

طراحی یک الگوریتم کنترل مرکزی کانال اصلی و ارزیابی عملکرد آن

"مطالعه موردی: کانال اصلی نارمادا"

علی اصغر منتظر، صلاح کوچک زاده، عباس قاهری و پیتر ژولزون اورلوپ

چکیده: نظر به محدود بودن منابع آب تجدید شونده و غالباً تحت کنترل در آمده و به منظور تامین نیازهای جمعیت فزاینده دنیا، بکارگیری روشهای نوین و پیشرفته در استفاده حداکثر از آب موجود و کاهش تلفات ناشی از روشهای مرسوم بهره برداری از این منابع، اجتناب ناپذیر می باشد. طراحی و بهره برداری سنتی شبکه های آبیاری به دلیل عدم وجود ابزارهای تطبیق قوانین بهره برداری با نیازهای متغیر زمانی آب، تلفات قابل ملاحظه ای را در شبکه ها به وجود می آورد. از اینرو تحقیق در نحوه مدیریت بهره برداری و تعیین روشها و ابزار کنترل مناسب در شبکه ها، امری ضروریست که با به خدمت گرفتن مدل های هیدرودینامیک، طراحی و اجرای سیستم های کنترل و شیوه های بهینه سازی مناسب انجام پذیر است. در این تحقیق ضمن معرفی مبانی طراحی سیستم های کنترل کانال های آبیاری، الگوریتم کنترل جدیدی برای مدیریت شبکه طراحی شده و در مورد یکی از بزرگترین کانال های انتقال آب جهان بکار برده شده است. الگوریتم طراحی شده با استفاده از نتایج شبیه سازی چندگزینه بهره برداری مختلف با مدل هیدرودینامیک Sobek و شاخص های ارزیابی عملکرد مورد بررسی قرار گرفت. سیستم کنترل مرکزی در این تحقیق از نوع کنترل از پایین دست ترکیبی پس خورد و پیش خورد PI با دی کوپلینگ می باشد. نتایج نشان داد، این الگوریتم از دقت و پتانسیل قابل توجهی در کنترل جریان و مستهلک نمودن اغتشاشات و اختلالات سازه ای - هیدرولیکی کانال مورد مطالعه برخوردار بوده و امکان تحقق توزیع تقاضا مدار و ارتقاء راندمان سیستم توزیع کانال را فراهم می نماید.

واژه های کلیدی: ارزیابی عملکرد، سیستم کنترل، کانال های آبیاری، کنترل از پایین دست، کنترل PI

۱. مقدمه

محدودیت منابع آب و خاک و پایین بودن عملکرد اغلب شبکه های آبیاری، ضرورت توجه بیش از پیش به بازنگری و اصلاح روشهای مرسوم طراحی و بهره برداری، زمینه سازی به منظور ارزیابی و بهبود عملکرد این سیستم ها و بهره برداری بهینه از منابع موجود را ایجاب می نماید. دستیابی به این مهم در سطح شبکه های آبیاری در گرو

فراهم آمدن یک سیستم اطلاعاتی جامع و دقیق از متغیرهای تعیین کننده رفتار هیدرولیکی و به تعبیری عملکرد آنها می باشد. فقدان اطلاعات صحیح، عدم دقت کافی در اجرای تنظیمات سازه ای، کنش و تاثیرات هیدرولیکی متقابل سازه ها و اختلاف مابین مقادیر هدف و واقعی متغیرهای مدیریتی از جمله مهمترین عواملی هستند که عملکرد سیستم های انتقال و توزیع را تحت الشعاع قرار می دهند. این موضوع در شرایطی حادث می شود که شبکه های آبیاری به شیوه دستی بهره برداری شوند که البته بهره برداری دستی کانالها هنوز یک روش معمول در مدیریت های آبیاری محسوب می شود. از اینرو بهبود عملکرد این سیستم ها با به خدمت گرفتن مدل های هیدرودینامیک، طراحی و اجرای سیستم های کنترل خودکار و شیوه های بهینه سازی میسر می گردد [۱]. امروزه اتخاذ این رویکرد با توجه بر لزوم سرویس مدار نمودن^۲ سیستم های توزیع جریان که

مقاله در تاریخ ۱۳۸۳/۷/۶ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۴/۶/۱۳ به تصویب نهایی رسیده است.

دکتر علی اصغر منتظر گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابو ریحان، دانشگاه تهران
almontaz@ut.ac.ir

دکتر صلاح کوچک زاده، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران
skzadeh@ut.ac.ir

دکتر عباس قاهری دانشکده مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران
gaheri@iust.ac.ir

دکتر پیتر ژولزون اورلوپ گروه مدیریت آب و زمین دانشگاه تیودلفت هلند
p.j.vanoverloop@citg.tudelft.nl

² Service oriented

• ساختار I/O

به منظور توصیف الگوریتم های کنترل، از یک ساختار I/O استفاده می شود که بیانگر تعداد متغیرهای اندازه گیری شده (ورودی) و متغیرهای عمل کننده (خروجی) می باشد. ساختارهای ورودی و خروجی منفرد، ورودی و خروجی چندگانه، و ورودی چندگانه – خروجی منفرد از جمله این ساختارها می باشند. این ساختار در انتخاب تکنیک طراحی الگوریتم تاثیر گذار است.

• منطق کنترل

منطق کنترل به نوع و جهت ارتباط بین متغیرهای مورد کنترل و متغیرهای خروجی بستگی دارد. نوع کنترل در سه گروه: کنترل پس خورد^۱، کنترل پیش خورد^۲ و کنترل ترکیبی^۳ قابل ذکر می باشد. در الگوریتم کنترل پس خورد، مقدار متغیر مورد کنترل در اثر ورود یک اغتشاش به سیستم، اندازه گیری ویا محاسبه گردیده؛ انحراف مقدار کمی آن از مقدار هدف^۴ تعیین و به منظور اعمال اصلاحات به الگوریتم کنترل برگشت داده می شود.

عمل کنترل تا رسیدن مقدار متغیر مورد کنترل به مقدار هدف ادامه می یابد. در چرخه های مختلف آمیل و آویس و آویو در تنظیم سطح آب از این منطق کنترل استفاده می کنند. با استفاده از این منطق کنترل، الگوریتم های کنترل مختلفی طراحی گردیده که به عنوان مثال می توان به الگوریتم های طراحی شده کوسوت و همکاران^۵، رودلار و همکاران^۶ و لیو و همکاران^۷ اشاره نمود [۶،۵،۴]. در الگوریتم کنترل پیش خورد، مقدار متغیر هدف و اغتشاش برآورد گردیده و وارد الگوریتم می شود و بر این اساس مقدار متغیر خروجی کنترل توسط الگوریتم تعیین می گردد.

از جمله الگوریتم های کنترلی که بر اساس این نوع منطق طراحی شده اند، می توان به فعالیتهای انجام شده توسط فلاوی^۸، تومیکیک^۹، لین^{۱۰}، بوم و همکاران^{۱۱} اشاره نمود [۱۰،۹،۸،۷].

نظر به محدودیتهایی که هر یک از دو نوع الگوریتم کنترلی فوق دارند، بکارگیری الگوریتم کنترلی ترکیبی پیش خورد به اضافه پس خورد که از کارایی بالاتری نسبت به هر یک از این دو برخوردار می باشد؛ قابل توصیه و کاربرد است [۳]. در شکل (۱) تقسیم بندی انواع منطق کنترل نشان داده شده است.

