



دانشگاه گیلان

ISAV2024

چهارمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات
۲۱ و ۲۲ آذر ماه ۱۴۰۳
کرج - ایوان



انجمن آکوستیک و ارتعاشات ایران

طراحی، مدلسازی و ساخت شیر پیزوالکتریک نیوماتیک مبتنی بر مکانیزم منعطف جهت کنترل فشار هوا

امیرحسین مرادی^{۱*}، حامد غفاری راد^۱، سیدمهدی رضاعی^۱، محمد زارعی نژاد^۲

^۱ ایران، تهران، خیابان حافظ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مکانیک، کدپستی: ۱۵۹۱۶۳۴۳۱۱

^۲ ایران، تهران، خیابان حافظ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پژوهشکده فناوریهای نو

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: amo.mo@aut.ac.ir

چکیده

شیرهای قطع و وصل (دیجیتال) نیوماتیک فرکانس بالا، به طور گسترده در صنایع اتوماسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد. وظیفه این شیرها مانند شیر سروو و شیر تناسبی، تغییر پیوسته نرخ جریان و یا فشار، تابعی از سیگنال ورودی است. در شیرهای قطع و وصل از محرک های سلونوئیدی استفاده می‌شود که میتواند معایبی مانند زمان پاسخ با تاخیر بالا به دلیل تاخیر سیگنال الکتریکی در سیم پیچ و کاهش سرعت پاسخ و همچنین دیجیتال بودن این عملگرها (عملکرد قطع-وصل) اشاره کرد. برای حل این مشکل از عملگر پیزوالکتریک به جای سلونوئید استفاده شده است. به دلیل کم بودن دامنه جابجایی پیزوالکتریک از مکانیزم منعطف نوع لوزی برای تقویت دامنه جابجایی پیزوالکتریک استفاده می‌شود. در ادامه روشی برای تحلیل کینتواستاتیکی و دینامیکی مکانیزم های منعطف ارائه شده که نتایج استاتیکی به دست آمده از این روش با روش المان محدود تا حد خوبی بر یکدیگر منطبق هستند و مکانیزم لوزی در زوایای حدود ۲ درجه بیشترین مقدار بزرگنمایی را دارد. همچنین خطای فرکانس های طبیعی به دست آمده کم تر از ۱۵.۵٪ است. سپس عملکرد شیر پیزوالکتریک بررسی شده است و برای اطمینان از قابلیت کنترل کردن فشارهای مختلف توسط شیر پیزوالکتریک، سه سیگنال مرجع سینوسی با فرکانس ها و دامنه فشارهای مختلف به آن وارد شده که پس از گذشت یک دوره تناوب، فشار خروجی به خوبی می‌تواند سیگنال هدف را دنبال کند. همچنین یک سیگنال پله با دامنه فشار یک بار، به شیر پیزوالکتریک اعمال شد که زمان مورد نیاز برای رسیدن فشار از ۱۰٪ تا ۹۰٪ فشار ۱ بار ۸.۳ میلی ثانیه است. این رفتار نشان می‌دهد سرعت پاسخ عملگر پیزوالکتریک همراه با مکانیزم منعطف برای این شیر می‌تواند بسیار مناسب باشد.

کلمات کلیدی: عملگر پیزوالکتریک؛ مکانیزم منعطف؛ شیر نیوماتیک پیزوالکتریک؛ کنترل فشار

۱- مقدمه

شیرهای قطع و وصل (دیجیتال) نیوماتیک فرکانس بالا به طور گسترده در صنایع اتوماسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد. وظیفه این شیرها مانند شیر سروو و شیر تناسبی، تغییر پیوسته نرخ جریان و یا فشار، تابعی از سیگنال ورودی است. به منظور تغییرات پیوسته

جریان و فشار توسط شیر قطع و وصل، می‌توان از روش مدولاسیون عرض پالس^۱ با فرکانس بالا برای تحریک سلونوئید شیر قطع و وصل استفاده کرد. شیرهای قطع و وصل نیوماتیک معمولاً در کاربردهایی که نیاز به کنترل دقیق است، مانند هوافضا، رباتیک و ماشین آلات صنعتی استفاده می‌شود.

