بررسی میزان اثربخشی دو راهبرد «پوشش‌دار کردن» و «خودکارسازی بهره‌برداری» در کاهش میزان تلفات انتقال و توزیع آب در کانال اصلی آبیاری، مورد مطالعاتی کانال اصلی مغان

سروش برخورداری، سید مهدی هاشمی شاهدانی* و احد باقرزاده خلخالی[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱/۲۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۸/۷)

چکیده

تلفات ناشی از تراوش و بهره‌برداری دو عامل اصلی کاهش راندمان انتقال و توزیع در کانال‌های آبیاری است. این پژوهش به بررسی میزان تأثیر دو راهکار پوشش و خودکارسازی به‌عنوان راهکارهای کاربردی کاهش تلفات پرداخته است. برای تحقق هدف مذکور، با استفاده از مدل Seep/w کاهش میزان نشت در طول کانال خاکی مغان، با استفاده از راهکار پوشش‌دار کردن مورد بررسی قرار گرفت. همچنین شبیه‌سازی بهره‌برداری این کانال با استفاده از مدل هیدرودینامیک ICSS در دو حالت بهره‌برداری موجود و سامانه کنترل خودکار پیش‌بین (MPC) با هدف بررسی بهبود توزیع آب انجام شد. نتایج پژوهش حاکی از توانایی ۱۰ درصدی به کارگیری پوشش در کاهش تلفات نشت بود. همچنین ارزیابی بهره‌برداری قبل و بعد از به کارگیری اتوماسیون مشخص کرد که کنترل‌گر علاوه بر کاهش ۱۵ درصدی تلفات بهره‌برداری، فرآیند توزیع و تحویل را نیز به نحو مطلوبی بهبود داده است. به‌طوری که حداقل مقادیر محاسبه شده شاخص راندمان و کفایت تحویل آب در امتداد بازه‌های کانال، به‌ترتیب برابر ۱۰۰ و ۸۳ درصد حاصل شده است. علیرغم محدودیت‌های مالی و ملاحظات اجرائی در پیاده‌سازی پروژه‌های مدرن‌سازی و بهسازی شبکه‌های آبیاری، به کارگیری دو راهبرد پیشنهادی به‌صورت مجزا و یا همزمان، بسته به اهداف مدیران شبکه و نیز پتانسیل هر راهبرد در کاهش تلفات انتقال و توزیع توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی نشت، تلفات انتقال و توزیع، بهره‌برداری کانال اصلی، اتوماسیون

۱. گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mehdi.hashemy@ut.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

خشکسالی‌های متوالی سبب شده است تا در بیشتر مناطق تحت آبیاری، امکان تأمین آب متناسب با کل مقدار مورد تقاضا فراهم نشود و بر این اساس مسئله اصلی مدیران شبکه‌های آبیاری، بهره‌گیری بهینه از منابع آب تأمین شده است. در حقیقت، با توجه به ارزش اقتصادی آب و هزینه بالای تأمین و توزیع آن در شبکه‌های آبیاری، بهره‌برداری هدفمند از منابع آب ضروری است (۱). رسیدن به این مهم با دو راهکار مدیریت تأمین محور، با تمرکز بر شناسایی منابع جدید آب و تأمین آب کافی مورد نیاز شبکه‌های آبیاری و مدیریت تقاضا محور، با هدف کاهش تلفات موجود در اجزای مختلف شبکه‌های آبیاری، قابل دستیابی است. با توجه به تشدید دوره‌های خشکسالی و کاهش میزان بارندگی سالانه در دهه اخیر (۲۸) و نیز افزایش تعداد دشت‌های ممنوعه و وضعیت بحرانی آب زیرزمینی در برخی دشت‌ها و محدوده‌های شبکه‌های آبیاری (۱۰)، راهکار تأمین محور نتوانسته پاسخی مطمئن و قابل اعتماد برای مشکل مذکور باشد، بنابراین تمرکز رویکردهای مدیریتی از مدیریت عرضه به مدیریت تقاضا تغییر کرده است.

با وجود کاهش مصرف آب در مزارع با به‌کارگیری رویکردهای نوین در مدیریت فعالیت‌های درون‌مزرعه‌ای آب (۱۷)، با وجود بهره‌برداری سنتی از کانال‌های آبیاری، در عمل در کاهش مقدار آب تحویلی به مزارع تفاوتی ایجاد نمی‌شود. به‌عبارت دیگر لازم است بین مدیریت بهره‌برداری کانال‌های آبیاری به‌منظور بهبود عملکرد در سامانه انتقال، توزیع و سامانه‌های مدرن آبیاری داخل مزارع رابطه متقابلی وجود داشته باشد (۷). پیاده‌سازی موفق راهکارهای بهبود عملکرد در سامانه‌های انتقال، توزیع و تحویل آب، مستلزم شناخت صحیح از اجزای یک شبکه آبیاری و همچنین بررسی دقیق میزان پتانسیل بهبود عملکرد هر جزء است. شبکه‌های آبیاری متشکل از شبکه اصلی (کانال‌های درجه یک و دو) و شبکه فرعی (کانال‌های درجه دو وسه) به‌ترتیب نقش انتقال آب تا سر مزارع و توزیع آن در داخل مزارع را بر عهده دارند. بخش قابل توجهی از تلفات در سامانه‌های اصلی انتقال و توزیع آب کشاورزی، شامل نشت از کانال‌های روباز انتقال آب با پوشش خاکی و نیز پوشش‌های بتنی مشکل‌دار (۲۳) و تلفات مربوط به بهره‌برداری نادرست سازه‌های کنترل و تنظیم و نیز سازه‌های آبگیری (۱۵) محدود می‌شود. بنابراین، ارائه راهکارهای مدیریتی به‌منظور کاهش تلفات در سامانه‌های انتقال و توزیع در شبکه‌های آبیاری باید معطوف به کاهش نشت در مسیر کانال‌های آبیاری و نیز ارتقا روش‌های بهره‌برداری سازه‌های کنترل و آبگیری شود. به‌منظور بهره‌وری بهینه از آب، اطلاع از میزان نرخ نشت در کانال‌های آبیاری لازم است (۱۸).

میزان تلفات تراوش در کانال‌های آبیاری ایران به نقل از نشریه شماره ۲۸۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، در شبکه کانال‌های آبیاری بدون پوشش بین ۱۵ تا ۲۵ درصد و برای شبکه کانال‌های دارای پوشش بین ۵ تا ۱۵ درصد است (۳). طی پژوهشی که توسط معاون شهیدی و همکاران در منطقه‌ای در استرالیا انجام شد، مشخص شد که بین ۱ تا ۱۴ درصد از کل آب وارد شده به کانال اصلی آبیاری بدون پوشش به‌دلیل نشت تلف می‌شود (۱۴). همچنین مطالعه توسط کینزلی و همکاران نشان داد که کانال‌های خاکی واقع شده در دره تگزاس می‌توانند بیش از ۴۰ درصد حجم آب انحرافی را توسط پدیده نشت از دست دهند (۱۱). نیوتون و پرلی مقدار تلفات آب را برای یک کانال خاکی به طول ۸/۲ کیلومتر، ۲۵ درصد تعیین و حجم تلفات را در مدت ۲۱۰ روز فصل آبیاری ۱۱/۹ میلیون مترمکعب تعیین کردند و به این نتیجه رسیدند که با کنترل تلفات حدود ۳۰ تا ۴۵ درصد از آب مصرفی کاسته می‌شود (۱۶).

