

## تعیین ضرایب کنترل گر PID با استفاده از الگوریتم هم تکاملی HDREP در کنترل موقیت سیستم سروو هیدرولیک

حسین عبدالله زاده<sup>۱</sup>، رضا حمزه لو<sup>۲\*</sup>، امیر رفاهی اسکویی<sup>۳</sup>

1 - دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران  
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران  
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران  
\* تهران، صندوق پستی 16785-163، rehamzeloo@sru.ac.ir

### چکیده

در میان پژوهشهای صورت گرفته بر روی سیستم سروو هیدرولیک موضوع کنترل موقعیت از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد. علت این امر ناشی از رفتار غیر خطی شیر سروو در یک سیستم الکترو هیدرولیک می‌باشد. این رفتار ریشه در میزان اصطکاک، متغیر بودن بار وارد شده به سیستم، جریان غیر خطی دبی سیال در شیر، مدل غیر خطی عدم قطعیت-های سیستم، ناشناخته بودن اغتشاش خارجی و پیچیدگی ساختار درونی خود شیر دارد. به همین دلیل کنترل موقعیت بیشترین سهم در پژوهش‌ها را به خود اختصاص داده است. از این رو تنظیم پارامترهای کنترل گر از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش برای تنظیم پارامترهای کنترل گر از الگوریتم هم تکاملی<sup>۱</sup> HDREP استفاده شده است و روش ITAE<sup>۲</sup> بعنوان تابع هدف تعیین شده است. برای مشخص کردن میزان تاثیر این الگوریتم در بهینه‌سازی پارامترهای کنترل گر نتایج با خروجی دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی<sup>۳</sup> GA<sup>۴</sup>، PSO<sup>۵</sup> و DE<sup>۵</sup> مقایسه گردیده است. با توجه به مقایسه صورت گرفته روش پیشنهادی توانایی بهتری در یافتن ضریب‌های بهینه دارد. با استفاده از راه حل ارائه شده در کنترل موقعیت یک سیستم سروو هیدرولیک پاسخ سیستم به میزان قابل توجهی بهبود یافت. در مقایسه با روش‌های دیگر برای ضرایب بدست آمده از روش الگوریتم HDREP نسبت به الگوریتم ژنتیک زمان صعود (۴۸٪) و زمان نشست (۴۴.۸٪) و نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات زمان صعود (۵۵.۷٪) و زمان نشست (۵۲٪) و نسبت به الگوریتم تکامل تفاضلی زمان صعود (۵۵.۷٪) و زمان نشست (۵۷٪) کاهش یافته‌اند و فراجاهش در تمام موارد وجود ندارد.

### کلیدواژگان

سیستم مرکب سروو هیدرولیک، کنترل گر PID، کنترل موقعیت، بهینه سازی، الگوریتم هم تکاملی.

<sup>1</sup> Hybrid-Deferential Evolution- Receptor Editing- PSO

<sup>2</sup> Integral Time Absolute Error

<sup>3</sup> Genetic Algorithm

<sup>4</sup> Particle Swarm Optimization

<sup>5</sup> Deferential Evolution

## PID controller parameter tuning by a co-evolutionary algorithm (HDREP) in servo hydraulic position control systems

Hosein Abdollahzadeh<sup>1</sup>, Reza Hamzeloo<sup>1\*</sup>, Amir Refahi Oskoei<sup>1</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 16785-163 Tehran, Iran, rehamzeloo@sru.ac.ir

### Abstract

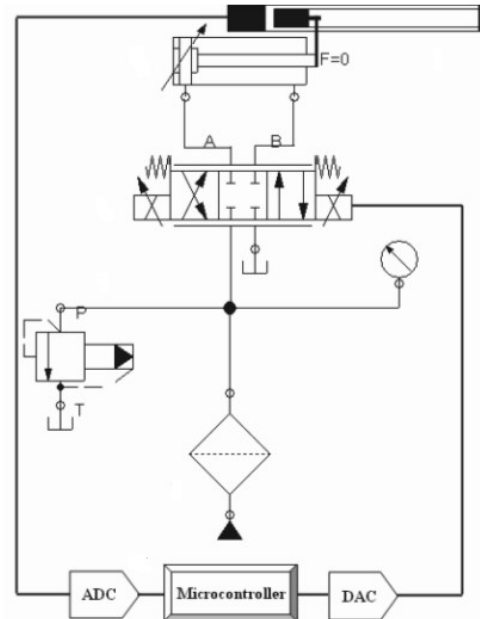
Amount of implemented researches on electro hydraulic servo system, the position control is accentuated. This is because of nonlinear behavior of servo valve in an electro hydraulic servo system. This nonlinear behavior is because of exhibiting strong friction, variable inertia mechanical loads, nonlinear fluid flow in valve, the uncertainties, unknown external disturbances and its complex structure of servo valve. There for position control allocated the major part of researches. The characteristics of these non-linear components are usually not known exactly as structure or parameters. For these reasons, tuning of the traditional PID controller parameters to control this system for the required performance faces a strong challenge. In this paper to tune PID parameters a hybrid algorithm HDREP is applied. The ITAE index is used as the optimization objective function. To determine its effect on the optimization of PID parameters, the results of the hybrid approach for the case study were compared with those of GA, PSO, and DE algorithms. It is found that the introduced algorithm has better ability to find optimum parameters. In compare with linear approach for achieved parameters by genetic algorithm the rising time (48%) and settling time (44.8%) and also for achieved parameters by PSO algorithm the rising time (55.7%) and settling time (52%) and also for achieved parameters by DE algorithm the rising time (55.7%) and settling time (57%) are decreased also maximum over shoot for all of them is zero.

