

New Method Presentation for PID Controller Design Based on PSO-NM Hybrid Algorithm

Ebrahim Amoupour¹

¹Department of Electrical Engineering, Roudsar and Amlash Branch, Islamic Azad University, Roudsar, Iran.

Abstract

Recently, many investigations have been done on field of PID controller design. In some papers which their main subject matter is electrical machines speed control for aforementioned controller optimization with various algorithm has been used but one of the most important challenges in this field is controller design with high freedom degree. In this research we try to find a new method that can tune PID controller parameters so that more efficient results as compared to others are achieved. At previous researches IPSO and chaotic algorithms are applied for PID controller parameters such as K_i , K_p and K_d design. In all work, it is assumed that object variables have same importance but in this paper these variables have been weighted by proposed PSO-NM hybrid algorithm. Indeed in proposed hybrid algorithm six variables such as PID controller coefficients and weight of object parameters related to system response such as steeling time, maximum overshoot and rise time have been tuned and optimized instead of three PID controller coefficients.

Keywords: PID Design, PSO-NM hybrid algorithm, weighted response parameters.

ارائه روش جدیدی برای طراحی کنترلر PID براساس الگوریتم هایبرید

PSO-NM

ابراهیم عموپور

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رودسر و املش، گروه مهندسی برق، رودسر، ایران.

amoupour1@raiau.ac.ir

چکیده: به تازگی تحقیقات بسیاری در زمینه طراحی کنترلر PID انجام شده است. موضوع بحث شده برخی از مقالات، کنترلر سرعت ماشین های الکتریکی است که از الگوریتم های گوناگونی برای بهینه سازی کنترلر مدنظر استفاده شده است و همواره یکی از مهم ترین چالش ها در این حوزه، طراحی کنترلر با درجه آزادی بالا است. در این مقالات، بیشتر تمرکز بر جست و جوی الگوریتمی با نتایج بهینه تر نسبت به سایرین است تا پارامترها را به گونه ای مناسب تر تخمین بزنند. در برخی از مقالات، پارامترهای کنترلر PID به کمک الگوریتم بهبود یافته PSO، تعیین و بهینه سازی شده اند و الگوریتم PSO آشوبی معرفی شده و برای تعیین پارامترهای کنترلر PID بهینه کنترلر PID به کار گرفته شده است. در تمامی مراجع، روش کار به گونه ای بوده که اهمیت متغیرهای هدف مسئله مدنظر به یک اندازه اهمیت داشته است؛ اما در این پژوهش به کمک الگوریتم هایبرید PSO-NM این متغیرها وزن دهی شدند. در واقع، به جای سه پارامتر برای بهینه سازی، الگوریتم هایبرید اجتماع ذرات و نلدرمید وزن های مربوط به پارامترهای هدف را هم جزء پارامترهایی به حساب می آورد که باید بهینه شوند.

واژه های کلیدی: طراحی PID، الگوریتم هایبرید PSO-NM، پارامترهای وزن دار

۱- مقدمه

پارامترها از جمله دمای محیط، گرمایی اجناس داخلی و باز و بسته بودن درب کوره، نتایج کنترلی آنها رضایت بخش نیست؛ بنابراین کنترل دقیق دما بسیار اهمیت دارد. در واقع، این موضوع، کنترل و تنظیم چند کمیت معین با هدف نگهداری کمیت دمایی در مقدار مطلوب است و با در نظر گرفتن نیاز کنترلر دما در صنایع مختلف، می توان به مقایسه کنترلر PI فازی و PID کلاسیک در صنایع تولید گاز اشاره کرد [۱-۲]. از دید گذشتگان، پایه ای ترین کنترلر، کنترلر PID کلاسیک است؛ ولی در بررسی های انجام شده به علت اینکه در سال های اخیر با پیشرفت فرضیه فازی و شبکه های عصبی مواجه شده ایم؛ بنابراین، در پیشینه این مورد، دما کوره پخت، بررسی و بین کنترلر PID کلاسیک و PID فازی با استفاده از شبکه عصبی مقایسه شده است که این نوع به بهبود کیفیت و پایداری بهتر سیستم و مقاومت در برابر اختلالات ناگهانی منجر می شود. در برخی مطالعات،

بیشتر در صنعت دسته اعظمی از سیستم ها رفتار غیرخطی دارند و مشخصه آنها با توجه به تغییرات زمان، متفاوت است؛ به طور مثال در سیستم کوره های گرمایی و تنظیم دما (که بسیار در صنعت استفاده شده است) به علت معایب غیرخطی بودن و تغییرپذیری با زمان و با توجه به وجود مشکلات کنترلر دما و به علت تداخل بسیاری از

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۰۴/۰۱

نام نویسنده مسئول: ابراهیم عموپور

نشانی نویسنده مسئول: ایران - گیلان - رودسر - دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودسر و املش

حتی دما مطلوب سیستم‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع^۱ نیز بررسی شده است که کنترلر PID فازی را با نوع تطبیقی وارد کرده‌اند و به کار گرفته‌اند [۳]. هم‌اکنون با پیشرفت الگوریتم‌های هوشمند، ضرورت استفاده از PID فازی خبره به‌عنوان بهینه‌ترین کنترلر برای ما بیش از پیش آشکار شده است. تکنولوژی کنترل فازی PID برای کنترل دما کوره در مقایسه با نوع کلاسیک و حتی PI فازی آن به دلیل سادگی، انعطاف‌پذیر بودن، پایداری و دقت، کاربرد بهتری دارد و برای رهایی از بند محدودیت‌هایی که در عمل برای کنترل دما به‌صورت زمان واقعی^۲ پیش می‌آیند، استفاده از کنترلر PID فازی خبره پیشنهاد می‌شود. از طرف دیگر، همان‌طور که می‌دانیم همواره طبیعت، به دنبال رسیدن به بهینه‌ترین حالت است. انسان هم با الگوگرفتن از طبیعت برای حل مسائلی که هم‌روزه با آن مواجه است، به دنبال رسیدن به بهترین جواب ممکن برای مسئله است. انسان با استفاده از کامپیوتر و محاسباتی که در آن انجام می‌دهد، به راحتی جوابی مناسب برای تمامی سؤالات خود پیدا می‌کند [۴-۵]. در اینجا مقدمه‌ای از روش پیشنهادی ارائه شده است. همان‌طور که می‌دانیم در یک کنترلر فازی خبره از دانش بشری برای بهینه‌شدن پاسخ با دقت زیاد استفاده می‌شود. در این پژوهش ما با بررسی اطلاعات به‌دست‌آمده و با مقایسه انجام شده با کنترلر PID در جدول جست‌وجوگر، از نظر رسیدن به اهداف کنترلی از جمله پاسخ سریع، فراجهد کم، نتایج بهینه‌ای نشان داده شده است.

کنترل‌کننده PID، یک کنترل‌کننده سه بخشی است که بخش‌های تناسبی، انتگرال‌گیری و مشتق‌گیری را شامل می‌شود و پرکاربردترین کنترل‌کننده در صنعت است؛ به‌طوری‌که حدود نود درصد کل کنترل‌کننده‌های مورد استفاده در صنعت، یا PID هستند و یا از آن در ساختارهای کنترلی دیگر استفاده می‌کنند. این امر به تنهایی گویای اهمیت این کنترل‌کننده است [۶]. کنترل‌کننده PID از رایج‌ترین نمونه‌های الگوریتم کنترل بازخوردی است که در بسیاری از فرآیندهای کنترلی، نظیر کنترل سرعت موتور DC، کنترل فشار، کنترل دما و غیره کاربرد دارد. هدف از به کار بردن کنترلر PID در سیستم کنترل حلقه بسته، کنترل

دقیق و سریع خروجی سیستم، در شرایط متفاوت بدون دانستن دقیق رفتار سیستم در پاسخ به ورودی است. کنترلر PID از سه قسمت مجزا به نام‌های بخش تناسبی^۱، انتگرالی^۲ و مشتق^۳ تشکیل شده است که هرکدام از آن‌ها سیگنال خطا را ورودی می‌گیرند و عملیاتی را روی آن انجام می‌دهند و در نهایت خروجی آن‌ها با هم جمع می‌شود. خروجی این مجموعه که همان خروجی PID است، برای اصلاح خطا به سیستم فرستاده می‌شود. برخلاف ظاهر ساده PID، طراحی این کنترلر در عمل فراتر از تنظیم سه پارامتر اصلی آن است. عوامل مختلفی در عملکرد این کنترل‌کننده تأثیرگذار هستند؛ از جمله ساختار کنترل‌کننده، درجه پروسه^۴، نسبت ثابت زمانی غالب سیستم به زمان مرده پروسه^۵، دینامیک عنصر محرک، نوع فیلتر بخش مشتق‌گیر^۶ و تنظیم پارامتر آن، رفتار غیر خطی در سیستم و غیره. هریک از این عوامل نقشی در روند طراحی و تنظیم کنترل‌کننده PID دارند. عملکرد کنترل بهینه، تنها پس از یافتن بهترین مجموعه از ضرایب تناسبی (Kp)، ضریب انتگرالی (Ki)، و ضریب مشتق‌گیر (Kd) امکان‌پذیر است. تحقیقات بسیاری برای یافتن روش‌های طراحی و تنظیم کنترلر PID برای داشتن بهترین عملکرد ممکن انجام شده است که برخی از آن تحقیقات مطابق زیر هستند:

در مرجع [۷] نیز برای رفع مشکل عدم همگرایی دقیق به جواب و بهبود تنوع جمعیت روش بهینه‌سازی جست‌وجوی غذای حشره - میوه از روش مذکور کمک گرفته می‌شود. الگوریتم پیشنهادی برای آزمون کارایی، ابتدا به یک تابع تست اعمال می‌شود. برای تأیید بازده بهتر روش اصلاح‌شده الگوریتم بهینه‌سازی جست‌وجوی غذای حشره میوه تعداد محاسبه مستقل ۱۰۰ فرآیند برای FOA و MFOA با اعداد تصادفی متفاوت برای مشاهده تغییرات در مقادیر بهینه برآزش متناظرشان انجام شد. این نکته رؤیت‌پذیر است که همگرایی MFOA سریع‌تر از FOA اصلی است و در عین حال، در روش پیشنهادی دقت یا مقدار برآزش بهتری به‌دست آمده است؛ بنابراین روش پیشنهادی مقدار بهینه تابع تست را سریع و کارا جست‌وجو می‌کند و برای یافتن پاسخ بهینه، پایداری و خصوصیت همگرایی بهتری نشان می‌دهد. در تست دوم نیز پارامترهای

پایدار مرتبه دوم با یک (صفر) و دو (قطب) در نظر گرفته شده، پاسخ خروجی روش پیشنهادی با اختلال استاتیک بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهند الگوریتم PSO پیشنهادی، تابع برازش برای عملکرد سیستم را در حضور اختلال استاتیک بهبود می‌دهد و در نتیجه پاسخ سیستم حلقه‌بسته با اختلال استاتیک تأثیری بر پاسخ خروجی ندارد.

در مرجع [۱۰] الگوریتم بهینه‌سازی جدید اصلاح‌شده با نام غذایابی باکتری ارائه می‌شود. این الگوریتم غذایابی باکتری E. Coli را به صورت یک فرآیند بهینه‌سازی مدل می‌کند؛ به صورتی که یک جانور تلاش می‌کند انرژی به دست آورده در یک واحد زمانی جست‌وجو را حداکثر کند. این الگوریتم از نوع روش‌های هوشمند گروهی است. در شبیه‌سازی‌ها الگوریتم روی چهار سیستم مرتبه یک و دوم ساده آزموده شده است که بعد از بهینه‌سازی پارامترها با الگوریتم پیشنهادی، شاخص‌های عملکرد پاسخ سیستم به سرعت بهبود می‌یابد، اورشوت کاهش می‌یابد و زمان نشست حداقل می‌شود و عملکرد پایدار و پاسخ‌گذرای سیستم به وضوح بهبود می‌یابد. از نتایج شبیه‌سازی درمی‌یابیم قابلیت سازگاری برای تنظیم پارامترهای کنترلر PID و عملکرد کنترلی بهینه برای کنترلر PID با روش پیشنهادی در مقایسه با فرمولاسیون Zeigler-Nichols بهتر است.

در مرجع [۱۱] الگوریتم هوشمند گروه ماهی‌ها را در بهینه‌سازی مقادیر تنظیمی پارامترهای کنترلر PID پیشنهاد می‌شود. سه رفتار توصیف‌شده در الگوریتم شامل جست‌وجوی غذا (حرکت آزادانه ماهی‌ها در آب به سمت غذا)، رفتار حرکت گروهی (تقسیم به بخش‌های کوچک برای اجتناب از تراکم و گیرکردن در زمان حمله شکارچیان، حرکت حدودی هم‌جهت با سایر همراهان، حرکت حدودی به سمتی مرکز مسیر حرکت همراهان نزدیک) و رفتارهای ردیابی (وقتی یک ماهی از گروه ماهی‌ها غذای بیشتری پیدا می‌کند، سایر ماهی‌ها به سرعت غذا را با دنبال کردن آن پیدا می‌کنند) به‌کارگیری الگوریتم پیشنهادی در بهینه‌سازی پارامترهای کنترلر PID بر سیستم‌های تست به نتایج خوبی منجر شده است. پس الگوریتم، صرفاً از اعتبار و امکان در

کنترلر PID برای یک سیستم تنظیم اتوماتیک ولتاژ AVR^۹ محاسبه شده است. میزان پاسخ پله کنترلر FOA کندتر از MFOA است و FOA اورشوت دارد. الگوریتم MFOA پارامترهای کنترلی بهتر و بدون خطای حالت پایدار و بدون اورشوت، با زمان صعود و زمان نشست کوتاه‌تری را منجر می‌شود.

در مرجع [۸] در طراحی پارامترهای کنترلر PID از الگوریتم هوشمند شکارچی - طعمه^{۱۱} (PIO) الهام‌گرفته از لانه‌یابی کبوترها (PPPIO) برای افزایش تنوع جمعیت استفاده می‌شود. برای اعتبارسنجی بر روی یک سیستم تست مرتبه دوم، سه الگوریتم PSO، PIO و PPPIO در تنظیم پارامترهای PID استفاده شد. سه الگوریتم مذکور به ورودی پله پاسخی با کیفیت مشابه دارند؛ اما سرعت همگرایی PIO و PPPIO سریع‌تر از PSO است. گاهی ممکن است PIO در بهینه محلی گیر کند؛ اما PPPIO به‌طور مؤثر از آن اجتناب می‌کند. بنابراین عملکرد بهتری نسبت به PIO و PSO دارد. الگوریتم PPPIO در مقایسه با PIO و PSO توانایی جست‌وجوی گلوبال بهتر و همگرایی سریع‌تری وجود دارد.

در مرجع [۹] برای الگوریتم اصلاح‌شده اجتماع گروه ذرات MPSO پیشنهادی فرمولاسیون سرعت ذره تغییر داده‌شده تا بازده محاسباتی افزایش یابد. همچنین، ضرایب متغیر با زمان وارد شده‌اند؛ در نتیجه وابستگی مکان بعدی ذره به بهترین موقعیت قبلی‌اش با زمان کاهش می‌یابد و وابستگی مکان بعدی ذره به بهترین مکان جامع با زمان افزایش می‌یابد. پس از اینکه دسته، چند پاسخ بالقوه را دید که یکی از آن‌ها بهترین است، دسته باید تنها اطراف آن بهترین پاسخ را جست‌وجو کند؛ چون به احتمال بیشتر مقدار بهینه تابع برازش یا فیتنس در آن اطراف است. احتمال اینکه ذرات پراکنده در کل فضای پاسخ نتیجه بهتری نسبت به ذرات متمرکز شده در یک زیرفضای کوچک پاسخ داشته باشند، بسیار کم است. کل دسته در اطراف بهترین نقطه مطلق جمع می‌شوند و در زمان بسیار کمی جست‌وجو را برای بهینه مطلق در زیرفضای کوچک اطراف بهترین پاسخ ادامه می‌دهند؛ در نتیجه، بهینه‌سازی، سریع‌تر و بهتر خواهد بود. برای تست الگوریتم پیشنهادی، ابتدا یک فرآیند

چنین مسائلی برخوردار است؛ اما نشان نمی‌دهد که بهتر از سایر الگوریتم‌ها است یا خیر.

در مرجع [۱۱] یک تابع هزینه ساده برای ارزیابی عملکرد کنترلر PSO-PID برای یک سیستم غیرخطی دانشگاهی الگوی فازی Takagi-Sugeno ارائه می‌شود. این تابع هزینه در یافتن نتایج بهینه با حداکثر سرعت ممکن کمک می‌کند. برای طراحی تابع هزینه در اینجا حداقل سازی خطا مدنظر است. همچنین الگوسازی کنترلر PID دیجیتال به روش جدید RST است. در اجرای الگوریتم پیشنهادی، ابتدا پارامترهای PSO مقداردهی اولیه می‌شوند. در مرحله دوم، بخش‌های غیرخطی سیستم در قوانین فازی حذف می‌شوند. آنگاه پارامترهای الگوی RST کنترلر محاسبه می‌شوند. تابع هزینه محاسبه می‌شود، سپس خطا و مقدار بهترین مکان هر ذره به دست می‌آید. سرعت و مکان ذرات در دسته به روزرسانی می‌شود و اگر شرط توقف الگوریتم ارضا نشود، فرآیند از مرحله دوم از سر گرفته می‌شود. در موارد بررسی شده مطالعاتی، کنترلر PID با روش قراردادن قطب و PSO مقایسه می‌شود که در مقایسه درمی‌یابیم در الگوریتم اجتماع گروه ذرات ماکزیمم اورشوت کاهش می‌یابد و زمان همگرایی حداقل می‌شود. پس الگوریتم پیشنهادی برای کنترلر سیستم چند ورودی و خروجی (MIMO) استفاده می‌شود.

