



Design, Manufacturing, and Comprehensive Dynamic Modeling of a Piezoelectric Pneumatic Servo Valve Based on Compliant Mechanisms

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Moradi A. H.¹,
Ghafarirad H.¹,
Rezaei S. M.^{1*},
Zareinejad M.²,
Firuzy Rad P.¹,

How to cite this article

Moradi A H, Ghafarirad H, Rezaei S M, Zareinejad M, Firuzy Rad P, Design, Manufacturing, and Comprehensive Dynamic Modeling of a Piezoelectric Pneumatic Servo Valve Based on Compliant Mechanisms. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(10):631-641.

¹ Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

² New Technologies Research Center, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Faculty of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Hafez Street, Tehran, Iran.
Smrezaei@aut.ac.ir

Article History

Received: November 24, 2024
Accepted: January 5, 2025
ePublished: January 16, 2025

ABSTRACT

This article focuses on the design, manufacturing, and dynamic modeling of a piezoelectric pneumatic servo valve based on a compliant mechanism. The use of piezoelectric actuators in these valves, due to their fast dynamic response and high precision, significantly improves the speed of pressure control. To this end, the structure of the pneumatic servo valve and the function of its components were initially investigated. To enhance the valve's orifice opening, a rhombus type compliant mechanism was designed to amplify the displacement range of the piezoelectric actuator. Subsequently, a comprehensive dynamic model of the system was presented. After identification and validating the proposed dynamics, the results of air pressure control for both steady and time-varying reference inputs were provided. Experimental results indicate that the proposed dynamic model for the manufactured valve has a maximum error of 25%. Additionally, frequency analysis results show that the valve has a dynamic bandwidth of 90 Hz and a natural frequency of 56 Hz, highlighting its applicability for high-frequency operations. The results of pressure control demonstrate a step response time of approximately 21 milliseconds at a pressure of 2 bar, indicating its capability to respond to rapid pressure changes. Furthermore, the ability to track input pressures with varying frequencies and amplitudes was also evaluated.

Keywords Piezoelectric Servo Valve, Compliant Mechanism, Pressure Control, Coupled Dynamic Modeling

CITATION LINKS

1- Digital fluid power: State of the art. 2- Development of a piezoelectric high-speed on/off valve and its application to pneumatic closed-loop position control system. 3- Innovative pressure control with ANFIS-enhanced mode switching for high-speed pneumatic systems. 4- Intelligent switching control of pneumatic actuator using on/off solenoid valves. 5- Pressure control of a pneumatic valve system using a piezoceramic flapper. 6- Simulation of the piezoelectric high-speed on/off valve. 7- A linear time-varying model for on-off valve-controlled pneumatic actuators. 8- Development of a high-speed on/off digital valve for hydraulic control systems using a multilayered PZT actuator. 9- A piezoelectric actuator-based direct-drive valve for fast motion control at high operating temperatures. 10- Design and modeling of an improved bridge-type compliant mechanism with its application for hydraulic piezo-valves. 11- Dynamic design of a novel high-speed piezoelectric flow control valve based on compliant mechanism. 12- Fluid-dynamic analysis and multi-objective design optimization of piezoelectric servo valves. 13- Coupled dynamic modeling of piezo-actuated compliant mechanisms subjected to external loads. 14- Piezoelectric titanium-based microfluidic pump and valves for implantable medical applications. 15- Development and testing of XY stage compliant mechanism. 16- Volume flow characterization of PWM-controlled fast-switching pneumatic valves. 17- Feedback systems: an introduction for scientists and engineers.

طراحی، ساخت و مدلسازی دینامیک جامع شیر سروو نیوماتیک پیزوالکتریک مبتنی بر مکانیزم‌های منعطف

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

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
^۲ پژوهشکده فناوریهای نو، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله، به طراحی، ساخت و مدلسازی دینامیکی شیر سرونیوماتیک پیزوالکتریک مبتنی بر مکانیزم منعطف پرداخته شده است. استفاده از عملگرهای پیزوالکتریک در این شیرها، به دلیل پاسخ دینامیکی سریع و دقت بالا، منجر به بهبود قابل توجه سرعت کنترل فشار توسط این شیرها می‌گردد. به همین منظور، ابتدا ساختار شیر سرونیوماتیک و عملکرد اجزای آن مورد بررسی قرار گرفته است. جهت افزایش میزان گشودگی دریچه شیر طراحی شده، یک مکانیزم منعطف لوزی شکل برای تقویت دامنه جابجایی عملگر پیزوالکتریک طراحی گردیده است. در ادامه، به ارائه مدل دینامیک جامع سامانه پرداخته شده است. پس از شناسایی و صحت‌گذاری دینامیک پیشنهادی، نتایج کنترل فشار هوا به ازای ورودی‌های مرجع ثابت و متغیر با زمان ارائه گردیده است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل دینامیکی پیشنهادی برای شیر ساخته شده دارای حداکثر خطای ۲۵ درصد می‌باشد. همچنین نتایج تحلیل فرکانسی نشان می‌دهد که شیر موردنظر دارای پهنای باند دینامیکی ۹۰ هرتز و فرکانس طبیعی ۵۶ هرتز است، که نشان‌دهنده قابلیت استفاده در فرکانس‌های بالا می‌باشد. همچنین نتایج کنترل فشار زمان پاسخ پله‌ای حدود ۲۱ میلی‌ثانیه در فشار ۲ بار را نشان می‌دهد، که بیانگر توانایی آن در پاسخگویی به تغییرات سریع فشار است. علاوه بر این، قابلیت دنبال کردن فشارهای ورودی با فرکانس‌ها و دامنه‌های مختلف نیز مورد بررسی قرار گرفت.

کلیدواژه‌ها: شیر سروو پیزوالکتریک - مکانیزم منعطف - کنترل فشار - مدلسازی دینامیکی تلفیقی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶

* نویسنده مسئول: Smrezaei@aut.ac.ir

۱- مقدمه

شیرهای قطع و وصل نیوماتیک با فرکانس بالا، در کاربردهایی که نیاز به کنترل دقیق دارند مانند هوافضا، رباتیک و ماشین‌آلات صنعتی، به‌طور گسترده استفاده می‌شوند. این شیرها، مشابه شیرهای سروو و تناسبی، می‌توانند دبی و فشار را به صورت تابعی از سیگنال ورودی تغییر دهند. برای ایجاد تغییرات پیوسته در جریان و فشار، می‌توان از مدولاسیون عرض پالس با فرکانس بالا برای تحریک سلونوئید شیر قطع و وصل استفاده کرد.

استفاده از سلونوئیدها در شیرهای قطع و وصل معایبی مانند زمان پاسخ‌دهی بالا به دلیل تأخیر سیگنال الکتریکی در سیم‌پیچ و کاهش سرعت پاسخ را به همراه دارد. علاوه بر این، ماهیت دیجیتالی سلونوئیدها (عملکرد قطع و وصل) محدودیت‌هایی را

ایجاد می‌کند. برای حل این مسئله، به جای سلونوئید از عملگر پیزوالکتریک برای کنترل فشار استفاده شده است. به‌کارگیری عملگر پیزوالکتریک مزایایی مانند چگالی انرژی بالا، ساختار ساده، پاسخ دینامیکی سریع و رزولوشن در مقیاس میکرومتر را به همراه دارد. با این حال، به دلیل کم بودن دامنه جابجایی عملگر پیزوالکتریک، از مکانیزم‌های منعطف برای تقویت دامنه جابجایی استفاده می‌شود. این مکانیزم‌ها معمولاً در ساختاری یکپارچه ساخته می‌شوند که مزایایی مانند عدم نیاز به مونتاژ، عدم وجود اصطکاک و لقی، سبک بودن، بی‌صدا بودن و قابلیت تولید در ابعاد کوچک را به همراه دارند.