### Keywords

Hydraulic servo system (HSS) , proportional- integral-derivative (PID) , position control, Optimization, Co-evolutionary algorithm.

#### ۱- مقدمه

سیستم سروو هیدرولیک بعلت توانایی ایجاد نیروی دقیق و زیاد نسبت به ابعاد کوچک خود در کاربری‌های صنعتی و غیر صنعتی بسیار محبوب می‌باشد [۱]. این محبوبیت نه فقط برای توانایی سیستم در تامین نیروی بالای مورد نیاز بوده بلکه بیشتر برای توانایی کنترل دقیق پاسخ مورد نیاز می‌باشد. بعنوان مثال این سیستم در تجهیزات سیار حمل اجسام سنگین، دستگاه‌های حفاری، سیستم‌های جابجایی مواد، ماشین‌های ابزار، شبیه‌سازهای پرواز، غلطک‌های نورد و کنترل سطح پرواز در هواپیماها کاربرد دارد. یک سیستم سروو هیدرولیک از هماهنگی اجزای گوناگون بدست می‌آید که برای دست‌یابی به حالت مورد نظر از انتقال نیروی هیدرولیک هماهنگ شده‌اند. این سیستم در شکل ۱ نشان داده شده است و از تجهیزاتی همچون شیر سروو، منبع تامین نیرو، سنسورها (موقعیت، سرعت، نیرو یا فشار) و عملگر تشکیل شده است [۲]. مسایل مربوط به کنترل سروو هیدرولیک را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد، کنترل موقعیت (مکان، سرعت و شتاب) و کنترل نیرو و گشتاور. وظیفه اصلی یک سیستم کنترل دست‌یابی به پاسخ مورد نظر می‌باشد بعنوان مثال در یک سیستم کنترل موقعیت، سیلندر باید مسیر تعیین شده توسط کاربر را تعقیب کند.



شکل ۱ نمونه یک سیستم سروو هیدرولیک در کنترل موقعیت [۲]

در پژوهش‌های انجام شده برای کنترل سیستم‌های الکتروهیدرولیکی روند مشابهی وجود دارد و می‌توان گفت همگی از آن پیروی کرده‌اند. معمولاً در این پژوهش‌ها درگام نخست به مدل‌سازی و شبیه‌سازی رفتار سیستم با استفاده از روش‌های گوناگون پرداخته شده است. در برخی پژوهش‌ها برای خطی‌سازی و آسان‌سازی عملیات کنترل، از جعبه ابزار شناسایی سیستم متلب استفاده شده است تا برای سیستم یک تابع تبدیل تعیین گردد. در

دیگر پژوهش‌ها از همان مدل شبیه‌سازی شده در محیط سیمولینک متلب استفاده گردیده است. در مرحله بعد به بررسی عملکرد سیستم با استفاده از کنترل‌گرهای گوناگون پرداخته شده است. استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف جهت بدست آوردن پارامترهای بهینه گنترلگر در بیشتر پژوهش‌ها انجام شده است. برخی از پژوهشگران نیز با استفاده از شیوه‌ها و روش‌های نوین و ابتکاری در راستای کنترل بهتر سیستم تلاش کرده‌اند.

پژوهش‌های پیرامون کنترل سیستم‌های سروو هیدرولیک با مدل‌سازی رفتار دینامیکی سیستم آغاز می‌گردند. مهمترین مشکلی که پژوهشگران در هنگام شبیه‌سازی با آن روبرو هستند چگونگی دست‌یابی به مدلی است که بتواند رفتاری مشابه با رفتار حقیقی سیستم نمایش دهد. بنابراین می‌توان گفت دست‌یابی به یک مدل مناسب نقطه شروع یک فرآیند کنترل است [۱]. یکی از پژوهش‌های جامع در این زمینه توسط آقای مقدی و همکارانش انجام شده است. سیستم مورد مطالعه توسط ایشان یک مدل آزمایشگاهی تشکیل شده از دو سیلندر می‌باشد که بصورت متقارن به هم وصل گردیده و توسط یک شیر سروو کنترل می‌شوند. ابتدا با استفاده از روابط ریاضی حاکم بر سیستم و بوسیله محیط سیمولینک نرم افزار متلب<sup>۱</sup> رفتار دینامیکی سیستم شبیه‌سازی شده است. و جهت کنترل بهتر و آسانتر رفتار غیر خطی سیستم با استفاده از جعبه ابزار شناسایی سیستم نرم افزار متلب تابع تبدیل سیستم تخمین زده شده است. در ادامه برای بهبود عملکرد سیستم با استفاده از کنترل‌گرهای (تناسبی- انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر)<sup>۲</sup> و (تناسبی- انتگرال‌گیر)<sup>۳</sup> به کنترل سیستم پرداخته‌اند. ضرایبی کنترل‌گر بوسیله الگوریتم ازدحام ذرات و با در نظر گرفتن دو تابع هدف متفاوت (انتگرال خطای مطلق)<sup>۴</sup> و (انتگرال مربع خطا)<sup>۵</sup> بدست آمده است. در انتها شبیه‌سازی بدست آمده را با نتایج حاصل از آزمایش‌ها مقایسه کرده‌اند [۱]. در پژوهش آقای ینگ کوینگ و همکارانش نیز به کنترل موقعیت توسط یک مدل آزمایشگاهی متشکل از یک سیلندر که توسط یک شیر سروو کنترل می‌شوند پرداخته شده است. به بیان ایشان کنترل موقعیت مهمترین بخش در سیستم سروو هیدرولیک می‌باشد. مدل ریاضی سیستم بوسیله آنالیز رفتار سیستم تعیین گردیده است. در ادامه برای برطرف کردن کندی پاسخ سیستم، دقت کم و توانایی کم در برخورد با اغتشاش از کنترل‌گر (تناسبی- انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر) استفاده کرده‌اند. ضرایبی کنترل‌گر بوسیله الگوریتم ژنتیک تنظیم شده‌اند و در تابع هدف بجز کمینه کردن میزان خطا از وزن دهی بیشترین مقدار فراجاهش و زمان صعود نیز استفاده شده است. جهت حذف اغتشاش در سیستم فیلتر کالمن به انتهای مدار کنترلی اضافه شده است [۳]. در پژوهش ژنیونگ و ژاویو سو برای کنترل میزان دوران یک موتور هیدرولیکی با کنترل سیال ورودی از سیستم سروو هیدرولیک استفاده شده است. برای کنترل این فرآیند از مدل‌سازی فضای حالت بعلاوه سیستم کنترلی مد لغزشی<sup>۶</sup> استفاده گردیده است. برای