بنابراین با توجه به مقادیر قابل توجه گزارش‌شده تلفات تراوش در کانال‌های آبیاری، مشخص است که حجم قابل‌توجهی از آب منحرف‌شده برای مقاصد آبیاری هرگز به‌دلیل نشت از کانال‌ها به‌ویژه کانال‌های خاکی به زمین‌های کشاورزی نمی‌رسد. علاوه‌بر تلفات تراوش، بخش دیگری از تلفات ناشی از بهره‌برداری نادرست سازه‌های تنظیم و آبگیرها در حین انتقال، کنترل و تنظیم سطح آب و نیز طی فرایند

www.SID.ir

Archive of SID

توزیع آب تا سر مزارع رخ می‌دهد. تلفات مذکور عموماً به تجهیزات شبکه، شرایط نگهداری از شبکه، مهارت کادر بهره‌برداری و امکانات بازرسی و تعمیرات به‌موقع به لحاظ پرسنل، ماشین‌آلات و مصالح بستگی دارد. میزان تلفات مذکور با توجه به مدیریت بهره‌برداری، برای شبکه‌های آبیاری مدرن ایران حدود ۵ تا ۱۰درصد گزارش شده است (۳). طی پژوهشی توسط سرا و همکاران در یک شبکه آبیاری واقع در اسپانیا انجام شد، مشخص شد که بیش از نیمی از (۵۵ درصد) آب عرضه‌شده به‌دلیل مدیریت ضعیف بهره‌برداری و نگهداری شبکه انتقال و نیز از کار افتادگی زیرساخت‌های مربوط به آن از شبکه اتلاف می‌شود (۲۰). همچنین با مطالعه‌ای که توسط اجید و همکاران روی چهار منطقه از اتیوپی با طرح‌های آبیاری متفاوت در قالب سه شیوه مدرن، نیمه‌مدرن و سنتی انجام شد، مشخص شد که از نظر میزان تحویل آب در سه طرح مذکور بر اساس شاخص FRD (Farm Relative Delivery)، مقدار این شاخص برای سه طرح مدرن، نیمه‌مدرن و سنتی به‌ترتیب ۲/۲۱، ۱/۰۱ و۰/۵۹گزارش و نتیجه‌گیری شد که عامل ایجاد بازدهی کم و به‌دنبال آن ایجاد بی‌عدالتی در توزیع آب، عملیات ضعیف بهره‌برداری، سازه‌های آسیب‌دیده و توسعه زیرساخت‌های آبیاری بدون برنامه‌های مدیریتی مناسب است (۲). مدیریت هوشمند انتقال و تحویل آب آبیاری با خودکارسازی سازه‌های کنترل و تنظیم سطح آب، یکی از اقدام‌های جدی در کاهش مؤثر تلفات بهره‌برداری کانال‌های آبیاری است (۹). برای تحقق این مهم، با تلفیق مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در کانال آبیاری با روش‌های خودکارسازی مرسوم در مهندسی کنترل، مطالعات مختلفی در مورد بهبود شیوه بهره‌برداری در کانال‌های آبیاری انجام گرفته است.

زمانی و همکاران طی پژوهشی با استفاده از مدل هیدرودینامیک SOBEK و نرم‌افزار MATLAB طراحی و ارزیابی سامانه کنترل سراسری پایین‌دست فاصله‌دار PI (تناسبی-انتگرالی)، برای یک کانال اصلی را مورد بررسی قرار داد و نتیجه شد که شیب کف کانال به‌عنوان یک عامل بیشترین تأثیر را روی رفتار جریان و تنظیم کنترل‌گر مد نظر دارد (۲۹). طی پژوهشی که توسط ساوری و همکاران انجام شد با مقایسه نتایج حاصل از کاربرد روش‌های دستی مرسوم و روش فازی FSL در تعیین دستورالعمل مناسب بهره‌برداری کانال موجود در شبکه آبیاری عقیلی واقع در جنوب غرب ایران، نتیجه شد که اگرچه شاخص‌های راندمان و کفایت در شرایط نرمال بهره‌برداری برای هر دو روش بیش از ۹۰ درصد و خطای سطح آب نیز کمتر از ۱۰ درصد است ولی در شرایط کمبود آب (خشکسالی) روش FSL با نتایج بهتری قادر به توزیع عادلانه آب در بین مصرف‌کنندگان خواهد بود (۱۹).

با توجه به معضل همیشگی ملاحظات اجرایی و از آن مهم‌تر محدودیت اعتبارات مالی شبکه‌های آبیاری در نوسازی، به‌سازی و مدرن‌سازی شبکه‌های آبیاری، لازم است تا میزان کارایی راهبردهای مختلف مشخص شود تا مدیران شبکه قادر باشند از بین راهبردها و روش‌های مختلف، روش مناسب را با آگاهی از میزان توانایی و پتانسیل هر روش در کاهش تلفات مذکور انتخاب کنند. بنابراین، این پژوهش با هدف کاهش تلفات آب در سامانه‌های انتقال، توزیع و تحویل آب کشاورزی در شبکه‌های آبیاری اقدام به بررسی میزان اثربخشی دو راهکار «پوشش‌دار کردن کانال‌ها» با پوشش بتنی و «خودکارسازی سامانه‌های اصلی انتقال و توزیع» در کاهش تلفات در شبکه‌های آبیاری کرده است.

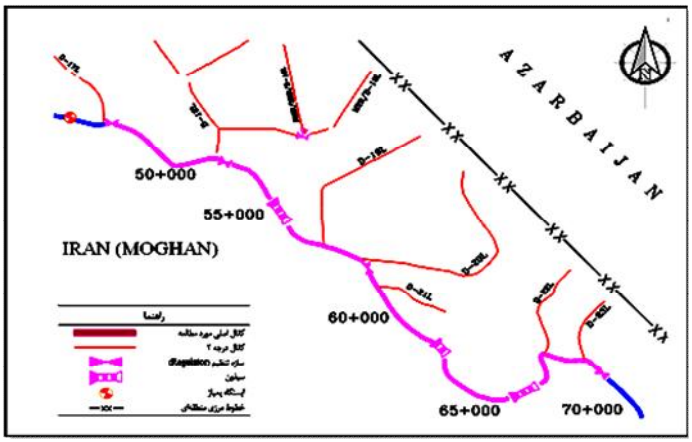
مواد و روش‌ها

مشخصات کانال مورد استفاده

کانال اصلی شبکه آبیاری دشت مغان از انتهای حوضچه‌های رسوب‌گیر سد انحرافی میل و مغان، به‌وسیله هشت دریچه کشویی با بیشترین دبی ۸۰ مترمکعب بر ثانیه در شرایط گشودگی کامل تغذیه می‌شود. کانال مورد مطالعه در این پژوهش در مسیر بعد از دریاچه و در موقعیت مربوط به کیلومتراژ حدود ۴۶ تا ۷۰ (با عنوان کانال اصلی بیله‌سوار) واقع شده است. در شکل ۱ موقعیت منطقه و کانال اصلی مورد

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱. پلان کانال مورد مطالعه در این پژوهش

مطالعه در این پژوهش نشان داده شده است. بر اساس مصاحبه صورت گرفته با مدیران بهره‌برداری این شبکه، مشخص شد که کانال مذکور، به‌عنوان یکی از مناطق بحرانی از نظر تلفات نشت به‌شمار می‌رود. بالا بودن رقوم نشت در کانال به سبب خاکی بودن کانال و نیز در مقایسه با ابعاد نسبتاً کوچک آن که در برخی موارد حتی از استاندارد FAO (۰/۱ مترمکعب در شبانه‌روز در مترمربع) نیز بزرگ‌تر است، باعث زهدار شدن اراضی به‌ویژه در این محدوده می‌شود. از طرفی نیز مشکلات فزاینده بهره‌برداری به سبب رشد نی و علف هرز در بدنه اصلی کانال و در محل آبگیر کانال‌های درجه دو باعث رسوب‌گذاری در بستر کانال خواهد شد و کاهش ظرفیت کانال و آبگیرها و به‌دنبال آن کاهش عملکرد مؤثر سازه‌های موجود در مسیر را باعث می‌شود، که حاکی از این مطلب است (۵).

مشخصات هندسی و هیدرولیکی کانال مورد بررسی در این پژوهش که بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده از دفتر بهره‌برداری شبکه مغان حاصل شده است، در جدول ۱ ارائه شده است:

شایان ذکر است که پروفیل‌های زمین‌شناسی در این بخش از کانال اصلی نشان دهنده این است که جنس خاک بیشتر از نوع رسی و قسمت عمده‌ای از طول کانال در خاکبرداری احداث شده است (۵).

محاسبه هیدرولیکی دبی نشت

بر اساس قانون دارسی دبی نشت از رابطه زیر پیروی می‌کند (۱۸):

$$q = -KA\frac{h}{L} \qquad (۱)$$

که در آن q دبی نشت (مترمکعب بر ثانیه)، K هدایت هیدرولیکی خاک (متر بر ثانیه)، A سطح مقطع جریان آب در خاک (مترمربع) و $\frac{\partial h}{\partial L}$ گرادیان (شیب) هیدرولیکی جریان است. معادله حاکم بر جریان آب در محیط متخلخل معادله پوآسون است که شکل تعمیم‌یافته معادله معروف لاپلاس است:

$$K_x\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}+K_y\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}=q \qquad (۲)$$

که در آن K_x و K_y به‌ترتیب هدایت هیدرولیکی خاک در دو جهت افقی و قائم (متر بر ثانیه)، h پتانسیل آب در خاک (متر) و q دبی جریان ورودی به توده خاک (مترمکعب بر ثانیه در واحد سطح) است. اگر دبی ورودی به توده خاک وجود داشته باشد علامت مثبت و برعکس چنانچه دبی خروجی از توده خاک وجود داشته باشد، علامت q منفی خواهد بود.

