

# تحلیل حساسیت ديفرانسیلی میکروژیروسکوپ ارتعاشی سه درجه آزادی

منیژه ذاکری<sup>۱</sup>، علی علیزاده<sup>۲</sup>، وحید عظیمی راد<sup>۳</sup>

۱ استادیار، دانشکده مهندسی فناوری های نوین، دانشگاه تبریز، تبریز، m.zakeri@tabrizu.ac.ir

۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی فناوری های نوین، دانشگاه تبریز، تبریز

۳ استادیار، دانشکده مهندسی فناوری های نوین، دانشگاه تبریز، تبریز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۰۴

## چکیده

در این مقاله رفتار میکروژیروسکوپ ارتعاشی سه درجه آزادی، که دو درجه آزادی در راستای حسگر و یک درجه آزادی در راستای تحریک دارد، پس از بررسی مدل کامل سیستم شامل بخش های مکانیکی و الکتریکی، با استفاده از روش تحلیل حساسیت گرافیکی و ديفرانسیلی مطالعه و تحلیل شده است. برای این منظور نخست معادلات حاکم بر عملکرد میکروژیروسکوپ استخراج شده است. در شبیه سازی ها، بازه فرکانسی عملکرد حسگر بررسی و تغییرات ولتاژ خروجی حسگر نسبت به تغییر پارامترهای بخش های مکانیکی و الکتریکی سیستم تحلیل حساسیت شده است. طبق دسته بندی نتایج تحلیل حساسیت، پارامترهای حساس شامل جرم ثانویه  $m_2$ ، ضریب گذردهی، طول و عرض ساختار، و مؤلفه های ولتاژ مستقیم و متناوب ولتاژ تحریک اعمالی می باشد. سیستم دارای حساسیت نسبتاً کمتر نسبت به پارامترهای فاصله اولیه صفحات خازن و ضریب سختی بوده و نسبت به تغییرات جرم اولیه  $m_1$ ، جرم ساختار دکوپله کننده  $m_f$  و مدول یانگ غیرحساس است. نمودار تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به پارامترهای جرم  $m_2$ ، ضریب سختی و فاصله اولیه بین الکترودهای خازنی کاملاً غیرخطی است و در برخی نواحی شیب بسیار تندی دارد که می توان با طراحی این متغیرها در ناحیه مناسب، تغییرات خروجی را به نحو مطلوبی کنترل کرد.

## واژگان کلیدی

مدلسازی، تحلیل حساسیت، حسگر، میکروژیروسکوپ

## ۱. مقدمه

این حسگر یکی از مهمترین اجزای سیستم های هدایت، ناوبری، ردیابی، کنترل حرکت و پایداری است و نقشی اساسی در

ژیروسکوپ<sup>۱</sup> یا دوران نما حسگری است که نرخ دوران زاویه ای را حول محوری ثابت، نسبت به چارچوبی لخت اندازه گیری می کند.

برنامه‌ریزی، ثبت و کنترل حرکت یک متحرک از یک نقطه به نقطه‌ای دیگر دارد. از اینرو ژيروسکوپها کاربردهای متنوعی در مهندسی هوافضا، هوانوردی، ادوات نظامی، تلفن‌های هوشمند، خودرو، پزشکی و سایر زمینه‌ها دارند و مطالعه ساختار آنها و توسعه فناوری آن موضوع تحقیق بسیاری از پژوهشگران است [۱]. پژوهشگران بسیاری بیش از سه دهه میکرو و نانوژيروسکوپ‌هایی مبتنی بر فناوری سیستم‌های میکرو و نانوالکترومکانیکی<sup>۲</sup> را مطالعه و بررسی کرده‌اند [۲]. دسته‌بندی این مدل‌ها به لحاظ ساختار، سازوکار عملکرد، بازه اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای، دقت، روش ایجاد حرکت، روش اندازه‌گیری نرخ دوران و روش‌های ساخت در ابعاد میکرو و نانو<sup>۳</sup> بسیار متنوع هستند [۳]. میکروژيروسکوپ‌های ارتعاشی که از جمله پرکاربردترین ساختارها به‌شمار می‌روند، براساس اثر کریولیس وارد بر جرم محک عمل می‌کنند. در ساده‌ترین نوع از این ساختار، یک جرم که امکان حرکت صفحه‌ای در دو راستای عمود بر هم را دارد، در یک راستا توسط محرک هارمونیک تحریک می‌شود. در اثر این حرکت و نیز حرکت دورانی حول محور عمود بر صفحه، یک نیروی کریولیس در راستای عمود بر راستای تحریک ایجاد می‌شود. از انواع ساختارها به‌عنوان میکروژيروسکوپ ارتعاشی می‌توان به میکروژيروسکوپ‌های متشکل از میکروتیر، صفحه، حلقه و جرم مرتعش اشاره نمود.

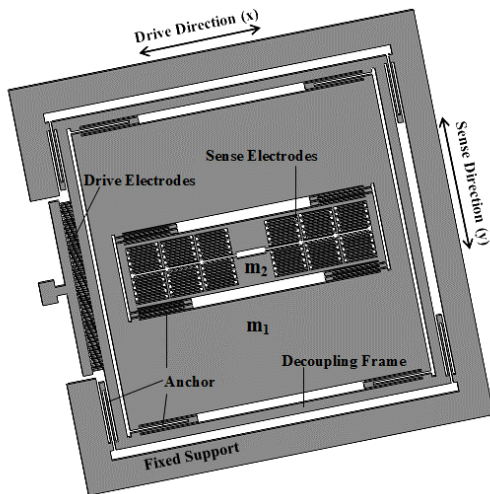
گوم و همکاران (۲۰۱۰) برای اندازه‌گیری سرعت دوران یک میکروتیر حول محور طولی آن میکروژيروسکوپ را ارائه کرده‌اند که بر مبنای نوسان جانبی تیر کار می‌کند [۴]. یکی از این ارتعاشات جانبی در راستای تحریک به‌وجود می‌آید. دوران زاویه‌ای میکروتیر، بر مبنای اثر کریولیس ارتعاش جانبی دیگری در راستای حسگر ایجاد می‌کند که توسط الکترودهای خازنی تعبیه‌شده در این راستا ثبت می‌شود. ساختار توسعه‌یافته مشابهی متشکل از چند میکروتیر، موسوم به میکروژيروسکوپ‌های شاخه‌ای<sup>۴</sup>، توسط ونگا و همکاران (۲۰۱۰) ساخته شده است [۵]. اولویت آنها در طراحی رسیدن به فاکتور کیفیت بالا جهت افزایش دقت اندازه‌گیری حسگر است. هاو و همکاران (۲۰۰۴) نیز به طراحی، مدلسازی و ساخت میکروژيروسکوپ صفحه‌ای مرتعش پرداخته‌اند [۶-۷]. این ساختار شامل یک صفحه نازک دایره‌ای است که روی لایه‌ای از جنس سیلیکون تک‌کریستالی ساخته شده است. این صفحه الاستیک با نوسان در مود ارتعاشی بیضوی خود موجب تغییر در

