

ارزیابی و مقایسه کارکرد سامانه کنترل خودکار فازی با دو نوع پایگاه قواعد برای سرریز لولایی

رضا نورسته^۱، محمد جواد منعم^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس

* تهران، صندوق پستی ۴۸۳۸-۱۴۱۵۵

Monem_mj@modares.ac.ir

چکیده- محدود بودن منابع آب و ضعف عملکرد شبکه‌های آبیاری، استفاده بهینه از منابع موجود را با به‌کارگیری فناوری‌های کنترلی مناسب‌تر ضروری می‌سازد. الگوریتم‌های مختلفی برای کنترل خودکار سطح آب در کانال‌های آبیاری به‌کار رفته که با محدودیت‌هایی روبرو هستند. منطق فازی می‌تواند بخشی از محدودیت‌های موجود را برطرف سازد. با وجود کاربرد موفق منطق فازی در شاخه‌های گوناگون مهندسی، این روش تاکنون برای کنترل سطح آب در کانال‌های آبیاری استفاده نشده است. سامانه کنترل خودکار سرریز لولایی در مقیاس آزمایشگاهی ساخته و عملکرد آن در شرایط تغییر بزرگ جریان ارزیابی شد. یکی از اجزای اصلی منطق فازی پایگاه قواعد است. در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق از دو نوع پایگاه قواعد استفاده و نتایج آنها مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط تغییر بزرگ جریان (۴۰۰ درصد)، مقادیر شاخص‌های خطای مطلق حداکثر و خطای مطلق تجمعی به‌ترتیب در محدوده ۶/۹ تا ۹/۲ و ۰/۷۹ تا ۱/۱۷ درصد بوده و این انحراف با گذشت زمان کوتاهی (کمتر از ۲ دقیقه) در محدوده مجاز تثبیت شده است. با به‌کارگیری پایگاه قواعد نوع دوم، پایداری سامانه بهتر و نوسان سطح آب و تغییر ارتفاع سرریز کمتر می‌شود. با در نظر گرفتن این مقادیر و با توجه به مقدار تغییر دبی، عملکرد سامانه کنترل خودکار فازی ساخته شده در کنترل سطح آب مطلوب ارزیابی می‌شود.

کلیدواژگان: سیستم کنترل فازی، کانال‌های آبیاری، سرریز لولایی، سامانه کنترل خودکار.

۱- مقدمه

بهره‌برداری، کاهش اتلاف آب در سیستم‌های انتقال و توزیع، تأمین انعطاف‌پذیری بالاتر و بهبود روش‌های تحویل و توزیع، استفاده از سامانه‌های کنترل خودکار در شبکه‌های آبیاری، به‌عنوان راه‌حل مهم و مؤثری در بین کارشناسان آبیاری مطرح شده است (Stam, 1973).

عملکرد ضعیف شبکه‌های آبیاری و در نتیجه کاهش بهره‌وری آب در بخش کشاورزی، ارائه روش‌های مؤثر بهره‌برداری مناسب از شبکه‌های آبیاری را ضروری کرده است (Gomez et al., 2002). به‌منظور افزایش کارایی

می‌شود. مدل ریاضی سیستم کنترل فازی دریچه کشویی برای کنترل سطح جریان در کانال‌ها توسط منعم و کیاپاشا تهیه و با مدل^۱ ICSS تلفیق شده است (منعم و کیاپاشا ۱۳۸۸). بررسی سوابق مدل‌های فیزیکی و سیستم‌های کنترل کانال‌های آبیاری نشان می‌دهد که تاکنون از کنترل فازی در کنترل سطح آب کانال‌های آبیاری استفاده شده است. با توجه به اینکه هدف اصلی در استفاده از سیستم‌های کنترل جریان کانال‌های آبیاری تنظیم عمق آب است و با توجه به گستردگی کاربرد موفق کنترل فازی در بسیاری از مسائل مهندسی، در این تحقیق از دو نوع پایگاه قواعد فازی^۲ استفاده شده است.

وظیفه سامانه کنترل خودکار کانال، کنترل و بازگرداندن کمیتی خاص از جریان به مقدار ایده‌آل آن است. معمولاً به دلیل سادگی اندازه‌گیری سطح آب، این پارامتر به‌عنوان متغیر کنترل شونده در کانال‌های آبیاری در نظر گرفته می‌شود (Malaterre et al., 1998). بر طبق روابط هیدرولیکی حاکم بر سازه‌های روگذر، تغییر ارتفاع آب با تغییر دبی در این سازه‌ها به مراتب کمتر از سازه‌های زیرگذر است، بنابراین سازه‌های روگذر به‌عنوان سازه کنترل سطح آب مناسب‌تر هستند. یکی از سازه‌هایی که برای کنترل سطح آب در کانال‌های آبیاری به کار می‌رود، سازه سرریز لولایی^۳ است که سازه‌ای است که در کف لولا شده و زاویه آن با کف قابل تنظیم است (Wahlin and Replogle, 1994). دلیل توسعه سرریزهای لولایی، سادگی در بهره‌برداری، سادگی طراحی، روگذر بودن جریان و توانایی سرریزها در ثابت نگاه داشتن عمق آب در شرایط مختلف و سادگی خودکارسازی آن است.

منعم و حسین‌زاده سامانه سنتی کنترل خودکار را برای سرریز لولایی در مقیاس آزمایشگاهی ساخته و آزمایش کردند (Monem and Hoseinzadeh, 2011).

سامانه کنترل کانال شامل دو بخش نرم‌افزار و سخت‌افزار است. بخش نرم‌افزاری یا کنترل‌کننده، وظیفه محاسبه تنظیمات سازه‌ها و بخش سخت‌افزار وظیفه اعمال تنظیمات بر سازه‌ها را به‌عهده دارند. موفقیت هر سامانه کنترل به توانایی منطق یا روش تنظیم در محدوده مورد نظر بستگی دارد. با توجه به اهمیت و مزایای سامانه‌های کنترل خودکار در مدیریت و بهره‌وری بهینه از آب در شبکه‌ها و توسعه سامانه‌های الکترونیک و الکترومکانیک در چند دهه اخیر، همواره سعی بر این بوده که سامانه‌ای ارائه شود که بتواند به بهترین شیوه مدیریت بهره‌برداری از شبکه را به‌عهده گیرد (Loof et al., 1994). از این رو، روش‌ها و الگوریتم‌های متعددی ابداع شده است. بررسی سیر تکامل الگوریتم‌های کنترل نشان می‌دهد که با وجود پیشرفت‌های الگوریتم‌های کنترلی، به دلیل برخی از مشکلات مانند نیاز سامانه‌های کنترل به سخت‌افزارهای پیچیده، وجود خطا در گردآوری داده‌ها از سطح شبکه، عدم قطعیت در برآورد زمان انتقال، دبی، تقاضای واقعی و پیش‌بینی شده و همچنین پیچیدگی روابط ریاضی حاکم بر برخی سیستم‌های کنترل در شبکه‌ها، الگوریتم‌های کنترل نیاز به ارتقا و بهبود دارند، به طوری که الگوریتم‌های جدید همواره موضوع تحقیق در این زمینه است. استفاده از منطق فازی می‌تواند به‌عنوان نوعی کنترل‌کننده توانا، بیشتر نواقص را برطرف سازد (منعم و کیاپاشا، ۱۳۸۸).

