تحلیل دینامیکی یک میکرومحرک پیچشی دو محوره

مژده خادم‌باشی[۱و۲*]، حمید معین‌فرد[۳و۴]

[۱] کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، مشهد، ایران

[۲] مرکز *R&T*، گروه کارخانه‌جات پارت‌لاستیک، مشهد، ایران

[۳] دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، مشهد، ایران

[۴] قطب علمی رایانش نرم وپردازش هوشمند اطلاعات، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: *Mozhde.khadembashi@gmail.com*

چکیده

تقریبا در دو دهه اخیر سیستم‌های میکروالکترومکانیکی[۱] نشان دادند که می‌توانند نقش به‌سزایی در سیستم‌های نوری ایفا نمایند و سیستم‌های میکروالکترومکانیکی‌نوری[۲]را به وجود آورده‌اند. این سیستم‌ها دارای طیف گسترده‌ای از کاربردها هستند. استفاده از آن‌ها در سنسورهای لایدار[۳] موضوع بسیاری از تحقیقات و پژوهش‌های اخیر است که می‌تواند تحول عظیمی در تکنولوژی‌های روز دنیا نظیر اتومبیل‌های خودران[۴] ایجاد کند. با توجه به اهمیت موضوع، در این مقاله به تحلیل دینامیکی یک میکرومحرک‌پیچشی دو محوره پرداخته شده است. پژوهش‌های پیشین، عمدتاً از یک مدل که صرفا پیچش تیرهای نگهدارنده را درنظر می‌گیرد، استفاده کرده‌اند. اما در این پژوهش، رفتار استاتیکی و دینامیکی میکرومحرک پیچشی دو محوره توسط یک مدل چهار درجه آزادی بررسی شده است که هم‌زمان اثر خمش و پیچش تیرهای نگهدارنده را درنظر می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از یک مدل صرفاً پیچشی در مدل‌سازی رفتار ارتعاشاتی، باعث بروز خطاهای بزرگ در طراحی کنترلر این سیستم‌ها می‌شود.

کلمات کلیدی: سیستم‌های الکترومکانیکی‌نوری؛ اتومبیل‌های خودران؛ میکرومحرک‌پیچشی دو محوره ؛ خمش تیرهای نگهدارنده؛ مدل چهار درجه آزادی

---

[1] MEMS
[2] MOEMS
[3] LiDAR
[4] Autonomous Vehicle

مقدمه

تکنولوژی از روش‌های مختلفی می‌تواند زندگی انسان‌ها را تحت تاثیر قرار دهد. نقش وسایل و سیستم‌های کوچک در این مسیر در نگاه اول به سادگی قابل رویت نیست. ولی می‌توان در موقعیت‌های مختلف کاربردهای روزافزون آن را مشاهده کرد. به‌منظور پاسخ‌گویی به نیاز بشر، اخیراً تکنولوژی نوظهور سیستم‌های نانو-میکروالکترومکانیکی، پیشرفت‌های عظیمی در زمینه تست و ساخت وسایل جدید با کاربردهای نوین و خصوصیات شگفت‌انگیز شاهد بوده است. وزن سبک، اندازه کوچک و مصرف انرژی کم آن‌ها باعث جذابیت بیشتر آن‌ها شده است. هدپرینترهای جوهرافشان، میکروپمپ‌ها، میکرودریچه‌ها، شتاب‌سنج‌های کیسه‌ی هوای خودرو، میکروآینه‌ها، تشدیدکننده‌های میکرو و میکروفلپ‌ها تنها مثال‌های اندکی از وسایلی هستند که در آن‌ها سیستم‌های میکروالکترومکانیکی به‌کار رفته و یا جایگزین سیستم‌های پیشین شده‌اند.

در دو دهه اخیر، سیستم‌های نانو-میکروالکترومکانیکی نقش مهمی در سیستم‌های نوری ایفا کرده‌اند که باعث ایجاد سیستم‌های میکروالکترومکانیکی نوری شده‌است، به عنوان مثال سنسورهای لایدار به دلیل داشتن وضوح بالا و تصویربرداری سه بعدی بسیار دقیق از محیط اطراف خود در شرایط مختلف آب و هوایی، که یک مؤلفه اصلی در سیستم های رانندگی خودران است، در صنعت خودرو، مورد توجه بسیار زیادی قرار گرفته‌اند. با این حال، قیمت و وضوح این سنسورها هنوز با مقادیر مطلوب در بازار خودرو، مطابقت ندارد. به همین منظور در سال‌های اخیر تحقیقات و پژوهش‌های زیادی برای به‌کارگیری سیستم‌های میکروالکترومکانیکی نوری در این سنسورها انجام شده است[۱, ۲]. از دیگر کاربردهای سیستم‌های میکروالکترومکانیکی نوری، می‌توان به سوئیچ‌های نوری، نمایش‌گرها،طیف‌بینی و تصحیح خطا در سیستم‌های نوری و تصویربرداری بیوداروییی، اشاره کرد.