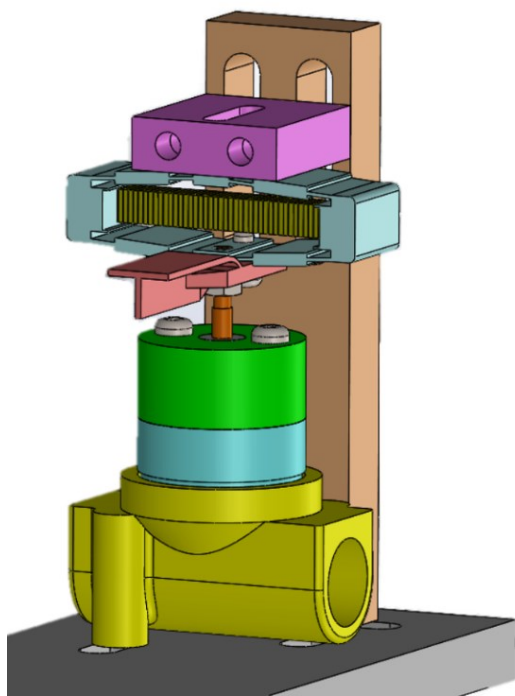
بر خلاف تمرکز بیشتر تحقیقات بر روی شیرهای هیدرولیکی، مطالعات محدودی بر روی شیرهای نیوماتیک انجام شده است. متی لینگاما^[1] که یکی از پیشگامان در زمینه هیدرولیک دیجیتال است، به تعریف این تکنولوژی و معرفی اجزای اصلی آن شامل شیرها، پمپ‌ها و عملگرهای دیجیتال پرداخته، اما اصول دیجیتال را به‌طور گسترده در نیوماتیک بررسی نکرده است. با این حال، پتانسیل و کارایی قابل توجهی در استفاده از اصول دیجیتال در سیستم‌های نیوماتیکی وجود دارد. در این راستا، آهن و همکاران^[2] با معرفی روشی به نام مدولاسیون عرض پالس اصلاح شده، رویکردی نوین برای تحریک شیرهای قطع و وصل فرکانس بالا ارائه داده‌اند. آن‌ها نشان دادند که با استفاده از چندین شیر قطع و وصل سرعت بالا می‌توان عملکردی مشابه شیرهای سروو را به دست آورد. سان و همکاران^[3]، یک سیستم سروو فشار با استفاده از شیرهای سوئیچینگ پرسرعت، به جای شیرهای تناسبی معرفی کردند. در این روش، از یک سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) برای بهبود کنترل فازی با یادگیری شبکه عصبی استفاده می‌شود. ادغام سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی با سوئیچینگ حالت، عملکرد ردیابی فشار را بهبود می‌بخشد و خصوصیات غیرخطی پیچیده سیستم‌های نیوماتیکی را مدیریت می‌کند. نتایج نشان می‌دهند که این روش می‌تواند اورشوت (Overshoot) و خطاهای نسبی سیستم را به طور قابل توجهی کاهش دهد.

برونو و همکاران^[4] نیز یک شیر نیوماتیک با سرعت بالا را معرفی کرده‌اند که به‌طور مستقیم توسط عملگر پیزوالکتریک کنترل می‌شود. این شیر با ترکیب با یک شیر کنترل جهت، توانایی کنترل موقعیت سیلندر را دارد. چوی و یوو^[5] با جایگزینی پیزوالکتریک‌های بایمورف به‌جای فلاپر در یک شیر نیوماتیکی، موفق به کنترل دقیق فشار خروجی شیر شدند، که یکی از چالش‌های مهم در کنترل فشار نیوماتیک است. در ادامه این تحقیقات، اوپانگ و همکاران^[6] با شبیه‌سازی عملکرد شیرهای قطع و وصل با سرعت بالا، نشان دادند که شیرهای پیزوالکتریک تحت فشار ۲۰ مگاپاسکال، دبی ۱۰ لیتر بر دقیقه و فرکانس ۲۰۰ هرتز می‌توانند عملکرد قابل قبولی از خود نشان دهند. علاوه بر

عملگرهای ویس کویل (voice coil) و مکانیزم انعطاف‌پذیر موازی ارائه کردند. این طراحی مدولار امکان تعمیر آسان قطعات آسیب‌دیده را فراهم می‌کند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد استیج با حرکت خطی $7 \pm$ میلی‌متر و فرکانس رزونانس ۱۸ هرتز عملکردی مشابه استیج‌های یکپارچه دارد و برای ردیابی مسیر مناسب است. در تحقیقات پیشین، اگرچه عملگرهای پیزوالکتریک در شیرهای نیوماتیکی استفاده شده‌اند و پیشرفت‌هایی مانند افزایش سرعت پاسخ و دقت کنترل را به همراه داشته است، اما این عملگرها محدودیت‌هایی مانند جابجایی کم و نیروهای خارجی زیاد بر پلانجر را دارد که این‌ها می‌توانند باعث کاهش کورس پلانجر شیر شوند. در تحقیق حاضر با طراحی یک مکانیزم منعطف نوع لوزی و طراحی پلانجر شیر به نحوی که بارهای خارجی را تا حد زیادی کاهش دهد، این شیر به کورس جابجایی نسبتاً بالایی همراه با سرعت پاسخ و دقت کنترل بالا دست یافته است. بنابراین در این مقاله، ابتدا ساختار شیر تشریح می‌شود و مدل دینامیکی برای هر یک از اجزا به صورت مجزا معرفی می‌گردد. سپس، با تلفیق این مدل‌ها، یک مدل جامع برای کل سیستم استخراج می‌شود. به منظور اطمینان از دقت مدل، صحت‌سنجی انجام شده و آزمایش‌های تجربی روی شیر صورت می‌گیرد تا پهنای باند سیستم به‌طور تجربی محاسبه شود. همچنین عملکرد شیر در کاربرد کنترل فشار بررسی شده و پاسخ شیر به ورودی‌های سینوسی با دامنه و فرکانس‌های مختلف و همچنین ورودی پله ارزیابی می‌شود.

۲- ساختار شیر و عملکرد آن

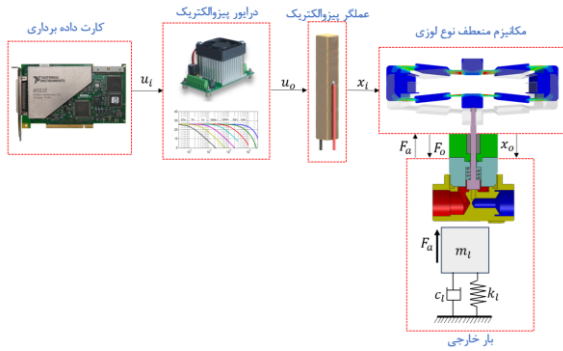
طرح کلی شیر قطع و وصل پیزوالکتریک در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱) نمای کلی شیر پیزوالکتریک

این، کانت و سینگ^[7] یک مدل خطی متغیر با زمان برای شیرهای قطع و وصل نیوماتیک استخراج کرده‌اند، که قابلیت تحلیل رفتار دینامیکی این شیرها را بهبود می‌بخشد. از طرفی، یامادا و همکاران^[8] شیر قطع و وصل دیجیتالی را برای سیستم‌های کنترل هیدرولیک توسعه داده‌اند، که با استفاده از عملگرهای پیزوالکتریک تحریک می‌شود و قابلیت‌های بیشتری در کنترل دارد.