یکی از ویژگی‌های مهم منطق فازی توانایی آن در کنترل فرایندهایی است که روابط ریاضی پیچیده‌ای بر آنها حاکم است، زیرا عدم قطعیت را به‌خوبی در نظر می‌گیرد. هزینه کمتر تجهیزات الکترونیکی به‌کار رفته در روش‌های مبتنی بر منطق فازی در مقایسه با سیستم‌های سنتی کنترل خودکار یکی دیگر از مزایای آن است. به کارگیری منطق فازی در کنترل دبی جریان در کانال، اولین بار در سال ۱۹۹۴ برای کانال T_2 در مراکش با طول ۹۳ کیلومتر انجام شده است (Vron and Bouillot, 1992). در آن سیستم فقط دبی خروجی کانال با تنظیم دبی ورودی به آن کنترل

1. Irrigation Conveyance System Simulation
2. Fuzzy Rule Base
3. Pivot Weir

شده عمق جریان در بالادست سازه تنظیم به عنوان متغیر کنترل شونده در نظر گرفته شد. تنظیم عمق جریان در کانال‌های آبیاری نیازمند آگاهی از میزان تنظیم سازه کنترل و عمق آب در کانال است. بنابراین دو متغیر زاویه سرریز و رقوم سطح آب به عنوان متغیرهای اندازه‌گیری شونده انتخاب شد.

در شبکه‌های آبیاری معمولاً پس از اندازه‌گیری عمق و تنظیم سازه‌های آب‌بند، با تغییر تنظیم سازه‌های آب‌بند، عمق جریان کنترل می‌شود. لذا در سیستم کنترل فازی ساخته شده، میزان تغییر در زاویه سرریز به عنوان متغیر خروجی کنترل در نظر گرفته شده است. این متغیر توسط منطق کنترل‌کننده با توجه به مقدار متغیرهای اندازه‌گیری شونده (رقوم سطح آب و زاویه سرریز) به نحوی تعیین می‌شود که متغیر مورد کنترل (رقوم سطح آب در کانال) را در محدوده هدف تثبیت کند. ساختار ورودی و خروجی این سیستم کنترل با دو متغیر ورودی و یک متغیر خروجی به شکل $2ISO^1$ است. این سیستم کنترل از نوع پس‌خورده^۲ است.

بیشتر پژوهش‌ها در زمینه سامانه‌های کنترل خودکار به شکل ارائه مدل‌های ریاضی بوده و به‌ویژه در ایران فناوری ساخت این سامانه‌ها توسعه نیافته است. توسعه بومی سامانه‌های کنترل خودکار و کاربرد آنها در شبکه‌های آبیاری مستلزم بومی‌سازی فناوری و تهیه سخت‌افزارها و نرم‌افزارها، و آزمودن آنها است. از آنجا که ساخت و آزمودن این سامانه‌ها در محیط‌های آزمایشگاهی دقیق‌تر بوده و هزینه‌های کمتری دارد، به‌منظور توسعه بومی این سامانه‌ها در کشور، لازم است این سامانه‌ها نخست در مقیاس آزمایشگاهی ساخته و نتایج عملکرد آنها ارزیابی شود، تا پس از برطرف کردن مشکلات اجرایی، بتوان از آنها در محیط واقعی استفاده کرد. در این تحقیق، خودکارسازی سرریز لولایی با استفاده از منطق فازی مطالعه شده و سامانه‌ای برای کنترل خودکار سرریز لولایی در مقیاس آزمایشگاهی ساخته و عملکرد آن در شرایط تغییر بزرگ جریان با دو نوع پایگاه قواعد فازی ارزیابی شد.

۲- مواد و روشها

۲-۱- مشخصات سیستم کنترل فازی توسعه یافته

سیستم‌های کنترل جریان در شبکه‌های آبیاری، دو بخش سخت‌افزاری و نرم‌افزاری (منطق کنترل) دارند. این سیستم‌ها با استفاده از اطلاعات کسب شده از سطح شبکه و با تحلیل آنها بر طبق منطق کنترل، سازه‌ها را تنظیم می‌کنند. ساختار اصلی هر سیستم کنترل به‌وسیله متغیرهای سیستم کنترل، ساختار ورودی و خروجی و نوع کنترل‌کننده مشخص می‌شود.

در هر سامانه کنترل سه نوع متغیر وجود دارد که عبارتند از: متغیر کنترل شونده، متغیر اندازه‌گیری شونده و متغیر خروجی کنترل‌کننده (متغیر کنش). با توجه به این که در شبکه‌های آبیاری هدف اصلی استفاده از سیستم کنترل برای تنظیم رقوم سطح آب است، در سامانه کنترل ساخته

۲-۲- تعیین تعداد مجموعه‌های فازی^۳ در دامنه

تغییرات متغیرها

با مشخص شدن متغیرهای ورودی و خروجی سامانه کنترل، برای طراحی سامانه کنترل فازی در گام نخست تعدادی مجموعه فازی در دامنه تغییر متغیرها تعریف می‌شود. انتخاب تعداد مجموعه‌های فازی برای متغیرهای سیستم، با توجه به شناخت از سیستم، دامنه تغییر متغیرها و با در نظر گرفتن دقت و سرعت مورد نظر در محاسبات انجام می‌شود. دامنه تغییر متغیر ورودی اول (زاویه سرریز) از صفر تا ۹۰ درجه است. شش مجموعه فازی در دامنه تغییر متغیر زاویه سرریز در نظر گرفته شده که

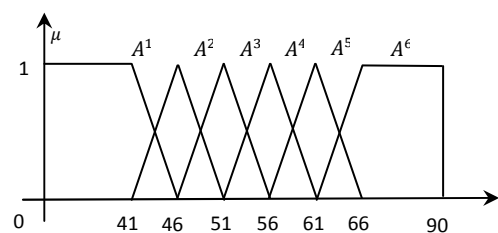
1. 2 Input Single Output
2. Feed Back
3. Fuzzy Sets