فاصله الکترودهای خازنی مجاورش می‌شود. تاو و همکاران (۲۰۱۰) یک میکروژيروسکوپ حلقه‌ای مرتعش بر مبنای اثر پیزوالکتریک<sup>۵</sup> ارائه کردند که برای اندازه‌گیری سرعت‌های دورانی متوسط و پایین مناسب است [۸]. این سیستم متقارن شامل حلقه‌ای است که روی هشت پایه فلزی معلق است. هر پایه توسط المان‌های پیزوالکتریک متصل به آن تحریک می‌شود، به طوری که مود اول حلقه تحریک شود. ارتعاش مود دوم حلقه، که توسط نیروی کریولیس تحریک می‌شود، به صورت یک سیگنال متناسب با سرعت زاویه‌ای ثبت می‌شود.

میکروژيروسکوپ‌های شامل جرم مرتعش، دسته دیگری از میکروساختاری‌هایی هستند که بر مبنای اثر کریولیس کار می‌کنند و در سیستم‌های کنترل حرکت نیز بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌عنوان نمونه‌ای از این میکروژيروسکوپ‌ها می‌توان به کار جین و گوپال (۲۰۱۰) در ساخت میکروژيروسکوپ دو درجه آزادی اشاره کرد [۹]. آنها به منظور افزایش مقدار خروجی سیستم (با فرض ورودی ثابت) تلاش کرده‌اند تا سیستم ساخته‌شده حداکثر تقارن ممکن را داشته باشد. در شرایط تقارن، پیک‌های ارتعاشی سیستم که مربوط به مود تحریک و مود حسگر هستند بر هم منطبق می‌شوند و به این ترتیب خروجی افزایش پیدا می‌کند. آنها پس از آزمایش‌های تجربی مشاهده کردند که تغییر دما با تأثیر بر پارامترهای ساختاری موجب تغییر رفتار سیستم می‌شود. پاتل و همکاران (۲۰۱۲) با مدلسازی میکروژيروسکوپ ارتعاشی به کمک سیستم جرم و فنر و میراکننده، روشی ابداع کردند تا تأثیر تغییر دما بر پارامترهای ساختاری را مطالعه کنند [۱۰]. با آزمایش‌های تجربی مشخص شد که می‌توان رفتار سیستم را با داشتن مدول یانگ و ضریب میرایی در دماهای مختلف پیش‌بینی کرد.

مهمترین پارامتری که عملکرد میکروژيروسکوپ‌ها براساس آن بررسی می‌شود، حساسیت است. حساسیت به صورت نسبت ولتاژ خروجی به نرخ دوران زاویه‌ای ورودی تعریف می‌شود. بنابراین جهت بالابردن حساسیت، باید پارامترها به گونه‌ای طراحی شوند که ولتاژ خروجی حسگر و در نتیجه حساسیت آن به اندازه کافی بزرگ باشد. از طرفی، همان‌طور که بحث شد، برای افزایش حساسیت میکروژيروسکوپ‌های با جرم مرتعش سعی می‌شود فرکانس‌های تشدید در دو راستای مذکور بر هم منطبق باشند. علاوه بر اینکه این انطباق بدون استفاده از روش‌های کنترلی

تحریک و حسگر و جرم  $m_2$  دارای یک درجه آزادی در راستای حسگر است.



شکل ۱. ساختار یک میکروژیروسکوپ ارتعاشی سه درجه آزادی [۱۲]

جرم  $m_1$  و چارچوب جداکننده توسط الکترودهای تحریک در راستای تحریک به ارتعاش وا داشته می‌شوند. بر اثر این حرکت و دوران، حول محور عمود بر صفحه، نیروی کوریولیس باعث نوسان جرم  $m_1$  و تمام متعلقات درونی آن (که شامل جرم  $m_2$  و الکترودهای متحرک آن می‌باشد) در راستای حسگر می‌شود. الکترودهای ثابت همچون چارچوب نگاه‌دارنده ثابت به بدنه متصل هستند. به این ترتیب حرکت نسبی بین الکترودهای ثابت و متحرک باعث ایجاد تغییر در جریان خروجی خازن‌های حسگر و نهایتاً ولتاژ خروجی می‌شود.

در شکل ۲ مدل المان‌های متمرکز ساختار مکانیکی میکروژیروسکوپ ارتعاشی سه درجه آزادی نشان داده شده است. در این شکل جرم‌های  $m_1$  و  $m_2$ ، به ترتیب معادل جرم چارچوب جداکننده و چارچوب نگاه‌دارنده ثابت است. همچنین تکیه‌گاه‌های بین المان‌ها با فنر و میراکننده مدل‌سازی شده‌اند. معادلات حاکم بر سیستم با در نظر گرفتن دو دستگاه مختصات، شامل یک دستگاه لخت متصل به چارچوب نگاه‌دارنده ثابت  $A$  و یک دستگاه چرخان متصل به چارچوب جداکننده  $B$ ، استخراج می‌شوند. با فرض اینکه دستگاه چرخان و جرم‌های متصل به چارچوب جداکننده، با سرعت و شتاب زاویه‌ای  $\Omega$  و  $\dot{\Omega}$  نسبت به دستگاه  $A$  در حال دوران باشند، بردار شتاب هر کدام از جرم‌ها در دستگاه لخت  $A$  به شکل زیر به دست می‌آید:

پرهزینه عملاً امکان‌پذیر نمی‌باشد، این مسئله موجب نوسان شدید خروجی میکروژیروسکوپ با تغییرات پارامترهای محیطی نیز می‌شود [۱۱]. یکی از راه‌حل‌های این مشکل استفاده از درجات آزادی بیشتر در راستای تحریک و یا حسگر است. وانگ و همکاران (۲۰۱۲) یک ساختار سه درجه آزادی شامل دو درجه آزادی در راستای تحریک و یک درجه آزادی در راستای حسگر ارائه کردند [۱۲]. به این ترتیب در ناحیه بین دو فرکانس تشدید مود تحریک یک ناحیه نسبتاً مسطح به وجود آمده است. با انتخاب فرکانس کاری در وسط این ناحیه می‌توان مشکل حساسیت سیستم به تغییر فرکانس را تا حدودی بر طرف نمود. در واقع این حالت مصالحه‌ای بین کاهش خروجی و افزایش پایداری پاسخ خروجی است. با توجه به تحقیقات موجود، انتخاب بهینه مقادیر پارامترهای سیستم شامل پارامترهای هندسی، ساختاری و الکتریکی و نیز در نظر گرفتن محدودیت‌های عملی، اهمیت ویژه‌ای در طراحی این حسگرها دارد. لذا مطالعه و بررسی تغییرات فرکانسی و حساسیت حسگر با تغییرات ساختار آن امری لازم و ضروری به نظر می‌رسد. برای تحلیل حساسیت سیستم‌ها روش‌های مختلفی شامل روش‌های ریاضی، آماری و گرافیکی وجود دارد.

