مجله تحقيقات آب و خاک ايران (۴۳) ۱, ۱۳۹۱ (۹۴-۸۷)

# توسعه و آزمون مدل رياضي سرريز لولايي خودکار با منطق PID

محمد جواد منعم[۱]* و زينب حسين زاده[۲]
[۱] استاديار، [۲] دانشجوي دکتري، دانشکده کشاورزي، دانشگاه تربيت مدرس
(تاريخ دريافت: ۱۳۸۹/۵/۱۷- تاريخ تصويب: ۱۳۹۰/۹/۲۱)

## چکيده

به‌منظور ارتقاء عملکرد شبکه‌هاي آبياري، تأمين انعطاف‌پذيري بالاتر و بهبود روش‌هاي تحويل و توزيع، استفاده از سيستم‌هاي کنترل خودکار در شبکه‌هاي آبياري مطرح مي‌باشد. در اين تحقيق، مدل رياضي سرريز لولايي خودکار با منطق PID به‌صورت تلفيقي با مدل هيدروديناميک ICSS، جهت کنترل سطح آب در کانال‌هاي آبياري تهيه شد. اين مدل بر روي کانال استاندارد شماره دو ASCE تحت گزينه بهره‌برداري تغييرات شديد دبي مورد آزمون قرار گرفت. اين کانال داراي شيب ملايم، طول ۲۸ کيلومتر و ۸ بازه بوده که در انتهاي هر بازه يک آبگير و يک سازه تنظيم قرار دارد. از بررسي نمودارهاي سطح آب و شاخص‌هاي عملکرد MAE و IAE، مشخص گرديد که حداکثر خطا ۳% بوده که از لحاظ کاربردي مناسب است و اين انحراف طي زمان کوتاهي (حدود چند دقيقه) اصلاح شده است. بنابراين عملکرد سيستم کنترل خودکار تهيه‌شده مطلوب بوده و جهت کنترل سطح آب در کانال‌هاي آبياري قابل‌توصيه مي‌باشد.

واژه‌هاي کليدي: اتوماسيون، کنترل سطح آب،کانال آبياري، منطق کنترل PID، سرريز لولايي.

## مقدمه

امروزه با افزايش جمعيت، ظاهرشدن چهره کم‌آبي، بروز خشکسالي‌ها و افزايش تقاضا براي مصرف آب در کشور و محدوديت منابع آب توجه بيش از پيش کارشناسان به استفاده بهينه از منابع آب موجود و افزايش بهره‌وري جلب شده است. در اين ميان بخش کشاورزي به‌عنوان بزرگترين مصرف‌کننده آب، عملکرد ضعيفي را در بهره‌وري بهينه از منابع آب ارائه نموده است، و لذا توجه بيشتر محققان به اصلاح و بهبود عملکرد و ارتقا بهره‌وري آب در اين بخش ضروري مي‌باشد (Monem and Kiapasha., 2009).

يکي از عوامل مؤثر بر عملکرد شبکه‌هاي آبياري، مديريت توزيع و سيستم‌هاي کنترل مربوط است (Monem and Mamizade., 2005). يک سيستم کنترل شامل دو بخش محاسبه ميزان تنظيمات سازه‌ها (الگوريتم سيستم کنترل) و اعمال تنظيمات محاسبه‌شده بر روي سازه‌ها (سخت‌افزار سيستم کنترل) مي‌باشد. موفقيت يک سيستم کنترل به توانايي الگوريتم کنترل در تنظيم عامل تحت‌کنترل در محدوده مورد نظر بستگي دارد. نحوه عمل سازه‌هاي کنترل تحت الگوريتم‌هاي مختلف متفاوت است. هريک از اين الگوريتم‌ها داراي معايب و مزايايي مي‌باشند که براساس اهداف و ويژگي‌هاي طرح موردنظر انتخاب مي‌شوند. يکي از الگوريتم‌هاي مناسب و بسيارمتداول در صنعت، کنترل‌کننده کلاسيک PID (Proportional-Integral- Derivative) است که درسيستم‌هاي هيدروليکي مانندکانال‌هاي آبياري نيز کاربرد دارد. با توجه به اينکه تاکنون خودکارسازي سرريز لولايي در ايران صورت نگرفته است، بنابراين در آغاز سعي شد از اين منطق که شناخته‌شده و آسان‌تر است استفاده شود. از معايب اين منطق نيز مي‌توان به پيچيدگي استخراج ضرائب کنترلي اشاره کرد. اين الگوريتم اولين بار در سال ۱۹۳۹ به بازار عرضه شد و تا به امروز به‌عنوان پرکاربردترين کنترل‌کننده مطرح بوده است (Araki, 2009). تحقيقات بسياري در زمينه کاربرد الگوريتم PID و مشتقات آن در خودکارسازي کانال‌هاي آبياري صورت گرفته است. کنترل‌کننده‌هاي غيرمتمرکز با منطق PI به‌صورت فيزيکي بر روي کانال شماره ٦ Coleambally در استراليا مورد آزمون قرار گرفت و نتايج حاکي از عملکرد مناسب کنترل‌کننده در آزمايشات صحرايي مي‌باشد (Ooi and Wayer, 2008). جهت نوسازي منطقه آبياري EASET BENCH واقع در Montana از سازه‌هاي مجهز به کنترل‌کننده‌هايي با منطق PI استفاده گرديده است. پس از گذشت چندين سال از به‌کارگيري اين سازه‌ها مشخص گرديده است که موفقيت سيستم کنترل موجود مستلزم به‌کارگيري نيروي انساني مجرب و اجراي برنامه‌هاي نگهداري از سازه‌هاست(Stringam and Esplin, 2006). سيستم کنترل با منطق PI کلاسيک بر روي يک کانال آزمايشگاهي در پرتقال براي کنترل سطح آب مورد آزمون قرار گرفت. نتايج آزمايشات

* نويسنده مسئول: Javadmonem@gmail.com

نشان‌دهنده مطلوبیت عملکرد کنترل‌کننده ارائه‌شده می‌باشد (Litrico et al., 2005).