روش‌های عددی، زمینه‌ای برای حل معادلات دیفرانسیل و تبدیل آنها به مجموعه‌ای از معادلات جبری است. با استفاده از کامپیوتر می‌توان مجموعه بزرگی از معادلات جبری را به‌وسیله تکنیک‌هایی با عنوان روش‌های تکراری و یا روش‌های ماتریسی حل کرد. از جمله نرم‌افزارهایی که برای حل معادله پوآسون با استفاده از روش المان محدود استفاده می‌شود، نرم‌افزار Seep/w است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱. مشخصات هندسی و هیدرولیکی کانال

شماره بازه	نوع سازه تنظیم	تعداد آبگیر	مجموع دبی آبگیری (متر مکعب بر ثانیه)	عمق نرمال در انتهای بازه (متر)	عرض کف (متر)	شیب جداره (متر بر متر)	شیب طولی (متر بر متر)
۱	دریچه کشویی	۱	۰/۵	۱/۷۳	۴	۱/۵	۰/۰۰۰۳۳
۲	دریچه کشویی	۱	۳	۱/۶۴	۳	۱/۵	۰/۰۰۰۳۳
۳	دریچه کشویی	۲	۱/۹	۱/۴۳	۳	۱/۵	۰/۰۰۰۳۳
۴	دریچه کشویی	۳	۲/۱	۱/۲	۳	۱/۵	۰/۰۰۰۳۳

مدل‌سازی نشت آب از بستر کانال شبکه آبیاری مغان در مدل Seep/w

نرم‌افزار Seep/w از جمله برنامه‌های ژئوتکنیکی مبتنی بر المان محدود و یک مدل‌ساز عددی از سری مجموعه‌های نرم‌افزار Geo-Studio است که توانایی مناسبی در ترسیم گرافیکی شبکه جریان، توزیع پتانسیل فشار و سطح آزاد جریان داخل پروفیل خاک دارد. با توجه به قابلیت بالای نرم‌افزار Seep/w، مدل‌سازی نشت آب از بدنه کانال خاکی موردنظر توسط این نرم‌افزار انجام گرفت. برای این مهم، پس از جمع‌آوری اطلاعات اولیه، مسئله در مدل تعریف شد. پس از تعریف شبکه‌بندی و مصالح بستر، شرایط مرزی در مدل تعریف شد. شرایط مرزی اول مربوط به نقاط داخل کانال است که زیر بار آب قرار گرفته‌اند، به این نقاط مقادیری از بار کلی برابر ارتفاع سطح آب داخل کانال نسبت به تراز سطح مبنا تعلق گرفت. شرط مرزی دوم مربوط به نقاط همتراز سطح ایستابی است که به این نقاط بار فشاری صفر نیز تعلق گرفت. شایان ذکر است که به‌علت وضعیت حاکم بر اراضی دشت مغان، وجود زهکش‌های سطحی و ارتفاع قرارگیری کانال نسبت به اراضی مجاور؛ عمق سطح سفره آب زیرزمینی بسیار پائین‌تر از ترازهای مدل‌سازی است (بیشتر از پنج برابر عمق کانال).

پس از محاسبه و مدل‌سازی نشت برای کانال مورد مطالعه این پژوهش با استفاده از مدل مذکور، برای کنترل و صحه‌گذاری (واسنجی) نتایج، ارزیابی مقادیر نشت با مقادیر اندازه‌گیری‌شده به روش مستقیم جریان ورودی و خروجی (inflow-outflow) نیز مدنظر قرار گرفته است. در این راستا مقادیر اندازه‌گیری شده نشت در طول کانال اصلی که در طی مدت ۱۵ ماه (۵) انجام شده، استفاده شد. بر پایه آزمون‌های نفوذپذیری، ضرایب هدایت هیدرولیکی خاک بستر پیشتر تعیین شده بودند؛ لیکن به‌منظور اعمال ناهمگنی در طول کانال، آنالیزهای مقایسه‌ای تراوش در راستای صحت‌سنجی مقادیر نشت مدل‌سازی با نشت اندازه‌گیری شده(واقعی) انجام پذیرفتند و بر پایه آنها، مقدار ضریب نفوذپذیری معادل برای خاک در طول مسیر کانال $۶/۵\times۱۰^{-۷}$ متر بر ثانیه تعیین و انتخاب شده است. با توجه به این موضوع که عمق آب، مشخصات هندسی سطح مقطع کانال و ویژگی‌های مصالح در امتداد کانال از جمله پارامترهای تأثیرگذار در میزان نشت به‌حساب می‌آیند، بنابراین بازه مورد نظر به هفت بازه تقسیم شد و مقادیر نشت به تفکیک برای هر کدام از بازه‌ها به‌دست آمد.

میزان نشت با استفاده از مدل Seep/w در محدوده کانال مورد مطالعه ابتدا برای حالت بستر بدون پوشش (خاکی) تعیین شده است. پس از آن براورد میزان نشت، با به‌کارگیری پوشش سطحی روی کانال انجام شده تا تأثیر این پوشش بتنی در کاهش تلفات انتقال بررسی شود. شایان ذکر است که کالیبراسیون مدل براورد نشت تهیه شده در Seep/w بر اساس اطلاعات اندازه‌گیری شده در امتداد طول کانال اصلی انجام گرفته است که این مقادیر در گزارش مربوط به مطالعات تکمیلی کنترل نشت شبکه آبیاری مغان که در سال ۱۳۸۳ گردآوری شده، ارائه شده است.

سامانه کنترل خودکار بهره‌برداری کانال اصلی آبیاری مغان

یک سیستم کانال روباز را می‌توان با لحاظ کردن عوامل

www.SID.ir

Archive of SID

محدودکننده، به‌ویژه محدودیت ظرفیت سازه‌ها و کانال‌های انتقال، با بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی به طور مؤثرتری کنترل کرد. با توجه به اینکه سامانه‌های اصلی انتقال و توزیع آب آبیاری شبکه گسترده‌ای از کانال‌ها و سازه‌های متعدد هستند، مجموعه کانال‌های شبکه آبیاری دارای یک سیستم پیچیده با اغتشاشات هیدرولیکی با منشا متفاوت هستند و لازم است از سامانه‌های کنترل خودکار به جای روش‌های بهره‌برداری ناکارامد سنتی استفاده شود (۲۵). در راستای رسیدن به این هدف روش‌های متفاوت بهره‌برداری با استفاده از الگوریتم‌های کنترل کلاسیک و مدرن استفاده شده است (۱۲). در این پژوهش، روش کنترل پیش‌بین MPC (Model Predictive Control) با قابلیت حل مسائل کنترل چندمتغیره، در نظر گرفتن محدودیت‌های محرک‌های سیستم، امکان بهره‌برداری نزدیک‌تر به محدودیت‌های فیزیکی و به‌روزرسانی سریع (۲۴) به‌عنوان روش مناسب بهره‌برداری خودکار کانال اصلی مغان در نظر گرفته شده است.

کنترل پیش‌بین روابط ریاضی حاکم بر هیدرولیک کانال آبیاری (یا هر سیستم آبی دیگری) را باعنوان مدل داخلی برای پیش‌بینی رقوم سطح آب در بازه‌های کانال استفاده می‌کند. با بهره‌گیری از روابط هیدرولیکی مذکور، پارامتر هیدرولیکی رقوم سطح آب برای گام‌های زمانی آتی پیش‌بینی می‌شود. این امکان که با عنوان افق پیش‌بینی معرفی شده است، کنترل‌گر را قادر می‌سازد که فرامین کنترلی (منظور تنظیم سازه‌های کنترل سطح آب) در زمان حال را با در نظر گرفتن وقایعی که در آینده نزدیک رخ می‌دهد، صادر کند. مدل داخلی با به‌کارگیری ورودی‌هایش که عبارت‌اند از: اغتشاشات حال و آینده و اقدامات کنترلی حال و آینده، اقدام به تعیین خروجی‌ها که همان وضعیت جریان و تراز سطح آب در زمان حال و آینده است، می‌کند. برای این منظور معمولاً از مدل‌های خطی ساده شده در طراحی کنترل‌گر MPC استفاده می‌شود (۲۶). عمل خطی‌سازی مدل داخلی در MPC در هر گام زمانی در فرایند غیرخطی متغیرها در طول افق کاهشی انجام می‌شود (۸). در کنترل سیستم آبی به روش MPC از مدل‌های فضای حالت که امکان فشرده‌سازی فرمولاسیون چندمتغیره مدل‌های خطی را مهیا می‌کنند، برای بیان مدل داخلی استفاده می‌شود. مدل فضای حالت استفاده شده در سیستم کانال‌ها را می‌توان در حالت کلی به فرم زوج معادله (۳) بیان کرد (۲۴).

