اکوهیدرولوژی
دورهٔ ۹، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۴۰۱، ص ۴۱۷-۴۰۳

تعیین سهم منابع آب سطحی و زیرزمینی در محدودهٔ یک شبکهٔ آبیاری بر پایهٔ محاسبهٔ تلفات سامانهٔ بهره‌برداری، مورد مطالعاتی شبکهٔ آبیاری آبشار اصفهان

سروش برخورداری[۱]، ملیکا ابراهیم نجاری[۲]، سید مهدی هاشمی شاهدانی[۳*]

۱. فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد گرایش سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش منابع، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۳. دانشیار، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۱۲/۰۸؛ تاریخ بازنگری ۱۴۰۱/۰۱/۳۱؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۲/۱۲)

چکیده

این مطالعه با شبیه‌سازی فرایند توزیع آب سطحی در کانال‌های آبیاری، تحلیل مکانی توزیع آب و همچنین، برآورد نیاز آب کشاورزی، اقدام به تعیین سهم منابع آب سطحی و زیرزمینی با هدف تدقیق سهم منابع آب در یک شبکهٔ آبیاری کرد. در راستای دستیابی به این مهم، شبکهٔ آبیاری آبشار اصفهان، با مشکلات حاد مدیریت توزیع آب، به عنوان نمونهٔ مطالعاتی این پژوهش انتخاب شد. بنابراین، شبیه‌سازی توزیع آب بین آبگیرهای کانال اصلی و فرعی، با توسعهٔ مدل شبیه‌ساز انتگرالی‌ـــ تأخیری در محیط MATLAB صورت گرفت و تحلیل مکانی شاخص کفایت توزیع آب، در محیط GIS انجام شد. نیاز آبی محصولات الگوی کشت نیز با استفاده از برنامهٔ نت‌وات برآورد شد. نتایج شبیه‌سازی در کانال‌های اصلی و فرعی، بیانگر روند غالباً کاهشی کفایت تحویل آب از آبگیرهای بالادست تا پایین‌دست، به‌خصوص تحت سناریوهای بهره‌برداری کم‌آبی بوده که نشان از ضعف مدیریت کارآمد توزیع آب در شبکه کانال داشت. همچنین، تحلیل مکانی کفایت توزیع آب آبیاری بیانگر ناکارآمدی تحویل آب سطحی و دلیل اصلی افزایش تعداد چاه‌های حفرشده توسط کشاورزان در محدودهٔ شبکه آبیاری بوده است. در ادامه، سهم آب سطحی و زیرزمینی به تفکیک ۵۹ روستای دارای حقابه مشخص شد، به طوری که آب سطحی توزیع‌شده در روستاهای واقع در بالادست و پایین‌دست هر کانال فرعی به‌ترتیب ۳۵-۴۸٪ و ۴۹-۶۰٪ تقاضای کشاورزی را تأمین کرده است. نتایج این تحقیق، زمینه را برای پیاده‌سازی سیستم حسابداری آب، با تدقیق سهم منابع آب سطحی و زیرزمینی در محدودهٔ شبکهٔ آبیاری، فراهم می‌کند.

کلیدواژگان: شبیه‌سازی توزیع و تحویل، تحلیل مکانی توزیع آب سطحی، حسابداری آب، شبکهٔ آبیاری.

* نویسندهٔ مسئول

Email: mehdi.hashemy@ut.ac.ir

مقدمه

افزایش جمعیت و تغییر سبک زندگی از سنتی به مدرن، سبب افزایش نیاز روزافزون و تنوع بیشتر محصولات غذایی شده است. این در حالی است که از یک سو با رشد مصارف شهری و صنعتی، آب کمتری نسبت به گذشته به بخش کشاورزی، اختصاص داده شده است. از طرفی دیگر، تغییرات اقلیمی، وقوع خشکسالی‌های متواتر و مستمر در دهه‌های اخیر و کاهش محسوس منابع آب تجدیدپذیر در مناطق خشک و نیمه‌خشک، امکان تأمین به‌موقع و مناسب آب را با یک مشکل چالش‌برانگیز مواجه ساخته است. در این ارتباط دامنهٔ وسیعی از راه‌کارهای مدیریت تأمین‌محور با تمرکز بر شناسایی و ایجاد منابع جدید آب برای مصارف کشاورزی به‌کار برده شده است. با توجه به هزینه‌های زیاد تأمین و توزیع آب کشاورزی در کشورهای در حال توسعه، راه‌کار تأمین محور نتوانسته پاسخی مطمئن و قابل اعتماد برای مشکل یادشده باشد و به‌تدریج جای خود را به راهبرد مدیریت تقاضامحور، به منظور کاهش تلفات در سیستم‌های انتقال، توزیع و تحویل داده است. با این‌وجود، به دلیل بی‌توجهی به سیستم‌های انتقال و توزیع برون‌مزرعه‌ای و نیز به کار نگرفتن سیستم‌های نوین در آن نسبت به بخش درون‌مزرعه‌ای، سهم بزرگی از تلفات در شبکه‌های آبیاری به این بخش اختصاص داده شده است [۱]. مطالعات و بررسی‌های مختلف در مورد شیوهٔ عملکرد سامانه‌های توزیع آب کشاورزی بیانگر عملکرد ضعیف مدیریت بهره‌برداری این شبکه کانال‌های روباز در تحویل ناکافی، غیرمطمئن و ناعادلانهٔ آب کشاورزی به کشاورزان واقع در بالادست و پایین‌دست این شبکه‌ها دارند [۲ و ۳]. پژوهش‌های مختلفی در ارتباط با تخمین میزان تلفات در سامانه‌های توزیع آب کشاورزی در شبکه‌های آبیاری صورت گرفته و محدودهٔ متفاوتی از تلفات آب در این سامانه‌ها گزارش شده است [۴ و ۵].