یکي از سازه‌هايي که اخيرا به‌طور گسترده‌اي جهت کنترل سطح آب در کانال‌هاي آبياري به کار گرفته مي‌شود، سازه سرريز لولايي است. اين سازه سرريزي است که در کف لولا شده و زاويه آن با کف قابل‌تنظيم است (Wahlin and Replogle, 1994). دليل توسعه سرريزهاي لولايي، آساني در بهره‌برداري، سادگي طراحي، روگذر بودن جريان و توانايي سرريزها در ثابت نگه‌داشتن عمق آب در شرايط مختلف و اتوماسيون آسان آن است. اولين آزمايشات انجام‌شده در زمينه سرريزهاي لولايي از سوي کميته احياي اراضي ايالات متحده آمريکا (United States Bureau of Reclamation) *USBR* در سال ۱۹۴۸ صورت گرفت. با استفاده از داده‌هاي اين آزمايشات مقدار دبي براي جريان آزاد با خطاي ۰/۴۵ درصد و انحراف معيار ۰/۹۹درصد بيش از مقدار واقعي برآورد گرديد (USBR, 1948). همچنين آزمايشات انجام‌شده بر روي سرريز لولايي نشان داد که خطاي روابط ارائه‌شده براي شرايط آزاد ٦/٤ درصد و براي شرايط مستغرق تا ۱۰ درصد نيز مي‌باشد (Wahlin and Replogle, 1994). اخيرا در کانال اصلي Haughtan در استراليا از سازه‌هاي سرريز لولايي جهت کنترل سطح آب استفاده شده است. نتايج عملکرد اين شبکه رضايت‌بخش بوده است (Wayer and Eurénand, 2007).

بخش عمده‌اي از عمليات بهره‌برداري از کانال‌ها، اجراي برنامه‌هاي تحويل و توزيع آب با بهره‌گيري از سازه‌ها و سيستم‌هاي کنترل مي‌باشد. با توجه به تغييرات زماني و مکاني برنامه تحويل آب و همچنين ماهيت جريان غيرماندگار در شبکه‌هاي آبياري، استفاده از مدل‌هاي هيدروديناميکي به منظور ارزيابي عملکرد سيستم‌هاي کنترل در تعامل با رفتار هيدروليکي جريان ضروري مي‌باشد. مدل ICSS به‌منظور شبيه‌سازي شرايط هيدروليکي، هيدرولوژيکي و بهره‌برداري سيستم‌هاي انتقال آب که همواره تحت تغييرات دبي ورودي و خروجي و تغييرات شرايط فيزيکي و بهره‌برداي هستند در سال ۱۹۸۵ توسط Manz طراحي گرديد (Skutsch,1993). الگوريتم‌هاي کنترل Bival (Monem and Mamizade, 2005)، فازي (Monem and Kiapasha, 2009) و CARRD (Monem and Ahmadpanah, 2010) به‌صورت تلفيقي در مدل ICSS تهيه شدند و مورد ارزيابي قرار گرفتند. با توجه به توسعه روزافزون انواع سامانه‌هاي کنترل خودکار و ضرورت ارزيابي مقايسه‌اي آنها انجمن مهندسين آمريکا (American Society ASCE Civil Engineering) کانال‌هاي استانداردي را همراه با شرايط آزمون مشخص و شاخص‌هاي ارزيابي عملکرد توصيه نمود (Clemmens et al., 1998).

هدف از انجام اين تحقيق، توسعه و آزمون مدل رياضي سرريز لولايي خودکار با منطق PID جهت تنظيم عمق آب در عمق هدف صرف‌نظر از ميزان دبي عبوري از کانال مي باشد. براي اين منظور، مدل رياضي سازه سرريز لولايي( Pivot Weir) با الگوريتم PID به‌صورت تلفيقي با مدل هيدروديناميکي ICSS تهيه شد و در کانال استاندارد شماره دو انجمن مهندسي عمران آمريکا ASCE موردآزمون قرار گرفت. در اين مقاله، در ابتدا مواد و روش هاي به کارگر فته شده در تحقيق که شامل الگوريتم PID، تئوري حاکم بر سرريز لولايي، مدل هيدروديناميک ICSS (Irrigation Conveyance System Simulation)، آزمون‌هاي ASCE و شاخص‌هاي ارزيابي عملکرد مي‌باشد، تشريح مي‌شوند. سپس نتايج حاصله مورد بحث و تجزيه و تحليل قرار مي گيرد و در نهايت نتيجه گيري ارائه مي‌شود.

## مواد و روش‌ها

### الگوريتم PID

کنترل‌کننده PID که شامل سه جز تناسبي (Proportional)، انتگرالي (integral) و ديفرانسيلي (derivative) مي‌باشد، به‌طور وسيعي در فرايندهاي خودکار صنعتي به‌کار گرفته مي‌شود. در الگوريتم PID که به‌صورت کنترل پس‌خور عمل مي‌کند، متغيرهاي کنترل‌شونده (عمق جريان)، اندازه‌گيري مي‌شوند. مقدار انحراف اين متغيرها از مقدار هدف به الگوريتم کنترل برگشت داده مي‌شود تا يک عمل تصحيح روي متغير خروجي کنترل (تنظيم سازه) ايجاد شده و مقدار متغير کنترل‌شونده را به سوي مقدار هدف نزديک کند. در اين روش، تأثير اغتشاشات بر روي خروجي سيستم در نظر گرفته مي‌شوند.