$$x(k+1) = A(k).x(k) + B_u.u(k) + B_d.d(k)$$
$$y(k) = C.x(k) \qquad (۳)$$

در این معادله x وضعیت جریان در کانال که اغلب سطح آب در نقاط هدف است را نشان می‌دهد. u اقدام کنترلی محاسبه شده به‌وسیله کنترل‌گر (میزان تغییر جریان)، d اغتشاشات پیش‌بینی شده، y خروجی سیستم آبی مدل شده است که از اندازه‌گیری‌های سیستم واقعی استفاده می‌کند و k نیز شاخص گام زمانی است. پارامترهای A، B_u، B_d و C ضرایب معادلات هستند که به‌ترتیب عبارت‌اند از: ماتریس سیستم (نمایی از ضرایب معادلات جریان)، ماتریس ورودی ضرایب کنترل، ماتریس ورودی ضرایب اغتشاشات و ماتریس ضرایب خروجی. با تعریف h_{ref} به‌عنوان عمق هدف و تعریف خطا به فرم رابطه (۴) و جایگذاری آن در معادله (۵) می‌توان رابطه میزان خطا در هر بازه کانال را بر اساس جریان ورودی و جریان‌های خروجی محاسبه کرد. مدل تهیه شده ماتریسی فضای حالت مربوط به بازه اول کانال آبیاری مغان، مطابق با رابطه (۵) آورده شده است:

$$e(k) = h(k) - h_{ref} \qquad (۴)$$

(۵)

$$\begin{bmatrix} Q_{hg}(k+1) \\ Q_{hg}(k) \\ Q_{hg}(k-1) \\ Q_{hg}(k-2) \\ e_1(k+1) \\ e_1^*(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{T_c}{A_s} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{T_c}{A_s} & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_{hg}(k) \\ Q_{hg}(k-1) \\ Q_{hg}(k-2) \\ Q_{hg}(k-3) \\ e_1(k) \\ e_1^*(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta Q_{hg}(k) \\ u_1^*(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{T_c}{A_s} \\ -\frac{T_c}{A_s} \end{bmatrix} \cdot \left[Q_{off-take1}(k) \right]$$

$$\Delta Q_{hg}(k) \pounds \Delta Q_{hg,max}(k)$$

$$u_1^*(k) \geq h_{min}(k) - h_{ref}$$

$$u_1^*(k) \pounds h_{max}(k) - h_{ref}$$

که در این رابطه $Q_{hg}(k)$، $Q_{hg}(k-1)$، $Q_{hg}(k-2)$ و $Q_{hg}(k-3)$ به‌ترتیب دبی‌های کنترلی رها شده از سازه تنظیم سراب کانال در گام‌های زمانی k تا k-۳ است. زمان تأخیر بین ورود آب از سراب تا تغییر ایجاد شده رقوم سطح آب در انتهای پایین‌دست

www.SID.ir

Archive of SID

اولین بازه کانال مورد مطالعه برابر سه گام زمانی است. $e_1(k)$ خطای محاسبه شده از رابطه (۵) برای بازه اول کانال، $e_1^*(k)$ و $e_1^*(k)$ متغیر حالت اضافه شده به سیستم است که در برگیرنده محدودیت نرم ناشی از تجاوز رقوم سطح آب از رقوم حداکثر و حداقل در بازه اول است. اطلاعات تکمیلی در مورد متغیر حالت $e_1^*(k)$، متغیر کنترل‌شونده $\Delta Q_{hg}(k)$ و نیز متغیرهای کمکی u_1^* و e_1^* و همچنین روابط بین آنها در رفرنس (۲۴) به تفصیل ارائه شده است.

تابع هدف

تابع هدف، متشکل از یک سری زیر اهداف متفاوت و مجزاست که به هر زیر هدف یک وزن نسبی داده می‌شود تا نشان‌دهنده اهمیت و اولویت آن زیر هدف باشد (۸). تابع هدف مورد استفاده در این پژوهش، مطابق با تابع هدف توصیه شده توسط اورلوپ برای سیستم کانال آبیاری (۲۴)، به فرم تابع هدف درجه دو (Quadratic Programming) به‌صورت رابطه (۶) مشخص شد (۲۴):

$$\text{minj} = X^T.Q.X + U^T.R.U \qquad (۶)$$

که در آن J تابع هدف را نشان می‌دهد که می‌بایست حداقل شود، X ماتریس متغیرهای حالت، U ماتریس فرامین کنترلی، Q ماتریس وزن برای متغیرهای حالت و R ماتریس وزن برای اعمال کنترلی هستند. هدف از بهینه‌سازی در این پژوهش حداقل‌سازی خطای رقوم سطح آب از رقوم هدف (متغیر $e_1(k)$ در رابطه (۵) که یکی از متغیرهای ماتریس حالت (X) است) در بازه‌های کانال و در عین حال حداقل‌سازی تعداد تنظیمات سازه‌های تنظیم سطح آب (متغیر کنترل‌شونده $\Delta Q_{hg}(k)$ در ماتریس فرامین کنترلی) است.

بررسی جامع مطالعات گوناگون صورت گرفته در کانال مورد مطالعه این پژوهش، اعم از گزارش‌های شرکت‌های مهندسین مشاور، حاکی از آن است که عملکرد بهره‌برداری کانال اصلی مغان بر اساس شیوه مرسوم بهره‌برداری کنونی بررسی نشده است. همچنین بررسی‌های صورت گرفته در حین این پژوهش نشان داد که آمار و اطلاعات سالانه منتشر شده مربوط به راندمان انتقال و توزیع آب کانال مذکور، که در سالنامه‌های آماری شرکت آب منطقه‌ای اردبیل و شرکت مدیریت منابع آب ایران گزارش شده است، بر پایه اندازه‌گیری‌های میدانی یا مدل‌سازی بهره‌برداری کانال آبیاری مذکور نبوده است. لذا به‌منظور نشان دادن قابلیت خودکارسازی در بهبود مطلوبیت بهره‌برداری بازه منتخب شده کانال اصلی مغان در این پژوهش، چهار سناریو بهره‌برداری در نظر گرفته شد و میزان بهبود «راهبرد خودکارسازی» با مقایسه نتایج این سناریوها مشخص شد. سناریوهای بهره‌برداری مذکور شرایطی را در ورودی کانال اصلی فراهم می‌آورد تا عملکرد سامانه کنترل خودکار طراحی شده در شرایط کاهش دبی ورودی به‌ترتیب با صفر، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد کاهش بررسی شود. به‌عبارت دیگر، در نظر است با خودکارسازی بهره‌برداری کانال مغان، تنظیمات سازه‌های کنترل سطح آب در بازه‌های کانال تحت چهار سناریوی متفاوت دبی ورودی از سراب کانال (شامل کاهش صفر، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصدی دبی ورودی) به نحوی انجام شود که سطح آب در هر بازه کمترین انحراف را از عمق هدف آن بازه داشته باشد و بنابراین با این رویکرد میزان کاهش تلفات بهره‌برداری در هر سناریو مشخص شود. در این مطالعه از مدل هیدرودینامیک ICSS برای شبیه‌سازی وضعیت هیدرولیکی جریان در گزینه‌های مختلف بهره‌برداری کانال اصلی استفاده شد. این مدل قادر به شبیه‌سازی سیستم‌های انتقال و توزیع آب که دارای تغییرات زمانی جریان ورودی و خروجی هستند از لحاظ هیدرولیکی و هیدرولوژیکی است. این مدل همچنین قادر به شبیه‌سازی جریان‌های ماندگار و غیرماندگار در شبکه‌های آبیاری با انواع شکل مقطع کانال همراه با طیف قابل توجهی از سازه‌ها توأم با جریان‌های گسترده ورودی و خروجی است. این مدل دارای یک هسته مرکزی است که معادلات جریان‌های غیرماندگار را در شبکه‌های آبیاری حل می‌کند و شرایط مرزی و سازه‌های مختلف به‌صورت زیر برنامه‌هایی با آن تلفیق می‌شوند. از ویژگی‌های بارز این مدل دسترسی به متن برنامه (Source) مدل است که به زبان فرترن است.

لازم به ذکر است که برای مدل‌سازی بهره‌برداری، کانال

www.SID.ir

Archive of SID

مورد مطالعه به چهار بازه و بر اساس تعداد سازه‌های تنظیم موجود در مسیر تقسیم شده است در حالی که در مدل‌سازی نشت کانال مذکور، تعداد بازه‌ها بر اساس تغییر پارامترهای هیدرولیکی، هندسی و ویژگی‌های مصالح به هفت بازه تغییر می‌کند.

