



## طراحی و پیاده‌سازی کنترل کننده تطبیقی برای کنترل موقعیت یک عملگر نیوماتیک تحت بارگذاری متغیر

مصطفی تقی زاده<sup>۱\*</sup>، سید مهدی چاوشیان<sup>۲</sup>

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۲- دانشجوی دکتری تخصصی، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

\* تهران، صندوق پستی، ۱۷۴۳۵۲۴۱۵۵

### چکیده

در شرایط بارگذاری یکنواخت، استفاده از یک کنترل کننده با ضرایب ثابت می‌تواند برای سیستم سروپیو ماتیک قابل قبول باشد؛ اما در شرایط بارگذاری متغیر با دامنه تغییرات گسترده برای دستیابی به عملکرد مطلوب، روش‌های پیشرفته‌تر کنترلی باستی مدنظر قرار گیرند. در این مقاله کنترل کننده‌ای تطبیقی برای یک سیستم سروپیو ماتیک با شیر دو وضعیتی و تحریک PWM تحت بارگذاری متغیر طراحی گردیده و روی آن پیاده‌سازی شده است. در سیستم سروپیو ماتیک تحت آزمایش به جای استفاده از شیر گران قیمت سرو یا پروپر شال از شیر دو وضعیتی پاسخ سریع با تحریک PWM استفاده شده است. شناسایی پارامترهای سیستم با استفاده از اطلاعات ورودی - خروجی به صورت بلندرنگ انجام شده و پارامترهای کنترل کننده بطور لحظه‌ای تنظیم می‌شوند. در طراحی کنترل کننده تطبیقی پیشنهادی از الگوریتم رگولاتورهای خودتنظیم استفاده شده است. کنترل طراحی شده از طریق یک کارت واسط کامپیو تری روی سیستم سروپیو ماتیک مدنظر اعمال شده و عملکرد آن مورد بررسی و مقایسه با روش‌های کنترل تابعی - مشتق گیر و کنترل چند مدلله قرار گرفته است. در روش کنترل چند مدلله، برخلاف روش ارائه شده می‌باشد تعداد محدود و گستره‌ای بار مرجع را در میان گستره‌ی تغییرات بار در نظر گرفته و کنترل کننده‌های ثابت را متناظر با این نقاط، طراحی یا تنظیم نمود. آزمایش‌های تجربی انجام شده تحت بارگذاری متغیر عملکرد مطلوب کنترل کننده تطبیقی را به ازای گستره‌ی کامل تغییرات بار نشان می‌دهند.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۵ بهمن ۱۳۹۴

پذیرش: ۱۸ اردیبهشت ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۳۰ خرداد ۱۳۹۵

کلید واژگان:

کنترل موقعیت

عملگر نیوماتیک

کنترل کننده تطبیقی

PWM

سیگنال

## Adaptive control for position control of a pneumatic actuator under variable loads

Mostafa Taghizadeh\*, Seyed Mahdi Chavoshian

Department of Mechanical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

\* P.O.B. Tehran, Iran, 1743524155, mo\_taghizadeh@sbu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 14 February 2016

Accepted 07 May 2016

Available Online 19 June 2016

Keywords:

Position control

Pneumatic Actuator

Adaptive Controller

PWM

### ABSTRACT

Under a constant loading condition, use of a controller with constant coefficients can be acceptable for servo pneumatic systems. However, in variable loads with widespread changes, more advanced control methods should be considered to achieve desirable performance. In this paper, an adaptive controller is designed and implemented to a variably loaded servo pneumatic system with PWM driven switching valve. In the experimental setup, a pneumatic circuit is used which consists of one PWM driven fast switching valve instead of an expensive servo or proportional valve. In the designed adaptive controller, real time identification of system parameters is performed using input-output data and controller parameters are adjusted instantaneously. "Self-tuning regulators" algorithm in which the desired closed loop poles and zeroes are predefined, is applied to design the proposed controller. The designed controller is applied to the pneumatic actuator via an interface board and its results are compared to results of a PD and a multi model controller. Unlike the proposed method which varies the control parameters continuously according to load variations, in multi-model method the control law is selected among a number of fixed controllers. Experimental results demonstrate the high performance of the adaptive controller under variable loads.

مواد اولیه مورد نیاز، تعمیرپذیری کم‌هزینه و آسان و قیمت تمام شده پایین

از جمله ویژگی‌های مطلوب این عملگرها هستند. در نیوماتیک مزایای موتورهای الکتریکی مانند عملکرد تمیز و قابل اطمینان و مزایای سیستم‌های هیدرولیکی مثل قابلیت اعمال مستقیم و بدون واسطه به بار در یک جا جمع

**۱- مقدمه** ویژگی‌های فراوان و بعض منحصر به فرد عملگرهای نیوماتیکی باعث شده که

این عملگرهای از جمله‌ی پرکاربردترین عملگرهای صنعتی باشند. ویژگی‌هایی چون سرعت، قابلیت اطمینان، عملکرد و ساختار ساده، دسترسی آسان به

Please cite this article using:

M. Taghizadeh, S. M. Chavoshian, Adaptive control for position control of a pneumatic actuator under variable loads, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 181-188, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.6.25.8 ]

از این روش ساده‌سازی بدست آورده‌اند. همچنین تقی‌زاده و همکاران [3] مدار نیوماتیک جدیدی با استفاده از تنها یک شیر دو وضعیتی با تحریک PWM را معرفی نموده و رفتار شبه خطی آن را با استفاده از تست‌های حلقه باز و حلقه بسته نشان داده‌اند. این مدار نیوماتیک که ساده و کم هزینه بوده و با کاهش نویز همراه است، در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است.

به منظور درک عمیق و کامل از اجزای داخل سیستم دستیابی به یک مدل تحلیلی، که از روابط فیزیکی حاکم بر اجزای سیستم تشکیل شده، ضروری است. در زمینه‌ی سیستم‌های سرونیوماتیک استاندارد تلاش‌های زیادی برای مدل‌سازی تحلیلی سیستم صورت گرفته است. اما برای مدل‌سازی تحلیلی سیستم سرونیوماتیک با شیرهای دو وضعیتی و تحریک PWM تعداد مقالات بسیار محدود است. کانت و سینگ [11] رفتار دینامیکی یک سیستم سرونیوماتیک با شیر دو وضعیتی را به عنوان یک سیستم خطی متغیر با زمان بررسی کردند. یی و همکارانش دو مدل برای شیرهای سلوونیئیدی مورد استفاده در روش PWM ارائه دادند [12]. آنها در مدل‌سازی خود زمانهای تأخیر شیر رالاحظ کردند.

مهمنترین قسمت در طراحی یک سیستم سرونیوماتیک ارائه‌ی کنترل کننده برای آن است. در زمینه طراحی کنترل کننده‌ی خطی لای و همکاران [13] یک کنترل کننده دو حلقاتی برای کنترل موقعیت سیلندر سیستم نیوماتیک با تحریک PWM طراحی نموده‌اند. حلقه‌ی داخلی یک کنترل کننده PI برای فشار، و حلقه‌ی اصلی یک PD کنترل کننده PID سیلندر کار می‌کرد. جنتیله و همکاران نیز از یک کنترل کننده PID استفاده کردند که پارامترهای آن ابتدا به روش زیگلر و نیکولز تنظیم شده و سپس با استفاده از روش‌های ابتکاری و سعی و خطا اصلاح می‌شدند [14]. وارسولد و بون [7] با استفاده از روش‌های شناسایی یک مدل گسته‌ی خطی برای سیستم به دست آورده و سپس یک کنترل کننده ی PID دیجیتال بهمراه جبران کننده اصطکاک برای آن طراحی کردند. عملکرد مطلوب و مقاوم بودن سیستم به وسیله چند آزمایش نشان داده است.

