

تنظیم کنترلگر PID با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای کنترل تراز آب

سارا جمالی^۱، محمد جواد منعم^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۶/۲۶

چکیده

اهمیت تحویل و توزیع آب در شبکه‌های آبیاری منجر به استفاده از سیستم‌های دقیق‌تری در نظارت و کنترل آب شده است. یکی از متداولترین سیستم‌های کنترل خودکار، سیستم تناسبی - تجمعی - تفاضلی (PID) است که طراحی و اجرای موفق این کنترل‌کننده به تنظیم ضرایب کنترلی آن وابسته است. در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک در بهینه‌یابی ضرایب این کنترل‌گر برای کنترل تراز آب استفاده شده است، برای این منظور مدل مربوط به آن تهیه و با مدل هیدرودینامیک ICSS تلفیق گردید. روند بهینه‌سازی این ضرایب برای سیستم کنترل خودکار سرریز لولایی در کانال شماره دو ASCE مورد آزمون قرار گرفت، تابع هدف الگوریتم ژنتیک در این تحقیق، متشکل از شاخص‌های ارزیابی MAE، IAE و فرم بی‌بعد SRT بوده است. نتایج حاصله از ضرایب بهینه به دست آمده با ضرایب حاصله از آزمون و خطا در تحقیق مشابه در کانال، سازه و گزینه بهره‌برداری، مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد کلیه شاخص‌ها در ضرایب بهینه شده بهبود یافته‌اند و الگوریتم ژنتیک در تنظیم کنترل‌گر PID مناسب عمل کرده است.

واژه‌های کلیدی: کنترل‌گر PID، سرریز لولایی، شاخص‌های ارزیابی، الگوریتم ژنتیک، کانال آبیاری، مدل ICSS

مقدمه

و تفاضلی کنترل‌کننده باید طوری تعیین گردند که الگوریتم کنترل بتواند در کم‌ترین زمان ممکن و با دقت مناسب و کم‌ترین نوسانات (حداکثر پایداری) متغیر کنترل را به مقدار هدف برساند. هر چه زمان از بین رفتن آشفتگی کم‌تر باشد میزان اختلال وارده به کانال‌های پایین دست کم‌تر خواهد شد و بهره‌برداری از سیستم‌های آبیاری با راندمان بالاتر صورت می‌گیرد. یکی از مشکل‌ترین مراحل تهیه سامانه کنترل PID تعیین ضرایب کنترلی تابعی از نوع سازه‌ها، ظرفیت کانال‌ها، شیوه‌های بهره‌برداری و... می‌باشد که موجب می‌گردد تعیین مقدار مناسب آن‌ها مشکل و پیچیده گردد. علاوه بر آن اثرات متقابل بین بازه‌ای کانال‌ها و تغییرات شرایط جریان نیز موجب پیچیدگی بیش‌تر تعیین ضرایب مناسب می‌گردد. به‌طور معمول، تعیین این ضرایب برای هر سیستم خاص به صورت تجربی و سعی و خطا و بر اساس رفتار فرآیند مورد کنترل پیشنهاد شده است که گاهی این روند بسیار طولانی بوده و یکی از معایب استفاده از کنترل‌کننده PID محسوب می‌گردد (Chainho et al., 2005). بررسی سوابق تحقیق در تعیین ضرایب سامانه کنترل PID نشان می‌دهد که سه دسته از روش‌ها شامل روش‌های مبتنی بر سعی و خطا با ملاک قضاوت کارشناسی و یا معیارهای کمی شاخص‌های عملکرد (Monem and Hoseinzade., 2011)؛ شاوردی و منعم، (۱۳۸۹)، روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی خطی (Baume et al. 1999) و (Rijo and Arranja., 2005) و روش‌های مبتنی بر تئوری‌های

سیستم‌های کنترل خودکار وظیفه پایش و تعیین میزان تنظیمات و اعمال مانور سازه‌ها را دارند. این سیستم‌ها شامل دو بخش نرم‌افزاری و سخت‌افزاری هستند که بخش نرم‌افزاری در قالب یک الگوریتم کنترل، ضمن دریافت اطلاعات، محاسبه میزان تغییرات سازه و بخش سخت‌افزاری علاوه بر پایش اطلاعات، اعمال تنظیمات محاسبه‌شده را بر عهده دارد. یکی از قدیمی‌ترین و متداولترین الگوریتم‌های کنترل، سامانه کنترل کلاسیک PID^۳ است که در سیستم‌های هیدرولیکی مانند کانال‌های آبیاری نیز کاربرد فراوانی دارد. در سامانه کنترل PID سعی در حداقل کردن خطای بین متغیر اندازه‌گیری شده (عمق آب) و مقدار هدف در زمان کوتاهی است که این کار از طریق تعریف سه پارامتر تناسبی (Proportional)، تجمعی (Integral) و تفاضلی (Derivative) صورت می‌پذیرد. طراحی و اجرای موفق کنترل‌کننده‌های تناسبی - تجمعی - تفاضلی (PID) به تنظیم ضرایب کنترلی وابسته است. ضریب تناسبی، تجمعی

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده کشاورزی، گروه سازه‌های آبی S.jamali09@gmail.com

۲- دانشیار دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده کشاورزی، گروه سازه‌های آبی

(*- نویسنده مسئول: Email: Monem_mj@modares.ac.ir

3- Proportional-integral-derivative

تجمعی انحراف عمق از محدوده مجاز در طول دوره بهره‌برداری و مقدار تفاضلی خروجی کنترل (D) متناسب با شیب تغییرات انحراف عمق آب در زمان است که در نهایت میزان کلی خروجی کنترل (تنظیم سازه) $(u(t))$ ، طبق رابطه (۱) از جمع این سه جزء حاصل می‌شود.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^T (e) dt + K_d \frac{d(e)}{dt} \quad (1)$$

که در آن K_p ، K_i و K_d به ترتیب ضرایب تناسبی، تجمعی، تفاضلی و T بازه زمانی کنترل تجمعی و t بازه زمانی کنترل تفاضلی است. ضریب K_p مناسب نقش مؤثر در کاهش زمان خیز و خطای ماندگار سیستم ۲ دارد اما آن را از بین نمی‌برد. ضریب K_i در حذف خطای ماندگار سیستم باقیمانده از کنترل تناسبی نقش دارد، هر چند ممکن است به دلیل جمع کردن خطاهای قبلی باعث مازاد خطای مقدار فعلی متغیر کنترل از متغیر هدف شود. ضریب K_d نیز در افزایش پایداری سیستم، کاهش مازاد خطا و بهبود پاسخ سیستم نقش دارد.