شاخص‌های عملکرد بهره‌برداری

معیارهای ارزیابی عملکرد سیستم میزان موفقیت شبکه را در دستیابی به اهداف طراحی و بهره‌برداری بیان می‌کند که با توجه به نیاز آبی و توزیع زمانی آن در آبگیرهای مختلف به‌صورت دو شاخص کفایت و راندمان آبیاری معرفی شده‌اند. شاخص‌هایی که مولدن و گیتس (۱۵) برای ارزیابی عملکرد گزینه‌های بهره‌برداری ارائه داده‌اند به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

کفایت تحویل (P_A): شاخصی است که میزان توانایی روش بهره‌برداری را در تحویل آب به‌میزان درخواست شده در هر آبگیر بیان می‌کند. این شاخص به کمک رابطه (۷) قابل محاسبه است:

$$P_A = \frac{1}{T}\sum_T\left[\frac{1}{R}\sum_R(P_a)\right] \qquad (۷)$$

$$P_a = \frac{Q_d}{Q_r} \quad \text{if} \quad Q_d < Q_r \qquad \text{otherwise} \qquad P_a = 1$$

که در آن که در آن Q_r و Q_d به‌ترتیب معرف مقدار آب مورد نیاز (منظور آب درخواستی بر اساس حقابه یا قرارداد در این تحقیق) و مقدار آب تحویل داده شده در عمل برای آبگیر x در دوره زمانی t و نمادهای $\Sigma 1/T$ و $\Sigma 1/R$ به‌ترتیب متوسط زمانی و مکانی هستند.

راندمان تحویل (P_F): شاخصی است برای ارزیابی میزان مازاد آب تحویل داده شده نسبت به آب درخواستی در محل آبگیر که به‌صورت رابطه (۸) بیان می‌شود:

$$P_F = \frac{1}{T}\sum_T\left[\frac{1}{R}\sum_R(P_f)\right] \qquad (۸)$$

$$P_f = \frac{Q_r}{Q_d} \quad \text{if} \quad Q_r < Q_d \qquad \text{otherwise} \qquad P_f = 1$$

نتایج و بحث

نتایج مدل‌سازی نشت آب از بستر کانال مورد مطالعه

پس از شبیه‌سازی کانال، نتایج حاصل از مدل‌سازی نشت در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است. بررسی مقادیر محاسبه شده نشت حاصل از مدل‌سازی در هر کدام از هفت بازه کانال مورد مطالعه با مقادیر اندازه‌گیری شده گویای این مطلب است که مدل Seep/w با خطایی کمتر از ۱۰ درصد در برآورد میزان نشت در کانال در مقایسه با میزان اندازه‌گیری شده آن به‌صورت مستقیم از دقت بالایی برخوردار است. نتایج کالیبراسیون مدل و مقایسه مقادیر نشت اندازه‌گیری شده و محاسباتی در جدول (۴) ارائه شده است. از آنجایی که مدل‌ها برای شبیه‌سازی واقعیت تا حد ممکن از فرضیاتی استفاده می‌کنند، لذا در این مدل نیز قبول ۱۰ درصد خطا در شبیه‌سازی به‌علت عدم در نظر گرفتن میزان تعرق پوشش گیاهی، تخریب ساختمان خاک ناشی از حرکت ریشه گیاهان و خطای اندازه‌گیری انسان منطقی به‌نظر می‌رسد که البته وجود این مشکل غیر قابل اجتناب خواهد بود.

میزان نشت محاسبه شده در کانال بدون پوشش (کانال خاکی)

نتایج حاصل از مدل‌سازی نشت در کانال خاکی در جدول ۲ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، با کاهش عمق در امتداد طول کانال (رجوع شود به جدول ۱) مقدار دبی نشت در مقاطع انتخاب شده برای هر بازه کاهش می‌یابد. این در حالی است که جنس خاک بستر در تمامی مسیر تقریباً یکسان است. بر اساس نتایج حاصل شده از برآورد نشت در طول کانال، میزان نشت موجود در طول کانال مورد نظر (۲۴ کیلومتر) حدود ۰/۱۱ مترمکعب در شبانه‌روز در متر مربع به‌دست آمده است. مطابق با مطالعات سازمان خواروبار و کشاورزی جهانی (FAO)، میزان متعارف نشت در کانال‌های با پوشش خاکی، برابر و یا کمتر از ۰/۱ مترمکعب در شبانه‌روز در مترمربع ارزیابی شده است (۵). با توجه به این معیار تمامی بازه‌های انتخاب شده در این کانال نشتی بیش از حد معمول داشته که به‌عنوان نقاط و مسیرهایی با

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲. نشت محاسبه شده با مدل Seep/w در کانال خاکی مغان

شماره بازه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
نشت در مقطع (مترمکعب بر ثانیه در متر)	۱×۱۰^{-۵}	$۹/۳\times۱۰^{-۶}$	$۹/۰۴\times۱۰^{-۶}$	$۸/۷۸\times۱۰^{-۶}$	$۸/۶۷\times۱۰^{-۶}$	$۸/۴۱\times۱۰^{-۶}$	$۸/۱۷\times۱۰^{-۶}$
نشت در هر بازه (مترمکعب بر ثانیه)	۰/۰۵۹	۰/۰۲۰	۰/۰۱۶	۰/۰۲۴	۰/۰۵۲	۰/۰۱۳	۰/۰۱۱
نشت در طول کل بازه (مترمکعب در ثانیه)	۰/۱۹۶						
نشت در طول کل بازه (مترمکعب در شبانه‌روز)	۱۶۹۳۴/۴						

جدول ۳. نشت محاسبه شده با مدل Seep/w در کانال با پوشش بتنی

شماره بازه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
نشت در مقطع (مترمکعب بر ثانیه در متر)	$۹/۸۸\times۱۰^{-۶}$	$۸/۷۳\times۱۰^{-۶}$	$۸/۵۰\times۱۰^{-۶}$	$۸/۲۱\times۱۰^{-۶}$	$۷/۳۸\times۱۰^{-۶}$	$۶/۹۷\times۱۰^{-۶}$	$۶/۵\times۱۰^{-۶}$
نشت در هر بازه (مترمکعب بر ثانیه)	۰/۰۵۵	۰/۰۱۸	۰/۰۱۵	۰/۰۲۳	۰/۰۴۷	۰/۰۱۱	۰/۰۰۹
نشت در طول کل بازه (مترمکعب بر ثانیه)	۰/۱۷۸						
نشت در طول کل بازه (مترمکعب در شبانه‌روز)	۱۵۳۷۹/۲						

جدول ۴. نتایج حاصل ازمقایسه میزان نشت محاسبه شده با استفاده از مدل Seep/w و نتایج اندازه‌گیری شده نشت

کاهش تلفات نشت در اثر پوشش کانال (درصد)	میزان نشت محاسبه شده با Seep/w برای کانال پوشش‌دار (مترمکعب بر ثانیه)	میزان نشت محاسبه شده با Seep/w برای کانال بدون پوشش (مترمکعب بر ثانیه)	میزان نشت اندازه‌گیری شده (مترمکعب بر ثانیه)
۹/۲	۰/۱۷۸	۰/۱۹۶	۰/۲۱۶

میزان نشتی بیش از حد مجاز شناسایی شده‌اند. بر این اساس لازم است تا با اتخاذ رویکرد مناسب مقدار نشت در این کانال، کاهش یابد. در راستای تحقق هدف مذکور، راهبرد پوشش‌دار کردن کانال مورد مطالعه در نظر گرفته شد و نتایجبه‌کارگیری آن در ادامه ارائه شده است.

میزان نشت از کانال مغان با به‌کارگیری راهبرد پوشش‌دار کردن

نتایج حاصل از مدل‌سازی نشت در کانال با پوشش بتنی در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه ملاحظات اجرایی، مشاهده‌های مربوط به پروژه‌های اجرا شده قبلی در منطقه (۴) و شرایط پیرامونی کانال مورد مطالعه مقدار ضریب نفوذپذیری بتن معادل ۲×۱۰^{-۷} متر بر ثانیه در مدل‌سازی لحاظ شده است. بر اساس نتایج ارایه شده در جدول ۳، میزان نشت محاسبه شده در هر کدام از مقاطع و بازه‌های انتخابی با پوشش بتنی تفاوت معناداری با حالت قبل از پوشش نداشته است. به‌طوری که حداکثر مقدار کاهش نشت در بازه پنجم و به مقدار ۹/۶ درصد و حداقل مقدار آن در بازه چهارم و به میزان ۴/۱ درصد به‌دست آمده است. همچنین مقایسه نتایج ارائه شده در جداول ۲ و ۳ حاکی از آن است که مقدار نشت به‌طور میانگین به میزان کمتر از ۱۰ درصد پس از پوشش‌دار کردن کاهش یافته است. این مهم می‌تواند به دلیل ریزدانه (رسی) بودن بستر خاکی کانال باشد که به طور ذاتی از نفوذپذیری کمی برخودار است، بنابراین اجرای لایه بتنی به‌عنوان پوشش سطحی تغییر قابل توجهی در کاهش نفوذپذیری اولیه به همراه ندارد. بنابراین می‌توان گفت که عملاً در تلفات نشت کاهش محسوسی ایجاد نشده و هنوز نرخ نشت در شبانه‌روز حدود ۱۵۰۰۰ مترمکعب در شبانه‌روز خواهد بود.

