



## مقایسه عملکرد دو مدار نیوماتیکی متفاوت در حضور کنترل کننده‌ها با ضرایب بهینه

وحیده وحیدی فر<sup>1</sup>، مصطفی تقی زاده<sup>2</sup>، وحید فخاری<sup>2\*</sup>، پدram صفرپور<sup>2</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران  
 2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران  
 \* v\_fakhari@sbu.ac.ir, 16589-53571، کد پستی

## چکیده

در این مقاله کنترل موقعیت یک عملگر نیوماتیک با شیر سولنوئیدی قطع/وصل با تحریک PWM با استفاده از دو مدار نیوماتیکی متفاوت، انجام می‌شود. پس از استخراج معادلات دینامیکی حاکم، به منظور بررسی تأثیر مدار بر عملکرد سیستم، به معرفی این دو مدار نیوماتیکی پرداخته می‌شود. سپس به منظور کنترل موقعیت عملگر نیوماتیکی، برای هر دو مدار، کنترل کننده مدل‌نفرشی و کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق گیر طراحی می‌شوند. در ادامه ضرایب بهینه کنترل کننده‌ها توسط الگوریتم ژنتیک با هدف کمینه کردن انرژی کنترلی و خطای موقعیت، تعیین می‌گردند. در نهایت با انجام شبیه‌سازی‌ها در سیمولینک متلب، عملکرد کنترل کننده‌های طراحی شده با ضرایب بهینه در حضور اغتشاش مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌گیرند. بر اساس نتایج به دست آمده، در مقایسه عملکرد دو مدار، برای مدار نیوماتیکی اول با دو شیر سولنوئیدی، می‌توان به توانایی سیستم در تعقیب بهتر و دقیق‌تر ورودی مرجع سینوسی با فرکانس بالا، در حضور کنترل کننده غیرخطی مدل‌نفرشی، در مقایسه با مدار نیوماتیکی دوم با تک شیر، اشاره کرد. خطای ردیابی موقعیت، در ورودی مرجع سینوسی با فرکانس پایین و در حضور کنترل کننده کلاسیک تناسبی-انتگرالی-مشتق گیر، برای مدار نیوماتیکی با تک شیر، به مراتب کمتر از مدار نیوماتیکی دو شیر می‌باشد، که نشان دهنده رفتار شبه خطی ورودی-خروجی عملگر، با این مدار نیوماتیکی است.

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 25 دی 1396  
 پذیرش: 15 اردیبهشت 1397  
 ارائه در سایت: 10 خرداد 1397  
 کلید واژگان:  
 عملگر نیوماتیک  
 کنترل موقعیت  
 کنترل کننده مدل‌نفرشی  
 تحریک PWM  
 الگوریتم ژنتیک

## Comparing performance of two different pneumatic circuits in the presence of controllers with optimal parameters

Vahideh Vahidifar, Mostafa Taghizadeh, Vahid Fakhari\*, Pedram Safarpour

Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran  
 \* P.O.B. 16589-53571, Tehran, Iran, v\_fakhari@sbu.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 15 January 2017  
 Accepted 05 May 2018  
 Available Online 31 May 2018

## Keywords:

Pneumatic Actuator  
 Position Control  
 Sliding Mode Controller  
 PWM Excitation  
 Genetic Algorithm

## ABSTRACT

In this paper, control position of a pneumatic actuator with the PWM solenoid on/off valves using two different pneumatic circuits performed. After deriving the governing dynamic equations, to investigate the circuit effect on system performance, mentioned two pneumatic circuits are introduced. Then in order to control the position of the pneumatic actuator, for both circuits, sliding mode and proportional-integral-derivative controllers are designed. In proceeding, optimum controller parameters are determined by genetic algorithm to achieve minimum control energy and position error. Finally, by performing simulations in Matlab Simulink, performance of designed controllers with optimal parameters is evaluated and compared in the presence of disturbance. According to the obtained results, by comparing the performance of two circuits, it is observed that the first pneumatic circuit with two solenoid valves can track the high-frequency sine reference input better and more precisely in the presence of a nonlinear sliding mode controller. The position tracking error in low-frequency sine reference input using a classic proportional-integral-derivative controller, for a single-valve pneumatic circuit is considerably less than that of a pneumatic circuit of two valves. This indicates the input-output quasi linear behavior of the pneumatic actuator in a single-valve circuit.

1- مقدمه  
 یکی از مهم‌ترین قسمت‌های هر سیستم کنترل، عملگرها هستند. عملگرها در واقع تبدیل‌کننده و تقویت‌کننده نوعی از انرژی به گونه دیگری از انرژی هستند. در سیستم‌های کنترل امروزی غالباً انرژی اولیه الکتریکی است، که مطلوب است به گونه‌ای از انرژی مکانیکی به صورت حرکت خطی یا دورانی تبدیل گردد. ویژگی‌های منحصربه‌فرد عملگرهای نیوماتیکی در مقایسه با عملگرهای رقیب، باعث شده که این عملگرها از جمله

پرکاربردترین عملگرهای صنعتی باشند. ساختار نسبتاً ساده، نسبت توان به وزن بالا، سرعت بالای عملگر، قابلیت اعمال نیرو در یک موقعیت ثابت برای مدت نسبتاً طولانی، تأمین و نگهداری راحتتر و ارزانتر از ویژگی‌های منحصر به فرد این سیستم‌ها می‌باشند.  
 عملگرهای نیوماتیکی مانند موتورهای الکتریکی تمیز، و همچون عملگرهای هیدرولیکی می‌توانند بدون واسطه بر روی بار اثر کنند. علاوه بر این سیستم‌های نیوماتیکی، به دلیل تراکم‌پذیری هوا دارای مزیت نرمی ذاتی

اولین کاربرد تکنیک PWM در سیستم‌های سرونوماتیک به سال‌های 1986 توسط گلدشتاین و همکارش [8] باز می‌گردد.

در ادامه، وان وارسولد و همکاران [9] روش‌های خاصی برای تبدیل سیگنال کنترلی به نسبت وظیفه هر شیر به منظور حل مشکلات غیرخطی بودن و ناحیه مرده در سیستم نیوماتیک ارائه نمودند. آنها با استفاده از روش‌های شناسایی، یک مدل گسسته‌ی خطی برای سیستم بدست آورده و سپس یک کنترل‌کننده PID دیجیتال به همراه جبران‌کننده‌ی اصطکاک برای آن طراحی کردند. عملکرد مطلوب و قوام سیستم به وسیله چند آزمایش نشان داده شد و نتایج جالبی در پاسخ به ورودی‌های پله و شب بدست آمد. آنها همچنین برای تقسیم سیگنال کنترلی بین دو شیر موجود در مدار نیوماتیکی، الگوهای مختلفی را باهم مقایسه کرده و دو الگوی جدید ارائه دادند که موجب بهبود عملکرد سیستم می‌شد.

تقی زاده و همکاران [10] مدلی غیرخطی از شیر نیوماتیک پاسخ سریع با تحریک PWM را با لحاظ نمودن زیرسیستم‌های الکترومغناطیسی، مکانیکی و سیالاتی ارائه نمودند. مزیت دیگر سیستم‌های سرونوماتیک با تحریک PWM در مقایسه با سیستم‌های استاندارد، انعطاف آنها در طراحی مدار نیوماتیک است. مدار نیوماتیکی تأثیر بسزایی بر عملکرد کنترلی سیستم دارد. همچنین، تقی زاده و همکاران [11] به معرفی دو مدار نیوماتیک جدید با رفتار بهبود یافته پرداختند. مدار اول در واقع شکل اصلاح شده‌ی یک مدار دو شیر متداول است، که در آن هر دو شیر با سیگنال PWM یکسان تحریک می‌شوند. در این مدار، پیچیدگی‌های مدارهای قبلی در تقسیم ورودی کنترلی بین دو شیر حذف شده است. دومین مدار نیوماتیکی ارائه شده تنها از یک شیر پاسخ سریع 2-3 تشکیل شده و تأثیر قابل ملاحظه‌ای در ساده‌سازی سیستم و کاهش هزینه‌ها دارد. علاوه بر این، مهمترین ویژگی این مدار رفتار شبه خطی ورودی-خروجی می‌باشد.

از آنجایی که مدار نیوماتیکی مورد استفاده در عملگرهای نیوماتیکی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد کنترلی سیستم دارند، بررسی و مقایسه اثر به‌کارگیری مدارهای نیوماتیکی مختلف بر رفتار کنترلی عملگرهای نیوماتیکی دارای اهمیت است که این موضوع در پژوهش‌های ارائه شده تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین، در این پژوهش، اثر به‌کارگیری دو مدار مختلف در کنترل عملگر نیوماتیکی مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌گیرد. به این منظور، روش کنترلی غیرخطی مودلغزشی و همچنین کنترل‌کننده کلاسیک تناسبی-انترگالی-مشتق‌گیر به منظور کنترل موقعیت عملگر نیوماتیکی با دو مدار مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین، به منظور مقایسه رفتار کنترل‌کننده‌های مذکور، ضرایب هر دو کنترل‌کننده با معرفی تابع هدف مناسب و با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه شده و در نهایت عملکرد کنترل‌کننده‌های طراحی شده با ضرایب بهینه و همچنین مدارهای نیوماتیکی به کار گرفته شده، مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌گیرند. نتایج به‌دست آمده، توانایی ردیابی مسیر سینوسی با فرکانس بالا برای مدار نیوماتیکی اول و رفتار شبه‌خطی ورودی-خروجی برای مدار نیوماتیکی دوم را نشان می‌دهند.

در بخش دوم مقاله معادلات حاکم بر سیستم نیوماتیک شامل معادلات دینامیکی مجموعه صلب متحرک، معادلات دینامیکی حاکم بر فشار محفظه‌ها و معادلات مربوط به عبور سیال از شیر ارائه می‌شود. در بخش سوم به معرفی سیستم‌های سرونوماتیک با شیر دووضعیتی و تحریک PWM و بررسی مدارهای مختلف آن پرداخته می‌شود. در بخش چهارم روش کنترلی

می‌باشند، که این مزیت در کاربردهای رباتیکی اهمیت ویژه‌ای دارد. اما وجود عوامل غیرخطی، استفاده از نیوماتیک در کاربردهای سرو را با مشکل مواجه می‌نماید. با این وجود به دلیل مزایای سیستم‌های نیوماتیک و همچنین پیشرفت‌هایی که در تئوری و تکنولوژی کنترل این مدل صورت گرفته است، سرونوماتیک را در مسیر تبدیل به یک سروتکنولوژی مطلوب قرار داده است. مور و پو [1] در مقاله خود که در سال 1996 منتشر شد، بر توسعه فناوری سرونوماتیک و مقایسه‌ی آن با سایر فناوری‌های مشابه، پرداختند.