سانتی متر در نظر گرفته شده است. در الگوریتم کنترل پس از اندازه‌گیری رقوم سطح آب در محل تنظیم توسط حسگر، اختلاف آن با رقوم هدف به عنوان دومین متغیر ورودی به الگوریتم کنترل در نظر گرفته شده است. این متغیر شامل اعداد مثبت و منفی بوده و حداکثر مقدار آن ۱۵ سانتی متر است که از کم کردن حداکثر عمق آب ممکن در فلوم از عمق هدف به دست می‌آید. حداقل مقدار این متغیر برابر ۳۰- سانتی متر است که از تفریق عمق جریان در دبی صفر از عمق هدف حاصل می‌شود. تعداد مجموعه‌های فازی در نظر گرفته شده برای متغیر ورودی دوم برابر ۲۹ و برابر با تعداد مجموعه‌های متغیر کنش است. از ۲۹ مجموعه فازی در نظر گرفته شده، یک مجموعه برای حالتی است که مقدار متغیر برابر صفر است (اگر رقوم سطح آب در محل تنظیم جریان برابر رقوم هدف باشد مقدار متغیر دوم صفر به دست می‌آید). ۱۴ مجموعه در دامنه مثبت و ۱۴ مجموعه در دامنه منفی تعریف شده است. به منظور پوشش کامل دامنه تغییر متغیر ورودی دوم، مجموعه‌های فازی یکم و ۲۹-م از نوع دوزنقه‌ای و سایر مجموعه‌ها از نوع مثلثی انتخاب شده است.

۲-۳- استخراج پایگاه قواعد فازی

پایگاه قواعد فازی بخش اصلی کنترل‌کننده فازی است که دستورهای خروجی کنترل‌کننده به وسیله آن تولید می‌شود. یکی از روش‌های استخراج پایگاه قواعد، استفاده از مدل ریاضی و شبیه‌سازی جریان است. استفاده از این روش کم‌هزینه بوده و در مدت زمانی کوتاه انجام می‌شود. مدل شبیه‌سازی جریان که برای استخراج پایگاه فازی به کار رفته، مدل هیدرودینامیک ICSS است. برای استخراج پایگاه قواعد فازی با استفاده از مدل ICSS نخست باید مدل ریاضی سازه سرریز لولایی با قابلیت بهره‌برداری دستی تهیه شود که این کار توسط مانز انجام شده است (Skutcsch, 1993).

مجموعه‌های فازی یکم و ششم از نوع دوزنقه‌ای و سایر مجموعه‌ها از نوع مثلثی انتخاب شده است. با مشخص شدن مجموعه‌ها، مراکز مجموعه‌های فازی در دامنه تغییر این متغیر مشخص می‌شود. در شکل ۱ مجموعه‌های فازی متغیر زاویه سرریز به عنوان نمونه نشان داده شده است، که در آن x_1 متغیر زاویه سرریز، A^i مجموعه فازی i ام تعریف شده در دامنه متغیر x_1 و $\mu(x_1)$ درجه عضویت متغیر x_1 است.



شکل ۱ مجموعه‌های فازی متغیر زاویه سرریز

در گام بعدی باید تعداد مجموعه‌های فازی متغیر خروجی کنترل (میزان تغییر در زاویه سرریز) مشخص شود. دامنه تغییر این متغیر به گونه‌ای در نظر گرفته شده که اعداد حاصل برای متغیر خروجی کنترل، توسط موتور محرک سازه تنظیم، در مدت یک گام زمانی کنترلی، قابل اعمال باشد. گام زمانی کنترل سامانه با توجه به دقت مورد نظر در کنترل سطح آب برابر دو ثانیه انتخاب شده و با در نظر گرفتن سرعت موتور به کار گرفته شده در سامانه، دامنه تغییر متغیر کنش از $4/2-$ تا $4/2+$ درجه به دست آمد. ۲۹ مجموعه فازی در دامنه تغییر متغیر خروجی کنترل در نظر گرفته شده است. از ۲۹ مقدار در نظر گرفته شده برای تغییر در زاویه سرریز، یک تغییر برای حالت صفر (در صورت انطباق عمق جریان با رقوم هدف و در نتیجه عدم نیاز به تغییر زاویه سرریز)، ۱۴ تغییر افزایشی ($\Delta\theta$ مثبت) و ۱۴ تغییر کاهششی ($\Delta\theta$ منفی) در نظر گرفته شده است. تمامی مجموعه‌ها مثلثی بوده و فواصل مراکز آنها از یکدیگر برابر $0/3$ درجه است.

در گام بعدی باید مجموعه‌های فازی متغیر ورودی دوم مشخص شود. عمق هدف در سیستم کنترل برابر ۳۰

و پس از پایداری جریان در نظر گرفته شده انتظار می‌رود که عملکرد سامانه با استفاده از این پایگاه قواعد مطلوب‌تر باشد. در گام‌های بعدی مقادیر استخراج شده برای تغییرات رقوم جریان تغییر علامت داده شد تا مراکز مجموعه‌های فازی در دامنه تغییر متغیر ورودی دوم به دست آید. این فرایند برای هر یک از شش مرکز مجموعه‌های زاویه سرریز تکرار شده است. بدین ترتیب برای شش مجموعه فازی متغیر ورودی اول با اعمال ۲۹ تغییر در زاویه سرریز - که نشان‌دهنده مراکز مجموعه‌های فازی در بخش آنگاه قواعد فازی است - ۲۹ مجموعه فازی در دامنه متغیر ورودی دوم استخراج شد، که در مجموع ۱۷۴ قاعده فازی استخراج شده است. قوانین موجود در پایگاه قواعد سامانه کنترل ساخته شده با توجه به متغیرهای ورودی و خروجی به صورت زیر به دست آمده است:

RUL: اگر x_1 (زاویه سرریز) مجموعه فازی A^i و x_2 (اختلاف رقوم آب از رقوم هدف) مجموعه فازی B_j^i باشد، آنگاه y (میزان تغییر در زاویه سرریز) برابر C_j^i است که در آن i شماره مجموعه فازی متغیر زاویه سرریز و j شماره مجموعه فازی متغیر انحراف سطح آب است. این قانون می‌گوید که اگر زاویه کنونی سرریز (x_1) ، مجموعه فازی A^i باشد و همچنین اختلاف رقوم سطح آب از رقوم هدف در محل تنظیم عمق جریان در بالادست سرریز (x_2) ، مجموعه فازی B_j^i باشد، آنگاه تغییر در زاویه سرریز (y) باید مجموعه فازی C_j^i در نظر گرفته شود تا عمق آب در محل تنظیم رقوم جریان به عمق هدف برسد.

۲-۴- ساختار کنترل کننده فازی

ساختار کنترل کننده طراحی شده در این تحقیق مانند ساختار معمول سایر کنترل کننده‌های فازی دارای سه بخش اصلی فازی‌ساز ورودی^۱، موتور استنتاج^۲ و غیرفازی‌ساز^۳ خروجی است.

