

توسعه مدل ریاضی سیستم کنترل فازی پایین دست در کانال‌های آبیاری

محمد جواد منعم^{۱*}، محمد صادق کیپاشا^۲

۱- دانشیار گروه سازه‌های آبی دانشکده کشاورزی و عضو پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

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

* تهران، صندوق پستی ۳۳۶-۱۴۱۱۵

monem_mj@modares.ac.ir

چکیده- محدودیت منابع آب و عملکرد ضعیف شبکه‌های آبیاری، توجه بیشتر محققان را به بهبود مدیریت توزیع و تحویل آب با به‌کارگیری سیستم‌های کنترل مناسب‌تر جلب کرده است. توسعه سیستم‌های کنترل در کانال‌های آبیاری به دلیل پیچیدگی رفتار هیدرولیکی، مستلزم استفاده از مدل‌های هیدرودینامیک است. امروز استفاده از تئوری فازی در بسیاری از مسائل مهندسی معمول شده است. در این تحقیق از تئوری فازی برای کنترل جریان در کانال‌های آبیاری استفاده شده است. به‌منظور توسعه مدل ریاضی سیستم کنترل فازی، از مدل هیدرودینامیک ICSS- که توانایی شبیه‌سازی شرایط هیدرولیکی جریان غیر ماندگار را در تعامل با سیستم‌های کنترل دارد - استفاده شد. پس از توسعه سیستم کنترل فازی، عملکرد آن در کانال استاندارد شماره دو، معرفی شده توسط ASCE، با در نظر گرفتن تغییرات قابل توجه آبیاری از کانال، مطالعه شد. برای ارزیابی سیستم کنترل فازی از شاخص‌های خطای مطلق حداکثر، خطای مطلق تجمعی و زمان عکس‌العمل سیستم و نمودار تغییرات زمانی عمق آب، بازشدگی دریچه و دبی جریان استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که با اعمال تغییرات در نظر گرفته شده برای آبیاری از کانال، حداکثر انحراف عمق آب از عمق هدف به میزان ۱/۹ درصد است. همچنین حداکثر زمان لازم برای بازگشت عمق جریان به محدوده یک درصدی از عمق هدف پس از خارج شدن از این محدوده - که سرعت عکس‌العمل سیستم را نشان می‌دهد - ۱/۸ دقیقه بوده است. این مقادیر حاکی از آن است که سیستم کنترل فازی توسعه یافته عملکرد مناسب و مطلوبی را در کنترل پایین‌دست کانال آبیاری ارائه کرده و برای کاربرد در شرایط واقعی قابل توصیه است.

کلید واژگان: سیستم کنترل فازی، کانال‌های آبیاری، کنترل پایین‌دست، مدل ریاضی، ICSS.

۱- مقدمه

محدودیت منابع موجود برای احداث شبکه‌های جدید آبیاری و پایین بودن کارایی اغلب شبکه‌های آبیاری موجود، به دلیل مدیریت غیرمؤثر حاکم بر این سیستم‌ها، لزوم بهبود عملکرد شبکه‌ها را نشان می‌دهد (منعم، ۱۳۷۵). با توجه به اهمیت سیستم‌های کنترل خودکار جریان در بهبود مدیریت و بهره‌وری از آب در شبکه‌ها، سعی بر این بوده که با استفاده از سامانه‌های الکترونیک و الکترومکانیک و مدل‌های ریاضی سیستم‌های کنترلی ارائه شود که بتواند مدیریت بهره‌برداری از شبکه را بیش از پیش بهبود بخشد (Loof et al., 1994).

استفاده از سامانه‌های خودکار الکترومکانیک برای کنترل جریان در شبکه‌های آبیاری از سال ۱۹۷۱ با ارائه سیستم کنترل^۱ EL-FLO آغاز شده و تاکنون با توسعه انواع سیستم‌های دیگر ادامه داشته است (Mallaterre et al., 1998). در دهه‌های اخیر استفاده از تئوری فازی در انواع مسائل پیچیده مهندسی به‌ویژه مسائل کنترل، رایج شده است (Chang and Chang, 2006). روش فازی با توجه به خصوصیات آن، می‌تواند به عنوان کنترل‌کننده‌ای توانا، بخش عمده‌ای از محدودیت‌های روش‌های معمول کنترل را برطرف سازد. برخی از محدودیت‌های روش‌های معمول کنترل در شبکه‌های آبیاری عبارتند از: وجود خطا در اندازه‌گیری‌های عمق و دبی، تنظیم سازه‌ها، جمع‌آوری داده‌ها از سطح شبکه و برآورد زمان انتقال، عدم اطمینان از تقاضای واقعی و پیش‌بینی شده، میزان دبی تحویلی، مدت زمان تحویل، زمان شروع و خاتمه آبیاری، فرکانس و دور آبیاری در زمان و مکان، پیچیدگی روابط ریاضی حاکم بر هیدرولیک کانال‌ها و سیستم‌های کنترل، و احتیاج به امکانات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری

پیچیده. به‌کارگیری روش‌های فازی برای کنترل دبی جریان در یک نقطه از کانال، اولین بار روی کانال T₂ در مراکش با طول ۹۳ کیلومتر در سال ۱۹۹۴ انجام شد (Vorn and Bouillot, 1994). با توجه به اینکه هدف اصلی در استفاده از سیستم‌های کنترل جریان در کانال‌های آبیاری، معمولاً تنظیم عمق جریان است، لذا لازم است قابلیت‌های روش فازی در کنترل عمق جریان در کانال‌ها نیز مورد بررسی قرار گیرد.

ارزیابی عملکرد سیستم‌های کنترل جریان در کانال‌های آبیاری تابع شرایط هیدرولیکی است. از این رو ارزیابی عملکرد آنها مستلزم استفاده از مدل هیدرودینامیکی تعیین رفتار هیدرولیکی جریان در طول زمان است. در این تحقیق از مدل هیدرودینامیک، ICSS² برای توسعه مدل ریاضی سیستم کنترل فازی استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مشخصات سیستم کنترل توسعه یافته

سیستم‌های کنترل جریان در شبکه‌های آبیاری، با استفاده از دو بخش سخت‌افزاری (تجهیزات) و نرم‌افزاری (الگوریتم یا منطق کنترل) به کنترل جریان می‌پردازند. این سیستم‌ها با استفاده از اطلاعات کسب شده از شبکه، نظیر ارتفاع سطح آب در کانال، دبی عبوری از سازه یا بازشدگی دریچه و تجزیه و تحلیل آنها بر طبق منطق کنترلی مورد نظر، میزان تنظیم مورد نیاز سازه‌ها را برای دسترسی به اهداف بهره‌برداری تعیین می‌کنند.