مهم‌ترین قسمت در طراحی یک سیستم سرونوماتیک ارائه‌ی کنترلی کننده برای آن است. تلاش‌های زیادی توسط پژوهشگران انجام شده که هدف آن‌ها رسیدن به ساختار کنترلی است که در حالت کلی بتواند سیلندر نیوماتیک را وادار به دنبال کردن ورودی دلخواه  $\dot{x}, \ddot{x}$  کند. دستیابی به این سیستم کنترلی با عملکرد مناسب گام مهمی است که استفاده از عملگرهای نیوماتیک را به عنوان عملگرهای بازوهای رباتیک آسان‌تر و گسترده‌تر خواهد نمود. از اولین روش‌های کنترلی می‌توان به استفاده از کنترل‌کننده تناسبی-انترگالی-مشتق‌گیر اشاره کرد. بابرو و همکاران [2] در کارهای خود از یک کنترل‌کننده تناسبی-انترگالی-مشتق‌گیر با بهره ثابت بهره بردند که بر اساس تابع تبدیل نامی سیستم بدست آمده و بر مبنای خطی‌سازی حول یک نقطه مشخص کاری استوار است. این تحقیقات اولیه، راه را برای فهم بهتر مسئله و پرداختن به مفهوم کنترل هموار ساخت. لی و همکارانش [3] از یک سیستم کنترلی تناسبی-انترگالی-مشتق‌گیر در حلقه داخلی، با خطی‌سازی فیدبک، به همراه کنترل موقعیت حلقه خارجی با جبران‌ساز اصطکاک، برای کنترل یک سیلندر دو طرفه نیوماتیک استفاده نمودند.

در زمینه کنترل‌کننده غیرخطی، تمایل پژوهشگران در سال‌های اخیر قابل توجه بوده است. یکی از این روش‌ها که ادعا می‌شود دارای دقت بالا و بازدهی مطلوب در حضور عدم قطعیت می‌باشد و همچنین پایداری را تضمین می‌کند روش مود لغزشی است. در سال 2008 یک کنترل‌کننده با سطح لغزشی چندگانه<sup>1</sup> توسط هانگ و همکارانش [4] ارائه شد و الگوریتم کنترلی پیشنهادی بر اساس روش پایداری لیاپانوف بر روی سیستم حلقه بسته انجام شد. از مزایای این کنترل‌کننده این است که بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت و بار اعمالی متغیر با زمان، سیستم عملکرد خوبی در ردیابی دارد. با این حال کنترل مود لغزشی باعث ایجاد پدیده چترینگ<sup>2</sup> شد. به منظور بهبود و کاهش پدیده چترینگ در سیگنال کنترلی، کنترل‌کننده مود لغزشی با مرتبه بالا و قوام متمایزکننده، در سال 2008 معرفی شد [5].

داس و همکارانش [6] از روش کنترل مودلغزشی در کنار مدل با رسته کاهش یافته به‌منظور کنترل سریع، دقیق و ارزان عملگر نیوماتیک که در آن از سنسورهای فشار استفاده نمی‌شود، استفاده کردند و برای در اختیار داشتن سیگنال‌های سرعت و شتاب از مشتق‌گیر مقاوم لوانت بهره بردند. جان و همکاران [7] به طراحی مشاهده‌گر فشار برای یک سیستم نیوماتیکی با خطوط انتقال طولانی بین منبع فشار و محفظه سیلندر پرداخته و سپس با استفاده از روش کنترل مود لغزشی، امیدانسان این سیستم را کنترل کرده‌اند. در بیشتر تحقیقاتی که به کنترل موقعیت عملگر نیوماتیک پرداخته‌اند از شیرهای سرو و تناسبی استفاده شده است که این شیرها معمولاً حجیم و گران‌قیمت بوده و بهره‌برداری و تعمیر آنها در مقایسه با شیرهای دو وضعیتی مشکل‌تر است. در حالی که شیرهای دو وضعیت با تحریک PWM، قیمت پایینتری داشته و باعث گسترش کاربرد سیستم‌های سرونوماتیک می‌شود.

<sup>1</sup> MSSC

<sup>2</sup> Chattering

است و مقدار آن هوا برابر با 1.4 می‌باشد. باتوجه به اینکه فرایند واقعی بین آدیباتیک و تک‌دما می‌باشد معمولاً ضریب  $\alpha$  را بین 1 و 1.4 انتخاب می‌کنند [12]. در الگوریتم کنترل مود لغزشی برای کنترل موقعیت، پارامتر  $\alpha$  به عنوان عدم قطعیت مدل لحاظ می‌شود.

### 3-2- معادله جریان عبور کننده از شیر

اگرچه مدل‌های مختلفی برای جریان در شیر وجود دارد، متداول‌ترین رابطه‌ای که در اکثر مقالات از آن استفاده شده رابطه‌ای براساس تئوری حاکم بر اوریفیس بصورت رابطه (3) می‌باشد:

$$\dot{m} = A_v \Psi(P_u, P_d) \quad (3)$$

$$\Psi(P_u, P_d) = \begin{cases} C_f C_1 \frac{P_u}{\sqrt{T}} : \frac{P_d}{P_u} \leq P_{cr} \\ C_f C_2 \frac{P_u}{\sqrt{T}} \left(\frac{P_d}{P_u}\right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_d}{P_u}\right)^{\frac{k-1}{k}}} : \frac{P_d}{P_u} > P_{cr} \end{cases}$$

در معادله (3)،  $C_f$  ضریب تخلیه شیر (بدون واحد)،  $A_v$  مساحت سطح مقطع روزنه شیر (برحسب متر مربع)، و  $P_u$  و  $P_d$  به ترتیب فشار در بالا دست و پایین دست روزنه شیر (برحسب پاسکال) هستند.  $P_{cr} = 0.528$  نسبت فشار بحرانی است که رژیم جریان را از مادون صوت به مافوق صوت (جریان خفه شده) تبدیل می‌کند. مقدار  $C_1$  و  $C_2$ ، به نسبت گرمای ویژه سیال، بستگی دارد.

$$C_1 = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, \quad C_2 = \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)}} \quad (4)$$

### 3- معرفی سیستم‌های سرونیوماتیک با شیر دودووضعیتی و تحریک PWM و بررسی مدارهای مختلف آن

در شیرهای دودووضعیتی، جابجایی اسپول کنترل شده نیست و شیر فقط می‌تواند کاملاً باز یا کاملاً بسته باشد. با اعمال سیگنال PWM به عنوان ورودی، شیر با فرکانس ثابت دائماً بازو بسته می‌شود. این سیگنال از مقایسه یک سیگنال پیوسته با یک سیگنال دندانه‌دار ای بدست می‌آید. هر کجا مقدار سیگنال پیوسته از سیگنال دندانه‌دار ای بزرگتر باشد سیگنال PWM در وضعیت روشن قرار می‌گیرد و اگر مقدار سیگنال پیوسته از مقدار سیگنال دندانه‌دار ای کمتر باشد، مقدار سیگنال PWM صفر است. بدین ترتیب، سیال به صورت بسته‌بندی شده در بسته‌هایی کوچک و بطور گسسته از شیر دو وضعیتی عبور کرده و به عملگر تحویل داده می‌شود. با تغییر پهنای پالس سیگنال می‌توان زمان باز بودن شیر در هر سیکل و در نتیجه دبی سیال عبوری از شیر را تغییر داد.

شکل 2 نحوه اعمال سیگنال، باز شدن و بسته شدن شیر نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود عمل باز شدن شیرها به صورت آنی اتفاق نمی‌افتد، بلکه با تأخیر همراه است. این تأخیرها باعث به‌وجود آمدن خصوصیات غیرخطی در سیستم می‌گردند.

در شکل 2،  $A_v$  سطح مقطع عبور هوا در شیر،  $T_{don}$  زمان تأخیر باز شدن کامل شیر و  $T_{doff}$  زمان تأخیر بسته شدن کامل شیر می‌باشد. رفتار غیرخطی سیستم‌های سرونیوماتیک تاکنون مهمترین مانع در برابر کاربردهای کنترلی دقیق این سیستم‌ها و توسعه تکنولوژی سرونیوماتیک بوده است. در این میان به‌نظر می‌رسد که استفاده از شیرهای دودووضعیتی با رفتار گسسته (درمقایسه با شیرهای سرو با رفتار پیوسته) می‌تواند موجب تشدید رفتار غیرخطی سیستم‌های سرونیوماتیک شود. اما از سوی دیگر، سیستم‌های

مود لغزشی و کنترل‌کننده تناسبی- انتگرالی- مشتق‌گیر برای دستیابی به کنترل موقعیت عملگر نیوماتیکی با توجه به قطع/وصل بودن شیرها برای هر دو مدار نیوماتیکی، ارائه می‌شود. در بخش پنجم با استفاده از الگوریتم ژنتیک ضرایب بهینه کنترل‌کننده‌ها تعیین می‌شود. در بخش ششم نتایج شبیه‌سازی همراه با بحث و بررسی ارائه می‌شود و بخش هفتم به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

### 2- مدل دینامیکی سیستم و استخراج معادلات حاکم

شکل 1 شماتیک یک سیستم نیوماتیکی را نمایش می‌دهد. معادلات اساسی حاکم بر این سیستم عبارتند از: دینامیک اجزای صلب متحرک، دینامیک غیرخطی حاکم بر فشار در محفظه‌های سیلندر و معادله جریان عبورکننده از شیر، که در زیربخش‌های بعدی ارائه می‌گردند. لازم به ذکر است که معمولاً از دینامیک شیر در برابر دینامیک کل سیستم صرف‌نظر می‌شود.

#### 1-2- دینامیک اجزای صلب متحرک

معادله دینامیکی حاکم بر حرکت پیستون و بار که از قانون دوم نیوتون نتیجه می‌شود، به صورت معادله (1) است.

$$M\ddot{x} + \beta\dot{x} + F_{friction} + F_{ext} = P_1 A_1 - P_2 A_2 - P_a A_r \quad (1)$$

که در آن،  $x$  موقعیت پیستون (برحسب متر)،  $M$  جرم کل اجزای متحرک (برحسب کیلوگرم)،  $P_1$ ،  $P_2$ ،  $A_1$  و  $A_2$  به ترتیب فشار مطلق (برحسب پاسکال) و سطح مقطع محفظه‌های 1 و 2 (برحسب مترمربع)،  $P_a$  فشار مطلق هوا (برحسب پاسکال)،  $\beta$  ضریب اصطکاک ویسکوز (برحسب نیوتون ثانیه بر متر)،  $F_{friction}$  نیروی اصطکاک کلمب و  $F_{ext}$  نیروی خارجی (برحسب نیوتون) می‌باشد.