در این پژوهش پس از مدل‌سازی و شبیه‌سازی رفتار کلی میکروژیروسکوپ، به‌عنوان نوآوری تأثیر تغییر پارامترهای سیستم بر عملکرد یک میکروژیروسکوپ ارتعاشی سه درجه آزادی با استفاده از روش‌های تحلیل حساسیت گرافیکی و دیفرانسیلی با توجه به دقت کافی روش‌ها و سادگی استفاده از این روش‌ها مطالعه و تحلیل خواهد شد. علاوه بر آن، با تحلیل حساسیت پارامترهای سیستم، راهکارهایی برای بهبود طراحی و عملکرد سیستم ارائه خواهد شد.

## ۲. مدل‌سازی میکروژیروسکوپ ارتعاشی سه درجه آزادی

ساختار میکروژیروسکوپ‌های ارتعاشی سه درجه آزادی، چنانکه در شکل ۱ نمایش داده شده است، از بخش‌های مختلفی چون چارچوب نگاه‌دارنده ثابت<sup>۶</sup> (متصل به جسمی که قرار است سرعت دورانی‌اش محاسبه شود)، دو جرم  $m_1$  و  $m_2$ ، چارچوب جداکننده<sup>۷</sup>، جرم  $m_f$  و سه مجموعه تکیه‌گاهی<sup>۸</sup> برای تعلیق جرم‌ها می‌باشد. جرم  $m_1$  دارای دو درجه آزادی در راستای

معادلات حرکت سیستم با توجه به درجات آزادی جرمها به شکل زیر خواهد بود:

$$(m_1 + m_2 + m_f) \ddot{x}_1 + c_{1x} \dot{x}_1 + k_{1x} x_1 = F_d(t) \quad (4)$$

$$m_1 \ddot{y}_1 + c_{1y} \dot{y}_1 + k_{1y} y_1 = k_{2y} (y_2 - y_1) - 2m_1 \Omega_z \dot{x}_1 \quad (5)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 + c_{2y} \dot{y}_2 + k_{2y} y_2 = k_{2y} y_1 - 2m_2 \Omega_z \dot{x}_2 \quad (6)$$

که در آن، جرم چارچوب جداکننده،  $F_d(t)$  نیروی الکترواستاتیکی تحریک اعمال شده به جرم  $m_1$  با فرکانس  $\omega_d$  و  $\Omega_z$  سرعت زاویه‌ای ورودی ژيروسکوپ حول محور  $k_{ij}$ ،  $z$  و  $c_{ij}$  به ترتیب ضریب الاستیک و دمپینگ وارد بر جرمهاست، به نحوی که  $i$  اندیس جرم و  $j$  اندیس جهت است. نیروی کریولیس وارد بر  $m_2$  در جهت حسگر معادل  $2m_2 \Omega_z \dot{x}_2$  است که نرخ دوران زاویه‌ای ورودی براساس آن اندازه‌گیری می‌شود. براساس این معادلات، برای فرکانس‌های طبیعی سیستم در راستای حسگر از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$\omega_{1y} = \sqrt{\frac{k_{1y}}{m_1}} \quad (7)$$

$$\omega_{2y} = \sqrt{\frac{k_{2y}}{m_2}} \quad (8)$$

با تعریف نسبت این فرکانس‌های تشدید به شکل  $\mu_y = m_2 / m_1$  و نسبت جرمها به صورت  $\gamma_y = \omega_{2y} / \omega_{1y}$  فرکانس‌های تشدید هم‌فاز و غیرهم‌فاز سیستم از معادله‌های زیر به دست می‌آیند:

$$f_{y-n1} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( 1 + \mu_y + \frac{1}{\mu_y^2} + \sqrt{\left( 1 + \mu_y + \frac{1}{\mu_y^2} \right)^2 - \frac{4}{\mu_y^2}} \right) \frac{\omega_{2y}}{2\pi}} \quad (9)$$

$$f_{y-n2} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( 1 + \mu_y + \frac{1}{\gamma_y^2} + \sqrt{\left( 1 + \mu_y + \frac{1}{\gamma_y^2} \right)^2 - \frac{4}{\gamma_y^2}} \right) \frac{\omega_{2y}}{2\pi}} \quad (10)$$

معادله پاسخ خروجی سیستم  $y_2$  نیز از معادلات ۴ تا ۶ به دست می‌آید.

$$\frac{Y_2}{X_1} = \frac{(-2m_2(k_{1y} + k_{2y} + c_{1y} - m_1\omega^2) - 2m_1k_{2y})}{(k_{1y} + k_{2y} + c_{1y} - m_1\omega^2)} \frac{(-2m_2(k_{1y} + k_{2y} + c_{1y} - m_1\omega^2) - 2m_1k_{2y})\omega\Omega}{(k_{2y} + c_{2y}\omega - m_2\omega^2) - k_{2y}^2} \quad (11)$$

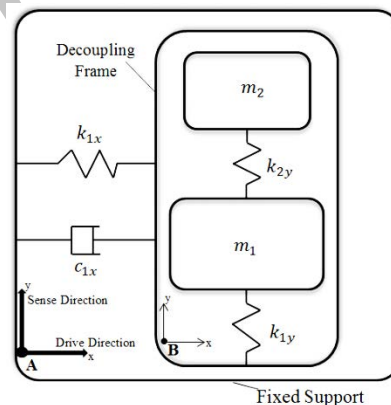
$$a_A = a_B + \dot{\Omega} \times r_B + \Omega \times (\Omega \times r_B) + 2\Omega \times V_B \quad (1)$$

که در آن،  $r_B$ ،  $V_B$  و  $a_B$  به ترتیب بردارهای موقعیت، سرعت و شتاب جرمها در دستگاه چرخان است. معادلات حرکت میکروژیروسکوپ با تعمیم معادله ۱ برای حرکت جرمهای  $m_1$  و  $m_2$  در حالت کلی به شکل زیر خواهد بود [۱۲]:

$$m_1 a_1 = F_1 + F_d + F_r - 2m_1 \Omega \times V_1 - m_1 \Omega \times (\Omega \times r_1) - m_1 \dot{\Omega} \times r_1 \quad (2)$$

$$m_2 a_2 = F_2 - F_r - 2m_2 \Omega \times V_2 - m_2 \Omega \times (\Omega \times r_2) - m_2 \dot{\Omega} \times r_2 \quad (3)$$

که در آنها،  $F_d$  نیروی الکترواستاتیکی تحریک وارد بر چارچوب جداکننده و  $F_1$  و  $F_2$  به ترتیب نیروهای عکس‌العمل تکیه‌گاهی وارد بر  $m_1$  و  $m_2$  و  $F_r$  نیروی عکس‌العمل الاستیک بین  $m_2$  و  $m_1$  می‌باشد. همچنین  $r_1$  و  $r_2$  به ترتیب بردارهای مکان جرمهای  $m_1$  و  $m_2$ ، و  $V_1$  و  $V_2$  بردارهای سرعت آنها در دستگاه چرخان  $B$  می‌باشند.