برای استخراج پایگاه قواعد نخست مدل ریاضی فلوام شامل مشخصات کامل فیزیکی و هیدرولیکی آن به شکل سازگار با مدل ICSS تهیه و سپس سرریز لولایی در محل مورد نظر در فلوام به عنوان شرط مرزی در مدل ریاضی فلوام تعریف شد. در ادامه، مدل در حالت بهره‌برداری دستی قرار داده شد و با اعمال بازشدگی‌های مختلف، تغییرات رقوم جریان در محل کنترل رقوم سطح آب، در زمان‌های مورد نظر مشاهده و ثبت شد.

به منظور استخراج پایگاه قواعد، باید ضرایب سرریز در مدل ICSS کالیبره می‌شد. با انجام آزمایش‌هایی در شرایط مختلف، کالیبره‌سازی سرریز انجام و سپس مراحل استخراج پایگاه قواعد به شرح زیر انجام شد:

نخست زاویه اولیه سرریز در هر یک از مراکز مجموعه‌های شش‌گانه تنظیم شد. با تنظیم جریان در کانال عمق آب در بالادست سازه در عمق هدف تنظیم شد. سپس با اعمال ۱۴ تغییر افزایشی و ۱۴ تغییر کاهش‌ی در زاویه سرریز، تغییر حاصل در رقوم سطح جریان در محدوده دامنه متغیر دوم ثبت شد. در فرایند استخراج قوانین فازی دو روش متفاوت به کار رفت. منعم و کیاپاشا (۱۳۸۸) در استخراج پایگاه قواعد فازی مدل ریاضی سیستم کنترل دریچه کشویی، به این روش عمل کردند که پس از تنظیم رقوم جریان در عمق هدف، به ازای تغییراتی که در بازشدگی دریچه اعمال می‌شد، میزان تغییر در رقوم سطح جریان پس از گذشت زمان Δt (گام زمانی اعمال کنترل در حین اجرای عملیات بهره‌برداری به صورت خودکار) به دست می‌آمد. پایگاه قواعد استخراج شده به این روش پایگاه قواعد نوع یک نامیده می‌شود. در روش دوم که در این تحقیق به کار رفته، پس از تنظیم رقوم جریان در عمق هدف، به ازای تغییراتی که در زاویه سرریز اعمال می‌شود، میزان تغییر در رقوم سطح جریان پس از پایدار شدن جریان در فلوام به دست می‌آید، پایگاه قواعد استخراج شده به این روش پایگاه قواعد اصلاح شده یا نوع دو نامیده می‌شود. با توجه به این که در پایگاه قواعد نوع دو تغییرات رقوم سطح آب در زمان طولانی‌تر

1. Fuzzifier
2. Inference Engine
3. Defuzzifier

تعلق^۱ پایگاه قواعد فازی از نوع مثلثی است. استخراج رابطه کنترلی در این حالت با استفاده از رابطه نگاشت فازی ساز منفرد، موتور استنتاج حاصل ضرب، غیرفازی ساز میانگین مراکز و ادغام کردن این نگاشت‌ها انجام می‌شود. رابطه کنترلی حاصل در این حالت به صورت رابطه ۱ است:

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

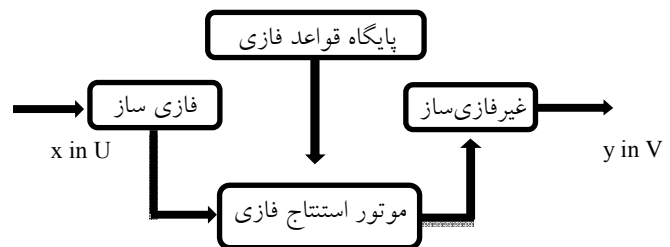
که در آن x_i متغیر ورودی، A_i^l مجموعه فازی تعریف شده در دامنه متغیر x_i ، $\mu_{A_i^l}(x_i)$ درجه عضویت متغیر x_i در مجموعه فازی A_i^l ، y^{-l} مرکز مجموعه‌های فازی در بخش آنگاه پایگاه قواعد فازی، M تعداد قواعد موجود در پایگاه قواعد فازی، n تعداد متغیرهای ورودی به سیستم کنترل و y خروجی سیستم فازی است.

۲-۶- فیلترهای سیستم کنترل فازی

در سامانه کنترل فازی بسته به شرایط می‌توان از سه نوع فیلتر محدوده مجاز عمق، محدوده مجاز تغییر ارتفاع سرریز و سرعت موتور استفاده کرد. محدوده مجاز عمق، محدوده‌ای در حول عمق هدف است، که توسط کاربر تعیین شده و چنانچه عمق قرائت شده در بالادست تنظیم‌کننده در درون این محدوده قرار گیرد، هیچ عمل کنترلی، توسط سیستم کنترل اعمال نخواهد شد و بدین ترتیب از اعمال بهره‌برداری‌های اضافی جلوگیری می‌شود. محدوده مجاز عمق در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق برابر ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده تا از یک سو دقت مورد نظر در کنترل سطح آب تأمین شود و از سوی دیگر از عملکرد مکرر و بیش از حد سرریز جلوگیری شود. محدوده مجاز تغییر ارتفاع سرریز، محدوده‌ای است که اگر تغییر ارتفاع سرریز محاسبه شده توسط الگوریتم کنترل، از این محدوده کوچکتر باشد، تغییری در ارتفاع سرریز داده نمی‌شود. بنابراین با اعمال نشدن تغییرات کم

فازی ساز نگاشتی است که مقادیر قطعی متغیرهای ورودی را به مجموعه‌های فازی تبدیل می‌کند. در سیستم کنترل فازی طراحی شده، فازی ساز ورودی از نوع منفرد انتخاب شد. انتخاب این فازی ساز سبب ساده‌سازی محاسبات در موتور استنتاج می‌شود. در منطق فازی انواع مختلفی از موتورهای استنتاج با خواص گوناگون وجود دارد. یکی از موتورهای استنتاج که در سیستم‌های فازی به فراوانی به کار می‌رود، موتور استنتاج حاصل ضرب است. این موتور استنتاج یکی از کاربردی‌ترین موتورهای استنتاج در سیستم‌های فازی بوده و مهمترین مزیت آن سهولت محاسباتی است که برای این تحقیق مهم بوده است (تشنه لب و همکاران، ۱۳۷۸).

