

ارائه مدل ریاضی برای سیستم کنترل پایین دست BIVAL در کانالهای آبیاری

محمدجواد منعم^{۱*}، جعفر مامی زاده^۲

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

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

* تهران، صندوق پستی ۳۱۸-۱۴۱۱۵

monem_mj@modares.ac.ir

چکیده- سیستم‌های کنترل و سازه‌های مربوط، نقش مهمی را در توزیع آب در شبکه‌های آبیاری برعهده دارند و میزان موفقیت شبکه تا حد زیادی به چگونگی عملکرد آنها بستگی دارد. نحوه عملکرد سازه‌های کنترل، در سیستم‌های مختلف متفاوت است. افزایش انعطاف‌پذیری توزیع و تحویل و کاهش تلفات آب با استفاده از سیستم‌های کنترل پایین دست، عامل مهمی در بهبود عملکرد شبکه‌ها به شمار می‌رود. یکی از این سیستم‌ها که برای اراضی با شیب زیاد نیز مناسب است، سیستم کنترل BIVAL می‌باشد. این سیستم با تنظیم حجم آب ثابت در بازه‌های کانال، ضمن پاسخگویی سریع و مناسب به تغییرات نیاز، حجم عملیات خاکی و هزینه احداث کانالها را نیز کاهش می‌دهد. در مطالعه رفتار هیدرولیکی جریان در شبکه‌ها در تعامل با سیستم‌های کنترل- که عمدتاً به صورت جریان غیرماندگار است- استفاده از مدل‌های هیدرودینامیک اجتناب ناپذیر است. بنابراین در اختیار داشتن مدلی ریاضی از سیستم‌های کنترل و سازه‌های مربوط به صورت تلفیقی با مدل‌های هیدرودینامیک، ضروری است. در این تحقیق مدل ریاضی سیستم کنترل BIVAL، ارائه و با مدل هیدرودینامیک ICSS تلفیق شده است. برای واسنجی ضرایب و ارزیابی مدل تهیه شده به صورت موضعی و سراسری، به ترتیب کانال E_1-R_1 از شبکه دز و کانال استاندارد شماره ۲ ارائه شده توسط ASCE، انتخاب شد. مراحل آزمون و ارزیابی مدل به این ترتیب انجام شد که ابتدا سیستم کنترل BIVAL در محدوده وسیعی از تغییرات دبی و ضرایب عددی به کار رفته در مدل مربوط، واسنجی و ضرایب مناسب آن استخراج شد. سپس عملیات بهره‌برداری متعددی انجام و شاخص‌های عملکرد آنها شامل MAE (بیشینه خطای مطلق)، IAE (خطای مطلق تجمعی) و SRT (زمان عکس‌العمل سیستم) در دو سطح ۵٪ و ۱٪ محاسبه شد. در آزمون سراسری مدل تهیه شده، مقادیر شاخص‌ها برای بازه‌ای که بیشترین تغییرات در آن صورت گرفته، به ترتیب برابر ۲/۵۷٪، ۰/۲۸٪ و صفر به دست آمد. در آزمون موضعی مدل تهیه شده، نمودار تغییرات زمانی عمق آب در وسط بازه ۵، بازشدگی دریاچه و دبی جریان در ابتدای آن بازه و در آزمون سراسری مدل تغییرات زمانی عمق آب در وسط هر یک از بازه‌ها محاسبه شد. شاخص‌های عملکرد و رفتار هیدرولیکی مدل تهیه شده، بیانگر عملکرد مناسب و مطلوب آن است.

کلید واژگان: کانالهای آبیاری، مدل ریاضی، سیستم‌های کنترل، کنترل پایین دست، BIVAL، ICSS.

نظر شاخص‌هایی نظیر راندمان، کفایت و عدالت در توزیع،
انجام تحقیقات گسترده‌ای را در زمینه بهبود روش‌های

۱- مقدمه
پایین بودن سطح عملکرد بسیاری از پروژه‌های آبیاری از

کانالها، تهیه شده توسط دفتر احیای اراضی آمریکا^۲ نیز سیستم کنترل BIVAL به اختصار معرفی شده است (Buyalski et al, 1991). شورو و همکاران ضمن تشریح جزئیات سیستم، نمونه‌ای از کاربرد آن را در کانال آبرسانی پروژه فالادمولودو در کشور مالی ارائه کردند. همچنین برای بخشهایی از دو کانال اصلی شبکه دیویاکوی در کشور مکزیک، سیستم کنترل BIVAL مورد آزمون قرار گرفته و در مقایسه با سایر گزینه‌های کنترل، مناسبتر تشخیص داده شده است (Chevereau and Benezeth, 1987). سواگر جزئیات طراحی و اجرای سیستم کنترل BIVAL را در کانال فالادمولودو در کشور مالی و نتایج حاصل از اجرای آن را تشریح کرده است (Sauvagere, 1992). برای امکان‌پذیری شبیه‌سازی و بررسی رفتار سیستم کنترل BIVAL در مدل هیدرودینامیک CANALMAN این سیستم کنترل در نظر گرفته شده است (Merkely, 1997). بررسی عملکرد سیستم کنترل - که موجب رفتار هیدرولیکی غیرماندگار در کانال می‌شود - مستلزم استفاده از مدل‌های هیدرودینامیک است. در این تحقیق، مدل ریاضی سیستم کنترل BIVAL ارائه و با مدل^۳ ICS تلفیق شده است.

۲- مواد و روشها

۲-۱- تعریف سیستم کنترل

هر سیستم کنترل شامل دو بخش سخت‌افزار (تجهیزات) و نرم‌افزار (الگوریتم یا منطق کنترل) است که به منظور اجرای عملیات بهره‌برداری از سازه‌های نصب شده در کانالها براساس اطلاعات گرفته شده در سطح شبکه، طراحی می‌شود. در سیستم کنترل، اطلاعات به‌دست آمده از حسگرهای نصب شده در محل‌های مورد نظر در شبکه، به‌عنوان اطلاعات ورودی به الگوریتم کنترل در نظر گرفته شده و براساس نوع برنامه و الگوریتم کنترلی، بهره‌برداری

بهره‌برداری و ارتقای عملکرد، ایجاد کرده است. سیستمهای کنترل و سازه‌های مربوط، نقش مهمی را در توزیع آب در شبکه‌های آبیاری برعهده دارند و میزان موفقیت شبکه، به چگونگی عملکرد آنها بستگی دارد. نحوه عملکرد سازه‌های کنترل، برای سیستمهای مختلف کنترل، متفاوت است. افزایش انعطاف‌پذیری توزیع و تحویل آب، کاهش تلفات مدیریتی آب را به دنبال داشته و امکان تصمیم‌گیری مصرف‌کنندگان را در باره عوامل تحویل آب فراهم می‌سازد و عامل مهمی در بهبود عملکرد شبکه‌ها است. سیستمهای کنترل پایین‌دست به نحوی طراحی می‌شوند که نسبت به تغییرات نیاز آبی پایین دست کانال، به‌وسیله عمل خودکار درپچه، بلافاصله پاسخگو باشند. با توجه به عمل خودکار درپچه‌ها، انعطاف‌پذیری در توزیع و تحویل آب در مقایسه با سیستمهای کنترل بالادست بیشتر شده و زارعان می‌توانند بهتر و ساده‌تر، مدیریت آبیاری را اعمال نمایند (مامی زاده، ۱۳۸۳). در سیستمهای کنترل پایین‌دست معمول، ارتفاع آب در پایین‌دست سازه آب بند، ثابت است و در دبی صفر، سطح آب در کانال افقی است. به‌منظور تنظیم سطح آب در حالت افقی (دبی صفر) پشته کانالها باید به‌صورت افقی ساخته شوند که این موجب می‌شود در زمینهای با شیب زیاد، هزینه عملیات خاکی و احداث کانالها افزایش یابد (Ankum, 1989). برای پرهیز از افزایش هزینه‌ها در زمینهای با شیب زیاد، از سیستمهای کنترل پایین‌دست خاص، مانند BIVAL استفاده می‌شود که در آن، هزینه عملیات خاکی و احداث کانالها نسبت به سیستمهای معمول، تقریباً نصف می‌شود (Chevereau and Benezeth, 1987) سیستم کنترل BIVAL توسط شرکت فرانسوی سوگرا^۱ در سال ۱۹۶۰ ابداع شد (Buyalski et al, 1991) و آنکوم این سیستم کنترل را معرفی کرد (Ankum, 1989). در راهنمای اتوماسیون