نکتهٔ حائز اهمیت و چالش‌برانگیز اینجاست که مطابق استاندارد ۲۸۱ سازمان برنامه و بودجه، میزان تلفات در یک شبکهٔ آبیاری مدرن متوسط- بزرگ مقیاس، حدود ۱۰ درصد اشاره شده است که این عدد منشأ اصلی ناکارآمدی مدیریت آب سطحی در بخش کشاورزی شده و تنها نتیجهٔ آن حفر فزایندهٔ چاه‌های کشاورزی در محدودهٔ شبکه‌های آبیاری بوده که اصولاً خلاف فلسفهٔ احداث این نوع شبکه‌ها است [۶]. ایجاد مشکل در چند دههٔ اخیر و با ظهور و تشدید کم‌آبی و عدم امکان تخصیص آب کافی به بخش کشاورزی، علنی شده است. بنابراین، از آنجا که عموماً توزیع آب سطحی برای مصارف کشاورزی به صورت توزیع سیستماتیک در محدودهٔ یک شبکهٔ آبیاری و با استفاده از سیستم کانال‌ها صورت می‌گیرد، تعیین محدودهٔ کارایی عملکرد این شبکه‌ها، اولین گام برای مدیریت صحیح منابع آب و به‌تبع، اولین اقدام در پیاده‌سازی یک سیستم حسابداری آب در اشل شبکه‌های آبیاری محسوب می‌شود. بنابراین، در ادامهٔ این بخش سعی شد که سابقهٔ تحقیق کاملی از میزان تلفات و جنس آن‌ها در سامانه‌های انتقال، توزیع و تحویل آب – که در عمل یا فراموش شده است یا ضریب اهمیت کمتری در مطالعات مختلف بخش مدیریت آب کشاورزی دارد – ارائه شود تا ذهنیت ۱۰ درصدی تلفات در سامانه های انتقال و توزیع آب کشاورزی که در ذهن مهندسان فعال در شرکت‌های مهندسان مشاور کشور و نیز بدنهٔ تصمیم‌گیری در بخش کارفرمایی مدیریت آب کشور وجود دارد، نفی، نقد و تصحیح شود.

فیپس در پژوهشی که انجام داد، میزان تلفات در سیستم انتقال و توزیع آب کشاورزی واقع در Lower Rio Grande Valley در تگزاس را ۳۰ درصد گزارش کرد [۷]. آککوزو و همکاران پژوهشی را با هدف تعیین میزان تلفات انتقال آب در شبکهٔ Hilla-Kifil در کشور عراق انجام دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد میزان تلفات ۳۷-۱۹ درصد، بسته به درجهٔ کانال انتقال، بوده و به طور کلی، کارهای تعمیر و نگهداری و تعمیر کانال‌های انتقال کافی نبوده است [۸]. طی پژوهش‌های انجام‌شده، میزان تلفات در سامانه‌های توزیع آب کشاورزی در شبکهٔ آبیاری Wonji-Shoa در کشور اتیوپی حدود ۱۲ـ ۷۲ درصد بسته به مدرن و غیر مدرن بودن شبکه‌ها و اصلی و فرعی بودن آن‌ها [۹]، در شبکهٔ Panchnadi در هندوستان، حدود ۲۵ـ ۳۶ درصد [۱۰]، در برخی از شبکه‌های آبیاری در کشور ترکیه حدود ۳ درصد در هر یک هزار متر [۱۱]، در شبکهٔ آبیاری رودشت واقع در منطقهٔ خشک مرکزی ایران حدود ۵۰ درصد [۱۱]، در شبکه‌های آبیاری کشور اسپانیا حدود ۴۵ درصد [۱۲] و بازده توزیع در کانال‌های آبیاری در شبکهٔ درودزن را حدود ۸۱ درصد [۱۳]، گزارش داده‌اند. براساس پژوهش ریاحی و همکاران، میزان بازده انتقال آب

در کانال‌های بتنی استان کرمان بین ۵۷ تا ۸۱ درصد [۱۴] و بر اساس پژوهش معروفی و سلطانی، بازده‌های انتقال آب در شبکهٔ آبیاری شاوور خوزستان بین ۳۴ تا ۸۳ درصد و بازده شبکهٔ توزیع نیز بین ۴۵ تا ۸۶/۵ درصد گزارش شدند [۱۵]. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش شینی و همکاران با هدف ارزیابی میزان توزیع آب در شبکهٔ آبیاری دز در استان خوزستان، نشان داد متوسط بازده انتقال در کانال‌های اصلی و فرعی سبیلی ۶۵/۲ و E4 برابر با ۵۶/۸ درصد است [۱۶]. همچنین، عباسی و همکاران با بررسی‌های میدانی در شبکه‌های مختلف آبیاری کشور، بازده انتقال و توزیع در سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۰ و سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۴ را به‌ترتیب ۶۸/۵ و ۷۴/۲ درصد گزارش داده‌اند [۱۷]. محمدی و همکاران با هدف ارزیابی انتقال آب در شبکهٔ ورامین واقع در منطقهٔ نیمه‌خشک مرکزی ایران، میزان تلفات آب در یک کانال اصلی درجهٔ ۱ را حدود ۱۲ درصد برآورد کردند که با احتساب مجموعه سیستم کانال‌ها از درجهٔ ۱ به درجهٔ ۴ این مقدار بیشتر خواهد شد [۱۸].