#### 2-2- دینامیک حاکم بر فشار در محفظه‌های سیلندر

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک و با درنظر گرفتن هوا به عنوان گاز کامل و همچنین توزیع یکنواخت دما و فشار در داخل محفظه‌ها، معادله تغییرات فشار به صورت معادله (2) استخراج می‌شود.

$$\dot{P}_{1,2} = \alpha \frac{RT}{V_{1,2}} \dot{m}_{1,2} - \alpha \frac{P_{1,2}}{V_{1,2}} \dot{V}_{1,2} \quad (2)$$

که در آن،  $V_{1,2}$  حجم هر کدام از محفظه‌ها (برحسب متر مکعب)،  $\dot{m}_{1,2}$  دبی جرمی (برحسب کیلوگرم بر ثانیه)،  $T$  دمای هوا (برحسب کلوین) و  $R$  ثابت جهانی گازها است. که مقدار آن برابر با  $278 \text{ m}^2/\text{g}^2\text{k}$  می‌باشد. ضریب  $\alpha$  در این معادله، به نوع فرایند انجام شده در حین تغییر فشار در محفظه‌ها، و در نتیجه میزان انتقال حرارت وابسته می‌باشد. می‌توان فرض کرد، فرایند به قدری سریع اتفاق می‌افتد که فرصتی برای تبادل حرارت وجود ندارد، یعنی فرایند آدیباتیک، که در این حالت  $\alpha = k$  در نظر گرفته می‌شود، یا اینکه فرایند به قدری آهسته انجام می‌شود که فرصت کافی برای تبادل حرارت وجود دارد، طوری که دمای داخل محفظه‌ها تغییر نمی‌کند، یعنی فرایند تک‌دما، در این حالت،  $\alpha = 1$  می‌باشد.  $K$  نسبت گرمای ویژه سیال

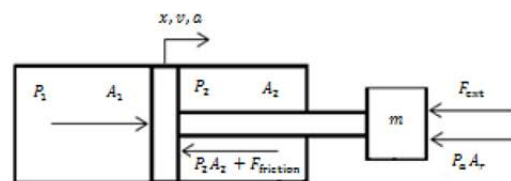


Fig. 1 Schematic of the pneumatic system [11]

شکل 1 شماتیک سیستم نیوماتیک [11]

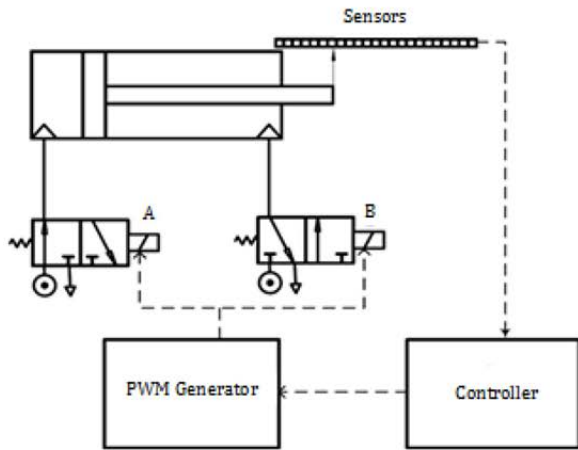


Fig. 3 The first pneumatic circuit presented in [11]  
 شکل 3 مدار نیوماتیکی اول ارائه شده در [11]

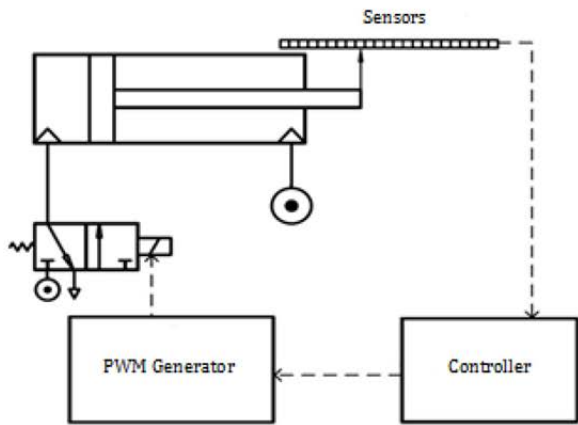


Fig. 4 The second pneumatic circuit presented in [11]  
 شکل 4 مدار نیوماتیکی دوم ارائه شده در [11]

کنترل کننده مناسبی که بتواند با دقت نسبتاً خوب به کنترل موقعیت این سیستم بپردازد، می‌تواند بسیار مفید باشد. کنترل کننده مود لغزشی یکی از روش‌های کنترلی غیرخطی می‌باشد که دارای قوام بالایی بوده و پایداری این سیستم را در مواجهه با اغتشاش می‌تواند تضمین نماید. در ذیل مراحل طراحی این کنترل کننده برای هر دو مدار نیوماتیکی ارائه شده است.

در ابتدا باید سیستم دینامیکی با ورودی کنترلی  $u$  به فرم رابطه (5) که مناسب برای طراحی این نوع کنترل کننده می‌باشد مرتب گردد:

$$x^{(n)} = f(\vec{x}) + b(\vec{x})u \quad (5)$$

در رابطه فوق،  $x$  خروجی سیستم (موقعیت پیستون) و  $\vec{x}$  بردار متغیرهای حالت به فرم رابطه (6) می‌باشد.  $f(\vec{x})$  تابعی غیرخطی از متغیرهای حالت است که مقدار آن دقیقاً معلوم نیست، اما عدم قطعیت روی آن توسط تابعی معلوم و پیوسته از  $\vec{x}$  محدود شده است.  $b(\vec{x})$  نیز که بهره کنترلی نام دارد، دقیقاً معلوم نبوده، ولی علامتش معلوم و توسط تابعی پیوسته و شناخته شده محدود شده است.

$$\vec{x} = [x \quad \dot{x} \quad \dots \quad x^{(n-1)}]^T \quad (6)$$

برای ارائه معادله سیستم سرونوماتیک به فرم رابطه (5)، با صفر در نظر گرفتن مقادیر  $F_{ext}$  و  $F_{friction}$  در معادله (1) و مشتق گرفتن از طرفین معادله نسبت به زمان، رابطه (7) بدست می‌آید:

$$M\ddot{x}_p + \beta\dot{x}_p = \dot{P}_1A_1 - \dot{P}_2A_2 \quad (7)$$

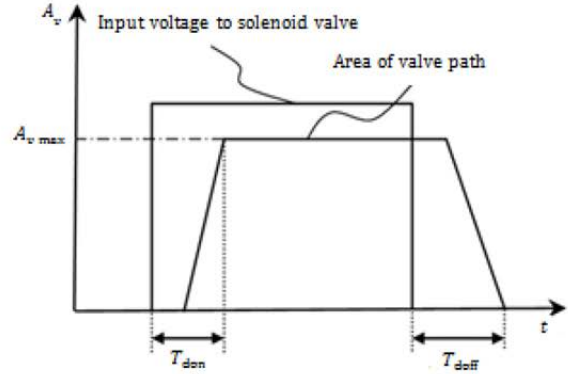


Fig. 2 The applied PWM signal to the valve [11]  
 شکل 2 سیگنال PWM اعمال شده به شیر [11]

سرونوماتیک باشیرهای دووضعیتی و تحریک PWM نسبت به سیستم‌های سرونوماتیک استاندارد دارای مزیتی هستند که تاکنون به ندرت مورد توجه قرار گرفته‌است. این مزیت عبارتست از انعطاف پذیری سیستم در استفاده از مدارهای نیوماتیک مختلف. برخلاف سیستم‌های استاندارد که برای کنترل هر سیلندر از یک شیر سروی 3-5 استفاده می‌کنند در سیستم‌های مورد مطالعه می‌توان مدارهای نیوماتیک متفاوت شامل تعداد و انواع مختلفی از شیرهای دووضعیتی پاسخ سریع طراحی کرد.

همانطور که گفته شد، مدار نیوماتیکی تأثیر بسزایی بر عملکرد کنترلی سیستم دارد. در ادامه به معرفی دقیق تر دو مدار نیوماتیک که توسط تقی زاده و همکاران [11] ارائه شده است، می‌پردازیم. آنها یک مدار نیوماتیکی جدید که در واقع شکل اصلاح شده‌ای از مدار دو شیر استفاده شده در [9] می‌باشد، را ارائه کرده و تأثیر آن را در کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد سیستم از طریق آزمایش‌های عملی نشان دادند. در شکل 3 این مدار نیوماتیکی نشان داده شده است. در مدار ارائه شده، شیر A در حالت نرمال به منبع فشار و شیر B به تخلیه وصل است. در نتیجه به‌ازای ورودی صفر، ماکزیمم اختلاف فشار در دو طرف پیستون ایجاد شده و پیستون با حداکثر سرعت، به سمت جلو حرکت می‌کند.

با افزایش ورودی (یعنی افزایش پهنای پالس سیگنال PWM)، اختلاف فشار در دو طرف پیستون کاهش یافته و به همان میزان سرعت پیشروی پیستون کم می‌شود. مهمترین مزیت این مدار اینست که هر دو شیر با یک سیگنال PWM تحریک می‌شوند و پیچیدگی‌های مدارهای قبلی در تقسیم ورودی کنترلی بین دو شیر با الگوهای مختلف، در اینجا وجود ندارد.

دومین مدار نیوماتیک ارائه شده در [13]، تنها از یک شیر پاسخ سریع 2-3 تشکیل شده است و تأثیر بسزایی در ساده‌سازی سیستم و کاهش هزینه‌ها دارد (شکل 4). در این مدار نیز مانند مدار قبل، مشکل تقسیم سیگنال کنترلی بین دو شیر وجود ندارد و تنها یک مدار الکترونیکی برای تولید سیگنال PWM نیاز است. علاوه بر این، مهم‌ترین ویژگی این مدار اینست که رفتار ورودی-خروجی سیستم، شبه-خطی می‌شود که در ادامه با طراحی کنترل کننده‌های خطی و غیر خطی و مقایسه رفتار مدارها، رفتار شبه خطی ورودی-خروجی سیستم نشان داده خواهد شد. این مدار تنها برای سیلندرهایی تک‌میله‌ای قابل استفاده می‌باشد که در آنها به علت وجود میله پیستون در یک سمت، سطح مقطع‌های دو طرف پیستون با هم متفاوتند.