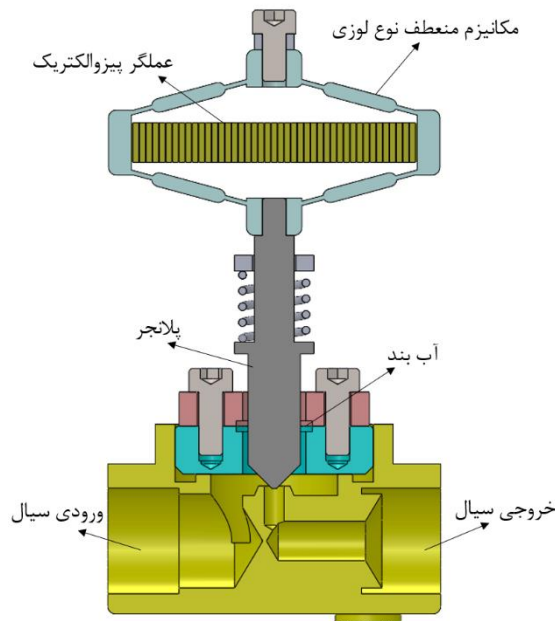
مطالعاتی روی شیر قطع و وصل با سرعت بالا متمرکز شده‌اند، با این حال تعداد کمی از آن‌ها روی شیرهای نیوماتیک بوده است. متی لینجاما [1] یکی از پیشگامان هیدرولیک دیجیتال به تعریف هیدرولیک دیجیتال، شاخه‌های آن و شیرها، پمپ‌ها و عملگرهای دیجیتال پرداخته است ولی اصول دیجیتال را برای نیوماتیک مورد مطالعه قرار نداده در حالی که نیوماتیک دیجیتال هم می‌تواند همان کارایی را داشته باشد. آهن و همکاران [2] یک روش مدولاسیون عرض پالس اصلاح شده را معرفی کردند و با این روش شیرهای قطع و وصل فرکانس بالا را تحریک کردند. آن‌ها گزارش کردند که می‌توان به جای شیرهای سروو از چندین شیر قطع و وصل سرعت بالا استفاده کرد. برونو و همکاران [3] یک شیر قطع و وصل نیوماتیک با سرعت بالا که مستقیماً توسط عملگر پیزوالکتریک تحریک می‌شود را معرفی کردند که با سری کردن این شیر با یک شیر کنترل جهت توانستند موقعیت یک سیلندر را کنترل کنند. چوی و یوو [4] با جایگزین کردن پیزوالکتریک‌های نوع بایمورف به جای فلاپر، توانستند فشار شیر نیوماتیکی را کنترل کنند. اویانگ و همکاران [5] به شبیه‌سازی شیر قطع و وصل سرعت بالا پرداختند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد که شیر پیزو می‌تواند تحت فشار ۲۰ مگاپاسکال و دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه و فرکانس ۲۰۰ هرتز به خوبی کار کند کانت و سینگ [6] یک مدل خطی متغیر با زمان برای شیرهای قطع و وصل نیوماتیکی استخراج کرد. همچنین یامادا و همکاران [7] یک شیر قطع وصل دیجیتال برای سیستم‌های کنترل هیدرولیکی که توسط عملگر پیزوالکتریک تحریک می‌شود را توسعه دادند. لینگ و همکاران [8] یک مکانیزم لوزی نوع پل طراحی و مدل‌سازی کردند و از آن در شیر سروو پیزوالکتریک هیدرولیکی استفاده کردند.

در شیرهای قطع و وصل از محرک‌های سلونوئیدی استفاده می‌شود که می‌تواند معایبی مانند زمان پاسخ با تاخیر بالا به دلیل تاخیر سیگنال الکتریکی در سیم پیچ و کاهش سرعت پاسخ و همچنین دیجیتال بودن این عملگرها (عملکرد قطع وصل) اشاره کرد. در این پژوهش از یک شیر قطع و وصل به منظور کنترل فشار استفاده شده است. برای تحریک، به جای سلونوئید از پیزوالکتریک استفاده شده است. به دلیل کم بودن دامنه جابجایی پیزوالکتریک از مکانیزم منعطف نوع لوزی برای تقویت دامنه جابجایی پیزوالکتریک استفاده می‌شود. استفاده از پیزوالکتریک به جای سلونوئید باعث شده تا شیر سروو فشار مزایایی مانند مصرف انرژی کم تر، سرعت پاسخ دینامیکی سریع تر، رزولوشن جابجایی در مقیاس میکرو و کنترل فشار در فرکانس‌های پایین را داشته باشد. در این مقاله در بخش دوم، ساختار شیر پیزوالکتریک و اجزای آن معرفی می‌گردد. در بخش سوم روشی برای تحلیل کینتواستاتیکی و دینامیکی مکانیزم‌های منعطف و در بخش چهارم به نتایج خروجی شیر پیزوالکتریک پرداخته می‌شود.