2. USBR

3. Irrigation Conveyance System Simulation

1. Sogreah

اندازه‌گیری همزمان سطح آب در بالادست و پایین‌دست بازه نیاز است (شکل ۱) و دریچه بالادست متناسب با تغییرات سطح آب در ابتدا و انتهای بازه کانال تنظیم می‌شود تا ارتفاع آب، تقریباً در وسط بازه ثابت باقی بماند (Chevereau and Benezeth, 1987).

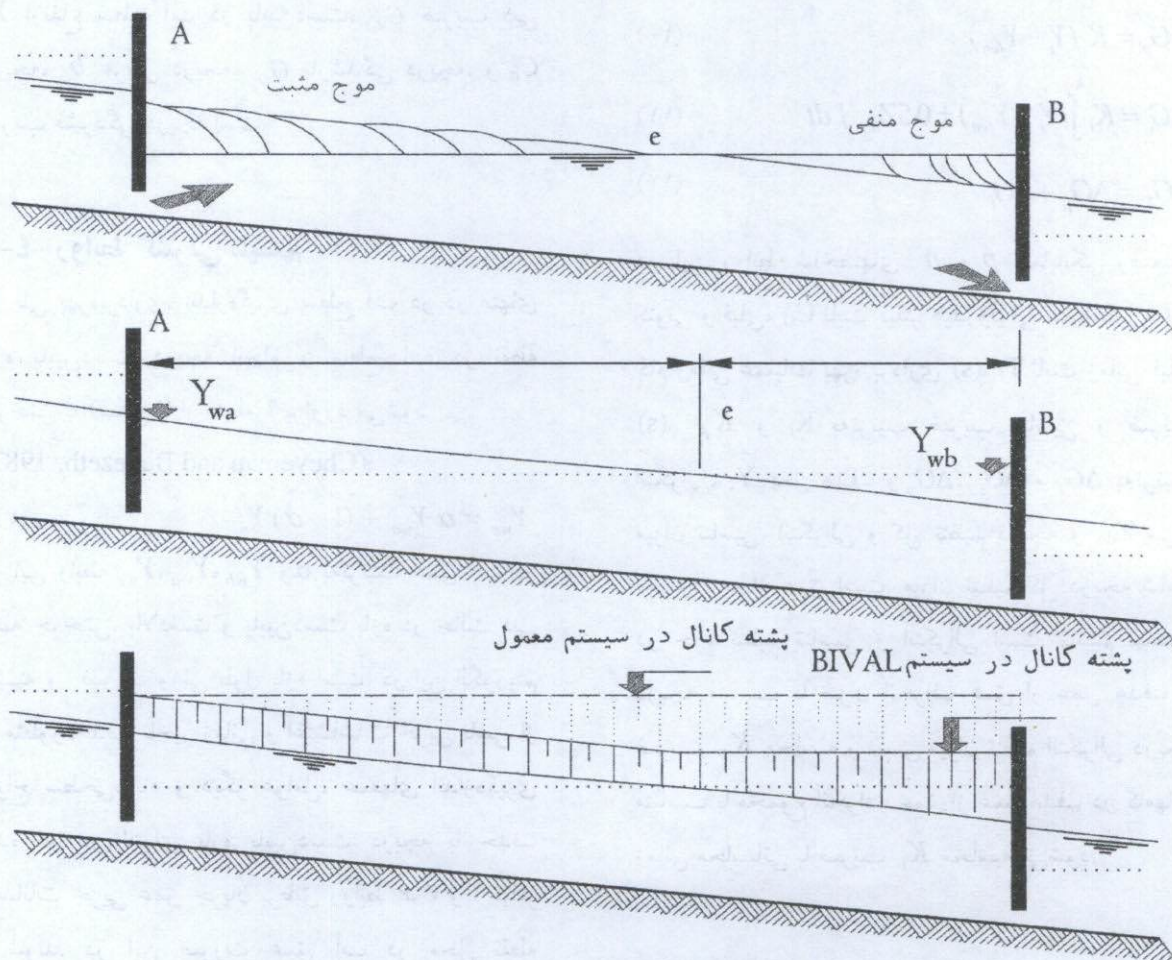
۲-۳- روابط هیدرولیکی سیستم

این سیستم کنترل بر روی هر نوع دلخواهی از سازه آب‌بند قابل اعمال است. بنابراین با توجه به سازه انتخاب شده، به منظور اعمال این سیستم کنترل، باید روابط دبی مربوط به آن سازه به کار برده شود. در این تحقیق از دریچه کشویی استفاده شده است.

از سازه‌ها انجام می‌شود تا متغیر مورد کنترل در محدوده مجاز هدف قرار گیرد (Mallaterre et al, 1998).

۲-۲- سیستم کنترل BIVAL

این سیستم یکی از روشهای خاص کنترل پایین‌دست است که تحویل بیشینه دبی مورد نیاز در هر زمان را تضمین می‌کند؛ برای این منظور سعی می‌شود تا همواره حجم آب در هر بازه کانال، ثابت نگاه داشته شود. با توجه به اینکه ارتفاع آب تقریباً در وسط بازه کانال ثابت نگاه داشته می‌شود، حجم ذخیره مورد نیاز کم بوده و لذا حجم عملیات خاکی نیز در مقایسه با سیستمهای کنترل پایین‌دست معمول کاهش می‌یابد. در این سیستم، به