#### 4- طراحی کنترل کننده‌ها

سیستم‌های نیوماتیکی دارای رفتار غیرخطی می‌باشند، بنابراین انتخاب

ثابت  $P_s$  متصل بوده، بنابراین با مشتق گرفتن از رابطه و با در نظر گرفتن ورودی کنترلی به صورت رابطه (18)، می‌توان روابط زیر را نوشت:

$$\dot{s} = \frac{1}{M} (\dot{P}_1 A_1 - \beta \ddot{x}) - \ddot{x}_d + 2\lambda \dot{e} + \lambda^2 e \quad (17)$$

$$u = A_{v1} \quad (18)$$

همچنین با جایگذاری معادله مربوط به  $\dot{P}$  در رابطه (17)، می‌توان قانون کنترلی را به صورت رابطه (19) بدست آورد.

$$A_{veq} = \frac{(P_1 A_1^2 / V_1) \dot{x} + \beta \ddot{x} + M(\ddot{x}_d - 2\lambda \dot{e} - \lambda^2 e)}{RT(\Psi(P_u, P_d) A_1 / V_1)} \quad (19)$$

حال با اضافه کردن جزء ناپیوسته به معادله (19)، قانون کنترلی نهایی به صورت معادله (20) استخراج می‌شود.

$$A_v = A_{veq} - K \text{sat}\left(\frac{s}{\varphi}\right) \quad (20)$$

برای هر دو حالت مدار تک شیر یا دو شیر، برای کنترل کننده طراحی شده باید شرط لغزش برقرار باشد. شرط لغزش بصورت معادله (21) ظاهر می‌شود.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq -\eta |s| \quad (21)$$

سطح لغزش به صورت معادله (22) بازنویسی می‌شود.

$$s = \dot{x} - \ddot{x}_d + 2\lambda \dot{e} + \lambda^2 e \quad (22)$$

با توجه به عدم قطعیت در نظر گرفته شده در معادله مربوط به  $\dot{P}$ ، این عدم قطعیت در هر دو تابع  $f$  و  $b$  ظاهر شده، که تخمین این توابع با  $\hat{f}$  و  $\hat{b}$  نشان داده می‌شوند.

$$\dot{s} = f + bu - \ddot{x}_d + 2\lambda \dot{e} + \lambda^2 e$$

$$u = b^{-1}(-f + \ddot{x}_d - 2\lambda \dot{e} - \lambda^2 e) \rightarrow$$

$$\hat{u} = \hat{b}^{-1}(-\hat{f} + \ddot{x}_d - 2\lambda \dot{e} - \lambda^2 e)$$

$$u = \hat{u} - k \text{sgn}(s) \rightarrow$$

$$u = \hat{b}^{-1}(-\hat{f} + \ddot{x}_d - 2\lambda \dot{e} - \lambda^2 e) - k \text{sgn}(s)$$

$$\rightarrow K = k \hat{b}^{-1}$$

$$u = \hat{b}^{-1}(-\hat{f} + \ddot{x}_d - 2\lambda \dot{e} - \lambda^2 e - K \text{sgn}(s)) \quad (23)$$

باجایگذاری رابطه  $u$  در رابطه  $\dot{s}$ ، رابطه (24) استخراج می‌شود.

$$\dot{s} = f + b \hat{b}^{-1}(-\hat{f} + \ddot{x}_d - 2\lambda \dot{e} - \lambda^2 e - K \text{sgn}(s)) - \ddot{x}_d$$

$$+ 2\lambda \dot{e} + \lambda^2 e \rightarrow$$

$$\rightarrow \dot{s} = (f - b \hat{b}^{-1}) + (1 - b \hat{b}^{-1}) \ddot{x}_d - 2\lambda \dot{e} - \lambda^2 e$$

$$- b \hat{b}^{-1} K \text{sgn}(s) \quad (24)$$

حال به بررسی شرط لغزش پرداخته می‌شود.

$$s \dot{s} \leq -\eta |s| \rightarrow [(f - b \hat{b}^{-1}) + (1 - b \hat{b}^{-1})(\ddot{x}_d - 2\lambda \dot{e} - \lambda^2 e) - b \hat{b}^{-1} K \text{sgn}(s)] (\dot{x} - \ddot{x}_d + 2\lambda \dot{e} + \lambda^2 e) \leq -\eta |s| \quad (25)$$

$$\rightarrow K \geq \frac{-\eta |s| - [(f - b \hat{b}^{-1}) + (1 - b \hat{b}^{-1})(\ddot{x}_d - 2\lambda \dot{e} - \lambda^2 e) - b \hat{b}^{-1} K \text{sgn}(s)] (\dot{x} - \ddot{x}_d + 2\lambda \dot{e} + \lambda^2 e)}{-\eta b \hat{b}^{-1} \text{sgn}(s) |s|} \quad (26)$$

محدوده مجاز برای پارامتر  $K$ ، طبق رابطه (26) تعیین می‌شود. در ادامه مشاهده می‌شود که پارامتر  $K$  نیز یکی از پارامترهایی است که در بدست آوردن آن از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود و از رابطه (26) بعنوان قید برای تعیین محدوده  $K$  در این الگوریتم استفاده می‌شود.

به منظور مقایسه و بررسی عملکرد کنترل کننده مود لغزشی، یک کنترل کننده کلاسیک تناسبی-انترگالی-مشتق‌گیر با فرمول استاندارد (27) طراحی شده، که در ادامه به منظور مقایسه دقیق بین دو کنترل کننده، ضرایب پهنه آن‌ها، با الگوریتم ژنتیک تعیین می‌گردد.

$$A_v = K_p(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \dot{e}) \quad (27)$$

در این سیستم، خروجی مطلوب موقعیت پیستون و ورودی کنترلی طبق رابطه (8)، مساحت شیر می‌باشد.

$$u = A_v \quad (8)$$

بمنظور بدست آوردن قانون کنترلی، یک سطح لغزش متغیر با زمان  $s = 0$  به صورت رابطه (9) تعریف می‌شود.

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e \quad (9)$$

هدف از این تعریف، ننگ‌داشتن شیب سطح لغزش در نزدیکی صفر است. که در آن  $\lambda$  یک ثابت مثبت،  $n$  شماره تعداد دفعاتی است که از معادله (7) انتگرال می‌گیریم تا خروجی  $x$  حاصل شود و  $e$  خطای موقعیت می‌باشد. سطح لغزش به صورت رابطه (10) در نظر گرفته می‌شود.

$$s = \frac{1}{M} (P_1 A_1 - P_2 A_2 - P_a A_r - \beta \dot{x}) - \ddot{x}_d + 2\lambda \dot{e} + \lambda^2 e \quad (10)$$

ابتدا مدار نیوماتیکی با دو شیر 2-3 با ورودی یکسان را انتخاب کرده و کنترل کننده برای آن طراحی می‌شود. شیر اول به محفظه 1 و شیر دوم به محفظه 2 متصل می‌باشد. با مشتق‌گیری از سطح لغزش و برابر صفر قرار دادن آن و همچنین جایگذاری معادله مربوط به  $\dot{P}$  در آن می‌توان قانون کنترلی را به صورت معادله (11) بدست آورد.

$$A_{veq} = \frac{(P_1 A_1^2 / V_1 + P_2 A_2^2 / V_2) \dot{x} + \beta \ddot{x} + M(\ddot{x}_d - 2\lambda \dot{e} - \lambda^2 e)}{RT(\Psi(P_{u1}, P_{d1}) A_1 / V_1 + \Psi(P_{u2}, P_{d2}) A_2 / V_2)} \quad (11)$$

ورودی کنترلی برای هر کدام از شیرها مطابق با رابطه (12) می‌باشد.

$$u = A_v = A_{v1} = A_{v2} \quad (12)$$

حال برای اینکه کنترل کننده بتواند در برابر اغتشاشات دارای قوام کافی باشد، یک جزء ناپیوسته مطابق رابطه (13) به آن اضافه می‌شود که بیانگر قانون کنترلی سوئیچینگ است.

$$A_v = A_{veq} - K \text{sgn}(s) \quad (13)$$

که تابع سوئیچینگ به صورت رابطه (14) می‌باشد.

$$\text{sgn}(s) = \begin{cases} 1 & , s > 0 \\ 0 & , s = 0 \\ -1 & , s < 0 \end{cases} \quad (14)$$

در کاربردهای عملی به جای تابع علامت  $\text{sgn}$  از تابع  $\text{sat}$  به علت عملکرد بهتر استفاده می‌شود در شبیه‌سازی انجام شده در این پژوهش نیز از این تابع استفاده شده است.

$$A_v = A_{veq} - K \text{sat}\left(\frac{s}{\varphi}\right) \quad (15)$$

که در آن  $K$  یک ثابت مثبت است که با توجه به دامنه اغتشاش و عدم قطعیت‌های سیستم تعیین می‌شود، و  $\varphi$  ضخامت لایه مرزی انتخاب شده در اطراف سطح لغزش می‌باشد. مقدار ضخامت لایه مرزی بر دقت کنترلی و میزان نوسانات فرکانس بالا مؤثر است.

تابع  $\text{sat}$  به صورت رابطه (16) می‌باشد.

$$\text{sat}\left(\frac{s}{\varphi}\right) = \begin{cases} \text{sgn}\left(\frac{s}{\varphi}\right) & \left|\frac{s}{\varphi}\right| \geq 0 \\ \frac{s}{\varphi} & \left|\frac{s}{\varphi}\right| < 0 \end{cases} \quad (16)$$

بنابراین ورودی کنترلی که همان مساحت شیرهای تناسبی می‌باشد به الگوریتم PWM وارد شده و سپس سیگنال PWM تولید شده به عنوان ورودی کنترلی به هر کدام از شیرها وارد می‌شود.