به عنوان یگانه انگاره ممکن ارتقای سطح کیفی و کمی عملکرد شبکه های آبیاری مطرح است، امری اجتناب ناپذیر است. ایده خودکارسازی و اجرای سیستم های کنترل کانالهای آبیاری در راستای دستیابی به این هدف، از اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی مطرح و نظر تعدادی از متخصصان و متولیان آبیاری را به خود معطوف ساخته است. طی دو دهه اخیر، دانش طراحی سیستم های کنترل پیشرفتهای چشمگیری داشته لکن هنوز بخش عمده ای از تکنولوژی بدست آمده، در سطح شبکه های آبیاری مورد استفاده قرار نگرفته است [۲]. نظر به اینکه طراحی و اجرای سیستم های کنترل خودکار می تواند به عنوان رویکردی جدید و زمینه فعالیت تحقیقاتی الویت دار بخش آب کشور مطرح باشد، انجام مطالعات و انتشار نتایج آن به منظور آشنایی متخصصان و کارشناسان این بخش، ضروری می نماید. این مقاله در این راستا تدوین گردیده و با هدف معرفی این سیستمها و ارزیابی یک تکنیک و الگوریتم کنترل کارآ و در عین حال جدید در سطح شبکه های آبیاری و زهکشی ارائه شده است.

سیستم های کنترل وظیفه تعیین میزان تنظیمات و اعمال مانور سازه ها را بر عهده دارند. این سیستمها شامل دو بخش نرم افزار و سخت افزار بوده که بخش نرم افزار در قالب یک الگوریتم کنترل، محاسبه میزان تنظیمات سازه ها را انجام داده و بخش سخت افزار، اعمال تنظیمات محاسبه شده سازه ها را بر عهده دارد.

موفقیت یک سیستم کنترل به توانایی الگوریتم کنترل در تعیین دقیق پارامترهای کنترلی دارد. تا به حال الگوریتم های کنترل متعددی ابداع شده که گرچه هر یک دارای منطق خاصی به منظور تعیین پارامترهای کنترلی بوده لکن همه آنها دارای چهار جزء اصلی: متغیرها، ساختار ورودی - خروجی (I/O)، منطق کنترل و تکنیکهای طراحی می باشند [۳]. نظر به اهمیت اجزای فوق به منظور معرفی سیستم کنترل طراحی شده کانال مورد مطالعه، هر یک از این اجزاء به اختصار تشریح می شود.

• متغیرها

متغیرها در یک سیستم کنترل شامل ۱- متغیر مورد کنترل، ۲- متغیر مورد اندازه گیری و ۳- متغیر خروجی کنترل می باشند. متغیر مورد کنترل می تواند دبی، حجم، رقوم سطح آب در بالادست سازه های تنظیم، رقوم سطح آب در پایین دست سازه های تنظیم و یا رقوم آب در طول بازه کانال باشد.

متغیر مورد اندازه گیری به متغیری اطلاق می شود که عمل مشاهده بر روی آن انجام شده و به منظور مقایسه با مقدار کمی متغیر مورد کنترل وارد الگوریتم کنترل می گردد؛ این متغیر می تواند رقوم سطح آب، دبی ویا حجم باشد.

پس از انجام مقایسات، الگوریتم کنترل مقدار متغیر خروجی را تعیین می نماید. این متغیر می تواند میزان بازشدگی سازه و یا مقدار دبی عبوری از آن باشد.

¹ Feedback-FB

² Feedforward-FF

³ FB+FF

⁴ Set-point

⁵ Kosuth et al.

⁶ Rodellar et al.

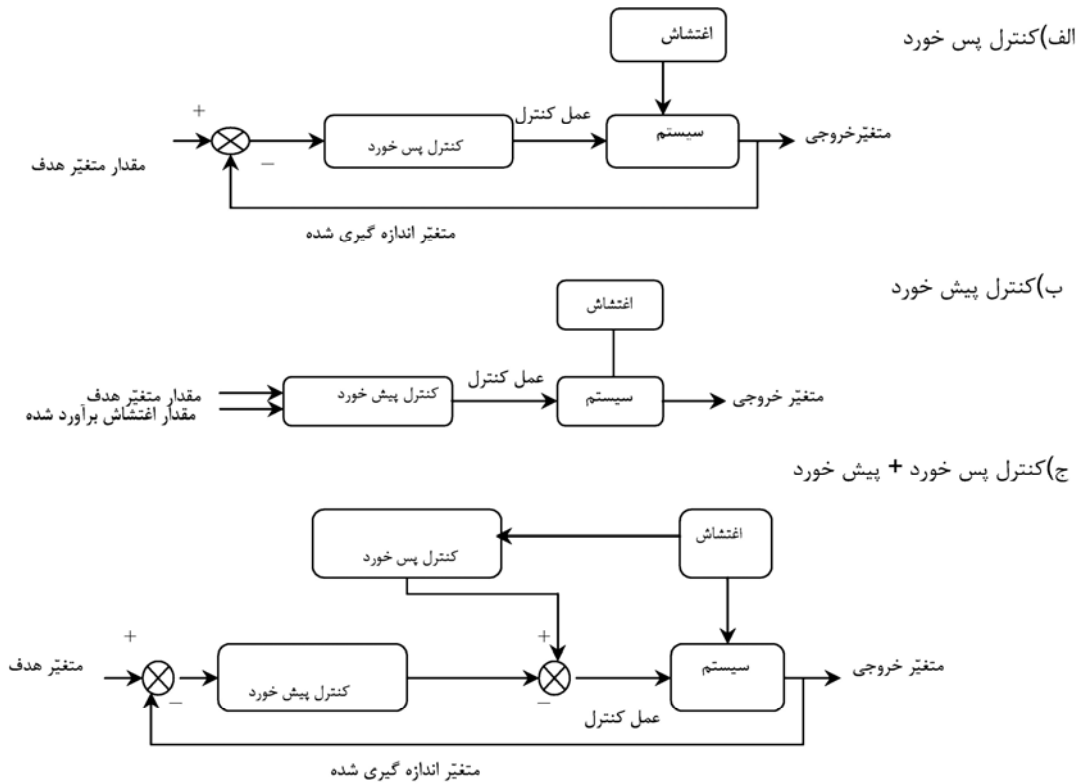
⁷ Liu et al.

⁸ Flavey

⁹ Tomicic

¹⁰ Lin

¹¹ Baume et al.



شکل ۱. تقسیم بندی منطق کنترل از نظر نوع

با توجه به اینکه در این تحقیق از تکنیک کنترل PI استفاده گردیده، به اختصار این تکنیک معرفی می‌گردد. در این تکنیک محاسبه متغیر خروجی با استفاده از روش تناسبی + انتگرالی صورت می‌گیرد [۱۱]. به تعبیر دیگر خروجی کنترل معادل است با مجموعی از نسبتهای تناسبی و انتگرالی (رابطه ۱).

