

مقاله پژوهشی

توسعه و ارزیابی مدل سیستم کنترل خودکار بالادست فازی در کانال‌های آبیاری

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

چکیده

محدودیت منابع آب در بخش کشاورزی و ضعف عملکرد شبکه‌های آبیاری، استفاده بهینه از منابع موجود را با بکارگیری فن آوری-های کنترلی مناسب‌تر ضروری می‌سازد. تئوری فازی یکی از روش‌هایی است که در دهه‌های اخیر برای حل مسائل مختلف کنترل در شاخه‌های گوناگون مهندسی به کار گرفته شده است. در این تحقیق با استفاده از تکنیک فازی، سیستم کنترلی برای تنظیم عمق آب در کانال‌های آبیاری تدوین شده و با استفاده از مدل هیدرودینامیک ICSS در کانال E1-R1 از شبکه دز عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای ارزیابی سیستم کنترل تدوین شده از نمودار تغییرات عمق و دبی در بالادست آب‌بندها و بازشدگی آنها در طول زمان بهره‌برداری و شاخص‌های خطای مطلق حداکثر، خطای مطلق تجمعی و سرعت عکس‌العمل سیستم استفاده شد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که متوسط و حداکثر انحراف عمق آب از عمق هدف برای آب‌بندها به ترتیب در محدوده ۰/۰۱۷ تا ۰/۱۴۳ درصد و ۰/۶۶۷ تا ۱/۲۲۲ درصد بوده است. همچنین میزان شاخص سرعت عکس‌العمل نشان داد که حداکثر زمان لازم برای تثبیت عمق جریان در محدوده یک درصدی عمق هدف ۶/۶ دقیقه می‌باشد. با در نظر گرفتن این مقادیر و با توجه به شدت میزان تغییرات آبیاری اعمال شده در کانال، عملکرد سیستم کنترل فازی تدوین شده مطلوب ارزیابی می‌شود

واژه‌های کلیدی: کنترل بالادست، سیستم کنترل فازی، کانال‌های آبیاری، مدل ریاضی، ICSS

ارجاع: منعم م و کیاپاشا م، ۱۳۸۸. توسعه و ارزیابی مدل سیستم کنترل خودکار بالادست فازی در کانال‌های آبیاری. مجله پژوهش آب ایران. ۳ (۴): ۵۰-۴۱

۱ - دانشیار گروه سازه‌های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس
 ۲ - دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سازه‌های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس
 * نویسنده مسئول: monem_mj@modares.ac.ir
 تاریخ دریافت: 1387/11/30 تاریخ پذیرش: 1388/06/15

مقدمه

محدودیت‌های روش‌های معمول کنترل را برطرف سازد. به کارگیری تئوری فازی برای کنترل دبی جریان در کانال، اولین بار در سال ۱۹۹۴ بر روی کانال T₂ در مراکش با طول ۹۳ کیلومتر انجام شده است (ورن و همکاران ۱۹۹۲). با توجه به اینکه هدف اصلی استفاده از سیستم‌های کنترل جریان در کانال‌های آبیاری تنظیم عمق آب است، لازم است با توجه به قابلیت‌های تئوری فازی ابزار مناسبی برای کاربرد آن در کنترل عمق آب در کانال توسعه یافته و عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گیرد.

ارزیابی عملکرد سیستم‌های کنترل در شبکه‌های آبیاری با استفاده از مدل‌های فیزیکی مستلزم صرف هزینه و وقت قابل توجه می‌باشد و باید برای این امر از مدل‌های هیدرودینامیک استفاده نمود. بنابراین تهیه مدل ریاضی سیستم‌های کنترل و سازه‌های مربوط بصورت تلفیقی با مدل‌های هیدرودینامیکی، نظیر مدل ICSS⁴ که توانایی شبیه‌سازی شرایط هیدرولیکی جریان را در شبکه‌های آبیاری دارد، ضروری است. در این تحقیق مدل ریاضی سیستم کنترل بالادست فازی تهیه شده و با مدل هیدرودینامیک ICSS تلفیق گردیده و عملکرد آن بر روی کانال EI-R1 از شبکه دز مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

مشخصات سیستم کنترل فازی 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 در سطح شبکه و تجزیه و تحلیل آنها طبق منطق کنترل سازه‌های موجود را تنظیم می‌نماید. ساختار اصلی هر سیستم کنترل بوسیله متغیرهای سیستم کنترل، ساختار ورودی و خروجی و نوع کنترل کننده مشخص می‌شود.

در هر سیستم کنترل سه نوع متغیر کنترل شونده (مورد کنترل)، اندازه‌گیری شونده (ورودی)، و خروجی عمل کنترل وجود دارد. با توجه به آنکه در شبکه‌های آبیاری غالباً هدف استفاده از سیستم کنترل تنظیم رقوم سطح آب می‌باشد، در