در کنترل PID سعي در حداقل‌کردن خطاي بين متغير اندازه‌گيري‌شده و مقدار هدف است. مقدار تناسبي متناسب با ميزان انحراف عمق از محدوده مجاز، مقدار انتگرالي متناسب با ميزان تجمعي انحراف عمق از محدوده مجاز در طول دوره بهره‌برداري و مقدار ديفرانسيلي متناسب با نرخ تغييرات عمق آب ميزان تنظيم سازه را تعيين مي‌کنند که مجموعه آنها به صورت رابطه (۱) ميزان تنظيم سازه را مشخص مي‌کند (Ratinho et al., 2002).

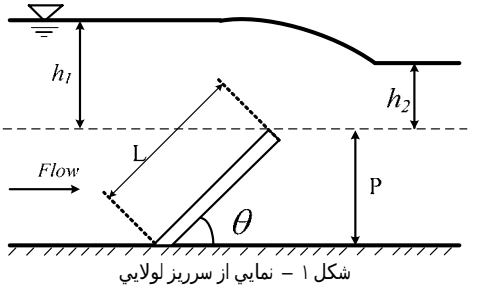
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^T e(t)dt + K_d \frac{de}{dt} \qquad (۱)$$

که در آن $u_{(t)}$ ميزان تنظيم سازه، $K_p$، $K_i$ و $K_d$ به ترتيب ضرايب تناسبي، انتگرالي و ديفرانسيلي، $e_{(t)}$ ميزان انحراف متغير کنترل (عمق جريان) از مقدارهدف، $de$ ميزان تغيير

متغير كنترل در بازه زماني $dt$ و $T$ بازه زماني تجمعي تغييرات است.

روابط حاكم بر سرريز لولايي

سرريزهاي لولايي، سازه‌هايي هستند كه در كف لولا شده‌اند و زاويه آن‌ها با كف قابل‌تنظيم است. شكل (١) نمايي از يک سرريز لولايي را نشان مي‌دهد.




شكل ١ – نمايي از سرريز لولايي

رابطه (٢) براي دبي جريان آزاد اين سرريزها ارائه شده است (Wahlin and Replogle, 1994).

$$Q = \frac{2}{3}\sqrt{2g}C_a C_e b_e h_1^{1.5} \qquad (٢)$$

كه در اين رابطه $b_e$ عرض مؤثر سرريز، $h_1$ ارتفاع آب روي سرريز، $C_a$ ضريب تصحيح براي زاويه سرريز لولايي و $C_e$ ضريب دبي سرريزهاي قائم مي‌باشد.

ضريب دبي $C_e$، با نسبت $\frac{h_1}{p}$ رابطه خطي دارد ($p$ ارتفاع قائم سرريز از كف كانال است). كه مقدار اين ضريب از رابطه (٣) به دست مي‌آيد (Wahlin and Replogle, 1994).

$$C_e = m\frac{h_1}{p} + b \qquad (٣)$$

كه در آن $m$ و $b$ ضرايب تجربي هستند كه با توجه به مقدار $\frac{b_e}{B}$ ($b_e$ عرض سرريز و $B$ عرض كانال بالادست) در جداولي ارائه شده‌اند (Kindsvater and Carter, 1959). در اين تحقيق با توجه به برابر بودن عرض سرريز با عرض كانال بالادست مقادير $m$ و $b$ به‌ترتيب ٠/٠٧٥ و ٠/٦٠٢ در نظر گرفته شد.

ضريب $C_a$ متناسب با زاويه سرريز ($\theta$) است و به صورت تجربي به‌دست مي‌آيد. در اين تحقيق، از رابطه (٤) ارائه‌شده در مدل ICSS توسط Manz (1985) استفاده شده است.

$$C_a = (-5.89\times\theta^6\times10^{-12} + 1.202\times\theta^5\times10^{-9} - 8.35\times\theta^4\times10^{-8} + 3.422\times\theta^3\times10^{-6} - 2.217\times\theta^2\times10^{-4} + 9.035\times\theta\times10^{-3} + 1) \qquad (٤)$$

براي تعيين دقت رابطه (٤) يک سري آزمايشات بر روي سرريز لولايي در آزمايشگاه هيدروليک دانشكده كشاورزي دانشگاه تربيت مدرس بر روي فلومي به ابعاد ١٠× ٠/٣ × ٠/٤٥ متر بر روي سرريزي به ابعاد ٠/٣ × ٠/٣ متر انجام شد. تعداد ٢٥ آزمايش براي ٧ زاويه سرريز (٩ تا ٦١/٠٤ درجه) و براي هر زاويه ٣ تا ٥ دبي (٢/٦٨٤ تا ١٢/٦٩٥ ليتر در ثانيه) انجام شد. با استفاده از داده‌هاي اين آزمايشات رابطه (٤) مورد واسنجي قرار گرفت كه حداقل خطا ٠/١ % براي زاويه ٢٣ درجه، حداكثر آن ١٣% براي زاويه ٣٥/١ و متوسط خطا ٨/٠٥ % برآورد شد.

براي تعيين دبي اين سرريزها در شرايط جريان مستغرق مي توان از ضريب كاهشي جريان مستغرق ($C_{df}$) استفاده نمود كه به صورت رابطه (٥) بيان مي شود.

$$Q = C_{df} Q_o \qquad (٥)$$

كه در آن $Q_o$ دبي در شرايط جريان آزاد است. مقدار $C_{df}$ به نسبت ارتفاع آب پايين‌دست به بالادست ($h_2$ ارتفاع تيغه آب روي سرريز در پايين‌دست آن) بستگي دارد. كه در مدل تهيه‌شده از رابطه (٦) استفاده شده است (Villemonte, 1947).