شکل ۲. مدل المان‌های متمرکز ساختار مکانیکی

میکروژیروسکوپ ارتعاشی سه درجه آزادی [۱۲]

در مدلسازی میکروژیروسکوپ ارتعاشی سه درجه آزادی، فرض می‌شود که حسگر در جهت خارج صفحه،  $z$ ، دارای سختی زیادی است و بدین ترتیب تمام حرکت‌های مفروض سیستم در جهت‌های  $x$  و  $y$  خواهند بود. چارچوب جداکننده مقید به حرکت در جهت تحریک بوده و  $m_2$  به طور خالص در جهت حسگر نوسان می‌کند. همچنین، چون فرکانس اعمال شده به میکروژیروسکوپ بسیار بیشتر از فرکانس دورانی ورودی می‌باشد، می‌توان از پارامتر  $\Omega_z^2$  صرف‌نظر کرد. همچنین با فرض ثابت بودن نرخ دوران، مشتق این پارامتر نیز صفر خواهد شد. نهایتاً،

گرافیکی و دیفرانسیلی مورد مطالعه قرار می‌گیرد تا ناحیه کاری بهینه براساس تغییرات پارامترهای حساس تعیین گردد. در شبیه‌سازی رفتار دینامیکی سیستم، از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. مقادیر نامی پارامترهای میکروژیروسکوپ در جدول ۱ ارائه شده است که جهت مقایسه نتایج مطابق با مقادیر موجود انتخاب شده‌اند [۱۳-۱۴].

جدول ۱. مقادیر نامی پارامترهای شبیه‌سازی

مقدار نامی	پارامتر
$2/46 \times 10^{-6}$	$m_1 (kg)$
$1/54 \times 10^{-7}$	$m_2 (kg)$
$1/19 \times 10^{-7}$	$m_f (kg)$
۶۱/۲	$k_{1x} (N/m)$
۷۸/۴	$k_{1y} (N/m)$
۳/۳۶	$k_{2y} (N/m)$
$8/54 \times 10^{-5}$	$c_{1x} (N.s/m)$
$4/62 \times 10^{-6}$	$c_{2y} (N.s/m)$
$1/33 \times 10^{-5}$	$c_{1y} (N.s/m)$
۴۸	$N$
۶۰	$V_{AC} (V)$
۱۰۰	$V_{DC} (V)$
$8/854 \times 10^{-12}$	$\epsilon_0 (F/m)$
$85 \times 10^{-6}$	$x (m)$
$6 \times 10^{-6}$	$w (m)$
$10 \times 10^{-6}$	$y_0 (m)$

در شکل ۳ نمودار تغییرات ولتاژ خروجی میکروژیروسکوپ نسبت به فرکانس آمده است. مقادیر حاصل از شبیه‌سازی فرکانس‌های طبیعی میکروژیروسکوپ برای نرخ دوران زاویه‌ای ثابت  $\Omega$  معادل ۵۰ درجه بر ثانیه، در مد تحریک  $f_y$  و نیز مد حسگر  $f_{y-n1}$  و  $f_{y-n2}$  براساس معادلات ۱۴ تا ۱۶ و مقادیر جدول ۱، به ترتیب برابر با  $7/732$ ،  $7/696$  و  $3/943$  هرتز به دست آمده‌اند که مشابه نتایج تئوری و تجربی حاصل در تحقیقات گذشته‌اند [۱۴]. در این میکروژیروسکوپ فرکانس طبیعی مد تحریک طوری تنظیم شده است که مقدار آن در بازه مسطح مابین دو فرکانس طبیعی به دست آمده برای مد حسگر قرار بگیرد. در شکل‌های ۴ تا ۱۴ نمودار تغییرات ولتاژ خروجی میکروژیروسکوپ نسبت به تغییر پارامترهای طراحی حول نقطه نامی تعریف شده در

در معادله ۱۱،  $X_1$  جابه‌جایی جرم  $m_1$  در راستای تحریک و  $\omega$  فرکانس تحریک است. معادله جابه‌جایی جرم  $m_1$  در راستای تحریک،  $X_1$ ، از معادله ۱۲ به دست خواهد آمد:

$$X_1 = \frac{2\epsilon_0 x w N V_{AC} V_{DC}}{k_{1x} y_0^2} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega}{\omega_d}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{Q_d \omega_d}\right)^2}} \quad (12)$$

که در آن  $\epsilon_0$  ضریب گذردهی،  $V_{AC}$  و  $V_{DC}$  به ترتیب ولتاژهای اعمالی متناوب و مستقیم هستند. همچنین  $x$  و  $w$  به ترتیب عرض و طول هر یک از صفحات خازن،  $N$  تعداد الکترودها و  $y_0$  فواصل اولیه بین صفحات خازن در راستای تحریک است. همچنین فاکتور کیفیت از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$Q_d = \frac{(m_1 + m_2 + m_f) \omega_d}{c_{1x}} \quad (13)$$

با جایگذاری معادله ۱۲ در ۱۱، مقدار جابه‌جایی جرم آزمون به دست می‌آید. در حسگرهای الکترواستاتیکی برای خطی‌سازی رابطه خروجی حسگر با پارامتر ورودی، از ساختارهای حسگر تفاضلی استفاده می‌شود که در آن، ولتاژ خروجی و جابه‌جایی خروجی به صورت خطی با هم متناسب هستند [۱۳].

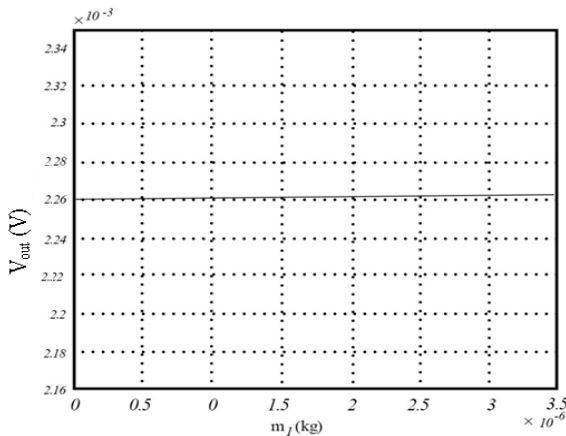
$$V_{out} = \frac{Y_2}{y_0} V_m \quad (14)$$

که در آن،  $V_m$  ولتاژ نامی اعمالی به پایانه‌های بخش الکترواستاتیکی حسگر است.