در دهه‌های اخیر با توجه به محدودیت‌های موجود در منابع آب و پایین بودن سطح عملکرد شبکه‌های آبیاری، بهبود عملکرد شبکه‌ها و بهره‌برداری بهینه از آنها با بکارگیری سیستم‌های کنترل خودکار مورد توجه محققان قرار گرفته است. سیستم‌های کنترل خودکار ابتدا برای کنترل موضعی بالادست به صورت هیدرولیکی مانند سازه آمیل (شرکت نیرتک، ۱۹۷۵) و یا به صورت سیستم‌های الکترومکانیکی تحت عناوین Little Man و Colvin (بایلسکی، ۱۹۷۰) بکار رفتند. با توجه به مشکل ناپایداری سیستم‌های الکترومکانیکی با استفاده از فیلترهای هیدرولیکی و الکترونیکی سامانه‌های HY-FLO¹ و EL-FLO² ابداع گردید (بایلسکی، ۱۹۷۹). سامانه‌های مذکور برای انعطاف پذیری بیشتر به عنوان سیستم کنترل پایین‌دست نیز مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین برای کنترل خودکار موضعی پایین دست سازه‌های هیدرولیکی AVIS و AVIO ابداع شد (شرکت نیرتک، ۱۹۷۵). با توسعه الکترونیک در دهه ۱۹۸۰ امکان ساخت سیستم‌های کنترل خودکار پایین‌دست سراسری ایجاد شد و انواع این سامانه‌ها از جمله سیستم CARDD³ (بورت، ۱۹۸۳) و سیستم BIVAL (چیوریو، ۱۹۸۷) ابداع شد. متعاقباً سیستم‌های کنترل دینامیک مرکزی نیز توسعه یافت (روجر، ۱۹۸۷) و متاتیا، (۱۹۸۷). در حال حاضر با توجه به برخی محدودیت‌های سیستم‌های کنترل موجود از جمله ناپایداری، پیچیدگی سیستم‌ها، و هزینه بالای آنها تحقیقات برای ابداع سامانه‌های کنترل موثرتر، با پیچیدگی و هزینه کمتر ادامه دارد (مالتری، ۱۹۹۸). امروزه استفاده از تئوری فازی در حل انواع مسائل پیچیده مهندسی، به خصوص مسائل کنترل به صورت امری رایج در آمده است (چانگ و همکاران، ۲۰۰۶). روش‌های معمول کنترل در کانال‌های آبیاری دارای محدودیت‌هایی نظیر احتیاج به امکانات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری پیچیده، خطا در جمع‌آوری داده‌ها از سطح شبکه و برآورد زمان انتقال امواج، میزان دبی جریان و تقاضا می‌باشند. تئوری فازی می‌تواند بخش عمده‌ای از

¹ - Hydraulic Filter level Offset

² - Electronic Filter level Offset

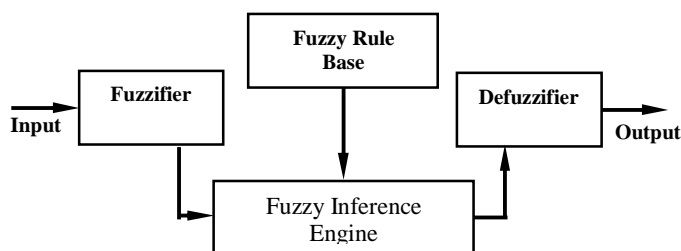
³ - Canal Automatic Response Distance Delivery

⁴ - Irrigation Conveyance System Simulation

کنترل دقیق بوده و خطا در جمع‌آوری آنها کم باشد، از فازی‌ساز منفرد استفاده می‌شود. این فازی‌ساز توانایی حذف اغتشاش موجود در داده‌های ورودی را ندارد ولی سبب ساده سازی روند محاسبات در موتور استنتاج می‌گردد. زمانی که خطا و اغتشاش در متغیرهای ورودی زیاد باشد، در کنترل کننده از فازی‌ساز گوسی استفاده می‌شود. این فازی‌ساز توانایی کاهش اغتشاش موجود در داده‌های ورودی را دارد.

در تئوری فازی انواع مختلفی از موتورهای استنتاج با خواص گوناگون وجود دارد. یکی از انواع موتورهای استنتاج که در سیستم‌های فازی به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرد موتور استنتاج حاصلضرب^۶ می‌باشد. این موتور استنتاج یکی از کاربردی‌ترین موتورهای استنتاج در سیستم‌های فازی بوده و مهمترین مزیت آن سهولت محاسباتی آن می‌باشد که در این تحقیق از آن استفاده شده است (تشنه لب و همکاران ۱۳۷۸).

غیرفازی‌سازها نگاشت‌هایی می‌باشند که مجموعه فازی خروجی موتور استنتاج کنترل کننده فازی را به یک مقدار قطعی می‌نگارند. در این تحقیق از غیرفازی‌ساز میانگین مراکز که یکی از رایج ترین غیرفازی‌ساز مورد استفاده در سیستم‌های فازی می‌باشد، استفاده شده است. شکل ۱ ساختار سیستم کنترل فازی توسعه یافته در این تحقیق را نشان می‌دهد



شکل ۱- ساختار سیستم کنترل فازی توسعه یافته شده در تحقیق حاضر (تشنه لب و همکاران 1378)

استخراج پایگاه قواعد فازی

پایگاه قواعد فازی بخش اصلی کنترل کننده فازی می‌باشد که دستورهای خروجی از کنترل کننده بوسیله آن تولید می‌شود. برای استخراج پایگاه قواعد دو روش وجود دارد. در روش اول با استفاده از مدل فیزیکی مجهز به سیستم کنترل فازی، به ازای تنظیم دبی‌های مختلف و عمق‌های متفاوت