$$Q_{Est(t)} = Q_{1(t)} + Q_{2(t)} \quad (1)$$

در رابطه فوق:

$$Q_{Est(t)} = \text{برآورد مقدار متغیر خروجی کنترل در زمان } t$$

$$Q_{1(t)} = \text{نسبت تناسبی متغیر مورد کنترل}$$

$$Q_{2(t)} = \text{نسبت انتگرالی متغیر مورد کنترل}$$

می باشد که :

$$Q_{1(t)} = k_p \cdot e(t) \quad (2)$$

$$Q_{2(t)} = k_I \cdot \int_0^t e(t) dt \quad (3)$$

جهت کنترل نیز بیانگر موقعیت کنترل گر و به عبارتی متغیری است که مورد کنترل قرار می‌گیرد و به سه نوع کنترل از پایین دست^۱، کنترل از بالادست^۲ و یا کنترل ترکیبی دو نوع فوق تقسیم بندی می‌شود. در سیستم کنترل از پایین دست، کنترل گر در پایین دست سازه‌ها قرار گرفته و متغیر پایین دست سازه مورد کنترل قرار می‌گیرد. در سیستم کنترل از بالادست، کنترل در بالادست سازه‌ها واقع شده و متغیر بالادست سازه مورد کنترل قرار می‌گیرد. در کنترل ترکیبی پایین دست + بالادست، کنترل گر در بالادست و پایین دست سازه‌ها قرار دارد. در شکل ۲ انواع مختلف کنترل از نقطه نظر جهت کنترل ارائه شده‌اند. تکنیک طراحی عبارت از شیوه‌ایست که در تولید متغیرهای خروجی کنترل با استفاده از متغیرهای اندازه‌گیری شده بکار گرفته می‌شود. تکنیکهای ابداعی^۳، تناسبی^۴، انتگرالی تناسبی^۵، انتگرالی-مشتق تناسبی^۶، کنترل فازی^۷، بهینه سازی خطی و غیر خطی^۸ و سه وضعیتی^۹ مهمترین تکنیکهای طراحی موجود می‌باشند.

¹ Downstream control

² Upstream control

³ Heuristic

⁴ Proportional-P

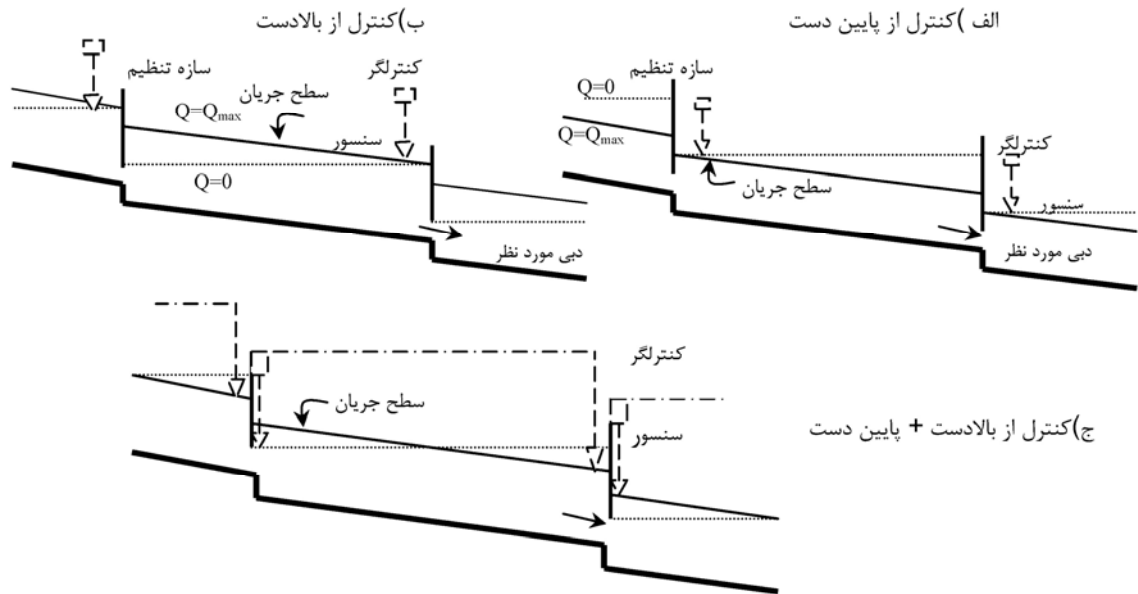
⁵ Proportional Integral-PI

⁶ Proportional-Integral-Derivative-PID

⁷ Fuzzy control

⁸ Linear and non-linear optimization

⁹ Three position



شکل ۲. تقسیم بندی منطق کنترل از نظر جهت کنترل تکنیک طراحی

در روابط (۲) و (۳) :

$e(t) =$ تفاوت مقدار متغیر اندازه گیری شده و مقدار مورد انتظار در زمان t

$k_p =$ ضریب وزنی اثر نسبت تناسبی و انتگرالی

$k_I =$ ضریب وزنی اثر نسبت انتگرالی

همانطور که قبلا هم اشاره گردید، اکثر الگوریتمهای کنترل هنوز در سطح شبکه‌های آبیاری به اجرا در نیامده اند.

از طرفی تهیه مدل فیزیکی و انجام مطالعات و ارزیابی عملکرد این الگوریتمها هزینه بر و زمان گیر می‌باشد. از اینرو بکارگیری مدل‌های هیدرودینامیک و استفاده از نتایج شبیه‌سازها، روش بهینه، کارا و قابل توصیه در مطالعه این الگوریتمها به حساب می‌آید. به تعبیر دیگر، نظر به ماهیت غیردایمی جریان در طول بهره برداری و تعامل سیستمهای کنترل با جریانهای غیردایمی، بررسی عملکرد این سیستمها در قالب تلفیق الگوریتم اجرایی آنها با یک مدل هیدرودینامیک امکان پذیر می‌باشد.

در این رابطه کلیمنس و همکاران^۱ با انجام شبیه‌سازهایی به مقایسه و ارزیابی الگوریتمهای کنترل مختلف پرداختند [۱۲]. کلیه این مقایسات بر روی الگوریتمهای کنترل از پایین دست نوع پیش خورد انجام گرفت. کلیمنس و شورمانز^۲ کنترل گرهای بهینه کنترل از پایین دست PI نوع پیش خورد را معرفی نمودند [۱۳].

در این تحقیق یک الگوریتم کنترل مرکزی خودکار جدید از نوع کنترل از پایین دست (سطح آب) ترکیبی پس خورد و پیش خورد PI برای یکی از بزرگترین کانالهای انتقال آب جهان طراحی گردیده و با

استفاده از نتایج شبیه‌سازها توسط مدل هیدرودینامیک Sobek عملکرد آن ارزیابی شده است.

۲. مواد و روش تحقیق

۲-۱. کانال اصلی شبکه آبیاری

بررسیهای این تحقیق بر روی کانال اصلی شبکه آبیاری نارمادا در کشور هند انجام گرفته است (شکل ۳). شبکه آبیاری نارمادا یکی از بزرگترین شبکه‌های آبیاری جهان بوده که پس از اجرای کلیه واحدهای آن، سطح ناخالص اراضی تحت پوشش شبکه به حدود دو میلیون هکتار می‌رسد.

شبکه در شمال غربی کشور هند واقع شده که سطح وسیعی از اراضی کشاورزی ایالت گجارات^۳ را شامل می‌شود. کانال اصلی شبکه با طولی معادل ۴۵۸ کیلومتر و دبی طراحی $1134 \text{ m}^3/\text{s}$ در بخش ابتدایی، انتقال آب از مخزن سدسردار ساروار^۴ و توزیع آن را بین کانالهای درجه دو بر عهده دارد. این مطالعه بر روی ۱۰۵ کیلومتر ابتدای این کانال انجام گرفته است.

در این بخش از کانال ۹ سازه تنظیم کننده (۹بازه)، ۱۲ سازه آبگیر، سه سازه تقاطعی شامل سیفون معکوس و آکدوک وجود دارند. شیب بستر و ضریب زبری مانینگ پوشش کانال بترتیب 0.0008 m/m و 0.18 می‌باشند. شکل ۴ شمایی از پروفیل طولی و سازه‌های موجود در این کانال را نمایش می‌دهد.