در این‌گونه سیستم‌ها روش‌های متفاوت تحریک نظیر محرک گرمایی، نوری و الکترواستاتیکی وجود دارد. به دلیل مصرف انرژی کم، تاثیر بالا، راحتی استفاده از الکترونیک و راحتی تولید، محرک الکترواستاتیکی یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین محرک‌ها به شمار می‌آید و در بسیاری از میکرومحرک‌ها از نیروی الکترواستاتیکی به عنوان نیروی تحریک‌کننده میکرومحرک استفاده شده است[۳].

چو و یون[۴]، از نیروی الکترومغناطیس به عنوان نیروی تحریک‌کننده‌ی میکرومحرک استفاده کردند. آن‌ها برای شبیه‌سازی و استخراج فرکانس‌های طبیعی سیستم از نرم‌افزار انسیس[1] استفاده نمودند. رابینویچ و همکارانش [۵] عملکرد میکروصفحات را با محدود کردن میدان‌های الکترواستاتیکی، یعنی خطوط بین صفحات و دیوارهای جانبی‌ای که آن‌ها را پشتیبانی می‌کنند، مورد آزمایش قرار دادند. پال و خی[۶] یک مدل حرارتی یک درجه آزادی از میکرومحرک ارائه کردند که تحریک در آن به صورت الکتروحرارتی انجام می‌گرفت.

یک نمونه میکرومحرک با محرک الکترواستاتیک، یک صفحه معلق است که بر روی یک صفحه صلب قرار می‌گیرد. صفحه بالایی به کمک تیرهای نگهدارنده نگه داشته شده‌است. هر دو صفحه از مواد رسانا تشکیل شده و محیط دی‌الکتریک فاصله بین آن‌ها را پر می‌کند. زمانی‌که تغییرات ولتاژ به آن دو صفحه اعمال می‌شود، به دلیل اعمال بار برروی تیرها، صفحه میکرومحرک به علت جاذبه الکترواستاتیک حرکت می‌کند. بنابراین تغییراتی در ظرفیت خازن رخ می‌دهد. تا یک ولتاژ اعمالی خاص، نیروی الاستیک و نیروی الکترواستاتیک با هم برابر هستند و این باعث می‌شود که سیستم در یک حالت تعادل قرار گیرد. زمانی‌که ولتاژ اعمالی از یک مقدار بحرانی بیشتر شود، نیروی الاستیک میکرومحرک نمی‌تواند با نیروی الکترواستاتیک برابر شود. در نتیجه صفحه محرک ناپایدار می‌شود و به صفحه ثابت می‌چسبد. این ناپایداری سازه‌ای، ناپایداری کششی گفته می‌شود. ولتاژ ناپایداری کششی یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی در محدوده عملکرد دستگاه‌های میکرو است. در این راستا لیو و همکارانش [۷] به طراحی، تولید و بررسی خصوصیات میکرومحرک پیزوالکترونیک پیستونی منحصر به فرد با شکلی شبیه به S پرداختند. میکرومحرک پیزوالکترونیک طراحی شده از لحاظ مصرف انرژی کمتر و فرکانس رزونانس بیشتر، نسبت به میکرومحرک‌های الکترومکانیکی برتری دارد. شاوزی‌پور و همکارانش [۸] یک ساختار جدید برای خازن‌های مبتنی بر صفحات موازی به کار گرفتند. خازن‌ها دارای الکترودهایی با شکل مثلثی و تیرهای ناهموار و مجموعه‌ای از تیرهای میانی است که سفتی ساختار خازن را افزایش می‌دهد و درنتیجه آن، ولتاژ بایاس نیز افزایش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که اگر ضریب سفتی تیرهای میانی و نگهدارنده بهینه شوند، پاسخ خطی بدست می‌آید. لی و همکارانش

[1] Ansys

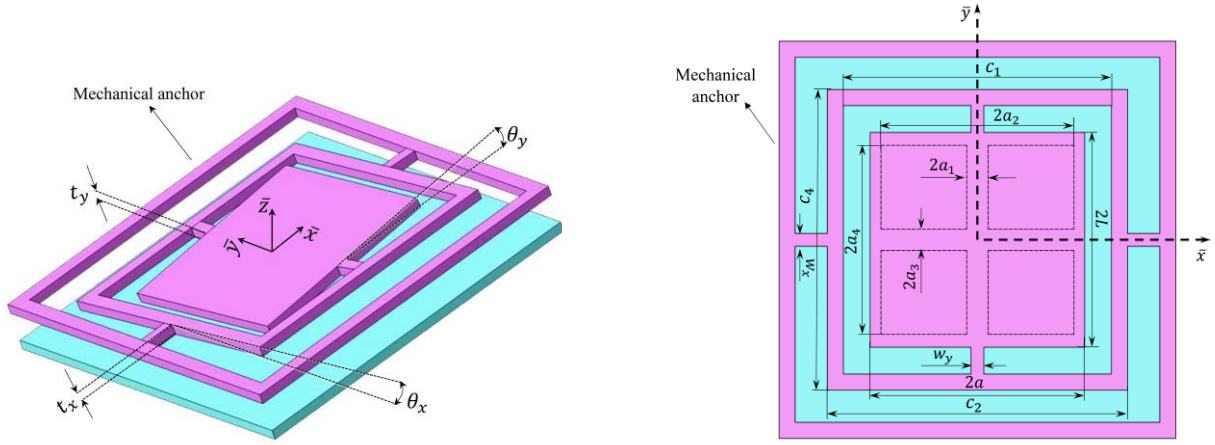
[۹]، مفهوم، تجزیه و تحلیل تئوری فرآیند تولید میکرو و خصوصیات آزمایشگاهی میکرومحرک با فرکانس رزونانس قابل‌تنظیم را ارائه کردند. اگرچه خطای فرآیند تولید میکرو، معمولا باعث تغییر در مقدار فرکانس‌های طبیعی می‌شود، اما این مشکل با میکرومحرک‌هایی با فرکانس رزونانس قابل‌تنظیم برطرف گردید.