شکل ۱ مشخصات سیستم کنترل BIVAL (Ankum, 1989)

$$Y_{fe} = \alpha Y_{fa} + (1 - \alpha) Y_{fb} \quad (5)$$

که در آن Y_{fa} ، Y_{fb} و Y_{fe} به ترتیب عمقهای فیلترشده در نقطه چرخش، بالادست و پایین دست بازه است. در نهایت میزان تنظیم دریچه که خروجی الگوریتم کنترل است از روابط ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به دست می آید (Merkely, 1997):

$$Y_{fan} = \frac{C_{sf} (Y_{wan} + Y_{wap}) + Y_{fap} (1 - C_{sf})}{1 + C_{sf}} \quad (6)$$

$$Y_{fbn} = \frac{C_{sf} (Y_{wbn} + Y_{wbp}) + Y_{fbp} (1 - C_{sf})}{1 + C_{sf}} \quad (7)$$

$$Y_{fen} = \alpha Y_{fan} + (1 - \alpha) Y_{fbn} \quad (8)$$

$$C_{sf} = \frac{\Delta t}{2T_f} \quad (9)$$

$$\Delta G_p = K_p (Y_t - Y_{fen}) \quad (10)$$

$$\Delta G_i = K_i \int_0^k [Y_t - Y_{fen}] dt \quad (11)$$

$$\Delta G_T = \Delta G_p + \Delta G_i \quad (12)$$

در این روابط شاخصهای n و p نمایانگر وضعیت کنونی و قبلی، C_{sf} ثابت فیلتر هیدرولیکی شبیه سازی، Δt گام زمانی عملیات بهره برداری (s)، T_f ثابت زمانی فیلتر (s)، K_p و K_i به ترتیب ضریب تناسبی و ضریب انتگرالی، Y_t عمق هدف و ΔG_p ، ΔG_i و ΔG_T به ترتیب میزان تناسبی، انتگرالی و کل تنظیم دریچه و Z_{db} میزان محدوده مجاز عمق است. میزان تنظیم کل دریچه شامل دو جزء تنظیم تناسبی و انتگرالی است. تنظیم تناسبی دریچه متناسب با میزان انحراف عمق از عمق هدف با ضریب K_p محاسبه و سپس میزان تنظیم انتگرالی دریچه متناسب با مجموع انحراف عمق از عمق هدف در گامهای زمانی محاسباتی با ضریب K_i محاسبه می شود.

۲-۵- مدل ICSS و ساختار شرایط مرزی آن

مدل ICSS این توانائی را دارد که تمامی ویژگیهای مهم

در دریچه های کشویی برای محاسبه دبی هنگامی که ارتفاع آب بالادست دریچه بیشتر از بازشدگی دریچه باشد، از دو رابطه هیدرولیکی روزنه با جریان آزاد و مستغرق و هنگامی که ارتفاع آب بالادست دریچه کمتر از بازشدگی دریچه باشد، از رابطه سرریز استفاده شده است. روابط برای جریان آزاد، مستغرق و سرریز به ترتیب، به صورت روابط ۱، ۲ و ۳ است:

$$Q = C_d b G_o \sqrt{2g (Y_N - C_c G_o)} \quad (1)$$

$$Q = C_d b G_o \sqrt{2g (Y_N - Y_1)} \quad (2)$$

$$Q = C_d b Y_N \sqrt{2g (Y_N - Y_1)} \quad (3)$$

در این روابط Y_N ارتفاع سطح آب در بالادست دریچه، Y_1 ارتفاع سطح آب در پایین دست، C_d ضریب دبی دریچه، b عرض دریچه، G_o بازشدگی دریچه، و C_c ضریب فشردگی دریچه است.

۲-۴- روابط کنترلی سیستم

در طی بهره برداری، اندازه گیری سطح آب در دو انتهای بازه پایین دست دریچه انجام و سطح آب در نقطه چرخش e (شکل ۱) از رابطه ۴ برآورد می شود (Chevereau and Benezeth, 1987):

$$Y_{we} = \alpha Y_{wa} + (1 - \alpha) Y_{wb} \quad (4)$$

در این رابطه Y_{wa} ، Y_{wb} ، Y_{we} و α به ترتیب عمق آب در نقطه چرخش، بالادست و پایین دست بازه در حالت دبی بیشینه و ضریب وزنی طول بازه است. در این الگوریتم به منظور حذف تأخیر زمانی و اغتشاشات جزئی ناشی از امواج سطحی، باد و دیگر عوامل، عمقهای اندازه گیری شده در دو انتهای بازه پایین دست دریچه با حذف نوسانات جزئی عمق جریان برطبق روابط ۶، ۷ و ۹ فیلتر می شوند. در این صورت عمق آب در محل نقطه چرخش، از رابطه خطی (۵) بین عمقهای فیلتر شده در دو انتهای بازه پایین دست دریچه به دست می آید:

۲-۶-۲- زیر برنامه انجام عملیات بهره برداری

روند نمای زیر برنامه عملیات بهره برداری در شکل ۲ نشان داده شده است. به منظور انجام خودکار عملیات بهره برداری برای این دریاچه‌ها، مراحل زیر در نظر گرفته شده است. در ابتدای عملیات بهره برداری اگر فیلتر مربوط به عمق روشن باشد، عمق‌های بالادست و پایین دست بازه پایین دست دریاچه برطبق روابط ۶ و ۷ فیلتر شده و عمق فیلتر شده در وسط بازه از رابطه ۸ محاسبه می‌شود. در غیر این صورت عمقهای خوانده شده تغییری نمی‌کند و عمق در وسط بازه از رابطه ۴ محاسبه می‌شود. پس از این مرحله، عمق محاسبه شده در وسط بازه با محدوده مجاز عمق مقایسه می‌شود، در صورتی که این عمق در محدوده مجاز باشد، میزان تنظیم برابر صفر در نظر گرفته می‌شود، در غیر این صورت تنظیم بازشدگی تناسبی، انتگرالی و کل دریاچه به ترتیب برطبق روابط ۱۰، ۱۱ و ۱۲ محاسبه می‌شود. در ادامه کار اگر کلید کنترل محدوده مجاز حرکت دریاچه روشن شده باشد میزان تنظیم بازشدگی (ΔG_T) با محدوده مجاز حرکت دریاچه مقایسه می‌شود. اگر میزان ΔG_T کمتر از محدوده مجاز بود، $\Delta G_T = 0$ در نظر گرفته می‌شود، اما چنانچه کلید کنترل محدوده مجاز حرکت دریاچه خاموش باشد یا ΔG_T کمتر از محدوده مجاز نباشد، محاسبات، به کنترل سرعت حرکت دریاچه ختم می‌شود. اگر کلید کنترل سرعت حرکت دریاچه روشن باشد و ΔG_T محاسبه شده از حاصل ضرب سرعت حرکت دریاچه در گام زمانی محاسباتی بیشتر باشد، مقدار ΔG_T برابر با حاصل ضرب سرعت حرکت دریاچه در گام زمانی در نظر گرفته می‌شود، در غیر این صورت ΔG_T تغییری نخواهد کرد. در نهایت بازشدگی کلی دریاچه (GO) با حداکثر بازشدگی آن (max GO) مقایسه می‌شود. در صورتی که میزان بازشدگی از حداکثر بازشدگی بیشتر بود، مقدار آن برابر با حداکثر بازشدگی دریاچه در نظر گرفته می‌شود، در غیر این صورت مقدار بازشدگی دریاچه تغییری نخواهد کرد (مامی زاده، ۱۳۸۳).

هیدرولیکی و بهره برداری شناخته شده و مورد نیاز در کانالهای آبیاری را در شرایط جریان ماندگار و غیر ماندگار متغیر تدریجی یک بعدی، شبیه سازی کند. در مدل ICSS امکان شبیه سازی گسترده وسیعی از سازه های آبی وجود دارد که هر یک به صورت شرایط مرزی در نظر گرفته شده و در چهار مرحله متفاوت در محاسبات احضار می شوند. این مراحل به ترتیب عبارتند از: محاسبات جریان ماندگار، بهره برداری، محاسبات جریان غیر ماندگار و به روز آوری ماتریسهای شرایط مرزی. توسعه و تهیه مدل با توجه به این چهار مرحله انجام شده است (مامی زاده، ۱۳۸۳).