معرفی کانال استاندارد شماره دو ASCE^۳ و سناریوی بهره‌برداری آن

این کانال با شیب ملایم و طول ۲۸ کیلومتر، شامل ۸ بازه بوده که بازه‌ها به‌وسیله دریچه‌های زیرگذر از هم جدا شده‌اند. در هر بازه یک آبیگر روزنه‌ای در انتها وجود دارد. مقطع کانال دوزنقه‌ای و ضریب زبری مانینگ ۰/۰۲ است و شیب جانبی این کانال ۱/۵ افقی:۱ عمودی (1.5H:1V) می‌باشد. در این کانال در بازه انتهایی برای ثابت نگه‌داشتن رقوم سطح آب از یک پمپ استفاده شده است. این پمپ به‌عنوان خروجی انتهایی کانال می‌باشد. در این تحقیق به‌جای تمامی سازه‌های تنظیم به‌کار گرفته شده در کانال، سازه سرریز لولایی خودکار با منطق PID قرار داده شد. با توجه به اینکه مدل ریاضی استفاده شده از سرریز لولایی در این تحقیق برای شرایط کنترل بالادست تست می‌شود، سازه خودکاری جهت تنظیم سطح آب در بازه انتهایی ضرورت ندارد. لذا به‌جای پمپ انتهایی، سازه سرریز لولایی دستی به‌عنوان خروجی تعریف گردید. عمق آب انتهایی کانال آنقدر کم در نظر گرفته شد که عملاً تأثیری بر روی شرایط بالادست نداشته باشد. مدل ریاضی کانال استفاده شده در این تحقیق در جدول (۱) آمده است.

محاسباتی در شاخه کنترل (Domingues et al., 2011; Van, 2007; Litrico et al., 2005; Overloop et al., 2005) در این زمینه به‌کار رفته است. هم‌چنین محمدیان و همکاران (۱۳۸۹)، نیز از الگوریتم ژنتیک برای بهینه کردن سه ضریب کنترلگر PID استفاده کردند که تابع هزینه در این تحقیق میزان خطا در فرایند کنترل گاورنرهای قدرت در صنایع کشتی‌سازی بوده‌است، این روش با روش‌های معمول ولی قدیمی‌تر دیگر نظیر زیکلر و نیکولز و تغییر مکان قطب‌ها و جدول ITAE مقایسه شد و نشان داد که الگوریتم ژنتیک در تنظیم این پارامترها کاملاً موفق بوده و موجب کاهش زمان خیز، زمان نشست و مازاد خطا شده است. لذا با توجه به توانمندی روش‌های بهینه‌سازی فرامکاشف‌ای (الگوریتم ژنتیک)، می‌توان از این روش‌ها در تعیین ضرایب مناسب کنترل کلاسیک PID، به‌طور مؤثر استفاده نمود. در این تحقیق در نظر است با استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی ضرایب کنترلگر PID، شاخص‌های ارزیابی عملکرد این کنترلگر را برای کنترل تراز آب بهبود داد.

مواد و روش‌ها

مدل ICSS^۱

آزمون سامانه‌های کنترل خودکار مستلزم استفاده از مدل‌های مناسب هیدرودینامیک است. یکی از مدل‌های مناسب جهت شبیه‌سازی شرایط مختلف بهره‌برداری کانال‌های آبیاری مدل هیدرودینامیکی ICSS می‌باشد. این مدل به‌منظور شبیه‌سازی شرایط هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و بهره‌برداری سیستم‌های انتقال آب که همواره تحت تغییرات دبی ورودی و خروجی و تغییرات شرایط فیزیکی و بهره‌برداری هستند طراحی گردید. مدل ICSS به‌صورت یک هسته مرکزی متشکل از تعدادی زیرمجموعه‌های ثابت جهت حل جریان ماندگار و غیرماندگار طراحی گردیده است که می‌توان سایر مجموعه‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی اجزا مختلف انتقال را به راحتی به آن اضافه کرد. زیربرنامه‌های مربوط به جریان ماندگار و جریان غیرماندگار و بهره‌برداری خودکار سازه سرریز لولایی با منطق PID در مدل ICSS موجود بوده‌است. شرح کامل تئوری روابط سرریز لولایی در مرجع (۵) موجود است.

الگوریتم PID

در سامانه کنترل PID سعی در حداقل کردن خطای بین متغیر اندازه‌گیری شده (عمق آب) و مقدار هدف است. مقدار تناسبی خروجی کنترل (P) متناسب با میزان انحراف عمق از محدوده مجاز $(e(t))$ ، تعیین می‌شود، مقدار تجمعی خروجی کنترل (I) متناسب با میزان