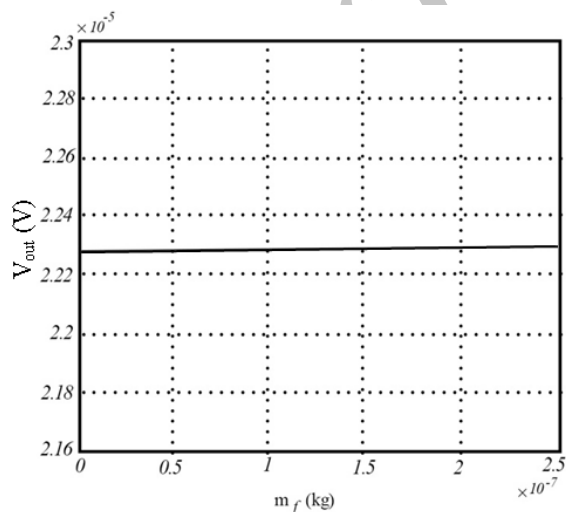
### ۳. شبیه‌سازی رفتار فرکانسی میکروژیروسکوپ

در میکروژیروسکوپ‌های سه درجه آزادی ارتعاشی برای رفع مشکل انطباق فرکانس‌های تشدید در راستای تحریک و حسگر، از ناحیه مسطح بین دو فرکانس تشدید حسگر استفاده می‌شود و با قرار دادن فرکانس تشدید راستای تحریک در این ناحیه، حساسیت بالای حسگر به تغییرات پارامترهای سیستم رفع می‌شود. رفتار خروجی میکروژیروسکوپ متأثر از پارامترهای زیادی شامل متغیرهای الکتریکی، مکانیکی، هندسی و نیز شرایط محیطی است. در سیستم‌هایی با تعداد متغیرهای زیاد و حساسیت بالا، تحلیل حساسیت سیستم که ابزار اصلی در افزایش درک اولیه از طراحی سیستم و بهینه‌سازی آن می‌باشد، ضروری است. لذا در این بخش تأثیر هر یک از این متغیرها بر حساسیت خروجی سیستم و میزان اهمیت آنها با استفاده از روش تحلیل حساسیت

نسبت به تغییر جرم  $m_2$  مشاهده می‌شود. مشخص است که نمودار کاملاً غیرخطی و نزولی می‌باشد و با کاهش مقدار جرم  $m_2$ ، ولتاژ خروجی افزایش می‌یابد. مقدار نامی این متغیر  $1.0 \times 10^{-7}$  کیلوگرم و شیب نمودار در نقطه نامی  $58/7716$ - است. در این نقطه به ازای افزایش به میزان ۵ درصد در جرم  $m_2$ ، ولتاژ خروجی  $8/15$  درصد کاهش می‌یابد. ضریب تأثیر این پارامتر در مقادیر جرم‌های پایین‌تر بسیار بیشتر می‌شود. شکل ۶ نمودار تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به تغییر جرم چارچوب جداکننده  $m_f$  را نشان می‌دهد که تقریباً خطی و بدون شیب است. مقدار نامی این متغیر  $1.0 \times 10^{-7}$  کیلوگرم و شیب نمودار در نقطه نامی در حدود  $0.0659$  است. در این نقطه به ازای افزایش ۵ درصدی جرم  $m_f$ ، ولتاژ خروجی  $0.02$  درصد افزایش می‌یابد.



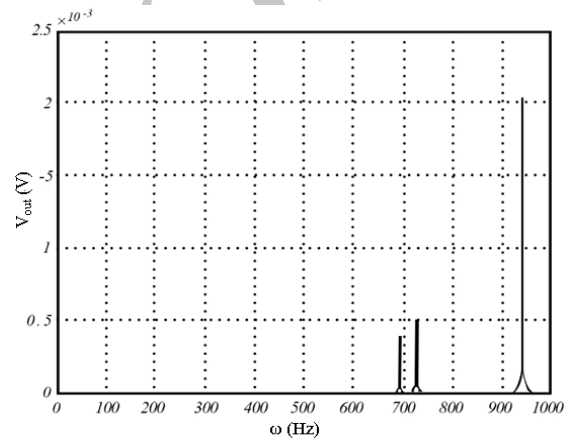
شکل ۴. تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به تغییرات جرم  $m_1$



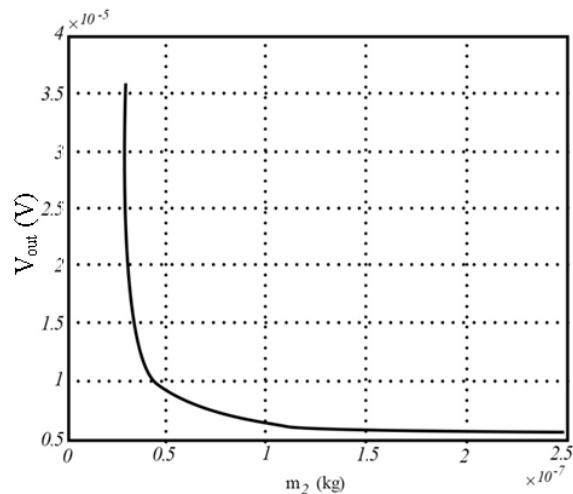
شکل ۶. تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به تغییرات جرم  $m_f$

می‌باشد. مقدار نامی این متغیر  $3/36$  نیوتن بر متر بوده و شیب نمودار در نقطه نامی در حدود  $3/829 \times 10^{-5}$  است. در این نقطه به

جدول ۱ مشاهده می‌شود. در این تحلیل‌ها، به‌ترتیب تأثیر جرم‌های ساختاری شامل  $m_1$ ،  $m_2$  و  $m_f$ ، سختی تکیه‌گاه الاستیک، ضریب گذردهی، ابعاد صفحات الکترواستاتیک و ولتاژهای اعمالی به پایانه‌های آنها و فاصله اولیه بین صفحات بررسی شده است. در نهایت تأثیر تغییر مدول یانگ ماده و یفر مورد استفاده در ساخت میکروژئروسکوپ نیز بررسی شده است. در شکل ۴ نمودار تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به تغییر جرم  $m_1$  مشاهده می‌شود. این نمودار تقریباً به‌صورت خطی و بدون شیب می‌باشد. مقدار نامی جرم  $m_1$  در این ساختار  $2/46 \times 10^{-6}$  کیلوگرم است. در نقطه نامی شیب نمودار معادل  $0.357$  بوده و به ازای تغییر به میزان ۵ درصد در جرم  $m_1$ ، ولتاژ خروجی  $0.2$  درصد افزایش می‌یابد. در شکل ۵ نمودار تغییرات ولتاژ خروجی