برای طراحی کنترل کننده مودلغزشی برای حالتی که از مدار نیوماتیکی با یک شیر سه راهه استفاده شده است، محفظه دوم به منبع فشار با فشار

جدول 4 پارامترهای بهینه کنترل کننده تناسبی-انتگرالی- مشتق گیر برای مدار نیوماتیکی با یک شیر

Table 4 Optimal parameters for PID control for pneumatic circuit with one valve

$K_p$	$T_i$	$T_d$
60	40	10

6- نتایج شبیه سازی

به منظور صحت‌گذاری مدل‌سازی انجام شده برای عملگر نیوماتیکی و تایید رفتار شبه خطی آن در مدار تک شیر، مقایسه‌ای بین رفتار ورودی- خروجی به دست آمده از شبیه‌سازی انجام شده در این پژوهش و نتایج متناظر آزمایشگاهی ارائه شده در مرجع [13] انجام می‌گیرد. در مرجع [13]، سرعت پیستون به ازای پهنای پالس‌های مختلف بین صفر تا صددرصد اندازه‌گیری شده و منحنی مربوطه در شکل 5 نشان داده شده است که رفتاری شبه خطی را نمایش می‌دهد. همچنین، شکل 6 منحنی رفتار سیستم با استفاده از شبیه سازی انجام شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. این منحنی با حل عددی معادلات دینامیکی سیستم بدست می‌آید. به این ترتیب که به ازای یک پهنای پالس ورودی معین، معادلات سیستم حل شده و منحنی زمانی سرعت پیستون بدست می‌آید. سرعت نهایی پیستون (پاسخ ماندگار منحنی زمانی) یک نقطه از منحنی 6 را تشکیل داده و با تکرار شبیه‌سازی به‌ازای پهنای پالس‌های مختلف، شکل 6 تکمیل می‌شود. لازم به ذکر است که با مقایسه شکل‌های 5 و 6 مشاهده می‌شود که نتایج شبیه‌سازی انجام شده در این پژوهش با نتایج آزمایشگاهی [13] انطباق خوبی دارند. البته با توجه به دو شکل مذکور، ملاحظه می‌شود که مقادیر سرعت به‌ازای ورودی‌های (ولتاژ یا پهنای پالس) یکسان، کمی با هم متفاوتند. این مسئله می‌تواند ناشی از اختلاف بین مقادیر واقعی پارامترهای سیستم با مقادیر به‌کار گرفته شده در شبیه‌سازی و همچنین، استفاده از فرضیات ساده‌کننده در مدل‌سازی (مانند

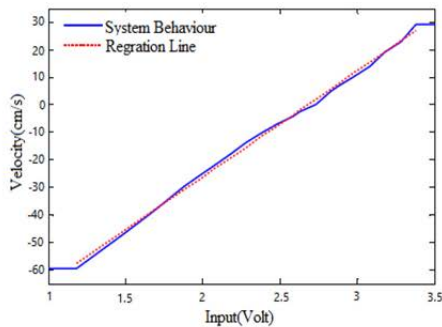


Fig. 5 Experimental results for the input / output behavior of the one-valve circuit [13]

شکل 5 نتایج آزمایشگاهی برای رفتار ورودی- خروجی مدار تک شیر [13]

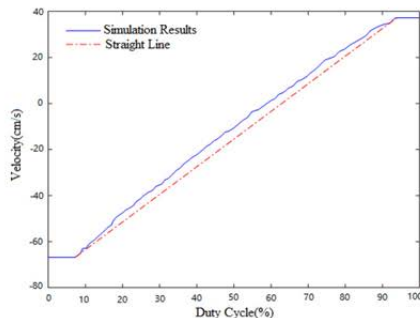


Fig. 6 Simulation results for the input / output behavior of the one-valve circuit

شکل 6 نتایج شبیه‌سازی برای رفتار ورودی- خروجی مدار تک شیر

که در آن  $e$  خطای ردیابی موقعیت است.  $K_p$  ضریب تناسبی،  $T_i$  ضریب انتگرالی و  $T_d$  ضریب مشتق‌گیر کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر می‌باشند. لازم به ذکر است که با جایگذاری قانون کنترلی تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر (رابطه 27) در معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم، دینامیک حلقه بسته به دست می‌آید که با توجه به آن، با انتخاب مقادیر مثبت برای ضرایب کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر دینامیک حلقه بسته همواره پایدار خواهد بود. البته صرفاً پایداری دینامیک حلقه بسته کافی نیست، به همین دلیل برای دستیابی به عملکرد مطلوب، ضرایب بهینه کنترل کننده با تعریف تابع هدف مناسب در بخش بعدی تعیین می‌گردند.

5- تعیین ضرایب بهینه کنترل کننده‌ها

پس از طراحی کنترل کننده‌ها، تعیین پارامترهایی که در ضمن کاهش خطای ردیابی، انرژی کنترلی را نیز کاهش دهند، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله پارامترهای بهینه برای کنترل کننده‌های طراحی شده برای نیل به اهداف مذکور تعیین می‌گردند تا به این ترتیب بتوان مقایسه بهتری میان عملکرد کنترل کننده‌ها نیز انجام داد. به این منظور تابع هدف به صورت معادله (22) انتخاب می‌گردد.

$$OF = w_1 \int |e| dt + w_2 \max|u| \quad (28)$$

که در آن  $OF$  تابع هدف،  $e$  خطای موقعیت،  $u$  ورودی کنترلی و  $w_1$  و  $w_2$  به ترتیب ضرایب وزنی اختصاص داده شده به انتگرال خطا و قدرمطلق ورودی کنترلی می‌باشند که هر کدام برابر با مقدار 0.5 در نظر گرفته شده است. هدف کمینه شدن مقدار تابع انتخاب شده می‌باشد که در نتیجه آن مقدار خطا و همچنین مقدار ورودی کنترلی به سیستم، کمینه شده و بدین ترتیب ضرایب بهینه کنترل کننده بدست می‌آید.

در این مقاله به منظور انجام بهینه‌سازی، از الگوریتم ژنتیک [13] و جعبه ابزار مربوطه در نرم‌افزار متلب استفاده می‌شود. پارامترهای بهینه بدست آمده در فرایند بهینه‌سازی برای مدار نیوماتیکی اول در جدول 1 و 2 و برای مدار نیوماتیکی دوم در جدول 3 و 4 برای هر دو کنترل کننده آورده شده است. این پارامترهای بهینه، کارایی بهتر و دقیق‌تری از فرایند کنترل موقعیت عملگر نیوماتیکی را ارائه داده، همچنین با بهینه‌سازی پارامترهای هر دو کنترل کننده مقایسه صحیح و کاملی از عملکرد آنها ارائه می‌شود.

جدول 1 پارامترهای بهینه کنترل کننده مود لغزشی برای مدار نیوماتیکی با دو شیر

Table 1 Optimal parameters for sliding mode control for pneumatic circuit with two valves

$K$	$\lambda$	$\varphi$
100	80	15

جدول 2 پارامترهای بهینه کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر برای مدار نیوماتیکی با دو شیر

Table 2 Optimal parameters for PID control for pneumatic circuit with two valves

$K_p$	$T_i$	$T_d$
100	50	10

جدول 3 پارامترهای بهینه کنترل کننده مود لغزشی برای مدار نیوماتیکی با یک شیر

Table 3 Optimal parameters for sliding mode control for pneumatic circuit with one valve

$K$	$\lambda$	$\varphi$
80	100	20

تناسبی- انتگرالی- مشتق گیر، دارای یک خطای حالت ماندگار می‌باشد که دارای ماهیت نوسانی است (شکل 11). این خطا به صورت ماندگار وجود دارد و از طرفی زمان نشست پاسخ در حدود 0.6 ثانیه است که در مقایسه با

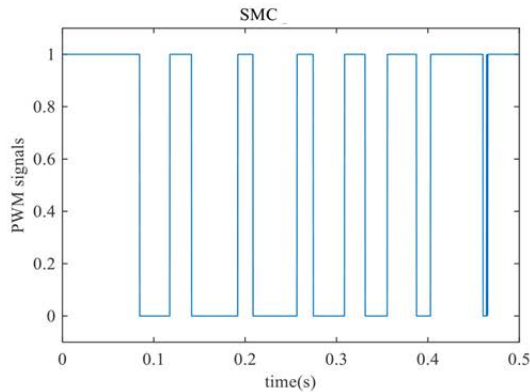


Fig. 7 PWM signal in the presence of sliding mode control for single-valve circuit

شکل 7 سیگنال PWM در حضور کنترل کننده مودلغزشی برای مدار تک شیر

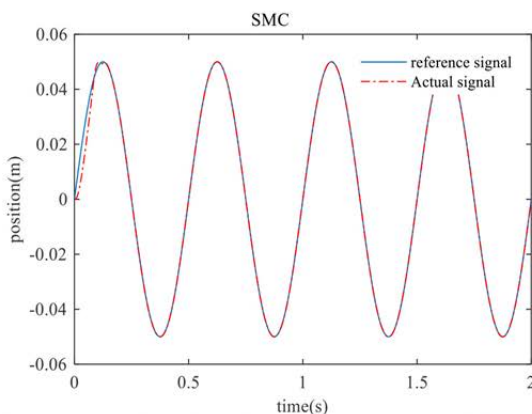


Fig. 8 Tracking of the sinusoidal path with amplitude of 0.05 m and frequency of 2 Hz in the presence of sliding mode controller for the two-valve circuit

شکل 8 ردیابی مسیر سینوسی با دامنه 0.05 متر و فرکانس 2 هرتز در حضور کنترل کننده مودلغزشی برای مدار دو شیر

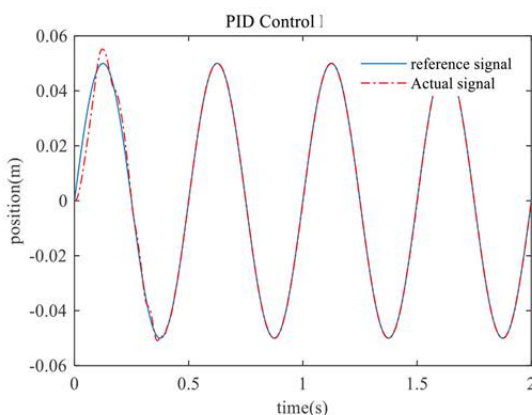


Fig. 9 Tracking of the sinusoidal path with amplitude of 0.05 m and frequency of 2 Hz in the presence of PID controller for the two-valve circuit

شکل 9 ردیابی مسیر سینوسی با دامنه 0.05 متر و فرکانس 2 هرتز در حضور کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتق گیر برای مدار دو شیر

عدم لحاظ نمودن اصطکاک خشک، صرف نظر نمودن از مدل دینامیکی شیر و ... ) باشد.