2- Steady-state Error

3-American Society of Civil Engineers

1-Irrigation Conveyance System Simulation

جدول ۱- مشخصات مدل ریاضی کانال استاندارد شماره دو ASCE

بازه	طول بازه (m)	رقوم بالادست (m)	رقوم پایین دست (m)	شیب کف کانال	عرض کف (m)	عمق هدف (m)	سازه بالادست	سازه(های) پایین دست
۱	۶۹۹۵	۴۰۰/۰۰۰	۳۹۹/۳۰۰۵	۰/۰۰۰۱	۷	۲/۳	دریچه دستی مخزن	آبگیر روزنه‌ای ۱
۲	۵	۳۹۹/۳۰۰۵	۳۹۹/۳۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۷	۲/۳	آبگیر روزنه‌ای ۱	سرریز لولایی ۱
۳	۲۹۹۵	۳۹۹/۱۰۰۰	۳۹۸/۸۰۰۵	۰/۰۰۰۱	۷	۲/۲۵	سرریز لولایی ۱	آبگیر روزنه‌ای ۲
۴	۵	۳۹۸/۸۰۰۵	۳۹۸/۸۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۷	۲/۲۵	آبگیر روزنه‌ای ۲	سرریز لولایی ۲
۵	۲۹۹۵	۳۹۸/۶۰۰۰	۳۹۸/۳۰۰۵	۰/۰۰۰۱	۷	۲/۲۵	سرریز لولایی ۲	آبگیر روزنه‌ای ۳
۶	۵	۳۹۸/۳۰۰۵	۳۹۸/۳۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۷	۲/۲۵	آبگیر روزنه‌ای ۳	سرریز لولایی ۳
۷	۳۹۹۵	۳۹۸/۱۰۰۰	۳۹۷/۷۰۰۵	۰/۰۰۰۱	۶	۲/۲۵	سرریز لولایی ۳	آبگیر روزنه‌ای ۴
۸	۵	۳۹۷/۷۰۰۵	۳۹۷/۷۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۶	۲/۲۵	آبگیر روزنه‌ای ۴	سرریز لولایی ۴
۹	۳۹۹۵	۳۹۷/۵۰۰۰	۳۹۷/۱۰۰۰۵	۰/۰۰۰۱	۶	۲/۲۵	سرریز لولایی ۴	آبگیر روزنه‌ای ۵
۱۰	۵	۳۹۷/۱۰۰۰۵	۳۹۷/۱۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۶	۲/۲۵	آبگیر روزنه‌ای ۵	سرریز لولایی ۵
۱۱	۲۹۹۵	۳۹۶/۹۰۰۰	۳۹۶/۶۰۰۵	۰/۰۰۰۱	۵	۲/۲	سرریز لولایی ۵	آبگیر روزنه‌ای ۶
۱۲	۵	۳۹۶/۶۰۰۵	۳۹۶/۶۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۵	۲/۲	آبگیر روزنه‌ای ۶	سرریز لولایی ۶
۱۳	۱۹۹۵	۳۹۶/۴۰۰	۳۹۶/۲۰۰۵	۰/۰۰۰۱	۵	۲/۱۵	سرریز لولایی ۶	آبگیر روزنه‌ای ۷
۱۴	۵	۳۹۶/۲۰۰۵	۳۹۶/۲۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۵	۲/۱۵	آبگیر روزنه‌ای ۷	سرریز لولایی ۷
۱۵	۱۹۹۵	۳۹۶/۰۰۰۰	۳۹۵/۸۰۰۰۵	۰/۰۰۰۱	۵	۲/۱۵	سرریز لولایی ۷	آبگیر روزنه‌ای ۸
۱۶	۵	۳۹۵/۸۰۰۰۵	۳۹۵/۸۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۵	۱/۴	آبگیر روزنه‌ای ۸	سرریز لولایی ۸

جهت بدست آوردن بهترین ضرایب برای سیستم کنترل PID، بهینه‌سازی ضرایب در گزینه تغییرات شدید دبی ورودی در ابتدای بازه اول کانال مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات اعمال شده در میزان دبی ورودی مطابق با آزمون شماره دو ASCE برای دو ساعت بهره‌برداری، می‌باشد. در این سناریو، دبی ورودی کانال به میزان ۵۰۰ درصد به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد (از ۲/۷ مترمکعب بر ثانیه به ۱۳/۷ مترمکعب بر ثانیه) و برای ۲ ساعت ادامه دارد. روند شبیه‌سازی مدل هیدرودینامیک برای این تغییرات به ازای هر سری از

ضرایب برای هر عضو از جمعیت انجام می‌شود و پاسخ بهینه و تابع هدف در پایان هر نسل از الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. جهت ارزیابی مدل بهینه‌سازی تهیه شده در برآورد ضرایب و تابع هدف، آنالیز آماری بین نتایج حاصل از آزمون‌های GA و نتایج حاصل از تابع هدف در ضرایب سعی و خطا (حسین‌زاده، ۱۳۸۹) در ۳ ساعت اول سناریوی بهره‌برداری یک ASCE طبق جدول (۲)، انجام شد و در نهایت به منظور ارزیابی ضرایب بهینه به دست آمده، این سناریو بهره‌برداری به طور کامل مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۲- تغییرات اعمال شده در گزینه تغییرات شدید

بازه	دبی اولیه آبگیرها (m ³ /s)	دبی اولیه سرریزها (m ³ /s)	تغییرات اولیه دبی آبگیرها در ساعت ۳ (m ³ /s)	دبی سرریزها پس از تغییرات (m ³ /s)	تغییرات ثانویه دبی آبگیرها در ساعت ۵ (m ³ /s)	دبی سرریزها پس از تغییرات ثانویه (m ³ /s)
سرپ کانال	---	۱۳/۷	---	۱۳/۷	---	۱۳/۷
۱	۰/۲	۱۲/۰	۱/۵	۲/۵	-۱/۵	۱۱
۲	۰/۳	۱۰/۲	۱/۵	۲/۲	-۱/۵	۹/۵
۳	۰/۲	۷/۵	۲/۵	۲/۰	-۲/۵	۷
۴	۰/۳	۷/۲	---	۱/۷	---	۷
۵	۰/۲	۷/۰	---	۱/۵	---	۷
۶	۰/۳	۶/۲	۰/۵	۱/۲	-۰/۵	۶/۵
۷	۰/۲	۵/۰	۱/۰	۱/۰	-۱/۰	۵/۵
۸	۰/۳	۲/۷	۲/۰	۰/۷	-۲/۰	۳/۵

الگوریتم بهینه سازی ژنتیک

در این تحقیق با استفاده از الگوریتم ژنتیک و بهینه سازی چند هدفی مدل تعیین ضرایب بهینه کنترل گر PID تهیه و با مدل هیدرودینامیک ICSS تلفیق گردید. ابداع الگوریتم های ژنتیک، به وسیله پروفسور جان هنری هالند^۱ از دانشگاه میشیگان در سال ۱۹۷۵ میلادی صورت گرفت. در الگوریتم ژنتیک هر گزینه از متغیرهای تصمیم را به شکل یک کروموزوم که مجموعه ای از ژن ها است شبیه سازی کرده و مجموعه تمام کروموزوم های موجود، همان فضای حالت مسئله را تشکیل می دهد. فرایند بهینه سازی الگوریتم ژنتیک بدین صورت است:

در ابتدا ساختاری صحیح برای کروموزوم ها که همان راه حل های مسئله هستند انتخاب می شود.

با تولید تصادفی مجموعه ای از جواب های مسئله، جمعیت آغازین تشکیل می گردد.