سیستم کنترل توسعه یافته عمق جریان در بالادست سازه تنظیم به عنوان متغیر مورد کنترل در نظر گرفته شد. تنظیم عمق جریان در کانال‌های آبیاری نیازمند آگاهی از وضع موجود عمق آب و میزان تنظیم سازه کنترل است. بنابراین دو متغیر رقوم سطح آب و بازشدگی دریچه تنظیم-کننده به عنوان متغیرهای مورد اندازه‌گیری انتخاب شدند. در شبکه‌های آبیاری معمولاً پس از مشاهده عمق موجود و میزان بازشدگی دریچه‌های آب‌بند با تنظیم دریچه، عمق جریان کنترل می‌شود. لذا در سیستم کنترل فازی ایجاد شده میزان تغییر در بازشدگی دریچه به عنوان متغیر خروجی عمل کنترل در نظر گرفته شده است. این متغیر با توجه به مقدار متغیرهای اندازه‌گیری شده (رقوم سطح آب موجود و بازشدگی موجود دریچه) توسط الگوریتم کنترل فازی به نحوی تعیین می‌شود که متغیر موردکنترل (رقوم سطح آب در کانال) را در رقوم هدف تثبیت نماید. همچنین ساختار ورودی و خروجی این سیستم کنترل با دو متغیر ورودی و یک متغیر خروجی عمل کنترل به صورت $2ISO^1$ می‌باشد. در کنترل کننده فازی تهیه شده نوع سیستم کنترل، به علت نزدیکی موقعیت کنترل رقوم سطح آب به سازه تنظیم کننده جریان، از نوع پس‌خورد^۲ در نظر گرفته شده است.

ساختار کنترل کننده فازی

ساختار سیستم‌های کنترل فازی توسعه یافته در این تحقیق مانند سایر سیستم‌های کنترل فازی که در کاربردهای مهندسی از آنها استفاده می‌شود دارای سه بخش اصلی شامل فازی‌ساز ورودی^۳، موتور استنتاج^۴ و غیرفازی‌ساز^۵ خروجی می‌باشد.

یک فازی‌ساز نگاشتی است که مقادیر قطعی متغیرهای ورودی را به مجموعه‌های فازی تبدیل می‌نماید. سیستم کنترل فازی توسعه یافته در این تحقیق بنحوی طراحی شده است که از دو نوع فازی‌ساز منفرد و گوسی استفاده می‌نماید. چنانچه مقادیر متغیرهای ورودی به الگوریتم

¹ - 2 Input single output

² - Feed back

³ - Fuzzifier

⁴ - Inference engine

⁵ - Defuzzifier

⁶ - Product

فازی B_j^i باشد، آنگاه میزان تغییر در بازشدگی دریچه (y) باید مجموعه فازی C_j^i در نظر گرفته شود تا عمق آب بالادست تنظیم‌کننده به عمق هدف برسد.

روابط کنترلی سیستم کنترل فازی

روابط کنترلی در کنترل‌کننده فازی با ادغام نگاشت‌های فازی ساز ورودی، موتور استنتاج و غیر فازی ساز خروجی استخراج می‌گردد. برای استخراج روابط کنترلی دو حالت در نظر گرفته می‌شود. روابط کنترلی در حالت اول برای مواقعی استخراج می‌شود که داده‌های ورودی فاقد اغتشاش باشد. استخراج رابطه کنترلی در این حالت با استفاده از رابطه نگاشت فازی ساز منفرد، موتور استنتاج حاصلضرب، غیر-فازی ساز میانگین مراکز و ادغام این نگاشت‌ها در هم انجام می‌شود. رابطه کنترلی حاصله در این حالت به صورت معادله ۱ می‌باشد:

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

که در آن: x_i متغیر ورودی، A_i^l مجموعه فازی تعریف شده در دامنه x_i ، $m_{A_i^l}(x_i)$ میزان 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 می‌شود که داده‌های 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 نمودن این نگاشت‌ها در هم انجام شده و رابطه کنترلی حاصله در این حالت به صورت معادله ۲ تعریف می‌شود:

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

جریان در کانال، میزان تغییر در بازشدگی دریچه سازه به گونه‌ای تعیین می‌شود که عمق جریان در عمق هدف تثبیت گردد. در روش دوم با استفاده از مدل ریاضی و شبیه سازی جریان پایگاه قواعد فازی استخراج می‌گردد. استفاده از روش دوم کم هزینه بوده و در زمانی کوتاه انجام می‌شود. لذا در این تحقیق از روش دوم برای استخراج پایگاه قواعد فازی استفاده شده است

مراحل طی شده برای استخراج پایگاه قواعد فازی به این شرح می‌باشد: متغیر ورودی اول که بازشدگی دریچه است در دامنه حداقل و حداکثر بازشدگی به ۱۰ مجموعه فازی تقسیم شده است. دومین متغیر ورودی اختلاف رقوم سطح آب با رقوم هدف است که به دلیل مثبت و منفی بودن آن علاوه بر یک مجموعه به مرکز صفر به چهار مجموعه مثبت، و چهار مجموعه منفی، جمعا نه مجموعه در محدوده محتمل تقسیم شده است. مدل ریاضی کانال و سازه آب بند با امکان بهره برداری دستی تهیه شده است. باز شدگی اولیه دریچه در هریک از مراکز مجموعه های ده گانه تنظیم شده است. با تنظیم جریان در کانال عمق آب در بالادست سازه در عمق هدف تنظیم شده است. سپس با اعمال چهار تغییر افزایشی و چهار تغییر کاهشی در بازشدگی دریچه، میزان تغییر حاصله در رقوم سطح جریان در محدوده دامنه متغیر دوم ثبت شده است. این فرایند برای هر یک از ده مرکز مجموعه‌های باز شدگی دریچه تکرار شده است. بدین ترتیب برای ده مجموعه متغیر اول با اعمال نه تغییر در میزان بازشدگی که نشان دهنده متغیر مورد نظر در بخش آنگاه قواعد فازی است، نه مجموعه فازی در دامنه متغیر ورودی دوم استخراج می‌گردد، که مجموعاً ۹۰ قاعده فازی استخراج شده است. قوانین موجود در پایگاه قواعد سیستم کنترل تدوین شده با توجه به متغیرهای ورودی و خروجی به صورت زیر به دست آمده است:

Ru^L : اگر x_1 (باز شدگی دریچه سازه تنظیم) A^i و x_2 (اختلاف رقوم آب از رقوم هدف) B^j باشد، آنگاه y (میزان تغییر در بازشدگی دریچه سازه تنظیم‌کننده) برابر C_j^i است. این قانون بیان می‌نماید که اگر بازشدگی کنونی دریچه سازه تنظیم آب در کانال (X_1) ، مجموعه فازی A^i باشد و همچنین اختلاف رقوم سطح آب از رقوم هدف در محل تنظیم عمق جریان در بالادست تنظیم‌کننده (X_2) ، مجموعه

توسعه مدل ریاضی سیستم کنترل فازی

با توجه به روابط هیدرولیکی و کنترلی ذکر شده در این تحقیق، مدل ریاضی سیستم کنترل از بالادست فازی برای کنترل دریچه کشویی، به عنوان یک شرط مرزی به زبان فرترن برنامه نویسی شده و با مدل ICSS تلفیق گردیده است (کیا پاشا ۱۳۸۵). این مدل ریاضی برای انجام محاسبات هیدرولیکی دارای یک بخش اصلی و چهار زیر برنامه می-باشد که این زیر برنامه ها محاسبات جریان ماندگار، عملیات بهره برداری، شبیه سازی جریان غیر ماندگار و به روز رسانی پارامترهای محاسبه شده را در هر گام زمانی انجام می دهند. محاسبات جریان ماندگار از سازه انتهایی کانال و با یک دبی معین شروع می شود. پس از رسیدن به شرط مرزی سازه مجهز به سیستم کنترل فازی، با استفاده از روابط هیدرولیکی سازه و دبی اولیه جریان در کانال میزان بازشدگی اولیه دریچه و عمق جریان در بالادست آن محاسبه می گردد. بدین ترتیب شرایط انجام محاسبات جریان ماندگار در بازه های بالادست فراهم گشته و انجام محاسبات به سمت سراب کانال ادامه می یابد.

عملیات بهره برداری خودکار، در هر گام زمانی از محاسبات جریان غیر ماندگار با اجرای زیر برنامه بهره برداری و با استفاده از روابط کنترلی سیستم کنترل فازی انجام می شود. در سیستم کنترل فازی تهیه شده با توجه به شرایط موجود می توان از سه نوع فیلتر محدوده مجاز عمق، محدوده مجاز تغییر در بازشدگی دریچه و سرعت موتور استفاده نمود. محدوده مجاز عمق، محدوده ای است حول عمق هدف، که توسط کاربر تعیین شده و چنانچه عمق قرائت شده در بالا-دست تنظیم کننده در درون این محدوده قرار گیرد، هیچ عمل کنترلی، توسط سیستم کنترل اعمال نخواهد شد و بدین ترتیب از اعمال بهره برداری های اضافی جلوگیری می-شود. محدوده مجاز تغییر در بازشدگی دریچه، محدوده ای می باشد که چنانچه مقدار تغییر در بازشدگی محاسبه شده توسط الگوریتم کنترل از میزان این محدوده کوچکتر باشد، تغییری در بازشدگی دریچه داده نمی شود. بنابراین با عدم اعمال تغییرات کم در بازشدگی دریچه، از عملکرد مکرر آن جلوگیری شده و پایداری بهتری برای عملکرد سیستم کنترل تامین می گردد. در فیلتر سرعت موتور چنانچه میزان تغییر در بازشدگی دریچه سازه تنظیم کننده که توسط

که در آن \bar{x}_i مرکز مجموعه های فازی در دامنه تعریف متغیر x_i ، a_i انحراف معیار فازی ساز گوسی، S_i انحراف معیار توابع عضویت گوسی در دامنه تعریف متغیر x_i و سایر پارامترها قبلا تعریف شده اند.

روابط هیدرولیکی سیستم کنترل فازی

سیستم کنترل فازی تهیه شده بر روی هر نوع سازه آب بند در کانال های آبیاری قابل اعمال می باشد. در این تحقیق سیستم کنترل بر روی دریچه کشویی مستطیلی اعمال شده است و لذا از روابط هیدرولیکی این سازه استفاده می شود. برای محاسبه دبی عبوری از سازه چهار حالت هیدرولیکی جریان روزنه آزاد و مستغرق و سرریز آزاد و مستغرق در نظر گرفته شده است. به عنوان نمونه رابطه هیدرولیکی دبی عبوری از دریچه کشویی در حالت جریان مستغرق بصورت معادله ۳ تعریف شده است:

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

که در این رابطه Y_N عمق جریان در بالادست دریچه، Y_1 عمق جریان در پایین دست دریچه، b عرض دریچه، GO بازشدگی دریچه، C_d ضریب دبی و g شتاب ثقل می باشد.