جمع‌بندی نتایج حاصل از مدل‌سازی نشت در جدول ۴ ارائه شده است. بر این اساس، تفاوت در میزان تلفات نشت برای دو حالت بستر بدون پوشش و پوشش‌دار آن در حدود ۱۰

www.SID.ir

Archive of SID

درصد تخمین زده شده است.

بررسی تأثیر به‌کارگیری راهبرد خودکارسازی بهره‌برداری در کاهش تلفات انتقال در کانال اصلی

نتایج شبیه‌سازی به تفکیک چهار سناریوی بهره‌برداری جریان با شرایط کاهش دبی ورودی در جدول ۵ ارائه شده است و شاخص‌های ارزیابی نیز برای هر چهار بازه انتخابی در شبیه‌سازی بهره‌برداری محاسبه شدند.

بر اساس سناریوهای موجود، در ابتدا سناریوی نرمال بهره‌برداری کانال برای شرایط جریان نرمال و بدون هیچ‌گونه شرایط کم‌آبی در دبی جریان ورودی شبیه‌سازی شده است. در این شرایط با توجه به اینکه هیچ‌گونه محدودیتی در تأمین آب مورد نیاز وجود ندارد، بنابراین تمامی آبگیرها آب مورد نیاز خود را در بهترین حالت ممکن و با بیشترین سطح کفایت (۱۰۰ درصد) دریافت می‌کنند. همچنین با توجه به‌میزان آب دریافتی توسط آبگیرها متناسب با میزان آب تقاضا شده، تلفات مربوط به انتقال و توزیع در قالب تحویل آب مازاد به حداقل ممکن (راندمان ۱۰۰ درصد) خواهد رسید. در ادامه با توجه به روند کاهشی مقدار دبی ورودی در سایر سناریوهای مربوطه اگرچه میزان مازاد آب تحویلی در آبگیرها همچنان در کمترین مقدار ممکن (راندمان ۱۰۰ درصد) خواهد ماند ولی شاخص کفایت در هر سناریو متناسب با مقدار کاهش دبی میزان متفاوتی را تجربه خواهد کرد. بر این اساس که با کاربرد سامانه کنترل خودکار پیشنهادی در سناریوی مربوط به کاهش ۱۰ و ۱۵ درصد، اگرچه شاخص مربوط به کفایت از مطلوب‌ترین حالت ممکن (۱۰۰ درصد) برخوردار نیست ولی مطابق با طبقه‌بندی موجود به‌منظور بهره‌برداری بهینه از سیستم آبیاری در کانال بر اساس نظریه مولدن و گیتس در سال ۱۹۹۰، آبگیری در تمامی بازه‌ها در حالت متعارف انجام خواهد گرفت و هیچ‌گونه خللی در تحویل و دریافت آب توسط آبگیرهای موجود در امتداد کانال به‌وجود نخواهد آمد. به این صورت که مطلوبیت ممکن از لحاظ شاخص کفایت در این دو سناریو در تمامی بازه‌ها به بالای ۸۰ درصد خواهد رسید. در آخرین سناریوی شبیه‌سازی شده و با کاهش دبی تا میزان ۲۰ درصد در ورودی کانال، با وجود قرار گرفتن شاخص راندمان در بهترین حالت ممکن (۱۰۰ درصد) در تمامی بازه‌های تعریف شده در این حالت، با کاهش میزان دبی ورودی، مطلوبیت بهره‌برداری از نظر شاخص کفایت تحویل آب کاسته شده و آبگیری در امتداد کانال از محدوده مطلوب مجاز (۸۰ درصد) فاصله گرفته است. همان‌طور که نتایج به‌دست آمده در این سناریو نشان می‌دهد، مقدار شاخص کفایت تحویل آب در دو بازه اول و دوم به‌ترتیب با ۷۸ و ۷۹ درصد به‌دست آمده است. بنابراین اگر اهداف اصلی کاهش تلفات ناشی از بهره‌برداری و در عین حال تأمین شرایط مطلوب بهره‌برداری در کانال آبیاری باشد، سناریوی مذکور قادر به تأمین هدف دوم نبوده زیرا فرایند تحویل آب در آبگیرهای بالادست کانال (بازه‌های اول و دوم و با مقادیر کفایت کمتر از ۸۰ درصد) با اختلال همراه شده است.

شایان ذکر است که شاخص راندمان تحویل آب بیانگر میزان آب تحویلی مازاد به آبگیر است. به عبارت دیگر اگر یک آبگیر تنها نیمی از آب درخواستی (حقابه) خود را دریافت کند، این فرایند از دیدگاه شاخص راندمان، مطلوب تلقی می‌شود زیرا آب مازادی به آبگیر تحویل داده نشده است. بنابراین، ضروری است که بررسی مطلوبیت بهره‌برداری کانال آبیاری همزمان با هر دو شاخص راندمان و کفایت تحویل آب بررسی شود (۱۵).

بنابراین با توجه به نتایج حاصل شده، سامانه کنترل متمرکز MPC (که ماهیتاً یک کنترل‌گر سراسری با قابلیت برقراری شرایط همزمان کنترل بالادست و پایین‌دست است)، با اعمال محدودیت در سازه سراب کانال (به‌واسطه کاهش دبی ورودی در سناریوهای بهره‌برداری) سبب افزایش راندمان شده است. این در حالی است که در روش‌های مرسوم کنترل بالادست امکان تحویل آب مازاد در همین شرایط کم‌آبی در بالادست شبکه وجود خواهد داشت که سبب می‌شود راندمان تحویل آب در بازه‌های پایین‌دستی کاسته شود. بنابراین بر اساس شاخص‌های محاسبه شده متناظر با سناریوهای موجود و نیز با توجه به حاکم بودن شرایط فعلی کم‌آبی در منابع آب موجود، انتخاب سناریوی سوم (کاهش ۱۵ درصدی در دبی ورودی)،

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۵. نتایج شبیه‌سازی مربوط به سناریوهای بهره‌برداری

شاخص (درصد)	سناریوی بهره‌برداری							
	نرمال		کم‌آبی (۱۰ درصد کاهش)		کم‌آبی (۱۵ درصد کاهش)		کم‌آبی (۲۰ درصد کاهش)	
	راندمان	کفایت	راندمان	کفایت	راندمان	کفایت	راندمان	کفایت
بازه اول	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۸۸	۱۰۰	۸۳	۱۰۰	۷۸
بازه دوم	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۳	۱۰۰	۸۷	۱۰۰	۷۹
بازه سوم	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۱	۱۰۰	۸۶	۱۰۰	۸۲
بازه چهارم	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۰	۱۰۰	۸۴	۱۰۰	۸۱