اگرچه سیستم کنترل خطی طراحی شده در [7] جزء تحقیقات خوب در این زمینه محسوب می‌شوند، اما سیستم سرونیوماتیک اساساً یک سیستم غیرخطی است و باید در چارچوبی غیرخطی مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد. پائول و همکاران یک کنترل کننده غیرخطی برای سیستم سرونیوماتیک با شیر دو وضعیتی ارائه کردند که پایداری را از دیدگاه لیپانوف تضمین می‌کرد [15]. البته سیگنال کنترلی آنها یک سیگنال PWM نبود؛ اما از آنجا که از شیر دو وضعیتی استفاده کرده بودند، مقاله آنها در این بخش قابل ذکر است. اگرچه مدل آنها غیرخطی بود ولی عوامل غیرخطی مهمی مثل دینامیک غیرخطی فشار در محفظه‌های سیلندر و تمایز بین جریان مادون صوت و ماقوچ صوت در شیر را در نظر نگرفته بودند. آن و همکاران نیز کنترل هوشمند این سیستم‌ها را با استفاده از شبکه‌های عصبی مورد بررسی قرار دادند [16]. شن و همکاران برای مدل سیستم همان روش قبلی خود را به کار گرفته و لی این بار بجای در نظر گرفتن یکتابع تبدیل خطی مرتبه اول، از معادله‌ی غیرخطی فشار استفاده نموده و با توجه به مدل غیرخطی بدست آمده یک کنترل کننده مد لغزشی برای سیستم طراحی کردند [17-19]. اگرچه انتظار می‌رود که با استفاده از مدل و کنترل کننده غیرخطی نتایج بهتری حاصل شود ولی بهبود قابل ملاحظه‌ای در عملکرد سیستم جدید به چشم نمی‌خورد. علاوه بر این، کنترل مد لغزشی در عمل با مشکل لرزش مواجه است. نگوین و همکارانش نیز در مقاله‌ای جدیدتر به طراحی کنترل

شده‌اند. علاوه بر اینها سیستم‌های نیوماتیک در مقایسه با دو سیستم دیگر دارای مزایای ویژه‌ای مثل نرمی<sup>1</sup> ذاتی هستند؛ که دلیل آن قابلیت تراکم هوا می‌باشد. این مزیت در کاربردهای خاص مثل کاربردهای رباتیکی که در آن ربات با انسان در تعامل است، اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. اما وجود عوامل غیرخطی و پارامترهای متغیر با زمان، استفاده از نیوماتیک در کاربردهای سرو را با مشکل مواجه می‌نماید. با این وجود مزایای سیستم‌های نیوماتیک از یک سو و پیشرفت‌ها در تئوری و تکنولوژی کنترل از سوی دیگر، سرونیوماتیک را در مسیر تبدیل به یک سروتکنولوژی مطلوب قرار داده است. در مقاله ای که در سال 1996 منتشر شد، مور و پو مروری بر توسعه فناوری سرونیوماتیک و مقایسه‌ی محسان و محدودیت‌های آن با سایر فناوری‌های مشابه، ارائه داده‌اند [1].

چهار جزء اصلی یک سیستم سرونیوماتیک عبارت از عملگر، شیر، کنترل، کنترل کننده و اندازه‌گیر است. برای هر یک از این اجزای چهارگانه، گرینه‌های مختلفی وجود دارد و هر ترکیب چهارتاپی از میان گرینه‌های موجود منجر به تحقق یک سیستم سرونیوماتیک متفاوت می‌شود. در این میان تقسیم‌بندی از نقطه نظر شیر مورد استفاده، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که بر این اساس این سیستم‌ها به دو دسته‌ی سیستم‌های سرونیوماتیک استاندارد (با شیرهای سرو یا پروپرشنال) و سیستم‌های سرونیوماتیک با شیرهای دو وضعیتی تحریک شده توسط سیگنال PWM<sup>2</sup> تقسیم می‌شوند. اکثر مقالات منتشر شده در زمینه سرونیوماتیک به تحقیق پیرامون سیستم‌های سرو نیوماتیک استاندارد پرداخته‌اند که در آنها از شیرهای پروپرشنال یا سرو (با عملکرد پیوسته) استفاده شده است [2]. اما این شیرها عمولاً حجمی و گران قیمت بوده و بهره برداری و تعمیر آنها در مقایسه با شیرهای دو وضعیتی مشکل‌تر است. این در حالیست که شیرهای دو وضعیتی قیمت پایین‌تر (حدود یک دهم) نسبت به شیرهای سرو و پروپرشنال دارند. به منظور کاهش هزینه‌ها و گسترش کاربرد سیستم‌های سرونیوماتیک، می‌توان از شیرهای دو وضعیتی پاسخ سریع استفاده کرد که با سیگنال PWM با فرکانس حدود 50 هرتز تحریک می‌شوند و بدین ترتیب عملکرد شبه پیوسته پیدا می‌کنند [3].

اولین کاربردهای تکنیک PWM در سیستم‌های سرونیوماتیک به سال‌های 1968 توسط گلدشتاین و همکارش باز می‌گردد [4]. پس از آن نوریتسوگو در سال 1987 دو مقاله ارائه کرد [6,5] که در آنها از سه شیر دو وضعیتی با تحریک PWM و یک کنترل کننده تنساسبی با فیدبک موقعیت و سرعت استفاده شده بود. سیستم‌های سرو نیوماتیک با تحریک PWM مزیتی نسبی دیگری در مقایسه با سیستم‌های استاندارد دارند که انعطاف آنها در طراحی مدار نیوماتیک است. برای مدار نیوماتیک تعداد و انواع متفاوتی از شیرهای پاسخ سریع را می‌توان مورد استفاده قرار داد [10-7,3]. مدار نیوماتیک انتخاب شده اثر عمدت‌های برخطی بودن سیستم دارد، وارسولد و بون [7] از یک مدار نیوماتیک با دو شیر 3-2 استفاده نموده و خطی بودن رابطه‌ی بین ورودی - خروجی را با طرح پالس ویژه‌ای بهبود بخشیده‌اند. تقی‌زاده و همکاران [2] مدلی غیرخطی از شیر نیوماتیک پاسخ سریع با تحریک PWM را با لحظه نمودن زیر سیستم‌های الکترومغناطیسی، مکانیکی و سیالاتی ارائه نموده‌اند. آنها استراتژی ساده‌سازی جدیدی را برای این مدل خطی ارائه نموده و به منظور استفاده از این مدل در کنترل PWM، مدل استاتیکی بین ورودی سیکل وظیفه و میانگین جابجایی اسپول را با استفاده

<sup>1</sup> Compliance<sup>2</sup> Pulse width Modulated

سیگنال PWM یک سیگنال باینری با فرکانس ثابت و پهنهای پالس متغیر می‌باشد. دوره‌ی تناوب سیگنال یعنی مجموع زمان‌های روشن بودن و خاموش بودن آن ثابت است ولی درصد زمان روشن بودن نسبت به دوره تناوب (پهنهای پالس) متغیر است. همان‌گونه که در شکل 2 مشاهده می‌شود، این سیگنال از مقایسه یک سیگنال پیوسته با یک سیگنال دندانه ارهای بدست می‌آید. هر کجا مقدار سیگنال پیوسته از سیگنال دندانه ارها بزرگ‌تر باشد، سیگنال PWM در وضعیت روشن قرار می‌گیرد؛ و اگر مقدار سیگنال پیوسته از مقدار سیگنال دندانه ارهای کمتر باشد، مقدار سیگنال PWM صفر است.