در اکثر پژوهش‌های انجام شده بر روی میکرومحرک‌ها که به تعدادی از آن‌ها اشاره شد، از درجه آزادی سیستم که ناشی از خمش تیرهای تگهدارنده است، صرف‌نظر شده است و صحبتی از خمش آن‌ها به میان نیامده است. برای اولین بار ژائو و همکارانش [۱۰] مدلی تئوری برای مشخصه‌های دینامیکی میکروآینه‌های پیچشی با درنظر گرفتن اثر کوپل خمش و پیچش ارائه دادند. آن‌ها با استفاده از این مدل، پاسخ پله و هارمونیک میکروآینه را با الگوریتم‌های عددی تحلیل کردند. اما رویکرد استفاده شده در مقاله مذکور یک رویکرد عددی بود که علاوه بر زمان مورد نیاز بسیار بالا برای تحلیل، عملاً قادر به محاسبه و بررسی نواحی ناپایدار پاسخ فرکانسی نیست. هم‌چنین هوآنگ و همکارانش [۱۱] یک مدل تئوری دو درجه آزادی با درنظر گرفتن اثر خمش و پیچش در میکرومحرک‌های پیچشی الکترواستاتیکی ارائه دادند. آن‌ها به بررسی اثر استفاده از این مدل جدید بر روی ولتاژ، زاویه و موقعیت ناپایداری که شدیداً وابسته به ابعاد و موقعیت میکرومحرک و نسبت سفتی خمش و پیچش تیرها می‌باشد، پرداختند.

با توجه به مقالات ارائه شده، هم‌چنان کمبود تحقیقاتی در زمینه‌ی بررسی تاثیر خمش میکروتیرهای نگهدارنده در رفتار دینامیکی میکرومحرک‌های پیچشی دو محوره، احساس می‌شود. بنابراین در این پژوهش، این رفتار دینامیکی، با درنظر گرفتن اثر خمش مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱- مدل‌سازی ریاضی

شکل (۱) نمای شماتیک دو بعدی و سه بعدی یک میکرومحرک پیچشی دو محوره را نشان می‌دهد. صفحه اصلی میکرومحرک بر روی چهار الکترود معلق است. زاویه پیچشی این صفحه حول محورهای $\bar{x}$ و $\bar{y}$ به ترتیب با θ_x و θ_y نشان داده شده‌است. خیز تیرهای خارجی و داخلی نیز در ادامه با δ_x و δ_y نشان داده می‌شوند.



(ب) (الف)

شکل ۱. نمای شماتیک یک میکرومحرک پیچشی دو محوره (الف) نمای بالا ، (ب) نمای سه بعدی

هنگام اعمال اختلاف ولتاژ بین الکترودها و صفحه محرک معلق، در اثر نیروهایی که بین میکرومحرک و الکترودهای زیرین آن ایجاد می‌شود، صفحه محرک به اندازه θ_x و θ_y حول محور تیرهای پیچشی دوران پیدا می‌کند. هم‌چنین به اندازه δ_x و δ_y در اثر خاصیت خمشی تیرها، در راستای محور $\bar{z}$ جابجا می‌شود. با درنظر گرفتن چهار درجه آزادی یاد شده، معادلات دینامیکی حاکم بر رفتار این سیستم، با استفاده از معادله لاگرانژ به‌دست می‌آید. بدین منظور انرژی پتانسیل، انرژی جنبشی و کار مجازی انجام شده در سیستم باید محاسبه شود.

با اعمال اختلاف ولتاژ، هر الکترود مانند یک خازن رفتار می کند، بنابراین انرژی پتانسیل الکتریکی در سیستم طبق رابطه (۱) به‌دست می‌آید.

$$U_{Elec} = \sum_{i=1}^{4} -\frac{1}{2}\varepsilon_0\,(\bar{v}_b + \bar{v}_i)^2 \iint_{\bar{E}_i} \frac{d\bar{x}d\bar{y}}{h_0 - \delta_x - \delta_y + \bar{y}\theta_x - \bar{x}\theta_y} \qquad (۱)$$