بنابراین، یکی از اقدام‌های اساسی و کاربردی در این زمینه، بهبود برنامه‌ریزی توزیع آب سطحی در شبکهٔ کانال‌های به‌هم‌پیوسته است تا بتوان علاوه بر کاهش تلفات ناشی از مدیریت ناصحیح توزیع آب کشاورزی، افزایش رضایت کشاورزان از تأمین به‌موقع، کافی و عادلانهٔ آب را به همراه داشت. بر پایهٔ این نیاز پروژه‌های مدرن‌سازی، بهسازی و نوسازی این سامانه‌ها در شبکه‌های آبیاری مختلف در دورترین نقاط دنیا در اولویت قرار گرفته‌اند. بررسی مطالعات نشان داد پروژه‌های یادشده در قالب: ۱- پیاده‌سازی سامانه‌های مانیتورینگ و دیسپاچینگ مرکزی و محلی با هدف اندازه‌گیری زمان توزیع و تحویل آب به کلان تحویل‌ها و پیاده‌سازی سیستم‌های حسابداری آب و به تبع آن، بازارهای محلی آب [۳]؛ ۲- ارتقای سامانه‌های کنترل به سامانه‌های کنترل خودکار متمرکز و غیرمتمرکز [۱۹] و ۳- بهره‌گیری از روش‌های سازه‌ای مانند استفاده از مخازن ذخیرهٔ آب در خارج از مسیر کانال یا مخازن درون مسیر کانال توصیه شده است [۲۰]. با در نظر گرفتن تمام محدودیت‌ها و مشکلات پیش روی پروژه‌های بهسازی توزیع آب کشاورزی، توصیه می‌شود در گام نخست، ارزیابی عملکرد سامانهٔ توزیع آب کشاورزی – که از منابع آب سطحی تأمین می‌شود – تحت شرایط بهره‌برداری مختلف – که منشأ تغییر شرایط بروز پدیدهٔ کم آبی در بیشتر نقاط کشور است – به نحو مناسبی انجام شود. پیاده‌سازی پروژه‌های مدرن‌سازی، بهسازی و نوسازی، در گروی ارزیابی دقیق اولیهٔ عملکرد سازه‌های هیدرولیکی موجود در شبکه و نیز تشخیص ضعف‌ها و قوت‌های سامانهٔ بهره‌برداری در شبکهٔ آبیاری خواهد بود. بنابراین به منظور تحقق این هدف، پژوهش حاضر، برای اولین‌بار اقدام به ارزیابی شیوهٔ کارکرد سامانهٔ اصلی و فرعی بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری آبشار اصفهان از نظر کفایت توزیع آب در سطح شبکه کرده است. در ادامه، با تحلیل مکانی توزیع آب سطحی و پردازش اطلاعات بهره‌برداری از ۵۵۴۰ چاه حفرشده در این شبکه اقدام به تعیین سهم منبع آب سطحی و زیرزمینی در هر محدودهٔ مستقل کشاورزی در داخل این شبکه شده است. بر این اساس، سؤال این تحقیق این‌طور عنوان می‌شود که سیستم توزیع آب کنونی آب سطحی تا چه میزان اهداف اولیهٔ ساخت یک شبکهٔ آبیاری، که عبارت از: توزیع کافی و مناسب آب سطحی بین محدوده‌های زراعی است، را محقق کرده است. بنابراین، هدف اصلی این تحقیق تعیین سهم منبع آب سطحی و زیرزمینی در تأمین تقاضای آب آبیاری محصولات کشت‌شده در شبکهٔ آبیاری آبشار است.