شکل ۳. نمودار ولتاژ خروجی سیستم نسبت به فرکانس



شکل ۵. تغییرات ولتاژ خروجی بر اساس تغییرات جرم  $m_2$

در شکل ۷ نمودار تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به تغییرات سختی مشاهده می‌شود که نمودار کاملاً غیرخطی و صعودی

شده که به صورت غیرخطی نزولی می‌باشد. مقدار نامی این متغیر  $10^{-6}$  متر بوده و شیب نمودار در این نقطه در حدود  $9/4430$  است. در این نقطه به ازای افزایش فاصله اولیه صفحات خازن به میزان ۵ درصد، ولتاژ خروجی تقریباً  $1/36$  درصد کاهش می‌یابد. در شکل ۱۴ نمودار تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به تغییر مدول یانگ ماده ویفر نشان داده شده که به صورت تقریباً غیرخطی و با شیب کمی نزولی می‌باشد. مقدار نامی این متغیر  $214$  گیگاپاسکال بوده و شیب نمودار در این نقطه در حدود  $10^{-8} \times 1/3$  است. در این نقطه به ازای افزایش فاصله اولیه صفحات خازن به میزان ۵ درصد، ولتاژ خروجی تقریباً  $0/06$  درصد کاهش می‌یابد. تأثیر عمده این پارامتر در تعیین سختی تکیه‌گاه‌های الاستیک نگه‌دارنده است. طبق نتایج به دست آمده در نمودارهای شکل‌های ۴ تا ۱۴، می‌توان پارامترهای سیستم را برحسب تأثیر آن بر ولتاژ خروجی به سه دسته حساس، با حساسیت کم و غیرحساس تقسیم‌بندی کرد. با توجه به مقادیر عددی به دست آمده، در جدول ۲ دسته‌بندی پارامترهای میکروژیروسکوپ به ترتیب بیشترین تا کمترین تأثیر بر تغییرات ولتاژ خروجی ارائه شده است. با توجه به جدول ۲، پارامترهای حساس سیستم شامل جرم  $m_2$ ، ضریب گذردهی، طول و عرض ساختار، و مؤلفه‌های ولتاژ مستقیم و متناوب ولتاژ تحریک اولیه سیستم می‌باشند که بیشترین تأثیر را بر خروجی خواهند داشت. فاصله اولیه صفحات خازن و ضریب سختی دارای حساسیت نسبتاً کمتر است. سیستم نسبت به تغییرات جرم  $m_1$ ،  $m_f$  و مدول یانگ غیرحساس بوده و تغییرات این پارامترها تأثیر چندانی بر مقدار ولتاژ خروجی ندارد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

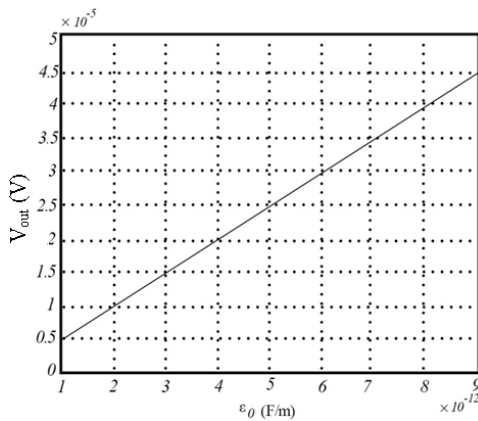
میکروژیروسکوپ‌های ارتعاشی از جمله پرکاربردترین حسگرها به‌شمار می‌روند. در این پژوهش رفتار خروجی ژيروسکوپ ارتعاشی با دو درجه آزادی در راستای حسگر و یک درجه آزادی در راستای تحریک با استفاده از مدل‌سازی سیستم شامل بخش‌های مکانیکی و الکتریکی، شبیه‌سازی و تحلیل حساسیت شد. فرکانس کاری این حسگر در ناحیه مسطح بین دو فرکانس تشدید مود تحریک قرار دارد. در این میکروژیروسکوپ، که از دو چارچوب نگه‌دارنده ثابت و جداکننده، سه جرم و سه مجموعه تکیه‌گاهی برای تعلیق جرم‌ها تشکیل شده، حرکت نسبی بین الکترودهای ثابت و متحرک موجود در سیستم سبب ایجاد تغییر در جریان

ازای افزایش به میزان ۵ درصد در مقدار سختی، ولتاژ خروجی  $1/04$  درصد افزایش می‌یابد. با افزایش مقادیر سختی به بالای ۴ نیوتن بر متر، حساسیت ولتاژ خروجی به تغییرات این پارامتر به شدت افزایش می‌یابد و لذا در طراحی باید در انتخاب مقدار این پارامتر دقت کرد.