<sup>1</sup> SIMULINK\MATLAB

<sup>2</sup> PID: Proportional- Integrator-Derivative

<sup>3</sup> PI: Proportional- Integrator

<sup>4</sup> IAE: Integral Absolute Error

<sup>5</sup> ISE: Integral Square Error

<sup>6</sup> SMC: Sliding Mode Control



در یک بالابر پیشنهاد داده‌اند. روش ایشان بر اساس روش مدل مرجع<sup>۶</sup> بوده، که با تغذیه و اصلاح پارامترهای کنترل‌گر (تناسبی-انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر) تلاش در رفع خطای سیستم داشته است. در این پژوهش پس از مدل‌سازی سیستم با استفاده از سیمولینک و معادلات فضای حالت رفتار دینامیکی سیستم با کنترل‌گر (تناسبی-انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر) کنترل گردیده است. نخست با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات و تابع هدف (انتگرال خطای مطلق در زمان)<sup>۷</sup> ضرایبی بهینه بدست آمده است و در گام بعد با معرفی یک مدل درجه دو بعنوان مرجع مورد نیاز تعریف گردیده است در نهایت روش تطبیقی معرفی و بکار گرفته شده است [۱۰]. کنترل‌گر (تناسبی-انتگرال‌گیر- مشتق-گیر) بعلاوه سادگی و کارایی بالا بصورت گسترده‌ای در سیستم‌های سروو هیدرولیک استفاده می‌شوند. انتخاب پارامترهای بهینه در کارایی این کنترل-گر بسیار تاثیر گزار است از اینرو در برخی از پژوهشها فقط به بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌گر پرداخته شده است و روشهای مختلف و نتایج آنها با هم مقایسه و بررسی گردیده است. بعنوان مثال عمر و همکارانش به تنظیم و بهینه کردن پارامترهای کنترل‌گر (تناسبی-انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر) با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات در کنترل موقعیت یک نمونه آزمایشگاهی تشکیل شده از شیر سروو و سیلندر هیدرولیکی پرداخته‌اند [۹]. در پژوهش دیگر تاناسک و ووده‌چی برای به بررسی، مقایسه و بهینه‌سازی رفتار سیستم شیر سروو با استفاده از الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات نسبت به روش زیگلر نیکولز در کنترل موقعیت یک نمونه آزمایشگاهی تشکیل شده از شیر سروو و سیلندر هیدرولیکی پرداخته‌اند [۱۱].

از الگوریتم‌های هم تکاملی در صنعت استفاده‌های فراوانی می‌شود برای نمونه در مرجع [۱۲] شیوه‌ای ترکیبی و نوآورانه برای بهینه‌سازی با استفاده از درهم آمیختن الگوریتم تفاضل تکاملی و ویرایش دریافت کننده از الگوریتم ایمنی بدن ارائه داده است. و با استفاده از این روش به بهینه سازی فرآیند فرزکاری پرداخته است.

در این تحقیق با استفاده از پژوهش‌های پیشین برای بهبود رفتار سیستم سروو هیدرولیک در کنترل موقعیت سیلندر و شیر سروو با استفاده از تنظیم و اصلاح پارامترهای کنترل‌گر از الگوریتم هم تکاملی استفاده شده است. در انتها کارایی و میزان بهبود عملکرد سیستم با مقایسه نتایج بدست آمده از دیگر روشهای بهینه سازی مشخص گردیده است.

## ۲- مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم مرکب سروو هیدرولیک

مدل ریاضی که برای سیستم شیر سروو توسعه داده می‌شود می‌بایست تمام عوامل غیر خطی را در بر بگیرد. شمانتیک و تصویر سیستم مورد بررسی در شکل ۲ نمایش داده شده است. روش مدل‌سازی ایشان در ادامه آورده شده است.