مشخصات اساسی هر سیستم کنترل توسط متغیرهای سیستم کنترل، نوع کنترل و ساختار ورودی و خروجی آن تعیین می‌شود. متغیرها در سیستم‌های کنترل جریان به سه بخش متغیرهای کنترل‌شونده (مورد کنترل)، متغیرهای

1. Electronic Filter Level Offset

2. Irrigation Conveyance System Simulation

۲-۲- نظریه فازی و ساختار سیستم فازی

پیشنهادی

در طول سالیان متمادی، منطق دو ارزشی و ریاضیات مبتنی بر آن - که سعی دارد برای تمامی گزاره‌ها صرفاً ارزش درست یا نادرست را در نظر بگیرد - پایه تمامی علوم بوده است (غفاری، ۱۳۷۷). با توسعه دانش بشری منطق دو ارزشی در توجیه مسائلی نظیر عدم قطعیت موجود در برخی پدیده‌ها با مشکلاتی روبه‌رو شد. نظریه فازی به منظور برطرف ساختن عدم قطعیت و ابهام موجود در برخی از پدیده‌ها به وسیله پروفیسور لطفی عسگرزاده، ارائه شده است (تشنه‌لب و همکاران، ۱۳۷۸). در تئوری فازی، ریاضیات فازی با جایگزینی مجموعه‌های فازی به جای مجموعه‌های ریاضی کلاسیک شکل می‌گیرد. در مجموعه‌های کلاسیک ریاضی تعلق عضو به مجموعه صریح بوده و مقدار تعلق برابر صفر یا یک دارد، اما در مجموعه‌های فازی هر عضو مجموعه مقدار تعلق بین صفر و یک داشته و تابع تعلق، تابعی پیوسته با مقداری در محدوده صفر و یک است.

ساختار سیستم کنترل فازی پیشنهادی در این تحقیق مانند سایر سیستم‌های کنترل فازی که در کاربردهای مهندسی از آنها استفاده می‌شود، سه بخش اصلی شامل فازی‌ساز ورودی، موتور استنتاج و غیرفازی‌ساز خروجی دارد. فازی‌ساز نگاشتی است که مقادیر قطعی متغیرهای ورودی را به مجموعه‌های فازی تبدیل می‌کند. سیستم کنترل فازی این تحقیق به نحوی طراحی شده که از دو نوع فازی‌ساز منفرد^۲ و گوسی^۳ استفاده می‌کند. چنانچه مقادیر متغیرهای ورودی به الگوریتم کنترل دقیق بوده و خطا در جمع‌آوری آنها کم باشد، از فازی‌ساز منفرد استفاده می‌شود. این

اندازه‌گیری شونده (ورودی) و متغیرهای خروجی یا اقدام کنترلی تقسیم می‌شوند. در شبکه‌های آبیاری به‌طور معمول، هدف از استفاده از سیستم‌های کنترل، تنظیم رقوم سطح آب و در سیستم‌های کنترل از پایین‌دست تنظیم رقوم آب پایین‌دست سازه‌های آب‌بند مورد نظر است. از این رو در سیستم کنترل ارائه شده، عمق جریان در پایین‌دست سازه تنظیم به‌عنوان متغیر مورد کنترل در نظر گرفته شده است. تنظیم عمق جریان در کانال‌های آبیاری نیازمند اطلاع از وضع موجود عمق آب و میزان تنظیم سازه کنترل است. بنابراین دو متغیر رقوم سطح آب و بازشدگی دریچه تنظیم‌کننده به‌عنوان متغیرهای اندازه‌گیری انتخاب شد. به‌طور معمول در کانال‌های آبیاری پس از مشاهده عمق موجود و میزان تنظیم دریچه‌های آب‌بند با تغییر میزان بازشدگی دریچه‌های آب‌بند، عمق جریان تنظیم می‌شود. لذا در سیستم کنترل فازی ارائه شده، میزان تغییر در بازشدگی دریچه به‌عنوان متغیر خروجی سیستم کنترل در نظر گرفته شده است. این متغیر با توجه به متغیرهای اندازه‌گیری شونده (رقوم سطح آب موجود و بازشدگی دریچه تنظیم‌کننده) توسط الگوریتم کنترل فازی به نحوی تعیین می‌شود که متغیر مورد کنترل (رقوم سطح آب در کانال) را به رقوم هدف برساند. با توجه به نوع عمل کنترل در کانال‌های آبیاری - که میزان تنظیم سازه بر اساس میزان انحراف رقوم سطح آب از رقوم هدف تعیین می‌شود - در کنترل‌کننده فازی ارائه شده، سیستم کنترل از نوع پس‌خورد^۱ در نظر گرفته شده است. همچنین ساختار ورودی و خروجی این سیستم کنترل با توجه به استفاده از دو متغیر اندازه‌گیری شونده ورودی و یک متغیر خروجی عمل کنترل به صورت 2ISO می‌باشد.

2. Singleton Fuzzifier
3. Gaussian Fuzzifier

1. Feed Back

که در آن n تعداد متغیرهای ورودی سیستم کنترل، B^L و A^L_i مجموعه‌های فازی موجود در پایگاه قواعد سیستم کنترل فازی، M تعداد قوانین موجود در پایگاه قواعد فازی، x مقدار متغیر قطعی ورودی و y مقدار متغیر قطعی خروجی است.

غیرفازی‌سازی، نگاشتی است که مجموعه فازی خروجی موتور استنتاج کنترل کننده فازی (B^L) را به مقداری قطعی (y^*) می‌نگارد. در این تحقیق از غیرفازی‌سازی میانگین مراکز^۲ - که یکی از رایجترین غیرفازی‌سازهای مورد استفاده در سیستم‌های فازی و کنترل فازی است - استفاده شده است. در این غیرفازی‌سازی خروجی سیستم فازی (y^*) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$y^* = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l w_l}{\sum_{l=1}^M w_l} \quad (4)$$

که در آن \bar{y}^l مرکز مجموعه فازی خروجی l ام و w_l ارتفاع مجموعه فازی l ام است. شکل ۱ ساختار سیستم کنترل فازی این تحقیق را نشان می‌دهد.

۲-۳- طراحی سیستم کنترل کننده فازی برای کنترل جریان در شبکه‌های آبیاری

برای طراحی سیستم کنترل فازی با توجه به مشخص شدن متغیرهای ورودی، ابتدا باید تعداد مجموعه‌های فازی که در دامنه تغییر متغیرهای ورودی تعریف می‌شوند، مشخص شود. این مجموعه‌ها باید به نحوی تنظیم شوند که سراسر دامنه تغییر متغیرهای ورودی را پوشش دهند. سپس نوع تابع عضویت برای هر متغیر در پایگاه قواعد فازی تعیین می‌شود.