مطالعات مشابهی به روز برای طراحی کنترلر PID در حوزه‌های متنوعی در مراجع [۱۲] و [۱۳] آورده شده‌اند.

۲- الگوریتم پیشنهادی PSO-NM

۲-۱- بهینه‌سازی اجتماع گروه ذرات PSO

الگوریتم بهینه‌سازی سراسری برای بحث درباره مسائلی است که در آن‌ها بهترین راه‌حل به صورت یک نقطه یا سطح در فضای چندبعدی نشان داده می‌شود. فرضیه‌ها در این فضا رسم می‌شوند و با یک سرعت اولیه و کانال ارتباطی بین ذرات شروع می‌شوند. سپس ذرات در فضای راه‌حل حرکت می‌کنند و بعد از هر مهر زمانی، براساس معیار شایستگی، ارزیابی می‌شوند. بعد از مدتی، ذرات به طرف ذراتی سرعت می‌گیرند که مقادیر شایستگی بهتر در گروه

ارتباطی خودشان دارند. مزیت اصلی این رویکرد نسبت به سایر استراتژی‌های کمینه‌سازی مانند آنیلینگ شبیه‌سازی شده این است که تعداد زیاد افرادی که گروه ذرات را تشکیل می‌دهند، تکنیکی بسیار ارتجاعی را برای مسئله کمینه‌سازی محلی به‌کار می‌برند [۱۴]. ذرات دو قابلیت دارند: ۱) حافظه مربوط به بهترین موقعیت خود و دانش بهترین موقعیت گروه؛ ۲) افراد یک دسته موقعیت‌های خوب را با یکدیگر، مبادله و موقعیت و سرعت خود را بر مبنای این موقعیت‌های خوب تنظیم می‌کنند. این ارتباط از دو راه صورت می‌گیرد:

بهترین سراسری که برای همه شناخته شده است.

بهترین‌های همسایه که هر ذره تنها با زیرمجموعه‌ای از دسته درباره بهترین موقعیت‌ها ارتباط دارد.

ابرهات^۱، کندی^۲ اولین بار الگوریتم دسته ذرات را در سال ۱۹۹۵ مطرح کردند. در تدوین این روش از پرواز گروهی پرندگان و شنای گروهی ماهی‌ها و زندگی اجتماعی آنان الهام گرفته شده که با استفاده از یکسری روابط ساده فرمول‌بندی شده است؛ مانند همه الگوریتم‌های تکاملی دیگر، الگوریتم دسته ذرات نیز با ایجاد یک جمعیت تصادفی از افراد شروع می‌شود که در اینجا یک گروه از ذره‌ها خوانده می‌شوند. مشخصات هر ذره در گروه، براساس مجموعه‌ای از پارامترها تعیین می‌شوند که باید مقادیر بهینه آن‌ها تعیین شوند. در این روش، هر ذره یک نقطه از فضای جواب مسئله را نشان می‌دهد. هرکدام از ذرات حافظه دارند؛ یعنی بهترین موقعیتی که در فضای جست‌وجو به آن می‌رسند را به خاطر می‌سپارند؛ بنابراین حرکت هر ذره در دو جهت صورت می‌گیرد.

- به سوی بهترین موقعیتی که تا کنون اختیار کرده‌اند.

- به سوی بهترین موقعیتی که همه ذرات تا به حال اختیار کرده‌اند.

PSO از تکنیک‌های محاسبات تکاملی است و با تقلید از پرواز پرندگان و تبادل اطلاعات میان آن‌ها ابداع شده است. در PSO هر راه‌حل تنها یک پرنده در فضای جست‌وجو است و عضو نامیده می‌شود. تمام پرندگان یک مقدار شایستگی دارند و با تابع شایستگی بهینه‌شده ارزیابی می‌شوند. علاوه بر این، هر پرنده p یک موقعیت در فضای

وزن جبری بزرگتر، استکشاف عمومی و وزن جبری کوچکتر، استکشاف محلی را تسهیل می‌کند. در الگوریتم PSO استاندارد جمعیت با راه‌حل‌های تصادفی مقداردهی اولیه می‌شود و تا رسیدن به شرط خاتمه به صورت تکراری شایستگی جمعیت محاسبه می‌شود و مقادیر P_{best} و G_{best} تعیین می‌شوند. سپس سرعت و موقعیت نیز به ترتیب به‌روزرسانی می‌شوند. در آخر هم، G_{best} و مقدار شایستگی‌اش به‌عنوان خروجی بیان می‌شوند. شرط خاتمه، رسیدن به ماکزیمم تعداد نسل‌ها یا رسیدن به یک مقدار خاص شایستگی در G_{best} است.

۲-۲- الگوریتم بهینه‌سازی نلدر - مید (NM)

نلدر و مید اولین بار الگوریتم NM را در سال ۱۹۶۵ طرح کردند و هدف از ارائه این روش، حل مسائل بهینه‌سازی نامقید بود؛ اما با وجود گذشت زمان طولانی از ابداع روش نلدر - مید، امروزه این روش به دلیل سادگی برای استفاده و کدنویسی در کامپیوتر هنوز هم انتخاب مناسب برای حل مسائل بهینه‌سازی در زمینه‌های آماری، مهندسی، فیزیک و علوم پزشکی و داروسازی است. این الگوریتم، روشی سریع برای یافتن جواب مینیمم محلی در مسائل بهینه‌سازی است و برای مسائل بهینه‌سازی چند بعدی نیز استفاده می‌شود. همچنین این روش برای یافتن جواب از مشتق توابع برخلاف روش گرادین بهره نمی‌برد. الگوریتم نلدر - مید به مقدار مینیمم محلی از راه تشکیل ساختار منحصربه‌فرد همگرا می‌شود. با استفاده از این ساختار یگانه، جست‌وجو در جهت‌هایی با پتانسیل بالا برای مینیمم‌سازی تابع هدف اجرا می‌شود. ساختار منحصربه‌فرد در روش نلدر - مید به فرم یک شکل هندسی مرکب از $N+1$ گوشه تعریف می‌شود که N تعداد متغیرهای تابع هدف مسئله بهینه‌سازی است. در هر تکرار الگوریتم نلدر - مید شروع به محاسبه تصویر بدترین نقطه (گوشه دارای بالاترین مقدار تابع هدف $best$) در راستای نقطه مرکزی (گوشه با مقدار متوسط $good$) می‌کند. براساس مقدار محاسبه‌شده در مرحله اول، الگوریتم، عملیات گسترش و انقباض به شکلی با ساختار جدید اجرا می‌کند. به عبارت دیگر، مقادیر تابع هدف برای هر تکرار در گوشه‌های

D بعدی مسئله دارد که در تکرار t ام، با یک بردار به صورت رابطه (۱) نمایش داده می‌شود.

$$X_i^t = (x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{iD}^t) \quad (1)$$

همچنین این پرنده سرعتی دارد که پروازش را هدایت می‌کند و در تکرار t ام با بردار رابطه (۲) نشان داده می‌شود.

$$V_i^t = (v_{i1}^t, v_{i2}^t, \dots, v_{iD}^t) \quad (2)$$

و این پرنده نیز در هر تکرار یک حافظه از بهترین موقعیت قبلی خودش را دارد که با بردار P رابطه (۳) نشان داده می‌شود.

$$P_i^t = (p_{i1}^t, p_{i2}^t, \dots, p_{iD}^t) \quad (3)$$

در هر تکرار جست‌وجو، هر عضو با در نظر داشتن دو مقدار بهترین به‌روزرسانی می‌شود. اولی مربوط به بهترین راه‌حلی است که پرنده تا کنون آن را تجربه کرده است. (مقدار شایستگی این بهترین راه‌حل نیز ذخیره می‌شود). این مقدار را بهترین p یا اصطلاحاً P_{best} می‌نامند. دومین بهترین که با PSO دنبال می‌شود، بهترین موقعیتی است که تا کنون در جمعیت به دست آمده است. این مقدار بهینه عمومی است و اصطلاحاً G_{best} نامیده می‌شود. زمانی که یک عضو، بخشی از جمعیت را به‌عنوان توپولوژی همسایگانش در نظر می‌گیرد، بهترین مقدار یک بهترین محلی است و L_{best} نامیده می‌شود. بعد از اینکه دو بهترین مقدار پیدا شدند، موقعیت و سرعت هر عضو با روابط (۴) و (۵) به‌روزرسانی می‌شوند.

$$V_i(t+1) = wV_i(t) + c_1r_{1,i}(t)(P_i(t) - X_i(t)) + c_2r_{2,i}(t)(P_g(t) - X_i(t)) \quad (4)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (5)$$

در فرمول‌های فوق، t بیان‌کننده شماره تکرار و متغیرهای C_1, C_2 فاکتورهای یادگیری هستند. بیشتر $C_1 = C_2 = 2$ است که میزان جابه‌جایی یک پرنده را در یک‌بار تکرار کنترل می‌کند. r_1, r_2 دو عدد تصادفی یکنواخت در رنج $[0,1]$ هستند. w یک وزن جبری است که به صورت نوعی در رنج $[0,1]$ مقداردهی اولیه می‌شود.