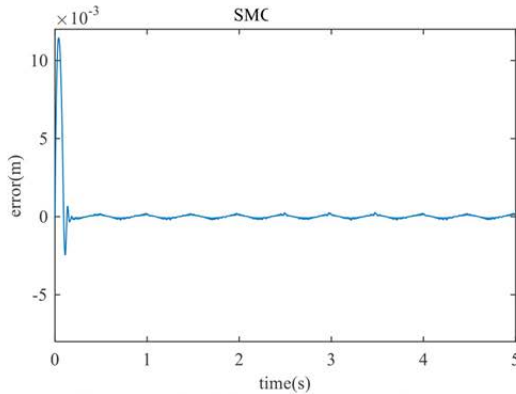
در این مقاله دو روش کنترلی تناسبی- انتگرالی- مشتق گیر و مودلغزشی برای کنترل موقعیت یک عملگر نیوماتیکی در تعقیب مسیر مورد نظر با دو مدار نیوماتیکی متفاوت، با استفاده از پارامترهای موجود در مرجع [13] شبیه سازی شده است. در ادامه نتایج شبیه سازی با استفاده از پارامترهای پهنه به دست آمده برای کنترل کننده‌ها در بخش قبل، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

شکل 7 نمونه‌ای از سیگنال PWM اعمال شده به شیر در حضور کنترل کننده مودلغزشی را نشان می‌دهد. با مقایسه سیگنال‌های اعمال شده به شیرها در دو مدار و در حضور هر دو کنترل کننده مشاهده می‌شود که در مدار نیوماتیکی با دو شیر در حضور کنترل کننده مودلغزشی 67 درصد و در حضور کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتق گیر، 56 درصد از زمان کل شیر باز بوده است. و همچنین تعداد دفعات روشن/خاموش شدن شیر در حضور کنترل کننده مودلغزشی 1.6 برابر تعداد دفعات روشن/خاموش شدن شیر در حالتی است که از کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتق گیر استفاده شده است. که این خود بیشتر بودن تلاش کنترلی و استهلاک سیستم را در حضور کنترل کننده مودلغزشی نسبت به کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتق گیر را نیز نشان می‌دهد. این بررسی را برای سیگنال PWM مربوط به مدار نیوماتیکی با یک شیر، انجام داده و مشاهده می‌شود که در این حالت در حضور کنترل کننده مودلغزشی، 71 درصد و در حضور کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتق گیر، 62 درصد از زمان کل، شیر کاملاً باز بوده است، و همچنین تعداد دفعات روشن/خاموش شدن شیر در حضور کنترل کننده مودلغزشی، 1.4 برابر کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتق گیر می‌باشد.

مجدداً برای این مدار هم تلاش کنترلی بیشتر و همچنین فعالیت بیشتر مدار را در حضور کنترل کننده مودلغزشی، می‌توان مشاهده کرد. در مقایسه سیگنال‌های PWM برای دومدار مختلف، مشاهده می‌شود که بطور کلی درصد باز بودن شیر، در مدار تک شیر بیشتر از مدار دو شیر بوده، که این نشان‌دهنده بیشتر بودن تلاش کنترلی سیستم با مدار تک شیر می‌باشد. این در حالی است که تعداد دفعات باز و بسته شدن شیر، برای مدار دو شیر 1.3 برابر نسبت به مدار تک شیر می‌باشد. که این نشان‌دهنده فعالیت، سروصدا (درحالت عملی) و استهلاک بیشتر سیستم با مدار دو شیر می‌باشد.

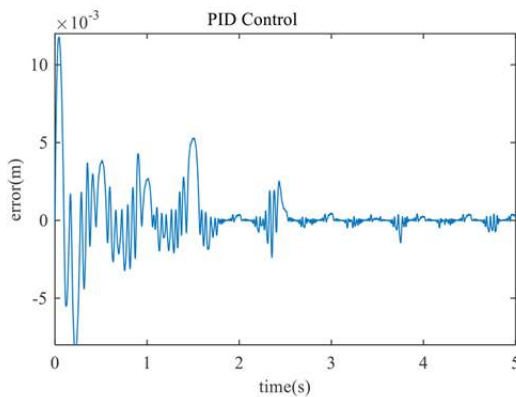
برای مدار تک شیر زمانی که سیستم تحریک می‌شود، محفظه اول به منبع فشار متصل شده و همچنان محفظه دوم به منبع فشار متصل است. بنابراین در هر حالت یک نیروی مقاوم از محفظه دوم به طرف محفظه اول وارد می‌شود، که برای غلبه بر این نیروی مقاوم نیاز به مصرف انرژی بیشتری می‌باشد. این در حالی است که در مدار دو شیر، هر کدام از محفظه‌ها که به منبع فشار وصل شوند محفظه دیگر به تخلیه وصل شده، پس نیروی مقاوم در برابر حرکت پیستون وجود ندارد بنابراین نسبت به مدار تک شیر، برای کنترل سیستم تلاش کنترلی کمتری، کمتر است.

شکل‌های 8 و 9 ردیابی مسیر سینوسی با دامنه 0.05 متر و فرکانس 2 هرتز، به ترتیب در حضور کنترل کننده مودلغزشی و کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتق گیر، برای مدار دو شیر، را نشان می‌دهند. با توجه به نمودار خطای این دو کنترل کننده در شکل 10 مشاهده می‌شود که کنترل کننده مودلغزشی با وجود عدم قطعیت پارامتری در مدل، قادر به کنترل دقیق موقعیت بوده و خطای آن پس از یک حالت گذرای کوتاه با زمان نشست 0.2 ثانیه به محدوده صفر می‌رسد. درحالی که سیستم در حضور کنترل کننده



**Fig. 12** Position error with sliding mode controller in the presence of disturbance with amplitude of 0.01 m and frequency of 0.5 Hz for the two-valve circuit

شکل 12 خطای موقعیت با کنترل کننده مودلغزشی در حضور اغتشاش با دامنه 0.01 متر و فرکانس 0.5 هرتز برای مدار دو شیر

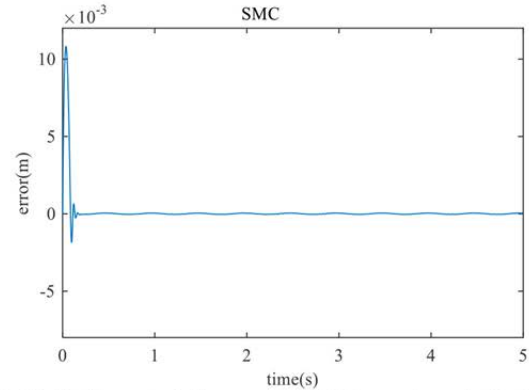


**Fig. 13** Position error with PID controller in the presence of disturbance with amplitude of 0.01 m and frequency of 0.5 Hz for the two-valve circuit

شکل 13 خطای موقعیت با کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر در حضور اغتشاش با دامنه 0.01 متر و فرکانس 0.5 هرتز برای مدار دو شیر

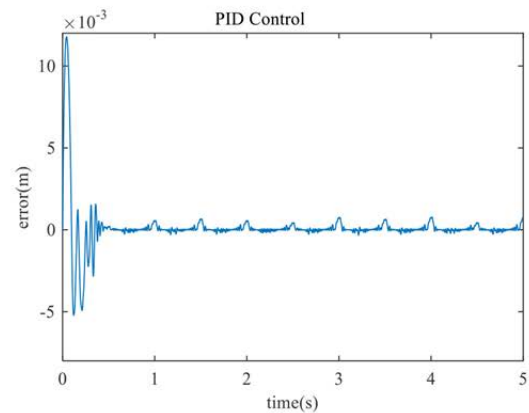
کنترل کننده مودلغزشی و کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر را نشان می‌دهند. با توجه به نمودار خطای این دو کنترل کننده، مشاهده می‌شود که نقطه اوج نمودار برای هر دو کنترل کننده یکسان بوده است. در حالی که از کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر استفاده شده است، زمان نشست سیستم 5 ثانیه بوده و خطای حالت ماندگار با ماهیت نوسانی، به اندازه 2 میلی‌متر وجود دارد. این درحالی‌است که در حضور کنترل کننده مودلغزشی خطا با زمان نشست 0.4 ثانیه به محدوده صفر می‌رسد. بنابراین، برای عملگر نیوماتیکی در مدار تک شیر هم، مانند مدار دو شیر، مجدداً عملکرد بهتر کنترل کننده مودلغزشی در مقایسه با کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر مشاهده می‌شود.

شکل‌های 16 و 17، خطای ردیابی موقعیت توسط عملگر نیوماتیکی در مدار تک شیر، به ترتیب در حضور کنترل کننده مودلغزشی و کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر، در حضور اغتشاشی با دامنه 0.01 و فرکانس 0.5 هرتز بر ورودی کنترلی را نیز نشان می‌دهد. برای عملگر نیوماتیکی در این مدار هم، مانند مدار دو شیر، افزایش خطای ردیابی برای هر دو کنترل کننده نیز مشاهده می‌شود. نمودار خطای ردیابی با کنترل کننده مودلغزشی، دارای زمان نشست 0.3 ثانیه و خطای حالت ماندگار به اندازه 0.2



**Fig. 10** Position error in the presence of sliding mode controller for the two-valve circuit

شکل 10 خطای موقعیت در حضور کنترل کننده مودلغزشی برای مدار دو شیر



**Fig. 11** Position error in the presence of PID controller for the two-valve circuit

شکل 11 خطای موقعیت در حضور کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر برای مدار دو شیر

خطای کنترل کننده مودلغزشی بزرگتر می‌باشد. نقطه اوج نمودار خطا برای کنترل کننده مودلغزشی تا 10.9 میلی‌متر و برای کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر تا 11.1 میلی‌متر می‌باشد.

به منظور بررسی قوام کنترل کننده مودلغزشی به اغتشاش، یک نیروی اغتشاش سینوسی با دامنه 0.01 و فرکانس 0.5 هرتز بر ورودی کنترلی اعمال شده است. نتایج در شکل 12 برای کنترل کننده مودلغزشی و در شکل 13 برای کنترل کننده PID نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود کنترل کننده مودلغزشی، در حضور اغتشاش قوام بیشتری از خود نشان داده و خطای موقعیت، در ردیابی مسیر مطلوب، کمتر است. برای هر دو کنترل کننده نقطه اوج نمودار در مقایسه با عدم اغتشاش، تغییری نداشته است. زمان نشست پاسخ در حضور کنترل کننده مودلغزشی 0.2 ثانیه و در حضور کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر، 1.7 ثانیه می‌باشد. در حضور هر دو کنترل کننده خطای حالت ماندگار با ماهیت نوسانی وجود دارد. اندازه خطای ردیابی در حضور کنترل کننده مودلغزشی 0.15 میلی‌متر و در حضور کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر، 1 میلی‌متر می‌باشد. این در حالی است که میزان نوسان خطا در حضور کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر، به مراتب بیشتر است.