$$C_{df} = (1 - (\frac{h_2}{h_1})^{1.5})^{0.385} \qquad (٦)$$

مدل رياضي سرريز لولايي خودكار

هر يک از سازه ها در مدل ICSS به صورت شرايط مرزي در قالب چهار زيربرنامه معرفي مي‌شوند. زيربرنامه A براي محاسبه جريان غيرماندگار، B براي به روزسازي اطلاعات، C براي اجراي عمليات بهره‌برداري و D براي محاسبه جريان ماندگار مي باشند. مدل اوليه اين سازه براي بهره برداري دستي قبلا تهيه شده بود كه در اين تحقيق، توسعه داده شده و خودكارسازي آن با استفاده از الگوريتم PID به آن اضافه گرديد. براي اين منظور در زيربرنامه C مربوط به محاسبه ميزان بهره‌برداري سازه، خودكارسازي سرريز لولايي با الگوريتم PID، متناسب با رابطه (١)، اضافه گرديد كه به‌طور خودكار در گام‌هاي زماني موردنظر كه توسط كاربر قابل‌انتخاب است، اعمال مي‌گردد. در سيستم كنترل بالادست PID براي سرريز لولايي، در ابتدا عمق فيلترشده از روابط (٧) و (٨) به دست مي‌آيد.

$$y_{fn} = \frac{C_{sf}(y_{wn} + y_{wp}) + y_{fp}(1 - C_{sf})}{1 + C_{sf}} \qquad (٧)$$

$$C_{sf} = \frac{\Delta t}{2T_f} \qquad (٨)$$

كه در آن‌ها $y_{fn}$، $y_w$ و $y_t$ به ترتيب عمق‌هاي فيلترشده، اندازه‌گيري‌شده و عمق هدف، $C_{sf}$ ثابت فيلتر هيدروليكي شبيه‌سازي، $\Delta t$ گام زماني، $T_f$ ثابت زماني فيلتر مي‌باشد. انديس‌هاي $n$ و $p$ نمايانگر گام زماني كنوني و قبلي مي‌باشند.

سپس سه عمل کنترل تناسبي، انتگرالي و ديفرانسيلي به‌ترتيب از روابط (۹)، (۱۰) و (۱۱) محاسبه مي‌شوند.

$$\Delta G_p = K_p (y_t - y_{fn}) \qquad (۹)$$

$$\Delta G_i = K_i \int_0^T [(y_t - y_{fn}) \pm 0.5 Z_{db}]dt \qquad (۱۰)$$

$$\Delta G_d = K_d \frac{y_{fn} - y_{fp}}{\Delta t} \qquad (۱۱)$$

که در آن‌ها $\Delta G_p$، $\Delta G_i$ و $\Delta G_d$ به‌ترتيب ميزان تنظيم تناسبي، انتگرالي و ديفرانسيلي سازه، $T$ گام زماني انتگرالي و $Z_{db}$ ميزان محدوده مجاز عمق است. در نهايت ميزان تنظيم كلي سازه از رابطه (۱۲) به دست مي‌آيد.

$$\Delta G = \Delta G_p + \Delta G_i + \Delta G_d \qquad (۱۲)$$

به‌منظور ارزيابي، مدل تهيه‌شده بر روي كانال استاندارد شماره دو ASCE مورد آزمون قرار گرفت. اين كانال با شيب ملايم و طول ۲۸ كيلومتر، شامل ۸ بازه بوده كه بازه‌ها به‌وسيله دريچه‌هاي زيرگذر از هم جدا شده‌اند. در هر بازه يک آبگير روزنه‌اي وجود دارد. مقطع كانال ذوزنقه‌اي، شيب جانبي آن 1.5H:1V، شيب طولي آن ۰/۰۰۰۱ و ضريب زبري آن ۰/۰۲ مي‌باشد. (Clemmens et al., 1998).

جهت آزمون سيستم كنترل تهيه‌شده، در مدل رياضي از سازه سرريز لولايي خودكار با منطق PID به‌عنوان سازه تنظيم استفاده شد. جداول (۱) و (۲) به‌ترتيب مشخصات بازه‌هاي مختلف و سازه‌هاي به‌كارگرفته‌شده در كانال شماره دو ASCE را نشان مي‌دهد.

جدول ۱- مشخصات بازه‌هاي كانال شماره دو **ASCE**

| بازه | طول بازه (متر) | عرض كف (متر) | بازه | طول بازه (متر) | عرض كف (متر) |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۷۰۰۰ | ۷ | ۵ | ۴۰۰۰ | ۶ |
| ۲ | ۳۰۰۰ | ۷ | ۶ | ۳۰۰۰ | ۵ |
| ۳ | ۳۰۰۰ | ۷ | ۷ | ۲۰۰۰ | ۵ |
| ۴ | ۴۰۰۰ | ۶ | ۸ | ۲۰۰۰ | ۵ |

جدول ۲- مشخصات سازه‌هاي به‌كارگرفته‌شده در كانال شماره دو **ASCE**

| شماره سرريز | عرض سرريز (متر) | طول سرريز (متر) | عمق هدف بالادست سرريز (متر) |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۷ | ۲/۲ | ۲/۳ |
| ۲ | ۷ | ۲/۲ | ۲/۲۵ |
| ۳ | ۷ | ۲/۲ | ۲/۲۵ |
| ۴ | ۶ | ۲/۲ | ۲/۲۵ |
| ۵ | ۶ | ۲/۲ | ۲/۲۵ |
| ۶ | ۵ | ۲/۰ | ۲/۱۵ |
| ۷ | ۵ | ۲/۰ | ۲/۱۵ |
| ۸ | ۵ | ۱/۲ | ۱/۴ |

براي ارزيابي عملكرد سيستم كنترل تهيه‌شده از شاخص‌هاي ارائه‌شده توسط ASCE (Clemmens et al., 1998) و منعم و مساح (Monem and Masah, 2003) استفاده شده است. اين شاخص‌ها عبارتند از:

خطاي مطلق ماكزيمم يا **MAE (Maximum Absolute Error)**:

اين شاخص براي نشان‌دادن ماكزيمم انحراف سطح آب از عمق هدف (رابطه ۱۳) است. مقدار اين شاخص براي هر كنترل كننده هر چه كوچكتر باشد، نشان‌دهنده عملكرد مطمئن‌تر سيستم كنترل در تنظيم سطح آب است (Clemmens et al., 1998).

$$MAE = \frac{\max|y_t - y_{target}|}{y_{target}} \qquad (۱۳)$$

كه در آن $y_t$ عمق آب مشاهده‌شده در زمان t و $y_{target}$ عمق آب هدف مي‌باشد.