با استفاده از یک روند انتخاب تصادفی، تعدادی از جواب های مسئله یا همان کروموزوم ها به گزینی شده و به عنوان والدین انتخاب می شود.

با استفاده از اعمالی مانند ترکیب و جهش، فرزندان آنها تولید می شوند.

فرزندان به جای والدین در جامعه جایگزین می شوند.

مراحل ۳ تا ۵ تا زمانی که جامعه به تکامل نهایی برسد ادامه می یابد.

اجزای الگوریتم ژنتیک در مدل تعیین ضرایب

در این تحقیق سه ضریب کنترل گر PID به عنوان کروموزوم های الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته شده اند و با روش دودویی نمایش داده می شوند. هم چنین برای ارزیابی عملکرد سیستم کنترل خودکار سرریز لولایی تحت ضرایب مختلف از GA از شاخص های ارائه شده توسط ASCE (Clemmens et al., 1998) و منعم و مساح (۱۳۸۲) استفاده شده است که به عنوان اجزای تابع هدف الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته شده اند. این شاخص ها عبارتند از: خطای مطلق ماکزیمم (MAE)^۲ و خطای مطلق تجمعی (IAE)^۳ که به ترتیب از روابط (۲) و (۳) بدست می آید و زمان عکس العمل سیستم (SRT)^۴، که عبارت است از فاصله زمانی بین خارج شدن سطح آب از محدوده مجاز عمق حول عمق هدف، تا زمانی که عمق آب مجدداً به این محدوده باز می گردد و در آن تثبیت می شود. که در این تحقیق این محدوده، ۲/۵

درصد عمق هدف در نظر گرفته شده است.

$$MAE = \frac{\max |y_m - y_t|}{y_t} \quad (۲)$$

که در آن y_m عمق آب مشاهده شده در زمان t و y_t عمق آب هدف می باشد.

$$IAE = \frac{\frac{\Delta t}{T} \sum_{t=0}^T |y_m - y_t|}{y_t} \quad (۳)$$

که در آن Δt گام زمانی محاسباتی و T طول دوره بهره برداری می باشد. برای محاسبه این شاخص باید گام زمانی محاسباتی در طول دوره بهره برداری ثابت باشد. تابع هدفی که در این تحقیق برای الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته شده است از مجموع سه شاخص MAE، IAE و فرم بی بعد شده SRT حاصل شده است.

$$CF = \sum_{i=1}^n MAE_i + \sum_{i=1}^n IAE_i + \sum_{i=1}^n \frac{SRT_i}{T_0} \quad (۴)$$

n تعداد سازه هایی است که عمق آب در بالادست آن کنترل می شود و T_0 زمان بهره برداری است. این تابع در واقع به عنوان تابع هزینه (CF)^۵ در نظر گرفته شده که در فرایند بهینه سازی سعی در حداقل کردن آن شده است.

مقادیر اولیه ضرایب با توجه به محدوده های مناسب ضرایب پیشنهادی در مراجع مختلف در نظر گرفته شده است. فرایند بهینه سازی که در این تحقیق در نظر گرفته شد بدین صورت بوده است که در ابتدا مقدار ضریب تناسبی کنترل گر PID (K_p)، با مقادیر اولیه ضرایب تجمعی (K_i) و تفاضلی (K_d) که در طول فرایند بهینه سازی ثابت هستند، بهینه می شود. در مرحله بعد با ثابت نگهداشتن مقدار ضریب به دست آمده K_p و اولیه K_d ضریب K_i بهینه می شود و نهایتاً در مرحله سوم با ثابت نگهداشتن ضرایب بهینه K_p و K_i ضریب K_d بهینه می شود و سه ضریب بهینه استخراج می شوند. با توجه به اینکه در این تحقیق مقدار حداقل تابع هدف مدنظر بوده است، شرط توقف فرایند بهینه سازی تعداد تکرارها بود. با توجه به اینکه کارایی GA به عوامل اندازه جمعیت، تعداد نسل، مقدار احتمال جهش، بستگی دارد، مقادیر بهینه تابع هدف در اندازه جمعیت های ۸، ۱۰ و ۱۲ برای ۲۰ نسل و اندازه جمعیت ۱۶ برای ۱۰ نسل در مقدار احتمال جهش ۰/۰۴ و انجام ۳ تکرار برای هر کدام مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۳). در نهایت گزینه مناسب با سه مقدار احتمال جهش ۰/۰۴، ۰/۰۶ و ۰/۱۲ و هر کدام با سه تکرار مورد آزمون قرار گرفت و مقدار مناسب عوامل بر اساس تابع هدف و مقایسه با هزینه اجرای آن انتخاب گردید.

- 1- John Henry Holland
- 2- Maximum Absolute Error
- 3- Integral of Absolute Magnitude of Error
- 4- System Response Time

جدول ۳- آزمون پارامترهای مختلف الگوریتم ژنتیک

شماره آزمون	جمعیت	نسل	احتمال جهش	جمعیت	نسل	احتمال جهش
۱	۸	۲۰	۰/۰۴	۱۶	۱۰	۰/۰۴
۲	۱۰	۲۰	۰/۰۴	۱۶	۱۰	۰/۰۴
۳	۱۲	۲۰	۰/۰۴	۱۶	۱۰	۰/۰۴
۴	۱۶	۱۰	۰/۰۴	۱۶	۱۰	۰/۱۲