شکل 14 و 15 به ترتیب خطای ردیابی ورودی مرجع سینوسی با دامنه 0.05 متر و فرکانس 2 هرتز، در مدار تک شیر، به ترتیب در حضور



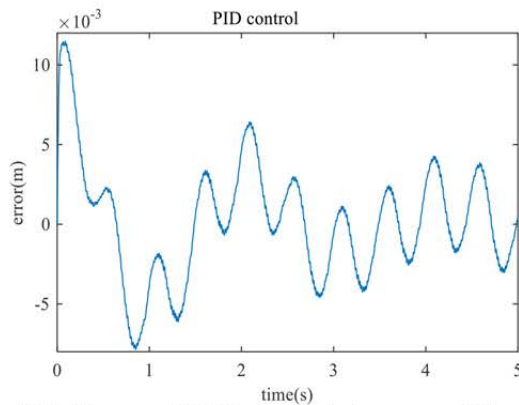


Fig. 17 Position error with PID controller in the presence of disturbance with amplitude of 0.01 m and frequency of 0.5 Hz for the one-valve circuit

شکل 17 خطای موقعیت با کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتق‌گیر در حضور اغتشاش با دامنه 0.01 متر و فرکانس 0.5 هرتز برای مدار تک شیر

است. در مقایسه نمودارهای مربوط به مدار دو شیر و مدار تک شیر، مشاهده می‌شود که ردیابی مسیر سینوسی با دامنه 0.05 متر و فرکانس 2 هرتز، توسط کنترل کننده مودلغزشی و کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتق‌گیر برای مدار دو شیر، نسبت به مدار تک شیر، دقیق‌تر انجام شده است. نمودار خطای کنترل کننده‌ها برای هر دو مدار نشان‌دهنده این است که خطای ردیابی و زمان نشست در حضور هر دو کنترل کننده برای مدار دو شیر کمتر از مدار تک شیر بوده است. همانطور که اشاره کردیم، این عملکرد بهتر، با فعالیت بیشتر سیستم، استهلاک و قیمت تمام‌شده اولیه بیشتر برای این مدار نیوماتیکی نیز همراه است. این در حالی است که مدار تک شیر خطای ردیابی و مصرف انرژی بیشتری داشته و قیمت اولیه سیستم نیز کمتر می‌باشد.

به منظور انجام مقایسه بهتر، بین کنترل موقعیت عملگر نیوماتیکی در دو مدار در فرکانس‌های مختلف کاری، یک ورودی سینوسی با دامنه ثابت 0.05 متر و فرکانس متغیر با زمان (مطابق رابطه (23)) به عنوان ورودی مرجع به کنترل کننده وارد کرده و نتایج آن، در شکل‌های 18 تا 22 مشاهده می‌شوند.

$$f = 0.3t + 0.5 \quad (29)$$

شکل 18 ردیابی مسیر سینوسی با فرکانس متغیر را در حضور کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتق‌گیر برای مدار دو شیر نشان می‌دهد. با توجه به خطای ردیابی موقعیت، در حضور هر دو کنترل کننده برای این مدار (شکل‌های 19 و 20)، مشاهده می‌شود که عملکرد نیوماتیکی در مدار دو شیر در حضور کنترل کننده مودلغزشی تا زمان 2 ثانیه، معادل با فرکانس 1.1 هرتز تقریباً برابر با صفر بوده است. از زمان 2 تا 4 ثانیه خطا با شیب کم، افزایش یافته است. بطوری که در فرکانس 1.7 هرتز خطای ردیابی برابر با 1 میلی‌متر بوده که این خطا تا زمان 6 ثانیه، معادل با فرکانس 2.3 هرتز، به 1.5 میلی‌متر می‌رسد. شکل 21 نمودار خطا در حضور کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتق‌گیر را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود سیستم از همان ابتدای مسیر دارای خطای ردیابی می‌باشد. این خطا تا زمان 1 ثانیه معادل با فرکانس 0.8 هرتز، برابر با 3 میلی‌متر بوده، که با افزایش فرکانس با شیب بیشتری نسبت به کنترل کننده مودلغزشی افزایش می‌یابد. به طوری که در زمان 4 ثانیه معادل با فرکانس 1.7 هرتز، اندازه خطا برابر با 5 میلی‌متر شده، که این خطا در زمان 6 ثانیه معادل با فرکانس 2.3 هرتز، برابر با 8 میلی‌متر می‌باشد.

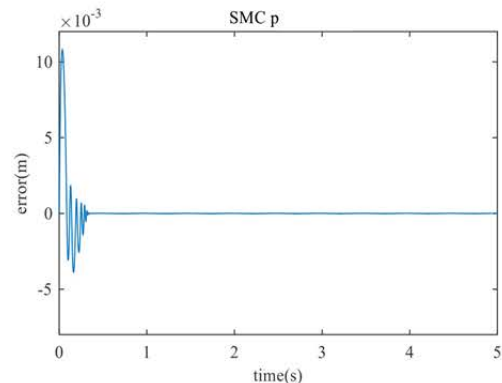


Fig. 14 Position error in the presence of sliding mode controller for the one-valve circuit

شکل 14 خطای موقعیت در حضور کنترل کننده مودلغزشی برای مدار تک شیر

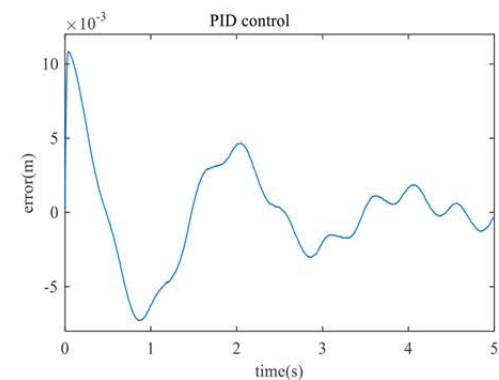


Fig. 15 Position error in the presence of PID controller for the one-valve circuit

شکل 15 خطای موقعیت در حضور کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتق‌گیر برای مدار تک شیر

میلی متر با ماهیت نوسانی می‌باشد. این در حالی است که نمودار خطای ردیابی با کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتق‌گیر، زمان نشست بیش از 5 ثانیه داشته و اندازه خطا 4 میلی متر می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، کنترل کننده مودلغزشی در مقایسه با کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتق‌گیر، در حضور اغتشاش، عملکرد بهتری داشته و دارای قوام بالاتری

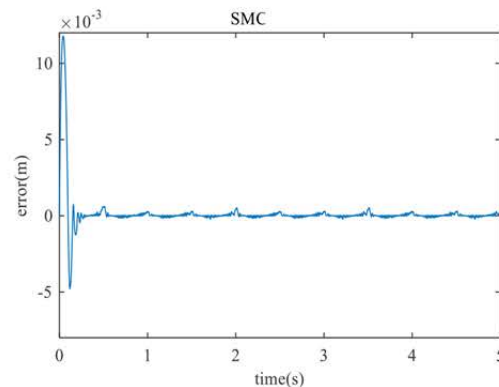


Fig. 16 Position error with sliding mode controller in the presence of disturbance with amplitude of 0.01 m and frequency of 0.5 Hz for the one-valve circuit

شکل 16 خطای موقعیت با کنترل کننده مودلغزشی در حضور اغتشاش با دامنه 0.01 متر و فرکانس 0.5 هرتز برای مدار تک شیر

می‌شود که در حضور کنترل کننده مدل‌لغزشی، خطای ردیابی تا زمان 1.5 ثانیه معادل با فرکانس 0.95 هرتز تقریباً برابر با صفر بوده است. اندازه خطا با افزایش فرکانس به مراتب افزایش یافته، به گونه‌ای که در زمان 4 ثانیه معادل با فرکانس 1.7 هرتز، اندازه خطا به 2 میلی‌متر رسیده است. با افزایش فرکانس (در فرکانس 2.3 هرتز) اندازه خطا برابر با 4 میلی‌متر می‌باشد. شکل 22 خطای ردیابی را در حضور کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که از ابتدای مسیر تا زمان 2 ثانیه، خطای ردیابی به اندازه 1 میلی‌متر وجود داشته، با افزایش زمان، در 4 ثانیه، معادل با فرکانس 1.7 هرتز، اندازه خطا به 3 میلی‌متر رسیده است. بعد از آن با افزایش فرکانس اندازه خطای ردیابی با شیب بیشتری افزایش یافته به طوری که در زمان 6 ثانیه معادل با فرکانس 2.3 هرتز، خطای ردیابی برابر با 17 میلی‌متر می‌باشد. در جداول 5 و 6، نتایج عددی شبیه‌سازی جهت مقایسه بهتر عملکرد دو مدار در فرکانس‌های مختلف کاری، به ترتیب برای مدار نیوماتیکی دو شیر و مدار نیوماتیکی تک‌شیر، آورده شده است.

با مقایسه نمودار خطای دو کنترل کننده برای هر دو مدار، عملکرد بهتر کنترل کننده مود لغزشی نسبت به کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر، هم در فرکانس‌های بالا و هم در فرکانس‌های پایین قابل مشاهده است. در مقایسه عملکرد دو مدار مشاهده می‌شود که در فرکانس‌های بالا، عملکرد سیستم با مدار دو شیر، در حضور هر دو کنترل کننده بهتر از مدار تک‌شیر می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که عملکرد نیوماتیکی در مدار دو شیر، در فرکانس‌های بالا رفتار مطلوبتری را از خود نشان می‌دهد. در فرکانس‌های پایین برای هر دو مدار، کنترل کننده مود لغزشی عملکرد یکسانی داشته، این در حالیست که در حضور کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر، مدار تک شیر، نسبت به مدار دو شیر، رفتار مطلوبتری را از خود نشان داده و خطای ردیابی نیز کمتر می‌باشد. که این نشان‌دهنده رفتار شبه خطی ورودی-خروجی، برای مدار نیوماتیکی تک شیر می‌باشد.

7- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا معادلات عملکرد نیوماتیکی، استخراج شده است. سپس به منظور بررسی تأثیر مدار نیوماتیکی بر عملکرد سیستم، دو مدار نیوماتیکی مختلف معرفی شده است. به منظور کنترل موقعیت عملکرد، در هر دو مدار، از دو کنترل کننده مود لغزشی و تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر استفاده شده، که به منظور مقایسه صحیح عملکرد این دو کنترل کننده در هر دو سیستم، و همچنین برای بهبود مشخصه‌های زمانی سیستم حلقه بسته، ضرایب هر دو کنترل کننده با انتخاب تابع هدف مناسب و استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه شده است. با مقایسه سیگنال PWM ورودی به دو مدار، در حضور هر دو

جدول 5 نتایج عددی برای مدار دو شیر

کنترل کننده	فرکانس (هرتز)	خطای ردیابی (میلی‌متر)
مودلغزشی	1.1-2.3	0-1.5
تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر	0.8-2.3	3-8

جدول 6 نتایج عددی برای مدار تک‌شیر

کنترل کننده	فرکانس (هرتز)	خطای ردیابی (میلی‌متر)
مودلغزشی	0.95-2.3	0-4
تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر	1.1-2.3	1-17

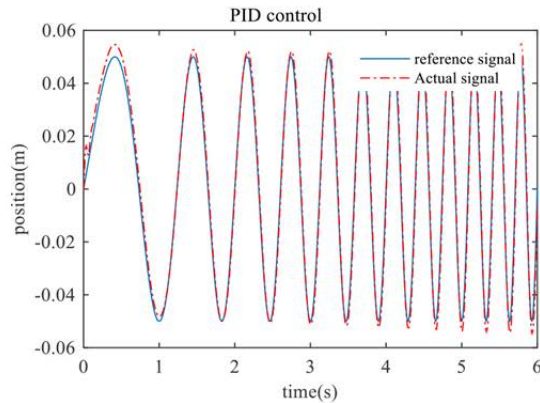


Fig. 18 Tracking of the sinusoidal path with amplitude of 0.05 m and linear time varying frequency in the presence of PID controller for the two-valve circuit

شکل 18 ردیابی مسیر سینوسی با دامنه 0.05 متر و فرکانس خطی متغیر با زمان در حضور کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر برای مدار دو شیر

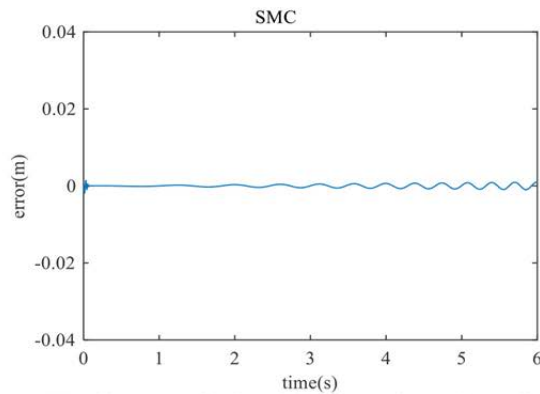


Fig. 19 Position error with sinusoidal reference input with amplitude of 0.05 m and linear time varying frequency in the presence of sliding mode controller for the two-valve circuit

شکل 19 خطای موقعیت با ورودی مرجع سینوسی با دامنه 0.05 متر و فرکانس خطی متغیر با زمان برای مدار دو شیر در حضور کنترل کننده مود لغزشی

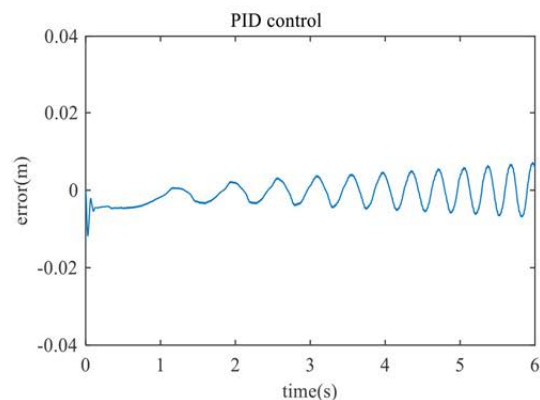


Fig. 20 Position error with sinusoidal reference input with amplitude of 0.05 m and linear time varying frequency in the presence of PID controller for the two-valve circuit

شکل 20 خطای موقعیت با ورودی مرجع سینوسی با دامنه 0.05 متر و فرکانس خطی متغیر با زمان در حضور کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر برای مدار دو شیر

با مشاهده نمودار خطای ردیابی مسیر سینوسی با فرکانس متغیر با زمان در حضور هر دو کنترل کننده برای مدار تک شیر در شکل 21 و 22 مشاهده

چترینگ در اطراف سطح لغزش، به خوبی ردیابی کرد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که مشخصه های زمانی حلقه بسته، نظیر خطای حالت ماندگار، با حضور کنترل کننده مود لغزشی برای هر دو مدار، به مراتب بهتر از تناسبی-انتگرالی- مشتق گیر می‌باشد. از طرفی مسئله اغتشاش در ورودی کنترلی به عنوان یک عامل خارجی بر سیستم اعمال شد که در نتیجه پاسخ سیستم با اعمال کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق گیر دارای رفتار نوسانی توام با خطای ماندگار بود که در مورد کنترل کننده مود لغزشی مقدار خطا به مراتب کمتر بدست آمد. در مقایسه رفتار سیستم در مدارهای مختلف، مشاهده شد که عملکرد نیوماتیکی با مدار دو شیر، درحضور هر دو کنترل کننده مودلغزشی و تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر، ورودی مرجع با فرکانس بالا را، با خطای کمتری ردیابی کرده که این نتیجه‌گیری درمورد کنترل کننده مودلغزشی بیشتر مشهود است. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد نیوماتیکی در مدار تک‌شیر در حضور کنترل کننده خطی تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر، قادر به ردیابی دقیق‌تر و بهتر ورودی مرجع، در فرکانس‌های پایین می‌باشد. این عملکرد سیستم با مدار تک شیر، در فرکانس پایین درحضور کنترل کننده خطی تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر نشان‌دهنده رفتار شبه خطی ورودی-خروجی سیستم می‌باشد.

8- مراجع

- [1] P. R. Moore, J. S. Pu, Pneumatic Servo actuator technology, *IEE Colloquium Actuator Technology: Current Practice and New Developments*, Vol. 1, No. 1, pp. 3/1-3/6, 1996.
- [2] S. Liu, J. E. Bobrow, An analysis of a pneumatic servo system and its application to a computer-controlled robot, *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, Vol. 110, No. 3, pp. 228-235, 1988.
- [3] H. K. Lee, G. S. Choi, G. H. Choi, A study on tracking position control of pneumatic actuators, *Mechatronics*, Vol. 12, No. 6, pp. 813-831, 2002.
- [4] Y. C. Tsai, A. C. Huang, Multiple-surface sliding controller design for pneumatic servo systems, *Mechatronics*, Vol. 18, No. 9, pp. 506-512, 2008.
- [5] M. Smaoui, X. Brun, D. Thomasset, High order sliding mode for an electropneumatic system: a robust differentiator-controller design, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Vol. 18, No. 4, pp. 481-501, 2007.
- [6] S. Das, B. Bandyopadhyay, A. K. Paul, P. Trivedi, Position control of pneumatic actuator using sliding mode control in conjunction with robust exact differentiator, *International Conference on Control, Automation, Robotics and Embedded Systems*, Jabalpur, India, Dec 16-18, 2013.
- [7] J. Ueda, M. Turkseven, Observer based impedance control of a pneumatic system with long transmission lines. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Stockholm, Sweden, May 16-21, 2016.
- [8] S. Goldstein, H. Richardson, A differential pulse-width modulated pneumatic servo utilizing floating flap disc switching valves, *ASME Transaction Journal of Basic Engineering*, Series C, Vol. 90, No. 2, pp. 143-151, 1968.
- [9] R. B. Varseveld, G. M. Bone, Accurate position control of a pneumatic actuator using on/off solenoid valves, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 2, No. 3, pp. 195-204, 1997.
- [10] M. Taghizadeh, A. Ghaffari, F. Najafi, Modeling and identification of a solenoid valve for PWM control applications, *Comptes Rendus Mecanique*, Vol. 337, No. 3, pp. 131-140, 2009.
- [11] M. Taghizadeh, A. Ghaffari, F. Najafi, Improving dynamic performances of PWM-driven servo-pneumatic systems via a novel pneumatic circuit, *ISA Transaction*, Vol. 48, No. 4, pp. 512-518, 2009.
- [12] E. Richer, Y. Hurmuzlu, A high performance pneumatic force actuator system: part 1- nonlinear mathematical model, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 122, No. 3, pp. 416-435, 2000.
- [13] T. Dominik Gwiazda, *Genetic Algorithms Reference*, pp. 200-225, Poland: Lightning Source, 2006.

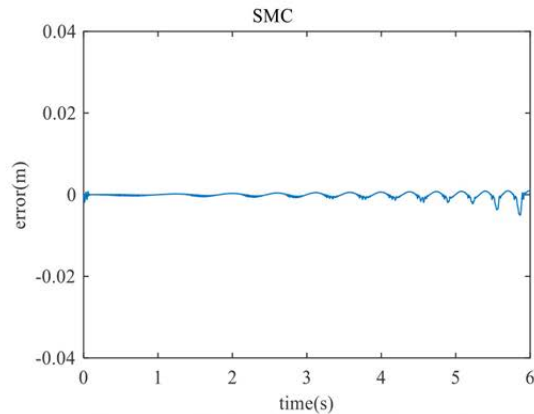


Fig. 21 Position error with sinusoidal reference input with amplitude of 0.05 m and linear time varying frequency in the presence of sliding mode controller for the one-valve circuit

شکل 21 خطای موقعیت با ورودی مرجع سینوسی با دامنه 0.05 متر و فرکانس خطی متغیر با زمان برای مدار تک شیر درحضور کنترل کننده مود لغزشی

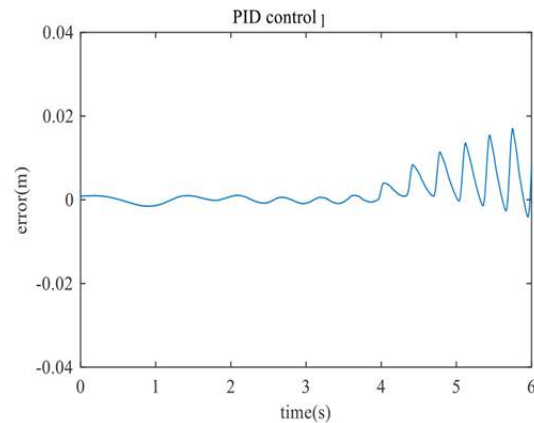


Fig. 22 Position error with sinusoidal reference input with amplitude of 0.05 m and linear time varying frequency in the presence of PID controller for the one-valve circuit

شکل 22 خطای موقعیت با ورودی مرجع سینوسی با دامنه 0.05 متر و فرکانس خطی متغیر با زمان درحضور کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر برای مدار تک شیر

کنترل کننده، مشاهده شد که میزان تلاش کنترلی در حضور کنترل کننده مودلغزشی در هر دو مدار، بیشتر از کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق-گیر است. همچنین میزان تلاش کنترلی در مدار تک‌شیر بیشتر از دو شیر بوده، این در حالی است که فعالیت سیستم، استهلاک و سروصدای آن (درحالت عملی) برای مدار دو شیر بیشتر از مدار با یک شیر است. نتایج شبیه‌سازی برای هر دو مدار نیوماتیکی نشان می‌دهد که کنترل کننده مود لغزشی در مقایسه با کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر در برابر غیرخطی‌های سیستم، عدم قطعیت پارامتری و اغتشاش، عملکرد بهتری داشته و سیستم مورد نظر را به خوبی کنترل می‌کند. همچنین با در نظر گرفتن لایه مرزی در اطراف سطح لغزش، می‌توان ورودی مرجع را بدون پدیده