تنظیم پارامترهای کنترل‌گر از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات پیوسته<sup>۱</sup> برای برطرف کردن عیوب غیر خطی در سیستم سروو هیدرولیک و خنثی کردن اثر اغتشاش استفاده شده است [۴]. به بیان ژینهایوچی و همکارانش سیستم سروو هیدرولیک بیشتر مواقع تحت تاثیر دو پارامتر عدم قطعیت و اغتشاش قرار می‌گیرد. وجود این دو پدیده سبب کاهش دقت سیستم می‌شود. آنها روشی تطبیقی بر اساس کنترل مد لغزشی جهت کنترل سروو هیدرولیک در یک نمونه آزمایشگاهی متشکل از یک سیلندر که توسط یک شیر سروو کنترل می‌شوند پیشنهاد داده‌اند. در ابتدا با استفاده از معادلات فضای حالت به مدل‌سازی ریاضی سیستم پرداخته و سپس کنترل‌گر به روش مد لغزشی طراحی شده است [۵]. در پژوهش آقای سید عیسی و همکارانش مدلی به نام (مدل کنترلی پیش‌بینی کننده)<sup>۲</sup> در جهت کنترل دقیق و کاربردی نیرو در یک سیستم پرس هیدرولیکی معرفی شده است. علاوه بر آن روشی کنترلی به نام روش توانهای شکسته<sup>۳</sup> را بکار برده‌اند، و با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی پارامترهای آن پرداخته‌اند [۶]. منگی لی و همکارانش روشی برای کنترل سرعت در یک بالابر که دارای دو جک متقارن بوده و به بالا و پایین وزنه متصل شده‌اند با هدف کاهش همزمان انرژی مصرفی سیستم پیشنهاد داده‌اند. روش کنترل موازی آنها از دو شیر سروو و یک پمپ دبی متغیر تشکیل شده است. برای این روش یک استراتژی دوگانه مجزا در نظر گرفته شده بگونه‌ای که از پمپ دبی متغیر جهت کنترل سرعت و نشستی‌های سیستم استفاده شده و از شیر سروو برای بهبود و کنترل رفتار و دقت سیستم حلقه بسته استفاده گردیده است. برای پیش‌بینی عدم قطعیت‌های سیستم از روش شبکه عصبی<sup>۴</sup> استفاده کرده‌اند و از روش پایداری لیاپانوف نیز جهت بررسی پایداری سیستم استفاده شده است [۷]. آقای تیاوی و همکارانش به بررسی افزایش راندمان یک شیر سروو با کنترل کردن جریان متغیر ورودی و فشار در هنگام فرآیند کنترل موقعیت در یک نمونه آزمایشگاهی تشکیل شده از شیر سروو، شیر کنترل فشار و سیلندر پرداخته‌اند. برای این منظور یک ساختار کنترل فشار در سیستم شیر سروو پیشنهاد داده‌اند و با استفاده از قوانین پایه فیزیک به استخراج روابط مورد نیاز پرداخته شده است [۸]. آقای یون یان و همکارانش به مدل‌سازی رفتار غیر خطی و شناسایی سیستم سروو هیدرولیک مورد استفاده در یک بیل مکانیکی پرداخته‌اند. برای مدل‌سازی فضای غیر خطی حاکم بر سیستم و بدست آوردن حالات گوناگون غیر خطی حاکم بر دینامیک سیستم و مشخص کردن رفتار این آنها از روش همسترین وینر<sup>۵</sup> استفاده شده است. این مدل از یک بلوک استاتیکی ثابت با دو بخش غیر خطی چند جمله‌ای و یک بلوک خطی ثابت نسبت به زمان و یک بلوک خروجی ثابت با یک چند جمله‌ای غیر خطی تشکیل شده است. در انتها برای اعتبار سنجی مدل خود را با نتایج عملی و خروجی دیگر روشهای شناسایی سیستم مقایسه کرده‌اند [۹]. آقای ایمان علی روشی تطبیقی برای حل مشکلات کنترلی ناشی از رفتار غیر خطی موجود در سیستم سروو هیدرولیک

<sup>1</sup> QPSO: Quantum Particle Swarm Algorithm

<sup>2</sup> MPC: Model Predictive Control

<sup>3</sup> FOC: Fractional Order Control

<sup>4</sup> RBFNN: Radial Basis Function Neural Network

<sup>5</sup> H-W: Hammerstein- Wiener

<sup>6</sup> MR: Model Reference

<sup>7</sup> ITAE: Integral Time Absolute Error

$$\frac{X_p}{X_v} = \frac{\frac{K_q}{A_p}}{\frac{s^3}{\omega_h^2} + \frac{2C_h}{\omega_h} s^2 + s} \quad (2)$$

جریان  $Q$  بی بار سیستم  $P_L = 0$  نیز بصورت (۳) بدست می‌آید.

$$Q = K_Q X_v \quad (3)$$

پس می‌توان با باز نویسی رابطه ۲ نسبت جریان به جابجایی را بصورت رابطه ۴ نوشت.

$$\frac{X_p}{Q} = \frac{\frac{1}{A_p}}{\frac{s^3}{\omega_h^2} + \frac{2C_h}{\omega_h} s^2 + s} \quad (4)$$

سیگنال ورودی به سیستم سروو از نوع جریان و خروجی آن دبی بی بار سیستم بوده که مقداری غیر خطی است. فرم تابع انتقال آن بسته به بزرگی فرکانس طبیعی قسمت قدرت است و هرگاه نزدیک به هم هستند می‌توان نوسانات سیستم را با تابع درجه دو تخمین زد.

$$\frac{Q}{I} = \frac{K_f}{\frac{s^2}{\omega_f} + \frac{2C_f}{\omega_f} s + 1} \quad (5)$$

که  $K_S$  ضریب جریان شیر ،  $\omega_f$  فرکانس طبیعی شیر و  $C_f$  ضریب میرایی شیر است.