در شیرهای دو وضعیتی، 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 دائمًا باز و بسته می‌شود. بدین ترتیب سیال به صورت بسته‌بندی شده در بسته‌هایی کوچک و به طور گسترده از شیر دو وضعیتی عبور کرده و به عملگر تحویل داده می‌شود. سرعت ارسال بسته‌های هوای همان فرکانس PWM است باید به اندازه کافی بالا باشد تا رفتاری شبیه پیوسته حاصل شود. با تغییر پهنهای پالس سیگنال می‌توان زمان باز بودن شیر در هر سیکل و در نتیجه اندازه بسته‌های ارسالی یا دبی سیال عبوری از شیر را تغییر داد.

سیگنال آنالوگ کنترلی برای تبدیل شدن به سیگنال PWM با پتانسیل 24 ولت به مدار الکترونیکی شکل 3 ارسال می‌شود؛ که شامل درایور PWM و تقویت کننده بوده و در آزمایشگاه ساخته شده است. لازم به ذکر است که سیگنال PWM را می‌توان در داخل کامپیوتر و به صورت نرم‌افزاری نیز تولید نموده و از طریق خروجی‌های دیجیتال کارت واسطه به شیر دو وضعیتی

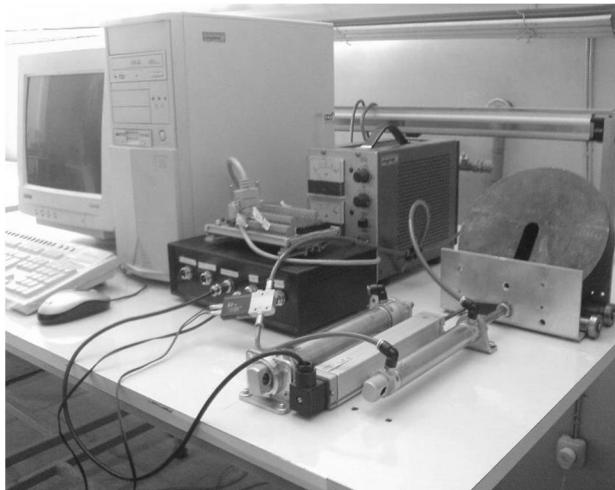


Fig. 1 Experimental setup

شکل 1 تجهیزات آزمایشگاهی

جدول 1 مشخصات تجهیزات آزمایشگاهی

Table 1 Experimental setup specification

مشخصات	تجهیزات	سازنده
سیلندر دو طرف، کورس 150mm، قطر 25mm	فستو	عملگر نیوماتیک
شیر پاسخ سریع 3-2	شیر	
MHE4-MS1H-3/2G-1/4K	پتانسیومتر	
کورس 0.05mm، دقت 0.170mm	جفران	
PCLD-8710	ادونتک	کارت واسطه

کننده مدلغزشی پرداخته‌اند [20]. اریاب و نجفی روش کنترل مودلغزشی را برای کنترل امپدانس یک عملگر نیوماتیک با شیرهای قطع/وصل ارائه نموده‌اند [21]. آنها امکان دستیابی به پارامترهای امپدانسی و اثر آنها بر پایداری سیستم، ضمن کاربرد این روش کنترلی، را مورد بررسی قرار داده‌اند. کنترل فازی نیز از دیگر روش‌هایی است که کاربرد آن در سیستم‌های سرونیوماتیک با تحریک PWM مورد بررسی قرار گرفته است. شیخ و هوآنگ یک کنترل کننده فازی – PWM برای کنترل موقعیت سیلندر در یک ربات اتوماتیک ارائه دادند [22]. آنها برای حذف ناحیه مرده و بهبود عملکرد سیستم از یک روش PWM اصلاح شده استفاده کردند. نمونه‌ی دیگری از کنترل فازی در سیستم‌های مورد مطالعه توسعه شیخ و ما در [23] آمده است.

تقی زاده و همکاران [24] کنترل کننده چندمده را برای عملگر نیوماتیکی تحت بار متغیر ارائه داده و عملکرد خوب کنترل کننده طراحی شده را با آزمایش‌های تجربی نشان داده‌اند. که در این مقاله عملکرد کنترل کننده‌ی پیشنهادی با عملکرد کنترل کننده چندمده نیز مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

در ادامه‌ی این مقاله تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده معرفی شده و در مورد سیگنال PWM و نحوه ساخت آن توضیح داده می‌شود. سپس طراحی کنترل کننده‌ی تطبیقی برای سیستم مورد بررسی ارائه می‌شود. در انتها نیز نتایج تست عملی کنترل کننده‌ی پیشنهادی ارائه گردیده و عملکرد آن مورد بررسی و مقایسه با روش‌های کنترل تناسبی - مشتق گیر و کنترل چندمده قرار می‌گیرد.

## 2- تجهیزات آزمایشگاهی و پیاده‌سازی کنترل کننده‌ی تطبیقی

به منظور انجام آزمایش‌های عملی از تجهیزات گوناگونی استفاده شده که در این بخش به معرفی این تجهیزات، شامل اجزای نیوماتیکی، سنسورها، تجهیزات الکترونیکی و سیستم کنترل کامپیوترا، پرداخته می‌شود.

عملگر تحت کنترل یک سیلندر تک میله دو طرفه ساخت شرکت فستو با کورس 150 میلی‌متر و قطر پیستون 25 میلی‌متر است. شیر 3-2 دو وضعیتی پاسخ سریع ساخت فستو نیز برای کنترل جریان هوا مورد استفاده قرار گرفته است. برای اندازه گیری موقعیت پیستون از یک پتانسیومتر خطی ساخت شرکت جفران<sup>1</sup> با کورس 170 میلی‌متر و دقت 0.05 میلی‌متر استفاده شده است (جدول 1).

شکل 1 سیستم سرونیوماتیک تحت آزمایش را نشان می‌دهد. یک گاری چرخ دار کوچک نیز در این شکل دیده می‌شود که به منظور اعمال بار به انتهای جلویی میله پیستون متصل شده است. یک کامپیوتر به عنوان کنترل کننده و یک کارت واسطه I/O ساخت شرکت ادونتک<sup>2</sup> جهت برقراری ارتباط با شیرها و سنسورها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. داده‌های اندازه گیری شده (خروجی سنسورها) از طریق ورودی‌های آنالوگ به کامپیوتر ارسال شده و در محیط نرم افزار متلب سیمولینک<sup>3</sup> پردازش می‌شوند. همچنین در این محیط، مقادیر مرجع تعیین شده و قوانین کنترلی برنامه‌نویسی می‌شوند. بدین ترتیب سیگنال کنترل به صورت نرم‌افزاری در داخل کامپیوتر ساخته شده و از طریق کانال‌های خروجی کارت واسطه به صورت یک ولتاژ آنالوگ بین 0 تا 5 ولت خارج می‌شود. پس از آن تنها کافیست تا سیگنال کنترلی به سیگنال PWM تبدیل شود.

<sup>1</sup> GEFAN

<sup>2</sup> ADVANTECH

<sup>3</sup> Matlab/Simulink

براساس آن پارامترهای کنترل کننده بطور لحظه‌ای تنظیم می‌شوند، البته شناسایی بلادرنگ پارامترها نیاز به زمان دارد که می‌تواند کنترل تطبیقی را در مواردی که تغییر پارامترها سریع هستند دچار مشکل کند.