ساختار ایجادشده ارزیابی می‌شوند و بالاترین مقدار تابع هدف برای هر گوشه ساختار در هر تکرار جایگزین بدترین مقدار محاسبه شده از مرحله قبل می‌شود و در غیر این صورت، ساختار به طرف بهترین نقطه (گوشه با کمترین مقدار تابع هدف) انقباض می‌یابد. این فرآیند تکرار می‌شود تا اینکه خطای مطلوب حاصل شود. سرعت همگرایی الگوریتم با سه پارامتر α ، β و γ متاثر می‌شود که به ترتیب پارامتر α ثابت انعکاس، پارامتر β ثابت انقباض و γ ثابت گسترش ساختار هستند [۱۵-۱۶].

۳- وزن‌دهی پارامترهای پاسخ خروجی به کمک الگوریتم هایبرید اجتماع گروه ذرات و نلدرمید PSO-NM

با تحلیل پاسخ پله سیستم در حضور کنترل‌کننده PID، بهبود پاسخ از لحاظ زمان نشست، فراجش و زمان خیز هدف اصلی است. در طراحی کنترل‌کننده PID علاوه بر تنظیم پارامترهای آن، روش پیشنهادشونده وزن‌دهی به خروجی‌های به دست آمده از پاسخ است. بدین منظور فرض می‌شود پارامترهای خروجی زمان نشست، فراجش و زمان خیز در پاسخ پله تعریف شود. در این صورت، الگوریتم ممکن است کنترل‌کننده‌ای را پیشنهاد کند که با آن پارامترهای به نظر بهینه شده قابلیت پیاده‌سازی نداشته باشند؛ بنابراین روشی که در اینجا پیشنهاد شده است روش وزن‌دهی است؛ به صورتی که به هر یک از پارامترهای پاسخ خروجی وزن خاصی اختصاص داده می‌شود. حال این وزن‌دهی بدین معنی است که هر یک از پارامترها در پاسخ به چه میزان اهمیت دارد؛ برای مثال، اگر طراح بخواهد پاسخ پله سیستم دارای فراجش کمتری باشد، می‌باید وزن کمتری به آن اختصاص دهد.

مثال، اگر پارامتر دیگری اهمیت بیشتری داشته باشد، بازه بزرگ‌تری در انتخاب آن پارامتر در نظر گرفته می‌شود. انتخاب حد بالا و حد پایین مناسب، عامل مهمی در وزن‌دهی هوشمند نوع اول است؛ بنابراین الگوریتم تکاملی علاوه بر تنظیم پارامترهای P ، I ، D کنترل‌کننده به تعداد پارامترهای خروجی، می‌باید وزن‌های مناسبی را برای هر یک از پارامترها تعیین کند. بنابراین تعداد متغیرهای الگوریتم بهینه‌سازی به تعداد $N+3$ است که در آن، N تعداد پارامترهای خروجی است که الگوریتم باید برای هر یک از آن‌ها وزن‌دهی مناسب انجام دهد. در قسمت وزن‌دهی، با ایجاد بازه‌ای برای هر یک از پارامترها میزان تأثیر و اهمیت هر یک از آن‌ها را تعیین می‌شود؛ برای مثال، فرض کنید که سه پارامتر در خروجی پاسخ سیستم وجود داشته باشد، زمان نشست، فراجش یا اورشوت و زمان خیز که به ترتیب با T_s ، $MP\%$ ، Tr نمایش داده می‌شوند؛ بنابراین اگر مثلاً برای طراح کم بودن فراجش از بقیه خصوصیات پاسخ خروجی اهمیت بیشتری داشته باشد و به نسبت سرعت رسیدن به جواب نهایی و ماندگار از سرعت گذرای پاسخ سیستم اهمیت بیشتری داشته باشد (اهمیت بیشتر T_s به نسبت Tr)، آنگاه با ایجاد قیدی بر روی برنامه، بازه‌های معناداری از حدودی که الگوریتم هوشمند اجازه جست‌وجو در آن فضا را داشته باشد، انتخاب می‌شود تا به هدف خود از لحاظ میزان اهمیت دادن الگوریتم به هر یک از پارامترها دست یابد. بنابراین در روش پیشنهادی این پژوهش، الگوریتم هوشمند PSO، علاوه بر جست‌وجوی بهینه‌ترین مقدار در فضای جست‌وجوی هر پارامتر کنترلی، وزن مناسب با مطلوب طراح تعیین می‌شود تا این ۶ پارامتر هم‌زمان به صورتی انتخاب شوند تا مطلوب‌ترین پاسخ به دست آید.

۳-۲- تابع هدف بهینه‌سازی اجتماع گروه ذرات PSO و نلدرمید NM

اما مهم‌ترین بخش یک مسئله بهینه‌سازی انتخاب تابع هدفی متناسب با شرایط و قیود موجود است. تابع هدف استفاده شده در این بهینه‌سازی به صورت رابطه (۶) است.

۳-۱- وزن‌دهی هوشمند پارامترهای پاسخ خروجی

در وزن‌دهی هوشمند به پارامترها، وزن‌دهی به صورت انتخاب بازه‌ای دلخواه برای هر یک از پارامترها است؛ برای

$$Cost = \left(\frac{10}{100-0} + \frac{25}{100-0} + \frac{40}{100-0} + 0.3 \times \frac{10}{100-0} + 0.1 \times \frac{0.2}{1-0} + 0.5 \times \frac{2}{5-0} \right) = 1.15 \quad (9)$$

در هر بار تکرار برنامه بهینه‌سازی، ابتدا جواب بهینه اولیه با الگوریتم اجتماع ذرات تعیین می‌شود که این جواب‌ها، جواب‌های ورودی الگوریتم نلدرمید در نظر گرفته می‌شود. اگر الگوریتم هایبرید در یک تکرار، موفق به یافتن پاسخ مناسب‌تری نشود، آنگاه در تکرار بعدی اعداد دیگری را با توجه به منطق خود پیشنهاد می‌دهد که هزینه کمتری داشته باشد تا در نهایت به بهینه‌ترین پاسخ دست یابد.

۴- مطالعات شبیه‌سازی و آنالیز حساسیت

الگوریتم بهینه‌سازی هایبرید ازدحام گروه ذرات و نلدرمید، در تنظیم و طراحی بهینه پارامترهای کنترلر PID، با توجه به وزن‌دهی هوشمند پارامترهای پاسخ خروجی برای تأیید کارایی و اعتبارسنجی عملکرد بر سیستم کنترلی حلقه بسته، مطابق شکل (۱) به کار گرفته و سپس با الگوریتم پیشرفته GA مقایسه می‌شود. فلوچارت به کار گرفته شده برای ازدحام گروه ذرات و نلدرمید (PSO-NM) با توجه به وزن‌دهی هوشمند پارامترهای پاسخ خروجی در ادامه آورده شده است.



شکل (۱): بلوک دیاگرام کنترلر PID با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات و نلدرمید (PSO-NM)

در شکل فوق، U سیگنال ورودی و Y، سیگنال خروجی است. اختلاف بین سیگنال ورودی و خروجی با نام سیگنال خطا e(t) شناخته می‌شود که به‌عنوان تضمین سیگنال کنترلی سیستم با کنترلر PID، تنظیم می‌شود. در این پروژه، برای انجام شبیه‌سازی و آنالیز حساسیت، دو مطالعه موردی ترتیب داده شده است. در مطالعات موردی اول، دوم

$$Cost = \sum_{i=1}^n w_i \times \frac{P_i}{\max(P_i) - \min(P_i)} \quad (6)$$

که در آن P_i ها متغیرهای بهینه‌سازی و مخرج کسر داخل سیگما بازه تعیین‌شده مربوط به هر یک از متغیرها در برنامه هستند. در واقع با این کار، همگی متغیرها نرمالیزه خواهند شد؛ بنابراین به دلیل تفاوت ماهیت و فضای عددی اتخاذشده هر یک از متغیرهای بهینه‌سازی (۶ متغیر = ۳ متغیر مربوط به پارامترهای کنترل‌کننده + ۳ متغیر مربوط به وزن هر یک از پارامترهای پاسخ‌های خروجی) می‌باید این متغیرها به گونه‌ای در تابع هزینه کنار یکدیگر آورده شوند تا در هزینه نهایی خللی ایجاد نشود. بدین منظور می‌باید هر یک از مقادیر پیشنهادی با الگوریتم PSO را در حوزه و فضای تعریف‌شده خود نرمالیزه شوند. در ادامه با ذکر یک مثال مسئله روشن‌تر خواهد شد. با فرض اینکه بازه‌های انتخابی برای هر یک از پارامترها از طراح به‌صورت رابطه (۷) باشند.