که ε_0 ثابت گذردهی الکتریکی خلأ، h_0 فاصله اولیه بین میکرومحرک و الکترودهای زیرین آن قبل از اعمال هرگونه اختلاف پتانسیل الکتریکی و $\bar{v}_b$ ولتاژ بایاس است. $\bar{E}_i$ و $\bar{v}_i$ محدوده مختصاتی الکترود iام و اختلاف ولتاژ الکترود iام و صفحه میکرومحرک را مشخص می‌کند. $\bar{v}_i$ ها با استفاده از یک الگوریتم تفاضلی مطابق روابط (۲) تا (۵) محاسبه می‌شوند.

$$\bar{v}_1 = 10\left(-\bar{v}_x + \bar{v}_y\right) \qquad (۲)$$

$$\bar{v}_2 = 10\left(-\bar{v}_x - \bar{v}_y\right) \qquad (۳)$$

$$\bar{v}_3 = 10\left(\bar{v}_x - \bar{v}_y\right) \qquad (۴)$$

$$\bar{v}_4 = 10\left(\bar{v}_x + \bar{v}_y\right) \qquad (۵)$$

که $\bar{v}_x$ و $\bar{v}_y$ ولتاژهای تحریک هستند.

انرژی پتانسیل مکانیکی ذخیره شده در تیرها نیز شامل انرژی پتانسیل ناشی از ثابت فنریت در جهت خمشی و پیچشی می‌باشد. در واقع در محاسبه انرژی پتانسیل کرنشی از کرنش‌های غیرخطی، جفت‌شدگی هندسی بین کرنش‌های الاستیک اصلی و کرنش‌های الاستیک برشی و هم‌چنین انرژی کرنشی ذخیره شده در صفحه در اثر تغییر شکل الاستیک جزئی در آن صرف‌نظر شده است. در این صورت خواهیم داشت:

$$U_{Mec} = \frac{1}{2}S_{0x}\theta_x^2 + \frac{1}{2}S_{0y}\theta_y^2 + \frac{1}{2}K_{0x}\delta_x^2 + \frac{1}{2}K_{0y}\delta_y^2 \qquad (٦)$$

که ثابت فنریت تیرهای نگهدارنده‌ی صفحه تحت پیچش حول محورهای $\bar{x}$ و $\bar{y}$ به‌ترتیب با S_{0x} و S_{0y}، و ثابت فنریت آن‌ها تحت خمش نیز به‌ترتیب با K_{0x} و K_{0y} نمایش داده شده است.

انرژی جنبشی سیستم از جمع انرژی‌های جنبشی دورانی و خطی طبق رابطه (۷) حاصل می‌شود.

$$T = \frac{1}{2}m_m\left(\dot{\delta}_x + \dot{\delta}_y\right)^2 + \frac{1}{2}(I_{xx}^{(m)} + I_{xx}^{(f)})\dot{\theta}_x^2 + \frac{1}{2}I_{yy}^{(m)}\dot{\theta}_y^2 + \frac{1}{2}m_F\dot{\delta}_x^2 \qquad `(۷)$$

در رابطه (۷)، m_m، $I_{xx}^{(m)}$ و $I_{yy}^{(m)}$ به‌ترتیب جرم و ممان‌های اینرسی قطبی صفحه میکرومحرک حول محورهای $\bar{x}$ و $\bar{y}$ و هم‌چنین m_F و $I_{xx}^{(f)}$ نیز به‌ترتیب جرم و ممان اینرسی قطبی قاب حول محور $\bar{x}$ می‌باشند.

کار مجازی انجام شده در این سیستم ناشی از نیروی میرایی لایه فشرده‌ی هوا بین میکرومحرک و صفحه زیرین آن می‌باشد که طبق رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned}\delta w_d = {} & \left(-C_{\theta_x}\dot{\theta}_x\right)\delta\theta_x + \left(-C_{\theta_y}\dot{\theta}_y\right)\delta\theta_y + \left(-C_\delta\left(\dot{\delta}_x + \dot{\delta}_y\right)\right)\delta\delta_x \\ & + \left(-C_\delta\left(\dot{\delta}_x + \dot{\delta}_y\right)\right)\delta\delta_y\end{aligned} \qquad (۸)$$

در معادله فوق C_δ، C_{θ_x} و C_{θ_y} به‌ترتیب ضرایب میرایی عرضی در جهت $\bar{z}$ و میرایی دورانی حول محورهای $\bar{x}$ و $\bar{y}$ می‌باشند.

با استفاده از معادله دیفرانسیلی لاگرانژ و بی بعد سازی پارامترها، معادلات حرکت دینامیکی حاکم بر سیستم طبق روابط (۹) تا (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned}&\frac{d^2\Delta_x}{d\tau^2} + M_\Delta\frac{d^2\Delta_y}{d\tau^2} + \zeta_{\Delta_x}\left(\frac{d\Delta_x}{d\tau} + \frac{d\Delta_y}{d\tau}\right) + \omega_{\Delta_x}^2\Delta_x = \\ &\left(\frac{I_{xx}^{(p)} + I_{xx}^{(f)}}{\left(m_p + m_f\right)L^2}\right)\sum_{i=1}^{4}(v_b + v_i)^2 \iint_{E_i} \frac{dxdy}{\left(1 - \Delta_x - \Delta_y + y\Theta_x - x\Theta_y\right)^2}\end{aligned} \qquad (۹)$$