در شبکه آبیاری نارمادا، روش توزیع چرخشی آب به عنوان مناسبترین روش توزیع آب در شبکه مطرح بوده و در حال حاضر نیز

³ Gujarat

⁴ Sardar sarovar

¹ Clemmens et al.

² Clemmens & Schuurmans

برنامه نویسی و با استفاده از مدول Real time control بامدول Water Flow در مدل Sobek تلفیق گردید.

نوع الگوریتم کنترل طراحی شده، کنترل از پایین دست، ترکیب پیش خورد به اضافه پس خورد بوده که با استفاده از کنترلر گرنوع PI؛ رقوم سطوح آب در انتهای بازه‌های کانال را کنترل و در رقوم هدف تثبیت می‌نماید. نکته قابل توجه آنکه نقش مدول هیدرودینامیک Sobek، صرفاً شبیه‌سازی گزینه‌های بهره برداری و تعیین متغیرهای هیدرولیکی مورد نیاز به منظور محاسبه شاخص های ارزیابی عملکرد الگوریتم می‌باشد.

بنابراین پس از اجرای سیستم کنترل در سطح کانال و نصب حسگرهای مربوطه، نیازی به مدول مذکور نبوده و کنترل گرها، به صورت خودکار وظیفه تنظیم جریان در کانال را انجام خواهند داد.

پارامترهای کنترلر گر PI با استفاده از قوانین تنظیم^۲ کانال‌ها محاسبه شدند [۱۵].

نظر به اینکه اغتشاشات در سطح یک بازه بر سایر بازه های مجاور تاثیر می‌گذارد، فرآیند کنترل نیز متاثر از تعامل بین بازه ها بوده و از پیچیدگی خاصی برخوردار است.

در این تحقیق به منظور کاهش اثرات بین بازه ای و تسریع در کنترل جریان، با استفاده از دی‌کوپلینگ^۳ سازه‌های تنظیم، بازه های مختلف با یکدیگر ارتباط داده شده و اثر کاهشی تعامل بازه‌ها بر عملکرد سیستم کنترل تقلیل یافت [۱۵]. در این مطالعه یک کنترلر گر مرکزی^۴ طراحی گردید.

این سیستم کنترل، توانایی ثابت نگه داشتن رقوم سطح آب در بالادست سازه‌های تنظیم کننده بازه‌های کانال (تمام طول کانال) را در نتیجه اعمال هرگونه اغتشاش و تغییرات هیدرولیکی و سازه ای در رقوم هدف دارا می‌باشد.

رقوم سطح آب هدف در هر یک از بازه ها، ۷۵ سانتیمتر بالاتراز عمق نرمال بازه‌ها در نظر گرفته شد.

این رقوم، امکان ایجاد حجم منشور ذخیره مناسبی را در بالادست سازه‌های تنظیم کننده فراهم می‌نماید. با اعمال یک تغییر هیدرولیکی یا سازه‌ای که تغییر رقوم سطح جریان را به دنبال خواهد داشت، سیستم کنترل دبی مورد نظراس سازه‌های تنظیم را محاسبه و بر این اساس میزان بازشدگی سازه‌ها را تعیین می‌نماید.

برای محاسبه زمان تاخیر بازه‌ها از مدل ID^۵، استفاده گردید [۱۶]. در این مدل تغییرات عمق جریان در بالادست سازه تنظیم دوائر اعمال تغییرات دبی ورودی بازه، به دو پارامتر زمان تاخیر و سطح منحنی برگشت آب در بازه ارتباط می‌یابد (رابطه ۴). منظور از زمان تاخیر، زمان انتقال اغتشاش در بازه می‌باشد.

عمومی ترین شیوه بهره برداری و توزیع آب در سطح شبکه می‌باشد. بر این اساس در شبکه نارمادا دبی ثابت ۱/۱۵۷ لیتر بر ثانیه در هکتار (۷۰ میلیمتر در هفته) بین کشاورزان به صورت چرخشی توزیع می‌شود. در مواقع خشکسالی و یا کمبود آب شبکه نیز به تناسب، آب مورد نیاز درصدی از اراضی به هرکشاورز تحویل می‌شود.

تغییرات دبی توزیع در سطح شبکه بطور متوسط بین ۲۰ تا ۱۰۰ درصد ظرفیت طراحی شبکه متغیر می باشد [۱۴]. در حال حاضر متولیان بهره‌برداری شبکه آبیاری نارمادا، به منظور ارتقای عملکرد توزیع و تحویل در سطح شبکه، درصدد اجرای سیستم‌های کنترل خودکار می باشند.

۲-۲. بکارگیری مدل هیدرودینامیک Sobek

به منظور انجام شبیه سازیها و ارزیابی عملکرد الگوریتم کنترل طراحی شده، ازمدل هیدرودینامیک Sobek استفاده گردید. مدل Sobek یک بسته نرم افزاری است که قابلیت کاربری در حوزه های مختلف مدیریت رودخانه ها، مجاری انتقال و توزیع آب در مناطق شهری و روستایی را دارا می‌باشد.

این مدل در سال ۲۰۰۰ توسط دلبلیو ال دلفت هیدرولیکی^۱ در قالب یک مدل تجاری ارائه گردید.

در این مدل هفت مدول مختلف وجود داشته که با توجه به اهداف شبیه سازی از حالت ترکیبی این مدولها نیز می‌توان استفاده نمود. مدول Water Flow به منظور شبیه سازی جریانهای دایمی و غیر دایمی مجاری روباز بکار گرفته می‌شود. در طراحی سیستم کنترل از حالت ترکیبی این مدول با مدول Real time control استفاده می‌شود. در این مدل برای حل معادلات سنت و نانت از شمای محاسباتی جدیدی موسوم به طرح دلفت که یک شیوه حل ضمنی در قالب یک شبکه متناوب است، استفاده می‌گردد.

بکارگیری شمای دلفت در حل معادلات سنت و نانت، قابلیت شبیه سازی شبکه‌های گسترده درختی، شاخه‌ای، حلقوی و پدیده های مختلفی نظیر امواج حاصل از برگشت آب، جریانهای بسیار کم در حد خشکی کانال و جریانهای فوق بحرانی را با دقت بالایی برای این مدل فراهم ساخته است. در این مدل امکان شبیه سازی انواع مختلف سازه های موجود در سیستم‌های انتقال و توزیع جریان وجود دارد. همچنین امکان شبیه سازی بهره برداریهای دستی، اتوماتیک و اجرای سیستم های کنترل مختلف در مدل پیش بینی شده است [۱۵].