یکی از الگوریتم‌های کنترل تطبیقی که در آن ابتدا پارامترهای مدل بهنگام شده و سپس پارامترهای کنترل کننده (تنظیم کننده) از حل یک مساله طراحی به دست می‌آیند به رگولاتورهای خود تنظیم<sup>۱</sup> موسوم است. نمودار بلوکی این روش که در این مقاله نیز از آن استفاده شده [25] در شکل ۵ نشان داده شده است. می‌توان چنین در نظر گرفت که یک سیستم کنترل تطبیقی از دو حلقه تشکیل می‌شود، یک حلقه پسخور معمولی شامل فرایند و کنترل کننده، و دیگری حلقه تخمین مدل و تنظیم پارامترهای کنترل کننده است.

در ادامه نحوه طراحی کنترل کننده با استفاده از روش جابجایی قطب تشریح خواهد شد. ایده اصلی این روش که در رگولاتورهای خود تنظیم استفاده می‌شود، عبارت است از تعیین کنترل کننده به گونه‌ای که قطب‌ها و صفرهای حلقه بسته در نقاط مطلوب از پیش تعیین شده قرار گیرند. برای این منظور فرض می‌شود که فرایند با مدل تک ورودی تک خروجی رابطه (1) قابل توصیف باشد:

$$A(q)y(t) = B(q)(u(t) + v(t)) \quad (1)$$

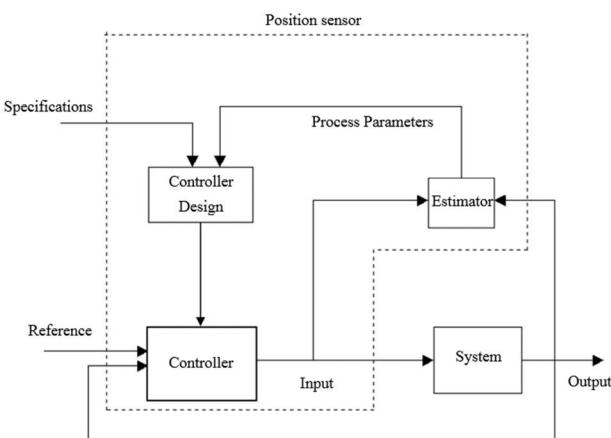
که در آن  $u$ ،  $v$  و  $y$  به ترتیب خروجی، ورودی و اغتشاش می‌باشند.  $A$  و  $B$  نیز چند جمله‌ای‌های مخرج و صورت تابع تبدیل سیستم بر حسب عملگر انتقال پیشو از  $q$  هستند. در سیستم سرونیوماتیک مورد مطالعه درجه این چند جمله‌ای‌ها و درجه‌ی نسبی سیستم  $d_0$ ، به صورت رابطه (2) می‌باشد:

$$\begin{aligned} \deg(A) &= n = 3 \\ \deg(B) &= m = 2 \\ d_0 &= n - m = 1 \end{aligned} \quad (2)$$

فرض می‌شود که  $A$  و  $B$  نسبت به هم اول هستند.<sup>۲</sup> یعنی عامل مشترک ندارند. بعلاوه فرض می‌شود که  $A$  مونیک<sup>۳</sup> است، یعنی ضریب بزرگترین توان برابر واحد است. حال سیستم کنترلی مطابق شکل ۶ در نظر گرفته می‌شود که نشان‌دهنده‌ی یک کنترل کننده دو درجه آزادی RST است و در آن  $R$  و  $S$  و  $T$  چند جمله‌ای‌هایی بر حسب  $q$  هستند.

در این سیستم، خروجی حلقه بسته به صورت رابطه (3) بدست می‌آید:

$$y(t) = \frac{BT}{AR + BS} u_c(t) + \frac{BR}{AR + BS} v(t) \quad (3)$$



شکل ۵ نمودار بلوکی رگولاتور خودتنظیم

<sup>۱</sup> Self-Turning Regulators (STR)

<sup>۲</sup> Relatively Prime

<sup>۳</sup> Monic

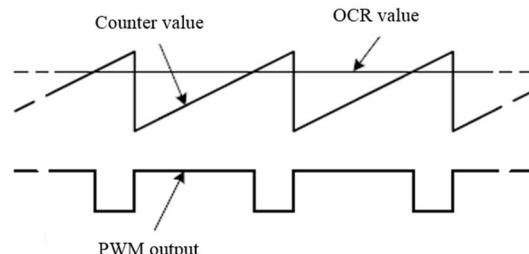


Fig. 2 PWM signal generating

شکل ۲ نحوه ساخت سیگنال PWM

اعمال نمود. ولی این کار بار محاسباتی کامپیوتر را بالا برد و زمان‌های نمونه‌برداری بسیار کوچکی نیاز دارد. به منظور کاهش بار محاسباتی و برای استفاده از زمان‌های نمونه برداری بزرگتر، در این تحقیق سیگنال PWM به صورت سخت‌افزاری در خارج از محیط کامپیوتر ساخته شده است. زمان نمونه‌برداری حدوداً ۰.۰۰۴ ثانیه در نظر گرفته شده تا بتوان نمودارهای خروجی را در فواصل ۴ ثانیه‌ای ثبت و رسم نمود.

آزمایش‌ها در فشار تغذیه ۵ بار و با مدار نیوماتیک شکل ۴ [3]، که در آن فقط یک شیر دو وضعیتی پاسخ سریع وجود دارد، انجام شده است.

### ۳- کنترل کننده تطبیقی

روش کنترل تطبیقی می‌تواند برای کنترل سیستم‌های دارای پارامترهای متغیر از جمله بار متغیر مورد استفاده قرار گیرد. در این روش، برخلاف کنترل چند مدل، نیازی به گسترشی تغییرات بار و شناسایی چند مدل در نقطه کارهای مختلف سیستم نمی‌باشد. بلکه مدل سیستم بطور بلادرنگ با استفاده از اطلاعات ورودی خروجی در هر لحظه شناسایی شده و

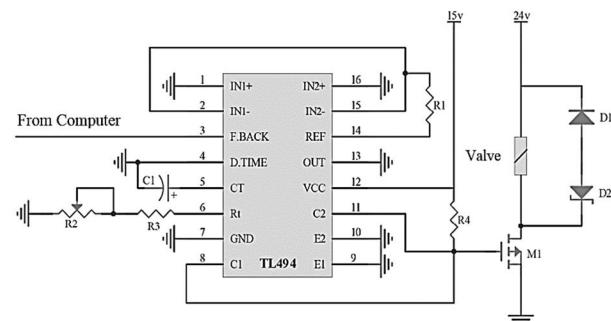


Fig. 3 PWM signal generator

شکل ۳ مدار مبدل سیگنال آنالوگ به PWM

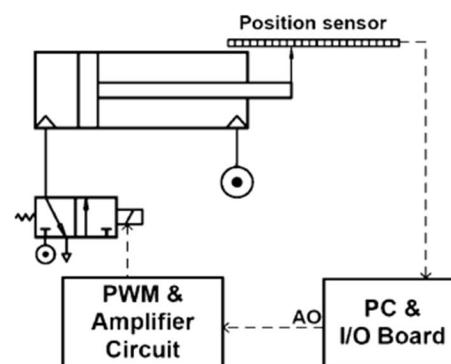


Fig. 4 The applied pneumatic circuit

شکل ۴ مدار نیوماتیک مورد استفاده

باید شرایط زیر نیز برقرار گردد:

$$\begin{aligned} \deg(R) &= \deg(A_c) - \deg(A) \\ \deg(A_c) &= 2 \cdot \deg(A) - 1 \\ \deg(A_m) - \deg(B_m) &= \deg(A) - \deg(B) = d_0 \end{aligned} \quad (13)$$