فازی‌سازی توانایی حذف اغتشاش موجود در داده‌های ورودی را ندارد، اما استفاده از آن سبب ساده‌سازی روند محاسبات در موتور استنتاج می‌شود. این فازی‌سازی، متغیر قطعی ورودی به الگوریتم کنترل را (x^*)، به یک منفرد فازی (A^L) با مقدار تابع تعلق $\mu_{A^L}(x)$ به صورت زیر می‌نگارد:

$$\mu_{A^L}(x) = \begin{cases} 1 & : x=x^* \\ 0 & : x \neq x^* \end{cases} \quad (1)$$

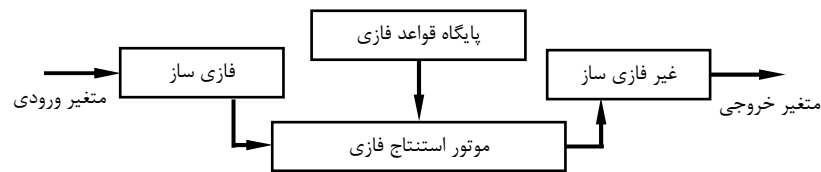
زمانی که خطا و اغتشاش در متغیرهای ورودی زیاد باشد، از فازی‌سازی گوسی استفاده می‌شود. این فازی‌سازی توانایی کاهش اغتشاش موجود در داده‌های ورودی را دارد. همچنین چنانچه از این فازی‌سازی با توابع تعلق گوسی در پایگاه قواعد فازی استفاده شود، روند محاسبات در موتور استنتاج ساده می‌شود. این فازی‌سازی متغیر قطعی ورودی به الگوریتم کنترل را (x^*)، به مجموعه فازی (A^L) با مقدار تابع تعلق $\mu_{A^L}(x)$ به صورت زیر می‌نگارد:

$$\mu_{A^L}(x) = e^{-\left(\frac{x_1-x_1^*}{d_1}\right)^2} * \dots * e^{-\left(\frac{x_n-x_n^*}{d_n}\right)^2} \quad (2)$$

که در آن d_i پارامترهای مثبت و x نشان دهنده t -نرم است.

در تئوری فازی انواع مختلفی از موتورهای استنتاج^۱ با خواص گوناگون وجود دارد. یکی از انواع موتورهای استنتاج که در سیستم‌های کنترل فازی مختلف و در این تحقیق استفاده شده، موتور استنتاج حاصل ضرب است. این موتور استنتاج یکی از کاربردی‌ترین موتورهای استنتاج در سیستم‌های فازی بوده و مهمترین مزیت آن سادگی محاسباتی است (تشنه‌لب و همکاران، ۱۳۷۸). نگاشت این موتور استنتاج به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_{B^L}(y) = \max_{l=1}^M [SUP_{x \in U} (\mu(x) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^L}(x) \mu_{B^L}(y))] \quad (3)$$



شکل ۱ ساختار کنترل کننده فازی در این تحقیق

نوع تابع عضویت انتخاب شده برای متغیرهای ورودی در پایگاه قواعد فازی، مثلثی یا گوسی است. اگر در سیستم کنترل فازی، فازی ساز ورودی از نوع منفرد باشد، تابع عضویت در پایگاه قواعد فازی از نوع توابع مثلثی انتخاب می شود. همچنین اگر فازی ساز ورودی از نوع گوسی باشد، برای ساده شدن روند محاسبات، از تابع تعلق گوسی برای پایگاه قواعد فازی استفاده شده است. در مرحله دوم پایگاه قواعد فازی - که بخش اصلی کنترل کننده فازی بوده و دستورهای خروجی از کنترل کننده به وسیله آن تولید می شود - استخراج می شود. برای استخراج پایگاه قواعد دو روش وجود دارد. در روش اول با استفاده از مدل فیزیکی مجهز به سیستم کنترل فازی، به ازای تنظیم دبی های مختلف و عمق های متفاوت جریان در کانال، میزان تغییر در بازشدگی دریچه سازه، به گونه ای تعیین می شود که عمق جریان در عمق هدف تثبیت شود. در روش دوم با استفاده از مدل هیدرودینامیک و شبیه سازی جریان، پایگاه قواعد فازی استخراج می شود. در این تحقیق از روش دوم استفاده شده است. این انتخاب با توجه به دقت مناسب، سرعت عمل، هزینه محدود و دسترسی به ابزار مورد نیاز صورت گرفته است. قوانین موجود در پایگاه قواعد سیستم کنترل تدوین شده، با توجه به متغیرهای ورودی و خروجی به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

Ru^L : اگر x_1 (باز شدگی دریچه سازه تنظیم) معادل A^1 و x_2 (اختلاف رقوم آب از رقوم هدف) معادل B^1_j باشد، آنگاه y (میزان تغییر در بازشدگی دریچه سازه تنظیم کننده) برابر C^1_j است. این قانون بیان می کند که اگر بازشدگی کنونی دریچه سازه تنظیم آب در کانال (X_1)، مجموعه فازی برابر A^1 باشد و همچنین اختلاف رقوم سطح آب از رقوم هدف در محل تنظیم عمق جریان در پایین دست تنظیم کننده (X_2)، مجموعه فازی برابر B^1_j باشد، آنگاه میزان تغییر در بازشدگی دریچه (y) باید مجموعه فازی C^1_j در نظر گرفته شود تا عمق آب پایین دست تنظیم کننده به عمق هدف برسد.

در مرحله سوم، روابط کنترلی و هیدرولیکی سیستم کنترل فازی استخراج می شود. روابط کنترلی در کنترل کننده فازی با ادغام نگاهت های فازی ساز ورودی، موتور استنتاج و غیر فازی ساز خروجی استخراج می شود. برای استخراج روابط کنترلی دو حالت در نظر گرفته می شود. می شود که داده های ورودی فاقد اغتشاش باشد. استخراج رابطه کنترلی در این حالت با استفاده از رابطه نگاهت فازی ساز منفرد، موتور استنتاج حاصل ضرب، غیر فازی ساز میانگین مراکز و تابع تعلق مثلثی و ادغام این نگاهت ها در هم انجام می شود. رابطه کنترلی حاصله در این حالت به صورت زیر است:

که در آن \bar{x}_i^{-l} مرکز مجموعه های فازی در دامنه تعریف متغیر x_i ، a_i انحراف معیار فازی ساز گوسی، σ_i^l انحراف معیار توابع تعلق گوسی در دامنه تعریف متغیر x_i بوده و سایر پارامترها قبلاً تعریف شده است.

سیستم کنترل فازی پیشنهادی بر روی هر نوع سازه آببند در کانالهای آبیاری قابل استفاده است. در این تحقیق سیستم کنترل بر روی دریچه کشویی مستطیلی اعمال شده و لذا از روابط هیدرولیکی این دریچه در طراحی سیستم کنترل استفاده شده است. برای محاسبه دبی عبوری از این سازه، شرایط هیدرولیکی دریچه با جریان آزاد و مستغرق و سرریز آزاد و مستغرق با وجود یا عدم وجود دراپ در کانال (شکل ۲) در نظر گرفته شده است که به عنوان نمونه روابط هیدرولیکی دبی عبوری از دریچه کشویی در حالت جریان دریچه آزاد با دراپ به صورت زیر است:

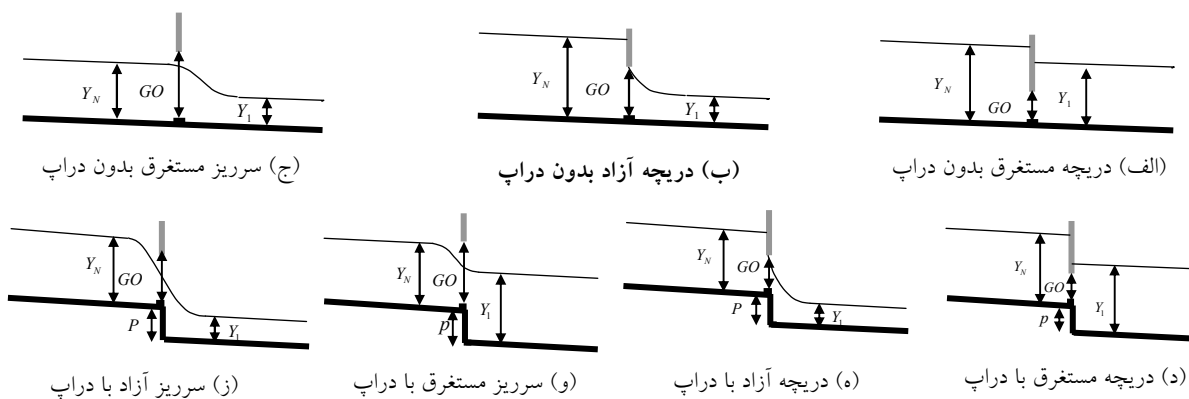
$$Q = C_d \times b \times GO \times \sqrt{2g(Y_N - C_c \times GO)} \quad (7)$$

$$y = \frac{\sum_{L=1}^M y^{-l} \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \right)}{\sum_{L=1}^M \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \right)} \quad (5)$$

که در آن x_i متغیر ورودی، A_i^l مجموعه فازی تعریف شده در دامنه x_i ، $\mu_{A_i^l}(x_i)$ درجه عضویت متغیر x_i در مجموعه فازی A_i^l ، \bar{y}^{-l} مرکز مجموعه های فازی در بخش آنگاه پایگاه قواعد فازی، M تعداد قواعد موجود در پایگاه قواعد فازی، n تعداد مجموعه های فازی در بخش آنگاه قواعد فازی و Y خروجی سیستم فازی می باشد.

حالت دوم برای شرایطی در نظر گرفته می شود که داده های ورودی دارای اغتشاش باشد. استخراج رابطه کنترلی در این حالت با استفاده از رابطه نگاشت فازی ساز گوسی، موتور استنتاج حاصلضرب، غیرفازی ساز میانگین مراکز و تابع تعلق گوسی و ادغام این نگاشت ها در یکدیگر انجام می شود. رابطه کنترلی حاصل در این حالت به صورت زیر است:

$$y = \frac{\sum_{L=1}^M y^{-l} \left(\prod_{i=1}^n \exp \left(-\frac{(x_i - \bar{x}_i^{-l})^2}{a_i^2 + (\sigma_i^l)^2} \right) \right)}{\sum_{L=1}^M \left(\prod_{i=1}^n \exp \left(-\frac{(x_i - \bar{x}_i^{-l})^2}{a_i^2 + (\sigma_i^l)^2} \right) \right)} \quad (6)$$



شکل ۲ طرحواره عبور جریان از سازه تنظیم کننده

به عنوان یک شرط مرزی با کد ۳۱۳ (BC313) برنامه نویسی و با مدل ICSS تلفیق شده است (کیاپاشا، ۱۳۸۵). در این قسمت زیربرنامه‌های مختلف این شرط مرزی و نحوه انجام محاسبات هیدرولیکی در مدل ریاضی سیستم کنترل فازی تشریح می‌شود.

در شروع شبیه‌سازی ابتدا محاسبات جریان ماندگار انجام می‌شود. این محاسبات از سازه انتهایی کانال و با دبی ثابتی شروع می‌شود. پس از رسیدن به شرط مرزی سازه مجهز به سیستم کنترل فازی، با اجرای زیربرنامه نوع D و استفاده از روابط هیدرولیکی سازه و دبی اولیه، میزان بازشدگی دریچه و عمق جریان در بالادست آن محاسبه شده و محاسبات به سمت سراب کانال ادامه می‌یابد. محاسبات جریان غیر ماندگار از سراب کانال شروع می‌شود و مرحله اول آن، بهره‌برداری از سازه‌ها است. عملیات بهره‌برداری خودکار در هر گام زمانی از محاسبات جریان غیرماندگار، با اجرای زیربرنامه نوع C و با استفاده از روابط کنترلی (روابط ۵ و ۶) انجام می‌شود. سیستم کنترل پیشنهادی در این تحقیق به نحوی طراحی شده که برای بهبود عملکرد آن در شرایط مختلف با توجه به نیاز می‌توان از سه نوع فیلتر محدوده مجاز عمق، فیلتر محدوده مجاز تنظیم دریچه و فیلتر سرعت موتور استفاده کرد. محدوده مجاز عمق، محدوده‌ای است حول عمق هدف که چنانچه عمق قرائت شده یا محاسباتی در پایین دست تنظیم کننده در درون این محدوده قرار گیرد، هیچ عمل کنترلی انجام نخواهد شد. با استفاده از این فیلتر، کاربر می‌تواند پس از رسیدن عمق جریان به محدوده مطلوب، از اعمال بهره‌برداری‌های اضافی جلوگیری کند. محدوده مجاز تنظیم دریچه، محدوده‌ای است که چنانچه مقدار تغییر در بازشدگی محاسبه شده در الگوریتم کنترل، از آن کوچکتر باشد، تغییری در بازشدگی

که در آن Y_N عمق جریان در بالادست دریچه، Y_1 عمق جریان در پایین دست دریچه، b عرض دریچه، GO بازشدگی دریچه، C_e ضریب فشردگی، C_d ضریب دبی، g شتاب ثقل و P ارتفاع دراپ بعد از دریچه است.

۲-۴- مدل ICSS

مدل هیدرودینامیک ICSS توسط Manz (1990)، به منظور شبیه‌سازی سیستم‌های انتقال و توزیع آب آبیاری از نظر هیدرولیکی، هیدرولوژی و بهره‌برداری ارائه شده است. عملکرد این مدل با استفاده از داده‌های دقیق آزمایشگاهی گردآوری شده توسط Tersk و اسنجی شده و مورد تأیید قرار گرفته است. صحت عملکرد این مدل به تأیید انجمن مهندسان عمران کانادا رسیده و در بسیاری از تحقیقات و مطالعات، با موفقیت استفاده شده است (Monem and Manz, 1994). این مدل توانایی شبیه‌سازی یک‌بعدی جریان متغیر تدریجی را در شرایط مختلف بهره‌برداری در کانال‌های آبیاری، با انواع سازه‌های کنترل و تنظیم و شکل مقطع‌های گوناگون - در شرایط جریان ماندگار و غیرماندگار - دارا است. در مدل ICSS سازه‌های هیدرولیکی به صورت شرایط مرزی شبیه‌سازی می‌شوند. برای محاسبات هیدرولیکی، روابط مربوط به شرایط مرزی (BC^1) در چهار مرحله، انجام محاسبات جریان ماندگار ($BC\#D$)، انجام عملیات بهره‌برداری ($BC\#C$)، انجام محاسبات جریان غیرماندگار ($BC\#A$) و به روز کردن ماتریس شرایط مرزی ($BC\#B$) احضار می‌شود.