$$\begin{aligned} k_p &\rightarrow [0 \dots 100], & k_i &\rightarrow [0 \dots 100], \\ k_d &\rightarrow [0 \dots 100] \\ w_1 &\rightarrow [0 \dots 0.5], & w_2 &\rightarrow [0 \dots 0.3], \\ w_3 &\rightarrow [0 \dots 1] \end{aligned} \quad (7)$$

در این انتخاب همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان فضای جست‌وجوی پارامترهای کنترلی، یکسان انتخاب شده است تا الگوریتم تکاملی PSO با جست‌وجوی فضای ممکن در این بازه‌ها، مقدار بهینه را انتخاب می‌کند؛ اما همان‌طور که در بازه‌های مربوط به وزن‌دهی داده‌ها مشخص شده است وزن پارامترهای خروجی با اولویت اهمیت به‌صورت $w_3 > w_1 > w_2$ هستند؛ بنابراین در این صورت پارامتر دارای وزن w_3 اهمیت بیشتری برای تابع بهینه‌ساز دارد؛ برای مثال یک پاسخ پیشنهادی با الگوریتم PSO به‌صورت (۸) باشد و همچنین پاسخ خروجی دارای $Tr=0.2 \text{ ms}$ و $Ts=2 \text{ ms}$ ، $MP=10\%$ باشد.

$$\begin{aligned} k_p &= 10, & k_i &= 25, & k_d &= 40 \\ w_1 &= 0.3, & w_2 &= 0.1, & w_3 &= 0.5 \end{aligned} \quad (8)$$

در نهایت برای این پاسخ (شاید بهینه) تابع هزینه به‌دست‌آمده پس از نرمالیزه‌کردن هر یک از متغیرها به‌صورت (۹) حاصل می‌شود.

مقدار عددی پارامترهای c_1 و c_2 برای تنظیم مکان و سرعت هر ذره برای تکرار نام در فرمولاسیون الگوریتم اجتماع ذرات به ترتیب معادل با مقدار عددی ۲ و ۱٫۵ انتخاب می‌شود.

الگوریتم هوشمند اجتماع گروه ذرات برای دستیابی به جواب بهینه و به‌روزرسانی موقعیت و سرعت ذرات هر گروه، مبتنی بر روند تکرار است. تعداد تکرار در اینجا برای معالجات شبیه‌سازی، ۵۰ بار در نظر گرفته شده است. اندیس w ، پارامتر اینرسی وزنی در فرمولاسیون الگوریتم اجتماع گروه ذرات است که برای تضمین همگرایی به کار می‌رود. اینرسی وزنی، برای کنترل تأثیر سوابق سرعت‌های پیشین بر سرعت‌های جاری ذرات کاربرد دارد که براساس تحقیقات انجام‌شده، تا کنون مقدار عددی مناسب آن معمولاً بین ۰٫۴ و ۰٫۷ گزارش شده است. در اینجا نیز این مقادیر، حداقل و حداکثر مقادیر عددی w ، برای مطالعات شبیه‌سازی انتخاب شده‌اند؛ اما مقدار عددی w طبق رابطه (۱۲)، محاسبه می‌شود.

$$W = W_{\max} - \left(\frac{W_{\max} - W_{\min}}{\max iter} \right) \quad (12)$$

این مسئله شامل دو تابع هدف $f_1(i)$ و $Cost(i)$ مطابق روابط (۱۳) و (۱۴) است که به ترتیب اولین تابع هدف، به دنبال بهینه‌سازی پاسخ زمانی سیستم است و به متغیرهای خطای حالت دائمی^{۱۵}، ماکزیمم اورشوت، زمان خیز و زمان نشست وابسته هستند؛ درحالی‌که دومین تابع هدف، کل هزینه ناشی از هریک از پارامترهای کنترلی سیستم با اهمیت‌های متفاوت از دید طراح کنترلر PID را دنبال می‌کند.

$$f_1(i) = (100 \times |Ess|^{0.5} + 5 \times M_p^2) + (100 \times t_s + t_r), \quad i = 1, \dots, n \quad (13)$$

$$Cost = \sum_{i=1}^n w_i \times \frac{P_i}{\max(P_i) - \min(P_i)} \quad (14)$$

اما الگوریتم اجتماع گروه ذرات (PSO) با یک تابع هدف کار می‌کند؛ بنابراین تنها راهکار باقی‌مانده، تلفیق دو تابع هدف به‌عنوان یک تابع هدف برای به‌کارگیری در الگوریتم اجتماع گروه ذرات، مطابق رابطه (۱۵) است.

به ترتیب یک سیستم مرتبه دوم و یک سیستم مرتبه سوم مدنظر قرار گرفته است که توابع تبدیل الگوی کنترلی موارد مذکور مطابق روابط (۱۰) و (۱۱) هستند و با $G_i(s)$ نمایش داده می‌شوند.

$$G_1(s) = \frac{20}{1.5s^2 + 4.5s + 1} \quad (10)$$

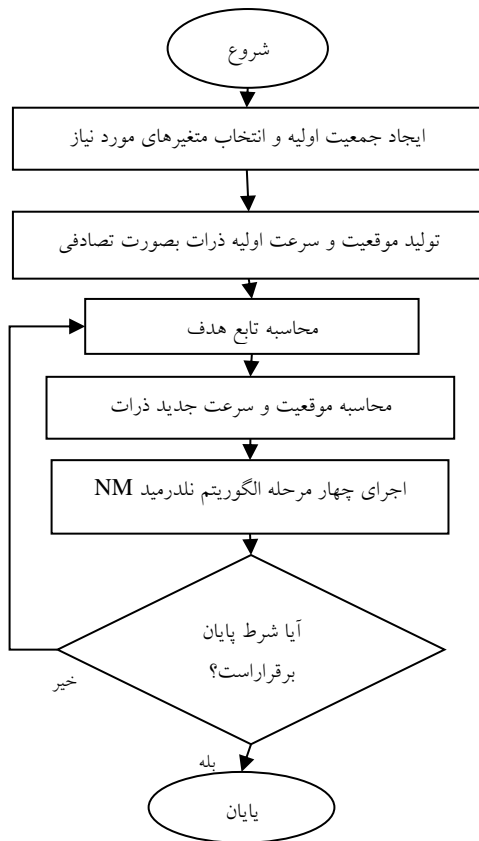
$$G_2(s) = \frac{s + 2}{s^3 + 1.5s^2 + 4.5s + 1} \quad (11)$$

کدنویسی مربوط به مطالعات عددی و شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار مطلب با کامپیوتر شخصی دارای پردازشگر دو هسته‌ای با قدرت پردازش ۲ گیگا هرتز^۳ و حافظه جانبی ۵۱۲ مگابایت^۴ انجام شده است. درنهایت، نتایج عددی به‌دست‌آمده در ارتباط با منحنی همگرایی به جواب مسئله بهینه‌سازی، پارامترهای مهم پاسخ سیستم برای طراح نظیر: زمان نشست (ts)، زمان خیز (tr) و فرجهش (MP%) و پاسخ خروجی، بررسی و مقایسه شده‌اند. اطلاعات مفروضات حل مسئله در مطالعات انجام‌شده برای الگوریتم هایبرید اجتماع گروه ذرات و نلدردید PSO-NM به ترتیب زیر هستند؛ ضمناً اطلاعات مفروض و فلوجارت به‌کارگرفته در مطالعات شبیه‌سازی مربوط به الگوریتم ژنتیک پیشرفته از مرجع [۱۷] و [۱۸] اقتباس شده است.