معرفی مدل ICSS

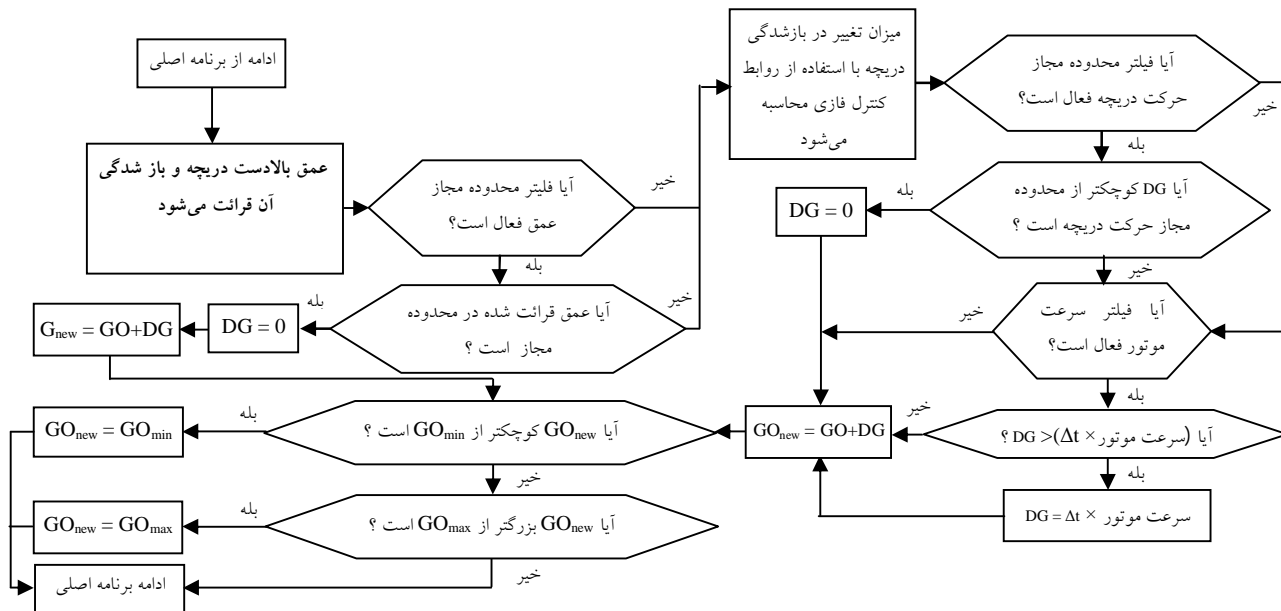
مدل ICSS که توانایی شبیه سازی تمامی مشخصات مهم هیدرولیکی و بهره برداری شناخته شده و مورد نیاز در کانال های آبیاری را دارا می باشد، توسط مانز در سال ۱۹۹۰ تهیه گردید. صحت عملکرد این مدل با استفاده از داده های دقیق آزمایشگاهی گردآوری شده توسط ترسک^۱ مورد بررسی و تایید قرار گرفته است و به تایید انجمن مهندسين عمران کانادا رسیده است (منعم و همکاران ۱۹۹۴). در این مدل امکان شبیه سازی طیف قابل توجهی از سازه های آبی وجود دارد که هر کدام به صورت یک شرط مرزی (BC^2) در نظر گرفته می شوند.

¹ - Tresk

² - Boundary Condition

شود. بدین ترتیب سرعت تنظیم دریچه در سیستم کنترل، در محدوده حداکثر سرعت کنترل می‌شود. شکل ۲ فرایند استخراج میزان تغییر در بازشدگی دریچه (DG) را در این زیربرنامه نشان می‌دهد.

الگوریتم کنترل محاسبه می‌شود، از حاصلضرب سرعت موتور در گام زمانی بین بهره‌برداری‌ها بیشتر باشد، میزان تغییر در بازشدگی دریچه برابر با مقدار حاصلضرب سرعت موتور در بازه زمانی بین بهره‌برداری‌ها در نظر گرفته می‌-



شکل ۲- نمودار گردش عملیات بهره برداری خودکار در سیستم کنترل بالادست فازی

دست محاسبه می‌شود. سپس روابط جریان غیرماندگار در یک گام زمانی (Δt) برای کل کانال به اضافه شرایط مرزی حل می‌شود. پس از محاسبه مقادیر عمق و سرعت در تمام گره‌های کانال مقادیر عمق، دبی و سایر عوامل مرتبط برای انجام محاسبات جریان غیرماندگار در گام زمانی بعدی در ماتریس شرایط مرزی مربوط به سازه تنظیم‌کننده جریان که سیستم کنترل فازی بر روی آن اعمال شده است، توسط زیر برنامه به روز رسانی^۱، به روز می‌شود

برای انجام محاسبات جریان غیرماندگار، علاوه بر روابط منفصل شده سنت و نانت در طول کانال به روابط شرایط مرزی ابتدا و انتهای هر بازه به صورت GO و FN و مشتقات آنها نسبت به عمق و سرعت در بالادست و پایین دست دریچه نیاز می‌باشد. به عنوان نمونه این روابط در حالت جریان دریچه مستغرق به صورت روابط ۴ و ۵ تعریف شده است:

$$G_o : A_1 V_1 - A_N \cdot V_N = 0 \quad (4)$$

$$F_N : A_1 \cdot V_1 - C_d \cdot b \cdot GO \cdot \sqrt{2g(Y_N - Y_1)} = 0 \quad (5)$$

که در این روابط، A سطح مقطع جریان، V سرعت جریان، Y عمق آب، اندیس ۱ و N به ترتیب مشخصه ابتدای بازه پایین دست و انتهای بازه بالادست، C_d ضریب فشردگی دریچه، b عرض دریچه، و GO بازشدگی دریچه می‌باشد.

در این محاسبات در هر گام زمانی ابتدا مشتقات معادلات شرایط مرزی نسبت به عمق و سرعت بالادست و پایین

معیارهای ارزیابی سیستم‌های کنترل

در این تحقیق برای ارزیابی عملکرد سیستم کنترل فازی از معیارهای ارائه شده توسط ASCE و منعم و همکاران استفاده شده است که شامل معیارهای خطای مطلق حداکثر^۲، خطای مطلق تجمعی^۳ و زمان عکس‌العمل