$$\frac{d^2\Delta_y}{d\tau^2}+\frac{d^2\Delta_x}{d\tau^2}+\zeta_{\Delta_y}\left(\frac{d\Delta_x}{d\tau}+\frac{d\Delta_y}{d\tau}\right)+\omega_{\Delta_y}^2\Delta_y=\left(\frac{I_{xx}^{(p)}+I_{xx}^{(f)}}{m_pL^2}\right)\sum_{i=1}^{4}(v_b+v_i)^2\iint_{E_i}\frac{dxdy}{\left(1-\Delta_x-\Delta_y+y\Theta_x-x\Theta_y\right)^2} \quad (۱۰)$$

$$\frac{d^2\Theta_x}{d\tau^2}+\zeta_{\Theta_x}\frac{d\Theta_x}{d\tau}+\Theta_x=-\sum_{i=1}^{4}(v_b+v_i)^2\iint_{E_i}\frac{ydxdy}{\left(1-\Delta_x-\Delta_y+y\Theta_x-x\Theta_y\right)^2} \quad (۱۱)$$

$$\frac{d^2\Theta_y}{d\tau^2}+\zeta_{\Theta_y}\frac{d\Theta_y}{d\tau}+\omega_{\Theta_y}^2\Theta_y=\frac{I_{xx}^{(p)}+I_{xx}^{(f)}}{I_{yy}^{(p)}}\left(\frac{a}{L}\right)^2\sum_{i=1}^{4}(v_b+v_i)^2\iint_{E_i}\frac{xdxdy}{\left(1-\Delta_x-\Delta_y+y\Theta_x-x\Theta_y\right)^2} \quad (۱۲)$$

که پارامترهای بی‌بعد شامل $\tau=\Omega t$ ، $\Delta_x=\frac{\delta_y}{h_0}$ ، $\Delta_y=\frac{\delta_y}{h_0}$ ، $x=\frac{\bar{x}}{a}$ ، $y=\frac{\bar{y}}{L}$ ، $\Theta_x=\frac{\theta_x}{\theta_x^{max}}$، $\Theta_y=\frac{\theta_y}{\theta_y^{max}}$ ، $\zeta_{\Delta_y}=\frac{C_\delta}{m_p\Omega}$ ، $\zeta_{\Delta_x}=\frac{C_\delta}{(m_p+m_f)\Omega}$ ، $\zeta_{\theta_x}=\frac{C_{\theta_x}}{\left(I_{xx}^{(p)}+I_{xx}^{(f)}\right)\Omega}$ ، $\zeta_{\theta_y}=\frac{C_{\theta_y}}{I_{yy}^{(p)}\Omega}$ ، $M_\Delta=\frac{m_p}{m_p+m_f}$ ، $\omega_{\Delta_x}^2=\frac{K_{0x}}{(m_p+m_f)\Omega^2}$ ، $\omega_{\Delta_y}^2=\frac{K_{0y}}{m_p\Omega^2}$، $\omega_{\Theta_y}^2=\frac{S_{0y}}{I_{yy}^{(p)}\Omega^2}$ ، $v_i=\frac{\bar{v}_i}{v_0}$ و $v_b=\frac{\bar{v}_b}{v_0}$ هستند. در این معادلات a و L به ترتیب نصف طول و نصف عرض صفحه میکرومحرک می‌باشند که در شکل (۱) آورده شده است. همچنین $\theta_x^{max}\approx\frac{h_0}{L}$ ، $\theta_y^{max}\approx\frac{h_0}{a}$ ، $v_0=\sqrt{\frac{2S_{0x}h_0^3}{\varepsilon_0aL^3}}$ و $\Omega=\sqrt{\frac{S_{0x}}{I_{xx}^{(p)}+I_{xx}^{(f)}}}$.

۲- رفتار استاتیکی و دینامیکی میکرومحرک

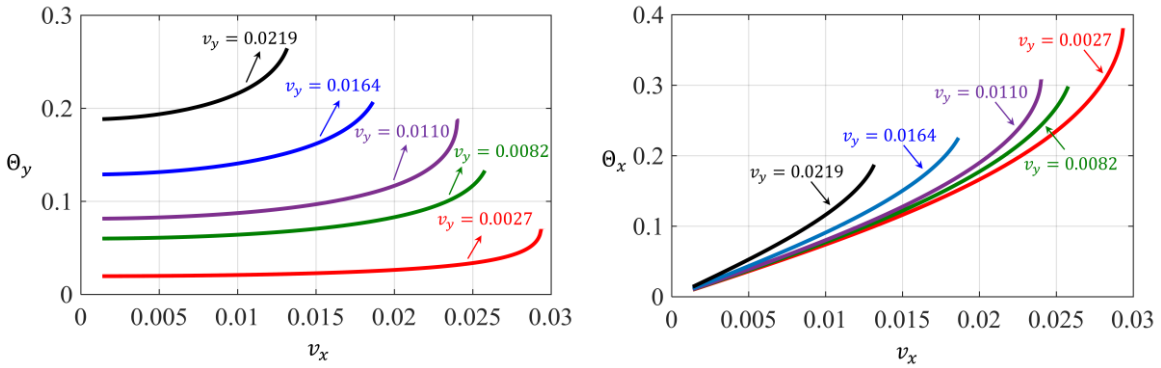
بعد از استخراج معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم، می‌توان رفتار استاتیکی و دینامیکی سیستم میکرومحرک را بررسی کرد. پارامترهای هندسی و فیزیکی میکرومحرک در جدول (۱) آورده شده‌است