غیرفازی ساز نگاشتی است که مجموعه فازی خروجی موتور استنتاج کنترل‌کننده فازی را به مقداری قطعی می‌نگارد. در این تحقیق غیرفازی ساز میانگین مراکز - یکی از رایج‌ترین غیرفازی سازهای سیستم‌های فازی - استفاده شده است. شکل ۲ ساختار سیستم کنترل فازی تدوین شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۲ ساختار سیستم کنترل فازی در تحقیق حاضر (تشنه لب و همکاران ۱۳۷۸)

۲-۵- روابط کنترلی سیستم کنترل فازی

روابط کنترلی در کنترل‌کننده فازی با ادغام کردن نگاشت‌های فازی ساز ورودی، موتور استنتاج و غیرفازی ساز خروجی استخراج می‌شود. در کنترل‌کننده فازی طراحی شده، فازی ساز ورودی از نوع منفرد و تابع

سایر اجزای سخت‌افزار سامانه، حسگر (بخش ورودی)، رایانه، پردازشگر مرکزی و موتور می‌باشد. در ادامه به‌طور مختصر به تشریح بخش‌های مختلف سخت‌افزار سامانه کنترل خودکار پرداخته می‌شود:

بخش ورودی: بخش ورودی شامل حسگر فراصوتی است. این حسگر عمق آب را با دقت $0/2$ میلی‌متر در هر 100 میلی‌ثانیه یک بار اندازه‌گیری می‌کند.

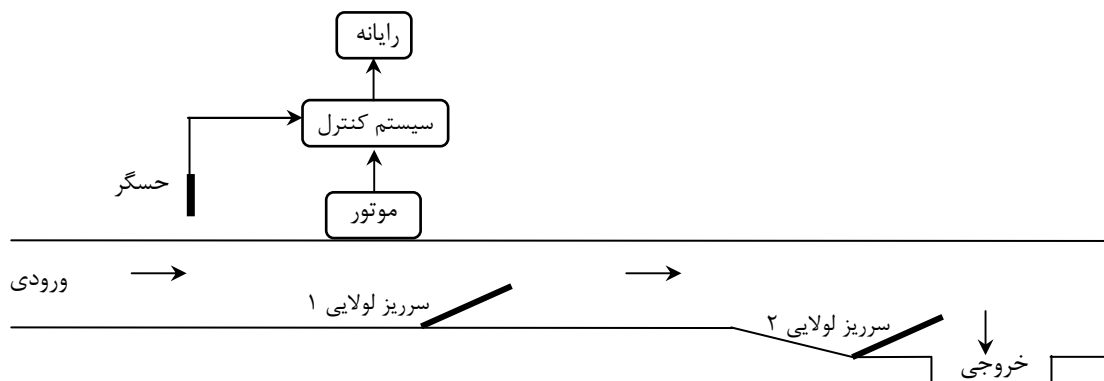
رایانه: کنترل سامانه خودکار سرریز لولایی از طریق رایانه و با استفاده از برنامه‌ای در نرم‌افزار متلب انجام می‌شود. این برنامه شامل سیستم کنترل فازی و واسط کاربر است که با استفاده از آن می‌توان فعال بودن فیلترها و محدوده‌های آنها را تنظیم و خروجی‌هایی مانند عمق آب و ارتفاع سرریز را مشاهده کرد.

پردازشگر: وظیفه ارتباط قسمت‌های مختلف سخت‌افزاری بر عهده پردازشگر است. فرمان‌ها با استفاده از رایانه برای پردازشگر ارسال می‌شود. پردازشگر با توجه به فرمان دریافتی دو گروه عملیات انجام می‌دهد. اگر فرمان خواندن حسگر دریافت شود، ارتفاع آب از طریق حسگر خوانده شده و مقادیر ارتفاع به رایانه ارسال می‌شود؛ اگر فرمان چرخش موتور ارسال شده باشد، با توجه به مقدار چرخش دریافتی و همچنین سرعت مورد نظر، راه‌اندازی موتور از طریق راه‌انداز انجام می‌شود.

در ارتفاع سرریز، از عملکرد مکرر آن جلوگیری شده و پایداری بهتری برای عملکرد سیستم کنترل تأمین می‌شود. با توجه به ویژگی‌های موتور و جعبه دنده به‌کار رفته در سامانه - که توانایی اعمال تغییر کمتر از نیم میلی‌متر در ارتفاع سرریز را ندارند - مقدار این فیلتر در سامانه کنترل خودکار برابر نیم میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در فیلتر سرعت موتور، اگر میزان تغییر در ارتفاع سرریز که توسط الگوریتم کنترل محاسبه می‌شود، از حاصل ضرب سرعت موتور در گام زمانی اعمال کنترل بیشتر باشد، حداکثر تغییر در ارتفاع سرریز به همان اندازه محدود می‌شود. بدین ترتیب سرعت تنظیم ارتفاع سرریز در سیستم کنترل، در محدوده حداکثر سرعت کنترل می‌شود. مقدار این فیلتر در سامانه کنترل خودکار برابر $1/5$ سانتی‌متر (معادل $4/2$ درجه) است که با توجه به سرعت موتور و گام زمانی کنترلی تعیین شده است.

۲-۲- سخت‌افزار و نرم‌افزار سامانه

آزمایش‌های سیستم کنترل بر روی فلومی مستطیلی به طول 10 ، عرض $0/3$ و ارتفاع $0/45$ متر انجام شد. در فاصله 6 متری از ابتدای فلوم، سرریز لولایی لبه‌تیزی بدون فشردگی با ابعاد $0/32 \times 0/3$ متر از آلومینیم نصب شد. سرریز از طریق سازوکار طناب و چرخ‌دنده به موتور متصل شد. شکل ۳ طرح‌واره فلوم آزمایشگاهی، سرریز لولایی و سامانه کنترل خودکار را نشان می‌دهد.



شکل ۳ طرح‌واره فلوم آزمایشگاهی و سامانه کنترل خودکار

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

شاخص زمان عکس‌العمل سیستم عبارت است از فاصله زمانی بین خارج شدن سطح آب از محدوده مجاز عمق پیرامون عمق هدف، تا زمانی که سطح آب بار دیگر به این محدوده باز می‌گردد. محدوده مجاز عمق، محدوده‌ای است پیرامون عمق هدف که دامنه تغییر آن برابر $(y_{target} \pm 0.5x \times y_{target})$ باشد که x توسط کاربر تعریف می‌شود. مقدار x در آزمایش‌های انجام شده برابر ۱۰، ۵، و ۲/۵ درصد در نظر گرفته شد. این شاخص نشان‌دهنده سرعت عکس‌العمل سیستم نسبت به تغییرات عمق آب است. هر چه مقدار این شاخص در سیستم کمتر باشد، عکس‌العمل سیستم نسبت به تغییر عمق سریع‌تر بوده و نوسان‌های عمق آب در عملیات بهره‌برداری سریع‌تر به محدوده مجاز باز می‌گردد.