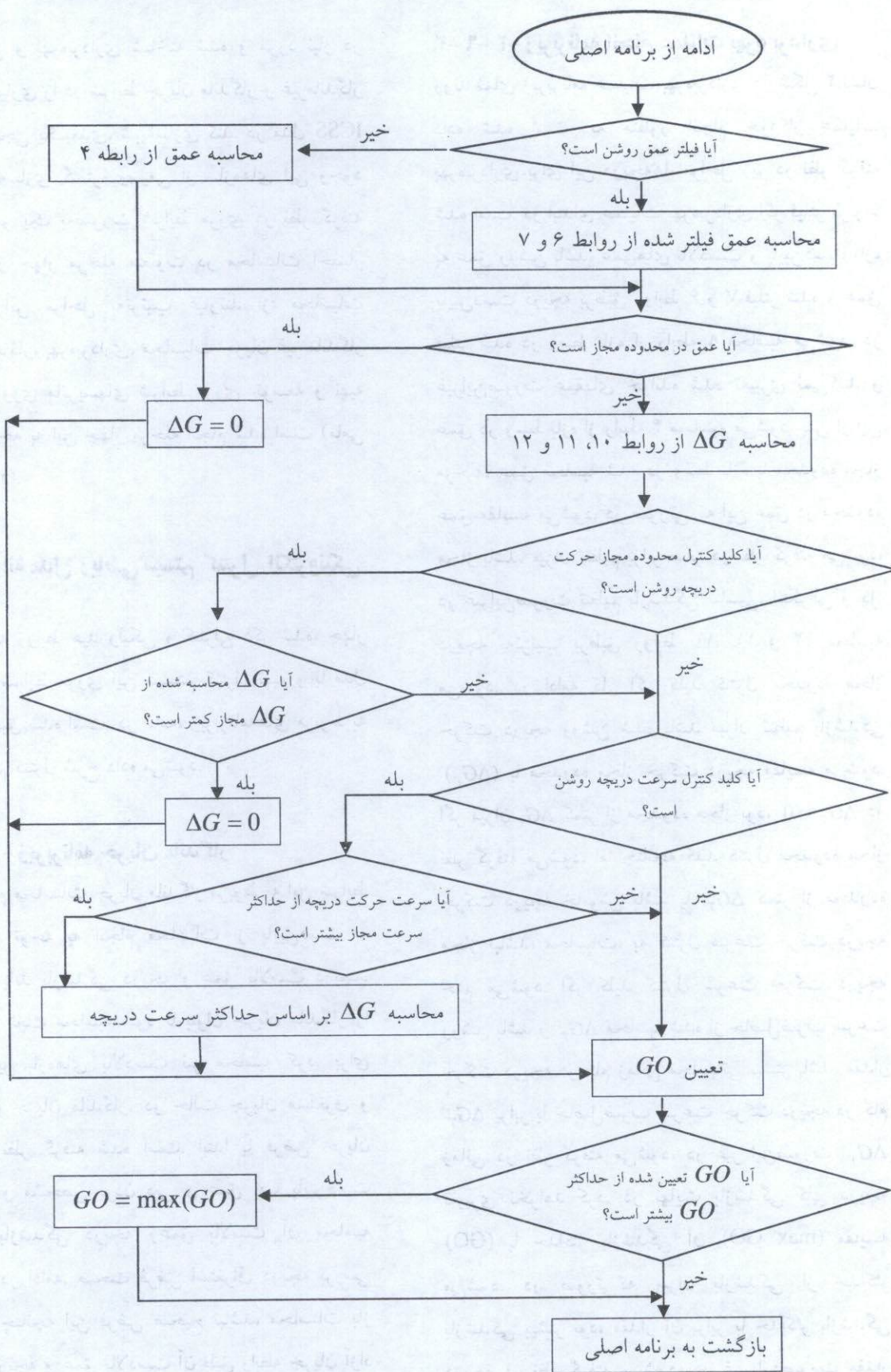
۲-۶-۲- ارائه مدل ریاضی سیستم کنترل الکترونیکی

BIVAL

با توجه به روابط هیدرولیکی و کنترلی ذکر شده، چهار زیر برنامه شرایط مرزی این سیستم کنترل تهیه و با مدل ICSS تلفیق شده است. در ادامه، زیر برنامه های مربوط به این سیستم کنترل شرح داده می شود.

۲-۶-۱- زیر برنامه جریان ماندگار

برای انجام محاسبات جریان ماندگار مربوط به این شرایط مرزی، با توجه به انجام محاسبات از پایین دست به بالادست باید بازشدگی دریاچه و عمق بالادست دریاچه، برای دبی ثابت محاسبه شود تا بتوان جریان ماندگار را برای سایر بازه های بالادست نیز محاسبه کرد. برای محاسبات جریان ماندگار، دو حالت جریان مستغرق و آزاد در نظر گرفته شده است. ابتدا با فرض جریان مستغرق و مشخص بودن دبی و عمق آب پایین دست دریاچه، بازشدگی دریاچه و عمق بالادست آن محاسبه می شود. در ادامه، صحت فرض استغراق دریاچه بررسی می شود: چنانچه این فرض صحیح نباشد، محاسبات باز شدگی دریاچه و عمق بالادست آن طبق رابطه جریان آزاد محاسبه و تصحیح می شود (مامی زاده، ۱۳۸۳).



شکل ۲ روند نمای زیربرنامه عملیات بهره‌برداری

$$IAE = \frac{\sum_{t=0}^T |y_t - y_{target}|}{T} \cdot \Delta t \quad (19)$$

در این رابطه Δt ، گام زمانی محاسباتی و T ، دوره زمانی آزمون است. این شاخص منعکس‌کننده متوسط انحراف عمق آب از عمق هدف در طول دوره زمانی آزمون است.

۳- زمان عکس‌العمل سیستم^۳ (SRT): این شاخص عبارت است از فاصله زمانی از شروع انحراف عمق و زمانی که انحرافات عمق در سطح محدوده مجاز قرار می‌گیرد (مساح، ۱۳۸۰). محدوده مجاز محدوده‌ای است در اطراف عمق هدف به میزان $Y_{target} \pm X (\%) * Y_{target}$ که میزان X با توجه به دقت و سرعت عمل مورد نظر توسط کاربر تعریف می‌شود.

علاوه بر شاخصهای مذکور، تغییرات عمق، دبی و بازشدگی دریاچه‌ها در طول زمان به صورت نمودار ترسیم شده و مورد تحلیل قرار گرفته است.