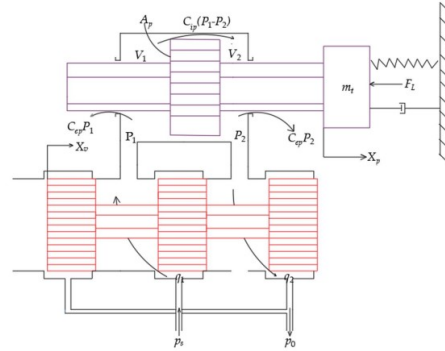
سیگنال فرمان جابجایی بصورت سیگنال ولتاژی اعمال می‌گردد و سیگنال ورودی به شیر از نوع جریان می‌باشد بنابراین نیاز به قرار دادن یک تشدیدگر در بین سیگنال ورودی و سروو احساس می‌شود. رابطه (۶) نسبت تشدید کننده را بیان می‌کند.

$$K_a = \frac{I}{\Delta U} \quad (6)$$

که  $\Delta U$  تغییرات بین سیگنال ورودی و پسخور بوده و ضریب پسخور نیز از رابطه (۷) بدست می‌آید.

$$K_{fk} = \frac{U_c}{X_p} \quad (7)$$

در نهایت نمودار بلوکی سیستم در شکل ۳ داده شده است.



شکل ۲ شماتیک سیستم شیر مورد استفاده در شبیه سازی و کنترل سیستم سروو هیدرولیک [۳]

اساس سیستم شیر کنترل در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل فشار روغن مورد نیاز سیستم،  $p_0$  فشار سیال برگشتی از سیستم،  $q_1$  جریان روغن ورودی به سیستم و  $q_2$  جریان روغن خروجی به سیستم،  $X_v$  میزان جابجایی اسپول شیر بعنوان ورودی سیستم،  $p_1$  و  $p_2$  فشار سیال ورودی به قسمت ۱ و ۲ سیلندر هستند،  $C_{ep}$  ضریب نشتی خارجی وابسته به فشار سیلندر،  $C_{ip}$  ضریب نشتی داخلی وابسته به فشار سیلندر،  $V_1$  و  $V_2$  حجم روغن در دو قسمت ورودی و خروجی سیلندر هستند،  $A_p$  سطح مقطع موثر پیستون ،  $m_t$  جرم موثر پیستون و بار،  $F_L$  نیروی خارجی وارد به پیستون و  $X_p$  جابجایی موثر پیستون هستند.

در حالت بی بار  $F_L = 0$  تابع تبدیل بین میزان جابجایی سیلندر و میزان جابجایی اسپول به شکل رابطه (۱) نوشته می‌شود. برای ساده سازی ثابت های  $K_h$ ،  $\omega_h$  و  $\zeta_h$  تعریف می‌گردند.

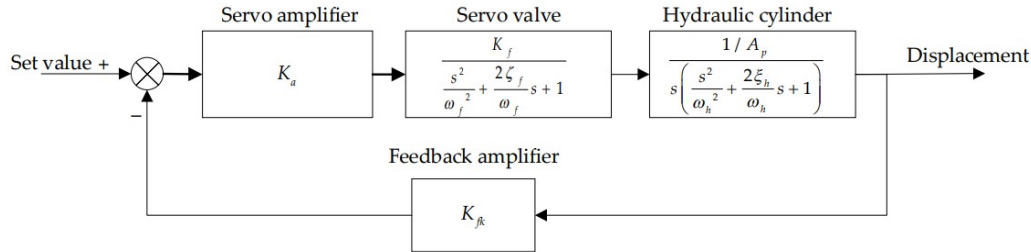
$$\frac{X_p}{X_v} = \frac{\frac{K_q}{A_p}}{\frac{V_t m_t}{4\beta_e A_p^2} s^3 + \left( \frac{m_t K_{ce}}{A_p^2} + \frac{B_p V_t}{4\beta_e A_p^2} \right) s^2 + s} \quad (1)$$

$$K_h = \frac{2\beta_e A_p^2}{V_t}$$

$$\omega_h = \sqrt{\frac{K_h}{m_t}}$$

$$\zeta_h = \frac{K_{ce}}{2A_p} \sqrt{\frac{2\beta_e m_t}{V_t}} + \frac{B_p}{2A_p} \sqrt{\frac{V_t}{2\beta_e m_t}}$$

که  $K_h$  ضریب سختی فنریت سیال تحت فشار،  $\omega_h$  فرکانس طبیعی سیستم هیدرولیک و  $\zeta_h$  ضریب میرایی سیستم است. با توجه به رابطه بالا در نهایت رابطه ۲ نتیجه می‌گردد.