۴- آزمون و ارزیابی عملکرد سیستم کنترل فازی

در این تحقیق آزمون تغییر بزرگ افزایشی و کاهش‌ی در جریان ورودی برای ارزیابی عملکرد سیستم کنترل فازی در نظر گرفته شد. برای اجرای عملیات بهره‌برداری خودکار، ابتدا مقادیر ثابت موجود در برنامه مانند عمق هدف، محدوده مجاز حداقل و حداکثر مانور سازه و محدوده مجاز عمق به نرم‌افزار سامانه وارد شد. با تنظیم دبی و ارتفاع سرریز، آزمایش در شرایطی آغاز شد که جریان ماندگار با دبی ۳ لیتر بر ثانیه در فلوم برقرار بوده و عمق آب در محل مورد نظر برای کنترل سطح آب (بالادست سرریز) در عمق هدف برابر ۳۰ سانتی‌متر و ثابت شده است. پس از طی زمان کوتاهی برای اعمال تغییر افزایشی، دبی ورودی با استفاده از شیر تنظیم به میزان ۱۵ لیتر بر ثانیه (۴۰٪) افزایش داده شد که باعث انحراف سطح آب از عمق هدف و در نتیجه عکس‌العمل

موتور: موتور به کار رفته برای جابه‌جایی سرریز، از نوع پله‌ای^۱ است که در هر پله ۱/۸ درجه می‌چرخد. برنامه کنترل خودکار و دستی سازه سرریز لولایی در نرم‌افزار متلب نوشته شد. در هر یک از برنامه‌های کنترل خودکار و دستی، از واسط کاربر برای ورود اطلاعات موردنیاز و یا مشاهده تغییرات جریان استفاده می‌شود. ارتباط سخت‌افزار و نرم‌افزار: پس از اجرای برنامه کنترل خودکار در محیط متلب عمق آب توسط حسگر خوانده شده و به رایانه ارسال می‌شود. در رایانه بر طبق منطق کنترل فازی و بر اساس داده‌های عمق آب و زاویه سرریز، مقدار جابه‌جایی سرریز محاسبه و توسط موتور اعمال می‌شود. این روند تا تثبیت سطح آب در محدوده هدف ادامه می‌یابد.

۳- شاخص‌های ارزیابی سامانه کنترل خودکار

به منظور ارزیابی سامانه کنترل خودکار از شاخص‌های خطای مطلق حداکثر (MAE^2)، خطای مطلق تجمعی (IAE^3) (Clemmens et al., 1998) و زمان عکس‌العمل (SRT^4) (منعم و مساح، ۱۳۸۲) استفاده شد. شاخص خطای مطلق حداکثر برای اندازه‌گیری حداکثر انحراف سطح آب از عمق هدف به صورت رابطه ۲ تعریف شده است:

$$MAE = \frac{\max |y_m - y_c|}{y_c} \quad (2)$$

که در آن y_m عمق مشاهده شده در زمان t و y_c عمق هدف است. شاخص خطای مطلق تجمعی نشان‌دهنده میانگین انحراف عمق از عمق هدف در طول دوره بهره‌برداری است و به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود:

$$IAE = \frac{\frac{\Delta t}{T} \sum_{t=0}^T |y_m - y_c|}{y_c} \quad (3)$$

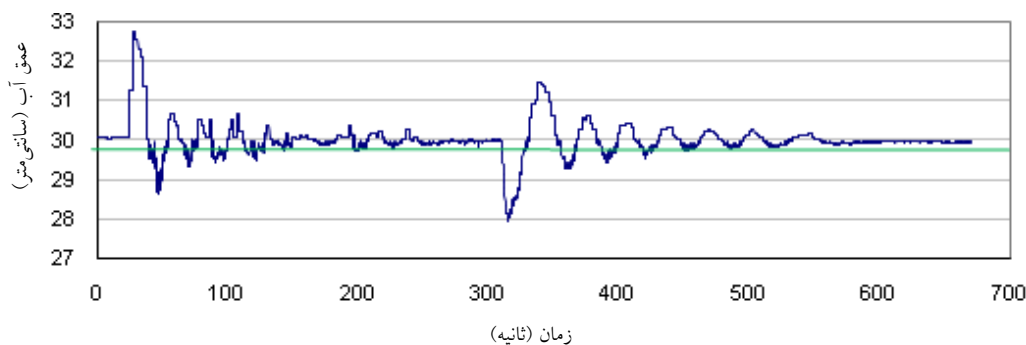
1. Stepper Motor
2. Maximum Absolute Error
3. Integral of Absolute Magnitude of Error
4. System Response Time

خودکار سیستم کنترل می‌شود. پس از تثبیت عمق آب در عمق هدف توسط سیستم کنترل خودکار، میزان دبی از ۱۵ لیتر بر ثانیه به ۳ لیتر بر ثانیه کاهش یافت و عملکرد سامانه کنترل در مقابل این تغییرات بررسی شد. به‌منظور بررسی اثر نوع پایگاه قواعد بر عملکرد سیستم کنترل، آزمون تغییرات جریان با به‌کارگیری پایگاه قواعد نوع اول و دوم به‌طور جداگانه انجام شد.

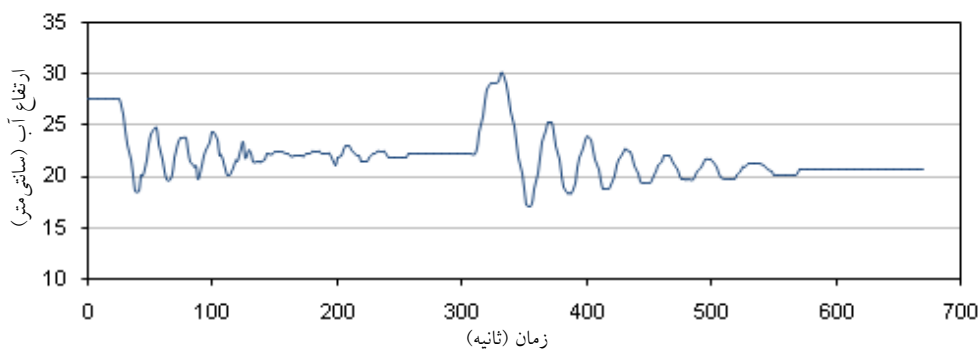
در حالت اول، این آزمون با به‌کارگیری پایگاه قواعد نوع اول انجام شده است. پس از اجرای گزینه‌ها نتایج عملکرد سیستم کنترل فازی به‌صورت معیارهای ارزیابی عملکرد سیستم‌های کنترل در جدول ۱ آورده شده است. نمودارهای تغییر عمق آب در بالادست سرریز و ارتفاع سرریز در طول دوره بهره‌برداری، در شکل‌های ۴ تا ۷ نشان داده شده است.