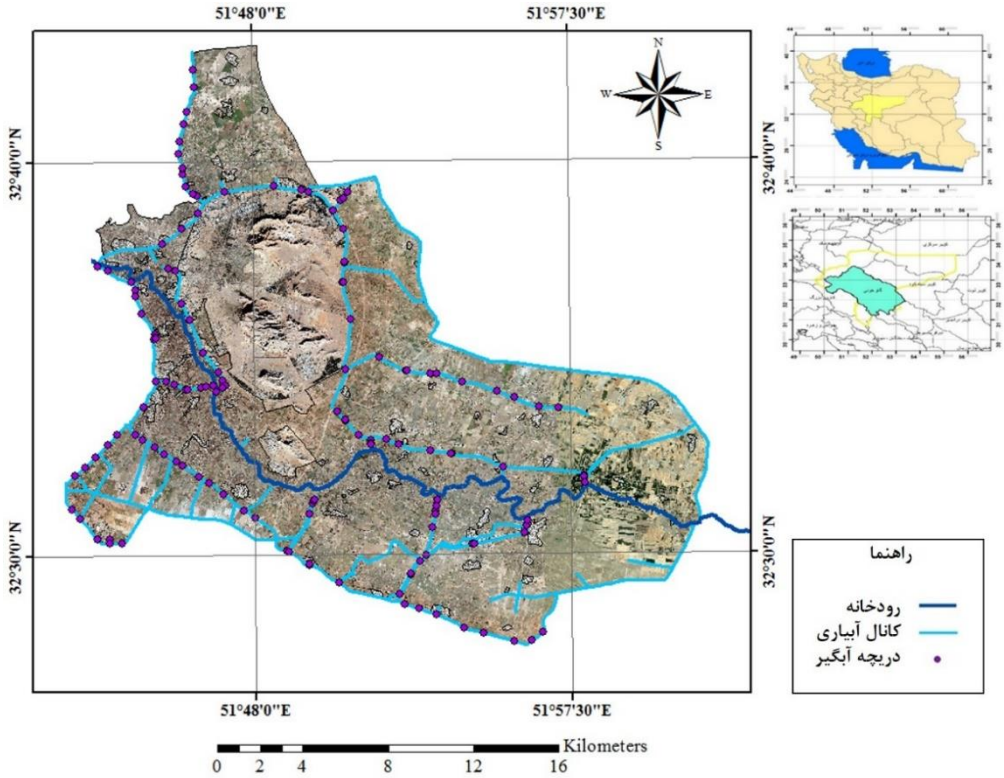
مواد و روش‌ها

شبکهٔ آبیاری و زهکشی آبشار

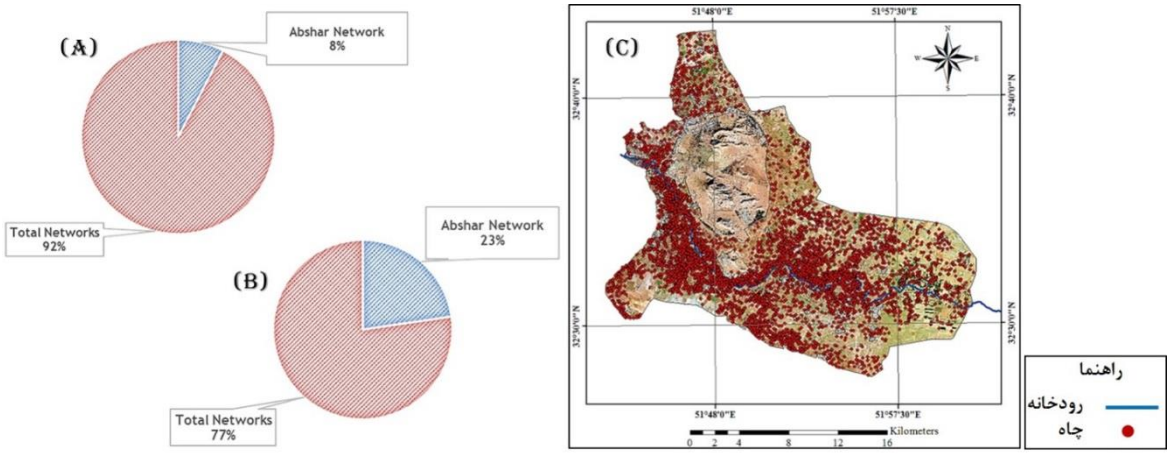
شبکهٔ آبیاری آبشار، شکل ۱، واقع در حوضهٔ آبریز زاینده‌رود و دشت کوهپایه و سگزی (شرق استان اصفهان) و با ارتفاع تقریبی ۱۵۰۰ متر بالاتر از سطح دریا، در منطقهٔ مرکزی ایران واقع شده است. مساحت در حال بهره‌برداری شبکه در حدود ۲۱ هزار هکتار است و موقعیت مکانی آن در عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۲۸ دقیقهٔ شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۷ دقیقهٔ شرقی قرار گرفته است. میانگین بارندگی سالانه در این منطقه ۱۲۰ میلی‌متر است که این میزان بسیار کمتر از متوسط بارندگی سالانه در ایران، حدود ۲۴۰ میلی‌متر است. این در حالی است که میزان تبخیر و تعرق در این منطقه حدود ۱۵۰۰ میلی‌متر در

سال برآورد شده است. منبع اصلی تأمین‌کنندهٔ آب این شبکهٔ آبیاری، آب رهاشده از سد انحرافی آبشار است. در طرفین سد انحرافی آبشار، در منشأ تأمین آب این شبکهٔ آبیاری، دو رشته کانال اصلی چپ و راست به منظور برداشت آب با هدف تحت پوشش قرار دادن اراضی به وسعت ۳۲ هزار هکتار (که بنا بر اطلاعات اخذشده از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان در حال حاضر حدود ۲۱ هزار هکتار در حال بهره‌برداری است) احداث شده است.

شبکهٔ آبیاری آبشار دارای دو رشته کانال اصلی درجهٔ ۱ به طول حدود ۶۹ کیلومتر و با ظرفیت حدود ۱۶ متر مکعب در ثانیه و ۱۰ رشته کانال فرعی درجهٔ ۲ به طول حدود ۶۱ کیلومتر با ظرفیت حدود ۳۰۰ تا ۲۴۰۰ لیتر در ثانیه و نیز حدود ۱۸۰ کیلومتر جمع‌کننده و زهکش سطحی روباز است. دریچه‌های برداشت آب از نوع نیرپیک تیپ XX2، L2 و C2 هستند. سازه‌های تنظیم سطح آب دینامیک از تیپ آمیل هستند. کنترل و تنظیم سطح آب به دو شیوهٔ کنترل بالادست، با به‌کارگیری ۳۲ سازهٔ خودکار هیدرومکانیکال آمیل و یک سازهٔ بتنی ثابت Duck-Bill صورت می‌گیرد. بر اساس تحلیل اطلاعات میدانی جمع‌آوری‌شده از شبکهٔ آبیاری آبشار، طی انجام این تحقیق، عملکرد ضعیف بهره‌برداری این شبکه به هدررفت حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد جریان ورودی در سامانه‌های انتقال، توزیع و تحویل آب کشاورزی می‌انجامد. از این‌رو، برای رفع این مشکل، کشاورزی وابسته به منابع آب زیرزمینی گسترش پیدا کرده به گونه‌ای که در حال حاضر با برداشت سالانه حدود ۱۰۲ میلیون مترمکعب از حدود ۵۲۶۹ حلقه چاه فعال حفرشده، مطابق شکل ۲، در داخل شبکهٔ آبیاری آبشار، حجم آب برداشتی در محدودهٔ این شبکه حدود ۸ درصد کل برداشت از منابع آب زیرزمینی در محدودهٔ شبکه‌های آبیاری حوضهٔ زاینده‌رود است. تعداد و موقعیت چاه‌های حفرشده به تفکیک نوع چاه (عمیق و نیمه‌عمیق) در سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۰ روی آبخوان این منطقه، بیانگر افزایش چشمگیر ۳۰۱/۲ و ۶۶/۴۳ درصدی به‌ترتیب برای حفر چاه‌های نیمه‌عمیق و چاه‌های عمیق است. افزایش روزافزون حفر چاه‌ها و بهره‌برداری از آن برای مصارف کشاورزی، این منطقه را به یکی از دشت‌های بحرانی کشور تبدیل کرده است.



شکل ۱. موقعیت شبکهٔ آبیاری آبشار، پراکندگی کانال‌های اصلی و فرعی توزیع آب سطحی و دریچه‌های آبگیر واقع بر آن‌ها



شکل ۲. (A) نسبت برداشت منابع آب زیرزمینی در شبکهٔ آبشار به کل برداشت منابع آب زیرزمینی، (B) نسبت تعداد چاه‌ها در شبکهٔ آبشار به کل چاه‌های برداشت آب زیرزمینی در محدودهٔ شبکه‌های آبیاری حوضهٔ زاینده‌رود، (C) شمایی از انبوه چاه‌های حفرشده عمیق، نیمه‌عمیق و کم‌عمق حفرشده طی سال‌های ۲۰۰۳ـ ۲۰۱۶ در محدودهٔ شبکهٔ آبیاری آبشار