جدول۱. پارامترهای فیزیکی و هندسی میکرومحرک[12]

پارامتر	مقدار	واحد	پارامتر	مقدار	واحد
ε_0	8.85×10^{-12}	F/m	h_0	68	μm
a_1	10	μm	a_2	176	μm
a_3	10	μm	a_4	176	μm
a	204	μm	L	204	μm
l_x	180	μm	l_y	180	μm
G	66	GPa	E	170	GPa
t_x	1.5	μm	t_y	1.5	μm

پارامتر	مقدار	واحد	پارامتر	مقدار	واحد
w_x	2	μm	w_y	2	μm
m_p	1.73×10^{-6}	gr	m_f	1.36×10^{-6}	gr
$\bar{v}_b$	50	V	v_0	182.39	-
C_{θ_x}	1.44×10^{-13}	$N.m/s$	C_{θ_y}	3.60×10^{-14}	$N.m/s$
C_δ	9.44×10^{-6}	$N.m/s$	-	-	-

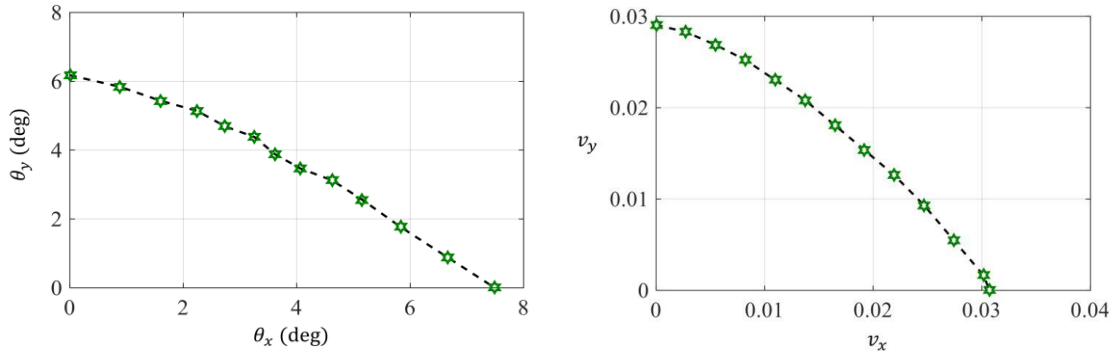
به منظور دست‌یابی به حل استاتیکی سیستم میکرومحرک، باید از معادلات تعادل سیستم استفاده نمود. استخراج معادلات تعادل سیستم میکرومحرک با برابر صفر قرار دادن پارامترهای سرعت و شتاب در معادلات دینامیکی حاصل می‌شود. با اعمال ولتاژهای تحریک به عنوان ورودی‌های سیستم، و حل هم‌زمان معادلات تعادل، زاویه‌های تعادلی مطابق شکل (۲)، حاصل می‌شود.



(ب) (الف)

شکل ۲. تغییرات (الف) Θ_x و (ب) Θ_y بر حسب v_x در مقادیر مختلف v_y

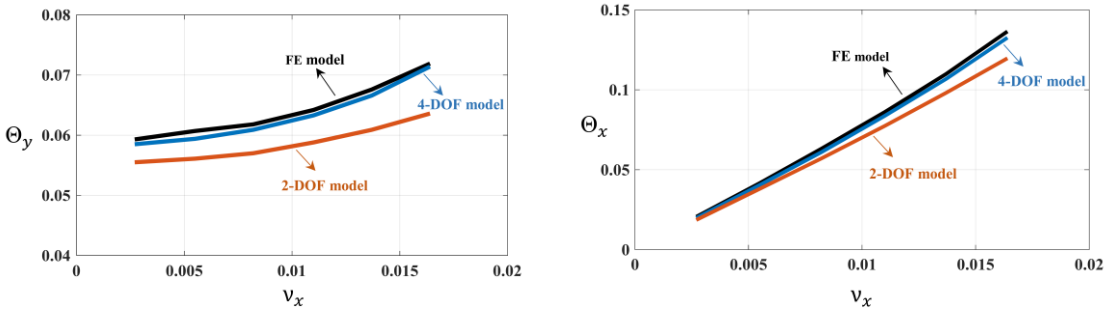
همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، با افزایش ولتاژهای بی‌بعد اعمالی به سیستم، زاویه‌های دورانی بی‌بعد، Θ_x و Θ_y نیز افزایش می‌یابند. این افزایش با روندی ثابت نسبت به افزایش ولتاژ ادامه می‌یابد تا زمانی‌که با تغییر اندکی در ولتاژهای اعمالی، افزایش شدیدی در زاویه‌های دورانی ایجاد می‌شود. این پدیده همان ناپایداری کششی است که به آن اشاره شده بود. از آن‌جایی که در سیستم مورد نظر، تغییر دو ولتاژ v_x و v_y باعث ایجاد ناپایداری کششی می‌شود، تشخیص ولتاژهای ناپایداری کششی کاری دشوار است. در شکل (۳)-(الف) نمودار ولتاژهای بی‌بعد ناپایداری کششی بر حسب هم رسم شده است. همان طور که انتظار می‌رود با افزایش ولتاژ ناپایداری کششی v_x، ولتاژ ناپایداری کششی v_y کاهش می‌یابد. زاویه های تعادلی در این ولتاژها نیز بر حسب یکدیگر در شکل (۳)-(ب) رسم شده‌است.