۲-۸- مشخصات کانالهای مورد استفاده برای

آزمون و ارزیابی سیستم کنترل BIVAL

برای واسنجی ضرایب و ارزیابی مدل تهیه شده به صورت موضعی، کانال E_1-R_1 از شبکه دز با ۱۲ بازه انتخاب شد. طول کل کانال برابر $2830/5$ متر بوده و در تمامی مقاطع، ضریب زبری مانینگ برابر $0/017$ و مقطع کانال دوزنقه‌ای با شیب جانبی $1V:5H$ است (مامی زاده، ۱۳۸۳). برای آزمون سراسری مدل تهیه شده، کانال استاندارد شماره ۲ ارائه شده توسط ASCE مورد استفاده قرار گرفت. این کانال شامل ۸ بازه و طول 28 کیلومتر با شیب $0/0001$ است. هر یک از بازه‌های کانال به وسیله دریچه کشویی از یکدیگر جدا شده‌اند. در هر بازه یک آبگیر روزنه‌ای وجود دارد. در تمامی بازه‌های کانال، ضریب زبری مانینگ برابر $0/02$ و مقطع کانال دوزنقه‌ای با شیب جانبی $1V:5H$ و عرض کف 7 متر است

۲-۶-۳- زیورنامه جریان غیر ماندگار

در مراحل محاسبات جریان غیرماندگار با استفاده از روابط پیوستگی و مومنتم با در نظر گرفتن N گره محاسباتی در هر بخش از کانال که $N-1$ بازه دارد، $2(N-1)$ معادله به دست می‌آید، درحالی‌که تعداد مجهولات $2N$ است. لذا ضروری است که دو معادله دیگر از طریق شرایط مرزی ابتدا (G_0) و انتهای هر بخش از کانال (F_N) به دست آید (مامی زاده، ۱۳۸۳). در دریاچه‌های کشویی خودکار، این سیستم کنترل روابط G_0 و F_N در سه حالت جریان سرریز، جریان دریاچه آزاد و مستغرق بصورت روابط زیر تعریف می‌شود:

$$G_o : A_1 V_1 - Q_1 = 0 \quad \text{جریان آزاد} \quad (13)$$

$$G_o : A_1 V_1 - A_N V_N = 0 \quad \text{جریان مستغرق و سرریز} \quad (14)$$

$$F_N : A_1 V_1 - C_d b Y_N \sqrt{2g(Y_N - Y_1)} = 0 \quad \text{جریان سرریز} \quad (15)$$

$$F_N : A_N V_N - C_d b G_o \sqrt{2g(Y_N - C_d G_o)} = 0 \quad \text{جریان آزاد} \quad (16)$$

$$F_N : A_1 V_1 - C_d b G_o \sqrt{2g(Y_N - Y_1)} = 0 \quad \text{جریان مستغرق} \quad (17)$$

۲-۷- شاخصهای ارزیابی سیستمهای کنترل

برای بررسی و ارزیابی مدل سیستمهای کنترل، شاخصهای ارائه شده توسط ASCE (Clemmens et al, 1998) و مساح (۱۳۸۰) استفاده شده است. این شاخصها عبارتند از:

۱- بیشینه خطای مطلق^۱ (MAE) که به صورت رابطه ۱۸ تعریف می‌شود.

$$MAE = \frac{\max(|y - y_{target}|)}{y_{target}} \quad (18)$$

در این رابطه y ، عمق آب مشاهده شده در زمان t و y_{target} عمق آب هدف است. این شاخص منعکس‌کننده حداکثر انحراف نسبت به عمق هدف است.

۲- خطای مطلق تجمعی^۲ (IAE) که به صورت رابطه ۱۹ تعریف می‌شود.

1. Maximum Absolute Error
2. Integral of Absolute Magnitude of Error

ماندگار در وسط بازه از محدوده مجاز عمق هدف بیشتر است که در نتیجه، میزان دبی و بازشدگی در پیچه کاهش یافته است تا اینکه عمق جریان در زمان $0/6$ ساعت به محدوده مجاز رسیده و پس از آن تا زمان 1 ساعت ادامه داشته است. در زمان 1 ساعت که دبی آنگیر افزایش یافته، عمق جریان در انتهای بازه و به تبع آن، عمق محاسبه شده جریان در وسط بازه، کاهش یافته است. در زمان $1/05$ ساعت، عمق جریان در وسط بازه به کمترین مقدار ($0/256$ متر) رسیده که در نتیجه آن میزان بازشدگی در پیچه و دبی افزایش یافته و عمق در زمان $1/08$ ساعت به محدوده مجاز رسیده و پس از آن تا زمان 3 ساعت ادامه داشته است. در زمان 3 ساعت، دبی آنگیر کاهش یافته و عمق جریان در انتهای بازه و به تبع آن عمق در وسط بازه افزایش یافته و در زمان $3/06$ ساعت به بیشترین مقدار خود یعنی $0/264$ متر رسیده که در نتیجه آن میزان بازشدگی در پیچه و دبی جریان کاهش یافته و عمق در زمان $3/09$ ساعت به محدوده مجاز رسیده است. در زمانهای $3/07$ و $3/15$ ساعت، عمق در وسط بازه نسبت به محدوده مجاز به ترتیب کاهش و افزایش یافته که با عکس العمل در پیچه در زمانهای $3/18$ و $3/3$ ساعت به محدوده مجاز رسیده است که این وضعیت تا ساعت 5 ادامه داشته است. شاخصهای IAE، MAE و SRT در دو سطح 1% و 5% نیز برای این حالت محاسبه شد. مقدار شاخص MAE برابر $1/5\%$ به دست آمد. بنابراین حداکثر انحراف عمق آب از عمق هدف در وسط بازه 5 مربوط به این سیستم کنترل، برابر 4 میلیمتر بوده است. شاخص IAE نیز کمتر از 1% و برابر $0/164\%$ به دست آمده است. زمان عکس العمل در دو سطح 5% و 1% برابر صفر به دست آمده که این نشان دهنده آن است که تغییرات عمق در وسط بازه 5 در تمام ساعات در محدوده مجاز
$$y_{target} \pm 0.05 y_{target} \text{ و } y_{target} \pm 0.25 y_{target}$$
 قرار گرفته اند که از نظر کاربردی کاملاً قابل قبول است.

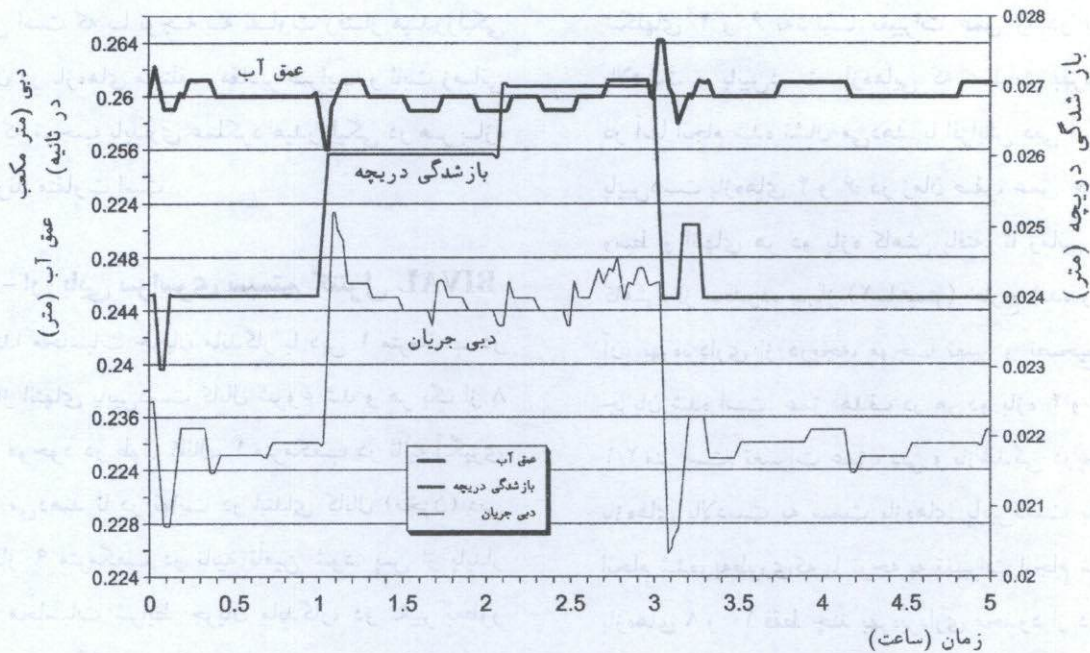
(Clemmens et al, 1998). ابتدا مدل ریاضی این کانال در شکل داده های ورودی برنامه ICSS به صورت 17 بازه تهیه شد و سیستم کنترل BIVAL به طور جداگانه در هر یک از بازه های کانال به عنوان شرایط مرزی قرار داده شد.