شبیه‌سازی توزیع و تحویل آب در کانال آبیاری

به منظور ارزیابی عملکرد سیستم بهره‌برداری فعال در شبکهٔ آبیاری آبشار، باید شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در کانال‌های اصلی و فرعی شبکه انجام گیرد. با توجه به تعداد محدود این شبیه‌سازها و همچنین، هزینهٔ زیاد خریداری مجوز قانونی این نوع نرم‌افزارهای تجاری، در این پژوهش مدل ریاضی هیدرولیک جریان در کانال اصلی سیستم توزیع آب در محیط نرم‌افزار MATLAB برنامه‌نویسی شد تا امکان تبادل اطلاعات با برنامه‌های زمانی تغییر بازشدگی دریچه‌های آبگیر (برنامه‌ریزی روزانهٔ تحویل و توزیع آب) به‌راحتی امکان‌پذیر شود. شایان یادآوری است که به‌کارگیری مدل‌های ریاضی باید به گونه‌ای صورت پذیرد که پارامترهای هیدرولیکی جریان (شامل رقوم سطح آب در مجاورت سازه‌های تنظیم سطح آب و دبی تحویلی به هریک از آبگیرها) در مدل توسعه‌داده‌شده قابل رصد باشد. از بین مدل‌های ریاضی موجود تنها مدل سنت ونانت خطی‌شده و مدل انتگرالی- تأخیری[1] (ID) در پروژه‌های مدرن‌سازی سامانه‌های آبی جایگاه مناسبی پیدا کرده است. مدل سنت ونانت خطی‌شده به طور کلی در پروژه‌های چندهدفه مانند کنترل آنی کمیت و کیفیت جریان یا خودکارسازی سامانه‌های بزرگ انتقال آب مثل رودخانه‌ها که دقت زیادی از کنترل سطح آب مورد نیاز است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش از مدل ریاضی ID برای شبیه‌سازی جریان در کانال اصلی سیستم توزیع آب استفاده شده است. در فعالیت‌های پژوهشی و عملی خودکارسازی در کانال‌های آبیاری در بیشتر موارد به سبب راحتی محاسبات و تأمین دقت مورد نیاز از مدل ID استفاده شده است [۲۱].

در مدل یادشده، هر بازهٔ کانال اصلی سیستم توزیع آب به دو بخش، شامل i- بخش جریان یکنواخت و ii- بخش منحنی برگشت آب است. هر بخش یک مشخصهٔ اصلی دارد که از مجموع این دو، مدل انتگرالی- تأخیری به‌دست می‌آید. این دو مشخصهٔ اصلی در هر بازهٔ کانال عبارت‌اند از: زمان تأخیر (τ) و سطح ذخیره (A_s). در بخش اول (جریان یکنواخت) فرض می‌شود که موج جریان ورودی جریان فقط به سمت پایین‌دست منتقل می‌شود. هر تغییری در سازهٔ تنظیم‌کنندهٔ سطح آب بالادست به تولید یک موج منجر می‌شود، این بخش از کانال فقط به عنوان گذار برای عبور این موج عمل می‌کند. شایان یادآوری است که سرعت موج در یک بازه از کانال با عمق نرمال، به سرعت موج سینماتیک نزدیک است [۲۲]. زمان تأخیر ناشی از حرکت موج یادشده به بخش منحنی برگشت آب می‌رسد و موجب تغییر تراز سطح آب می‌شود. زمان تأخیر تنها پارامتری است که در بخش جریان یکنواخت، برای تشریح جریان، در نظر گرفته می‌شود. معادلهٔ حاکم بر این بخش به صورت رابطهٔ ۱ ارائه می‌شود [۲۳]:

1. Integrator-Delay (ID) Model

$$q_{canal}(t) = q_{in}(t-\tau) \quad (۱)$$

که در آن q_{in} دبی ورودی به بخش یکنواخت جریان (m^3/s)، q_{canal} دبی ورودی به بخش ذخیره (m^3/s)، t زمان (sec) و τ زمان تأخیر (sec) است. بخش منحنی برگشت آب (بخش دوم) مانند یک مخزن عمل می‌کند و بخش انتگرالی مدل را شامل می‌شود. تغییرات مساحت سطح افقی آب در ترازهای مختلف مخزن (A_s) براساس دبی‌های ورودی و خروجی از بازه کانال به صورت رابطهٔ ۲، در حوزهٔ زمان و حوزهٔ فرکانس، قابل بیان است [۲۲]:

$$\begin{aligned} & A_s \cdot \frac{dh(t)}{dt} = q_{canal}(t) - q_{out}(t) \\ & A_s \cdot s \cdot h(s) = q_{canal}(s) - q_{out}(s) \Leftrightarrow \\ & h(s) = \frac{1}{A_s \cdot s} \cdot \left[q_{canal}(s) - q_{out}(s) \right] \end{aligned} \quad (۲)$$