۲- ساختار شیر و معرفی اجزا

نمایی از شیر قطع و وصل پیزوالکتریک در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. ولتاژ ورودی به عملگر پیزوالکتریک باعث ایجاد جابجایی خطی در پیزوالکتریک می‌شود. سپس کورس پیزوالکتریک توسط مکانیزم منعطف نوع لوزی تقویت می‌شود. پورت خروجی مکانیزم منعطف لوزی به صورت مستقیم به پلانجر متصل است که باعث به حرکت در آوردن پلانجر می‌شود. با حرکت پلانجر به سمت بالا، میزان گشودگی در شیر قطع و وصل افزایش پیدا می‌کند که منجر به افزایش دبی هوای گذرنده از گشودگی شیر می‌شود. از آن جایی که عملگر پیزوالکتریک تنها می‌تواند در کاربردهایی که طول آن افزایش پیدا می‌کند استفاده شود، از یک فنر سخت برای پایین آمدن پلانجر و بستن گشودگی استفاده می‌شود. در خروجی شیر سنسور فشار *MPX5700ap* نصب شده که توسط سنسور فشار دقیق فستو مدل *sde1* کالیبره شده است. سنسور فشار با یک محدود کننده که نقش مصرف کننده را دارد موازی شده است.

^۱ Pulse Width Modulation (PWM)



شکل ۱-۲ نمایشی از شیر قطع و وصل پیزوالکتریک

۳- تحلیل کینتواستاتیک و دینامیک مکانیزم های منعطف

به دلیل کم بودن جابجایی پیزوالکتریک از مکانیزم های منعطف نوع لوزی برای افزایش جابجایی پیزوالکتریک استفاده میشود. در این مکانیزم ها صلبیت مطرح نیست و در ساختارشان بجای استفاده از مفاصل متحرک، از مفاصل انعطاف پذیر استفاده می‌گردد. این مکانیزم‌ها به مکانیزم‌های انعطاف پذیر معروفند که نیرو و حرکت را با استفاده از تغییر شکل الاستیک منتقل می‌کنند و معمولاً در ساختاری یکپارچه ساخته می‌شوند که مزایایی مانند نداشتن نیاز به مونتاژ، عدم سایش، عدم اصطکاک، عاری از پس زنی، سبک و نداشتن سروصدا و قابلیت تولید در ابعاد کوچک را دارند. به این منظور، برای کاربرد هایی که نیاز به دقت بالا و رزولوشن بالا وجود دارد از مکانیزم‌های انعطاف پذیر استفاده می‌گردد.

شکل و پارامتر های هندسی مکانیزم منعطف نوع لوزی، گسسته سازی و شماره گذاری مکانیزم در شکل (۱-۳) آورده شده است. همچنین مقادیر آن ها به همراه پارامتر های مربوط به جنس در جدول (۱) آورده شده است.

تیرهای منعطف به صورت سریالی از (۱) تا (۱۶) شماره گذاری شدند و با گره های ۱ تا ۱۵ متصل شده است. همچنین انتهای گیر دار، گره ۰ شماره گذاری شده است. ضمناً پورت خروجی به عنوان یک جرم متمرکز در نظر گرفته شد، در حالی که تمام قسمت های دیگر به عنوان تیر منعطف در نظر گرفته شدند. جرم و ممان اینرسی جرمی پورت خروجی به صورت $m = \rho \cdot h_4 \cdot L_4$ و $J = \frac{m \cdot (h_4^2 + L_4^2)}{12}$ که d ضخامت مکانیزم است محاسبه می‌شود.