شکل ۳ نمودار بلوکی شبیه سازی سیستم سروو هیدرولیک توسط ینگ کونگ [۳]

### ۳- کنترلگر (PID) تناسبی-انتهگرالگیر- مشتقگیر

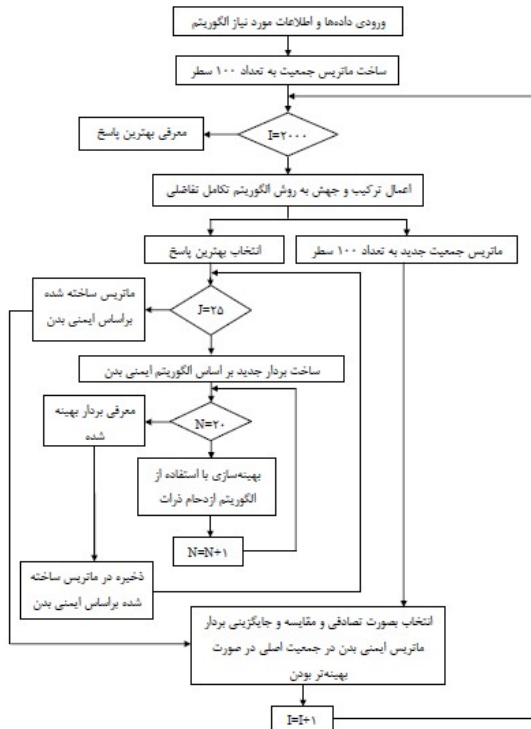
کنترلگر PID پرکاربردترین نوع کنترلگر در سیستمهای پسخوردار بوده و بصورت گسترده در سیستمهای کنترلی مورد استفاده قرار میگیرد. مهمترین هدف از استفاده این نوع کنترلگر کم کردن اختلاف بین خروجی و فرمان ورودی سیستم با تنظیم پارامترهای کنترلگر می باشد. رابطه ریاضی مورد استفاده در این نوع کنترلگر در ادامه (۸) آورده شده است [۱۳].

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

که  $U(t)$  خروجی کنترلگر،  $y(t)$  خروجی سیستم،  $K_p, K_i, K_d$  به ترتیب ضریبها تناسبی، انتگرال گیر و مشتق گیر بوده و  $e(t)$  خطای سیستم هستند.

### ۴- الگوریتم بهینه سازی هم تکاملی HDREP

الگوریتم هم تکاملی معرفی شده توسط عبدالله زاده و پناهی زاده [۱۲] معرفی گردیده و در بهینه سازی فرآیند فرزندکاری از آن استفاده کرده اند. این الگوریتم بر اساس الگوریتم تکامل تفاضلی پایه ریزی شده است از آنجایی که بزرگترین مشکل این روش گیرکردن در بهینه های محلی است برای غلبه بر این موضوع قسمت ویرایش دریافت کننده از الگوریتم ایمنی بدن به آن افزوده شده است در راستای اثر بخشی بیشتر این الگوریتم آنتی بادی های ساخته شده با بهینه سازی ضریب آلفا توسط الگوریتم ازدحام ذرات تقویت می گردند. این روش بطور کامل در مرجع یاد شده توضیح داده شده است. فلوجارت الگوریتم مذکور در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴ فلوجارت الگوریتم هم تکاملی استفاده شده در بهینه سازی فرزندکاری توسط عبدالله زاده و پناهی زاده [۱۲]

### ۵- شبیه سازی و نتایج

در این پژوهش از تابع تبدیل یک سیستم مرکب سروو هیدرولیک که پیشتر در مرجع [۱۴] بدست آمده استفاده گردیده است. این تابع تبدیل توسط رابطه ۹ نشان داده شده است. از آنجایی که در بهینه سازی هدف بدست آوردن پارامترهای بهینه با کمترین هزینه می باشد از روش انتگرال زمان مطلق خطا بعنوان تابع هدف استفاده شده است. استفاده از این تکنیک

نشان می دهد. همانگونه که از جدول ۱ مشخص است پارامترهای بدست آمده با الگوریتم HDREP دارای کمترین مقدار فراجهش، سریعترین زمان صعود و زمان نشست را با کمترین میزان ITAE را در بین الگوریتمها به خود اختصاص داده اند.

جدول ۱ ضریبهای کنترل بدست آمده به همراه پاسخ سیستم نسبت به ورودی پله

پارامترهای کنترل گر	PSO	GA	DE	HDREP
$K_p$	۷.۸۵	۸.۴۳۲۱	۸.۲۱۱	۱۴.۳۶۰۴
$K_i$	۰.۱۵	۰.۰۲۳۴	۰.۰۱۴	۲.۴۷۲۷e۵
$K_d$	۰.۰۰۸۷	۰.۰۰۵۲	۰.۰۴۳۲۴	۳.۶۲۴۳e۵
ITAE	۰.۳۷۱۶	۰.۲۶۵۵	۰.۴۷۲۶	۰.۰۸۵۸
$M_p$ %	۰	۰	۰	۰
$T_r$	۰.۰۶۰۶	۰.۰۵۲۱	۰.۰۶۰۶	۰.۰۲۶۸
$T_s$	۰.۱۲۶۱	۰.۰۹۶۳	۰.۱۱۲۶	۰.۰۵۳۱

پاسخ سیستم نسبت به ورودی پله در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل نیز مشخص است که بهترین پاسخ توسط الگوریتم پیشنهادی بدست آمده و سیستم بهترین عملکرد را از خود نشان می دهد و پاسخ سیستم به مقدار مورد نظر با کمترین فراجهش و بیشترین سرعت همگرا شده است. همچنین در جدول ۲ درصد میزان بهبود پاسخ نسبت به دیگر روشه نیز آورده شده است.