خطاي مطلق تجمعي يا **IAE (Integral of Absolute Error)**:

اين شاخص نشان‌دهنده ميانگين انحرافات عمق آب از عمق هدف در طول دوره بهره‌برداري مي‌باشد و به‌صورت رابطه (۱۴) تعريف مي‌شود (Clemmens et al., 1998):

$$IAE = \frac{\frac{\Delta t}{T}\sum_0^t |y_t - y_{target}|}{y_{target}} \qquad (۱۴)$$

كه در آن $\Delta t$ گام زماني محاسباتي و T طول دوره بهره‌برداري مي‌باشد.

زمان عكس‌العمل سيستم يا **SRT (System Response Time)**:

شاخص زمان عكس‌العمل سيستم عبارت است از فاصله زماني بين خارج شدن سطح آب از محدوده مجاز عمق حول عمق هدف، تا زماني كه عمق آب مجدداً به اين محدوده باز مي‌گردد و در آن تثبيت مي‌شود. هر چه مقدار SRT يک سيستم كمتر باشد، عكس‌العمل سيستم نسبت به تغييرات عمق سريع‌تر بوده و نوسانات عمق آب در حين عمليات بهره‌برداري سريع‌تر به محدوده مجاز باز مي‌گردد.

آزمون موردبررسي

در اين گزينه عملكرد سرريز لولايي خودكار در برابر تغييرات شديد دبي ورودي دبي آبگيرها مورد بررسي قرار مي‌گيرد. تغييرات اعمال شده در ميزان دبي ورودي و دبي آبگيرها مطابق با آزمون شماره دو ASCE مي‌باشد. اين تغييرات شامل افزايش دبي سراب كانال در ابتداي دوره و تغييرات افزايشي و كاهشي دبي آبگيرها مي‌باشد. تغييرات اعمال‌شده در اين گزينه در جدول (۳) ارائه گرديده است.

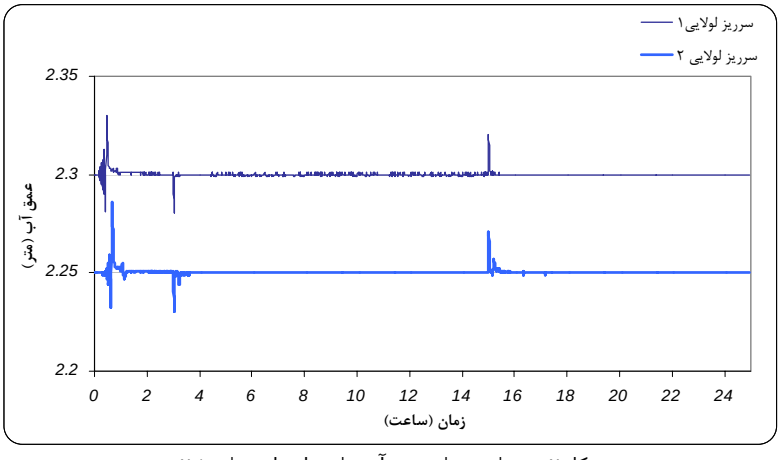
جدول ٣ – تغييرات اعمال‌شده در گزينه موردبررسي

| بازه | دبي اوليه آبگيرها ($m^3/s$) | دبي اوليه سرريزها ($m^3/s$) | تغييرات اوليه دبي آبگيرها در ساعت ٣ ($m^3/s$) | دبي سرريزها پس از تغييرات اوليه($m^3/s$) | تغييرات ثانويه دبي آبگيرها در ساعت ١٤ ($m^3/s$) | دبي سرريزها پس از تغييرات ثانويه ($m^3/s$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ورودي | ---- | ٢/٧ | ---- | ١٣/٧ | ---- | ١٣/٧ |
| ١ | ٠/٢ | ٢/٥ | ١/٥ | ١٢/٠ | -١/٥ | ١١ |
| ٢ | ٠/٣ | ٢/٢ | ١/٥ | ١٠/٢ | -١/٥ | ٩/٥ |
| ٣ | ٠/٢ | ٢/٠ | ٢/٥ | ٧/٥ | -٢/٥ | ٧/٠ |
| ٤ | ٠/٣ | ١/٧ | ----- | ٧/٢ | ---- | ٧/٠ |
| ٥ | ٠/٢ | ١/٥ | ----- | ٧/٠ | ---- | ٧/٠ |
| ٦ | ٠/٣ | ١/٢ | ٠/٥ | ٦/٢ | -٠/٥ | ٦/٥ |
| ٧ | ٠/٢ | ١/٠ | ١/٠ | ٥/٠ | -١/٠ | ٥/٥ |
| ٨ | ٠/٣ | ٠/٧ | ٢/٠ | ٢/٧ | -٢/٠ | ٣/٥ |