که در آن A_s مساحت سطح ذخیره (m^2)، h عمق آب و (m)، q_{out} دبی خروجی از بخش منحنی برگشت آب (m^3/s) است. برای یک بازه از کانال که شامل بخش جریان یکنواخت و بخش منحنی برگشت آب است، مدل کاملی از تلفیق معادلات ارائه‌شده در بخش‌های قبلی به دست می‌آید.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل بهره‌برداری کانال مورد مطالعهٔ این پژوهش که با استفاده از مدل ریاضی ساده‌شدهٔ ID توسعه داده شد، براساس اطلاعات اندازه‌گیری‌شده در محل (در دورهٔ زمان بهره‌برداری سال‌های ۱۳۹۰-۱۴۰۰) انجام گرفت. لازم به توضیح است که به دلیل کمبود آب، در برخی از سال‌های اخیر دورهٔ توزیع آب محدود به چند هفته شد که به منظور عدم تأثیر این شرایط در نتایج تحقیق، سعی شد بازهٔ زمانی کاملی از توزیع آب در کانال‌ها بر اساس آمار ده‌سالهٔ جمع‌آوری‌شده از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان انجام گیرد. با کالیبراسیون مدل بر پایهٔ میزان تطبیق داده‌های دبی تحویلی به کلیهٔ آبگیرهای واقع در کانال اصلی سیستم توزیع آب، به عنوان ضریب واسنجی، انجام گرفت. برای مقایسهٔ مقادیر شبیه‌سازی‌شده با مقادیر مشاهداتی از شاخص‌های ارزیابی ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب خطای پس‌ماند (CRM) و میانگین خطای مطلق (MAE) استفاده شد. مدل تهیه‌شده براساس داده‌های دبی تحویلی به کلیهٔ آبگیرهای کانال، برای دورهٔ بهره‌برداری در زمان کشت بهاره در شبکهٔ آبیاری و با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری‌شده در یک بازهٔ ده‌ساله واسنجی شد که مقادیر شبیه‌سازی‌شده با مقادیر مشاهده‌شده مقایسه شدند. مدل، با تغییر زمان تأخیر در بازه و بررسی انطباق مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری‌شده دبی تحویلی به آبگیرها واسنجی شد. تحویل و توزیع سطح آب در طول کانال‌های اصلی توسط ۳۸ آبگیر – کانال اصلی شاخهٔ جنوبی (چپ) – و ۲۰ آبگیر – کانال اصلی شاخهٔ شمالی (راست) و در کانال‌های فرعی ده‌گانه توسط ۷۷ آبگیر انجام می‌گیرد که به صورت دستی بهره‌برداری می‌شوند. سیستم توزیع آب سطحی شبکهٔ آبیاری آبشار شامل ۵۸ منطقهٔ زراعی مستقل است، توزیع آب سطحی توسط ۵۸ آبگیر اصلی صورت می‌گیرد. با توجه به شرایط سازه‌ای کانال اصلی سیستم توزیع آب محدودهٔ مطالعه‌شده، فرم مدل ماتریسی فضای حالت، مطابق رابطهٔ ۳، با ابعاد مختلف ماتریس، به تفکیک کانال‌های آبیاری – دو کانال اصلی و ۱۰ کانال فرعی - به دست آمد. با تبدیل روابط به‌دست‌آمده برای تمامی بازه‌ها، به دلیل بزرگ بودن ماتریس‌ها، مدل ماتریسی فضای حالت تنها برای بازهٔ اول در رابطهٔ ۳ آورده شده است [۲۱]:

$$\begin{bmatrix} Q_{hg}(k+1) \\ Q_{hg}(k) \\ Q_{hg}(k-1) \\ Q_{hg}(k-2) \\ e_1(k+1) \\ e_1^*(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{T_c}{A_s} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{T_c}{A_s} & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_{hg}(k) \\ Q_{hg}(k-1) \\ Q_{hg}(k-2) \\ Q_{hg}(k-3) \\ e_1(k) \\ e_1^*(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \nabla Q_{hg}(k) \\ u^*(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{T_c}{A_s} \\ -\frac{T_c}{A_s} \end{bmatrix} \cdot \left[Q_{off-take1}(k) \right] \quad (۳)$$

$$u^*(k) \geq h_{\min}(k) - h_{ref},$$
$$u^*(k) \leq h_{\max}(k) - h_{ref},$$

که در این رابطه $Q_{hg}(k)$، $Q_{hg}(k-1)$، $Q_{hg}(k-2)$ و $Q_{hg}(k-3)$ به‌ترتیب دبی‌های کنترلی (m^3/s) رهاشده از سازهٔ تنظیم سراب کانال در گام‌های زمانی k-3 تا k (sec) است. زمان تأخیر بین ورود آب از سراب تا تغییر ایجادشده رقوم سطح آب در انتهای پایین‌دست اولین بازه کانال مورد مطالعه برابر ۳ گام زمانی است. $e_1(k)$ خطای محاسبه‌شده (رقوم سطح آب اندازه‌گیری‌شده از رقوم هدف) برای بازهٔ اول کانال (m) و $e_1^*(k)$ متغیر حالت اضافه‌شده به سیستم است که دربرگیرندهٔ محدودیت نرم ناشی از تجاوز رقوم سطح آب از رقوم حداکثر و حداقل در بازه اول (m) است. $u^*(k)$ مقداری است که از میزان خطای ناشی از انحراف سطح آب از سطح هدف کم می‌شود تا مقدار $e_1^*(k)$ را به وجود آورد. درواقع، متغیر $u^*(k)$ تفسیر فیزیکی ندارد و فقط یک متغیر فرضی برای اعمال جریمهٔ بیشتر بر تابع هدف در زمانی که سطح آب از محدودهٔ مجاز بین حداکثر و حداقل رقوم سطح آب تجاوز می‌کند، است.

شاخص ارزیابی عملکرد توزیع آب در کانال‌های آبیاری و سناریوهای بهره‌برداری

ارزیابی توزیع آب سطحی توسط مدل‌های بهره‌برداری توسعه‌داده‌شده این پژوهش توسط شاخص ارزیابی عملکرد «کفایت توزیع آب سطحی» انجام شد. شاخص‌های کفایت و پایداری به صورت رابطهٔ ۴ تعریف می‌شود [۲۴]:

$$PA = \frac{1}{T}\sum_{T}\left[\frac{1}{R}\sum_{R}\left(\frac{Q_D}{Q_R}\right)\right] \qquad (۴)$$

که در آن PA شاخص کفایت توزیع آب (درصد)، T مدت‌زمان بهره‌برداری (sec)، R تعداد کل آبگیری‌های واقع در کانال اصلی، Q_D دبی تحویلی به هر آبگیر (m^3/s) و Q_R دبی تقاضای آب کشاورزی (m^3/s) است. هرچه مقدار شاخص کفایت به ۱۰۰ درصد نزدیک‌تر شود، مقدار مطلوب آن رخ داده است. با این‌حال، براساس طبقه‌بندی توصیه‌شده توسط مولدن و گیتس [۲۴]، سه دسته که بیانگر بهره‌برداری مطلوب ($PA \in (90-100)$)، قابل قبول ($PA \in (80-90)$) و ضعیف ($PA \leq 80$) سیستم توزیع آب است، قابل ارائه است.