همانطور که در شکل (۲-۳) نشان داده شده است، ماتریس سختی دینامیکی $D_i(\omega)$ تیر/مفصل منعطف i ام در مختصات

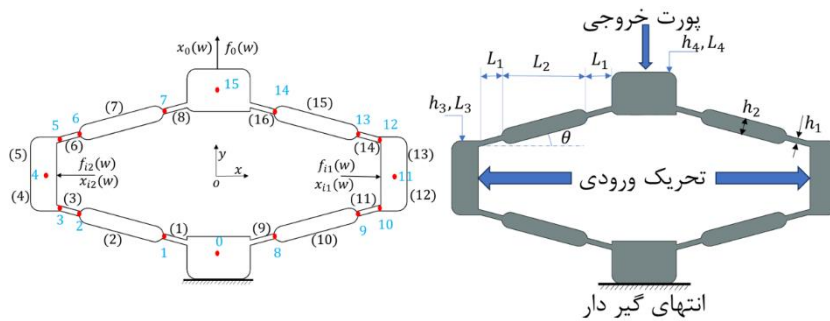
مرجع $xy - O$ ، که همانند قانون هوک جابجایی و نیروی گره ای وابسته به فرکانس را توصیف میکند به شکل زیر است.

$$\begin{Bmatrix} F_{i,j}(w) \\ F_{i,k}(w) \end{Bmatrix} = D_i(w) \cdot \begin{Bmatrix} x_{i,j} \\ x_{i,k} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{i,1} & k_{i,2} \\ k_{i,3} & k_{i,4} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} x_{i,j} \\ x_{i,k} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

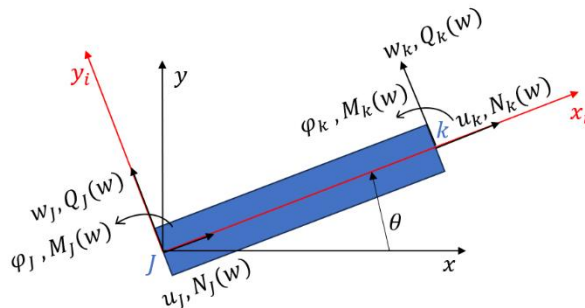
که $F_{ij}(w) = [N_j; Q_j; M_j]$ و $F_{ik} = [N_k; Q_k; M_k]$ و $x_{ij} = [u_j; w_j; \varphi_j]$ و $x_{ik} = [u_k; w_k; \varphi_k]$

نیرو ها و جابجایی های گره ای تیر/مفصل منعطف i ام در مختصات مرجع است. u_k و u_j جابجایی محوری، w_k و w_j جابجایی عرضی و φ_k و φ_j چرخش هستند. $D_i(w) = R^T \cdot D^e(w) \cdot R_i$ که $D^e(w)$ ماتریس سختی دینامیکی تیر/مفصل انعطاف پذیر در

مختصات محلی $o - x_i - y_i$ است که بر حسب d_1 تا d_8 در معادله (۲) نوشته شده است که مقادیر d_1 تا d_8 در [9] آورده شده است.



شکل ۱-۳ پارامترهای هندسی مکانیزم منعطف، گسسته سازی و شماره گذاری مکانیزم نوع لوزی



شکل ۲-۳ تعریف جابجایی و نیروی گره ای در تیر/مفصل i ام

جدول ۱ پارامترهای مربوط به هندسه و جنس مکانیزم منعطف نوع لوزی

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۴	$L_1 (mm)$	۰.۵۵	$h_1 (mm)$
۸.۵	$L_2 (mm)$	۲	$h_2 (mm)$
۸	$L_3 (mm)$	۴	$h_3 (mm)$
۷	$L_4 (mm)$	۴.۵	$h_4 (mm)$
۲۷۷۰	$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	۱۰	$d (mm)$
۷۱	$E (Gpa)$	متغیر	$\theta (deg)$

$$D^e(w) = \begin{bmatrix} d_1 & 0 & 0 & d_5 & 0 & 0 \\ 0 & d_2 & -d_3 & 0 & d_6 & d_7 \\ 0 & -d_3 & d_4 & 0 & -d_7 & d_8 \\ d_5 & 0 & 0 & d_1 & 0 & 0 \\ 0 & d_6 & -d_7 & 0 & d_2 & d_3 \\ 0 & d_7 & d_8 & 0 & d_3 & d_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ماتریس انتقال R_i را با داشتن زاویه θ تیر/مفصل i ام نسبت به مختصات مرجع o_{xy} را می‌توان توسط معادله (۳) تعیین کرد:

کرد:

$$R_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & \sin\theta_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_i & -\cos\theta_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta_i & \sin\theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

به هر گره مجموعه‌ای نیرو شامل نیروهای حاصل از اتصال به تیر/مفصل‌های منعطف، نیروهای خارجی و در صورتی که جرم متمرکز باشد نیروهای اینرسی وارد میگردد. معادلات تعادل بر اساس اصل دالامبر برای گره‌های ۱۱ تا ۱۵ مکانیزم لوزی نشان داده شده در شکل (۳-۱) در زیر آورده شده است.

$$\begin{cases} Node10 = F_{11k} + F_{12j} = 0 \\ Node11 = F_{12k} + F_{13j} = f_{i1} \\ Node12 = F_{13k} + F_{14j} = 0 \\ Node13 = F_{14k} + F_{15j} = 0 \\ Node14 = F_{15k} + F_{16j} = 0 \\ Node15 = F_{16k} + F_{8k} + M \cdot x_{15} = f_0 \end{cases} \quad (4)$$

که $f_i = [f_p; 0; 0]$ و $f_0 = [0; f_0; 0]$ ، ماتریس جرم نیز به صورت زیر است:

$$M = \begin{bmatrix} -m \cdot w^2 & 0 & 0 \\ 0 & -m \cdot w^2 & 0 \\ 0 & 0 & -j \cdot w^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

با جایگذاری معادله (۱) در معادله (۴) داریم:

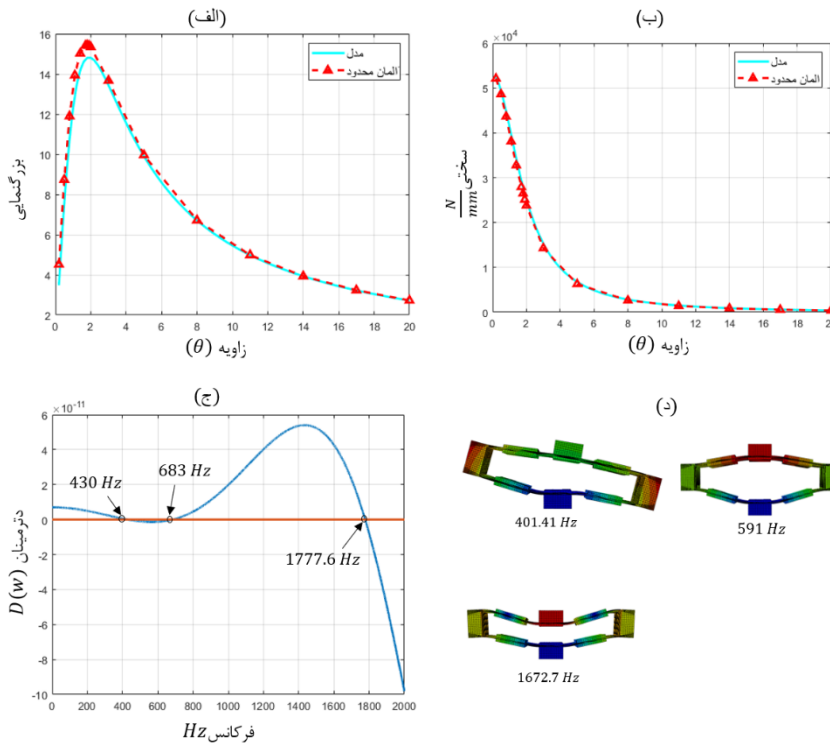
$$\begin{cases} k_{11,3}x_9 + (k_{11,4} + k_{12,1})x_{10} + k_{12,2}x_{11} = 0; \\ k_{12,3}x_{10} + (k_{12,4} + k_{13,1})x_{11} + k_{13,2}x_{12} = f_{i1} \\ k_{13,3}x_{11} + (k_{13,4} + k_{14,1})x_{12} + k_{14,2}x_{13} = 0; \\ k_{14,3}x_{12} + (k_{14,4} + k_{15,1})x_{13} + k_{15,2}x_{14} = 0; \\ k_{15,3}x_{13} + (k_{15,4} + k_{16,1})x_{14} + k_{16,2}x_{14} = 0; \\ k_{8,3}x_6 + k_{16,3}x_{14} + (k_{16,4} + k_{8,4} + M)x_{15} = f_0 \end{cases} \quad (6)$$