جدول ۲ درصد بهبود پاسخ سیستم توسط الگوریتم HDERS

روش	درصد بهبود $T_s$	درصد بهبود $T_r$
GA	۴۴.۸	۴۸
PSO	۵۲	۵۵.۷
DE	۵۷	۵۵.۷

معمولا به بدست آوردن پارامترهای بهینه کنترل گر نتیجه می شود. در بهینه سازی کنترل گر از یکی از چهار روش زیر بعنوان تابع هدف استفاده می گردد ISE، IAE، ITAE و  $ITSE^1$  [۱۴].

در بیشتر مقالات از روش ITAE بعنوان تابع هدف استفاده می گردد و این روش نشان داده که توانای دست یابی به پاسخ بهینه را با سرعت و دقت بیشتری انجام می دهد. [۱۴] رابطه ۱۰ این روش را بیان می کند.

$$G(s) = \frac{4.63}{4.528 \times 10^{-12}s^5 + 4.1988 \times 10^{-9}s^4 + 5.1725 \times 10^{-6}s^3 + 0.002s^2} \quad (9)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (10)$$

که  $e(t)$  و  $t$  زمان و  $e(t)$  خطا در لحظه می باشد. برای بررسی میزان کارایی الگوریتم مورد نظر (HDREP) در این مقاله نتایج حاصل از این روش در بهینه سازی پارامترهای کنترلگر با دیگر روشهای بهینه سازی همانند PSO، GA و DE مقایسه گردیده است.

برای الگوریتم PSO پارامترها بصورت:  $C1=C2=2$  و ضریب اینرسی  $W=1$ .

برای الگوریتم GA پارامترها بصورت:  $Cp=0.7$  و  $Pm = 0.02$

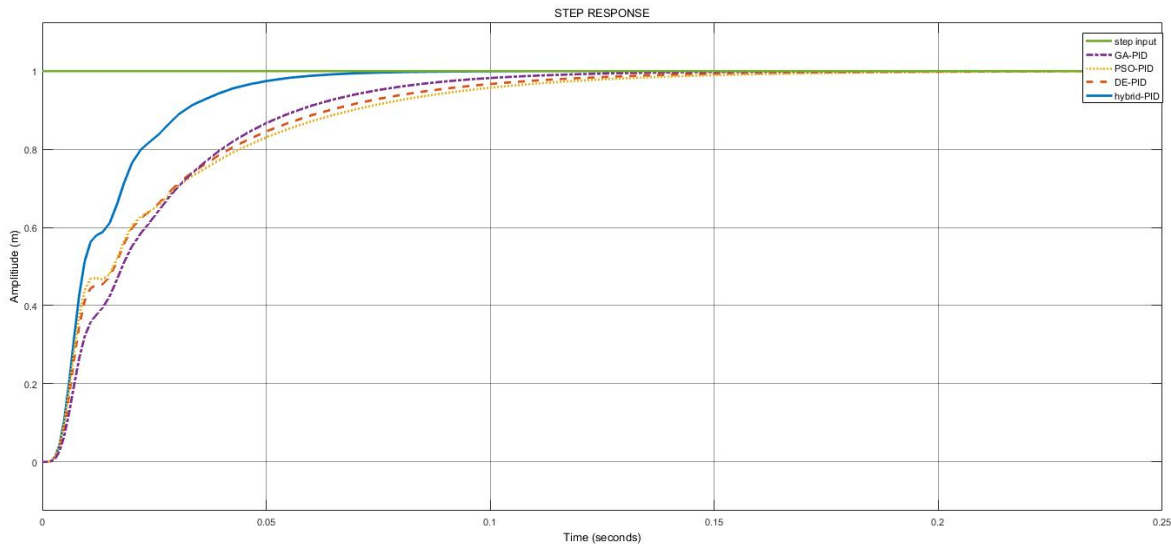
برای الگوریتم DE پارامترها بصورت:  $SF=0.8$  و  $CC=0.95$

تعیین گردیدند و برای الگوریتم HDREP پارامترها بصورت  $SF=0.8$  و  $CC=0.95$  و  $\alpha$  بعنوان پارامتر هم تکاملی انتخاب گردید که در الگوریتم فوق  $C1=C2=2$  و ضریب اینرسی  $W=1$  تعیین گردیدند.

برای PSO، GA و DE تعداد جمعیت اولیه ۵۰ عدد و تعداد تکرار الگوریتم ۲۰۰ بار تنظیم گردیده است. اما در الگوریتم HDREP تعداد جمعیت ۲۰ عدد و تعداد تکرار نیز ۲۰ بار تنظیم گردید. جمعیت آنتی بادی ها در قسمت ویرایش دریافت کننده ۵ عدد و تعداد تکرار حلقه هم تکاملی ۵ بار تعیین گردیده است. حد بالا و پایین (۰ و ۲۰) تعیین شده است.

در جدول ۱ نتایج بر اساس میزان ITAE، فراجهش  $M_p$ ، زمان صعود  $T_r$ ، زمان نشست  $T_s$  و ضریبهای بدست آمده از هر الگوریتم آورده شده است. می توان گفت فراجهش پایداری سیستم را بیان می کند و زمان صعود سرعت پاسخ دهی سیستم را آشکار می سازد و زمان نشست تطبیق پذیری سیستم را

<sup>1</sup> Integral Time Square Error



شکل ۵ نمودار پاسخ سیستم نسبت به ورودی پله با ضریبهای بدست آمده از روشهای ژنتیک، ازدحام ذرات، تکامل تفاضلی و روش هم تکاملی HDREP

زمان صعود (۰.۵۵۷) و زمان نشست (۰.۵۲) و نسبت به الگوریتم تکامل تفاضلی  
زمان صعود (۰.۵۵۷) و زمان نشست (۰.۵۷) کاهش یافته اند و فرآجهش در  
تمام موارد وجود ندارد.