نتایج و بحث

برآورد نیاز آبی محصولات غالب در الگوی کشت شبکهٔ آبیاری آبشار

با توجه به اینکه هدف اصلی این تحقیق تعیین سهم آب سطحی و زیرزمینی در تأمین آب آبیاری محصولات کشت‌شده در شبکهٔ آبیاری آبشار است، بنابراین در اولین گام اقدام به تخمین نیاز آبی محصولات غالب الگوی کشت این شبکه با استفاده از نرم‌افزار نت‌وات شد. نتایج این بخش در قالب جدول ۱ ارائه شده است. یکی از دلایلی که محققان این پژوهش را مجاب به این مهم کرد، نبود اطلاعات یکپارچه و قابل استناد جمع‌آوری‌شده در مطالعات میدانی بود تا بتوان مقدار نیاز آب آبیاری واقعی هر واحد مستقل کشاورزی را برآورد کرده و سپس، سهم منابع آب را تامین آن مشخص کرد. بیشتر اطلاعات موجود، اطلاعات مربوط به فروش آب، حقابه‌های از قبل مشخص و سهم آب مشخص‌شده برای هر دریچه بود. در ارتباط با محاسبات صورت‌گرفته در جدول ۱ لازم به توضیح است که اطلاعات مربوط به نام محصول، سطح زیر کشت و عملکرد آن در هر یک محدوده‌های مطالعاتی مورد نظر پژوهش حاضر مربوط به محصولاتی است که در مجموع ۹۰ درصد سطح زیر کشت شبکه را پوشش می‌دهند. به منظور محاسبهٔ نیاز خالص آبیاری از نرم‌افزار نت‌وات استفاده شد. به منظور محاسبهٔ میزان کل آب مصرفی در واحد هکتار این شبکه لازم بود که راندمان سیستم آبیاری واقع در مزارع این شبکه مد نظر قرار گیرد، که بر اساس اطلاعات جمع‌آوری مشخص شد که بیشتر مزارع از سیستم آبیاری سطحی از نوع آبیاری کرتی و جوی پشته‌ای بهره می‌برند که راندمان یادشده طبق توصیهٔ عباسی و همکاران [۱۷] در نظر گرفته شد.

کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی جریان در کانال‌های آبیاری

به منظور کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل ریاضی بهره‌برداری سامانهٔ انتقال و توزیع شبکهٔ آبشار با استفاده از شبیه‌ساز هیدرولیک جریان توسعه‌داده‌شده در این تحقیق، شاخص‌های آماری RMSE، CRM و MAE محاسبه شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. این ارزیابی بر اساس شبیه‌سازی دورهٔ بهره‌برداری ۱۵۰ روزه‌ای صورت گرفت

که داده‌های بهره‌برداری، شامل دبی ورودی به کانال اصلی و دبی تحویلی به آبگیرها در طول کانال اصلی، در سطح کانال مورد مطالعه اندازه‌گیری شده بود. بر این اساس، ۷۵ روز از این ۱۵۰ روز برای کالیبراسیون و ۷۵ روز برای صحت‌سنجی استفاده شد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، کالیبراسیون مدل به صورت آزمون و خطای دبی تحویلی به هر سازهٔ آبگیر واقع در کانال اصلی آبشار انجام شد. نتایج کالیبراسیون نشان داد MAE، برای دورهٔ کالیبراسیون برابر ۰/۸۷ و برای دورهٔ صحت‌سنجی ۱/۲۳ متر مکعب بر ثانیه است. مقدار بهینهٔ این شاخص برابر صفر است. با توجه به اینکه مقادیر یادشده به مقدار بهینه نزدیک هستند، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل دقت مناسبی ارائه می‌کند. شاخص CRM، برای دوره‌های کالیبراسیون و صحت‌سنجی، به‌ترتیب برابر ۰/۰۰۲- و ۰/۰۰۷- هستند، با توجه به اینکه بهترین میزان برای CRM صفر است، مقادیر کم این شاخص بیانگر دقت قابل قبول مدل در مراحل کالیبراسیون و صحت‌سنجی است. درنهایت، میزان شاخص RMSE، برای دورهٔ کالیبراسیون برابر ۰/۹۱ و برای دورهٔ صحت‌سنجی ۱/۰۹ متر مکعب بر ثانیه به دست آمدند. مقادیر مناسب این شاخص نیز دقت مدل را مورد تأیید قرار می‌دهد.

جدول ۱. نیاز آبی محاسبه‌شدهٔ محصولات غالب الگوی کشت شبکهٔ آبیاری آبشار و میزان کل آب مصرفی

ردیف	نام محصول غالب الگوی کشت	سطح زیر کشت (هکتار)	عملکرد (تن در هکتار)	نیاز خالص آبی در هکتار (مترمکعب)	راندمان کاربرد در مزرعه (درصد)	میزان کل آب مصرفی در هکتار (مترمکعب)
۱	گندم	۹۲۴۰	۴/۵	۳۷۲۷	۴۱	۹۰۹۱
۲	خربزه	۲۷۷	۴۰	۶۲۸۳	۴۱	۱۵۳۲۵
۳	کدو	۴۶۲	۲۰	۵۵۳۵	۴۱	۱۳۵۰۰
۴	پیاز	۲۳۱۰	۶۵	۵۷۴۰	۴۱	۱۴۰۰۰
۵	باقلا	۱۹۲۵	۱۸	۲۷۱۹	۴۱	۶۶۳۱
۶	شبدر	۳۲۷	۶	۳۲۸۰	۴۱	۸۰۰۰
۷	باغ‌ها	۹۷۰	۷	۲۸۷۰	۴۱	۷۰۰۰

شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد تحویل و توزیع آب سطحی در سطح شبکهٔ آبیاری آبشار