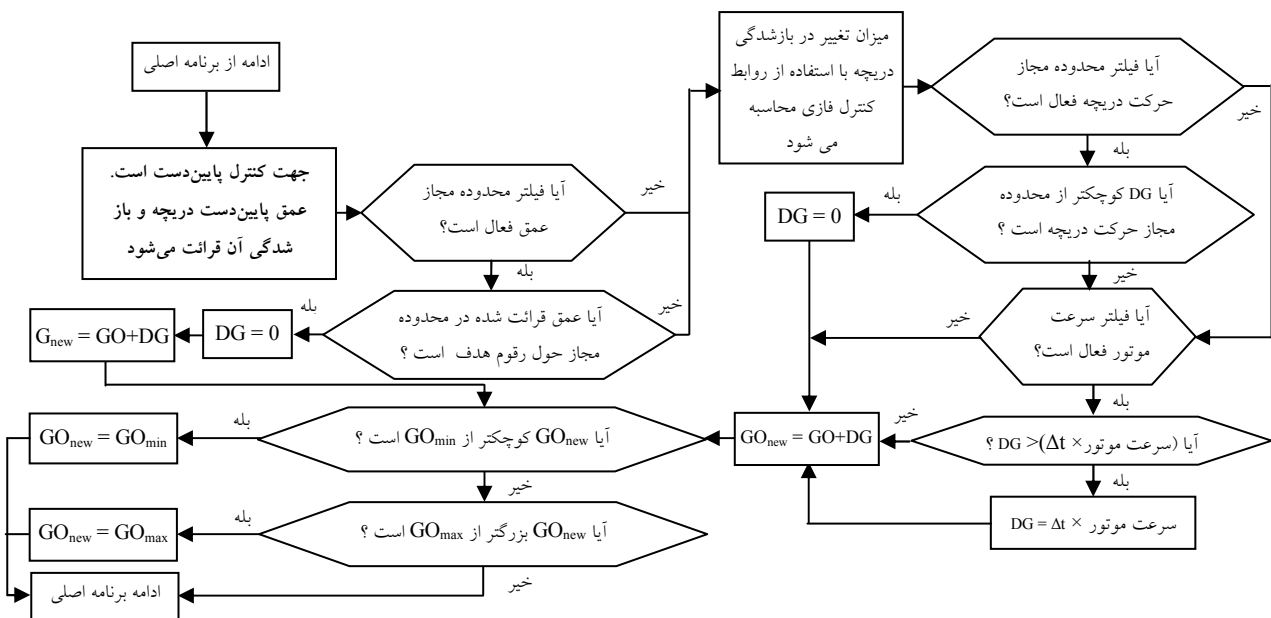
۲-۵- تهیه مدل ریاضی سیستم کنترل فازی

با توجه به روابط هیدرولیکی و کنترلی ذکر شده، مدل ریاضی سیستم کنترل فازی برای کنترل دریچه کشویی،

1. Boundary Condition

پس از انجام عملیات بهره‌برداری خودکار در هر گام زمانی، محاسبات جریان غیرماندگار انجام شده و پارامترهای محاسبه شده در ماتریس شرایط مرزی به‌روز می‌شود. برای انجام محاسبات جریان غیرماندگار در هر گام زمانی، ابتدا زیربرنامه نوع A احضار شده و مشتقات معادلات شرایط مرزی نسبت به عمق و سرعت محاسبه شده و در نهایت روابط جریان غیرماندگار در یک گام زمانی Δt برای کل کانال حل می‌شود. با مشخص شدن مقادیر عمق و سرعت در تمامی گره‌های کانال با احضار زیربرنامه نوع B، مقادیر عمق و دبی در ماتریس شرایط مرزی مربوط به سازه تنظیم‌کننده جریان - که سیستم کنترل فازی بر روی آن اعمال شده - و سایر عوامل مرتبط برای انجام محاسبات جریان غیرماندگار در گام زمانی بعدی، به‌روز می‌شود.

دریچه داده نمی‌شود. استفاده از این فیلتر که برای شبیه‌سازی اصطکاک موجود در دریچه‌ها طراحی شده، سبب می‌شود که با عدم اعمال تغییرات کم در بازشدگی دریچه آب‌بند، از عملکرد مکرر آن جلوگیری شود. فیلتر سرعت موتور، نوعی محدودیت را در سرعت اعمال تنظیم دریچه ایجاد می‌کند. در این فیلتر چنانچه میزان تغییر در بازشدگی دریچه سازه تنظیم‌کننده محاسبه شده، از حاصل ضرب سرعت موتور در گام زمانی محاسبات بیشتر باشد، میزان تغییر در بازشدگی دریچه برابر با مقدار حاصل ضرب سرعت موتور در بازه زمانی در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب سرعت تنظیم دریچه در محدوده حداکثر سرعت کنترل می‌شود. کاربرد سه فیلتر موجب عملکرد پایدار سازه می‌شود. شکل ۳ فرایند استخراج میزان تغییر در بازشدگی دریچه سازه آب‌بند را در عملیات بهره‌برداری خودکار در سیستم کنترل فازی نشان می‌دهد.



شکل ۳ روندنمای عملیات بهره‌برداری خودکار در سیستم کنترل فازی

شاخص خطای مطلق تجمعی (IAE²) نشان‌دهنده میانگین انحرافات عمق آب از عمق هدف در طول دوره بهره‌برداری بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$IAE = \frac{\Delta t \sum_{t=0}^T |y_t - y_{t \text{ target}}|}{y_{t \text{ target}}} \quad (11)$$

که در آن Δt گام زمانی محاسباتی و T طول دوره بهره‌برداری است. برای محاسبه این شاخص باید گام زمانی محاسبات در طول دوره بهره‌برداری ثابت باشد.

شاخص زمان عکس‌العمل سیستم (SRT³) عبارت است از فاصله زمانی بین خارج شدن سطح آب از محدوده مجاز حول عمق هدف، تا زمانی که سطح آب بار دیگر به این محدوده باز می‌گردد و در این محدوده تثبیت می‌شود. محدوده مجاز، محدوده‌ای است حول عمق هدف به میزان $y_{\text{target}} \times (1 \pm \%0.5X)$ که مقدار X در آن توسط کاربر تعریف می‌شود. این شاخص نشان‌دهنده سرعت عکس‌العمل سیستم نسبت به تغییرات عمق آب است. هر چه مقدار SRT سیستم کمتر باشد، عکس‌العمل سیستم نسبت به تغییرات عمق سریعتر بوده و نوسانهای عمق آب در حین عملیات بهره‌برداری سریعتر به محدوده مجاز باز می‌گردد و تثبیت می‌شود.