جدول ۱ شاخص‌های ارزیابی عملکرد سیستم کنترل خودکار

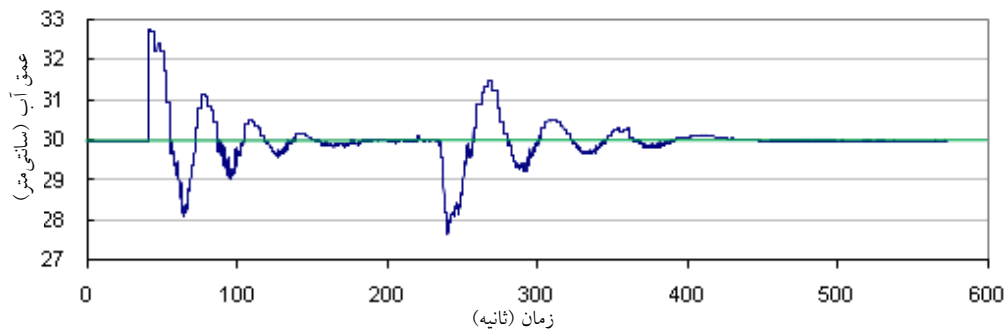
حالت دوم (پایگاه قواعد نوع دو)		حالت اول (پایگاه قواعد نوع یک)		شاخص ارزیابی عملکرد
کاهش دبی (۱۵ به ۳ لیتر در ثانیه)	افزایش دبی (۳ به ۱۵ لیتر در ثانیه)	کاهش دبی (۱۵ به ۳ لیتر در ثانیه)	افزایش دبی (۳ به ۱۵ لیتر در ثانیه)	
۲/۳۳	۲/۷۳	۲/۰۷	۲/۷۶	حداکثر انحراف (cm)
۷/۷۸	۹/۱۱	۶/۹	۹/۲	MAE%
۰/۸	۱/۱۷	۰/۸۲	۰/۷۹	IAE%
۰/۱۸	۰/۴۴	۰/۱۵	۰/۱۴	SRT(10%)(min)
۰/۹۳	۰/۹۶	۰/۶۱	۰/۴۲	SRT(5%)(min)
۱/۳۲	۱/۴۷	۱/۸۶	۱/۶۲	SRT(2.5%)(min)



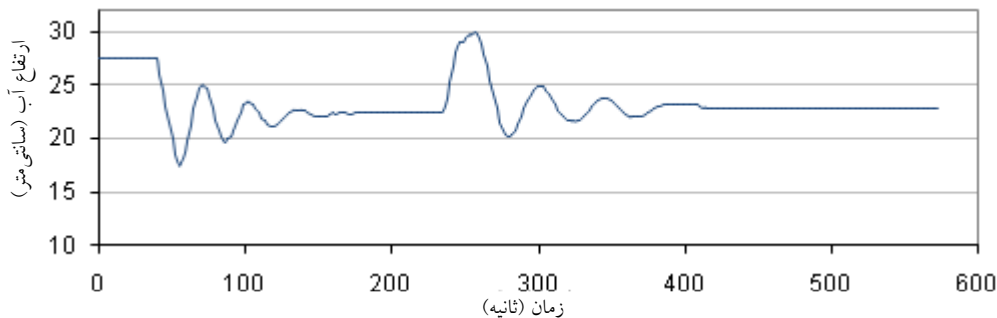
شکل ۴ تغییرات عمق آب در حالت اول



شکل ۵ تغییرات ارتفاع سرریز در حالت اول



شکل ۶ نمودار تغییرات عمق آب در گزینه دو



شکل ۷ تغییرات ارتفاع سرریز در حالت دوم

۵- نتایج

بررسی نمودارهای تغییر عمق آب و ارتفاع سرریز و همچنین جدول شاخص‌های ارزیابی عملکرد سیستم کنترل خودکار نکات زیر را نشان می‌دهد:

۱) مقادیر MAE در این آزمایش‌ها برای سامانه کنترل در محدوده $6/9$ تا $9/2$ درصد حاصل شده است. همچنین در هر دو حالت، حداکثر انحراف در حالت افزایش جریان روی داده که دلیل آن، شکل موج ایجاد شده افزایشی در سامانه به صورت موج مثبت است. موج مثبت با پیشانی نسبتاً عمودی و بدون تغییر شکل به سرریز می‌رسد. بنابراین حداکثر انحراف عمق در این حالت ایجاد شده و عکس‌العمل سامانه کنترل در مقابل آن شدید است. اما در حالت کاهش جریان، یک موج منفی در ابتدای فلوم ایجاد شده و با تغییر شکل در طول کانال و به شکلی تدریجی به سرریز می‌رسد که موجب عکس‌العمل ملایم سامانه کنترل و کاهش انحراف عمق شده است. در کاربردهای عملی سیستم‌های کنترل در کانال‌های آبیاری اگر مقادیر

این شاخص برای سیستم کنترل کمتر از ده درصد به دست آید، عملکرد سیستم مطلوب است. در آزمایش‌های انجام شده حداکثر مقدار MAE در شرایط افزایش جریان برابر $9/2$ درصد در حالت اول و $9/11$ در حالت دوم بوده که با توجه به تغییرات دبی (افزایش 40% درصدی) مقدار مطلوبی است. مقایسه مقادیر MAE در حالت‌های اول و دوم نشان می‌دهد که تفاوت چندانی در مقدار این شاخص در این دو حالت وجود ندارد و سیستم کنترل می‌تواند با به‌کارگیری هر دو نوع پایگاه قواعد، تغییرات ناگهانی جریان را در محدوده نوسان‌های قابل قبول عمق تنظیم و کنترل کند.

۲) مقادیر IAE در این آزمایش‌ها برای سامانه کنترل بین $0/79$ و $1/17$ به دست آمده که عملکرد مطلوبی را نشان می‌دهد. مقایسه مقادیر IAE در دو حالت نشان می‌دهد که تفاوت چندانی بین دو حالت وجود ندارد و سیستم کنترل توانسته با به‌کارگیری هر دو نوع پایگاه قواعد، تغییرات جریان را با میانگین انحراف کوچکی کنترل کند.

نتیجه، اگرچه سطح آب پس از زمان Δt به رقوم هدف می‌رسد، اما پس از آن، بار دیگر از سطح هدف دور شده و انحراف دیگری در آن به وجود می‌آید. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که سطح آب در محدوده مجاز تثبیت شود. سیستم کنترل با پایگاه قواعد نوع دو در برخورد با انحراف مشابه در سطح آب، اقدام کنترلی کوچکتری را در نظر می‌گیرد. اعمال این اقدام کنترلی اگرچه سطح آب را پس از زمان Δt به سطح هدف نمی‌رساند، اما این نوع سیستم با روندی ملایم‌تر و با نوسان کمتری در ارتفاع سرریز، چند اقدام کنترلی کوچکتر و در دفعات عکس‌العمل کمتر، سطح آب را در محدوده مطلوب تثبیت می‌کند.