با توجه به مطالعه ارائه شده در بالا، طراحی کنترل کننده را می‌توان به

صورت زیر خلاصه نمود:

$$(1) \text{ با توجه به شروط حداقل درجه و علی بودن می‌توان رابطه (14) را نوشت:}$$

$$\deg(R) = \deg(S) = \deg(T) = 2 \quad (14)$$

$$(2) \text{ چندجمله‌ای } B \text{ به صورت } B = B^+ B^- \text{ تجزیه می‌شود و با انتخاب } B_m = B^- B'_m \text{ با حداقل درجه یعنی به صورت یک عدد، } B_m \text{ به صورت } B'_m \text{ بدست می‌آید. مقدار } B'_m \text{ به گونه‌ای تعیین می‌شود که بهره ماندگار سیستم مطلوب برابر واحد شود.}$$

$$(3) \text{ با توجه به رابطه (13)، درجه } A_m \text{ تعیین شده و با فرض ریشه تکراری برای } A_m \text{ می‌توان رابطه (15) را نوشت:}$$

$$A_m = (z - a_m)^{\deg(B^-)+1} \quad (15)$$

$$\text{به این ترتیب مقدار } B'_m \text{ به صورت رابطه (16) محاسبه می‌شود:}$$

$$B'_m = \frac{A_m}{B^-} | z = 1 = \frac{(1 - a_m)^{\deg(B^-)+1}}{B^- | z = 1} \quad (16)$$

$$(4) \text{ با توجه به رابطه (13)، درجه } A_0 \text{ تعیین شده و این چندجمله‌ای به صورت رابطه (17) انتخاب می‌شود:}$$

$$A_0 = z^{n-1} \quad (17)$$

$$(5) \text{ چندجمله‌ای، به صورت رابطه (18) بدست می‌آید:}$$

$$T = B'_m A_0 = B'_m z^{n-1} \quad (18)$$

$$(6) \text{ با حل معادله دیوفانتین (10) و بکارگیری رابطه (9) چندجمله‌ای‌های } R \text{ و } S \text{ تعیین می‌شوند. در این مرحله با توجه به درجه } B^+ \text{ سه حالت زیر ممکن است اتفاق بیفتد. لازم به ذکر است که ریشه‌هایی از } B \text{ که داخل دایره‌ای به شعاع } \alpha \text{ قرار دارند، متعلق به } B^+ \text{ و مابقی به } B^- \text{ در نظر گرفته شده‌اند. پارامتری است که مقدار آن بین صفر و یک انتخاب می‌شود.}$$

$$\deg(B^+) = 2 \quad \text{حالت اول}$$

$$T = B'_m A_0 = B'_m z^{n-1} \quad (19)$$

$$S = \frac{A_0 A_m - A}{b_0} \quad (20)$$

$$\text{حالت دوم: } \deg(B^+) = 1$$

$$\text{در این حالت می‌توان روابط (21) را نوشت:}$$

$$\begin{aligned} B^- &= (b_0^- z + b_1^-) \\ R' &= (z + r_1') \\ S &= (s_0 z^2 + s_1 z + s_2) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\text{که در آنها ضرایب } s_1, s_0, r_1' \text{ و } s_2 \text{ مجهول بوده و با استفاده از رابطه دیوفانتین که به صورت ماتریسی (22) نوشته شده، بدست می‌آیند:}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & b_0^- & 0 & 0 \\ a_1 & b_1^- & b_0^- & 0 \\ a_2 & 0 & b_1^- & b_0^- \\ a_3 & 0 & 0 & b_1^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1' \\ s_0 \\ s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2a_m - a_1 \\ a_m^2 - a_2 \\ -a_3 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

سپس با استفاده از رابطه (9) چندجمله‌ای R نیز بدست می‌آید.

$$\deg(B^+) = 0 \quad \text{حالت سوم:}$$

$$\text{در این حالت می‌توان روابط (23) را نوشت:}$$

$$\begin{aligned} B^- &= B = (b_0 z^2 + b_1 z + b_2) \\ R' &= R = (z^2 + r_1 z + r_2) \\ S &= (s_0 z^2 + s_1 z + s_2) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\text{که در آنها ضرایب } s_1, s_0, r_1, r_2 \text{ و } s_2 \text{ مجهول بوده و با استفاده از رابطه}$$

$$\text{ماتریسی دیوفانتین به صورت (24) محاسبه می‌شوند:}$$

و چند جمله‌ای مشخصه حلقه بسته به صورت رابطه (4) می‌باشد:

$$AR + BS = AC \quad (4)$$

ایده کلیدی طراحی، مشخص کردنتابع تبدیل حلقه بسته مطلوب زیر است:

$$\frac{BT}{AR + BS} = \frac{BT}{A_c} = \frac{B_m}{A_m} \quad (5)$$

که در آن  $B_m$  و  $A_m$  به ترتیب چند جمله‌ای‌های صورت و مخرج تابع

تبدیل مطلوب هستند. عموماً مطلوب است که درجه ی چند جمله‌ای‌های  $B_m$

$A_m$  کوچک انتخاب شود که این مسئله مستلزم حذف عامل‌های مشترک  $BT$

و  $A_c$  است. بدین منظور چند جمله‌ای  $B$  به صورت رابطه (6) تجزیه می‌شود:

$$B = B^+ B^- \quad (6)$$

که چند جمله‌ای مونیکی است که صفرهای آن پایدار بوده و به خوبی میرا می‌شوند. بنابراین می‌تواند از صورت و مخرج تابع تبدیل حذف شود و  $B^-$  با عوامل ناپایدار یا عواملی که میرایی ضعیف داشته و قابل حذف نیستند، متناظر است. بنابراین نتیجه می‌شود که  $B^-$  باید عاملی از  $B_m$  باشد، پس:

$$B_m = B^- B'_m \quad (7)$$

از آنجا که  $B^+$  حذف می‌شود، باید عواملی از  $A_c$  باشد. بعلاوه از معادله

$$(4) \text{ نتیجه می‌شود که } A_m \text{ نیز باید عاملی از } A_c \text{ باشد. بنابراین چند جمله‌ای مشخصه حلقه بسته به شکل رابطه (8) است:}$$

$$A_c = A_0 A_m B^+ \quad (8)$$

که چند جمله‌ای  $A_0$  یک چند جمله‌ای مونیک و پایدار است که برای برآوردن درجه چند جمله‌ای‌های دو طرف تساوی در رابطه (8) به سمت

راست اضافه می‌شود. از طرفی چون  $B^+$  عاملی از  $B$  و  $A$  است. از معادله (4) نتیجه می‌شود که عاملی از  $R$  نیز می‌باشد. پس می‌توان رابطه (9) را نوشت:

$$R = R' B^+ \quad (9)$$

و معادله (4) به معادله (10) تبدیل می‌گردد:

$$AR' + B^- S = A_0 A_m = A'_c \quad (10)$$

چندجمله‌ای‌های  $R'$  و  $S$  را می‌توان از حل معادله (10) بدست آورد. این معادله که نقش اساسی در جبر بازی می‌کند، معادله دیوفانتین<sup>1</sup> نامیده شده و در صورتی که چند جمله‌ای‌های  $A$  و  $B$  عامل مشترک نداشته باشند، همواره دارای جواب است.