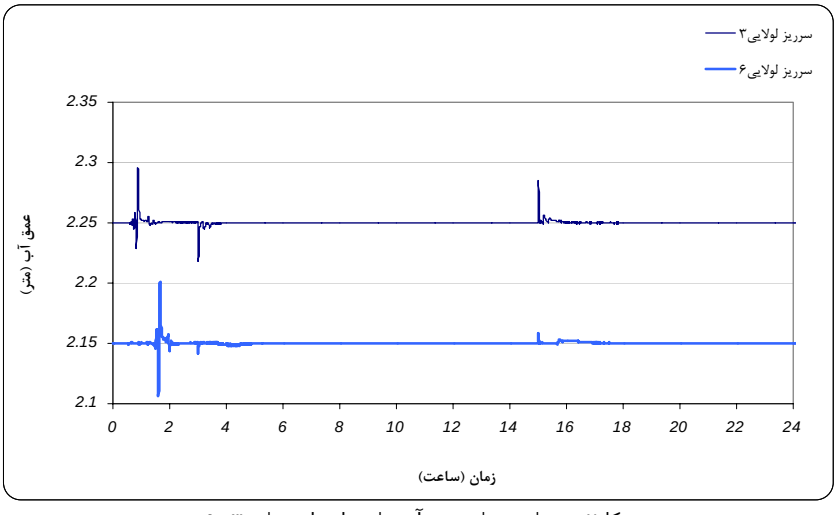
## نتايج و بحث

يكي از مراحل مشكل تهيه سيستم كنترل PID به صورت سراسري تعيين ضرايب مربوط به آن، يعني $K_p$، $K_i$، $K_d$ و $T_f$ مي باشد كه بايد براي هر سازه به صورت جداگانه و با سعي و خطا و تحليل حساسيت تعيين شود. تعيين ضرايب به توصيه محققين از بازه هاي بالادست كانال به سمت پايين دست انجام گرفت (Monem and Ahmadpanah, 2010). جهت انتخاب ضرايب مناسب، سه معيار حداقل بودن مقدار حداكثر انحراف عمق از عمق هدف، حداقل بودن زمان عكس العمل سيستم (SRT) و نزديک بودن عمق نهايي محاسبه شده به عمق هدف در نظر گرفته شد. ضرايب مربوط تابعي از شرايط كانال و بهره‌برداري است و براي سازه‌هاي مشابه تحت شرايط مختلف بهره‌برداري معمولا ثابت در نظر گرفته مي‌شوند كه براي آنها مقادير پايه توصيه شده است (Merkley, 1995.). در ابتدا براي سازه‌هاي ١، ٢ و ٣ مقادير $K_i$ و $K_d$ توصيه‌شده اوليه در نظر گرفته شد و مقدار ضريب $K_p$ در محدوده ٣/١- ١ مورد آزمون قرار گرفت. پس از تعيين مناسب‌ترين ضريب $K_p$، ضريب $K_d$ (اوليه) ثابت در نظر گرفته شد و مناسب‌ترين ضريب $K_i$ به دست آمد. در نهايت با اعمال ضرايب $K_p$ و $K_i$، ضريب $K_d$ مناسب تعيين گرديد. محدوده مورد آزمون براي ضرايب $K_i$ و $K_d$، ٠/١ – ٠/٠٠٠١ بوده است. در تمامي مراحل فوق مقدار ثابت زماني برابر با ٢ لحاظ شده بود. پس از به دست آوردن ضرايب سه‌گانه PID، مقدار ثابت زماني فيلتر در محدوده ١٠٠-٢ مورد آزمون قرار گرفت و مقدار مناسب آن انتخاب شد. پس از مشخص‌شدن ضرايب براي سه سازه اول، همين روند براي سازه‌هاي ۴ و ۵ و سپس براي سازه‌هاي ۶ و ۷ اجرا شد. مقادير $K_p$، $K_i$، $K_d$ و ثابت زماني براي تمامي سازه‌ها به‌ترتيب ٣/١، ٠/٠٠٠١، ٠/٠٠٠١ و ٢ حاصل شد.

پس از تعيين ضرائب، گزينه بهره‌برداري ذكرشده اجرا شد و نمودار تغييرات عمق براي هر يک از سازه‌ها رسم گرديد و شاخص‌هاي ارزيابي براي بازه‌هاي مختلف محاسبه شد. شكل‌هاي (٢) و (٣) نمودارهاي تغييرات عمق براي نمونه‌اي از سازه‌ها و جدول (٤) مقادير حداكثر و ميانگين انحراف سطح آب از عمق هدف و شاخص‌هاي ارزيابي عملكرد سيستم كنترل را براي سرريزها در طول دوره بهره‌برداري نشان مي‌دهند.




شكل ٢- نمودار تغييرات عمق آب براي سازه‌هاي تنظيم ١و٢




شکل۲- نمودار تغییرات عمق آب براي سازه‌هاي تنظيم ۳ و ۶

با توجه به اشكال (۲) و (۳) مي‌توان دريافت كه:

۱. در هنگام افزايش دبي ورودي، با رسيدن موج مثبت ناشي از اين افزايش دبي به محل سازه، عمق آب بالادست سازه‌هاي سرريز لولايي افزايش مي‌يابد. به دليل شديد بودن اين تغييرات، نوسانات عمق ناشي از آن زياد است. در اين حالت سيستم كنترل PID به گونه‌اي عمل مي‌كند كه ارتفاع سرريزها كاهش يافته و دبي عبوري از روي سازه‌ها افزايش مي‌يابد و عمق بالادست سرريزها كاهش يافته و به محدوده مجاز عمق هدف بازمي‌گردد.

۲. در بخش تغييرات اوليه (افزايشي) آبگيرها در ساعت سوم، با افزايش دبي آبگيرها و رسيدن موج منفي ناشي از اين تغييرات به محل سازه‌ها، عمق آب بالادست سازه‌هاي آب‌بند كاهش مي‌يابد. در اين حالت سيستم كنترل به‌گونه‌اي عمل مي‌كند كه ارتفاع سازه‌ها افزايش و دبي عبوري از روي سرريزها كاهش مي‌يابد. در نتيجه عمق آب بالادست سرريز افزايش يافته و در محدوده مجاز عمق هدف تثبيت مي‌گردد.