معادله (۶)، معادله تعادل نیرویی برای گره‌های ۱۰ تا ۱۱ است، با نوشتن معادلات تعادل برای نیرویی برای همه‌ی گره‌ها، ماتریس سختی دینامیکی کل مکانیزم منعطف لوزی به صورت زیر حاصل میشود.

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ f_{i2} \\ \vdots \\ f_{i1} \\ \vdots \\ f_0 \end{Bmatrix} = D(w) \cdot \begin{Bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_{i2} \\ \vdots \\ x_{i1} \\ \vdots \\ f_0 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

مدل سختی دینامیکی در معادله (۷) توصیف کننده کینتواستاتیک و دینامیک مکانیزم منعطف نوع لوزی در حوزه فرکانس است. با صفر قرار دادن فرکانس w و حل دستگاه معادلات خطی (۷)، بزرگنمایی و سختی ورودی و خروجی مکانیزم به دست می‌آید. همچنین با دنبال کردن صفرهای دترمینان ماتریس سختی کل $\det(D(w)) = 0$ میتوان فرکانس‌های طبیعی مکانیزم را محاسبه کرد.

برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدل ماتریس سختی دینامیکی از نرم افزار المان محدود آباکوس استفاده شد و خروجی‌های به دست آمده از مدل با خروجی آباکوس مقایسه گردید که نتایج به اندازه کافی دقیق بودند. تحلیل استاتیکی و مودال در نرم افزار آباکوس انجام شد و مقادیر بزرگنمایی - سختی ورودی و سختی خروجی و همچنین فرکانس تشدید مکانیزم نوع لوزی توسط مدل سختی دینامیکی محاسبه شد و با نتایج آباکوس مقایسه شد، همانطور که در شکل ۳-۳ می‌توان دید تا حد خوبی نتایج استاتیکی بر یک دیگر منطبق هستند و در زوایای حدود ۲ درجه بیشترین مقدار بزرگنمایی را داریم. همچنین میتوان دید که خطای فرکانس‌های طبیعی آن کم‌تر از ۱۵.۵٪ است.



شکل ۳-۳ (الف) تغییرات بزرگنمایی نسبت به زاویه تتا. (ب) تغییرات سختی ورودی نسبت به زاویه θ . (ج) صفرهای دترمینان ماتریس سختی کل. (د) آنالیز مودال در نرم افزار آباکوس با زاویه ۳ درجه