۲-۳. الگوریتم کنترل طراحی شده

کانال نارمادا توسط مدل هیدرودینامیک Sobek شبیه سازی شد. الگوریتم یک سیستم کنترل در قالب یک ام فایل در نرم افزار Matlab

² Tuning rules

³ Decoupling

⁴ Centralized controller

⁵ Integrator-Delay model

¹ WL/Delft Hydraulic

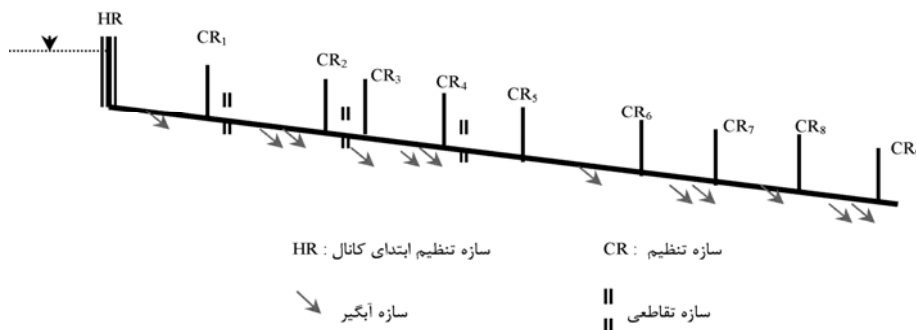
شکل ۶ شمایی از فرآیند اجرایی الگوریتم کنترل مرکزی طراحی شده را برای سه بازه از کانال نمایش می‌دهد. به منظور ارزیابی پتانسیل سیستم کنترل، سه گزینه بهره برداری مختلف در کانال شبیه سازی شدند. گزینه های شبیه سازی شده اول تا سوم به ترتیب عبارتند از جریان دائمی با دبی ثابت ورودی به کانال معادل ۴۰ درصد، ۶۰ درصد و ۸۰ درصد ظرفیت طراحی کانال.

$$\begin{cases} y(t) = y(0) & t \leq \tau \\ y(t) = y(0) + \frac{(t-\tau)\Delta Q}{A_s} & t > \tau \end{cases} \quad (4)$$

در رابطه فوق τ ، زمان تاخیر؛ A_s ، سطح منحنی برگشت آب؛ y ، عمق جریان؛ t ، زمان؛ و ΔQ تغییرات دبی ورودی بازه می‌باشند. شکل ۵ مدل ID را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد.

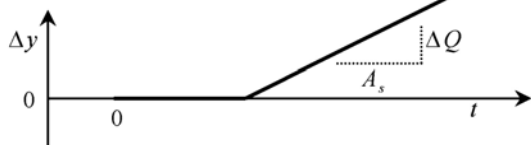


شکل ۳. موقعیت سد سردار ساروار و کانال اصلی نارمادا



شکل ۴. پروفیل طولی کانال مورد مطالعه (بدون مقیاس)

انتگرال قدر مطلق بزرگی خطا (IAE)^۲ و انتگرال قدرمطلق تغییر دبی (IAQ)^۳ محاسبه و مورد بررسی قرار گرفت [۱۲].



شکل ۵. مدل پاسخگویی ID

در هر گزینه از شبیه سازیهای فوق، دبی تحویل آبیگرهای کانال از ۲۰ درصد تا ۸۰ درصد ظرفیت طراحی آبیگرها تغییر یافت. به تعبیر دیگر بهره‌برداری آبیگرها به روش بهره برداری متناوب با دبی متغیر صورت پذیرفت. تغییرات در ۶ گام با تناوب زمانی ۲۴ ساعت برای هر گام و در دو روند افزایش دبی (۳ گام) و کاهش دبی (۳ گام) انجام گردید. برای ارزیابی عملکرد هر یک از گزینه‌های فوق، علاوه بر بررسی منحنی تغییرات پروفیل سطح آب و دبی سازه‌های تنظیم در هر بازه از کانال، سه شاخص ارزیابی ماکزیمم قدر مطلق ط (MAE)^۱،

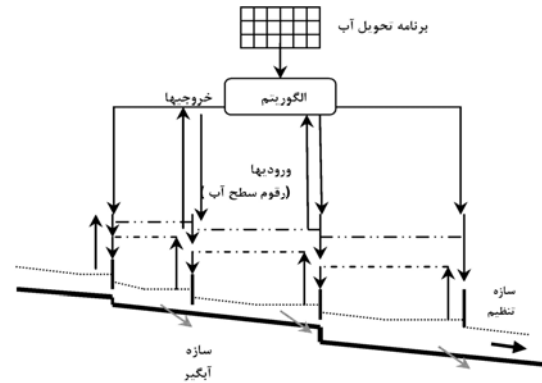
^۲ Integral of absolute magnitude of error

^۳ Integral absolute discharge change

^۱ Maximum absolute error

جدول ۱. مقادیر زمان تاخیر بازه های کانال نارمادا در هر یک از گزینه های بهره برداری شبیه سازی شده

شماره بازه	زمان تاخیر (دقیقه)		
	گزینه شماره ۱	گزینه شماره ۲	گزینه شماره ۳
1	11.1	28.4	31.9
2	2.7	2.7	2.7
3	8.3	18.2	20.4
4	4.6	4.6	4.6
5	11.7	30.7	34.5
6	2.6	2.7	2.7
7	12.5	33.8	38.1
8	11.9	34.6	38.9
9	10.6	30	33.7



شکل ۶. فرایند اجرایی الگوریتم کنترل مرکزی طراحی شده

رابطه محاسباتی هر یک از این شاخص ها بترتیب در روابط (۵) الی (۷) ارائه شده است.

$$MAE = \frac{\max(|y_t - y_{t \text{ target}}|)}{y_{t \text{ target}}} \quad (5)$$

$$IAE = \frac{\Delta t / T \sum_{t=0}^T |y_t - y_{t \text{ target}}|}{y_{t \text{ target}}} \quad (6)$$

$$IAQ = \sum_{t=t_1}^{t_2} (|Q_t - Q_{t-1}|) - |Q_{t_1} - Q_{t_2}| \quad (7)$$

در روابط فوق y_t رقوم سطح جریان محاسبه شده از نتایج شبیه سازی در زمان t ، $y_{t \text{ target}}$ رقوم سطح آب هدف، Δt گام زمانی تنظیم، T بازه زمانی شبیه سازی، Q_t دبی عبوری از سازه در زمان t ، t_1 و t_2 زمانهای ابتدا و انتهای شبیه سازی و Q_1 و Q_2 به ترتیب شدت جریانهای مورد انتظار در ابتدا و انتهای بازه شبیه سازی می باشند.

۳. نتایج و بحث

در این مطالعه از تئوری کنترل خطی برای طراحی یک کنترل گر از پایین دست سطح آب ترکیبی PI برای ۹ بازه ابتدای کانال اصلی شبکه آبیاری نارمادا استفاده گردید.

مناسب ترین مقادیر زمان تاخیر بازه ها با استفاده از نتایج شبیه سازی های جریان هر یک از گزینه های بهره برداری توسط مدل Sobek تعیین گردیدند.

در مناسب ترین زمانهای تاخیر، مقدار تغییرات رقوم سطح آب نسبت به رقوم هدف در اثر اعمال اغتشاشات حاصل از گزینه های بهره برداری حداقل می باشد [۱۵]. این مقادیر به عنوان زمان تاخیر بازه های کانال مورد استفاده قرار گرفته و جزو داده های ورودی الگوریتم کنترل می باشند.

جدول ۱ مقادیر زمان تاخیر بازه های کانال نارمادا را در هر یک از گزینه های بهره برداری مورد مطالعه نشان می دهد. داده های جدول بیانگر افزایش زمان تاخیر انتقال اغتشاشات با افزایش دبی بهره برداری کانال می باشد.

شکل ۷ روند تغییرات دبی تحویلی به آبریزهای کانال را نشان می دهد. این روند برای هر یک از سه گزینه بهره برداری شبیه سازی شده یکسان می باشد. محور افقی این نمودار مربوط به زمان (ساعت های مختلف در طول دوره ۶ روزه شبیه سازی) و محور قائم دبی تحویلی سازه های آبریز را نشان می دهد.