^۱ - Updating

^۲ - Maximum Absolute Error

^۳ - Integral of Absolute Magnitude of Error

ریاضی کانال E1-R1 چهار بازه اولیه آن انتخاب شده است. طول این ۴ بازه ۲۸۳۰ متر می‌باشد. این بخش از کانال دارای سه سازه آب‌بند بوده که در بالادست هر یک از این سازه‌ها دو آبگیر در طرفین کانال قرار دارد. به منظور بررسی عملکرد سیستم کنترل تدوین شده مدل ریاضی این کانال که شامل مشخصات کامل فیزیکی، شرایط مرزی و ویژگی‌های هیدرولیکی کانال در قالب فایل داده‌های ورودی به مدل ICSS تنظیم شده و دو سازه آب‌بند اول کانال، مجهز به سیستم کنترل خودکار فازی شده‌اند. در سراب کانال نیز از یک مخزن برای پاسخگویی به نیاز پایین دست استفاده شده است. در این بررسی یک گزینه با تغییرات همزمان جریان در سراب کانال و آبگیرهای آن به صورت سراسری در نظر گرفته شد. در این گزینه دبی ورودی به کانال و هر شش آبگیر آن در طول دوره بهره‌برداری ابتدا با اعمال دو تغییر افزایشی ۵۰ درصدی افزایش می‌یابد و سپس با اعمال دو تغییر کاهش، به دبی اولیه در شروع شبیه سازی باز می‌گردد. جدول ۲ تغییرات جریان را در طول دوره بهره‌برداری در این گزینه نشان می‌دهد

سیستم^۱ می‌باشند (منعم و همکار ۱۳۸۲) و (کلمن و همکاران، ۱۹۹۸). معیار خطای مطلق حداکثر برای اندازه‌گیری حداکثر انحراف عمق آب از عمق هدف بصورت معادله ۶ ارائه شده است.

$$MAE = \frac{\max |y_t - y_{target}|}{y_{target}} \quad (6)$$

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

معیار خطای مطلق تجمعی نشان‌دهنده میانگین انحرافات عمق آب از عمق هدف در طول دوره بهره‌برداری می‌باشد و به صورت معادله ۷ تعریف می‌شود:

$$IAE = \frac{\sum_{t=0}^T |y_t - y_{target}| \Delta t}{y_{target}} \quad (7)$$

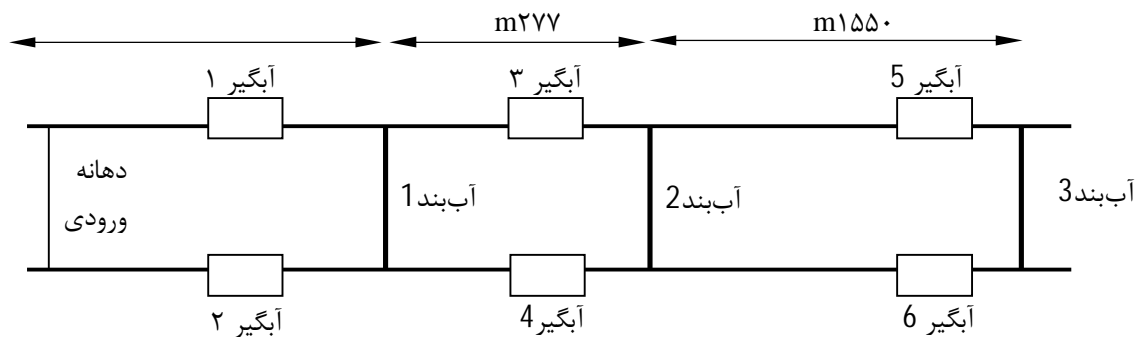
که در آن Δt گام زمانی محاسباتی و T طول دوره بهره‌برداری می‌باشد.

معیار زمان عکس‌العمل سیستم عبارت است از فاصله زمانی بین خارج شدن سطح آب از محدوده مجاز عمق، تا زمانی که سطح آب مجدداً به این محدوده باز می‌گردد و در این محدوده تثبیت می‌شود. محدوده مجاز عمق، محدوده‌ای است پیرامون عمق هدف به میزان $(1 \pm 0.5X) \times y_{target}$ که مقدار X در آن توسط کاربر تعریف می‌شود. هر چه مقدار این معیار برای یک سیستم کمتر باشد، عمق آب در حین عملیات بهره‌برداری سریعتر در محدوده مجاز تثبیت می‌گردد.

آزمون و ارزیابی عملکرد سیستم کنترل فازی

در این تحقیق از کانال E1-R1 از شبکه دز برای آزمون و ارزیابی عملکرد سیستم کنترل فازی استفاده شده است. کانال E1-R1 یکی از کانال‌های درجه دو شبکه دز با مقطع دوزنقه ای و پوشش بتنی می‌باشد که ضریب زبری مانینگ آن در طول مسیر ۰/۰۱۷ گزارش شده است. شکل ۱ شمای کلی کانال E1R1 و جدول ۱ مشخصات بازه‌های کانال E1-R1 و سازه‌های مربوط را نشان می‌دهد. برای تهیه مدل-

¹ - System Response Time



شکل ۳- شمای کلی کانال E1R1 و سازه‌های مربوط

جدول ۱- مشخصات کانال E1-R1 از شبکه آبیاری دز

سازه‌های پائین دست	سازه بالادست	عرض کف (M)	شیب طولی کف	رقوم پائین دست (M)	رقوم بالادست (M)	طول بازه (M)	بازه
۱- آبگیر سمت راست ۱							
۲- آبگیر سمت چپ ۲	ورودی با کنترل دبی	۱/۵	۰/۰۰۰۱۲	۱۴۹/۸۷۱۰	۱۵۰/۰۰۰۰	۱۰۷۵	۱
۳- سازه تنظیم کننده ۱							
۱- آبگیر سمت راست ۳							
۲- آبگیر سمت چپ ۴	سازه تنظیم کننده ۱	۱	۰/۰۰۰۱۲	۱۴۹/۸۳۸۵	۱۴۹/۸۷۱۰	۲۷۵	۲
۳- سازه تنظیم کننده ۲							
۱- سیفون معکوس	سازه تنظیم کننده ۲	۱	۰/۰۰۰۲۱	۱۴۹/۵۳۰۰	۱۴۹/۸۴۰۰	۴۳۲	۳
۱- آبگیر سمت راست ۵							
۲- آبگیر سمت چپ ۶	سیفون معکوس	۱	۰/۰۰۰۲۱	۱۴۸/۹۵۰۰	۱۴۹/۵۳۰۰	۸۱۷	۴
۳- سازه تنظیم کننده ۳							