۳- تحلیل نتایج

۳-۱- آزمون و ارزیابی سیستم کنترل BIVAL

به صورت موضعی

برای ارزیابی سیستم BIVAL به صورت موضعی، این سیستم کنترل در بازه پنجم کانال E_1-R_1 از شبکه دز قرار داده شد. برای تعیین محدوده مناسب هر یک از ضرایب تناسبی، انتگرالی و ثابت زمانی فیلتر، دامنه گسترده ای از ضرایب مربوط، به ترتیب در محدوده $3-0/5$ ، $0/002-0/001$ و $100-1$ مورد آزمایش قرار گرفته و محدوده ای که باعث ایجاد پایداری در محاسبات می شود، به دست آمده است. مقدار مناسب ضرایب تناسبی، انتگرالی، و ثابت زمانی فیلتر به ترتیب برابر 1 ، $0/001$ و 10 به دست آمد. عمق هدف در وسط بازه 5 ، برابر $0/26$ متر و محدوده مجاز آن برابر $1/5\%$ در نظر گرفته شده است. برای شروع عملیات، جریان ماندگار با دبی $0/237$ متر مکعب در ثانیه با بسته بودن تمامی آنگیرهای جانبی در نظر گرفته شده است. کل زمان بهره برداری 5 ساعت بوده و 2 تغییر در میزان دبی آنگیر پایین دست بازه 5 در ساعاتی 1 و 3 ایجاد شده است. بدین ترتیب که در ساعت 1 دبی آنگیر از صفر به $0/03$ متر مکعب در ثانیه افزایش یافته و در ساعت 3 میزان دبی از $0/03$ متر مکعب در ثانیه به حالت اولیه یعنی صفر کاهش یافته و عملیات بهره برداری تا ساعت 5 ادامه یافته است. نمودار تغییرات عمق آب در وسط بازه پنجم و بازشدگی در پیچه و دبی جریان در ابتدای بازه در شکل 3 ارائه شده است. تغییرات عمق نشان می دهد که در فاصله زمانی صفر تا $0/3$ ساعت، عمق محاسبه شده در مرحله محاسبات جریان



شکل ۳ تغییرات زمانی عمق آب، دبی و بازشدگی دریاچه در وسط بازه ۵ سیستم کنترل BIVAL

ضرایب آن یعنی K_p ، K_i و T_f است که باید برای هر یک از بازه‌ها به‌طور جداگانه و با سعی و خطا انجام شود. مراحل تعیین این ضرایب مطابق توصیه‌های ارائه شده، به‌ترتیب از بازه‌های بالادست کانال به سمت پایین‌دست انجام شد. ضریب تناسبی در محدوده ۵-۰/۰۱، ضریب انتگرالی ۰/۰۰۱ - ۰/۰۰۱ و ثابت زمانی فیلتر ۱-۵۰۰ مورد آزمون قرار گرفت و مقدار مناسب آنها برای هر یک از بازه‌ها به شرح جدول ۱ به‌دست آمد.

جدول ۱ مقادیر مناسب ضرایب

شماره بازه	K_p	K_i	T_f
۱	۰/۴۲	-	-
۲	۲/۹	۰/۰۰۰۱	۱۰
۴	۱/۶۵	۰/۰۰۰۱۵	۵
۶	۰/۰۷۵	۰/۰۰۰۱۵	۱۰
۸	۱/۰	۰/۰۰۰۱۵	۵
۱۰	۰/۰۷۱۴	۰/۰۰۰۲	۳
۱۲	۰/۴۵	۰/۰۰۰۲	۵
۱۴	۰/۴۷	۰/۰۰۰۱	۵
۱۶	۰/۱۹	۰/۰۰۰۱	۴

۳-۲- آزمون و ارزیابی سراسری سیستم کنترل BIVAL

پس از حصول اطمینان از عملکرد صحیح سیستم به‌صورت موضعی، آزمون سراسری آن بر طبق توصیه ASCE (Clemmens et al, 1998) به شرح زیر انجام شد. در کانال استاندارد مورد آزمون، دریاچه خودکار مخزن در ابتدای بالادست بازه اول و سیستم کنترل BIVAL در ۷ بازه پایین‌دست کانال قرار داده شد. به منظور ارزیابی اثر افزایش محدود آبیگری در بازه‌های میانی کانال و چگونگی گسترش عکس‌العمل سیستم کنترل در بالادست و پایین‌دست، دو افزایش همزمان در دبی آبیگری بازه‌های ۴ و ۶ در نظر گرفته شد. برای ارزیابی اثر افزایش قابل توجه آبیگری و کاهش جریان، دو گزینه دیگر نیز مورد آزمون قرار گرفت. با توجه به اینکه رفتار سیستم کنترل و نتایج حاصل از دو گزینه دیگر، مؤید نتایج حاصل از گزینه اول است، به منظور حفظ اختصار، در اینجا نتایج حاصل از گزینه اول ارائه می‌شود.