با قرار دادن معادلات (8-6) در معادله (5) رابطه (11) بدست می‌آید:

$$T = A_0 B'_m \quad (11)$$

از طرفی برای بدست آوردن یک کنترل کننده علی<sup>2</sup> باید شرایط ذیل برقرار باشد:

$$\deg(S) \leq \deg(R) \& \deg(T) \leq \deg(R) \quad (12)$$

همچنانی برای اینکه کنترل کننده بدست آمده از کمترین درجه باشد،

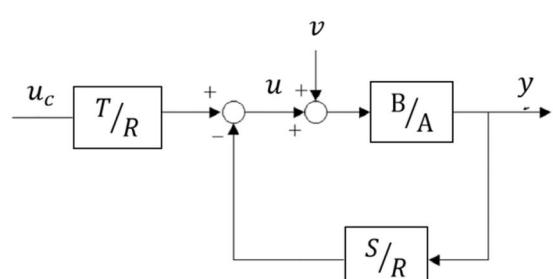
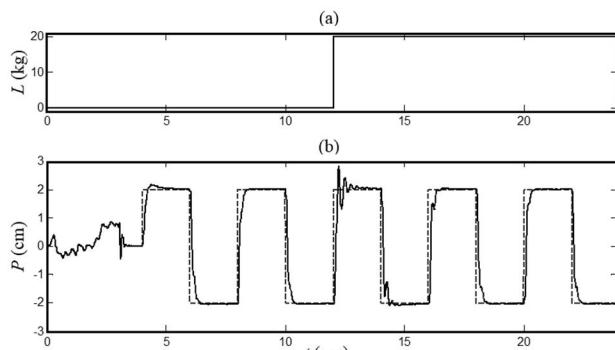


Fig. 6 Two degree of freedom RST controller

شکل 6 کنترل کننده دو درجه آزادی RST

<sup>1</sup> Diophantine Equation  
<sup>2</sup> Causal



شکل 8 نتایج عملکرد کنترل کننده تطبیقی به ازای تغییر بار از 0 تا 20 کیلوگرم.  
a) Load change b) Response

شکل 8 نتایج عملکرد کنترل کننده تطبیقی به ازای تغییر بار از 0 تا 20 کیلوگرم.  
(a) تغییرات بار (b) پاسخ

کنترلی سیستم، آزمایش‌هایی بطور جدایه انجام شده و نتایج آنها در شکل‌های 9 و 10 نشان داده شده‌اند. شکل 9 تأثیر تغییرات ضریب فراموشی بر عملکرد کنترل کننده نشان می‌دهد. در این شکل محل قطب حلقه بسته  $\lambda = 0.995$  و ثابت نگه داشته شده و سه مقدار  $a_m = 0.72$ ,  $0.995$ ,  $0.999$  برای پارامتر ضریب فراموشی در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که در شکل پیداست، با افزایش ضریب فراموشی اهمیت داده‌های جدید نسبت به داده‌های قدیمی تر کم شده و سیستم کنترل می‌شود. کاهش ضریب فراموشی نیز می‌تواند به ناپایداری سیستم منجر شود.

شکل 10 نیز تأثیر محل قطب حلقه بسته را بر عملکرد کنترل کننده نشان می‌دهد. در این شکل ضریب فراموشی ثابت و برابر  $0.995 = \lambda$  در نظر گرفته شده و محل قطب حلقه بسته در نقاط  $a_m = 0.55$  و  $a_m = 0.72$  تغییر داده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود و در شکل هم پیداست، با نزدیک شدن محل قطب به مقدار واحد (دایره با شعاع واحد) سیستم کنترل و با دور شدن از دایره واحد به سمت مرکز، سیستم سریع‌تر می‌شود. اما نزدیک شدن محل قطب به مرکز و افزایش سرعت کنترل با محدودیت روبروست و منجر به ناپایدار شدن سیستم می‌شود.

به منظور مقایسه عملکرد کنترل کننده پیشنهادی در این مقاله با عملکرد کنترل کننده تناسبی - مشتق گیر و کنترل کننده چند مدل‌های ارائه شده در [23]، دو آزمایش صورت گرفته است. ابتدا آزمایشی در گستره‌ی بین بی باری تا بار کامل انجام شده است. نتایج این آزمایش برای کنترل کننده تطبیقی در شکل 11 و برای کنترل کننده چند مدل در شکل 12 نشان داده شده است.

برای مقایسه و نمایش میزان بهبود عملکرد دو کنترل کننده ذکر شده در بالا نسبت به یک کنترل کننده تناسبی - مشتق گیر آزمایشی تحت شرایط بارگذاری یکسان انجام شده است. بهمنظور تقارن، مناسب‌ترین کنترل کننده ثابت یعنی کنترل کننده متناظر با بارگذاری متوسط انتخاب شده و نتایج به دست آمده در شکل 13 ارائه شده‌اند.

میزان خطای رهگیری موقیت با استفاده از سه کنترل کننده مورد بررسی، با استفاده از دو روش میانگین مربعات خطای نرمال<sup>1</sup> و میانگین خطای باپاس نرمال<sup>2</sup>، مورد بررسی قرار می‌گیرد [26]. جدول 2 نتایج این دو معیار را نشان می‌دهد.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & b_0 & 0 & 0 \\ a_1 & 1 & b_1 & b_0 & 0 \\ a_2 & a_1 & b_2 & b_1 & b_0 \\ a_3 & a_2 & 0 & b_2 & b_1 \\ 0 & a_3 & 0 & 0 & b_2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

#### 4- نتایج عملی

در این قسمت عملکرد کنترل کننده تطبیقی طراحی شده با انجام آزمایش‌های مختلفی روی سیستم سرونیوماتیک، بررسی و نتایج آن ارائه شده است. بدین منظور پارامترهایی که به عنوان شرایط اولیه می‌باشند در تمامی آزمایش‌ها ثابت و بهصورت زیر انتخاب شده‌اند:

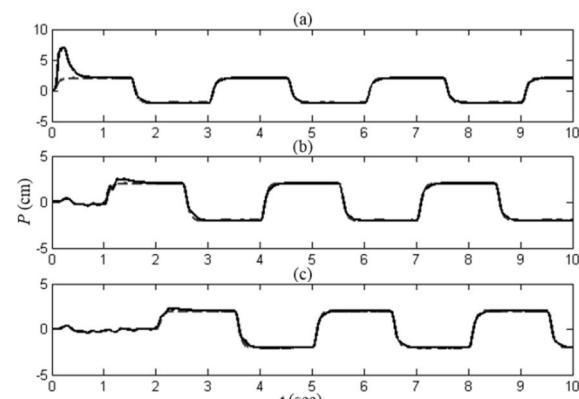
$$\theta(0) = 0, P(0) = \beta, I_{6 \times 6}, \beta = 100$$

اثر تغییردو پارامتر طراحی دیگر یعنی فراموشی،  $\lambda$  و محل مطلوب قطب‌های حلقه بسته،  $a_m$  نیز در آزمایش‌های جدایه‌ای بررسی و نمایش داده شده است.

به عنوان اولین آزمایش عملکرد بخش تخمین پارامتر را بررسی نموده و خروجی سیستم واقعی را با خروجی محل شناسایی شده مقایسه می‌کنیم. به منظور شناسایی سیستم قبل از اعمال کنترل، سیستم برای مدت معینی بهصورت حلقه‌باز و با ورودی نویز سفید تحریک شده است. شکل 7 ضمن مقایسه‌ی خروجی‌های سیستم و محل، تأثیر مدت زمان شناسایی اولیه را نیز روی پاسخ کنترلی سیستم نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در شکل 7- a دیده می‌شود، عدم وجود شناسایی اولیه، باعث ایجاد فراجهش‌های بزرگ در ابتدای عملکرد کنترلی می‌شود؛ که می‌تواند باعث ناپایداری یا ضربه زدن سینلندر به انتهای کورس گردد. در شکل‌های 7- b و 7- c با افزایش زمان شناسایی اولیه، خروجی محل به خروجی سیستم واقعی نزدیکتر شده است.