هان و همکاران^[9] شیر نیوماتیکی با عملگر پیزوالکتریک را برای کاربردهای دما بالا (تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) و پهنای باند بالا (۲۰۰ هرتز) طراحی و آزمایش کردند. با استفاده از عایق حرارتی و کنترلر پی‌ای‌دی (PID) مبتنی بر منطق فازی، این شیر توانست در دما و فرکانس ذکر شده، جابجایی دقیق اسپول را فراهم کند و عملکرد مناسبی داشته باشد. همچنین، لینگ و همکاران^[10] با طراحی و مدل‌سازی مکانیزم نوع پل لوزی، این مکانیزم را در شیر سروو هیدرولیکی پیزوالکتریک به‌کار گرفته و مزایای متعددی را در کنترل دقیق فشار و دبی جریان ارائه داده‌اند. لینگ و همکاران^[11] یک شیر کنترل جریان دو مرحله‌ای مبتنی بر عملگر پیزوالکتریک با مکانیزم انعطاف‌پذیر بهبودیافته ارائه کردند که به زمان پاسخ ۵ میلی‌ثانیه، نرخ جریان ۷۰ لیتر بر دقیقه و پهنای باند دینامیکی ۱۵۰ هرتز در فشار ۳۰ بار دست یافت. این پژوهش با ترکیب تحلیل تئوری و آزمایش، بهبود پهنای باند دینامیکی و ظرفیت جریان در کنترل دقیق جریان را هدف قرار داده است. گویی و همکاران^[12] به طراحی بهینه اسپول اصلی در شیر سروو پیزوالکتریک پرداخته‌اند تا با کاهش نیروی جریان و جرم اسپول، عملکرد کلی را بهبود دهند. با استفاده از الگوریتم ژنتیک (NSGA-II) و شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، اسپول بهینه‌سازی شده و نتایج تجربی نشان دادند که پهنای باند دینامیکی شیر به ۱۷۲ هرتز افزایش یافته و نسبت به اسپول غیر بهینه ۲۶٪ بهبود یافته است. لینگ و ژانگ^[13] به بررسی و مدل‌سازی ترکیبی از پیزوالکتریک و مکانیزم‌های منعطف تحت بارهای خارجی پرداخته‌اند. این مطالعه اثرات بار خارجی بر عملکرد مکانیزم‌های پیزوالکتریک را تحلیل کرده و به بهینه‌سازی تعامل بین اجزای پیزوالکتریک و سازه‌های منعطف پرداخته است. نتایج این مدل‌سازی می‌تواند به طراحی و بهبود عملکرد سیستم‌های نیوماتیکی و هیدرولیکی دقیق کمک کند، به‌ویژه در کاربردهایی که نیازمند پاسخ‌دهی سریع و کنترل تغییرات کوچک در موقعیت و نیرو هستند. همچنین، در راستای بهبود تحلیل مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر، روش‌های کینتواستاتیک و دینامیک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین، در یک مطالعه دیگر لینگ و همکاران^[14] با استفاده از مدل سختی دینامیکی دوپورت، به تحلیل دقیق‌تر مکانیزم‌های دوبعدی انعطاف‌پذیر پرداخته شده و قابلیت‌های مدل‌سازی دینامیکی این مکانیزم‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. باویسکار و همکاران^[15] مکانیزم استیج ایکس‌وی (xy) مبتنی بر طراحی مدولار با استفاده از



شکل ۳) رابطه بین ولتاژ جابجایی و نیروی شیر پیزوالکتریک تحت بار خارجی

می‌شود و می‌تواند محدود کننده حرکت دینامیکی مکانیزم منعطف باشد. بار خارجی را می‌توان با یک جرم و فنر و دمپر همراه با یک نیروی خارجی متمرکز جانبی معادل، مدل‌سازی کرد. برای به دست آوردن مدل دینامیکی تلفیق شده کل سیستم همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، باید همه‌ی اجزاء مدل‌سازی گردد و سپس تلفیق گردند. این مدل‌سازی شامل مدل درایور و مدل الکترومکانیکی پیزوالکتریک و مدل‌سازی مکانیزم منعطف در فضای لاپلاس و دینامیک بار خارجی شامل جرم پلانجر، نیروی جریان سیال و اصطکاک اورینگ‌ها و... می‌باشد.

۳-۱- فرمول بندی برای استخراج تابع تبدیل شیر پیزوالکتریک

در سیستم‌های مبتنی بر پیزوالکتریک، درایور پیزوالکتریک یک جزء کلیدی می‌باشد. وظیفه این جزء کلیدی تقویت ولتاژ خروجی از سیستم دیجیتال به آنالوگ می‌باشد که برای تغذیه‌ی عملگر پیزوالکتریک می‌باشد. تابع تبدیل درایور پیزوالکتریک را می‌توان به صورت یک سیستم مرتبه یک در دامنه لاپلاس به صورت زیر در نظر گرفت:

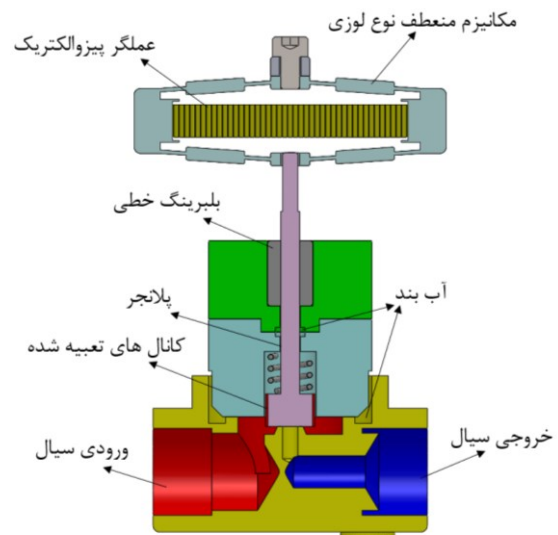
$$\frac{u_o}{u_i} = \frac{A_u}{R_p C_p S + 1} \quad (1)$$

که در این رابطه u_i و u_o به ترتیب نشان‌دهنده ولتاژ ورودی و ولتاژ خروجی و A_u و R_p و C_p به ترتیب مقدار تقویت ولتاژ و مقاومت پیزوالکتریک و مقاومت پیزوالکتریک و ظرفیت خازنی پیزوالکتریک می‌باشد. در رابطه (۱) می‌توان دید که با افزایش ظرفیت خازنی پیزوالکتریک، پهنای باند دینامیکی درایور کاهش می‌یابد.

همچنین با صرف‌نظر کردن از اثر هیستریزیس می‌توان یک دینامیک خطی مرتبه دو در حوزه زمان و لاپلاس برای پیزوالکتریک در نظر گرفت که به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \ddot{x}_i(t) + 2\zeta_p w_{np} \dot{x}_i(t) + w_{np}^2 x_i(t) = u_o(t) \\ (S^2 + 2\zeta_p w_{np} S + w_{np}^2) \cdot x_i = u_o \end{cases} \quad (2)$$

که جابجایی خروجی پیزوالکتریک ζ_p و w_{np} به ترتیب نسبت میرایی و فرکانس طبیعی معادل برای پیزوالکتریک می‌باشد. با



شکل ۲) نمایی از شیر پیزوالکتریک

همچنین در شکل ۲ نمای برش خورده شیر نشان داده شده است. با اعمال ولتاژ و افزایش آن به صورت خطی، جابجایی پیزوالکتریک به صورت خطی افزایش می‌یابد. توسط مکانیزم منعطف نوع لوزی کورس پیزوالکتریک تقویت می‌شود. پلانجر به صورت مستقیم به پورت خروجی مکانیزم منعطف متصل است که می‌تواند باعث حرکت خطی پلانجر شود. همچنین، برای همراستایی حرکت پلانجر با مکانیزم، از بیرینگ‌های خطی استفاده شده است.

با اعمال ولتاژ و حرکت پلانجر به سمت بالا، میزان بازشدگی شیر افزایش یافته و در نتیجه دبی هوای عبوری از آن بیشتر می‌شود. از آنجایی که عملگر پیزوالکتریک تنها قابلیت ایجاد افزایش طول را دارد، برای پایین آمدن پلانجر و بستن مجدد شیر، از یک فنر استفاده شده است. برای جلوگیری از باز شدن ناخواسته شیر بر اثر فشار سیال ورودی، کانال‌هایی در کنار پلانجر تعبیه شده که سیال را به پشت آن هدایت می‌کنند و به این ترتیب نیروی ناشی از سیال بر روی پلانجر تا حد زیادی خنثی می‌شود. در خروجی شیر، یک حسگر فشار MPX5700ap قرار دارد که توسط حسگر فشار دقیق مدل SDE1 از شرکت فستو کالیبره شده است.