(۵) مقایسه نمودارهای تغییر عمق آب در دو حالت نشان می‌دهد که با به‌کارگیری پایگاه قواعد نوع دو، نوسان کمتری در سطح آب به وجود آمده که نشانه پایداری بهتر سیستم کنترل است. این به دلیل آن است که در مقایسه با سیستم کنترل نوع یک که اقدام کنترلی شدیدی را در برخورد با انحراف سطح آب اعمال می‌کند، به‌کارگیری پایگاه قواعد نوع دو باعث می‌شود که اقدام کنترلی ملایم‌تر و تعداد دفعات عکس‌العمل سیستم کمتر باشد.

۶- نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده از این تحقیق را می‌توان چنین خلاصه کرد:

۱- نتایج حاصل از آزمون سامانه کنترل خودکار فازی سرریز لولایی نشان می‌دهد که مدل تهیه‌شده به‌خوبی می‌تواند به کنترل تغییرات زیاد دبی (۴۰۰٪) در شرایط کنترل بالادست بپردازد و می‌توان آن را در کانال‌های آبیاری به‌کار برد.

۲- بخش اصلی هر سیستم کنترل فازی پایگاه قواعد آن است که صحت عملکرد سیستم کنترل به استخراج درست آن بستگی دارد. بنابراین تهیه پایگاه قواعد فازی

(۳) مقادیر SRT در جدول نشان می‌دهد که در هر سه سطح ۱۰، ۵ و ۲/۵ درصد، سیستم کنترل در مدت زمان مناسبی عمق را به محدوده مجاز هدف باز می‌گرداند. حداکثر مقدار SRT برابر ۲/۵ درصد بوده که برابر ۱/۸۶ دقیقه در حالت اول و برابر ۱/۴۷ دقیقه در حالت دوم بوده است. مقایسه مقادیر SRT در دو حالت نشان می‌دهد که اگر چه مقدار آن در حالت دوم بهتر است، اما تفاوت قابل توجهی بین این دو حالت وجود ندارد و سیستم کنترل توانسته با به‌کارگیری هر دو نوع پایگاه قواعد، تغییرات ناگهانی جریان را در مدت زمان اندک تنظیم و کنترل کند.

(۴) بررسی نمودارهای تغییر ارتفاع سرریز در دو حالت نشان می‌دهد که با به‌کارگیری پایگاه قواعد نوع دو، دفعات عکس‌العمل سیستم به مراتب کمتر بوده و روند تغییر ارتفاع سرریز نوسان کمتری دارد (شکل‌های ۵ و ۷)، که علت آن را می‌توان با توجه به ماهیت پایگاه‌های قواعد نوع یک و دو تشریح کرد. در پایگاه قواعد نوع یک متغیر ورودی دوم الگوریتم کنترل، انحراف سطح آب از سطح هدف پس از زمان Δt است، اما مقدار این متغیر در پایگاه قواعد نوع دو، انحراف سطح آب از عمق هدف پس از پایدار شدن جریان است. سیستم کنترل برای این دو نوع پایگاه قواعد عکس‌العمل‌های متفاوتی دارد. سیستم کنترل مجهز به پایگاه قواعد نوع یک در صورت به‌وجود آمدن انحراف سطح آب از سطح هدف، عمل کنترلی را به میزانی در نظر می‌گیرد (محاسبه می‌کند) که سطح آب را پس از گذشت زمان Δt به سطح هدف برساند، حال آنکه سیستم کنترل با پایگاه قواعد نوع دو در برخورد با انحراف سطح آب، عمل کنترلی را به گونه‌ای در نظر می‌گیرد که با اعمال آن پس از پایدار شدن جریان، عمق آب در عمق هدف تثبیت شود. اگر این دو نوع سیستم کنترل با انحراف یکسانی روبرو شوند سیستم کنترلی مجهز به پایگاه قواعد نوع یک در مقایسه با سیستم نوع دو، عمل کنترلی بزرگتری را محاسبه و اعمال می‌کند. در

منعم م.ج. و کیاپاشا، م. ص. (۱۳۸۸). "توسعه و ارزیابی مدل سیستم کنترل خودکار بالادست فازی در کانال های آبیاری". مجله پژوهش آب ایران، سال سوم، شماره چهارم. ص.ص. ۴۱-۵۰.

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

Clemmens A.J., Kacerek T., Grawitz B. and Schuurmans, W. (1998). "Test cases for canal control algorithms", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 130(10):35-46.

Gomez M., Rodellar J. and Mantencon J. (2002). "Predictive control method for decentralized operation of irrigation canals", Applied Mathematical Modeling, 26, pp. 1039-1056.

Loof R., Das b. and Paudyal G.N. (1994). "Improved operation of large irrigation canal system in southeast Asia", Water Resource. 10(4), pp. 393-416.

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

Monem M. J. and Hoseinzadeh, Z., (2011). "Construction and evaluation of automatic pivot weir control system", Proceedings of ICID 21st International Congress on Irrigation and Drainage, 16-23 October 2011, Tehran, Iran, pp. 7-21.

Skutcsch J. C., (1993). *Irrigation water delivery models*, Proceedings of the FAO Expert Consultation. Water Report, IEEE Transactions on Control Systems Technology. 16(4), pp. 664- 675.

Stam G.G., (1973). "Water system automation", U. S. Bureau of Reclamation, Denver, Colo.

Vron 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-Provence.

Wahlin B.T. and Replogle J. A. (1994). "Flow measurement using an overshoot gate", United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, Standard from 208 (Rev. 2-80) R&M b ANSI Sd. m-111, pp. 298-102.

برای سیستم کنترل باید با دقت انجام شده و محدودیت های سخت افزار سیستم در این مرحله مد نظر قرار گیرد.

۳- با به کارگیری پایگاه قواعد نوع دوم پایداری سیستم بهتر، تعداد دفعات عکس العمل سیستم کنترل کمتر و نوسان سطح آب و ارتفاع سرریز کمتر می شود.

۷- فهرست علائم

A	مجموعه فازی متغیر ورودی اول
B	مجموعه فازی متغیر ورودی دوم
C	مجموعه فازی متغیر خروجی
i, j	شمارنده
IAE	میانگین مطلق خطا
M	تعداد قواعد در پایگاه قواعد
MAE	حداکثر خطای مطلق
n	تعداد متغیرهای ورودی
SRT	زمان عکس العمل سامانه
t	زمان
T	طول دوره بهره برداری
$\mu(x)$	تابع عضویت
x_1	متغیر ورودی اول (زاویه سرریز)
x_2	متغیر ورودی دوم (انحراف سطح آب)
y_c	عمق هدف
y_m	عمق اندازه گیری شده
y	متغیر خروجی (تغییر زاویه سرریز)

۸- منابع

تشنه لب م، صفارپور ن. و افیونی. (۱۳۷۸). *سیستم های فازی و کنترل فازی*، لی وانگ، چاپ دوم، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.