۳. در هنگام اعمال تغييرات ثانويه (كاهشي) آبگيرها، با كاهش دبي آبگيرها و رسيدن موج مثبت ناشي از اين تغييرات به سازه‌ها، عمق آب بالادست سرريزها افزايش مي‌يابد. در اين حالت سيستم كنترل به‌گونه‌اي عمل مي‌كند كه ارتفاع سازه‌ها كاهش يافته، دبي عبوري از روي سرريز افزايش يابد و در نتيجه عمق آب بالادست سرريز كاهش يافته و در محدوده مجاز عمق هدف تثبيت مي‌گردد.

جدول۴ - مقادير شاخص‌هاي ارزيابي عملكرد سيستم كنترل **PID**

| زمان (ساعت) | شاخص | آب‌بند ۱ | آب‌بند ۲ | آب‌بند ۳ | آب‌بند ۴ | آب‌بند ۵ | آب‌بند ۶ | آب‌بند ۷ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۰-۳ | MAE(%) | ۱/۳ | ۱/۶ | ۲/۰۴ | ۲/۲۶ | ۲/۳۵ | ۲/۲۶ | ۳/۰۲ |
| | IAE(%) | ۰/۰۷۳ | ۰/۰۸ | ۰/۰۸ | ۰/۱۲ | ۰/۰۷ | ۰/۰۹ | ۰/۰۷۴ |
| | حداكثر انحراف عمق (متر) | ۰/۰۳ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۴۶ | ۰/۰۵۱ | ۰/۰۵۳ | ۰/۰۵۱ | ۰/۰۶۵ |
| ۳-۱۴ | MAE(%) | ۰/۸۲ | ۰/۸۴ | ۱/۳۷ | ۰/۲۲ | ۰/۰۸۸ | ۰/۳۶ | ۰/۷۹ |
| | IAE(%) | ۰/۰۰۸ | ۰/۰۰۴ | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۵ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۰۶۵ | ۰/۰۰۶ |
| | حداكثر انحراف عمق (متر) | ۰/۰۱۹ | ۰/۰۱۹ | ۰/۰۳۱ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۸ | ۰/۰۱۷ |
| ۱۴-۲۵ | MAE(%) | ۰/۸۷ | ۰/۸۸ | ۱/۵۶ | ۰/۳۶ | ۰/۱۸۶ | ۰/۴ | ۰/۸۴ |
| | IAE(%) | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۱ | ۰/۰۶۵ | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۰۹۵ | ۰/۰۲۶ |
| | حداكثر انحراف عمق (متر) | ۰/۰۲ | ۰/۰۲ | ۰/۰۳۵ | ۰/۰۰۸ | ۰/۰۰۴ | ۰/۰۰۹ | ۰/۰۱۸ |

از جدول (٤) نتايج زير را مي‌توان دريافت:

۱- مقادير حداكثر انحراف عمق از عمق هدف (در هر سه نوع تغييرات دبي ورودي، دبي افزايشي آبگيرها و دبي كاهشي آبگيرها) در بازه‌هايي كه در ميزان دبي آبگيري آن‌ها تغيير داده شده است بيشتر است. مقدار اين پارامتر در سه بازه اول از بالادست به پايين‌دست روند افزايشي دارد، سپس در بازه‌هاي ۴ و ۵ به‌دليل عدم تغيير در دبي آبگيرها مقدار آن كاهش يافته و در نهايت در بازه‌هاي ۶ و ۷ (به‌دليل تغيير در دبي آبگيرها) مقدار آن افزايش مي‌يابد.

۲- حداكثر مقدار شاخص MAE براي آب‌بند ۷ در شرايط

افزايش شديد جريان و به ميزان ۳/۰۲ % به‌دست آمده است كه در حد قابل‌قبولي است. مقدار اين شاخص براي آب‌بندهاي بالادست كم بوده و به‌تدريج براي آب‌بندهاي پايين‌دست افزايش يافته است. اين امر نشان مي‌دهد كه در سيستم كنترل بالادست خطاهاي موجود در بالادست به‌صورت تجمعي در پايين‌دست اثر خود را نشان مي‌دهد. چنانچه تغييرات شديد آبگيري از كانال قبل از رسيدن امواج افزايشي و كاهشي دبي ورودي به سازه آب‌بند انجام گيرد، به‌علت كم‌بودن حجم ذخيره جريان در كانال تغييرات عمق جريان در بالادست سازه‌هاي آب‌بند شديد مي‌باشد. همچنين چنانچه طول كانال مانند كانال در نظر گرفته‌شده در اين گزينه زياد باشد، زمان لازم براي انتقال تغييرات دبي در سراب به سازه‌هاي آب‌بند انتهايي آن طولاني مي‌گردد. در نتيجه كنترل نوسانات ايجاد شده در كانال در زمان طولاني‌تري انجام مي‌گيرد. دليل ديگري كه مي‌توان در توجيه اين رفتار بيان كرد همزماني تغييرات ناشي از افزايش دبي ورودي و آبگيري افزايشي آبگيرها در انتهاي كانال مي‌باشد.

۳- مقادير شاخص‌هاي MAE و IAE براي گزينه تغييرات كاهشي دبي آبگيرها نسبت به تغييرات افزايشي آبگيرها بيشتر است. اين امر نشان مي‌دهد كه سيستم كنترل طراحي‌شده نوسانات ناشي از تغييرات افزايشي دبي آبگيرها را بهتر كنترل مي‌كند.