۴-۱- مفروضات برای الگوریتم هایبرید اجتماع

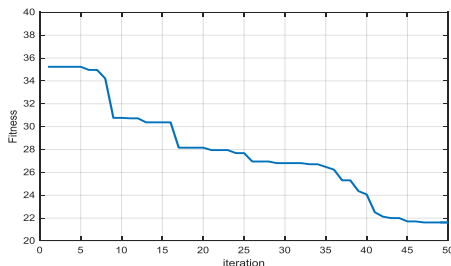
گروه ذرات و نلدردید PSO-NM

تعداد کل جمعیت‌های اولیه برابر ۳۰ عدد است که به‌عنوان جواب‌های تصادفی مسئله بهینه‌سازی تنظیم پارامترهای کنترلر PID، در نظر گرفته شده‌اند. برای هریک از جمعیت‌ها، ۶ عضو $K_p, K_i, K_d, w_p, w_i, w_d$ معادل مکان ذرات لحاظ می‌شوند که درواقع، متغیرهای مسئله بهینه‌سازی را شامل می‌شوند. مقدار حداقل برای هریک از اعضای جمعیت‌ها برابر ۰ است؛ اما برای مقادیر حداکثری آن‌ها به ترتیب ۱۵، ۸، ۵، ۰٫۵، ۰٫۳ و ۱ می‌است. تحقیقات نشان داده است انتخاب مقدار بزرگ‌تری برای c_1 نسبت به پارامتر اجتماعی c_2 مناسب‌تر است؛ اما باید همواره شرط $c_1 + c_2 \leq 4$ رعایت شود. بر اساس این، در اینجا



شکل (۲): فلوجارت الگوریتم هایبرید اجتماع گروه ذرات و نلدرمید PSO-NM با توجه به وزندهی پارامترهای پاسخ

الگوریتم پیشنهادی، طی زمان ۳٫۸ ثانیه بعد از ۵۰ تکرار به جواب بهینه، همگرا می شود اما همان طور که از نتایج شبیه سازی دیده می شود منحنی برازش مشخصه همگرایی کندی از خود در مقایسه با الگوریتم ژنتیک بکار گرفته شده، بر روی همین الگوی کنترلی نشان می دهد.



شکل (۳): منحنی همگرایی الگوریتم هایبرید اجتماع گروه ذرات و نلدرمید PSO-NM به پاسخ بهینه با توجه به وزندهی پارامترهای پاسخ سیستم برای مطالعه حالت اول (Weighted Response-PSO)

$$Min(f(i)), f(i) = f_1(i) \times (1 + cost(i)), \quad (15)$$

$$i = 1, \dots, n$$

علت جمع $Cost(i)$ با عدد یک آن است که با صفر شدن وزن ها، مقدار $Cost(i)$ برای هر مقدار از پارامترهای کنترلی صفر خواهد شد. به عبارتی، مقدار تابع $f_1(i)$ در تابع هدف نهایی، بی تأثیر خواهد شد. به همین دلیل برای جلوگیری از این اتفاق، تابع هدف نهایی به صورت $f(i)$ تعیین شده است؛ بنابراین با استفاده از فلوجارت ارائه شده در شکل (۲)، به طراحی و تنظیم پارامترهای کنترلر PID، با توجه به پارامترهای پاسخ اقدام می شود. روند کار بدین شکل است که ابتدا ۳۰ جمعیت اولیه، هر یک شامل ۶ عضو با مقادیر مکان و سرعت تصادفی اولیه، در محدوده مجاز تشکیل می شود و مقدار عددی تابع هدف مطابق رابطه (۱۵)، با توجه به مقادیر اولیه تولید شده برای متغیرهای سیستم کنترلی محاسبه می شود. اگر شرایط همگرایی به جواب بهینه مسئله فراهم شد آنگاه اجرای الگوریتم، متوقف می شود و در غیر این صورت، محاسبه موقعیت و سرعت جدید ذرات برای به روز رسانی مقدار تابع هدف در تکرار بعد با استفاده از رابطه (۴) انجام می شود.

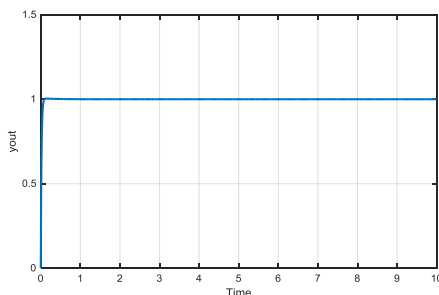
۴-۱-۱- مطالعه اول: سیستم کنترلی مرتبه دوم $G(S)^{16}$

در مطالعه حالت اول، یک سیستم مرتبه دوم مطابق رابطه ۱۰، به عنوان سیستم کنترلی $G_i(s)$ در مسیر پیش خور^{۱۷} سیستم حلقه بسته شکل (۳)، در نظر گرفته شده است. هدف این است که پارامترهای کنترلی K_p, K_i, K_d و همچنین ضرایب وزن متناظر هر یک از آن ها شامل w_d, w_i, w_p را در کنترلر PID که در مسیر پیش خور بلوک دیاگرام مذکور قرار دارد با الگوریتم هایبرید اجتماع گروه ذرات و نلدرمید PSO-NM طوری تعیین شود که پاسخ مطلوب و بهینه سیستم به ورودی دلخواه ایجاد شود. بنابراین، در این مطالعه نیز پاسخ به ورودی پله سیستم ارزیابی شده است.

کنترلی خواهد شد. از مقایسه نتایج به دست آمده از به کارگیری الگوریتم هایبرید اجتماع گروه ذرات و نلدرمید PSO-NM و الگوریتم ژنتیک (GA) با توجه به وزن دهی پارامترهای پاسخ بر روی سیستم کنترلی تست، مشاهده می شود الویت های انتخاب شده برای پارامترهای کنترلی تناسبی، مشتقی و انتگرالی با وجود مقادیر متفاوت، مشابه بوده اند. از مقایسه نتایج شبیه سازی برای مشخصه همگرایی تابع هدف (برازش) در میابیم الگوریتم ژنتیک سریع تر به مقدار بهینه، همگرا می شود؛ اما کمینه سازی f1 (هدف) طی تکرارهای برابر برای حل مسئله ضعیف تر تحقق می بخشد؛ یعنی در مقایسه با الگوریتم هایبرید اجتماع گروه ذرات و نلدرمید PSO-NM به مقادیر بالاتر برازش، همگرا می شود. در دیگرام حلقه بسته مورد مطالعه (Case1)، تابع تبدیل سیستم کنترلی ما (G(S))، سیستم مرتبه دوم است و بعد از حل مسئله بهینه سازی با الگوریتم هایبرید اجتماع گروه ذرات و نلدرمید PSO-NM، تنظیم پارامترهای تابع تبدیل کنترلر PID مشخص شده است؛ بنابراین تابع تبدیل کلی سیستم، مطابق رابطه (۱۶) بیان می شود.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{84.46s^2 + 281.8s + 63.627}{1.5s^3 + 89.14s^2 + 282.8s + 63.67} \quad (16)$$

پاسخ سیستم مورد مطالعه به ورودی پله با توجه به تنظیم بهینه پارامترهای کنترلی PID با الگوریتم پیشنهادی، مطابق شکل (۴) خواهد شد. مقادیر عددی ماکزیمم اورشوت یا فراجش، زمان خیز، زمان نشست و خطای حالت دائمی پاسخ سیستم به ورودی پله در شکل مذکور نمایش داده شده اند. هریک از آنها به ترتیبی که در ادامه آورده شده است، تعریف و مقداردهی می شوند.



شکل (۴): پاسخ ورودی پله سیستم با توجه به تنظیم بهینه

پارامترهای کنترلی PID (Case1)

جدول (۱) نتایج شبیه سازی برای تابع هدف، پارامترهای کنترلی و ضرایب وزن متناظر با هریک از آنها در کنترلر PID را با به کارگیری الگوریتم هایبرید اجتماع گروه ذرات و نلدرمید PSO-NM در مقایسه با نتایج حاصله از به کارگیری الگوریتم ژنتیک، نشان می دهد.

جدول (۱): نتایج شبیه سازی برای تابع هدف، پارامترهای کنترلی و ضرایب وزن متناظر با هریک از آنها در کنترلر PID (مقایسه الگوریتم هایبرید اجتماع گروه ذرات و نلدرمید PSO-NM پیشنهادی با الگوریتم GA)

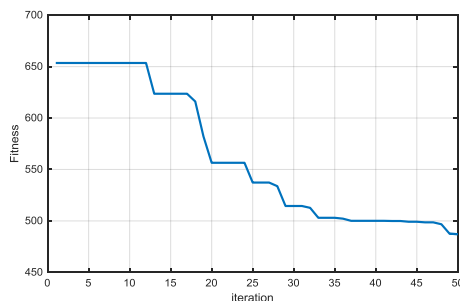
سیستم کنترلی مرتبه دوم (تنظیم پارامترهای PID)		
الگوریتم ژنتیک	الگوریتم اجتماع گروه ذرات و نلدرمید	مطالعه اول
$K_p (w_p)$	14.089 (0.0022)	15.36 (0.0035)
$K_i (w_i)$	3.181 (0.0530)	3.2012 (0.0550)
$K_d (w_d)$	4.232 (0.04342)	4.2943 (0.0457)
Cost-Best	2.2433	2.39
f1-Best	6.666	7.43
F (Fitness-Best)	21.620	25.24