۳- نتایج آزمون و ارزیابی مدل

یکی از مهمترین عوامل ایجاد جریان‌های غیرماندگار در کانال‌های آبیاری، تغییرات نیاز آبیگرهای موجود در طول کانال است. اعمال این تغییرات و تأمین نیاز آبیگرها با تنظیم آب‌بندها توسط سیستم‌های کنترل جریان و تغییر دبی ورودی به کانال و یا ترکیبی از آنها صورت می‌گیرد. هر یک از سیستم‌های مختلف کنترل، در کانال‌هایی با ویژگیهای متفاوت و تحت شرایط ویژه و محدودی مورد

در مدل ICSS برای انجام محاسبات جریان غیرماندگار، در کنار روابط منفصل شده سنت و نانت در طول کانال، از روابط شرایط مرزی به صورت G_0 و F_N و مشتقات آنها نسبت به عمق و سرعت به ترتیب در شرایط مرزی بالادست و پایین‌دست هر کانال استفاده می‌شود. از این رو، متناسب با شرایط جریان (شرایط هفت‌گانه شکل ۲) روابط G_0 و F_N تعریف شده است. به‌عنوان مثال روابط مورد استفاده در حالت جریان دریاچه مستغرق بدون دراپ به صورت زیر تعریف شده است:

$$G_0 : A_1 V_1 - A_N \cdot V_N = 0 \quad (8)$$

$F_N : A_1 \cdot V_1 - C_d \cdot b \cdot GO \cdot \sqrt{2g(Y_N - Y_1)} = 0 \quad (9)$
که در آن A_1 سطح مقطع جریان در ابتدای بازه پایین‌دست، V_1 سرعت جریان در ابتدای بازه پایین‌دست، A_N سطح مقطع جریان در انتهای بازه بالادست، V_N سرعت جریان در انتهای بازه بالادست است.

۲-۶- شاخص‌های ارزیابی عملکرد سیستم‌های کنترل

در این تحقیق برای ارزیابی عملکرد سیستم کنترل فازی از شاخص‌های مختلفی استفاده شده که عبارتند از خطای مطلق حداکثر، خطای مطلق تجمعی ارائه شده توسط ASCE (Clemmens *et al.*, 1998) و زمان عکس‌العمل سیستم، پیشنهادی منعم و مساح (۱۳۸۲). شاخص خطای مطلق حداکثر (MAE¹) برای اندازه‌گیری حداکثر انحراف عمق آب از عمق هدف به صورت رابطه زیر ارائه شده است:

$$MAE = \frac{\max |y_t - y_{t \text{ target}}|}{y_{t \text{ target}}} \quad (10)$$

که در آن y_t عمق آب مشاهده شده در زمان t و y_{target} عمق آب هدف است.

2. Integral of Absolute Magnitude of Error
3. System Response Time

1. Maximum Absolute Error

در تعامل با عملکرد سایر سازه‌های آب‌بند مورد ارزیابی قرار گرفت.

در این آزمون ابتدا محاسبات جریان ماندگار با دبی ۶ متر مکعب بر ثانیه از انتهای پایین دست کانال شروع شده و با توجه به اینکه هر یک از ۸ آبگیر موجود در طول کانال ابتدای شبیه‌سازی بسته است، در نهایت در ابتدای کانال دبی ماندگار ۶ متر مکعب در ثانیه توسط مخزن مجهز به دریچه خودکار تأمین می‌شود. پس از پایدار شدن شرایط جریان در کانال، افزایش آبیگری از کانال به‌طور همزمان در آبگیرهای بازه‌های ۱، ۲، ۳، ۶ و ۷ اعمال می‌شود. به‌منظور بررسی عملکرد سیستم کنترل فازی در برابر این تغییرات، محاسبات به مدت ۱۲ ساعت ادامه یافته است. با افزایش آبیگری از کانال عمق جریان در پایین دست سازه‌های آب‌بند کاهش می‌یابد. با کاهش عمق جریان در پایین دست سازه‌های آب‌بند میزان بازشدگی دریچه این سازه‌ها به‌طور خودکار توسط سیستم کنترل فازی افزایش یافته و در نتیجه دبی عبوری از این سازه‌ها زیاد می‌شود. این کار سبب می‌شود که عمق آب در پایین دست سازه‌های آب‌بند افزایش یافته و با انجام عملیات بهره‌برداری خودکار در گام‌های زمانی بعدی، عمق جریان در عمق هدف تثبیت شود. در مرحله بعدی عملکرد سیستم کنترل فازی در حالت کاهش میزان آبیگری از کانال مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت، پنج آبگیر مذکور به‌طور همزمان بسته شده و محاسبات به مدت ۱۲ ساعت ادامه یافته است. با کاهش آبیگری از کانال عمق جریان در پایین دست سازه‌های آب‌بند افزایش می‌یابد. با افزایش عمق جریان در پایین دست سازه‌های آب‌بند میزان بازشدگی دریچه این سازه‌ها به‌طور خودکار توسط سیستم کنترل فازی کم می‌شود. با کاهش دبی عبوری از سازه‌های آب‌بند عمق جریان در پایین دست سازه‌های

آزمون و ارزیابی قرار گرفته‌اند. خصوصیات کانال‌ها تأثیر عمده‌ای بر عملکرد سیستم‌های کنترل می‌گذارد، بنابراین ارزیابی عملکرد سیستم‌های کنترل پیشنهادی و قضاوت در مورد مزایا و معایب آنها به راحتی امکانپذیر نیست. برای برطرف کردن این مشکلات، کمیته کاری ASCE در زمینه بررسی الگوریتم‌های کنترل خودکار کانال‌ها، دو کانال استاندارد را برای آزمون الگوریتم‌های کنترل پیشنهاد کرده است (Clemmens et al., 1998).

در این تحقیق از کانال شماره دو ASCE برای استخراج پایگاه قواعد و آزمون و ارزیابی عملکرد سیستم کنترل فازی استفاده شده است. این کانال با طول ۲۸ کیلومتر و شیب طولی ۰/۰۰۰۱ شامل ۸ بازه است. هر یک از بازه‌های کانال به وسیله دریچه‌ای از یکدیگر جدا شده و در هر بازه، یک آبگیر روزنه‌ای وجود دارد. در تمامی بازه‌های کانال، ضریب زبری مانینگ برابر ۰/۰۲ و مقطع کانال دوزنقه‌ای با عرض کف ۷ متر و شیب جانبی ۱/۵H:۱V است. در انتهای کانال به‌منظور تخلیه جریان از پمپ استفاده می‌شود. به‌منظور بررسی عملکرد سیستم کنترل فازی مدل ریاضی این کانال در قالب فایلی که با فرمت داده‌های ورودی به مدل ICSS سازگار باشد، تنظیم شده است. همچنین دریچه‌های کشویی آب‌بند بین بازه‌های کانال مجهز به سیستم کنترل خودکار فازی شده و در سراب کانال نیز از مخزن مجهز به دریچه خودکار، برای پاسخگویی خودکار به نیاز پایین دست استفاده شده است.

به‌منظور بررسی عملکرد سیستم کنترل فازی یکی از گزینه‌های پیشنهادی ASCE در نظر گرفته شد. در این گزینه عملکرد سیستم کنترل در مقابل تغییرات قابل توجه آبیگری از کانال به‌صورت همزمان در آبگیرها و چگونگی گسترش عکس‌العمل سیستم کنترل در سرتاسر کانال و

برای رعایت اختصار، نمودارهای مربوط به سایر آب‌بندها که عملکردی بهتر از آب‌بند دوم داشته‌اند ارائه نشده است.