شکل 8 عملکرد کنترل کننده تطبیقی را در برابر تغییر ناگهانی بار سیستم از حالت بی باری (صفر کیلوگرم) به حالت بار کامل (20 کیلوگرم) نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود پس از تغییر ناگهانی پار ابتدا پاسخ سیستم نوسانی شده و فرجهش‌های نامطابقی نشان می‌دهد. اما به تدریج در اثر بهبود شناسایی، پاسخ کنترلی سیستم بهبود می‌یابد. با توجه به شکل، حدوداً 6 ثانیه زمان لازم است تا در اثر این تغییر بار شدید پاسخ سیستم به حالت مطلوب خود بازگردد.

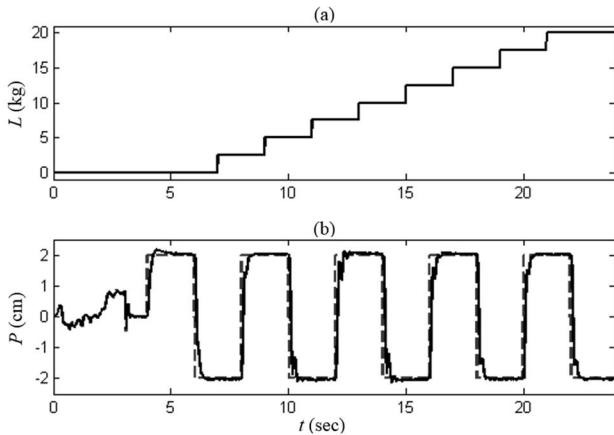
نتایج شکل 8 به ازای مقادیر ضریب فراموشی  $\lambda = 0.995$  و محل قطب حلقه بسته مطلوب در  $a_m = 0.72$  بدست آمداند؛ که مقادیر فوق بهصورت تجربی تنظیم شده‌اند. به منظور نمایش تأثیر این دو پارامتر بر پاسخ



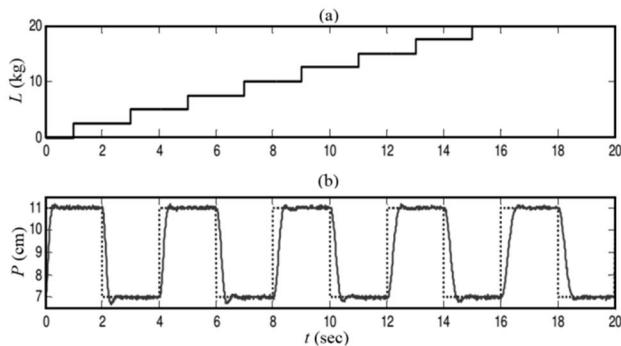
شکل 7 مقایسه خروجی‌های سیستم و مدل در بازه‌های زمانی شناسایی متفاوت. a) صفر ثانیه b) 2 ثانیه c) 4 ثانیه

<sup>1</sup> Normalized Root Mean Square Error

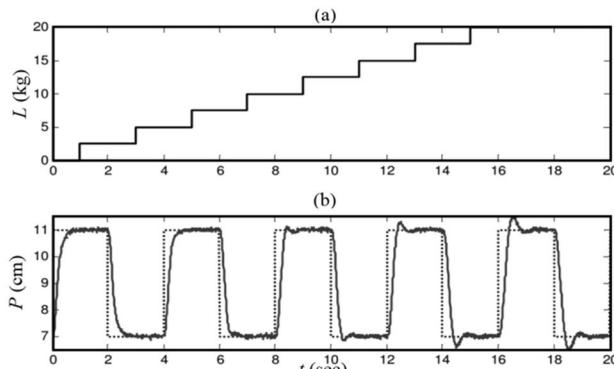
<sup>2</sup> Normalized Mean Bias Error



شکل 11 a) تغییرات بار (b) عملکرد کنترل کننده تطبیقی



شکل 12 a) تغییرات بار (b) عملکرد کنترل کننده چند مدل



شکل 13 a) تغییرات بار (b) عملکرد کنترل کننده متناظر با شرایط میان باری

جدول 2 خطای کنترل کننده‌ها در رهگیری موقعیت

Table 2 Tracking error of the controllers

NRMSE	NMBE	کنترل کننده
0.0726	0.182	تاباسی مشتق گیر
0.0311	0.0788	چند مدل
0.0539	0.0950	تطبیقی

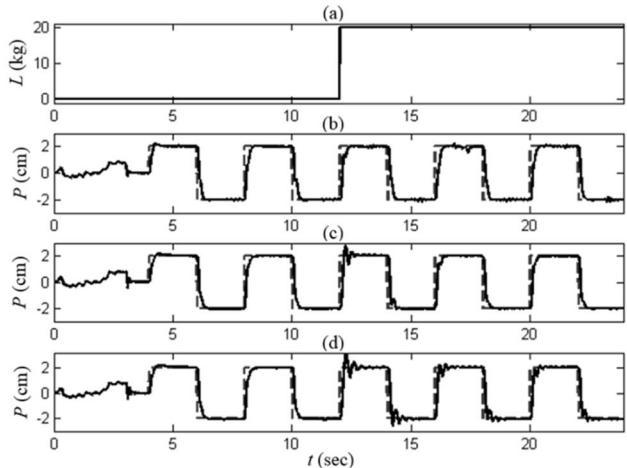
## 5- نتیجه گیری

کنترل موقعیت برای یک سیستم سرونیوماتیک تحت بارگذاری متغیر با استفاده از روش کنترل تطبیقی، در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت. ویژگی سیستم سرونیوماتیک تحت آزمایش استفاده از شیر دو وضعیتی و تحريك

$$\text{NRMSE} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (\text{actual value} - \text{setpoint value})^2}}{\frac{1}{N} \sum_1^N \text{setpoint value}} \quad (25)$$

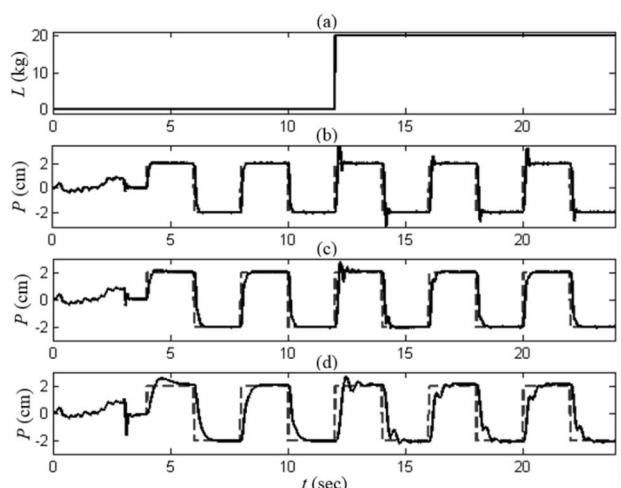
$$\text{NMBE} = \frac{\sum_1^N (\text{actual value} - \text{setpoint value})}{\sum_1^N \text{setpoint value}} \quad (26)$$

همان‌گونه که از مقایسه شکل‌های 11 و 13 و جدول 2 بدست می‌آید، کنترل کننده تطبیقی عملکرد بهتری از یک کنترل کننده PD ثابت دارد. اما بررسی شکل‌های 11 و 12 و جدول 2 نشان می‌دهد که در مقایسه با پاسخ کنترل کننده چند مدل، عملکرد کنترل کننده تطبیقی ضعیفتر است. البته اگر فاصله زمانی تغییر بارها (که در این آزمایش‌ها 2 ثانیه است) افزایش یابد و کنترل کننده تطبیقی فرصت کافی برای شناسایی سیستم داشته باشد، در آن صورت پاسخ سیستم تطبیقی به تدریج بهتر می‌شود. به عنوان نمونه، همان‌طور که در شکل 8 قابل مشاهده است عملکرد کنترل کننده تطبیقی پس از حدود 6 ثانیه به حالت ایده‌آل خود نزدیک می‌شود.