بررسی و تجزیه و تحلیل نتایج

مدل هیدرودینامیک CanalMan محدوده ۷-۱ را برای ضریب K_p و $1-0/001$ را برای ضرایب K_i و K_d پیشنهاد داده است که در این مدل نیز در ابتدا ضرایب بهینه در این محدوده مورد بررسی قرار گرفت اما با توجه به نتایج به دست آمده و عدم همگرایی مدل هیدرودینامیک در حدود بالایی این ضرایب، محدوده مناسب ضرایب برای K_p ، $5-1$ و برای K_i و K_d ، $1-0/001$ در نظر گرفته شد، همانطور که قبلاً گفته شد عملکرد مدل GA برای ۳ اندازه جمعیت ۸، ۱۰ و ۱۲ برای ۲۰ نسل، و جمعیت ۱۶ برای ۱۰ نسل، و هر کدام با ۳ تکرار انجام شد. نتایج حاصل از این ۴ آزمون در نرم‌افزار آماری SPSS تحت آزمون دانکن مورد آنالیز قرار گرفت که بین آزمون‌های GA اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. این نتیجه عدم حساسیت مدل را به پارامترهای انتخاب شده نشان می‌دهد. اما نتایج حاصل از تابع هدف در آزمون‌های تحت GA با نتیجه حاصل از ضرایب سعی و خطا، اختلاف معنی‌داری را از خود نشان دادند. که این مطلب نشان-دهنده تفاوت عملکرد GA با روند سعی و خطا در برآورد مقدار تابع هدف می‌باشد. میانگین تابع هدف تکرارهای هر ۴ آزمون GA به هم نزدیک بوده است اما در این میان، میانگین تابع هدف تکرارهای آزمون ۳ و پس از آن آزمون ۴ کمترین مقدار را داشته‌اند. هرچند که آنالیز آماری عدم حساسیت مدل را به تعداد جمعیت و نسل نشان داد اما از لحاظ کاربردی گزینه‌ای مناسب‌تر است که هزینه کمتری را در

بر داشته باشد. با توجه به این موضوع، هزینه زمانی که از آزمون‌های ۱ و ۲ و ۴ برآورد شد تقریباً یکسان بوده‌اند (در حدود ۸۰ دقیقه)، تعداد شبیه‌سازی در آزمون ۴ از سایر آزمون‌ها کم‌تر (تعداد ۴۸۰) بوده است و در مقابل آزمون ۳ دارای بیش‌ترین هزینه زمانی (در حدود ۱۵۰ دقیقه) و تعداد شبیه‌سازی (۷۲۰) را داشته است. اگرچه به مقایسه میانگین تابع هدف از سه تکرار آزمون‌های ۳ و ۴ بسیار نزدیک بوده‌اند ولی با توجه به هزینه اجرای مدل در این آزمون‌ها، گزینه ۴ به عنوان بهترین آزمون در نظر گرفته شد. این آزمون دارای جمعیت ۱۶ با تعداد ۱۰ نسل بوده است. هم‌چنین برای یافتن مقدار احتمال جهش مناسب، آزمون مناسب جمعیت و نسل از مرحله قبل، در ۳ مقدار مختلف احتمال جهش و هر کدام در ۳ تکرار مورد ارزیابی قرار گرفت. مقادیر تابع هدف در این سه آزمون در نرم‌افزار آماری SPSS تحت آزمون دانکن مورد آنالیز قرار گرفت، که بین آزمون‌ها اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. این نتیجه عدم حساسیت مدل را به این مقادیر احتمال جهش نشان می‌دهد. اما با مقایسه میانگین نتایج تکرارها در هر آزمون، مدل بهینه‌سازی در احتمال جهش $0/06$ (آزمون ۲)، میانگین تکرارهای کم‌تری داشته است. ضرایب متناظر در کم‌ترین تابع هدف از تکرارهای این آزمون برای K_p ، K_i و K_d به ترتیب برابر است با $3/5$ ، $0/096$ و $0/005$ ، که برای همه سازه‌ها یکسان در نظر گرفته شده است.

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد سیستم کنترل PID در بهترین ضرایب از آزمون و خطا

زمان (ساعت)	شاخص	آب بند ۱	آب بند ۲	آب بند ۳	آب بند ۴	آب بند ۵	آب بند ۶	آب بند ۷
۰-۳	MAE(%)	۱/۲۵۶	۱/۵۵۶	۱/۹۲۴	۲/۰۳۵	۲/۲۷	۲/۲۳۳	۲/۸۶
	IAE(%)	۰/۰۷۴	۰/۰۸	۰/۰۸۱	۰/۱۲	۰/۰۷۲	۰/۰۹۵	۰/۰۷۳
	SRT(h) (2.5%)	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۳
۳-۱۵	MAE(%)	۰/۸۱۶	۰/۸۲	۱/۳۷۷	۰/۲۶۱	۰/۱۰۷	۰/۳۶۵	۰/۸
	IAE(%)	۰/۰۴	۰/۰۱۱	۰/۰۱۴	۰/۰۹۱	۰/۰۱۴	۰/۰۱۶	۰/۰۱۴
	SRT(h) (2.5%)	.	.	۰/۰۱	.	.	.	.
۱۵-۲۴	MAE(%)	۰/۹	۰/۹۱۵	۱/۵۵	۰/۳۲۷	۰/۱۵۶	۰/۴۱	۰/۸۳۲
	IAE(%)	۰/۰۱	۰/۰۱۲	۰/۰۲	۰/۰۷۱	۰/۰۱۶	۰/۰۱۹	۰/۰۴
	SRT(h) (2.5%)	.	.	۰/۰۱	.	.	.	.

جدول ۵- مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد سیستم کنترل PID در بهترین ضرایب ار GA

زمان (ساعت)	شاخص	آب بند ۱	آب بند ۲	آب بند ۳	آب بند ۴	آب بند ۵	آب بند ۶	آب بند ۷
۰-۳	MAE(%)	۱/۱۶	۱/۱۱۷	۱/۰۹۶	۰/۹۷۳	۰/۸۸۱	۰/۹۲۷	۰/۸
	IAE(%)	۰/۰۶۱	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶۵	۰/۰۴	۰/۰۴۶	۰/۰۴۵
	SRT(h) (2.5%)	.	.	.	.	.	.	.
۳-۱۵	MAE(%)	۰/۸۱۶	۰/۸۳۱	۱/۳۸۷	۰/۲۳	۰/۱۹	۰/۳۷	۰/۸
	IAE(%)	۰/۰۱۴	۰/۰۱۲	۰/۰۱۶	۰/۰۶	۰/۰۱۵	۰/۰۱۸	۰/۰۲۱
	SRT(h) (2.5%)	.	.	۰/۰۲	.	.	.	.
۱۵-۲۴	MAE(%)	۰/۸۷۳	۰/۹	۱/۵۶	۰/۳۱	۰/۱۵	۰/۴۱	۰/۸۴
	IAE(%)	۰/۰۰۹	۰/۰۰۸	۰/۰۱۳	۰/۰۴۷	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۴۲
	SRT(h) (2.5%)	.	.	۰/۰۱	.	.	.	.