#### ۷- مراجع

- [1] M.A. Aboeela, M.E.-S.M. Essa, M.M. Hassan, *Modeling and identification of hydraulic servo systems*, International Journal of Modelling and Simulation, 38(3) (2018) 139-149.
- [2] D. Maneetham, N. Afzulpurkar, *Modeling, simulation and control of high speed nonlinear hydraulic servo system*, Journal of Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems, 4 (2010) 94-103.
- [3] Y.-Q. Guo, X.-M. Zha, Y.-Y. Shen, Y.-N. Wang, G. Chen, *Research on PID position control of a hydraulic servo system based on Kalman genetic optimization*, in: Actuators, MDPI, 2022, pp. 162.
- [4] X. Zheng, X. Su, *Sliding mode control of electro-hydraulic servo system based on optimization of quantum particle swarm algorithm*, Machines, 9(11) (2021) 283.
- [5] X. Ji, C. Wang, Z. Zhang, S. Chen, X. Guo, *Nonlinear adaptive position control of hydraulic servo system based on sliding mode backstepping design method*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 235(4) (2021) 474-485.
- [6] M.E.-S.M. Essa, M.A. Aboeela, M. Moustafa Hassan, S. Abdrabbo, *Model predictive force control of hardware implementation for electro-hydraulic servo system*, Transactions of the Institute of Measurement and Control, 41(5) (2019) 1435-1446.
- [7] M. Li, W. Shi, J. Wei, J. Fang, K. Guo, Q. Zhang, *Parallel velocity control of an electro-hydraulic actuator with dual disturbance observers*, IEEE Access, 7 (2019) 56631-56641.
- [8] A. Tivay, M. Zareinejad, S.M. Rezaei, K. Baghestan, *A switched energy saving position controller for variable-pressure electro-hydraulic servo systems*, ISA transactions, 53(4) (2014) 1297-1306.

#### ۶- نتیجه گیری

سیستمهای سروویدرولیک به دلیل کارایی بالا در موقعیت‌یابی و اعمال نیروی دقیق در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. پدیده‌های غیر خطی در سیستم‌های هیدرولیکی خاص و متنوع هستند و تشخیص و کنترل آنها با روشهای خطی بسیار سخت و دارای پیچیدگی‌های فراوان می‌باشد. به همین سبب تنظیم پارامترهای کنترل‌گر کاری دشوار می‌باشد و در صورت بروز خطا هزینه و پیامدهای منفی زیادی به همراه دارد. در این پژوهش برای بهبود کنترل موقعیت در سیستم مرکب سروو هیدرولیک متشکل از شیر سروو و سیلندر هیدرولیکی از یک الگوریتم هم تکاملی استفاده شده است. اساس کار مدل کنترلی معرفی شده بر ترکیب الگوریتمهای تکامل تفاضلی، ایمنی بدن و ازدحام ذرات استوار می‌باشد. برای مشخص شدن عملکرد روش پیشنهادی و میزان بهبود پاسخ سیستم ضرایب حاصل از سه روش بهینه سازی ژنتیک، ازدحام ذرات و تکامل تفاضلی بکار گرفته و با روش HDREP مقایسه شد. در مقایسه با دیگر روشها الگوریتم HDREP ضرایب بهتری را ارائه داده است. عدم وجود فرآجهش به همراه سرعت پاسخ دهی بالای سیستم بالا و زمان نشست کم و پایداری مناسب سیستم بدست آمده است. فرآجهش می‌تواند در طولانی مدت به سیستم آسیب زده و هزینه تعمیر و نگهداری را بالا ببرد. از اینرو با استفاده از راه حل ارائه شده در کنترل موقعیت سیستم مورد پاسخ سیستم به میزان قابل توجهی بهبود یافت. در مقایسه با روش های دیگر برای ضرایب بدست آمده از روش الگوریتم HDREP نسبت به الگوریتم ژنتیک زمان صعود (۰.۴۸) و زمان نشست (۰.۴۴۸) و نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات





- [9] M. Omar, W. Ali, M. Mostafa, *Auto tuning of PID controller using swarm intelligence*, International review of automatic control, 4(3) (2011) 319-327.
- [10] A.A. Aly, *Model reference PID control of an electro-hydraulic drive*, International Journal of Intelligent Systems and Applications, 4(11) (2012) 24.
- [11] T. Samakwong, W. Assawinchaichote, *PID controller design for electro-hydraulic servo valve system with genetic algorithm*, Procedia Computer Science, 86 (2016) 91-94.
- [12] V.a panahi zade, H. abdollahzade, *A hybrid Algorithm Based on Differential Evolution, Artificial Immune System and Particle Swarm Algorithms for Selection of Optimal Machining Parameters in Milling Operations*. karafan, (2022). (in persia فارسی)
- [13] M. Jelali, A. Kroll, *Hydraulic servo-systems: modelling, identification and control*, Springer Science & Business Media, 2002.
- [14] Y. Fan, J. Shao, G. Sun, *Optimized PID controller based on beetle antennae search algorithm for electro-hydraulic position servo control system*, Sensors, 19(12) (2019) 2727.