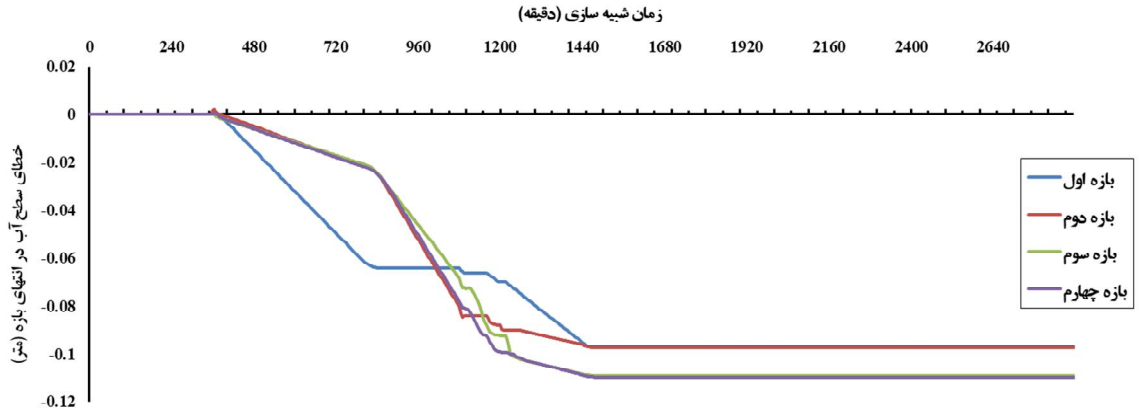
مطلوب‌ترین حالت ممکن از نظر بهره‌برداری با تحمل سخت‌ترین شرایط کم‌آبی از بین سناریوهای ممکن را احراز خواهد کرد. به عبارتی با به‌کارگیری سامانه کنترل خودکار پیشنهادی در جهت بهبود بهره‌برداری کانال اصلی، این روش می‌تواند با پذیرش حداکثر ۱۵ درصد کاهش دبی بالاخص در شرایط کم‌آبی (خشکسالی)، بهره‌برداری و آبگیری در بازه‌ها را در بهینه‌ترین حالت ممکن فراهم کند بدون آنکه خللی در آبگیری به‌وجود آید. از طرفی با نسبت دادن کاهش دبی ۱۵ درصدی در ورودی کانال به‌عنوان کاهش میزان تلفات بهره‌برداری به‌عنوان نتیجه عملکرد خودکارسازی انتقال و توزیع با ماهیت کنترل شرایط بالادست در کانال آبیاری مورد مطالعه، می‌توان از این مقدار به‌منظور استفاده بهینه برنامه‌ریزی کرد که حتی با وجود شرایط بهره‌برداری مرسوم در شبکه ادعای ۲۰ درصد کاهش تلفات با به‌کارگیری این روش نیز دور از انتظار نخواهد بود. همانطور که در شکل ۲ قابل مشاهده است، با انتخاب سناریو سوم (کاهش ۱۵ درصد دبی) به‌عنوان شرایط مقبول، میزان تغییرات رقوم سطح آب کنترل شده توسط سامانه کنترل خودکار طراحی شده در این پژوهش برای هر چهار بازه کانال بین ۱۰ تا ۱۱ سانتی‌متر بوده است که با توجه به ماهیت شیوه کنترل خودکار طراحی شده و نوع آبگیرهای موجود در امتداد کانال اصلی و همچنین شاخص‌های محاسبه شده کفایت در جدول ۵، نحوه تحویل آب در محدوده مطلوب و مطابق انتظار (بر اساس طبقه‌بندی مولدن و گیتس) بوده است.

نتیجه‌گیری

به‌منظور کاهش تلفات آب در سامانه‌های انتقال، توزیع و تحویل آب کشاورزی در شبکه آبیاری مغان دو راهکار «پوشش‌دار کردن کانال‌ها» و «خودکارسازی سامانه‌های اصلی انتقال و توزیع» بررسی شد. نتایج حاصل از این پژوهش بر اساس محاسبه میزان نشت با استفاده از مدل Seep/w در امتداد کانال مورد مطالعه حاکی از این مطلب است که استفاده از راهبرد پوشش‌دار کردن بستر کانال با توجه به جنس مصالح ریزدانه بستر و ملاحظات اجرایی اختلاف معنی‌داری در کاهش میزان نشت را در این کانال ایجاد نخواهد کرد. به عبارتی توانایی به‌کارگیری این راهبرد در کاهش معضل تلفات نشت در کانال اصلی مورد مطالعه در حدود ۱۰ درصد است. لازم به توضیح است که در اغلب شبکه‌های آبیاری مشکل نشت نه تنها در کانال‌های خاکی بلکه در کانال‌های بتنی مشکل‌دار نیز از معضلات مدیران شبکه به‌شمار می‌رود که راهکار پوشش‌دار کردن کانال‌ها اولین و پراستفاده‌ترین راه حل بوده است. با این وجود این راهکار، بخصوص در شبکه‌های آبیاری کشورهای در حال توسعه که از فقدان دستورالعمل‌های کاربردی و بازدیدهای دوره‌ای برای تعمیرات و نگهداری منظم کانال‌ها رنج می‌برند، نتوانسته مشکل نشت را به‌طور مؤثری کنترل کند. نتایج یکی از جدیدترین پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه نشان داد که میزان نشت از یک کانال خاکی بدون پوشش بتنی به‌طور چشمگیری در مقایسه با حالت پوشش شده آن افزایش نیافته و حتی کمتر از شش درصد گزارش شد (۲۷). در پژوهش دیگری

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲. تغییرات خطای سطح آب در بازه‌های کانال اصلی مطابق با ۱۵ درصد کاهش جریان

گزارش شده که چنانچه ۰/۰۱ درصد مساحت پوشش شده کانال شامل درز و ترک باشد در این صورت میزان نشت در کانال‌های پوششی بعد از مدتی مشابه با میزان نشت از کانال‌های غیر پوششی خواهد شد (۱۳). همچنین نتایج پژوهش بهراملو در این رابطه بیانگر این است که که در شرایط اقلیمی سرد منطقه‌ای و تکنولوژی اجرایی موجود که با توجه بهنوسانات شدید دمایی و ذوب و یخبندان‌های مکرر منطقه اکثر پوشش‌های بتنی دچار ترک‌خوردگی و تخریب شده و تلفات در پوشش محلی سنگ و ملات حدود یک سوم تلفات در پوشش بتن است (۶). بنابراین راهکار پوشش‌دار کردن کانال‌های خاکی علاوه بر اینکه با توجه به مسائلی مثل در دسترس بودن و مسائل اقتصادی نمی‌تواند راهکار مطمئنی در کاهش تلفات نشت باشد، تنها کاهش تلفات نشت را مورد هدف قرار داده است. از طرفی مطابق با اسناد بالادستی آب کشور، تحویل حجمی کنترل شده و دقیق به آب‌بران، در شبکه‌های آبیاری مدرن و سنتی کشور یکی از مهم‌ترین اقدامات ضروری در شبکه‌های آبیاری تلقی می‌شود. بنابراین در جهت دستیابی به این مهم و نیز پیاده‌سازی موفق راهکارهای بهبود عملکرد در سامانه‌های انتقال، توزیع و تحویل آب، به کارگیری راهبرد خودکارسازی برای این سامانه‌ها برای کاهش تلفات بهره‌برداری بررسی شد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که برای الگوی کاهش دبی ورودی به میزان ۱۵ درصد، سامانه کنترل پیش‌بین طراحی شده برای کانال مذکور به‌خوبی می‌تواند با کنترل نوسان‌های مربوط به خطای سطح آب، تا حداکثر به میزان ۱۱-۱۰ سانتی‌متر بیشترین تأثیر را برای بهبود عملکرد بهره‌برداری بگذارد. به گونه‌ای که شاخص‌های ارزیابی در حد مطلوب برای بهره‌برداری بهینه بوده که کمترین مقدار برای دو شاخص راندمان و کفایت برای این الگو برای بازه اول و به‌ترتیب برابر با ۱۰۰ و ۸۳ درصد هستند. در واقع با نسبت دادن این مقدار کاهش دبی در ورودی کانال به‌عنوان میزان کاهش تلفات در اثر خودکارسازی، می‌توان نتیجه گرفت که با به‌کارگیری راهبرد خودکارسازی سامانه انتقال و توزیع می‌توان تا میزان ۱۵ درصد تلفات مربوط به انتقال و توزیع در کانال اصلی شبکه آبیاری مغان را کاهش داد. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند تأییدی بر نتایج سایر پژوهش‌های انجام شده در راستای بهبود وضعیت بهره‌برداری کانال اصلی آبیاری باشد. به‌طوری که بر اساس نتایج پژوهش هاشمی و همکاران (۲۰۱۸)، در حدود ۲۵-۱۰ درصد تلفات بهره‌برداری در حوضه رودخانه زاینده‌رود به‌واسطه به‌کارگیری سامانه‌های کنترل خودکار متمرکز و غیرمتمرکز کاهش می‌یابد (۲۱). همچنین براساس پژوهشی که در آن از الگوریتم یادگیری سارسای فازی (FSL) برای تعیین دستورالعمل بهره‌برداری سازه‌های آب‌بند و آبگیر در امتداد کانال آبیاری E1R1 استفاده شود، مقادیر شاخص‌های راندمان و کفایت به‌ترتیب ۰/۹۸۹ و ۰/۹۹۴

www.SID.ir

Archive of SID

به‌دست آمد (۲۲). بنابراین می‌توان اظهار کرد که مدل‌ها و سامانه‌های مذکور با دقت زیادی در راستای اتوماسیون قادر به استخراج الگوهای بهره‌برداری برای تحویل و توزیع بهینه آب در کانال‌های آبیاری است. از طرفی با توجه به محدودیت‌های زمانی، مالی و ملاحظات اجرایی که نقش تعیین کننده‌ای در جهت انتخاب راهبرد برای ارتقا عملکرد بهره‌برداری دارند، می‌توان پتانسیل هر کدام از این دو راهبرد را به‌صورت مجزا و همزمان، بسته به اهداف مدیران شبکه به‌منظور کاهش تلفات انتقال و توزیع در کانال اصلی برای موارد مشابه نیز بررسی کرد و با اولویت‌بندی بر اساس شرایط موجود، مناسب‌ترین گزینه را در سامانه‌های انتقال و توزیع به‌کار برد.