مشابه با ضرایب به دست آمده از آزمون و خطا (حسین زاده، ۱۳۸۹) و در مقایسه با آن، میزان بهبود شاخص‌های ارزیابی مد نظر قرار گرفت که در جدول (۶) آمده است. بهبود شاخص‌ها از رابطه (۵) به دست آمده است.

$$IMP = \frac{Index_{T\&E} - Index_{OPT}}{Index_{T\&E}} \quad (5)$$

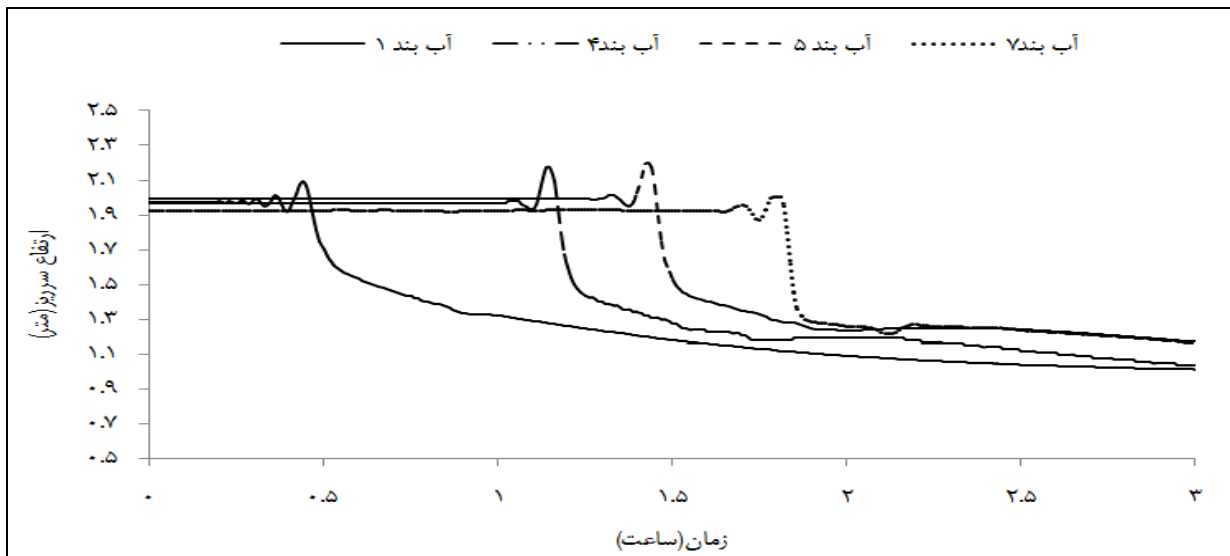
اندیس T&E مربوط به شاخص‌های به دست آمده از ضرایب آزمون و خطا و اندیس OPT مربوط به حالت بهینه سازی است. همان طور که در جدول (۶) مشخص است، میانگین مقادیر بهبود شاخص‌های ارزیابی IAE و MAE، در ۳ ساعت اول بیش تر از دو دوره زمانی دیگر بوده است. اما به طور کلی میانگین بهبود عملکرد کل سازه‌های سیستم با ضرایب بهینه شده در طول بهره برداری ۲۴ ساعته برای شاخص MAE، ۱۱/۵۳ درصد و برای شاخص IAE، ۱۹/۳۴ بوده است. شکل‌های (۱) و (۲) ارتفاع سازه‌های آب بند را برای دو حالت ضرایب بهینه شده از GA و سعی و خطا نشان می‌دهند.

سامانه کنترل PID بر روی سرریز لولایی با ضرایب بهینه به دست آمده از GA در سناریو بهره برداری که قبلاً معرفی گردید (جدول ۲)، اجرا شد. مقادیر شاخص‌های ارزیابی در جدول (۴) و جدول (۵) به ترتیب برای ضرایب حاصل از آزمون و خطا و ضرایب بهینه شده از GA نشان داده شده است.

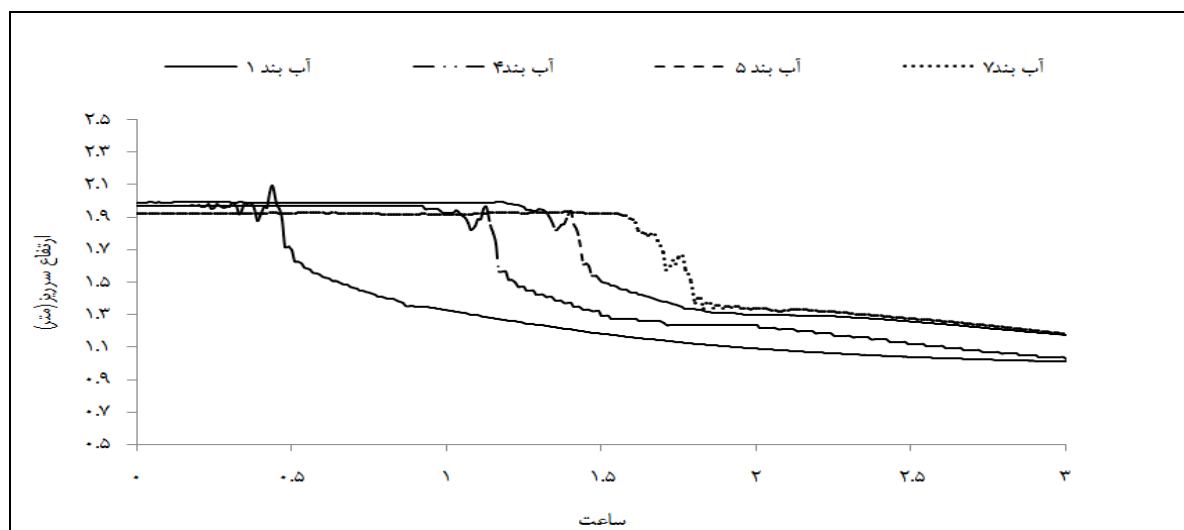
با مقایسه مقادیر شاخص‌های ارزیابی در دو حالت ضرایب بهینه شده از GA و ضرایب تهیه شده از آزمون و خطا می‌توان دریافت که نتایج شاخص‌ها در ۳ ساعت اول که بهینه سازی در آن انجام گرفته است، برای ضرایب بهینه شده از GA کم تر از ضرایب تهیه شده از آزمون و خطا بوده است، هم چنین بیشینه زمان پایداری (فاکتور SRT)، در سطح ۲/۵ درصد عمق کنترلی که در طول بهره برداری ۲۴ ساعته، برای ضرایب بهینه به دست آمده است، ۰/۰۲ ساعت (۷۲ ثانیه)، برای آب بند سوم و برای بقیه آب بندها صفر بوده است که نشان می‌دهد این ضرایب قادر است سیستم را در مدت زمان کوتاهی به پایداری برساند در حالی که بیشینه این فاکتور در ضرایب آزمون و خطا برابر با ۰/۰۹ ساعت (۵/۴ دقیقه) بوده است. جهت ارزیابی نتایج به دست آمده از GA در سناریو بهره برداری