۳- مدل‌سازی دینامیکی اجزا و سامانه

شیر قطع و وصل پیزوالکتریک سرعت بالا در شکل ۱ شکل ۱ نشان داده شده است. در این جا از مکانیزم نوع لوزی برای بزرگنمایی استفاده شده است. ویژگی اصلی این مکانیزم‌ها در این است که بار خارجی بر دینامیک و کینتواستاتیک مکانیزم منعطف همراه با پیزوالکتریک تاثیر می‌گذارد، مخصوصاً زمانی که بار خارجی سنگین باشد یا سفتی خروجی مکانیزم کم باشد. در این شیر پیزوالکتریک نیروی اینرسی پلانجر، نیروی جریان هوای پرفشار و نیروی اصطکاک اورینگ و نیروی فنر به عنوان بار خارجی در نظر گرفته

$$F_o = \frac{k_6(s)H_m(s)}{2(k_3(s) + k_5(s))} \cdot \frac{A_u}{(H_p(s))(H_u(s))} \cdot u_i \quad (9)$$

که در رابطه ی بالا $H_m(s) = (k_{in}(s) + k_2(s) - k_3(s)R_a(s) - k_1)$ و $H_u(s) = R_p C_p S + 1$ و $H_p(s) = S^2 + 2\zeta_p w_{np} S + w_{np}^2$ می باشد.

همچنین بار خارجی وارد بر خروجی مکانیزم منعطف را می توان به عنوان یک جرم و فنر و دمپر همراه با یک نیروی جانبی در نظر گرفت که رابطه آن در حوزه لاپلاس به صورت زیر می شود:

$$F_o - F_a = (m_l S^2 + c_l S + k_l) x_o \quad (10)$$

که در این رابطه m_l و c_l و k_l جرم و ضریب میرایی و سختی معادل بار خارجی و F_a نیرویی است که بر مکانیزم منعطف وارد می شود و قسمت هایی از بار خارجی که گنجانده آن در جرم و ضریب میرایی و سختی معادل مشکل است که این ضرایب را می توانیم توسط شناسایی سیستم به دست آوریم. اگر رابطه (۹) را در رابطه (۱۰) جایگذاری کنیم و بر حسب x_o حل کنیم، دینامیک کل حاصل از تلفیق دینامیک درایور پیژوالکتریک و پیژوالکتریک و مکانیزم منعطف و بار خارجی به صورت زیر به دست می آید:

$$x_o = \frac{k_6(s)H_m(s)}{2H_l(s)(k_3(s) + k_5(s))} \cdot \frac{A_u}{(H_p(s))(H_u(s))(H_l(s))} \cdot u_i - \frac{F_a}{H_l(s)} \quad (11)$$

که در این رابطه $H_l(s) = (m_l S^2 + c_l S + k_l)$ می باشد.

۲-۳- مدل اوریفیس

برای تعریف مدل اوریفیس در ابتدا باید فشار بحرانی تعریف شود. در صورتی که p_a فشار پایین دست و p_u فشار بالادست و p_{cr} فشار بحرانی باشد، در اوریفیس هایی با لبه تیز فشار بحرانی به صورت زیر تعریف می شود:

$$p_{cr} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (12)$$

این نسبت فشار دوطرف اوریفیس را فشار بحرانی می نامند و مقداری برابر $p_{cr} = 0.528$ برای آن به دست می آید. در صورتی که نسبت فشار بالادست به فشار پایین دست بیش از فشار بحرانی باشد، سرعت سیال عبوری از روزنه شیر به سرعت صوت رسیده و پدیده خفگی رخ می دهد. در این شرایط روابط حاکم بر سیال تنها به فشار بالادست وابسته خواهد بود. اما در صورتی که نسبت کم تر از فشار بحرانی باشد، معادلات سیال از قوانین اوریفیس تبعیت کرده و به هر دو فشار بالادست و پایین دست وابسته می باشد.

رابطه استاندارد برای اوریفیس شیر که خروجی آن دبی جرمی هوا است در رابطه (۱۳) آورده شده است. این رابطه بر اساس استاندارد ISO 6358 می باشد [16,17].

جایگذاری رابطه (۱) در رابطه (۲) تابع تبدیل پیژوالکتریک با در نظر گرفتن پهنای باند دینامیکی پیژوالکتریک به دست می آید:

$$x_i = \frac{A_u}{(S^2 + 2\zeta_p w_{np} S + w_{np}^2)(R_p C_p S + 1)} \cdot u_i \quad (3)$$

توسط مدل سختی دینامیکی دو پورت [12] می توان رابطه بین نیروها و جابجایی های پورت ورودی مکانیزم منعطف نوع لوزی که توسط عملگر پیژوالکتریک وارد می شود را با نیروها و جابجایی پورت خروجی مکانیزم منعطف که توسط بار خارجی اعمال می شود در حوزه فرکانس به دست آورد. با قرار دادن $S = j\omega$ که j عدد

موهومی و w فرکانس زاویه ای مدل سختی دینامیکی در حوزه لاپلاس به دست می آید.

$$\begin{bmatrix} F_{in1} \\ F_{in2} \\ F_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1(s) & k_2(s) & k_3(s) \\ k_2(s) & k_4(s) & k_5(s) \\ k_3(s) & k_5(s) & k_6(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{in1} \\ x_{in2} \\ x_o \end{bmatrix} \quad (4)$$

که F_{in1} و F_{in2} به ترتیب نیروی وارد شده به پورت ورودی در راست و چپ مکانیزم می باشد و u_{in1} و u_{in2} به ترتیب جابجایی وارد شده به پورت ورودی در راست و چپ مکانیزم می باشد و f_{out} و u_{out} به ترتیب نیرو و جابجایی در پورت خروجی مکانیزم منعطف می باشد و k_1 تا k_6 ضرایب ماتریس سختی دینامیکی [12] هستند. با توجه به اینکه مقدار نیروها و جابجایی های ورودی F_{in1} و F_{in2} و همچنین u_{in1} و u_{in2} با یکدیگر برابر ولی جهتشان مخالف یکدیگر است، میتوان نیروی خروجی مکانیزم بر حسب جابجایی ورودی را به صورت زیر به دست آورد.

$$F_o = \frac{k_3^2(s) - k_5^2(s) + (k_6(s)(k_4(s) - k_1(s)))}{2(k_3(s) + k_5(s))} \cdot x_i \quad (5)$$

نسبت بزرگنمایی مکانیزم منعطف را در صورتی که نیروی خروجی مکانیزم صفر باشد میتوان به صورت زیر نوشت:

$$R_a = - \frac{k_3(s) - k_5(s)}{k_6(s)} \quad (6)$$

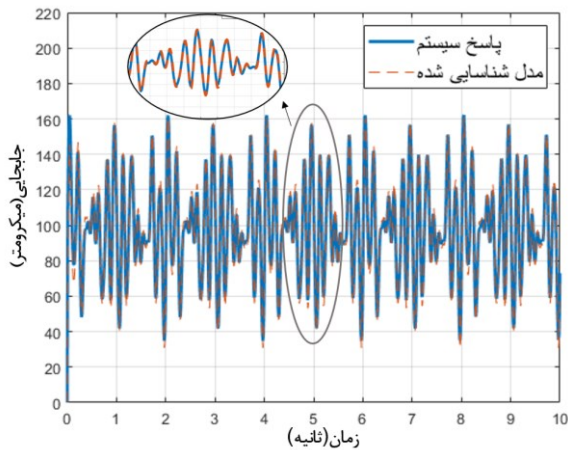
همچنین سختی ورودی مکانیزم زمانی که نیروی خروجی صفر باشد به صورت زیر به دست می آید:

$$k_{in} = k_4(s) - k_2(s) - \frac{(k_5(s)(k_5(s) - k_3(s)))}{k_6(s)} \quad (7)$$

با ادغام معادلات (۵) و (۶) و (۷) رابطه ی بین نیروی خروجی مکانیزم و جابجایی ورودی مکانیزم بر حسب سختی ورودی و نسبت بزرگنمایی به صورت زیر به دست می آید:

$$F_o = \frac{k_6(s)(k_{in}(s) + k_2(s) - k_3(s)R_a(s) - k_1)}{2(k_3(s) + k_5(s))} \cdot x_i \quad (8)$$