آنچه از نتایج شبیه سازی در جدول (۱) استنباط می شود، این است که برای تنظیم پارامترهای تناسبی، انتگرالی و مشتقی در کنترلر PID، برای سیستم مرتبه دوم $G_i(s)$ واقع در مسیر پیش خور سیستم حلقه بسته کلی، با توجه به مقدار عددی ضریب وزن 0.0530 پارامتر انتگرالی کنترلر اولویت اول به این پارامتر یعنی K_i تخصیص می یابد. این کار سبب می شود تا خطای ماندگار پاسخ سیستم در زمان به صفر برسد و با توجه به مقدار عددی ضریب وزن 0.04342 پارامتر مشتقی از اولویت دوم، نسبت به دو پارامتر تناسبی و انتگرالی قرار می گیرد. این کار سبب می شود که حساسیت سیستم به شیب تغییرات پاسخ (خطا) افزایش یابد؛ در نتیجه به افزایش هزینه ها برای فراهم کردن این امکان در بخش کنترلی منجر می شود. در نهایت ضریب وزن 0.0022 برای پارامتر تناسبی باید پایین ترین اولویت به طور بهینه به این پارامتر در کنترلر، یعنی K_p اختصاص یابد که در نتیجه پایین ترین هزینه صرف این بخش از سیستم

قبلی اجراهای متوالی شبیه‌سازی برای مطالعه حالت دوم (Case2) با الگوریتم هایبرید اجتماع گروه ذرات و نلدرمید PSO-NM و الگوریتم ژنتیک (GA) درمیانیم در عین حال که مقدار عددی تابع هدف در الگوریتم اجتماع گروه ذرات به مقادیر کمینه بهتری منجر می‌شود، سرعت همگرایی به جواب بهینه این الگوریتم در مقایسه با الگوریتم ژنتیک کمتر است. برای مطالعه حالت دوم، جدول (۲)، نتایج شبیه‌سازی به ورودی پله سیستم برای تابع هدف، پارامترهای کنترلی و ضرایب وزن متناظر با هر یک از آنها در کنترلر PID، را با به‌کارگیری الگوریتم هایبرید اجتماع گروه ذرات و نلدرمید PSO-NM در مقایسه با نتایج حاصله از به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک، نشان می‌دهد.

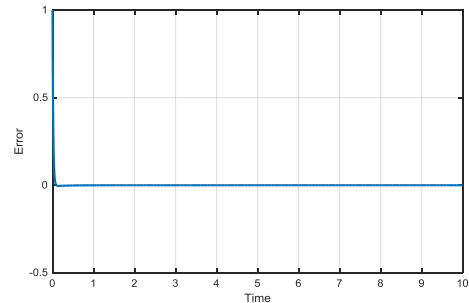
جدول (۲): نتایج شبیه‌سازی برای تابع هدف، پارامترهای کنترلی و ضرایب وزن متناظر با هر یک از آنها در کنترلر PID (مقایسه الگوریتم هایبرید اجتماع گروه ذرات و نلدرمید PSO-NM پیشنهادی با الگوریتم ژنتیک)

سیستم کنترلی مرتبه سوم (تنظیم پارامترهای PID)		
مطالعه دوم	الگوریتم اجتماع گروه ذرات و نلدرمید	الگوریتم ژنتیک
$K_p (w_p)$	0.8861 (0.1086)	0.8990 (0.3050)
$K_i (w_i)$	2.8023 (0.0089)	2.9963 (0.0136)
$K_d (w_d)$	2.6837 (0.0110)	2.7268 (0.1515)
Cost-Best	۰.۸۸۳۸	0.8708
f1-Best	۲۵۸.۵۸	350.24
F (Fitness-Best)	۴۸۷.۱۲	493.155



شکل (۶): منحنی همگرایی الگوریتم هایبرید اجتماع گروه ذرات و نلدرمید PSO-NM به پاسخ بهینه با توجه به وزن‌دهی

انتظار می‌رود با تنظیم بهینه پارامترهای کنترلی در کنترلر PID، پاسخ مطلوب سیستم از نظر طراح رقم بخورد و با میل به سمت زمان‌های بالا، خطای حالت دائمی پاسخ سیستم به ورودی پله نیز به دلیل وجود بخش انتگرالی، به مقدار صفر برسد. شکل (۵)، خطای حالت دائمی پاسخ سیستم به ورودی پله را نشان می‌دهد.



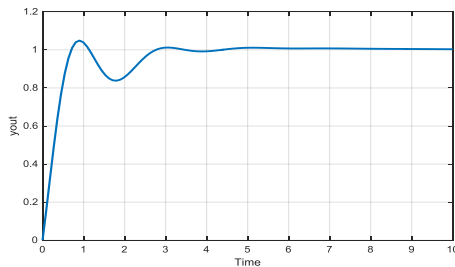
شکل (۵): خطای حالت دائمی پاسخ سیستم به ورودی پله با توجه به تنظیم بهینه پارامترهای کنترلی PID (Case1)

همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود با میل زمان به سمت بی‌نهایت ($t=0.006047$)، خطای ماندگار پاسخ سیستم به مقدار عددی صفر میل می‌کند که با وجود کنترلر PID، دقیقاً انتظار می‌رفت.

۴-۱-۲- مطالعه دوم: سیستم کنترلی مرتبه سوم $G(S)^8$

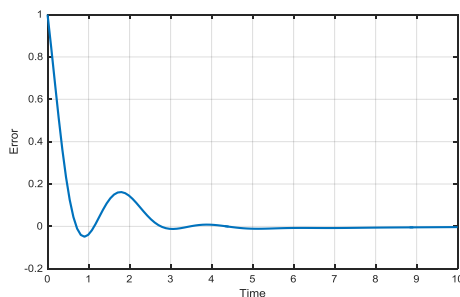
در مطالعه حالت دوم با اعمال دو تغییر، باقیمانده اطلاعات مفروض شبیه‌سازی به‌طور مشابه با مطالعه حالت اول، ثابت فرض شده است. در تغییر اول، مرتبه سیستم در تابع تبدیل $G(S)$ مسیر پیش‌خور برای سیستم کنترلی حلقه بسته (شکل ۱) از دو به سه، مطابق رابطه (۱۱) افزایش یافته است. در تغییر دوم، زمان شبیه‌سازی از ۲ ثانیه به ۷.۸۷ ثانیه افزایش داده شده است؛ به دلیل آنکه در بدترین شرایط کنترلی، یعنی به‌ازای δ نزدیک به صفر، میرایی‌سازی نوسانات پاسخ سیستم حول مقدار مطلوب به ورودی دلخواه با به‌کارگیری کنترلر PID، رؤیت‌پذیر است. مجدداً مسئله بهینه‌سازی تنظیم بهینه پارامترهای کنترلر تناسبی - انتگرالی - مشتقی، با الگوریتم هایبرید اجتماع گروه ذرات و نلدرمید PSO-NM مبتنی بر وزن‌دهی پارامترهای پاسخ، حل شده که منحنی همگرایی به جواب بهینه طی ۵۰ تکرار در شکل (۶) آورده شده است. به‌طور مشابه با مطالعه حالت

کنترلر PID، با الگوریتم پیشنهادی اجتماع گروه ذرات در شکل (۷) آمده است.



شکل (۷): پاسخ ورودی پله سیستم با توجه به تنظیم بهینه پارامترهای کنترلی PID (Case2)

مقدار عددی ماکزیمم اورشوت یا فراجش پاسخ (%MP)، در شرایط جدید سیستم، در مطالعه حالت دوم برابر $0,0487$ است. مقدار عددی زمان خیز (t_r) برابر $0,63063$ ثانیه است و زمان نشست سیستم (t_s) نیز با معیار $\pm 2\%$ در نظر گرفته شده است که مقدار عددی این زمان برابر $2,5225$ ثانیه است. شکل (۸) خطای حالت دائمی پاسخ سیستم به ورودی پله را در شرایط جدید نشان می‌دهد.



شکل (۸): خطای حالت دائمی پاسخ سیستم به ورودی پله با توجه به تنظیم بهینه پارامترهای کنترلی PID (Case2)

در تنظیم بهینه پارامترهای کنترلی تناسبی، انتگرالی و مشتقی در کنترلر PID، برای مطالعه حالت دوم (Case2)، پایین‌ترین ضریب وزن به پارامتر انتگرالی ($K_i(w_i)$) اختصاص داده شده است؛ بنابراین انتظار می‌رود خطای حالت دائمی پاسخ مطلوب سیستم به ورودی پله، طی زمان طولانی‌تری به مقدار صفر برسد.