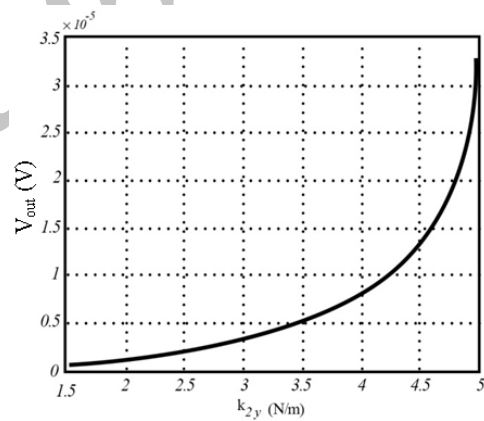
در شکل ۸ نمودار تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به تغییر ضریب گذردهی نشان داده شده که تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد. مقدار نامی این متغیر  $10^{-12} \times 8/854$  فاراد بر متر بوده و شیب نمودار در نقطه نامی در حدود  $4/9361 \times 10^{-6}$  است. در این نقطه به ازای افزایش ضریب گذردهی به میزان ۵ درصد، ولتاژ خروجی  $4/8$  درصد افزایش می‌یابد. طبق نتایج به دست آمده، ولتاژ خروجی نسبت به این پارامتر بسیار حساس بوده و لذا در فاز طراحی با انتخاب ماده‌ای با ضریب گذردهی مناسب می‌توان ولتاژ خروجی و در نتیجه حساسیت حسگر را بسیار افزایش داد. در شکل ۹ نمودار تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به تغییر عرض ساختار نشان داده شده که تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد. مقدار نامی این متغیر  $10^{-5} \times 0/6$  متر بوده و شیب نمودار در نقطه نامی در حدود  $2/1852$  است. در این نقطه به ازای افزایش عرض ساختار به میزان ۵ درصد، ولتاژ خروجی  $4/8$  درصد افزایش می‌یابد. در شکل ۱۰ نمودار تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به تغییر طول ساختار نشان داده شده که تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد. مقدار نامی این متغیر  $10^{-6} \times 8$  متر بوده و شیب نمودار در این نقطه در حدود  $5/4630$  است. در این نقطه به ازای افزایش طول ساختار به میزان ۵ درصد، ولتاژ خروجی تقریباً  $4/98$  درصد افزایش می‌یابد. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نمودار تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به تغییرات ولتاژ تحریک ورودی اولیه، که شامل دو مؤلفه ولتاژ مستقیم و متناوب است، به دست آمده است؛ چنان‌که مشاهده می‌شود نمودارها تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابند. مقدار نامی متغیر ولتاژ مستقیم  $100$  ولت بوده و شیب نمودار در این نقطه در حدود  $4/3704 \times 10^{-7}$  است. در این نقطه به ازای افزایش ۵ درصدی ولتاژ مستقیم، ولتاژ خروجی تقریباً  $4/53$  درصد افزایش می‌یابد. مقدار نامی متغیر ولتاژ متناوب  $60$  ولت بوده و شیب نمودار در این نقطه در حدود  $7/284 \times 10^{-7}$  است. در این نقطه به ازای افزایش ۵ درصدی ولتاژ متناوب، ولتاژ خروجی تقریباً  $4/5$  درصد افزایش می‌یابد. در شکل ۱۳ نمودار تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به تغییر فاصله اولیه صفحات خازن نشان داده

دارند. سیستم دارای حساسیت کمتری نسبت به پارامترهای فاصله اولیه صفحات خازن و ضریب سختی بوده و نسبت به تغییرات جرم  $m_1$ ، جرم  $m_f$  و مدول یانگ غیرحساس است. همچنین در بهینه‌سازی طراحی بر مبنای تحلیل حساسیت، رفتار نمودار تغییرات ولتاژ خروجی در محدوده تغییرات پارامترهای سیستم قابل استفاده خواهد بود. تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به پارامترهای جرم  $m_1$ ، جرم  $m_f$ ، ضریب گذردهی، عرض و طول صفحات الکترواستاتیک، مؤلفه‌های ولتاژ اعمالی و مدول یانگ نسبتاً خطی است. لذا رفتار سیستم نسبت به تغییرات این پارامترها قابل پیش‌بینی است و با اطمینان بیشتری می‌توان چنین پارامترهایی را جهت افزایش خروجی سیستم تغییر داد. از طرفی نمودار تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به برخی پارامترها شامل جرم  $m_2$ ، ضریب سختی و فاصله اولیه بین الکترودهای خازنی کاملاً غیرخطی بوده و در برخی نواحی دارای شیب بسیار تندی می‌باشد. می‌توان با تغییر این متغیرها در ناحیه مناسب، خروجی را به نحو مطلوبی افزایش داد یا ثابت نگاه داشت.

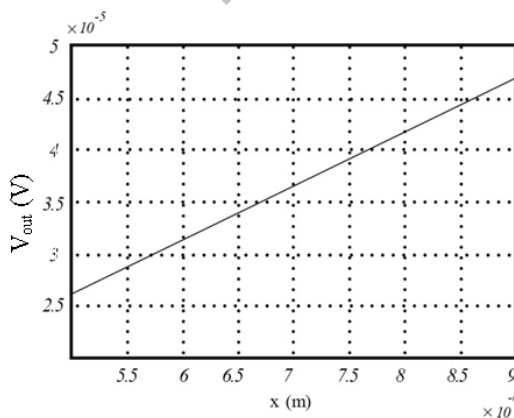
خروجی خازن‌های سیستم و نهایتاً ولتاژ خروجی حسگر می‌شود. با توجه به تحقیقات موجود، انتخاب بهینه مقادیر پارامترهای سیستم شامل پارامترهای هندسی و ساختاری و نیز در نظر گرفتن محدودیت‌های عملی، اهمیت ویژه‌ای در فاز طراحی این حسگرها دارد. از اینرو، در این پژوهش پس از مدلسازی و شبیه‌سازی رفتار دینامیکی میکروژنروسکوپ، تأثیر تغییر پارامترهای سیستم بر عملکرد آن با استفاده از روش تحلیل حساسیت گرافیکی و دینامیکی مطالعه و تحلیل شد. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، ابتدا تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به فرکانس شبیه‌سازی شده و فرکانس‌های تحریک و کاری سیستم با مقادیر تجربی موجود صحه‌گذاری شد. سپس تحلیل حساسیت گرافیکی اجرا و مقادیر حساسیت ولتاژ خروجی سیستم نسبت به پارامترهای بخش‌های مکانیکی و الکتریکی سیستم استخراج شد. طبق نتایج به‌دست آمده، سیستم نسبت به پارامترهای جرم  $m_2$ ، ضریب گذردهی، طول و عرض ساختار، و مؤلفه‌های ولتاژ مستقیم و متناوب ولتاژ تحریک اولیه حساس می‌باشد و لذا بیشترین تأثیر را بر خروجی



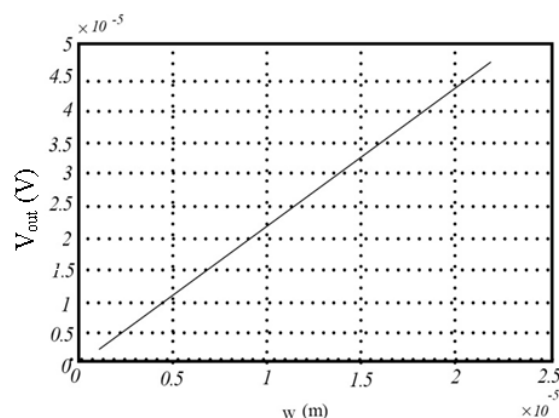
شکل ۸. تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به تغییرات ضریب گذردهی