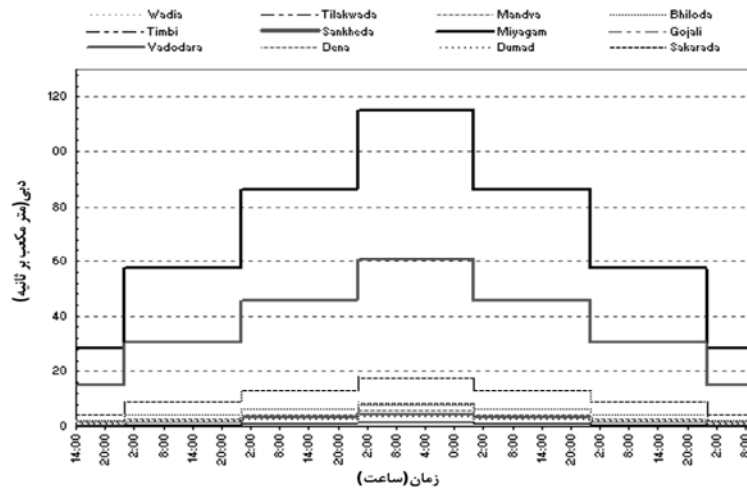
دبی آبریزها بین ۲۰ درصد تا ۸۰ درصد ظرفیت طراحی آنها در دو حالت افزایشی و کاهشی تغییر می یابد. اعمال تغییرات با زمان تناوب ۲۴ ساعت انجام گرفته که با توجه به روند بهره برداری موجود در کانال مورد مطالعه انتخاب گردیده است.

آبریزهای Miyagamhas و Timbi با ظرفیت طراحی ۱۴۳/۴۸ و ۱/۶۸ مترمکعب بر ثانیه، به ترتیب بیشترین و کمترین ظرفیت طراحی را بین آبریزهای کانال دارا می باشند. روند تغییرات رقوم سطح آب و دبی جریان عبوری از سازه های تنظیم کننده بازه ها در نتیجه اعمال اغتشاشات، می تواند در مطالعه پتانسیل سیستم کنترل و ارزیابی عملکرد آن مورد استفاده قرار گیرند.

سیستم کنترل با محاسبه و تغییر میزان بازشدگی سازه های تنظیم، رقوم سطح آب و دبی جریان سازه ها را در هر یک از بازه های کانال برای هر یک گزینه بهره برداری در حد مقادیر هدف تنظیم می نماید. شکل های ۸ و ۹، به ترتیب تغییرات شدت جریان عبوری و رقوم سطح آب بالادست سازه های تنظیم را در گزینه بهره برداری یک نشان می دهد.

محور افقی این شکل ها پارامتر زمان و محور قائم آنها به ترتیب دبی عبوری و رقوم سطح آب بالادست سازه های تنظیم را نمایش می دهد. در شکل های مورد نظر هر یک از منحنی های ارائه شده مربوط به یکی از سازه های تنظیم انتهای بازه های کانال بوده که با CR_i مشخص شده است. i شماره سازه تنظیم (یا بازه) را نشان می دهد. شکل های ۱۰ و ۱۱ نیز پارامترهای فوق را برای گزینه بهره برداری شماره سه به دست می دهد.

همانطور که در شکلها نیز مشخص است، میزان نوسانات حاصله از اعمال اغتشاشات (اجرای برنامه تحویل جریان) در گزینه بهره برداری شماره سه از شدت و زمان استهلاک بیشتری نسبت به گزینه بهره برداری شماره یک برخوردار می باشند.



شکل ۷. روند تغییرات دبی تحویلی به آبیگرهای مورد مطالعه

بازه‌ها از یک دقت کنترلی بسیار مناسبی برخوردار می‌باشند، لکن وضعیت کنترل جریان در بازه‌های شماره ۵ الی ۹ از وضعیت مناسبتری نسبت به سایر بازه‌ها برخوردار است.

به طور کلی می‌توان نتایج تحقیق را در بندهای ذیل خلاصه نمود:

✓ الگوریتم کنترل طراحی شده از دقت و پتانسیل کافی در کنترل جریان در طول کانال مورد مطالعه برخوردار بوده و امکان تحقق توزیع تقاضامدار و ارتقای راندمان سیستم توزیع کانال را فراهم می‌نماید.

✓ با توجه به ابعاد و ظرفیت طراحی کانال مورد مطالعه و نتایج ارزیابی عملکرد سیستم کنترل، می‌توان نتیجه گرفت که کنترل گره‌های مرکزی شرایط کنترلی مناسب و به تبع آن عملکرد قابل توجهی را برای سیستم‌های انتقال و توزیع امکان پذیر نموده و در بهبود فرآیند تنظیم و توزیع جریان شبکه‌های آبیاری نسبت به کنترل گره‌های محلی^۱ از توانمندی بیشتری برخوردار می‌باشند.

✓ اساسا توزیع و تحویل مناسب جریان به بهره‌برداران محلی در قالب فراهم نمودن شرایط مناسب کنترل و تنظیم جریان در سطح شبکه‌های آبیاری قابل دستیابی است.

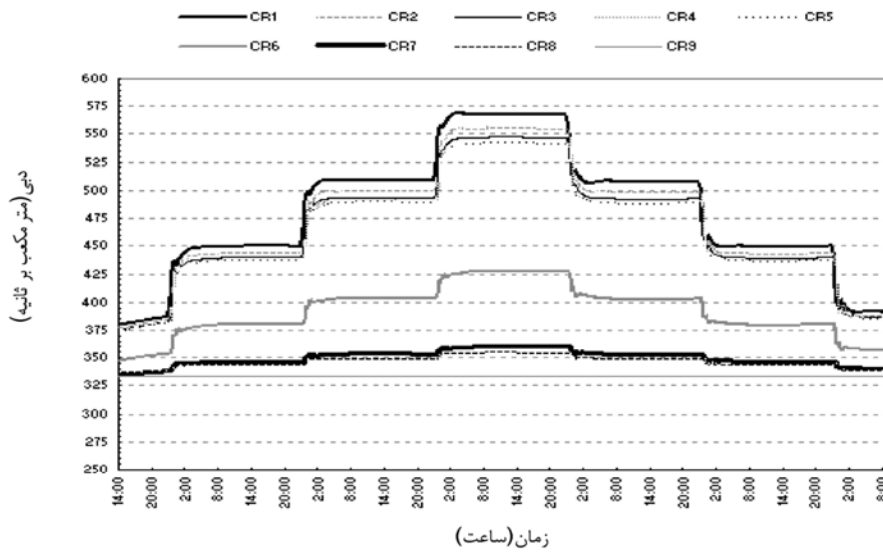
بکارگیری سیستم‌های کنترل خودکار هر چند در اجرا با مشکل سرمایه‌گذاری‌های بالای اولیه مواجه است لکن بعنوان یک ابزار کارآیی مدیریتی، امکان ارتقای راندمان تحویل و بهره‌برداری بهینه از ظرفیت شبکه‌های آبیاری کشور را که در حال حاضر به امری آرمانی مبدل گردیده، فراهم می‌نماید.

عملکرد نامناسب تحویل در سطح شبکه‌های آبیاری کشور بعنوان یکی از عوامل محدود کننده و ناکارآمدی شبکه‌ها مطرح بوده که متاسفانه از جمله موضوعاتی است که کمتر به آن پرداخته شده است.