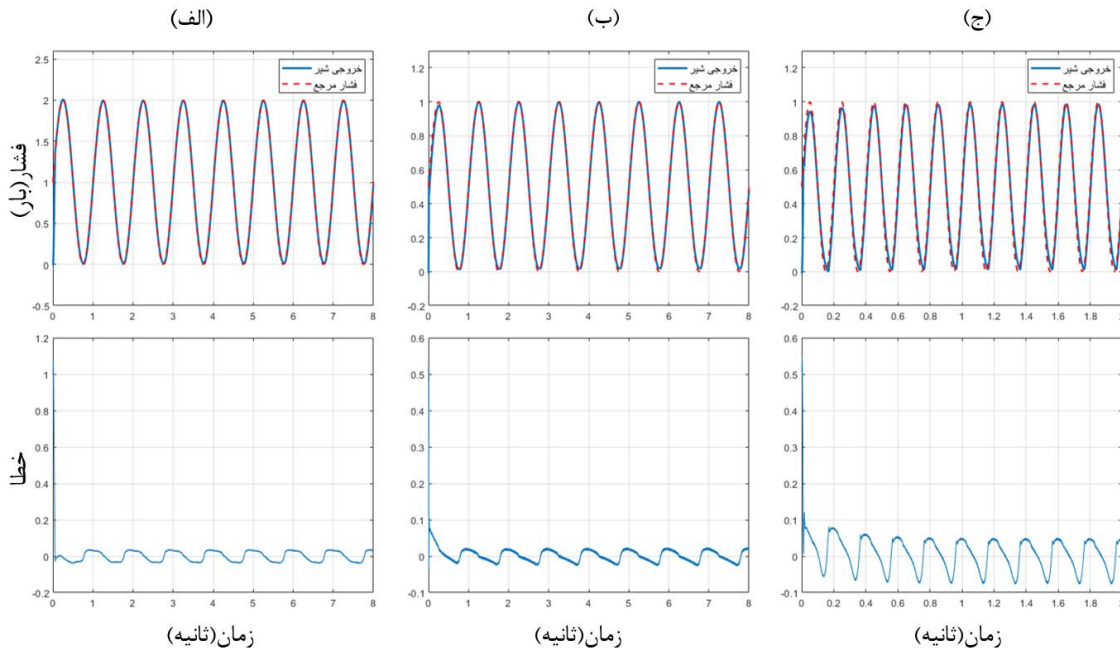
۴- ستاپ و نتایج تجربی

عملکرد شیر پیزوالکتریک نشان داده شده در شکل ۴-۱ (روی میز تست بررسی شده است).



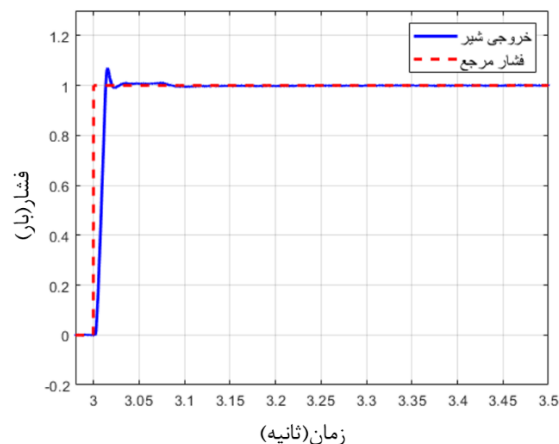
شکل ۴-۱ ستاپ تجربی شیر پیزوالکتریک معرفی شده

میز تست شامل کمپرسور هوا - رگولاتور فشار هوا - شیر پیزوالکتریک - سنسور فشار فستو مدل *sde 1* - کارت داده برداری *PCI-۶۰۵۲* و آمپلی فایر پیزوالکتریک *1۵۰-PDU* و ... است. داده های ورودی و خروجی شیر پیزوالکتریک توسط کارت داده برداری ذخیره می‌شوند. پیزوالکتریک توسط آمپلی فایر با ماکزیمم ولتاژ ۱۴۰ ولت تحریک می‌گردد. از سنسور فشار استفاده می‌شود تا فشار خروجی را به کنترلر بازخورد تا فشار خروجی شیر تنظیم گردد. در ضمن محدود کننده (مصرف کننده) و سنسور فشار در خروجی شیر به صورت موازی متصل شده‌اند. همچنین در حین انجام تست ها فشار بالادست در *۶ bar* توسط رگولاتور ثابت شده است. برای صحت سنجی قابلیت کنترل کردن فشار های مختلف توسط شیر پیزوالکتریک، سه سیگنال مرجع سینوسی با فرکانس ها و دامنه فشارهای مختلف به آن وارد شد و همانطور که در شکل (۲-۴) مشخص است، پس از گذشت یک دوره تناوب، فشار خروجی به خوبی می‌تواند سیگنال هدف را دنبال کند.



شکل ۲-۴ (الف) کنترل فشار خروجی شیر در فرکانس ۱ هرتز و دامنه فشار ۱ بار و خطای آن (ب) کنترل فشار خروجی شیر در فرکانس ۱ هرتز و دامنه فشار ۰.۵ بار و خطای آن (ج) فشار خروجی شیر در فرکانس ۵ هرتز و دامنه فشار ۰.۵ بار و خطای آن

همچنین برای تست پاسخ به ورودی پله همانطور که در شکل (۳-۴) نشان داده شده است یک سیگنال پله با دامنه فشار یک بار به شیر پیزوالکتریک اعمال شده که زمان مورد نیاز برای رسیدن فشار از ۱۰٪ تا ۹۰٪ فشار ۱ بار ۸.۳ میلی ثانیه است.