۳-۱- تحلیل نتایج

با بررسی مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد محاسبه شده برای سیستم کنترل فازی و نمودارهای تغییرات عمق و دبی سازه‌های آب‌بند و بازشدگی دریچه آنها، به نکات زیر می‌توان دست یافت:

۱- مقادیر شاخص‌های MAE، IAE و SRT در سطح یک درصد، در سازه‌های میانی کانال (بازه‌های پایین‌دست آب‌بندهای سه و چهار) نسبت به آب‌بندهای ابتدایی و انتهایی آن کمتر است. دلیل این موضوع آن است که در این آزمون در این بازه‌ها، تغییراتی در آبگیری از کانال به وجود نمی‌آید.

آب‌بند کاهش یافته و با انجام عملیات بهره‌برداری در گام‌های زمانی بعدی در عمق هدف تثبیت می‌شود. جدول ۱ زمان و مقدار تغییرات دبی آبگیری‌ها را در طول دوره بهره‌برداری در این گزینه نشان می‌دهد.

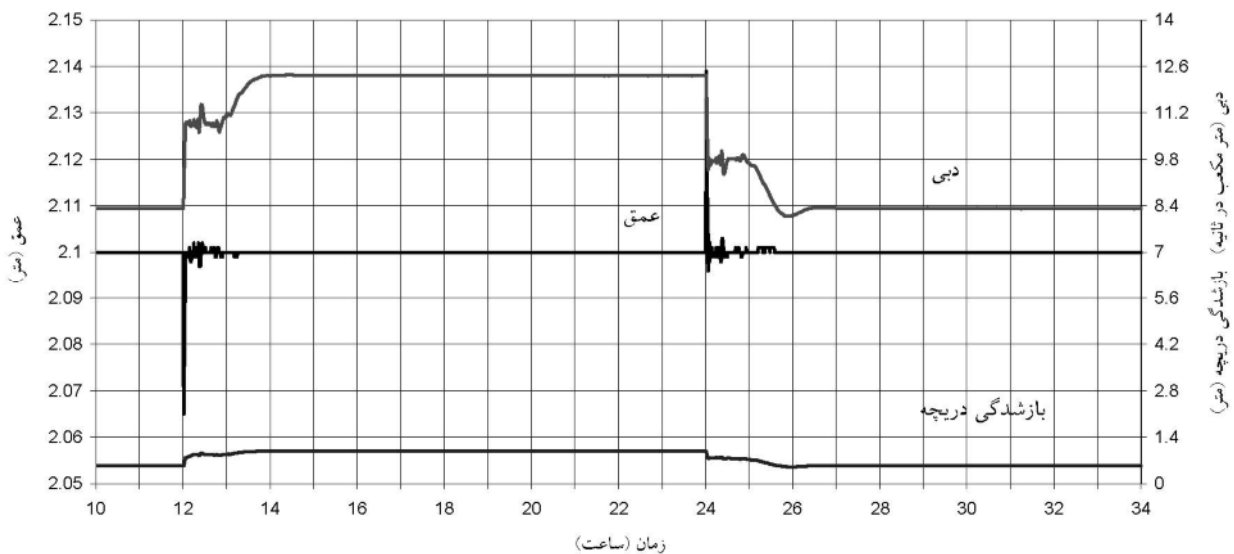
در این آزمون مقادیر عمق هدف برای آب‌بندهای ۱ و ۲، ۲/۱ متر، برای آب‌بندهای ۳ و ۴ معادل ۱/۹ متر و برای آب‌بندهای ۵، ۶ و ۷ معادل ۱/۷ متر در نظر گرفته شد. پس از اجرای برنامه تغییرات دبی آبگیرها طبق جدول ۱، مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین نمودارهای تغییرات عمق، دبی و بازشدگی دریچه سازه‌های آب‌بند نیز ترسیم شد که به‌عنوان نمونه تغییرات عمق، دبی و بازشدگی دریچه آب‌بند دوم - که نسبت به سایر سازه‌های آب‌بند شدیدتر است - در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۱ تغییرات دبی آبگیرهای کانال شماره دو ASCE

دبی آبگیر (m ³ /s)								زمان (ساعت)
هشت	هفت	شش	پنج	چهار	سه	دو	یک	
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۲-۰
۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۲/۵	۱/۵	۱/۵	۲۴-۱۲
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۴-۲۴

جدول ۲ مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد سازه‌ها

آب‌بندهای							شاخص	زمان
هفت	شش	پنج	چهار	سه	دو	یک		
۰/۱۱۸	۰/۹۴۱	۰/۵۳۰	۰/۱۵۸	۰/۰۵۳	۱/۶۶۷	۱/۰۴۸	MAE (%)	۱۰-۲۲
۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	IAE (%)	
۰/۰۰۰	۰/۰۱۰	۰/۰۱۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۳۰	۰/۰۱۰	SRT _{1%} (hour)	
۰/۱۱۸	۱/۰۵۹	۰/۴۷۱	۰/۰۵۳	۰/۱۰۵	۱/۸۵۷	۱/۱۴۳	MAE (%)	۲۲-۳۴
۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۷	۰/۰۰۸	IAE (%)	
۰/۰۰۰	۰/۰۲۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۳۰	۰/۰۲۰	SRT _{1%} (hour)	



شکل ۴ تغییرات عمق و دبی پایین دست آب بند دو و بازشدگی دریچه آن

مرحله بیش از ۵۰ درصد دبی جریان ورودی به کانال است - کاملاً مناسب ارزیابی می شود.

۴- در این آزمون مقدار حداکثر شاخص SRT در سطح یک درصد برای آب بند اول و به مقدار ۱/۸ دقیقه به دست آمده است. این مقدار نشان دهنده آن است که حداکثر زمان لازم برای بازگشت عمق جریان به محدوده یک درصدی عمق هدف پس از خارج شدن از این محدوده برابر ۱/۸ دقیقه است. مدت زمان کل تثبیت جریان در حدود ۶۰ دقیقه به دست آمده که این مقدار حدود ۳ درصد آن بوده و عکس العمل مناسبی ارزیابی می شود. باید ذکر شود که مقدار این شاخص با توجه به شدت تغییرات اعمال شده و دامنه در نظر گرفته شده حول عمق هدف برای محاسبه این شاخص (یک درصد)، مطلوب ارزیابی می شود.

۴- نتیجه گیری

۱- با استفاده از تئوری فازی می توان میزان اثر خطا را در داده های جمع آوری شده از سطح شبکه که به عنوان داده

۲- در این آزمون حداکثر مقدار شاخص MAE برای آب بند دوم و به میزان ۱/۹ درصد است، بدین معنا که حداکثر انحراف رقوم سطح آب از رقوم هدف در پایین دست سازه های آب بند مجهز به سیستم کنترل فازی در این آزمون، مربوط به آب بند دوم و به میزان ۳/۹ سانتی متر است. این مقدار انحراف رقوم آب از رقوم هدف - که تقریباً برابر ۳ درصد تغییرات دبی تحویلی به آبگیر است - با توجه به میزان قابل قبول نوسانهای دبی تحویلی در شبکه های آبیاری (حدود ۱۰ درصد) - کاملاً مناسب است.