به تعبیر دیگر با افزایش دبی بهره‌برداری کانال علاوه بر زمان تاخیر جریان در بازه‌ها، میزان نوسانات سطح آب و تغییرات دبی سازه‌ها بر اثر اعمال اغتشاشات در بازه‌های کانال نیز بیشتر است. روند تغییرات در دو حالت افزایش شدت جریان و کاهش آن وضعیتی مشابه دارند. وضعیت تغییرات رقوم سطح آب و دبی جریان سازه‌های تنظیم بیانگر آن است که مقادیر هدف هر یک از این دو پارامتر در هر یک از بازه‌ها و بر اثر اعمال هرگونه اغتشاش، با اجرای سیستم کنترل طراحی شده با دقت و سرعت بالایی قابل دستیابی است. نتایج شبیه سازی‌ها نشان می‌دهد وضعیت جریان هدف در هر گزینه بهره‌برداری در مدت زمانی در حدودی ۶ ساعت قابل دستیابی است. به بیان دیگر سیستم کنترل طراحی شده، دقت و سرعت بالایی در تنظیم رقوم سطح آب در بازه‌های کانال، تحلیل و استهلاک اغتشاشات به وجود آمده و کارآیی قابل توجهی در تحویل تقاضا مدار به بهره‌برداران را دارا می‌باشد. به منظور ارزیابی عملکرد سیستم کنترل در بهبود کارآیی سیستم توزیع جریان در کانال مورد مطالعه، شاخص‌های ارزیابی عملکرد سیستم کنترل مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به نتایج شبیه‌سازیها، میانگین و ماکزیمم مقدار شاخص‌های IAE ، MAE و IAQ برای هر بازه در طول مدت زمان شبیه‌سازی (۶ روز) محاسبه شدند. نتایج برای گزینه‌های بهره‌برداری یک الی سه بترتیب در جداول (۲) الی (۴) گزارش شده است. بررسی مقادیر کمی این شاخص‌ها نشان می‌دهد میزان نوسانات در بازه شماره دو نسبت به سایر بازه‌ها بیشتر می‌باشد. برای این بازه مقادیر ماکزیمم شاخص‌های IAE ، MAE و IAQ به ترتیب عبارتند از ۰.۱۰۷ ، ۰.۱۰۶ و ۰.۳۸ m^3/s و مقادیر میانگین شاخص‌ها بترتیب ۰.۰۹۷ ، ۰.۰۳۶ m^3/s می‌باشد.

این بازه کمترین مقدار زمان تاخیر را در بین بازه‌های کانال دارا می‌باشد. مقایسه مقادیر کمی شاخص‌ها نشان می‌دهد هر چند کلیه

¹ Local controllers

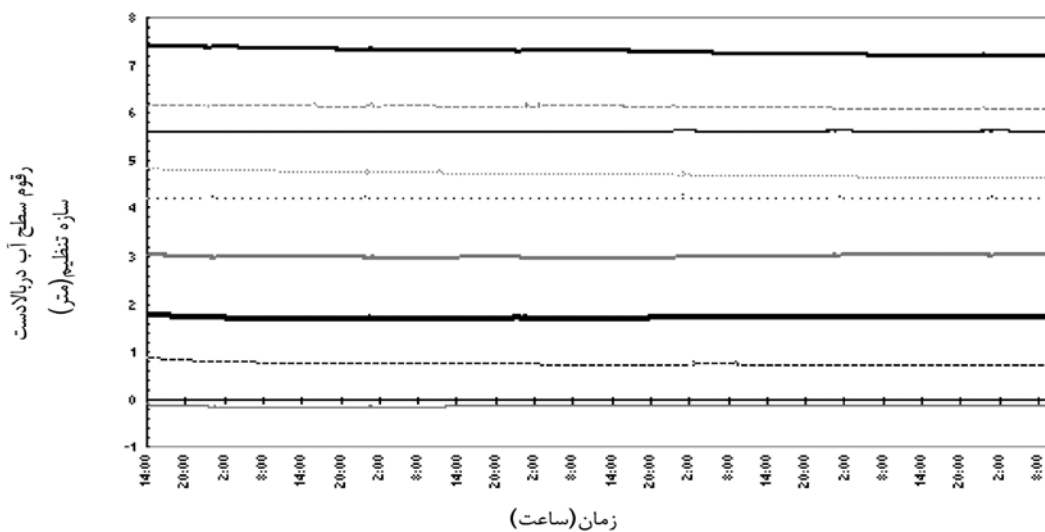


شکل ۸. تغییرات دبی سازه‌های مختلف تنظیم (گزینه بهره برداری شماره ۱)

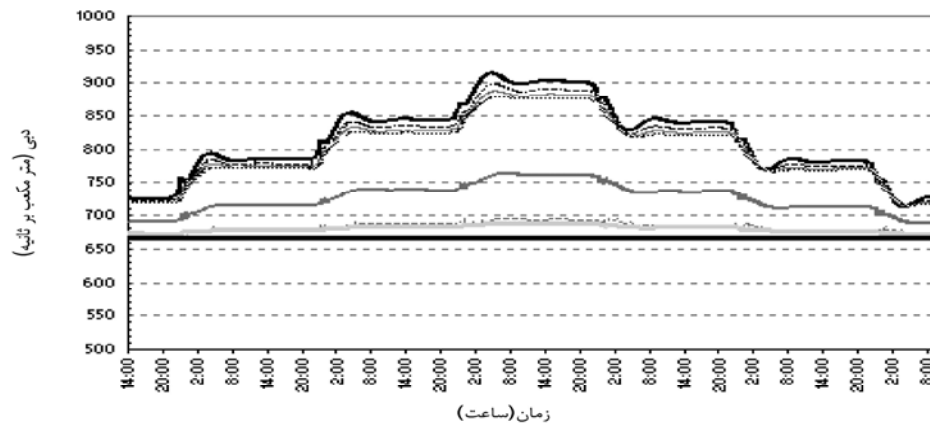
۴. سپاسگزاری

شبیه‌سازی‌های انجام شده با استفاده از مدل Sobek، در طول یک فرصت مطالعاتی که نویسنده اول در دانشگاه تیودلنت هلند داشته، انجام گرفته است. بدینوسیله از گروه علمی مدیریت آب و زمین دانشگاه تیودلنت که امکانات لازم در زمینه استفاده از مدل و سایر منابع علمی مورد نیاز تحقیق را در اختیار قرار داده‌اند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

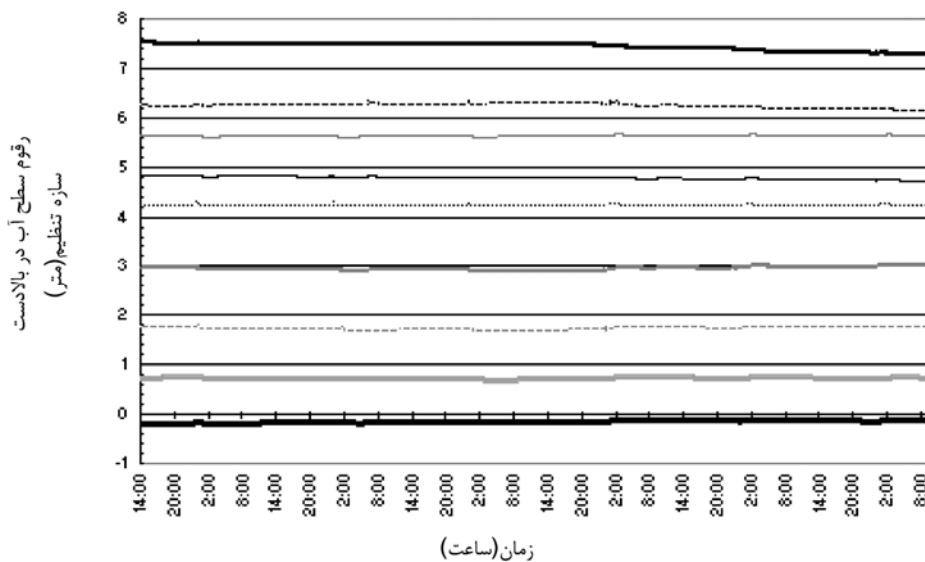
نظر به اینکه طراحی و اجرای سیستم‌های کنترل، رویکرد نه چندان دور و ضروری سالهای آتی در این عرصه خواهد بود، پرداختن به آن می‌تواند به عنوان زمینه فعالیت‌های تحقیقاتی اولویت دار محققین بخش آب کشور مطرح باشد. بی‌شک در این راستا تکنیک و الگوریتم کنترل طراحی شده در این تحقیق، به عنوان یکی از کارآترین و جدیدترین تکنیکها و الگوریتم‌های کنترل کاربردی در شبکه‌های آبیاری قابل توصیه می‌باشد. اجرای این سیستم در شبکه‌هایی که به صورت دستی بهره برداری می‌شوند، از اولویت و ضرورت بیشتری برخوردار است.