شکل ۳-۴ پاسخ کنترلی شیر پیزوالکتریک به ورودی پله

۵- نتیجه گیری:

یک شیر قطع و وصل به منظور کنترل فشار معرفی شد. برای تحریک، به جای سلونوئید از پیزوالکتریک استفاده شد و به دلیل کم بودن دامنه جابجایی پیزوالکتریک از مکانیزم منعطف نوع لوزی برای تقویت دامنه جابجایی پیزوالکتریک استفاده شد. این شیر نسبت به شیر هایی که توسط سلونوئید تحریک میشوند مزایایی مانند سرعت پاسخ دینامیکی سریع تر و مصرف انرژی کم تر و رزولوشن جابجایی در مقیاس نانو را دارد. همچنین روشی برای تحلیل کینتواستاتیکی و دینامیکی مکانیزم های منعطف ارائه شد که نتایج استاتیکی به دست آمده از این روش با روش المان محدود تا حد خوبی بر یک دیگر منطبق بودند و مکانیزم لوزی در زوایای حدود ۲ درجه بیشترین مقدار بزرگنمایی را داشت همچنین خطای فرکانس های طبیعی آن کم تر از ۱۵.۵٪ بود. سپس عملکرد شیر پیزوالکتریک با فشار بالادست ثابت ۶ بار روی میز تست بررسی شد و برای صحت سنجی قابلیت کنترل کردن فشار های مختلف توسط شیر پیزوالکتریک، سه سیگنال مرجع سینوسی با فرکانس ها و دامنه فشارهای مختلف به آن وارد شد که پس از گذشت یک دوره تناوب، فشار خروجی به خوبی می‌توانست سیگنال هدف را دنبال کند. همچنین برای تست پاسخ به ورودی پله، یک سیگنال پله با دامنه فشار یک بار به شیر پیزوالکتریک اعمال شده که زمان مورد نیاز برای رسیدن فشار از ۱۰٪ تا ۹۰٪ فشار ۱ بار ۸.۳ میلی ثانیه بود.

مراجع

1. M. Linjama, "DIGITAL FLUID POWER – STATE OF THE ART," in *The Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power* At: Tampere, Finland, May 2011.
2. S. Y. Kyoungkwan Ahn, "Intelligent switching control of pneumatic actuator using on/off solenoid valves," *Mechatronics*, vol. 15, no. 16, pp. 683-702, July 2005.
3. Y. Z. C. L. Q. G. & Y. L. Niyomwungeri Bruno, "Development of a piezoelectric high speed on/off valve and its application to pneumatic closed-loop position control system," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 33, p. 2747–2759, 10 June 2019.
4. S. B. C. a. J. K. Yoo, "Pressure control of a pneumatic valve system using a piezoceramic flapper," *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 218, 2004.
5. H. Y. H. J. & B. X. Xiaoping Ouyang, "Simulation of the piezoelectric high-speed on/off valve," *Chinese Science Bulletin*, vol. 53, p. 2706–2711, 2008.
6. R. S. C. Kunt, "A Linear Time Varying Model for On-Off Valve Controlled Pneumatic Actuators," *journal of dynamic systems measurement and control*, vol. 112, no. 4, pp. 740-747, 1990.
7. T. M. ., Y. S. Hironao Yamada, "Development of a High-Speed on/off Digital Valve for Hydraulic Control Systems using a Multilayered PZT Actuator," *International Journal of Fluid Power*, vol. 1, no. 2, pp. 5-10, 2014
8. J. W. ., M. W. ., L. C. ., B. F. Mingxiang Ling, "Design and modeling of an improved bridge-type compliant mechanism with its application for hydraulic piezo-valves," *Sensors and Actuators*, vol. 324, 2021.
9. L. L. H. J. C. Z. J. Mingxiang Ling, "A Pseudo-Static Model for Dynamic Analysis on Frequency Domain of Distributed Compliant Mechanisms," *journal of mechanisms and robotics*, 2018.