(ب) (الف)

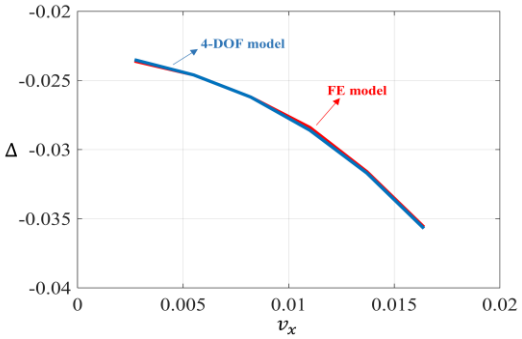
شکل۳. (الف) تغییرات ولتاژ بی‌بعد ناپایداری کششی v_y بر حسب ولتاژ بی‌بعد ناپایداری کششی v_x (ب) تغییرات زاویه دورانی θ_y بر حسب زاویه دورانی θ_x در ناحیه ناپایداری کششی

به منظور نشان دادن اهمیت استفاده از مدل چهاردرجه‌آزادی و در نظر گرفتن خمش تیرها در پیش‌بینی رفتار میکرومحرک، سیستم حاضر با مشخصات داده شده در جدول (۱)، در نرم افزار آباکوس[1] شبیه‌سازی شد. قاب‌ها و صفحه میکرومحرک در شبیه‌سازی، صلب در نظر گرفته شدند. زوایای Θ_x و Θ_y پیش‌بینی شده به ازای اعمال چند ولتاژ تحریک مختلف، برای مدل‌های المان محدود، چهاردرجه‌آزادی و دودرجه‌آزادی، در شکل (۴) مقایسه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که مدل دودرجه‌آزادی نسبت به مدل چهاردرجه‌آزادی، دقت کمتری در پیش‌بینی زوایای تعادلی دارد. همچنین در مدل دودرجه‌آزادی، از خمش تیرها کاملا صرف نظر شده‌است، حال آنکه در شکل (۵) مشاهده می‌شود که مجموع خیز تیرها $(\Delta = \Delta_y + \Delta_x)$ در مدل چهاردرجه‌آزادی با دقت بسیار خوبی با مدل المان محدود مطابقت دارد.



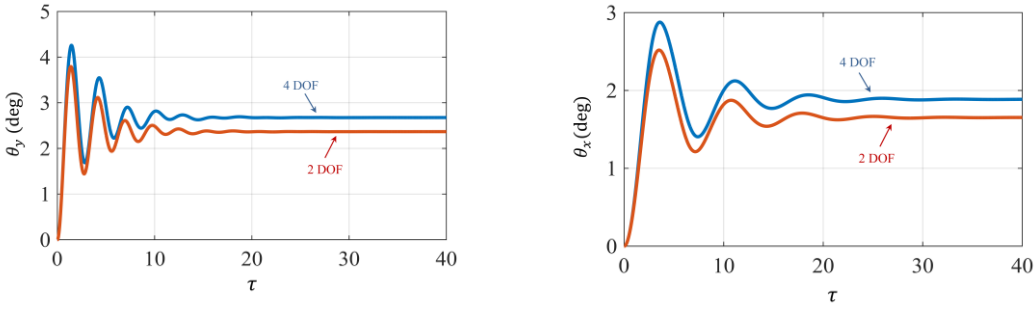
(الف) (ب)

شکل ۴. مقایسه پیش‌بینی (الف) Θ_x (ب) Θ_y بر حسب v_x در $v_y = 0.0082$، برای مدل‌های المان محدود، چهاردرجه‌آزادی و دودرجه‌آزادی



شکل ۵. مقایسه پیش‌بینی Δ بر حسب v_x در $v_y = 0.0082$، برای مدل‌های المان محدود و چهاردرجه‌آزادی

مشابه مقایسه‌ای که برای رفتار استاتیکی مدل‌های چهاردرجه‌آزادی و دودرجه‌آزادی صورت گرفت، رفتار دینامیکی این مدل‌ها نیز می‌توانند با یکدیگر مقایسه شوند. نتایج این مقایسه برای ولتاژهای پله‌ی $v_x = 0.011$ و $v_y = 0.0164$ در شکل (۶) آورده شده است.