شکل ۹. تغییرات رقوم سطح آب در بالادست هر یک از سازه‌های تنظیم (گزینه بهره برداری شماره ۱)



شکل ۱۰. تغییرات دبی سازه های مختلف تنظیم (گزینه بهره برداری شماره ۳)



شکل ۱۱. تغییرات رقوم سطح آب در بالادست هر یک از سازه های تنظیم (گزینه بهره برداری شماره ۳)

جدول ۲. مقادیر کمی شاخص های ارزیابی گزینه بهره برداری شماره ۱

شماره بازه	MAE(%)		IAE(%)		IAQ(m ³ /s)	
	میانگین در ۶ روز		میانگین در ۶ روز		میانگین در ۶ روز	
	ماکزیمم	میانگین	ماکزیمم	میانگین	ماکزیمم	میانگین
1	2.6	1.3	2.6	1.3	0.37	0.33
2	10.5	9.5	10.4	9.23	0.4	0.36
3	0.01	0.6	0.6	0.6	0.31	0.24
4	3.8	2.9	3.8	2.9	0.29	0.24
5	0.03	0	0.01	0.01	0.01	0.01
6	3.8	0.1	0.61	0.3	0.2	0.16
7	0.9	0.7	0.96	0.58	0.14	0.13
8	1.2	0.2	1.2	0.2	0.19	0.17
9	0.9	0.4	0.6	0.4	0.01	0

جدول ۳. مقادیر کمی شاخص‌های ارزیابی گزینه بهره برداری شماره ۲

شماره بازه	MAE(%)		IAE(%)		IAQ(m ³ /s)	
	میانگین در ۶ روز		میانگین در ۶ روز		میانگین در ۶ روز	
	ماکزیمم	میانگین	ماکزیمم	میانگین	ماکزیمم	میانگین
1	3.1	2	3.1	2.1	0.4	0.32
2	9.8	8.7	9.82	8.3	0.49	0.37
3	0.8	0.7	0.7	0.62	0.33	0.29
4	3.8	3.2	3.8	3.2	0.27	0.21
5	0.03	0	0.01	0.01	0.02	0.01
6	0.5	0.4	1	0.44	0.24	0.2
7	0.8	0.6	1	0.55	0.19	0.14
8	0.4	0.1	0.3	0.16	0.19	0.16
9	0.9	0.3	0.8	0.35	0.01	0.01

جدول ۴. مقادیر کمی شاخص‌های ارزیابی گزینه بهره برداری شماره ۳

شماره بازه	MAE(%)		IAE(%)		IAQ(m ³ /s)	
	میانگین در ۶ روز		میانگین در ۶ روز		میانگین در ۶ روز	
	ماکزیمم	میانگین	ماکزیمم	میانگین	ماکزیمم	میانگین
1	2	0.7	2.2	0.8	0.32	0.25
2	10.7	10	10.6	9.7	0.38	0.36
3	0.6	0.6	0.7	0.58	0.24	0.22
4	4	2.7	3.9	2.6	0.22	0.2
5	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0.01
6	0.4	0	0.4	0.21	0.14	0.1
7	0.9	0.6	0.8	0.62	0.1	0.08
8	1.6	0.1	1.6	0.25	0.14	0.12
9	0.9	0.4	0.9	0.45	0	0

مراجع

- [8] Tomicic, B., *A general optimization modules for real-time control of surface water resources*. Master of Science, IHE, Delft university, The Netherlands, 1989.
- [9] Lin, Z., and Manz, D.H., "Optimal operation of irrigation canal systems using nonlinear programming – dynamic simulation model." Cemagref – IIMI International Workshop, Montpellier, October, 1992, pp 297-306.
- [10] Baume, J.P., Sally, H., Malaterre, P.o., and Rey, J., *Development and field-installation of a mathematical simulation model in support of irrigation canal management*. IIMI-Cemagraf Research paper, 1993, 89p.
- [11] Molina, L.S., and Miles, J.P., "Control of an irrigation canal." Journal of hydraulic engineering, 122(7), 1996, pp 403-410.
- [12] Clemmens, A.J., Kacerek, T., Grawitz, B. and Schuurmans, W., "Test cases for canal control algorithms." J. Irrig. Drain. Eng., Vol.24, No.1, 1998, 23-30.
- [13] Clemmens, A.J., and Schuurmans, J., "Simple optimal downstream feedforward canal controllers: Theory." J. Irrig. Drain. Eng., Vol.130, No.1, 2004, ASCE.
- [14] Schuurmans, J., *Control of water levels in open channels*. Ph.D. thesis, Delft Univ. of Technology, Civil Engineering Faculty, Water Management Dept. 1997.
- [1] Burt, C.M., Styles, S., "Modern water control and management practices in irrigation: impact on performance." Proceedings of the fifth International ITIS network meeting on modernization of irrigation system operations, India, 1998, 28-30 October.
- [2] Rogers, D.C., and Goussard, J., "Canal control algorithms currently in use." J. Irrig. Drain. Eng., 124(1), 1998, 31-39.
- [3] Malaterre, P.O., Roggers, D.C., and Schuurmans, J., "Classification of canal control algorithm." J. Irrig. Drain. Eng., Vol.124, No.1, 1998, ASCE.
- [4] Kosuth, P., Roux, A., Lafaysses, J.L., "Use of a simulation model to improve operation of dam-river systems for irrigation purpose: elements for methodology. Cemagref-IIMI International workshop, Montpellier, October 1992.
- [5] Rodellar, J., Gomez, M. and Bonet, L., "Control method for on-demand operation of open-channel flow." J. Irrig. Drain. Eng., Vol.119, No.2, 1993, pp 225-241.
- [6] Liu, F., Feyen, J., and Berlamont, J., "computation method for regulating unsteady canals" J. Irrig. Drain. Eng., Vol.120, No.3, 1992, pp 674-689.
- [7] Falvey, H.T., "Philosophy and implementation of Gate Stroking." Proceeding ASCE Portland, Zimbelman D.D.(ed) 1987.

[16] Schuurmans, J., Clemmens, A.J., Dijkstra, S., Hof, A., and Brouwer, R., “*Modeling of irrigation and drainage canals for controller design.*” J. Irrig. Drain. Eng., 125(6), 1999, pp.338-344.

[15] WL/Delft Hydraulic, Sobek Manual and Technical Reference, The Netherlands. 2000.