منابع مورد استفاده

1. Afrasiabikia, P., A. P. Rizi and M. J avan. 2017. Scenarios for improvement of water distribution in Doroodzan irrigation network based on hydraulic simulation. *Computers and Electronics in Agriculture* 135: 312-320 .
2. Agide, Z., A. Haileslassie, H. Sally, T. Erkossa, P. Schmitter, S. Langan and D. Hoekstra. 2016. Analysis of water delivery performance of smallholder irrigation schemes in Ethiopia: Diversity and lessons across schemes, typologies and reaches .*International Livestock Research Institute (ILRI), Nairobi and Ethiopia* 23(4): 121-137.
3. Anonymous. 2004. Issue Criteria for designing irrigation and drainage networks. No. 281. (In Farsi).
4. Anonymous. 2014. Geotechnical modeling of the embankment section of Moghan channel in the channel path. Research Report. Yekom Consultant Engineers. (In Farsi).
5. Anonymous. 2014. Report of studies of major canal lining and modification of the main buildings of the Moghan plain network. Yekom Consultant Engineers. (In Farsi).
6. Bahramlou, R. 2013. Effect of concrete lining on controlling losses of water seepage from irrigation canals in Hamadan province. *Journal of Iranian Water Researches* 11: 75-83. (In Farsi).
7. Burt, C. M. 2013. The irrigation sector shift from construction to modernization: What is required for success? *Irrigation and Drainage* 62(3): 247-254 .
8. Camacho, E. F. and C. Bordons. 2004. Model Predictive Control in the Process Industry, Springer, London.
9. Hosseinzadeh, Z., M. J. Monem, N. Nahavandi and M. V. Tehrani. 2017. Development of a conceptual model for application of hydro-mechanical gates in irrigation networks by a system dynamic approach. *Irrigation and Drainage* 66(5): 808-819 .
10. Jafari, F., S. Javadi, G. Golmohammadi, N. Karimi and K. Mohammadi. 2016. Numerical simulation of groundwater flow and aquifer-system compaction using simulation and InSAR technique: Saveh basin, Iran. *Environmental Earth Sciences* 75(9): 833 .
11. Kinzli, K. D., M. Martinez, R. Oad, A. Prior and D. Gensler. 2010. Using an ADCP to determine canal seepage loss in an irrigation district. *Agricultural Water Management* 97(6): 801-810 .
12. Malaterre, P. O., D. C. Rogers and J. Schuurmans. 1998. Classification of canal control algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 124(1): 3-10 .
13. Merkley, G. P. 2007. Irrigation Conveyance & Control: Flow Measurement & Structure Design: Lecture Notes, Biological and Irrigation Engineering Department, Utah State Unive.
14. Moavenshahidi, A., R. Smith and M. Gillies. 2014. A computer model to estimate seepage rates from automated irrigation distribution channels during periods of shutdown. *Journal of Hydroinformatics* 16(6): 1302-1317 .
15. Molden, D. J. and T. K. Gates. 1990. Performance measures for evaluation of irrigation-water-delivery systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 116(6): 804-823 .
16. Newton, D. and M. Perle. 2006. Irrigation District water efficiency cost analysis and prioritization. DWA Final Report. USBR .
17. Rodríguez Díaz, J., E. Camacho Poyato and M. Blanco Pérez. 2011. Evaluation of water and energy use in pressurized irrigation networks in Southern Spain. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 137(10): 644-650 .
18. Rostamyan, R. and Abedi Koupaie, J. 2012. Evaluation of Seep/w Model for Estimating Water seepage from Soil Channels (Case Study of Zayandeh-Rud Irrigation Network). *Journal of Agricultural Science and Technology* 58: 13-22. (In Farsi).
19. Savari, H., M. Monem and K. Shahverdi. 2016. Comparing the performance of fsl and traditional operation methods for on-request water delivery in the aghili network, Iran. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 142(11): 04016055 .

www.SID.ir

20. Serra, P., L. Salvati, E. Queralt, C. Pin, O. Gonzalez and X. Pons. 2016. Estimating water consumption and irrigation requirements in a long-established mediterranean rural community by remote sensing and field data. *Irrigation and Drainage* 65(5): 578-588 .
21. Shahdany, S. M. H., A. Firoozfar, J. Maestre, I. Mallakpour, S. Taghvaeian and P. Karimi. 2018. Operational performance improvements in irrigation canals to overcome groundwater overexploitation. *Agricultural Water Management* 204: 234-246.
22. Shahverdi, K., M. J. Monem and M. Nili. 2015. Application of reinforcement learning algorithm for determining the operational instructions of the on-request method for optimal water distribution and delivery. *Journal of Iranian Soil and Water Research* 46(2): 291-283. (In Farsi).
23. Tavakoli, E., B. Ghorbani, H. Samadi Borujeni, M. Radfar and B. Ghahraman. 2016. Modifying empirical equations of seepage estimation using dimensional analysis (Boldaji earth canal, Chaharmahal and Bakhtiari province). *Journal of Water and Soil Conservation* 2: 106-118. (In Farsi).
24. Van Overloop, P. J. 2006. Model Predictive Control on Open Water Systems, IOS Press, Delft, Netherlands.
25. Wagemaker, R. 2005. Model predictive control on irrigation canals, aplication of various internal models. MSc. Thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
26. Xu, M., P. Van Overloop and N. Van De Giesen. 2011. On the study of control effectiveness and computational efficiency of reduced Saint-Venant model in model predictive control of open channel flow. *Advances in Water Resources* 34(2): 282-290 .
27. Yao, L., S. Feng, X. Mao, Z. Huo, S. Kang and D. A. Barry. 2012. Coupled effects of canal lining and multi-layered soil structure on canal seepage and soil water dynamics. *Journal of Hydrology* 430: 91-102.
28. Zaman, M. R., S. Morid and M. Delavar. 2016. Evaluating climate adaptation strategies on agricultural production in the Siminehrud catchment and inflow into Lake Urmia, Iran using SWAT within an OECD framework. *Agricultural Systems* 147: 98-110 .
29. Zamani, S., A. Parvaresh Rizi and S. Isapoor. 2015. The effect of design parameters of an irrigation canal on tuning of coefficients and performance of a pi controller. *Irrigation and Drainage* 64(4): 519-5.

www.SID.ir

Archive of SID

Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)
Vol. 23, No. 3, Fall 2019, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Assessing of the Effectiveness of two strategies of "Lining" and "Automation of the Operation" to Reduce Water Conveyance and Distribution Losses within the Main Irrigation Canals, Case Study of Moghan Main Canal

S. Barkhordari, M. Hashemy Shahdany* and A. Bagherzadeh Khalkhali[1]

(Received: April 18-2018 ; Accepted: October 29-2018)

Abstract

Seepage losses and poor operational activities are the two main source of water losses throughout the agricultural water conveyance and distribution systems in irrigation districts. This study aims to investigate the performances of two strategies of “canal lining” and employing the “Canal Automation” in order to reduce the losses mentioned above. The investigation was carried out on a couple of main canal reaches of Moghan Irrigation Districts. Two numerical models were simulated by Seep/w software to compare the seepage rate between the canal with and without concrete lining. The results reveal that the ability of concrete lining to reduce seepage losses along the canal is about 10%. Performance assessment of the “Canal Automation” strategy to minimize operational losses within the main canal was carried out employing Model Predictive Control (MPC). The results of the latter strategy indicate that employing the MPC not only reduces the operational losses along the canal by 15% but also improves the operation of the main canal so that the minimum efficiency and adequacy performance indicator was obtained 100% and 83% respectively. Therefore; due to Executive considerations and financial constraints in the same cases, the potential of each of the two strategies can be considered to reduce the conveyance and distribution losses and ultimately choose the most suitable option.

Keywords: Seepage modeling, Conveyance and Distribution Losses, Operational of main canal, Automation

1. Water Engineering Department, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.
*: Corresponding Author, Email: mehdi.hashemy@ut.ac.ir

www.SID.ir