جدول ۲- تغییرات دبی ورودی در سراب کانال E1-R1

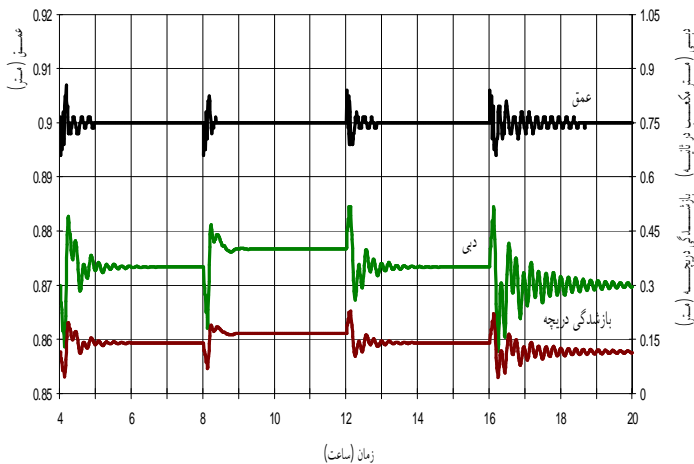
۲۰-۱۶	۱۶-۱۲	۱۲-۸	۸-۴	۴-۰	زمان (ساعت)
۰/۳۰۰	۰/۴۵۰	۰/۶۰۰	۰/۴۵۰	۰/۳۰۰	دبی ورودی به کانال در سراب (m ³ /s)
۰/۰۰۰	۰/۰۲۵	۰/۰۵۰	۰/۰۲۵	۰/۰۰۰	دبی آبگیرهای جانبی (m ³ /s)

نتایج

با بررسی مقادیر معیارها و نمودارهای تغییرات عمق، دبی و بازشدگی در پیچه سازه‌های آببند می‌توان به نکات زیر دست یافت:

۱- از آنجا که تغییرات آبیاری از کانال توسط آبگیرهای آن و بصورت یکنواخت در کل طول کانال انجام

پس از اجرای این گزینه نتایج عملکرد سیستم کنترل فازی بصورت معیارهای ارزیابی عملکرد سیستم‌های کنترل محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین تغییرات عمق در بالادست سازه‌های آببند، تغییر دبی عبوری از این سازه‌ها و تغییرات بازشدگی در پیچه آنها در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است



شکل ۵ - تغییرات عمق و دبی بالادست آببند دو و بازشدگی آن

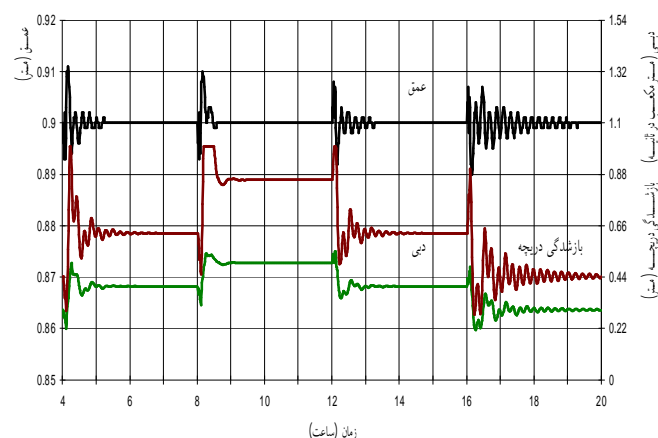
۲- با تثبیت عمق جریان در عمق هدف و تغییرات جزئی آن در طول دوره بهره‌برداری، سرعت حرکت امواج کاهشی و افزایشی در طول دوره بهره‌برداری در بازه بین آببند اول و دوم تقریباً ثابت می‌باشد. با توجه به آنکه در تغییر کاهشی دوم دبی کانال به پایین‌ترین حد ممکن می‌رسد، سرعت جریان در کانال کمترین حد خود را دارد. لذا مدت زمان انتقال امواج مثبت و منفی ایجاد شده در اثر عملکرد سازه آببند دوم به بالادست در این تغییر بیشتر می‌باشد. همچنین زمان لازم برای رسیدن امواج مثبت و منفی ایجاد شده ناشی از عملکرد سازه آببند اول به سازه آببند دوم نیز طولانی‌تر می‌گردد. بنابراین، در این تغییر نوسانات عمق آب در محدوده زمانی طولانی‌تری تثبیت می‌شود.

۳- مقادیر حداکثر شاخص‌های MAE و IAE به ترتیب ۱/۲۲ درصد و ۰/۱۴ درصد می‌باشد. این مقادیر نشان دهنده آن است که میزان حداکثر و میانگین انحرافات عمق جریان از عمق هدف به ترتیب معادل ۱/۲۲ سانتی‌متر و ۰/۱۳ سانتی‌متر است. همچنین مقدار حداکثر شاخص SRT در سطح یک درصد نیز به میزان ۶/۶ دقیقه بدست آمده است. با توجه به مقادیر محاسبه شده و همچنین تغییرات جریان ورودی به کانال که با افزایش و کاهش ۵۰ درصدی روبرو است و نیز تغییرات شدید و همزمان کاهشی و افزایشی آبیگری از کانال بصورت سراسری، می‌توان به این نتیجه رسید که، عملکرد سیستم کنترل فازی در حالت کنترل جریان از بالادست از لحاظ کاربردی مناسب می‌باشد.