۳-۳- واسنجی ضرایب

یکی از مراحل مهم تهیه مدل به‌صورت سراسری، تعیین

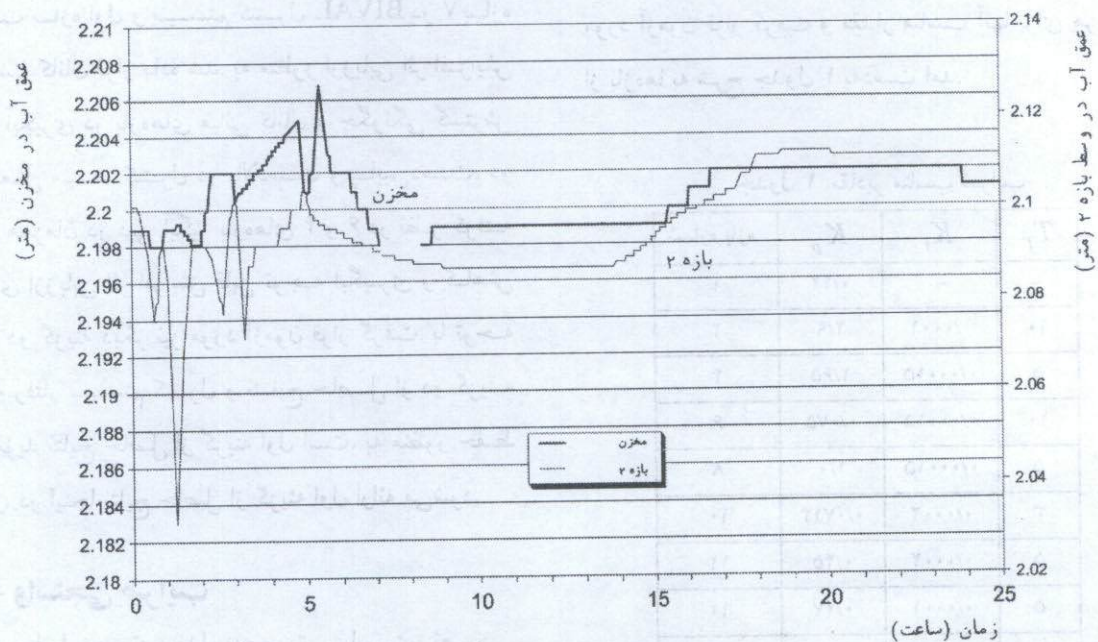
شکل‌های ۴ و ۶ به ترتیب تغییرات عمق را در بازه‌های بالادست و پایین دست بازه‌هایی که عملیات بهره‌برداری در آنها انجام شده نشان می‌دهد. با افزایش دبی آبگیرهای پایین دست بازه‌های ۴ و ۶، در زمان صفر، عمق جریان در وسط و انتهای هر دو بازه کاهش یافته، تا زمانی که این کاهش، از محدوده مجاز (۲ سانتیمتر) خارج شده و به تبع آن، بهره‌برداری از دریاچه، موجب تغییر و تصحیح عمق جریان شده است. عمق هدف در هر دو بازه ۴ و ۶ برابر ۲/۱ متر است. تغییرات عمق، دبی و بازشدگی دریاچه‌ها از بازه‌های بالادست به سمت بازه‌های پایین دست به تدریج انجام شده، به طوری که با توجه به تغییرات انجام شده، در بازه‌های ۸ و ۱۰ فقط چند بهره‌برداری محدود از دریاچه‌ها صورت گرفته است و در بازه‌های ۱۲، ۱۴ و ۱۶ در تمام مدت ۲۵ ساعت، عمق جریان در محدوده مجاز قرار گرفته است.

شاخصهای MAE، IAE و SRT با در نظر گرفتن محدوده مجاز ۵٪ در طی ۲۵ ساعت محاسبه و در جدول ۲ آورده شده است. مشاهده می‌شود که شاخصهای MAE و IAE در بازه‌هایی که تغییرات آبگیری در آنها انجام شده، بیشترین مقدار را دارند.

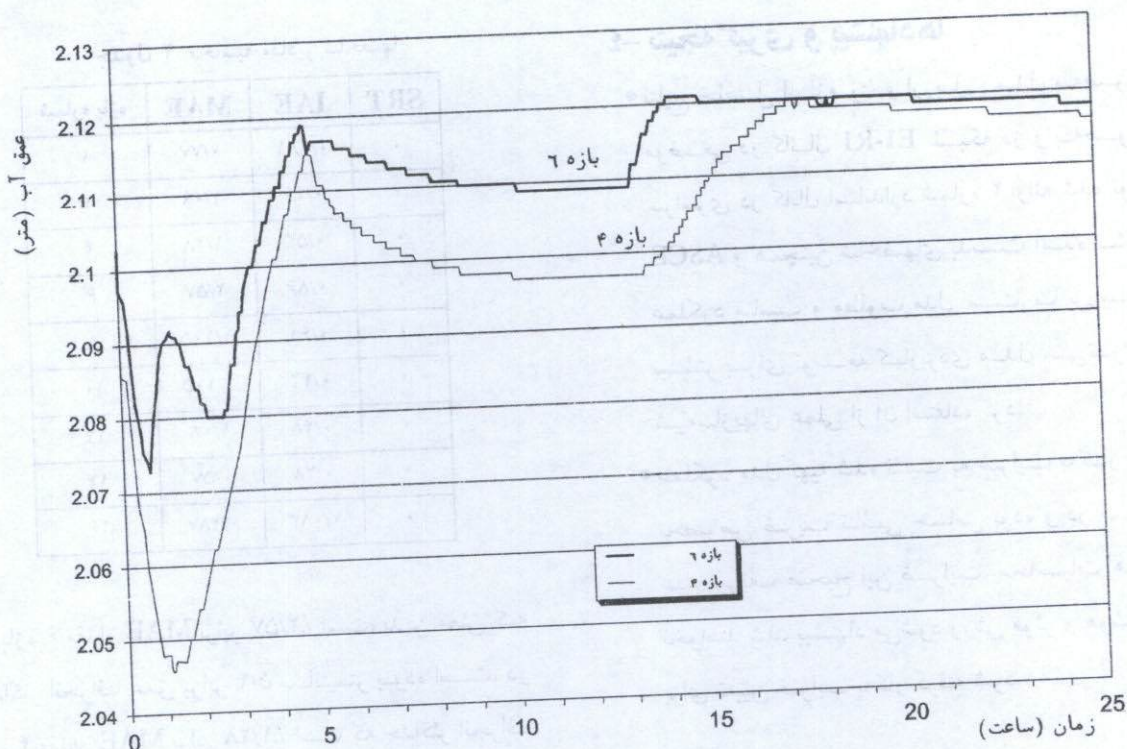
بدیهی است که با توجه به تفاوت رفتار هیدرولیکی جریان در بازه‌های مختلف، مقادیر ضرایب و ثابت زمانی فیلتر که موجب پایداری عملکرد هیدرولیکی در هر بازه می‌شوند متفاوت است.