جدول ۶- مقادیر بهبود شاخص‌های ارزیابی عملکرد سیستم کنترل

میانگین	مقادیر بهبود شاخص‌ها (%)							شاخص	زمان (ساعت)
	آب بند ۷	آب بند ۶	آب بند ۵	آب بند ۴	آب بند ۳	آب بند ۲	آب بند ۱		
۴۶/۱۸	۷۲/۰۸	۵۸/۴۹	۶۱/۱۹	۵۲/۲۰	۴۳/۰۱	۲۸/۱۷	۸/۱۴	MAE	۰-۳
۳۵/۴۸	۳۷/۹۲	۵۲/۷۸	۴۳/۵۳	۴۵/۹۲	۲۶/۰۳	۲۵/۹	۱۷/۲۹	IAE	
-۱۳/۶۱	-۲/۲۱	-۰/۸۴	-۷۶/۵۸	-۱۳/۲۹	-۰/۷۵	-۱/۳۲	-۰/۲۶	MAE	۳-۱۵
۰/۷۵	-۴۹/۸۴	-۱۵/۸۰	-۷/۴۴	۳۵/۶۲	-۱۵/۴۹	-۵/۱۰	۶۳/۳۱	IAE	
۲/۰۲	-۰/۴۶	-۰/۵۲	۵/۹۴	۴/۸۶	-۰/۴۸	۱/۶۷	۳/۱۶	MAE	۱۵-۲۴
۲۱/۸۰	-۴/۴۲	۳۰/۲۰	۲۰/۳۸	۳۳/۷۳	۳۱/۷۷	۲۹/۹۳	۱۱/۰۱	IAE	



شکل ۱- نمودار تغییرات ارتفاع سازه‌های سرریز لولایی در ضرایب بهینه آزمون و خطا



شکل ۲- نمودار تغییرات ارتفاع سازه‌های سرریز لولایی در ضرایب بهینه GA

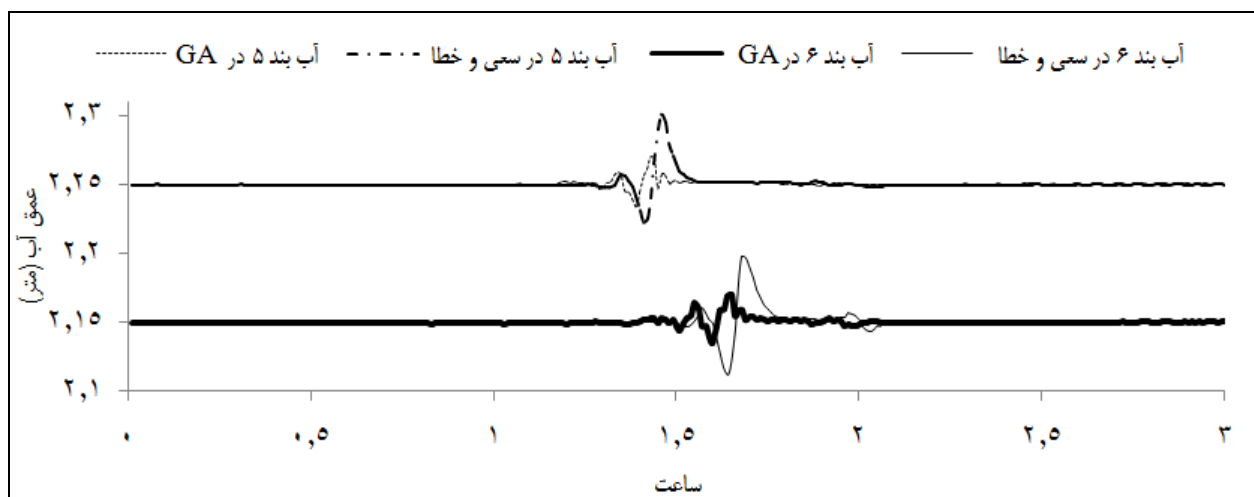
که مشخص است، در نمودارهای مربوط به ضرایب GA دامنه نوسانات عمق آب کمتر و مدت زمان رسیدن به پایداری جریان نیز کمتر است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌یابی ضرایب کنترلر خودکار PID استفاده شد لذا مدل نوشته شده از GA با مدل هیدرودینامیک ICSS تلفیق گردید و برای آزمون عملکرد آن، روند بهینه‌سازی این ضرایب برای سیستم کنترل خودکار سرریز لولایی در کانال شماره دو ASCE، تحت گزینه بهره‌برداری شدیدترین تغییر در ورودی کانال مورد ارزیابی قرار گرفت.

همان‌گونه که از شکل‌ها مشخص است، با رسیدن موج مثبت افزایشی، سیستم کنترل PID به گونه‌ای عمل می‌کند که ارتفاع سرریزها کاهش یافته و دبی عبوری از روی سازه‌ها افزایش می‌یابد و عمق بالادست سرریزها کاهش یافته و به محدوده مجاز عمق هدف باز می‌گردد. اما مقایسه ارتفاع سرریزها در دو حالت ضرایب بهینه‌شده GA و ضرایب بهینه آزمون و خطا نشان می‌دهد که عکس‌العمل سازه با ضرایب بهینه GA ملایم‌تر از حالت ضرایب سعی و خطا بوده که خود موجب نوسانات کمتر ارتفاع آب و شاخص‌های عملکرد مناسب‌تر شده‌است.