همچنین با جایگذاری رابطه (۳) در رابطه (۸) رابطه ی بین ولتاژ ورودی به درایور پیژوالکتریک و نیروی خروجی مکانیزم منعطف با در نظر گرفتن پهنای باند دینامیکی درایور و پیژوالکتریک و مکانیزم منعطف در فضای لاپلاس به صورت زیر دست می آید:



شکل ۵) پاسخ سیستم و مدل شناسایی شده به ورودی مورد استفاده برای شناسایی

۴-۱- نتایج شبیه سازی و آزمایشات تجربی

همان طور که در رابطه (۱۳) نشان داده شد، مدل کلی سیستم با ولتاژ خروجی کارت داده برداری u_i به عنوان ورودی و جابجایی پلانجر x_o به عنوان خروجی تعریف می شود. این مدل شامل پارامترهای مجهولی مانند جرم m_i ، دمپینگ c_i ، سختی k_i ، و نیروی جانبی F_a است که باید از طریق شناسایی استخراج شوند. برای این منظور، ورودی ولتاژی هارمونیک شامل ترکیب چند موج سینوسی با دامنه ها و فرکانس های مختلف مطابق رابطه زیر اعمال شده است:

$$u_i = 50 + 20 \sin(13\pi t) + 7 \sin(20\pi t) + 18 \sin(11\pi t) + 10 \sin(5\pi t) \quad (14)$$

این ورودی طیف وسیعی از فرکانس های سیستم را تحریک کرده و اطلاعات دقیقی از رفتار دینامیکی آن فراهم می کند. با اندازه گیری جابجایی پلانجر به کمک حسگر لیزر و استفاده از الگوریتم بهینه سازی افمینکان (fmincon)، ضرایب مدل با دقت تعیین شدند. شکل ۵ نتایج شناسایی سیستم را نشان می دهد.

به منظور اعتبارسنجی مدل دینامیکی و اطمینان از دقت نتایج شبیه سازی، آزمایش های تجربی انجام شد. تمام آزمایشات در دمای اتاق و در شرایط بدون بار انجام شد. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده سه سیگنال سینوسی با فرکانس های مختلف به عملگر پیزوالکتریک وارد شد و جابجایی پلانجر خوانده شده است و با نتایج حاصل از مدل دینامیکی به دست آمده در بالا مقایسه شده است. انتخاب سه سیگنال سینوسی با فرکانس و دامنه های مختلف برای بررسی پاسخ سیستم به ورودی های مختلف و درک رفتار دینامیکی پلانجر تحت تأثیر این ورودی ها بوده است. این آزمایش کمک می کند تا سیستم در شرایط مختلف بررسی شود و پاسخ های احتمالی در برابر ورودی های مختلف مشخص شود.

$$\dot{m} = \begin{cases} \frac{c_d A_v p_u}{\sqrt{RT}} \frac{1}{\gamma} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} & \frac{p_d}{p_u} \leq p_{cr} \\ \frac{c_d A_v p_u}{\sqrt{RT}} \left(\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left(\left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right) \right)^{\frac{1}{2}} & \frac{p_d}{p_u} > p_{cr} \end{cases} \quad (13)$$

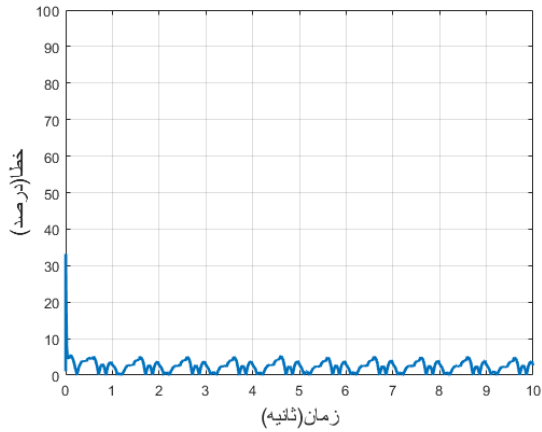
که در این رابطه \dot{m} دبی جرمی گذرنده از اوریفیس، c_d نشان دهنده ضریب تخلیه شیر، A_v سطح مقطع موثر سیال عبوری از شیر بوده، T دمای سیال بالادست، R نشان دهنده ثابت گازها و γ نسبت ظرفیت گرمایی می باشد.

۴- تجهیزات آزمایشگاهی و راستی آزمایی نتایج

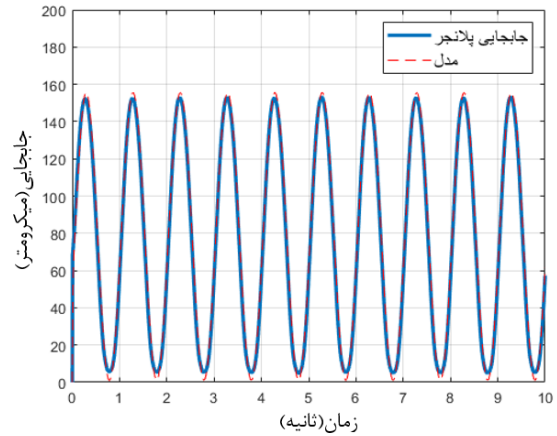
مکانیزم منعطف نوع لوزی با جنس آلومینیوم ۷۰۷۵ توسط ماشینکاری به روش تخلیه الکتریکی ساخته شده است. عملگر پیزوالکتریک مدل SA05536 با تفرانس بسیار بسته داخل مکانیزم منعطف جایگذاری شده است. عملگر پیزوالکتریک با حداکثر ولتاژ ۱۴۰ ولت تحریک می گردد. برای تحریک این عملگر از آمپلی فایر پیزوالکتریک مدل PDU150 استفاده شده است. برای بازخورد جابجایی پلانجر از لیزر HL-G103-AG5 شرکت پاناسونیک استفاده شده و برای اعمال ولتاژ خروجی دیجیتال تولید شده توسط کامپیوتر و ذخیره سازی داده های خروجی آنالوگ از حسگر جابجایی، از کارت داده برداری PCI6052 استفاده می شود. همچنین برای تامین فشار هوای بالادست شیر کمپرسور هوا به کار گرفته شده است. شیر پیزوالکتریک ساخته شده در شکل ۴ نشان داده شده است.



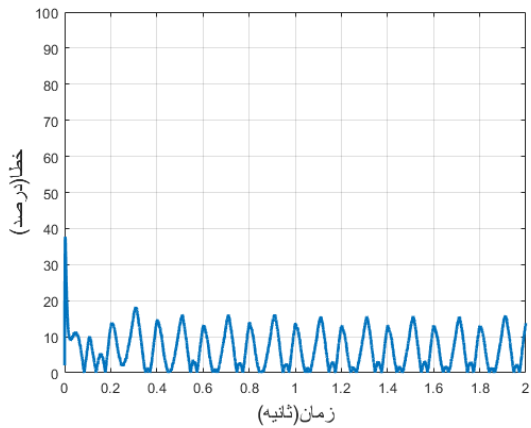
شکل ۴) شیر قطع و وصل پیزوالکتریک ساخته شده همراه با لیزر پاناسونیک در حال اندازه گیری جابجایی پلانجر



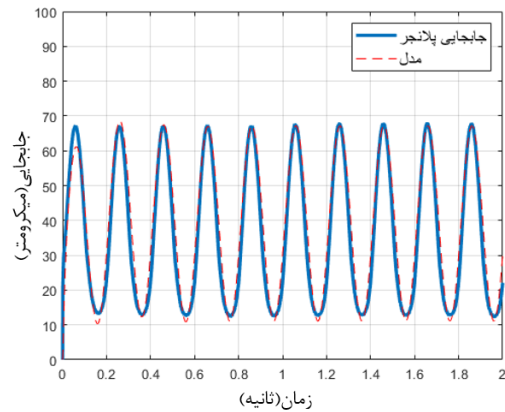
(الف)