(الف) (ب)

شکل ۶. تاثیر تعداد درجات آزادی بر روی زوایای (الف) θ_x (ب) θ_y در پاسخ دینامیکی سیستم

[1] Abaqus

در این شکل مشاهده می‌شود که رفتار دینامیکی سیستم نیز، در مدل‌های دودرجه‌آزادی و چهاردرجه‌آزادی، اختلاف قابل ملاحظه‌ای بایکدیگر دارند. از طرفی مقایسه رفتارهای استاتیکی این مدل‌ها با مدل شبیه‌سازی شده در نرم افزار آباکوس نشان داد که مدل چهاردرجه‌آزادی، نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهد.

۳- نتیجه‌گیری

قبل از توسعه و طراحی هر کنترلر باید مدلی از رفتار دینامیکی سیستم موجود باشد. با توجه به پژوهش‌های پیشین، مدل‌سازی دینامیکی صورت گرفته روی میکرومحرک‌های پیچشی بدون درنظر گرفتن اثر خمش آن‌ها بوده‌است که این امر باعث ایجاد خطا در محاسبه پارامترهای طراحی می‌گردد. بدین منظور در این پژوهش مدل‌سازی میکرومحرک پیچشی دو محوره با درنظر گرفتن اثر خمش تیرهای نگهدارنده ارائه گردید. معادلات دینامیکی و استاتیکی میکرومحرک با استفاده از روش لاگرانژ بدست آمد و رفتار استاتیکی و زوایای تعادل میکرومحرک با اعمال ولتاژهای مختلف بررسی شد. هم‌چنین ولتاژها و زاویه‌های بحرانی در محدوده ناپایداری کششی نیز بدست آمد. در انتها مقایسه رفتار استاتیکی مدل‌های دودرجه‌آزادی و چهاردرجه‌آزادی با مدل المان محدود شبیه سازی شده در نرم افزار آباکوس صورت گرفت و تاثیر در نظر گرفتن خمش تیرهای نگهدارنده در رفتارهای استاتیکی و دینامیکی سیستم بررسی شد. نتایج نشان داد که عدم درنظر گرفتن خمش تیرها، خطاهایی در رفتار کلی سیستم ایجاد می‌کند. بنابراین در این پژوهش با درنظر گرفتن خمش تیرهای نگهدارنده، یک مدل‌سازی دینامیکی دقیق ارائه گردید.

٤- مراجع

[1] E.H. Cook, S.J. Spector, M.G. Moebius, F.A. Baruffi, M.G. Bancu, L.D. Benney, S.J. Byrnes, J.P. Chesin, S.J. Geiger, D.A. Goldman, Polysilicon Grating Switches for LiDAR, Journal of Microelectromechanical Systems, (2020).
[2] H.W. Yoo, N. Druml, D. Brunner, C. Schwarzl, T. Thurner, M. Hennecke, G. Schitter, MEMS-based lidar for autonomous driving, e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, 135 (2018) 408-415.
[3] H. Moeenfard, M.T. Ahmadian, A. Soroush, A. Alasty, Beyond pull-in stabilization of dual axis micromirrors using fuzzy controllers, in: ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers, 2010, pp. 795-801.
[4] I.-J. Cho, E. Yoon, A low-voltage three-axis electromagnetically actuated micromirror for fine alignment among optical devices, Journal of Micromechanics and Microengineering, 19 (2009) 085007.
[5] A. Rabinovich, A. Ya'akobovitz, S. Krylov, Fringing electrostatic field actuation of microplates for open air environment sensing, Journal of Vibration and Acoustics, 136 (2014) 041013.
[6] S. Pal, H. Xie, A parametric dynamic compact thermal model of an electrothermally actuated micromirror, Journal of Micromechanics and Microengineering, 19 (2009) 065007.
[7] W. Liu, Y. Zhu, K. Jia, W. Liao, Y. Tang, B. Wang, H. Xie, A tip–tilt–piston micromirror with a double S-shaped unimorph piezoelectric actuator, Sensors and Actuators A: Physical, 193 (2013) 121-128.
[8] M. Shavezipur, S.M. Hashemi, A. Khajepour, A Novel Linear MEMS Capacitor With Triangular Electrodes and Nonlinear Structural Stiffness, in: ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers, 2008, pp. 819-824.
[9] F.-Y. Lee, X. Zhou, W. Fang, S.-C. Chen, Design of a tunable resonant micromirror, Sensors and Actuators A: Physical, 234 (2015) 72-81.
[10] J.P. Zhao, H.L. Chen, J.M. Huang, A.Q. Liu, A study of dynamic characteristics and simulation of MEMS torsional micromirrors, Sensors and Actuators A: Physical, 120 (2005) 199-210.
[11] J.-M. Huang, A. Liu, Z. Deng, Q. Zhang, J. Ahn, A. Asundi, An approach to the coupling effect between torsion and bending for electrostatic torsional micromirrors, Sensors and Actuators A: Physical, 115 (2004) 159-167.
[12] Y. Zhao, F.E. Tay, F.S. Chau, G. Zhou, Stabilization of dual-axis micromirrors beyond the pull-in point by integral sliding mode control, Journal of Micromechanics and Microengineering, 16 (2006) 1242.