می‌شود، انتظار می‌رود عکس‌العمل سازه‌های آببند در برابر این تغییرات یکسان باشد. ولی به دلیل ترکیب شدن اثر این تغییرات با تغییرات دبی ورودی به کانال و همچنین نزدیک بودن آببند اول به سراب کانال، شدت تغییرات جریان در بالادست این سازه نسبت به آببند دوم بیشتر می‌باشد. نمودارهای تغییرات عمق جریان در بالادست آببندها و مقادیر معیارهای MAE، IAE و SRT نیز گویای این مطلب می‌باشند.

جدول ۳ - مقادیر معیارهای ارزیابی عملکرد سازه‌ها

زمان	معیار	آببند یک	آببند دو
4-8	MAE (%)	1/2222	0/7778
	IAE (%)	0/0697	0/0331
8-12	SRT _{1%} (hour)	0/1000	0/0200
	MAE (%)	1/1111	0/6667
12-16	IAE (%)	0/0494	0/0172
	SRT _{1%} (hour)	0/1100	0/0200
16-20	MAE (%)	0/8889	0/6667
	IAE (%)	0/0519	0/0281
	SRT _{1%} (hour)	0/0400	0/0100
	MAE (%)	1/1111	0/6667
	IAE (%)	0/1431	0/0806
	SRT _{1%} (hour)	0/0900	0/0400



شکل ۴ - تغییرات عمق و دبی بالادست آببند یک و بازشدگی آن

- Dissertation. College of Eng. Utah State University. Logan, UT. USA.
- 5- Buyalski C.P. 1970. Basic Equipments in Automatic Delivery Systems, A paper presented at the National Irrigation Symposium, Irrigation Today and Tomorrow, Lincoln, Nebraska, Nov. 10-13.
 - 6- Buyalski C.P. and Serpozo E.A. 1979. Electronic Filter Level Offset (EL-FLO) Plus Reset Equipment for Automatic Control of Canals. REC-ERC 79-3 Engineering and Research Centre. USBR. Denver. Colorado. USA.
 - 7- Chang F. and Chang Y. 2006. Adaptive neuro-fuzzy inference system for prediction water level in reservoir. *Advances in Water Resources*. 29:1-10.
 - 8- Chevereau G. and Benzeth S.S. 1987. Bival System for Downstream Control, Planning, Operation, Rehabilitation, and Automation of Irrigation Water Delivery Systems, Proceedings of a Symposium. ASCE. Portland. Oregon.
 - 9- 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
 - 10- Malaterre P. O. Rogers D. and Schuurmans J. 1998. Classification of canal control algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE. 124:1-12
 - 11- Mattaei A. 1987. Corning Canal and Red Bluff Diversion Dam Microprocessor Controller. Report Bureau of Reclamation Willows California. March 1987.
 - 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*. 2:1-22
 - 13- Neyrtec Co.a. 1975. Amil Gates Constant Upstream Level Control in Reserviors and Canals, Catalog Publication no. A650182A. France.
 - 14- Neyrtec Co.b. 1975. Avio and Avis Gates Constant Downstream Level Control in Basins and Canals. Catalog Publication no. A6502A. France.
 - 15- Rogier D. and Coeuuret C. 1987. Dynamic Regulation on the Canal De Provence, Planning, Operation, Rehabilitation, and Automation of Irrigation Water Delivery Systems, Proceedings of a Symposium, ASCE., Portland, Oregon, July 28-30. Pp. 180-200.
 - 16- Voron B. and Bouillot A.P. 1992 Application of the fuzzy set theory to the control of a large canal. American Society of Civil Engineers Meeting Aix-en – province.

نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱- آزمون و ارزیابی سیستم کنترل فازی بالادست به صورت سراسری در کانال E1-R1 شبکه دز و معیارهای بدست آمده نشانگر عملکرد مناسب و مطلوب این سیستم کنترل می‌باشد. بنابراین با بررسی‌های بیشتر برای توسعه کاربردی این سیستم کنترل، می‌توان از آن در شبیه‌سازی‌های عملی استفاده نمود.

۲- در شبکه‌های آبیاری داده‌های جمع‌آوری شده از سطح شبکه به دلیل تاثیر عوامل فیزیکی، هیدرولیکی و ابزاری با خطا توأم می‌باشد. از این رو با استفاده از تئوری فازی می‌توان میزان اثر خطا را در داده‌های جمع‌آوری شده از سطح شبکه که به عنوان داده ورودی در الگوریتم کنترل از آنها استفاده می‌شود، کاهش داد.

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

منابع

- ۱- تشنه‌لب م. صفارپور ن. و افیونی ا. ۱۳۷۸. سیستم‌های فازی و کنترل فازی. (تالیف: لی وانگ) چاپ سوم، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. ۵۲۶ صفحه.
- ۲- کیاپاشا م. ۱۳۸۵. تدوین مدل ریاضی سیستم کنترل فازی در کانال‌های آبیاری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد تاسیسات آبیاری. دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس تهران. ۱۵۲ صفحه.
- ۳- منعم م. و مساح ع. ۱۳۸۲. تهیه مدل ریاضی سازه هیدرولیکی آمیل. چهارمین کنفرانس هیدرولیک ایران، شیراز. ۲۴۷-۲۳۹.
- 4- Burt C.M. 1983. Regulating of Sloping Canals by Automatic Downstream Control, Ph.D.