۴- مقادير SRT در سطوح ۱۰% و ۵%، براي تمامي سازه‌ها صفر به‌دست آمد. به عبارت ديگر در طول تمامي تغييرات اعمال‌شده در گزينه ۱ بهره‌برداري، عمق آب در محدوده مجاز عمق هدف در سطح ۱۰% و ۵% قرار مي‌گيرد و از اين محدوده خارج نمي‌شود. مقدار SRT در سطح ۲/۵ % براي تمامي سازه‌ها به جز سازه هفتم (۷۲ ثانيه) به‌دست آمد. به‌طور كلي مقادير SRT نشان‌دهنده توانايي سيستم كنترل ارائه‌شده در بازگرداندن عمق آب به محدوده مجاز عمق هدف در مدت زمان كوتاهي مي‌باشد.

## نتيجه‌گيري

در اين تحقيق، مدل رياضي خودكارسازي سازه سرريز لولايي با منطق PID و به‌صورت تلفيقي هيدروديناميک ICSS تهيه شد. مدل تهيه‌شده، بر روي كانال استاندارد شماره دو ASCE موردآزمون قرار گرفت. با مدل در اين آزمون ۷ سازه خودكار سرريز لولايي خودكار با منطق PID در كانال تعريف شد و عملكرد آنها موردبررسي قرار گرفت. نمودارهاي تغييرات عمق در طول زمان براي هر يک از سازه‌ها و شاخص‌هاي ارزيابي توسط ASCE مورد بررسي قرار گرفت. گزينه بهره‌برداري تغييرات شديد در دبي ورودي و دبي آبگيرها اجرا شد. با بررسي نمودارها و شاخص‌هاي ارزيابي مشخص گرديد كه در اين شرايط، سيستم كنترل ارائه‌شده به‌خوبي قادر به تنظيم سطح آب در بالادست سازه‌هاي تنظيم مي‌باشد.

## فهرست علائم و نمادها

u : متغير خروجي كنترل

y : عمق اندازه‌گيري‌شده

$y_c$ : عمق هدف

$h_e$ : ارتفاع مؤثر آب روي سرريز در بالادست سرريز

$h_2$ : ارتفاع آب روي سرريز در پايين‌دست سرريز

Flow : دبي جريان

L : طول سرريز

ɵ : زاويه سرريز

p : ارتفاع سرريز

Lit/s : ليتر بر ثانيه

MAE : خطاي مطلق ماكزيمم

IAE : خطاي مطلق تجمعي

SRT : زمان عكس‌العمل سيستم

## REFERENCES


Araki, M., (2009). PID CONTROL. *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*. .Retrieved July 21, 2009, www. eolss.net/ ebooks/ Sample% 20Chapters/ C18/E6-43-03-03.pdf .

Clemmens. A. J., Kacerek, T. F., Grawitz, B., and shuurmans, W. (1998). Test cases for canal control algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 124(1), 23-29.

Kindsvater, C.E., and Carter, R W. (1959). Discharge Characteristics of Rectangular Thin-Plate Weirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*., 124, 772-822.

Litrico, X., Fromion, V., Baume, J., Arranja, C., and Rijo, M. (2005). Experimental Validation of Methodology to control irrigation canals base on Saint-Venant equation. *Journal of Control Engineering Practice*, 13, 1425-1437.

Malaterre, P. O., Rogers, D., and Schuurmans, J. (1998). Classification of canal control algorithms. *Journal of Irrigation And Drainage Engineering, ASCE*, 124(1), 3-10.

Merkley, G. P. (1995). CANALMAN A Hydraulic Simulation Model for Unsteady Flow in Branching Canal Networks.

Monem, M. J., and Ahmadpanah, S. P. (2010). Model Development and Performance Evaluation of CARDD Downstream Control System For Severe Discharge Changes in Irrigation Canals . 8th *Iranian Hydraulic conference, Tehran*. 3(4), 13-26. (In Farsi)

Monem, M. J., and Kiapasha, M. S. (2009). Development of Mathematical Model of Fuzzy

Control System in Irrigation Canals. *Iranian Journal of Hydraulic*. 3 (4), 13-26. (In Farsi)

Monem, M. J., and Mamizade, J. (2005). Development of Downstream Constant Volume Control System (BIVAL) in Irrigation Canals. In: *The 5th Iranian Hydraulic Conference*. Bahonar University, Kerman, Iran. (In Farsi)

Monem, M. J., and Masah, A. R. (2003). Development of Mathematical Model of Amil. In: *The 4th Iranian Hydraulic Conference*. Shiraz, Iran. (In Farsi)

Ooi, S.K., and Weyer, E. (2008). Control Design for an Irrigation Channel from Physical Data. *Journal of Control Engineering Practice*, 16, 1132–1150.

Stringam, B. L., and Esplin, B. C. (2006). Automation of the EAST BENCH Irrigation Main Canal. *Journal of Iirrigation And Drainage Engineering*. 55, 395 -402.

Ratinho, T., Figueiredo, J., and Rijo, M. 2002. *Modeling, Control and Field Tests on an Experiimental Irrigation Canal*. The 10th Mediterranean Conference on Control and Automation. Lisbon, Portugal.

Stringam, B. L., and Esplin, B. C. (2006). Automation of the EAST BENCH Irrigation Main Canal. *Journal of Iirrigation And Drainage Engineering*. 55, 395 -402.

USBR (1948). Studies of Crests for Overfall Dams. Bulletin 3. Boulder Canyon Project, Final Report. *US Bureau of Reclamation, US Dept. ofInterior, Denver, CO*. 186 pp.

Villemonte, J.R. (1947). Submerged Weir Discharge Studies. *Engineering News Record*, 866-869.

Wahlin , B.T., and Replogle, J. A. (1994). Flow Measurement Using an Overshot Gate. *United States Department Of The Interior Bureau Of Reclamation*, Standard From 208, 298-102.

Weyer, E. and Eurénand, K., (2007). System Identification of Open Water Channels with Undershot and Over-shotgates. *Control Engineering Practice*. 15(7), 813–824.