پارامترهای پاسخ سیستم برای مطالعه حالت دوم (Weighted Response- PSO)

همان‌طور که از نتایج شبیه‌سازی در مطالعه حالت دوم مشاهده می‌شود برای دستیابی به پاسخ مطلوب به ورودی پله برای سیستم جدید، طراح کنترلر PID، می‌باید بالاترین اولویت به پارامتر تناسبی (K_p) با مقدار عددی ضریب وزن 0.1086 ، دومین اولویت به پارامتر مشتقی (K_d) با مقدار عددی ضریب وزن 0.0110 و پایین‌ترین اولویت را با ضریب وزن 0.0089 به پارامتر انتگرالی (K_I) اختصاص دهد. اولویت بالاتر برای تنظیم پارامتر کنترلی از کنترلر PID، دست طراح را به منظور صرف هزینه بیشتر برای آن پارامتر بازمی‌گذارد. بنابراین در اینجا برای الگوی کنترلی جدید، برای دستیابی به پاسخ مطلوب سیستم به ورودی پله از دید طراح، باید بیشترین هزینه صرف پارامتر تناسبی (K_p) شود تا بزرگ‌نمایی در خطاهای کوچک پاسخ سیستم، به خوبی انجام شود. سپس در اولویت بعدی، بیشترین هزینه برای پارامتر مشتقی (K_d) صرف شود تا شیب افزایشی یا کاهش خطا به درستی تعیین شود. در واقع، در پایین‌ترین اولویت، کمترین هزینه برای پارامتر انتگرالی (K_I)، برای رساندن خطای ماندگار سیستم به مقدار صفر است. البته باید متذکر شد اولویت‌بندی پارامترهای کنترلی PID، در هر دو روش PSO و GA مشابه به دست آمده‌اند که در مقادیر تنظیمات متفاوت هستند. با توجه به اینکه در دیاگرام حلقه بسته مورد مطالعه تحت شرایط جدید (Case2)، تابع تبدیل سیستم ($G(s)$) در مسیر پیش‌خور سیستم مرتبه سوم است، پس از حل مسئله بهینه‌سازی طراحی پارامترهای تناسبی، مشتقی و انتگرالی کنترلر PID، با الگوریتم هایبرید اجتماع گروه ذرات و نلدرمید PSO-NM با توجه به وزن‌دهی پارامترهای پاسخ تابع تبدیل کنترلر PID، مشخص می‌شوند؛ بنابراین تابع تبدیل کلی سیستم حلقه بسته مطابق رابطه (۱۷) بیان می‌شود.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1.649s^3 + 7.84s^2 + 10.38s + 2.6}{s^4 + 3.149s^3 + 12.34s^2 + 11.38s + 2.6} \quad (17)$$

در مطالعه حالت دوم، پاسخ سیستم به ورودی پله با توجه به تنظیم بهینه پارامترهای تناسبی، مشتقی و انتگرالی

control or an expert HVAC system", Contents lists available at ScienceDirect Expert Systems with Applications, 2011.

- [4] D. Shilane, J. S. Martikainen and S. Dudoit, "A general frame-work for statistical performance comparison of evolutionary computation algorithms", Information Sciences, Journal, Vol. 178, pp. 2870-2879, 2008.
- [5] D. B. Fogel, "Evolutionary Computation: Toward a New Philosophy of Machine Intelligence", IEEE Press, Piscataway, NJ, 1995.
- [6] W. Wang, J. Zhang, T. Chai, "A survey of advanced PID parameter tuning methods," Acta Automatic Sinica, Vol. 26, No. 3, pp. 347-355, 2000.
- [7] Yi Liu; Xuejie Wang; Yanjun Li, "A Modified Fruit-Fly Optimization Algorithm aided PID controller designing," Intelligent Control and Automation (WCICA), 2012 10th World Congress, pp.233-238, 2012.
- [8] Hang Sun; Haibin Duan, "PID controller design based on Prey-Predator Pigeon-Inspired Optimization algorithm," Mechatronics and Automation (ICMA), 2014 IEEE International Conference, pp.1416-1421, Aug. 2014.
- [9] D. Nangru, D. K. Bairwa, K. Singh, S. Nema, P.K. Padhy, "Modified PSO based PID controller for stable processes," Control, Automation, Robotics and Embedded Systems (CARE), 2013 International Conference, Vol. 5, No. 1, pp. 16-18, Dec. 2013.
- [10] L. Yijian; F. Yanjun, "Optimization design of pid controller parameters based on improved E.Coli foraging optimization algorithm," Automation and Logistics, ICAL, IEEE International Conference, pp. 227-231, 2008.
- [11] Y. Luo, J. Zhang and X. Li, "The Optimization of PID Controller Parameters Based on Artificial Fish Swarm Algorithm," Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, pp. 1058-1062, 2007.
- [12] A. Ltaief, A. Taieb, A. Chaari, "PID-PSO control for Takagi-Sugeno Fuzzy model," Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), International Conference, pp. 86-91, 2013.
- [13] M.N.Anwar, M.Shamsuzzoha, S.Pan: A frequency domain PID controller design method using direct synthesis approach. Arab J. Sci Eng., Vol.40, pp.995-1004, 2015.
- [14] J. Nivetha, V. Vijayan, S. Devakumar, C. Selvakumar, and R. C. Panda, "Desig of Tunable method of PID Controller for Integrating Process," International Journal Of Engineering And Computer Science, Vol. 4, No. 12, pp. 15148-15151, 2015.
- [15] B.Cheng, "The application of ant colony optimization algorithm in industrial process control", Graduate thesis of North China Electric Power University, 2005.
- [16] H. Duan, D. Wang, X. Huang J. Zhu, "Research and realization on parameters optimization of PID controller based on ant colony algorithm," Engineering juournal of Wuhan University, Vol. 37, No. 5, pp. 97-100, 2004.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، تنظیم پارامترهای کنترلر تناسبی - انتگرالی - مشتقی (PID) با الگوریتم هایبرید اجتماع گروه ذرات و نلدرمید PSO-NM پیشنهاد شده است. نوآوری کار در وزن دهی پارامترهای پاسخ سیستم شامل ماکزیمم فرآجهش، زمان نشست و زمان خیزش است. بدین ترتیب که علاوه بر سه متغیر K_P ، K_I ، K_D کنترلر، باید وزن های هریک از پارامترهای پاسخ شامل W_D ، W_I ، W_P را با توجه به ارزش آن ها برای طراح و هزینه تحمیلی آن نیز به عنوان متغیر در مسئله بهینه سازی در نظر گرفته شود. پس شش ذره با سرعت و مکان های متفاوت در الگوریتم هوشمند اجتماع ذرات باید معادل شش متغیر مسئله، الگوسازی شود و در نهایت، جواب بهینه (مکان بهینه ذرات) پس از پایان اجرای الگوریتم، تعیین شود. کنترلر PID مبتنی بر حلگر PSO با توجه به ویژگی های فوق العاده اش نظیر خطای ماندگار صفر، حساسیت کافی برای تشخیص شیب خطای سیستم و غیره در این مقاله، بهترین ابزار کنترلی معرفی شده است. با تحلیل نتایج نیز اعتبارسنجی و تأیید بهینگی الگوریتم پیشنهادی در مطالعات شبیه سازی پاسخ به ورودی پله برای دو سیستم مرتبه دوم و مرتبه سوم در یک سیستم کلی حلقه بسته، آزمایش شده است. آنچه از نتایج شبیه سازی استنباط می شود این است که الگوی پیشنهادی با دقت مناسب حتی بیشتر از الگوریتم ژنتیک، به محاسبه تنظیم پارامترهای K_D ، K_I ، K_P برای کنترلر PID و وزن های متناظر با هر یک از پارامترهای پاسخ شامل W_D ، W_I ، W_P قادر است؛ اما سرعت همگرایی به پاسخ بهینه کمتر از الگوریتم های هوشمند دیگر نظیر الگوریتم ژنتیک، است.

مراجع

- [1] S. Dequan*, G. Guili, G. Zhiwei, X. Peng, "Application of Expert Fuzzy PID Method for Temperature Control of Heating Furnace", International Workshop on Information and Electronics Engineering (IWIEE), 2012.
- [2] T. M. Baloch, "design and analysis of PI-fuzzy controller for temperature control system", Fourth Asia International Conference on Mathematical/Analytical Modelling and Computer Simulation, 2010.
- [3] S. Soyguder, M. Karakose, H. Alli, "Design and simulation of self-tuning PID-type fuzzy adaptive

[18] X. Meng, B. Song, "Fast Genetic Algorithms Used for PID Parameter Optimization," Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, August 2007.

[17] S.C.Zhan and J.Wu, "The optimization design based on ant colony algorithm for designing parameters of PID controller", Measurement & Control Technology, Vol.23, No.1, pp.69-71, 2004.

¹ Heating, Ventilating and Air Conditioning (HVAC)

² Real-time

³ Proportional

⁴ Integral

⁵ Derivative

⁶ Process degree

⁷ Ratio of dead-time to dominant time constant

⁸ Derivative filter design

⁹ Automatic Voltage Regulator

¹⁰ Prey-predator algorithm

¹¹ Eberhard

¹² Kennedy

¹³ GHZ

¹⁴ MB

¹⁵ Steady state error(ESS)

¹⁶ Second order control system

¹⁷ Feed-Forward

¹⁸ Third-order control system

Archive of SID