۳-۴- ارزیابی سراسری سیستم کنترل BIVAL

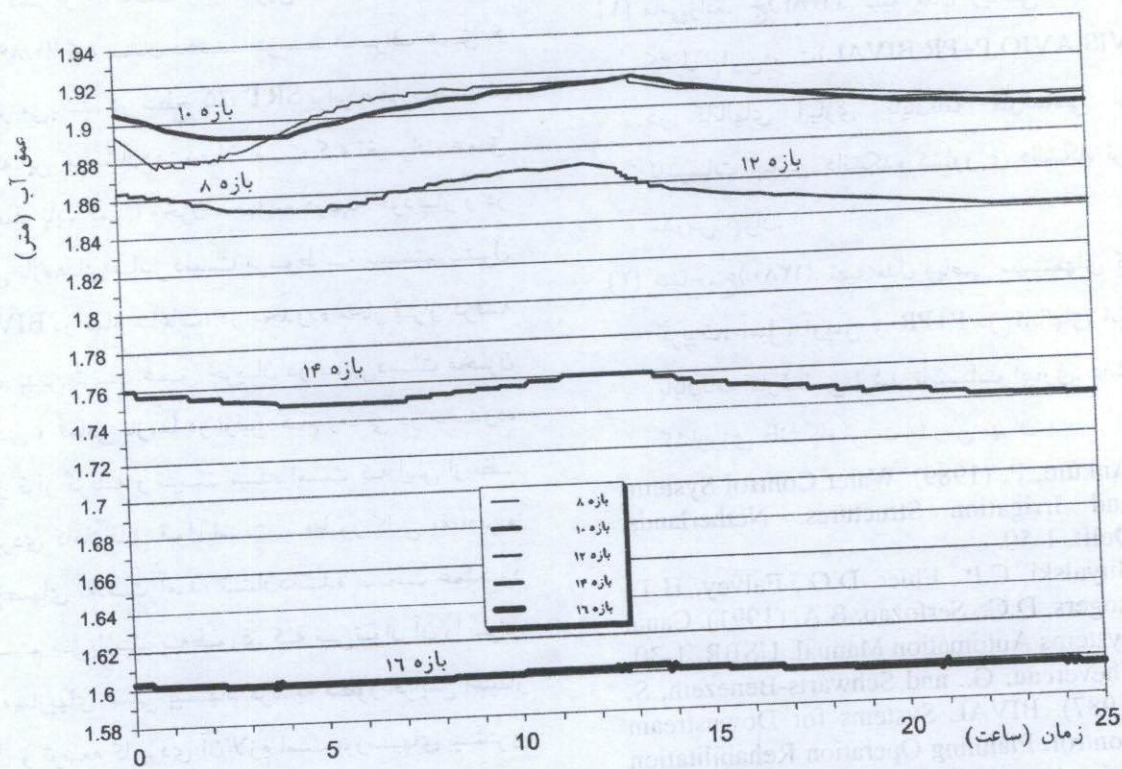
در ابتدا محاسبات جریان ماندگار با دبی ۱ مترمکعب در ثانیه از انتهای پایین دست کانال شروع شد و هر یک از ۸ آبگیر موجود در طول کانال، ۱ مترمکعب در ثانیه آبگیری انجام می‌دهند تا در نهایت در ابتدای کانال (مخزن) دبی ماندگار ۹ مترمکعب در ثانیه تأمین شود. پس از پایدار شدن محاسبات شرایط جریان ماندگار، دو تغییر به طور همزمان در آبگیرهای پایین دست بازه ۴ و ۶ (افزایش آبگیری هر یک به میزان ۵۰٪) انجام و عملیات بهره‌برداری به مدت ۲۵ ساعت ادامه یافت. تغییرات زمانی عمق آب بلافاصله در پایین دست دریاچه خودکار مخزن و در وسط هر یک از بازه‌های مربوط به سیستم کنترل BIVAL، در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ ارائه شده است. شکل ۵ تغییرات عمق را در بازه‌هایی که عملیات بهره‌برداری از آبگیرها در آنها انجام شده است نشان می‌دهد.



شکل ۴ تغییرات عمق بلافاصله پایین دست مخزن و در وسط بازه ۲ سیستم کنترل BIVAL



شکل ۵ تغییرات عمق در وسط بازه‌های ۴ و ۶ سیستم کنترل BIVAL



شکل ۶ تغییرات عمق در وسط بازه‌های ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶ سیستم کنترل BIVAL

۴- نتیجه گیری و پیشنهادها

- نتایج حاصل از آزمون و ارزیابی مدل به صورت موضعی در کانال E1-R1 شبکه دز و به صورت سراسری در کانال استاندارد شماره ۲ ارائه شده توسط ASCE و همچنین شاخصهای بدست آمده نشانگر عملکرد مناسب و مطلوب مدل است. با بررسیهای بیشتر برای توسعه کاربردی مدل می توان در شبیه سازیهای عملی از آن استفاده کرد.
- عملکرد مدل تهیه شده نسبت به ضرایب به کار رفته بخصوص ضریب تناسبی حساس بوده و در صورت عدم تعریف صحیح این ضرایب، محاسبات همگرا نخواهند شد. پیشنهاد می شود روش موثر و هوشمندی برای تعیین ضرایب به کار گرفته شود.

۵- فهرست منابع

- [۱] مامی زاده، ج (۱۳۸۳). تهیه مدل ریاضی سیستمهای کنترل پایین دست (AVIS, AVIO, P+PR, BIVAL) در کانالهای آبیاری. پایان نامه کارشناسی ارشد تاسیسات آبیاری. دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس تهران.
- [۲] مساح، ع (۱۳۸۰). تهیه مدل ریاضی سیستمهای کنترل نیریپیک، آمیل، آویس و P+PR در کانالهای آبیاری. پایان نامه کارشناسی ارشد تاسیسات آبیاری. دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس تهران.
- [3] Ankum, P. (1989). Water Control Systems and Irrigation Structures. Netherlands. Delft, 1-50.
- [4] Buyalski, C.P., Ehler, D.G., Falvey, H.T., Rogers, D.C., Serfozao, B.A. (1991). Canal Systems Automation Manual. USBR. 1-30.
- [5] Chevereau, G., and Schwarts-Benezeth, S. (1987). BIVAL Systems for Downstream Control. Planning Operation Rehabilitation and Automation of Irrigation Water Delivery Systems. Proceedings of Symposium Sponsored by The Irrigation and Drainage Division of the ASCE, D. D. Zimelman, ed, New York.

جدول ۲ محاسبه مقادیر شاخصها

شماره بازه	MAE	IAE	SRT
۱	۰/۷۷	۰/۰۸۱	۰
۲	۱/۰۹	۰/۴۶	۰
۴	۱/۲۸	۰/۵۳	۰
۶	۲/۵۷	۰/۸۶	۰
۸	۱/۱۰۵	۰/۶۱	۰
۱۰	۱/۱۰۵	۰/۴۲	۰
۱۲	۱/۰۸	۰/۴۸	۰
۱۴	۰/۵۷	۰/۲۸	۰
۱۶	۰/۱۸۷	۰/۰۸۳	۰

در بازه ۶ مقدار MAE برابر ۲/۵۷٪ است، بدین معنی که حداکثر انحراف عمق برابر ۵/۴ سانتیمتر بوده است. در بازه ۴ مقدار MAE برابر ۱/۲۸٪ است که حداکثر انحراف عمق برابر ۲/۷ سانتیمتر بوده است. IAE برای هر یک از بازه ها کمتر از ۱٪ است و بیشترین مقدار آن در بازه ۶ برابر ۰/۸۶٪ که نشان دهنده متوسط انحراف عمق ۶ میلیمتر می باشد. در سطح ۵٪ SRT برابر صفر به دست آمد که این امر نشان دهنده آن است که تغییرات عمق بلافاصله پایین دست مخزن مجهز به دریچه خودکار و در تمامی بازه های پایین دست مربوط به سیستم کنترل BIVAL در تمام ساعات، در محدوده مجاز قرار گرفته است. بدین ترتیب عمق جریان در پایین دست مخزن ورودی و تمامی بازه ها در اولین گام زمانی در محدوده مجاز قرار گرفته و تثبیت شده است که این از نظر کاربردی کاملاً قابل قبول است. به طور کلی مقادیر و شاخصهای به دست آمده نشان دهنده صحت عملکرد سیستم می باشد، به طوری که می توان آن را برای شبیه سازیهای عملی پیشنهاد کرد. به منظور افزایش اعتبار مدل و توسعه کاربردی آن لازم است بررسیهای بیشتری انجام شود.

- [8] Merkely, H. (1997). A Hydraulic Simulation Model for Unsteady Flow in Branching Canal Networks (CANALMAN). Utah State University. 1-140.
- [9] Sauvagere, J. (1992). The BIVAL Canal Control System Application to The Sahel Canal Operated by the Office du Niger (Mali). International Workshop on Application of Mathematical Modeling for the Improvement of Irrigation Canal Operation, Montpellier, France.
- [6] Clemmens, A. J., Kacerek, T. F., Grawitz, B., and Schuurmans, W. (1998). Test Case for Canal Control Algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE, 124:23-30.
- [7] Mallaterre, P. O., Rogers, D., and Schuurmans, J. (1998). Classification of Canal Control Algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE. 124:1-12.