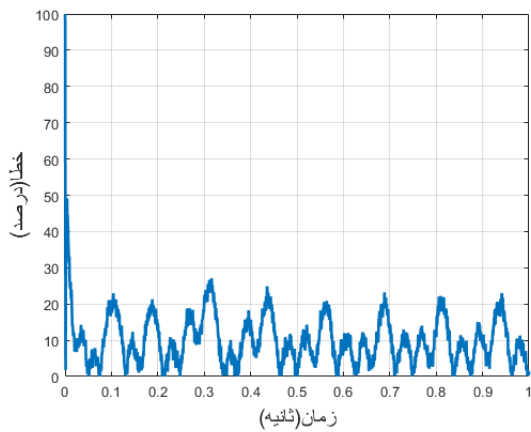
(ب)



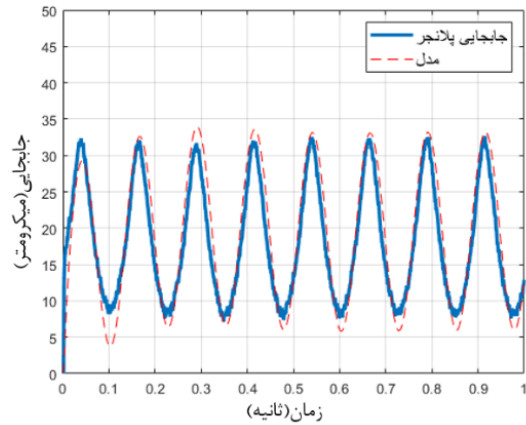
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

شکل ۷ نمودارهای خطای مدل‌سازی (الف): نمودار خطا به ازای ورودی سینوسی دامنه ۸۰ ولت و فرکانس ۱ هرتز (ب): نمودار خطا به ازای ورودی سینوسی به ازای ولتاژ ورودی با دامنه ۴۰ ولت و فرکانس ۵ هرتز (ج): نمودار خطا به ازای ورودی سینوسی با دامنه ۲۰ ولت و فرکانس ۸ هرتز

شکل ۶ ولتاژ تحریک سینوسی به پیزوالکتریک و جابجایی خروجی پلانجر (الف): جابجایی پلانجر به ازای ولتاژ ورودی با دامنه ۸۰ ولت و فرکانس ۱ هرتز (ب): جابجایی پلانجر به ازای ولتاژ ورودی با دامنه ۴۰ ولت و فرکانس ۵ هرتز (ج): جابجایی پلانجر به ازای ولتاژ ورودی با دامنه ۲۰ ولت و فرکانس ۸ هرتز

ضریب تعیین R^2 در نمودار شکل ۶ (الف) برابر با ۰٫۹۹۲، در شکل ۶ (ب) برابر با ۰٫۹۳ و در شکل ۶ (ج) برابر با ۰٫۸۵ است. همچنین نمودار خطای مدل‌سازی شکل که برای سه ورودی مختلف است در شکل ۷ نشان داده شده است.

نتایج به دست آمده از مدل و داده‌های خروجی سنسور نوری، همان طور که در شکل ۶ (الف) و (ب) و (ج) نشان داده شده است، که به خوبی با یکدیگر منطبق هستند.

جدول ۱) مقایسه بین نتایج خروجی حاصل از مدل سازی و نتایج تجربی

ورودی	ضریب تعیین (R^2)	بیشینه خطا (درصد)
$u = 40 \sin(1 * 2 * \pi * t) + 40$	0.992	5
$u = 20 \sin(5 * 2 * \pi * t) + 20$	0.93	16
$u = 10 \sin(8 * 2 * \pi * t) + 10$	0.83	25

جدول ۲) بیشینه خطای حاصل از کنترل فشار

مقدار مطلوب (بار)	بیشینه خطا پس از عبور از حالت گذرا
$p = 2 \sin\left(\left(1 * 2 * \pi * t\right) - \frac{\pi}{2}\right) + 2$	0.1 بار
$p = 1 \sin\left(\left(2 * 2 * \pi * t\right) - \frac{\pi}{2}\right) + 1$	0.15 بار
$p = 1 \sin\left(\left(3 * 2 * \pi * t\right) - \frac{\pi}{2}\right) + 1$	0.2 بار

نتایج به دست آمده نشان می دهد که با افزایش فرکانس، خطای مدل افزایش می یابد. علت این مسئله آن است که با افزایش فرکانس دینامیک های مدل نشده سیستم مانند هیستریزیس و ... تاثیر خود را بیشتر نشان می دهند در نتیجه مدل سازی با خطای بیشتری همراه خواهد بود.

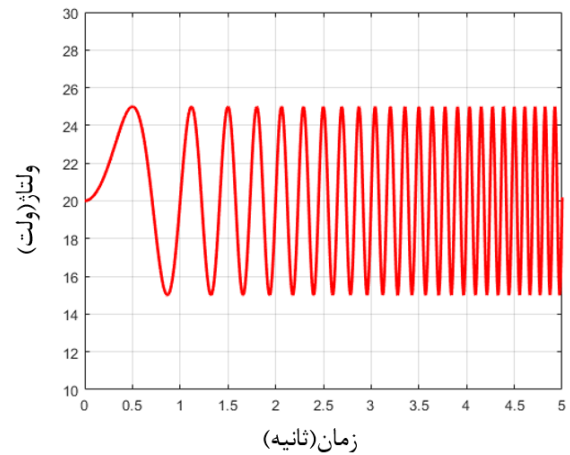
در ادامه برای به دست آوردن پهنای باند دینامیکی شیر، یک سیگنال چیرپ * تا ۱۵۰ هرتز را در ۷۵ ثانیه جاروب میکند به آن وارد شد و از آن تبدیل فوریه سریع گرفته شد که نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است. تحلیل پهنای باند دینامیکی برای بررسی سرعت پاسخ دهی سیستم به تغییرات ورودی اهمیت دارد و نشان می دهد که این شیر پیزوالکتریک می تواند در فرکانس های نسبتاً بالا نیز به صورت مؤثر عمل کند.

همانطور که در شکل ۸ مشخص است فرکانس اول سیستم ۵۶ هرتز و پهنای باند دینامیکی شیر ۹۰ هرتز در دقت ۳- دسی بل است که نشان دهنده پهنای باند به نسبت بالای شیر پیزوالکتریک می باشد. این آزمایش ها نشان دهنده دقت و پایداری سیستم طراحی شده هستند و این سیستم می تواند در کاربردهای کنترل فشار دقیق با دقت و سرعت پاسخ بالا مورد استفاده قرار گیرد.

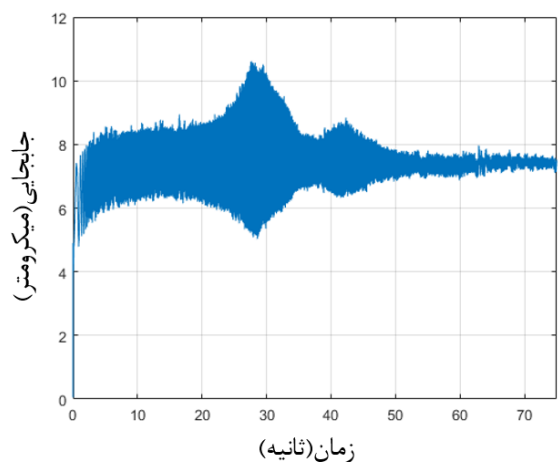
۲-۴- عملکرد شیر در کاربرد کنترل فشار

از این شیر در کاربردهای مختلفی می توان استفاده کرد که یکی از آن ها کنترل فشار است که در صنایع مختلف به کرات مورد استفاده قرار می گیرد که نمونه ای از این کاربرد آن ها میتوان به استفاده در ونتیلاتور پرتابل و دستگاه های اکسیژن ساز و استفاده در کروماتوگرافی گازی و کنترل نیروی عملگرهای نیوماتیکی و کنترل چرخش در هندپیس های دندان پزشکی اشاره کرد.

