Design," Springer, 2016.
- [10] A.V. Nasedkin, and E.I. Shprayzer, "Finite Element Simulation of Dissipative Heating of Piezoelectric Vibratory Gyroscopes," *Advanced Materials*. Springer, Vol. 193, pp. 511-521, 2017.
- [11] A. Efimovskaya, and A. M. Shkel. , "Multi-Degree-of-Freedom MEMS Coriolis Vibratory Gyroscopes Designed for Dynamic Range, Robustness, and Sensitivity," *2018 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*, 2018.
- [12] L. Aaltonen, "Self-test in a closed-loop vibratory gyroscope," *U.S. Patent No. 9,846,037*. 19, 2017.
- [13] G. Casinovi, et al. , "Gyroscope sensing and self-calibration architecture based on signal phase shift," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 241, pp. 1-11, 2016.
- [14] D. Lynch, "Vibratory Gyro Analysis by the Method of Averaging." In *Proceedings of the 2nd St. Petersburg Conference on Gyroscopic Technology and Navigation*, St. Petersburg, Russia, pp. 26–34, May 1995,.