۳- حداکثر میزان شاخص IAE برای آب بند اول و به مقدار ۰/۰۰۸ درصد است. با توجه به این مقدار می توان به این نتیجه رسید که مقدار حداکثر میانگین انحراف رقوم سطح آب از رقوم هدف در طول دوره بهره برداری برابر ۰/۰۲ سانتی متر است. این مقدار انحراف تقریباً برابر ۰/۲ درصد تغییرات دبی تحویلی به آبگیر بوده و در مقایسه با مقدار قابل قبول در شبکه ها بسیار مطلوب است. این موضوع به ویژه با توجه به شدت تغییرات - که در هر

کنترل، نسبت به انتخاب سیستم کنترل مناسب‌تری اقدام کرد.

۵- فهرست علائم

A_1	سطح مقطع جریان در ابتدای بازه پایین دست
A_N	سطح مقطع جریان در انتهای بازه بالادست
A'	متغیر منفرد فازی
A_i^L	مجموعه‌های فازی موجود در پایگاه قواعد سیستم کنترل فازی
A_i^J	مجموعه فازی تعریف شده در دامنه X_i
B^L	مجموعه‌های فازی موجود در پایگاه قواعد سیستم کنترل فازی
B'	مجموعه فازی خروجی موتور استنتاج کنترل کننده فازی
b	عرض دریچه
C_c	ضریب فشردگی
C_d	ضریب دبی
d_i	پارامترهای ثابت مثبت
GO	بازشدگی دریچه
g	شتاب ثقل
IAE	شاخص خطای مطلق تجمعی
M	تعداد قوانین موجود در پایگاه قواعد فازی
MAE	شاخص خطای مطلق حداکثر
n	شمارشگر تعداد متغیرهای ورودی به سیستم کنترل یا تعداد مجموعه های فازی در بخش آنگاه قواعد فازی
P	ارتفاع دراپ بعد از دریچه
SRT	شاخص زمان عکس‌العمل سیستم
T	طول دوره بهره‌برداری
V_1	سرعت جریان در ابتدای بازه پایین دست
V_N	سرعت جریان در انتهای بازه بالادست
w_i	ارتفاع مجموعه فازی I ام
x_i	متغیر ورودی

ورودی در الگوریتم کنترل از آنها استفاده می‌شود، کاهش داد. این سبب می‌شود که در کانال‌های آبیاری - که در آنها داده‌های جمع‌آوری شده از سطح شبکه به دلیل تأثیر عوامل فیزیکی، هیدرولیکی و ابزاری چندان دقیق نیستند - کنترل کننده فازی بتواند عملکرد مطلوبی را ارائه دهد.

۲- با در نظر گرفتن فیلترهای سرعت موتور، محدوده مجاز تغییر در بازشدگی دریچه و محدوده مجاز عمق برای مدل ریاضی این سیستم کنترل، می‌توان رفتار سیستم کنترل را در شرایط مختلف و وجود محدودیتهای گوناگون در اعمال تغییرات بازشدگی بر روی دریچه سازه تنظیم کننده، مورد آزمون قرار داد.

۳- با توجه به طبیعت غیرماندگار جریان در شبکه‌ها در تعامل با سیستم‌های کنترل جریان، استفاده از مدل‌های هیدرولیک در ارزیابی عملکرد آنها اجتناب ناپذیر است. ساختار مدل ICSS به نحوی طراحی شده که می‌توان شرایط مرزی و سیستم‌های کنترل مختلفی را با آن تلفیق کرد. از این رو می‌توان از این مدل برای تهیه مدل ریاضی سایر سیستم‌های کنترل جریان و بررسی عملکرد آنها استفاده کرد.

۴- آزمون و ارزیابی عملکرد سیستم کنترل فازی در کانال استاندارد شماره دو ASCE نشان می‌دهد که، عملکرد سیستم کنترل فازی تدوین شده مطلوب و مناسب است. با اطمینان از صحت عملکرد سیستم کنترل فازی توسعه یافته می‌توان از آن در کنترل کانال‌های آبیاری استفاده کرد.

۵- با توسعه مدل سیستم کنترل فازی می‌توان در مطالعات انواع سیستم‌های کنترل، عملکرد آن را با سایر سیستم‌های کنترلی مقایسه و ارزیابی کرد و در شبکه‌های آبیاری جدید یا در نوسازی شبکه‌های موجود برای اجرای سیستم‌های

منعم، م. ج. (۱۳۷۵). "معرفی مدل مشابه‌سازی شبکه‌های آبیاری و بهینه‌سازی بهره‌برداری از آنها"، هشتمین سمینار کمیته ملی آبیاری زهکشی.

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

Chang, F. and Chang, Y. (2006). Adaptive neuro-fuzzy inference system for prediction water level in reservoir, *Advances in Water Resources*, 29, pp. 1-10.

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, pp. 23-30.

Loof, R., Das, B., Paudyal, G.N. (1994). Improved operation of large irrigation canal system in Southeast Asia, *Water Resour. Dev.* 10(4), pp. 393-416.

Mallaterre, P. O., Rogers, D., and Schuurmans, J. (1998). Classification of canal control algorithms, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE. 124, pp. 1-12.

Monem, M. J. and Manz, D. H. (1994). Application of simulation techniques for improving the performance of irrigation conveyance systems, *I. J. of Water Resources Engineering*, 2, pp. 1-22

Voron, B. Bouillot, A. P. (1992). Development and application of the irrigation conveyance system simulation model. Cemagref-Iml International Workshop on the Application of mathematical Modeling for Improvement of Irrigation Canal Operation, Montpellier, France.

x^*	متغیر قطعی ورودی به الگوریتم کنترل
x_i^{-l}	مرکز مجموعه‌های فازی در دامنه تعریف متغیر x_i
y	خروجی سیستم فازی می‌باشد
Y_N	عمق جریان در بالادست دریچه
Y_1	عمق جریان در پایین‌دست دریچه
y^{-l}	مرکز مجموعه فازی خروجی I ام
y_t	عمق آب مشاهده شده در زمان t
Y_{target}	عمق آب هدف
a_i	انحراف معیار فازی سازگوسین
Δt	گام زمانی محاسباتی
$\mu_{A_i}(x)$	تابع تعلق
$\mu_{A_i}(x_i)$	میزان درجه عضویت متغیر x_i در مجموعه فازی A_i
σ_i^{-l}	انحراف معیار توابع تعلق گوسی در دامنه تعریف متغیر x_i

۶- منابع

تشنه‌لب، م. صفارپور، ن. افیونی، ا. (۱۳۷۸). "سیستم‌های فازی و کنترل فازی"، (تالیف: لی وانگ) چاپ دوم، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

غفاری، ع. (۱۳۷۷). "تفکر فازی"، (تالیف: کاسکو، بارت) چاپ اول، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

کیاپاشا، م. ص. (۱۳۸۵). "تدوین مدل ریاضی سیستم کنترل فازی در کانال‌های آبیاری"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد تاسیسات آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس تهران.