شکل 9 تأثیر ضریب فراموشی بر عملکرد کنترل کننده (a) تغییر بار (b) λ = 0.99 (c) λ = 0.995 (d) λ = 0.999

شکل 9 تأثیر ضریب فراموشی بر عملکرد کنترل کننده (a) تغییر بار (b) λ = 0.99 (c) λ = 0.995 (d) λ = 0.999



شکل 10 تأثیر محل قطب بر عملکرد کنترل کننده (a) تغییر بار (b) a\_m = 0.55 (c) a\_m = 0.72 (d) a\_m = 0.85

شکل 10 تأثیر محل قطب بر عملکرد کنترل کننده (a) تغییر بار (b) a\_m = 0.55 (c) a\_m = 0.72 (d) a\_m = 0.85

- circuit, *Electrical Engineering*, Vol. 91, No. 2, pp. 79–87, 2009.
- [9] M. Sorli, S. Pastorelli, Performance of a pneumatic force controlling servosystem: influence of valves conductance, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 30, No. 3, pp. 283–300, 2000.
- [10] K. Ahn, S. Yokota, Intelligent switching control of pneumatic actuator using on/off solenoid valves, *Mechatronics*, Vol. 15, No. 6, pp. 683–702, 2005.
- [11] C. Kunt, R. Singh, A linear time varying model for on-off valve controlled pneumatic actuator, *ASME of Dynamic System Measurement and Control*, Vol. 112, No. 4, pp. 740–748, 1990.
- [12] N. Ye, S. Scavarda, M. Betemps, A. Jutard, Models of pneumatic PWM solenoid valve for engineering application, *ASME of Dynamic System Measurement and Control*, Vol. 114, No. 4, pp. 680–688, 1992.
- [13] J. Y. Lai, C. H. Menq, R. Singh, Accurate position control of a pneumatic actuator, *ASME of Dynamic System Measurement and Control*, Vol. 112, No. 4, pp. 734–739, 1990.
- [14] A. Gentile, N. Giannoccaro, G. Reina, Experimental tests on position control of a pneumatic actuator using on/off solenoid valves, *Proceeding of IEEE/ICIT, Bangkok*, Vol. 1, pp. 555–559, 2002.
- [15] A. K. Paul, J. K. Mishra, M. G. Radke, Reduced order sliding mode control for pneumatic actuator, *IEEE Transaction on control systems technology*, Vol. 2, No. 3, pp. 271–276, 1994.
- [16] K. Ahn, S. Yokota, Intelligent switching control of pneumatic actuator using on/off solenoid valves, *Mechatronics*, Vol. 15, No. 16, pp. 683–702, 2005.
- [17] E. J. Barth, J. Zhang, M. Goldfarb, Sliding mode approach to PWM-controlled pneumatic systems, *The American Control Conference, Anchorage Alaska*, Vol. 3, IEEE Cat. No. CH37301, pp. 2362–2367, 2002.
- [18] X. Shen, J. Zhang, E. J. Barth, M. Goldfarb, Non linear averaging applied to the control of pulse width modulated (PWM) pneumatic systems, *The American Control Conference, Boston*, Vol. 5, pp. 4444–4448, 2004.
- [19] X. Shen, J. Zhang, E. J. Barth, M. Goldfarb, Nonlinear model-based control of pulsedwidth modulated pneumatic servo systems, *ASME Transaction Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 128, No. 3, pp. 663–669, 2006.
- [20] T. Nguyen, J. Leavitt, F. Jabbari, J. E. Bobrow, Accurate sliding-mode control of pneumatic systems using low-cost solenoid valves, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 12, No. 2, pp. 216–219, 2007.
- [21] N. Hosseingholi Arbab, F. Najafi, Impedance control of a pneumatic actuator with solenoid on/off valves, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 12–20, 2014. (in Persian)
- [22] M. C. Shih, C. Hwang, Fuzzy PWM control of the positions of a pneumatic robot cylinder using high speed solenoid valve, *JSME International Journal*, Vol. 40, No. 3, pp. 469–476, 1997.
- [23] M. C. Shih, M. Ma, Position control of a pneumatic rodless cylinder using fuzzy PWM control method, *Mechatronics*, Vol. 41, No. 2, pp. 241–253, 1998.
- [24] M. Taghizadeh, A. Ghaffari, F. Najafi, Multimodel PD-control of a pneumatic actuator under variable loads, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 48, No. 5, pp. 655–662, 2010.
- [25] K. J. Astrom, B. Wittenmark, *Adaptive Control*, Second Edition, Dover publications INC, New York, 2008.
- [26] D. Li, G. Cheung, Study of Models for Predicting the Diffuse Irradiance on Inclined Surfaces, *Elsevier Applied Energy*, Vol. 81, No. 2, pp. 170–186, 2005.

PWM به جای استفاده از شیر گران قیمت سرو یا پروپرشنال است. الگوریتم رگولاتورهای خودتنظیم در طراحی کنترل کننده تطبیقی پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفت. کنترل کننده طراحی شده از طریق یک کارت واسط کامپیوتری روی سیستم سرونیوماتیک مدلظر اعمال شده و عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفت. عملکرد مطلوب کنترل کننده تطبیقی به ازای گسترهی کامل تغییرات بار، توسط آزمایش های صورت گرفته مورد تأیید قرار گرفته است. سپس به منظور مقایسه عملکرد کنترل کننده پیشنهادی در این مقاله با عملکرد کنترل کننده تنسابی - مشتق گیر و کنترل کننده چند مدل دو آزمایش طراحی و انجام شد. همان طور که انتظار می رفت در شرایط بارگذاری متغیر با دامنه تغییرات گسترده، مشاهده شد که استفاده از یک کنترل کننده ثابت تنسابی مشتق گیر عملکرد مطلوبی ندارد. کنترل کننده تطبیقی مشکل گستینگی کنترل کننده چند مدل را به خوبی مرتفع نموده است؛ اما با توجه به زمان لازم برای شناسایی مدل سیستم در کنترل تطبیقی، این کنترل کننده در صورتی عملکرد مطلوب دارد که تغییرات بار سیستم خیلی سریع نباشد.

## 6- 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] 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.
- [3] 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.
- [4] S. Goldstein, H. Richardson, A differential pulse-width modulated pneumatic servo utilizing floating flapper disc switching valves, *ASME Transaction Journal of Basic Engineering, Series C*, Vol. 90, No. 2, pp. 143–151, 1968.
- [5] T. Noritsugu, Development of PWM mode electro-pneumatic servomechanism, Part I: Speed control of pneumatic system, *Journal Fluid control*, Vol. 17, No. 2, pp. 7–28, 1987.
- [6] T. Noritsugu, Development of PWM mode electro-pneumatic servomechanism, Part II: Position control of pneumatic system, *Journal Fluid control*, Vol. 17, No. 2, pp. 65–79, 1987.
- [7] V. Varseveld, G. Bone, Accurate position control of a pneumatic actuator using on/off solenoid valves, *IEEE/ASME Transaction Mechatron*, Vol. 2, No. 3, pp. 195–204, 1997.
- [8] M. Taghizadeh, A. Ghaffari, F. Najafi, Increased tracking ability of pulse width modulation-driven pneumatic servo systems via a modified pneumatic