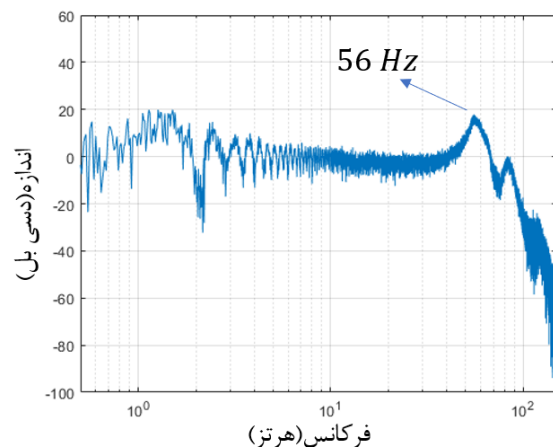
برای کنترل فشار خروجی شیر پیزوالکتریک از حسگر فشار MPX5700ap در خروجی شیر استفاده شده که توسط حسگر فشار دقیق فستو مدل sde1 کالیبره شده است. کالیبراسیون کمک می کند تا داده های فشار خروجی دقیق تری به دست آید و این موضوع تأثیر مهمی در دقت کنترل فشار دارد. حسگر فشار با یک محدود کننده که نقش مصرف کننده را دارد موازی شده است.



(الف)



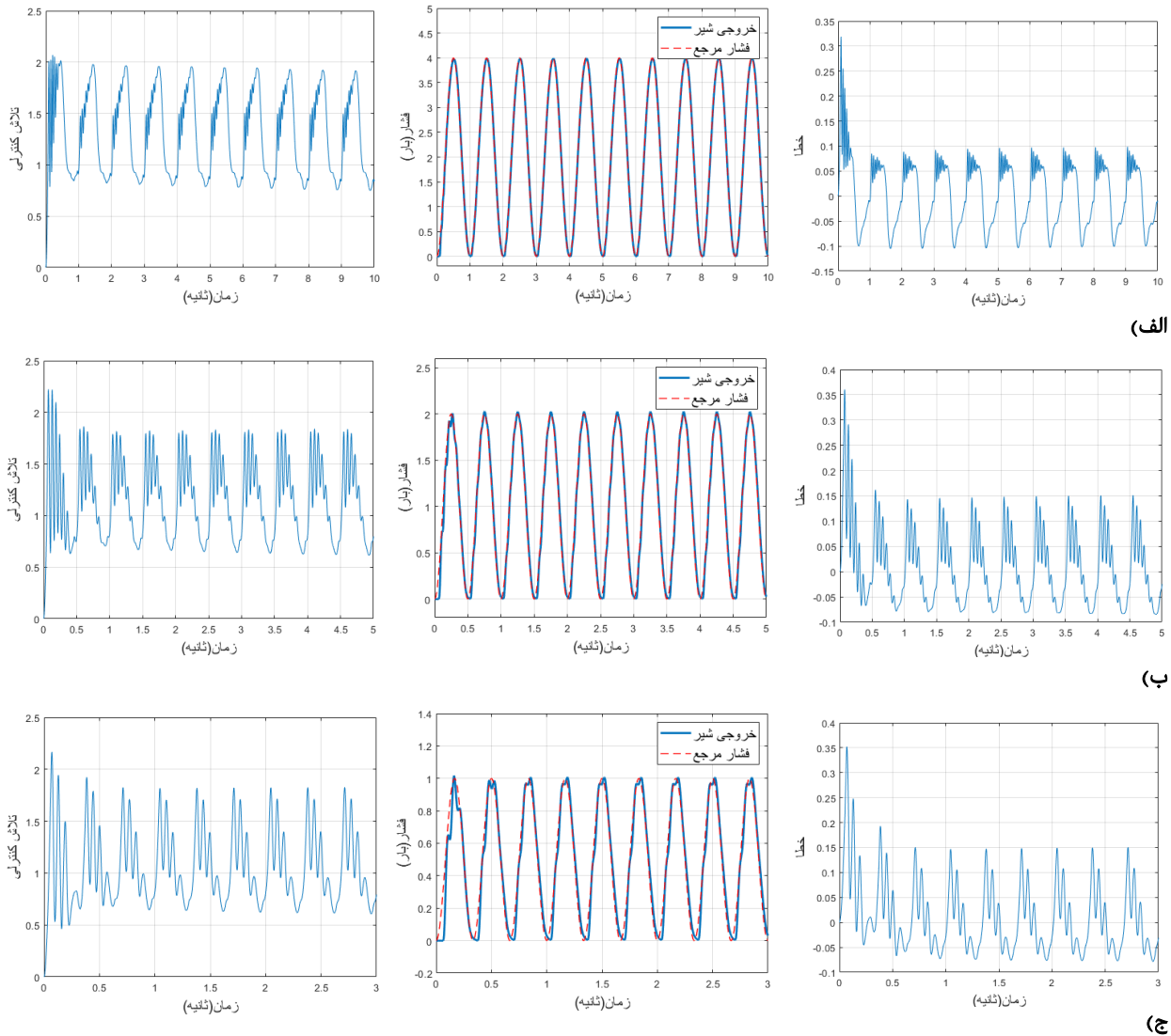
(ب)



(ج)

شکل ۸) پهنای باند دینامیکی شیر پیزوالکتریک (الف): سیگنال ورودی چیرپ از فرکانس ۰ تا ۱۵۰ هرتز در مدت زمان ۷۵ ثانیه (ب): پاسخ شیر به ورودی چیرپ (ج) تبدیل فوریه سریع از جابجایی پلانجر تحت ورودی چیرپ

همچنین بیشینه خطا مدل سازی و مقادیر ضریب تعیین حاصل از ورودی های مختلف در جدول ۱ آورده شده و مقایسه شده اند.



شکل ۹) (الف): کنترل فشار خروجی شیر در فرکانس ۱ هرتز و دامنه فشار ۴ بار و خطا و تلاش کنترلی آن (ب): کنترل فشار خروجی شیر در فرکانس ۲ هرتز و دامنه فشار ۲ بار و خطا و تلاش کنترلی آن (ج): فشار خروجی شیر در فرکانس ۳ هرتز و دامنه فشار ۲ بار و خطا و تلاش کنترلی آن

در بازه‌های زمانی مختلف کنترل کند و تأثیر آن در کاهش خطای فشار خروجی نسبت به سیگنال مرجع را نشان داده شده است. در جدول ۲ نیز بیشینه مقدار خطای خروجی نسبت به فشار مطلوب نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، بیشترین خطای موجود پس از عبور از حالت گذرا در حدود ۰/۲ بار برای ورودی سینوسی با فرکانس ۳ هرتز و دامنه ۲ بار گزارش شده است که نشان دهنده دقت بالای این شیر در ساخت پروفیل‌های فشار مختلف می‌باشد. همچنین می‌توان دید که با افزایش فرکانس ورودی مرجع خطای فشار خروجی نسبت به سیگنال مرجع زیادتر می‌شود. در ادامه نیز ورودی مرجع پله با دامنه ۲ بار به سیستم وارد شده است که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، زمان صعود برای شیر پیزوالکتریک در دامنه فشار ۲ بار ۲۱ میلی ثانیه است که نشان دهنده سرعت پاسخ بالای این سیستم است.