شکل ۷. تغییرات ولتاژ خروجی سیستم نسبت به تغییرات سختی

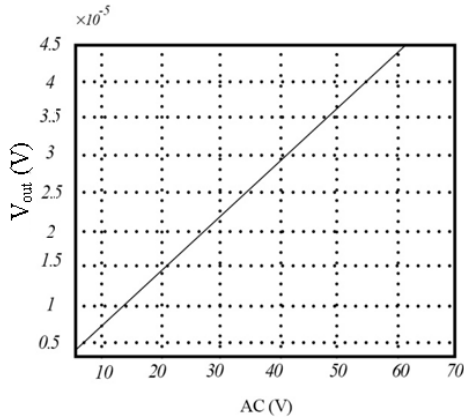


شکل ۱۰. تغییرات ولتاژ خروجی سیستم نسبت به تغییر طول ساختار

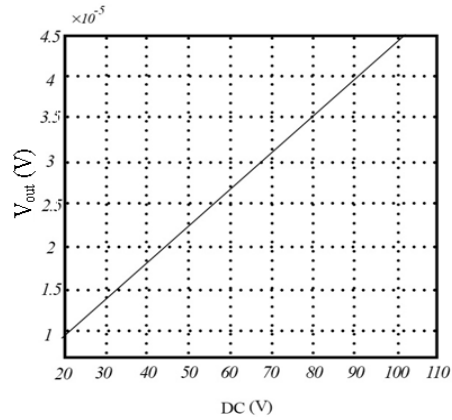


شکل ۹. تغییرات ولتاژ خروجی با تغییرات عرض ساختار

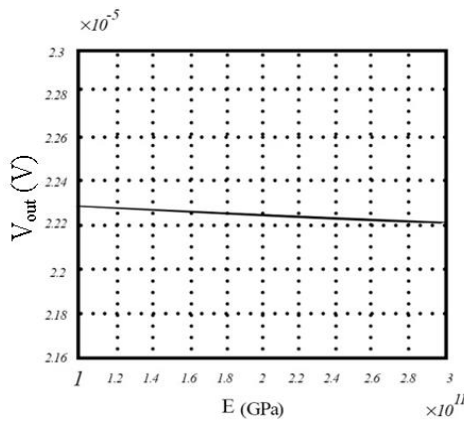




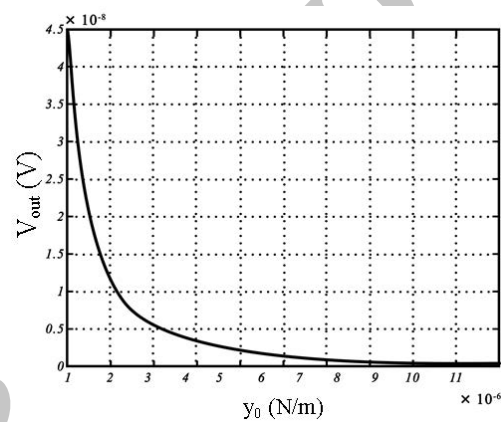
شکل ۱۲. تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به تغییرات ولتاژ متناوب



شکل ۱۱. تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به تغییرات ولتاژ مستقیم



شکل ۱۴. تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به تغییرات مدول یانگ



شکل ۱۳. تغییرات ولتاژ خروجی نسبت به تغییرات فاصله صفحات خازن

جدول ۲. حساسیت دیفرانسیلی ولتاژ خروجی نسبت به پارامترهای سیستم

دسته	حساسیت	پارامتر
حساس	-۸/۱۵	جرم $m_2$
حساس	۴/۹۸	طول
حساس	۴/۸	عرض
حساس	۴/۸	ضریب گذردهی
حساس	۴/۵۲	ولتاژ مستقیم
حساس	۴/۵	ولتاژ متناوب
حساسیت کم	-۱/۳۶	فاصله اولیه
حساسیت کم	۱/۰۴	سختی
غیر حساس	-۰/۰۶	مدول یانگ
غیر حساس	۰/۰۲	جرم $m_1$
غیر حساس	۰/۰۰۲	جرم $m_f$

## ۵. مأخذ

[1] D. Choukroun, Y. Oshman, J. Thienel, M. Idan, *Advances in Estimation, Navigation, and Spacecraft Control*, Springer, 2015.

[2] R. Antonello, R. Oboe, *MEMS Gyroscopes for Consumers and Industrial Applications, Microsensors, INTECH*, pp. 253-280, 2011.

- [3] M. Wen, Z. Luo, S. Liu, A characterization of the performance of MEMS vibratory gyroscope in different fields, in *15<sup>th</sup> International Conference on Electronic Packaging Technology*, Chengdu, China, 12-15 Aug 2014.
- [4] M. Ghommem, A. H. Nayfeh, S. Choura, F. Najjar, E. M. Abdel-Rahman, Modeling and performance study of a beam microgyroscope, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, No. 23, pp. 4970-4979, 2010.
- [5] R. Wanga, P. Chenga, F. Xiea, D. Youngb, Z. Hao, A multiple-beam tuning-fork gyroscope with high quality factors, *Sensors and Actuators*, Vol. 166, No. 1, pp. 22-33, 2010.
- [6] S. Pourkamali, Z. Hao, F. Ayazi, VHF single crystal silicon elliptic bulk-mode capacitive disk resonators-part I: design and modeling, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 13, No. 6, pp. 1043-1053, 2004.
- [7] Z. Hao, S. Pourkamali, F. Ayazi, VHF single crystal silicon capacitive elliptic bulk-mode disk resonators-part II: implementation and characterization, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 13, No. 6, pp. 1054-1062, 2004.
- [8] Y. Tao, X. Wu, D. Xiao, Y. Wua, H. Cui, X. Xi, B. Zhu, Design, analysis and experiment of a novel ring vibratory gyroscope, *Sensors and Actuators*, Vol. 168, No. 2, pp. 286-29, 2010.
- [9] A. Jain, R. Gopal, 2-DOF vibratory gyroscope fabricated by SU-8 based UV-LIGA process, *Microsystem technologies*, Vol. 20, No. 7, pp. 1291-1297, 2010.
- [10] C. Patel, P. McCluskey, Modeling and simulation of the MEMS vibratory gyroscope, *13th IEEE ITherm Conference*, San Diego, USA, 30 May-01 Jun 2012.
- [11] C. Acar, A. Shkel, Nonresonant micromachined gyroscopes with structural mode-decoupling, *IEEE SENSORS JOURNAL*, Vol. 3, No. 4, pp. 497-506, 2003.
- [12] W. Wang, X. Lv, F. Sun, Design of micromachined vibratory gyroscope with two degree-of-freedom drive-mode and sense-mode, *IEEE SENSORS JOURNAL*, Vol. 12, No. 7, pp. 2460-2464, 2012.
- [13] C. Acar, A. Shkel, *MEMS vibratory gyroscope: structural approaches to improve robustness*, Springer, 2008.
- [14] C. Acar, A. Shkel, Inherently robust micromachined gyroscopes with 2-DOF sense-Mode oscillator, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 15, No. 2, pp. 380-387, 2006.

پی نوشت

1. gyroscope
2. micro / nano electro mechanical systems
3. micro / nano fabrication
4. tuning fork micro gyroscopes
5. piezoelectric effect
6. fixed support
7. decoupling frame
8. anchor