نمودارهای شکل (۳) نمونه‌ای از تغییرات ارتفاع آب در بالادست سازه‌های آب بند را نشان می‌دهد که مربوط به آب بندهای ۵ و ۶ در دو حالت ضرایب بهینه شده از GA و آزمون و خطا است. همان‌طور



شکل ۳- نمودار تغییرات عمق آب در بالادست سازه‌های ۵ و ۶

و نوسانات ارتفاع آب کم‌تر و مدت زمان رسیدن به پایداری جریان کوتاه‌تر شده‌است. نتایج حاصل از ارزیابی مدل تهیه شده نشان‌دهنده عملکرد مناسب الگوریتم ژنتیک در بهینه‌یابی ضرایب کنترل‌گر PID بوده است و می‌توان استفاده از آن را در کانال‌های آبیاری توصیه نمود.

مراجع

حسین زاده، ز. ۱۳۸۷. طراحی و تهیه مدل ریاضی و فیزیکی سرریز لولایی خودکار و آزمون سیستم اتوماسیون آن. پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه سازه های آبی، دانشگاه تربیت مدرس.

شاهوردی، ک.، منعم، م. ج. ۱۳۸۹. ساخت و آزمون سامانه کنترل خودکار PID برای کانالهای آبیاری در مقیاس آزمایشگاهی. مجله هیدرولیک، جلد ۵، شماره ۲، ص ۶۵-۷۵.

محمدیان، ح.، جوادی، ش. و اکبری، ش. ۱۳۸۹. تنظیم پارامترهای کنترل‌گر PID با استفاده از الگوریتم ژنتیک و مقایسه آن با روشهای دیگر. اولین همایش منطقه‌ای مهندسی برق.

منعم، م. ج.، مساح، ع. ۱۳۸۲. تهیه مدل ریاضی سازه هیدرولیکی آمیل. چهارمین کنفرانس هیدرولیک ایران، شیراز.

Baume, J.P., Malaterre, P.O and Sau, J. 1999. Tuning of PI controllers for an irrigation canal using optimization tool, In Proc. of the USCID Workshop, 483-500.

مدل تهیه شده قابلیت بهینه‌سازی ضرایب کنترل در گزینه‌های کنترلی P، PI و PID را نیز دارا می‌باشد. این مدل توانسته است در یک تابع چند هدفه متشکل از سه شاخص ارزیابی MAE, IAE, SRT برای کل بازه‌ها، که از سازه‌های آب‌بند یکسان تشکیل شده است، در مدت زمان نسبتاً مناسبی (حدود ۲ ساعت)، در مقایسه با روند آزمون و خطا ضرایب بهینه را تعیین کند.

فهرست نشانه‌ها	
e	خطا
K_d	ضریب دیفرانسیلی
K_i	ضریب انتگرالی
K_p	ضریب تناسبی
MAE	خطای مطلق ماکزیمم
IAE	خطای مطلق تجمعی
SRT	زمان پاسخگویی سیستم
u	متغیر کنش یا خروجی کنترل
y_t	عمق هدف
y_m	عمق اندازه‌گیری شده
t	زمان
T	زمان بهره‌برداری
IMP	بهبود مقدار شاخص

بررسی نتایج حاصل از بهبود شاخص‌های ارزیابی عملکرد سیستم (MAE, IAE, SRT)، در ضرایب بهینه به‌دست آمده از GA، نشان داد که کلیه شاخص‌های عملکرد بهبود یافته و به طور کلی میانگین بهبود عملکرد کل سازه‌های سیستم در ضرایب بهینه شده در طول بهره‌برداری ۲۴ ساعته، برای شاخص MAE، ۱۱/۵۳ درصد و برای شاخص IAE، ۱۹/۳۴ بوده است. تنظیم ارتفاع سرریزها ملایم‌تر بوده

- Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, P.27-37.
- Monem,M. J., Hoseinzade,Z. 2011. Construction and Evaluation of Automatic Pivot Weir Control System, Proceedings of ICID 21st International Congress on Irrigation and Drainage, 16-23 October, Tehran, Iran, PP. 7-21.
- Rijo,M. and Arranja,C. 2005. Hydraulic Performance of a Downstream Controlled Irrigation Canal Equipped with Different Offtake Types, Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal, Vol.7, ISSN: 1682-1130.
- Van Overloop,P.J., Schuurmans,J., Brouwer,R and Burt,C.M. 2005. Multiple-Model Optimization of Proportional Integral Controllers on Canals. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 131(2): 190-196.
- Cháinho,J., Pereira,P., Rafael,Sand Pires,A.J. 2005. A Simple PID Controller with Adaptive Parameter in a DSPIC; Case of Study, 9CHLIE - 9th Spanish Portuguese.
- Clemmens,A.J., Kacerek,T.F., Grawitz,B and Schuurmans,W. 1998. Test Cases for Canal Control Algorithms, Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 124(1): 23-29.
- Domingues,J., Valerio,D and da Costa,J.S. 2011. Rule-based fractional control of an irrigation canal, Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, April,vol.6, ISSN: 2. 5 Pages.
- Hoseinzade
- Litrico,X., Malaterre,P.O., Baume,J.P., Vion,P.Y and Ribot-Bruno,J. 2007. Automatic Tuning of Controller for an Irrigation Canal Pool, Journal of

PID Controller Tuning Using Genetic Algorithms to Control the Water Level

S. Jamali¹, M. J. Monem^{2*}

Received: Dec. 25, 2013 Accepted: Sep. 17, 2014

Abstract

Importance of water delivery and distribution leads to use more accurate systems for water monitoring and controlling. The proportional-integral-derivative (PID) control system is one of the most prevalent control systems that its successful design and implementation depend on control coefficients tuning rules. In this study, Genetic Algorithm has been used to optimize the coefficients of the PID control to control water level; so its model has developed and linked with ICSS Hydrodynamic model. The optimization process was applied on the pivot gate in ASCE test case 2. The objective function of the GA consists of three performance indexes of MAE, IAE and dimensionless form of SRT. The results of optimized coefficients were compared with the trial and error coefficients in study which was alike in canal, structure and operation scenario. The results show that all of the indexes have been improved generally and Genetic Algorithm functioned properly in PID tuning.

Key words: PID controller, Pivot weir, Evaluation indexes, Genetic algorithm, Irrigation canal, ICSS model.

1- M. Sc. Graduate of Tarbiat Modares University, Faculty of Agriculture, Water Structure Engineering Department

2- Associate Professor of Tarbiat Modares University, Faculty of Agriculture, Water Structure Engineering Department
Tehran

(*-Corresponding Author Email Monem_mj@modares.ac.ir)