برای حلقه بسته شدن سیستم، خروجی حسگر به کارت داده برداری بازخورد می‌شود. برای کنترل موثر فشار از یک کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتقی استفاده شده است و ضرایب کنترلر به صورت دستی تنظیم شده‌اند. همچنین تمام آزمایشات در دمای اتاق و فشار بالادست ۶ بار انجام شده است. برای نشان دادن عملکرد این شیر در کنترل فشار سه سیگنال مرجع سینوسی با فرکانس‌های مختلف و دامنه‌های مختلف به آن وارد شده و خطای آن خروجی فشار نسبت به فشار مرجع به همراه تلاش کنترلی آن نیز در شکل ۹ نمایش داده شده است. هدف از این آزمایش‌ها بررسی دقت و عملکرد شیر پیزوالکتریک در کنترل فشار خروجی و نشان دادن توانایی این سیستم در دنبال کردن سیگنال‌های مرجع با فرکانس‌ها و دامنه‌های مختلف است. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، کنترلر پی آی دی با تنظیم دقیق ضرایب توانسته است فشار خروجی را به صورت مؤثر

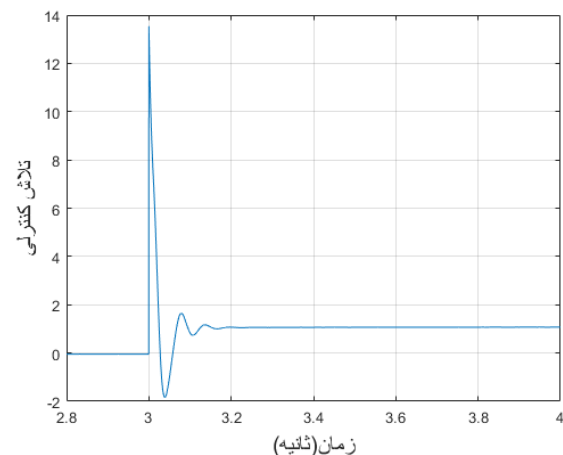
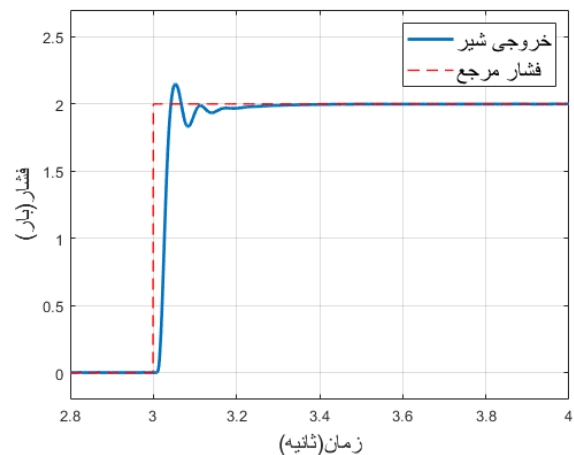
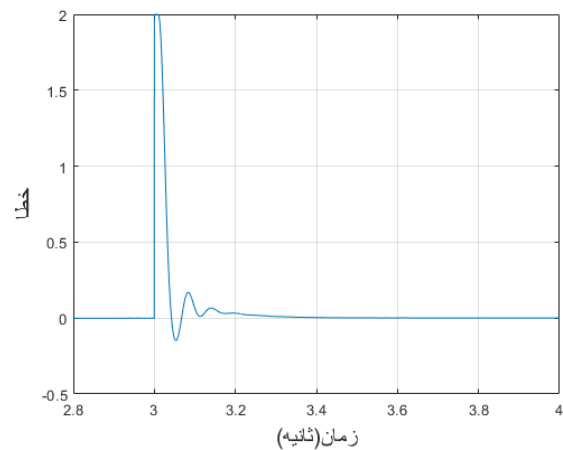
باند ۹۰ هرتز دست پیدا کند، که نشان‌دهنده پایداری و پاسخگویی بالای شیر در کنترل تغییرات سریع فشار است. نتایج این آزمایش‌ها همچنین نشان داد که زمان پاسخ پله‌ای به فشار ۲ بار حدود ۲۱ میلی‌ثانیه است. علاوه بر این، شیر سروو طراحی‌شده می‌تواند فشارهای ورودی با فرکانس‌ها و دامنه‌های مختلف را به صورت پیوسته دنبال کند، که این امر بیانگر انعطاف‌پذیری و عملکرد دینامیکی خوب سیستم است. این ویژگی‌ها شیر سروو پیزوالکتریک را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای صنعتی حساس به دقت و سرعت تبدیل می‌کند، که در آنها نیاز به پاسخ‌دهی سریع و دقیق به تغییرات فشار، همچون در سیستم‌های رباتیک، هوافضا و تجهیزات پزشکی، وجود دارد. به طور کلی، این طراحی با ارائه یک راهکار قابل اعتماد و دقیق در حوزه کنترل فشار نیوماتیک، قابلیت‌های قابل توجهی در بهبود عملکرد سیستم‌های نیوماتیک دارد و می‌تواند به عنوان یک ابزار حیاتی در کاربردهای صنعتی و تخصصی به کار رود.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله هیچ تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

- 1- Linjama M. Digital fluid power: State of the art. In *The Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power 2011* May 18 (Vol. 2, No. 4, pp. 18-20).
- 2- Bruno N, Zhu Y, Liu C, Gao Q, Li Y. 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*. 2019 Jun;33:2747-59.
- 3- Sun G, Li S, Yu Q, Zhang J, Ni H. Innovative pressure control with ANFIS-enhanced mode switching for high-speed pneumatic systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2025 May 1:1-8.
- 4- Ahn K, Yokota S. Intelligent switching control of pneumatic actuator using on/off solenoid valves. *Mechatronics*. 2005 Jul 1;15(6):683-702.
- 5- Choi SB, Yoo JK. Pressure control of a pneumatic valve system using a piezoceramic flapper. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2004 Jan 1;218(1):83-91.
- 6- Ouyang X, Yang H, Jiang H, Xu B. Simulation of the piezoelectric high-speed on/off valve. *Chinese Science Bulletin*. 2008 Sep;53(17):2706-11.
- 7- Kunt C, Singh R. A linear time-varying model for on-off valve-controlled pneumatic actuators.
- 8- Yamada H, Wennmacher G, Muto T, Suematsu Y. Development of a high-speed on/off digital valve for hydraulic control systems using a multilayered PZT actuator. *International Journal of Fluid Power*. 2000 Jan



شکل ۱۰) پاسخ کنترلی شیر پیزوالکتریک به ورودی پله همراه با خطا و تلاش کنترلی

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک شیر سروو پیزوالکتریک با طراحی جدید و عملکرد دقیق مبتنی بر مکانیزم منعطف توسعه یافت که به عنوان راهکاری برای کنترل دقیق فشار در سیستم‌های نیوماتیک معرفی شد. بررسی‌ها نشان داد که این طراحی نوآورانه با بهره‌گیری از یک عملگر پیزوالکتریک و مکانیزم لوزی شکل قادر است به تنظیمات دقیق فشار دست یابد و دبی خروجی را به صورت موثر کنترل نماید. این سیستم توانسته است به فرکانس طبیعی ۵۶ هرتز و پهنای

- 1;1(2):5-10.
- 9- Han C, Choi SB, Han YM. A piezoelectric actuator-based direct-drive valve for fast motion control at high operating temperatures. *Applied Sciences*. 2018 Oct 2;8(10):1806.
- 10- Ling M, Wang J, Wu M, Cao L, Fu B. Design and modeling of an improved bridge-type compliant mechanism with its application for hydraulic piezo-valves. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2021 Jun 15;324:112687.
- 11- Ling M, He X, Wu M, Cao L. Dynamic design of a novel high-speed piezoelectric flow control valve based on compliant mechanism. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2022 May 10;27(6):4942-50.
- 12- Gui S, Zhang S, Fu B, Ling M. Fluid-dynamic analysis and multi-objective design optimization of piezoelectric servo valves. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2022 Jun 1;85:102157.
- 13- Ling M, Zhang X. Coupled dynamic modeling of piezo-actuated compliant mechanisms subjected to external loads. *Mechanism and Machine Theory*. 2021 Jun 1;160:104283.
- 14- Bußmann AB, Durasiewicz CP, Kibler SH, Wald CK. Piezoelectric titanium-based microfluidic pump and valves for implantable medical applications. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2021 Jun 1;323:112649.
- 15- Baviskar DD, Rao AS, Sollapur S, Raut PP. Development and testing of XY stage compliant mechanism. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2024 Sep;18(7):5197-210.
- 16- Pipan M, Herakovič N. Volume flow characterization of PWM-controlled fast-switching pneumatic valves. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*. 2016 Sep 15;62(9):543-50.
- 17- Åström KJ, Murray R. Feedback systems: an introduction for scientists and engineers. *Princeton University Press*; 2021 Feb 2.