به منظور بررسی وضع موجود بهره‌برداری سامانهٔ انتقال و توزیع آبیاری در این تحقیق، شبیه‌سازی بهره‌برداری وضع موجود به تفکیک هر یک از کانال‌های اصلی (شاخهٔ شمالی (راست) و شاخهٔ جنوبی (چپ)) و فرعی (کانال‌های یک تا ده) توسط مدل کالیبره‌شده انجام گرفت. سپس، ارزیابی تحویل و توزیع آب به صورت نقطه‌ای (به تفکیک هر سازهٔ آبگیر)، منطقه‌ای (در سه ناحیهٔ بالادست، میان‌دست و پایین‌دست) و کلی (منظور کل آبگیرهای واقع در امتداد هر کانال) با بهره‌گیری از شاخص کفایت تحویل و توزیع آب و به ازای سناریوهای مختلف انجام شد. به این صورت که در ارزیابی نقطه‌ای، شاخص ارزیابی عملکرد کفایت توزیع و تحویل آب برای آبگیرهای واقع در طول کانال اصلی محاسبه شد. همچنین، به منظور بررسی منطقه‌ای تحویل و توزیع آب در هر کانال، شاخص مورد نظر در بالادست، میان‌دست و پایین‌دست برآورد شد. شایان یادآوری است که در ارزیابی شاخص کفایت با استفاده از این روش، تعداد آبگیرها در هر بازه (بالادست، میان‌دست و پایین‌دست) حتی‌الامکان یکسان انتخاب شده و ارزیابی کفایت تحویل و توزیع آب در امتداد هر بازه بر اساس متوسط شاخص‌های کفایت توزیع و تحویل آب برای آبگیرهای واقع در امتداد آن بازه محاسبه می‌شود. از طرفی دیگر، به جهت ارائهٔ دیدگاه جامع برای مدیر شبکه و تصمیم‌گیران محلی، شاخص کفایت با استفاده از روش یادشده در کل کانال نیز محاسبه شدند و تحویل و توزیع

آب با توجه به سناریوهای مختلف بررسی شده است. به این‌منظور، طیف مختلفی از دبی‌های ورودی در قالب سناریوهای بهره‌برداری مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. از این‌رو، حالت‌های مختلف بهره‌برداری (در این تحقیق سناریوهای بهره‌برداری نام‌گذاری شده است)، بر اساس محدودهٔ دبی ورودی و الگوی تغییرات دبی ورودی، در این پژوهش در نظر گرفته شد تا فرایند ارزیابی بهره‌برداری به صورت دقیق‌تر و جامع‌تر صورت گیرد. از هر سناریو، یک دبی به عنوان نماینده انتخاب شد، به طوری که دبی برگزیده‌شده (دبی نمایندهٔ هر محدوده) بر اساس میزان تکرار وقوع این دبی در داده‌های اندازه‌گیری‌شده در شبکه طی بهره‌برداری از هر یک از کانال‌ها صورت گرفت. سناریوهای بهره‌برداری شامل: ۱- کاهش ۳۰ درصدی جریان ورودی (Sc#1)؛ ۲- کاهش ۱۵ درصدی جریان ورودی (Sc#2)؛ ۳- کاهش ۵ درصدی جریان ورودی (Sc#3)؛ ۴- شرایط بهره‌برداری نرمال یعنی زمانی که کانال مورد نظر جریان آب را بدون هیچ محدودیتی (افزایش و یا کاهش در دبی ورودی) در کانال‌های درجهٔ ۲ توزیع می‌کند (Sc#4) و ۵- افزایش ۲۵ درصدی جریان ورودی (Sc#5) که مربوط به روزهای محدودی طی فصل زراعی که میزان دبی تحویلی در محل بند انحرافی حدود ۲۵٪+ جریان بیشتر از میزان تقاضای شبکهٔ آبیاری بود.

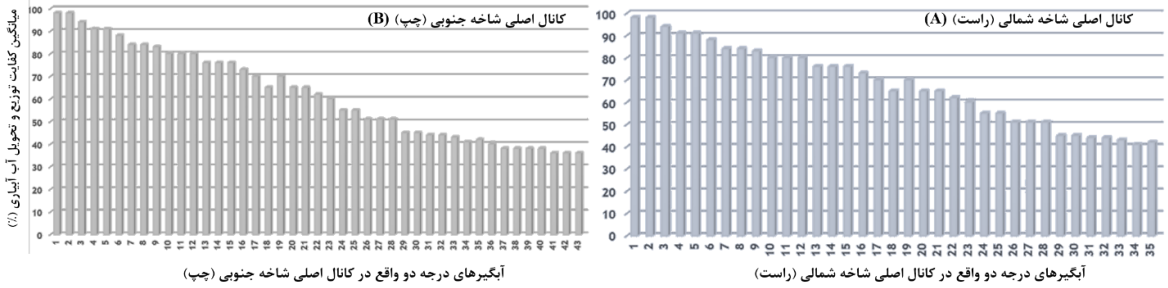
با توجه به تعداد زیاد کانال‌های این شبکه، که شبیه‌سازی توزیع آب همهٔ آن‌ها توسط مدل توسعه‌داده‌شده انجام و تحلیل شده است، فقط نتایج شبیه‌سازی‌شده طولانی‌ترین کانال که ظرفیت عبوری بیشتر و تعداد آبگیر بیشتری دارد، ارائه شده است. در این راستا، نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی برای کانال اصلی شاخهٔ شمالی (راست) و شاخهٔ جنوبی (چپ) به عنوان نمایندهٔ کانال‌های شبکه در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه و در ادامه تشریح و بحث شده است.

هر یک از نمودارهای ارائه‌شده در شکل ۴ میانگین شاخص کفایت توزیع آب محاسبه‌شده طی فصل آبیاری- که نمایانگر میزان متوسط تحویل آب آبیاری به هر آبگیر واقع شده در کانال‌های اصلی است- را به ازای سناریوهای بهره‌برداری نشان می‌دهد. مطابق با نتایج ارائه‌شده، با کاهش جریان ورودی به کانال اصلی مورد نظر در شبکهٔ آبشار میزان متوسط شاخص کفایت در کل امتداد مسیر کانال مستقیم تحت تأثیر قرار گرفته که باعث کاهش مطلوبیت بهره‌برداری سیستم متناسب با هر سناریو شده است.

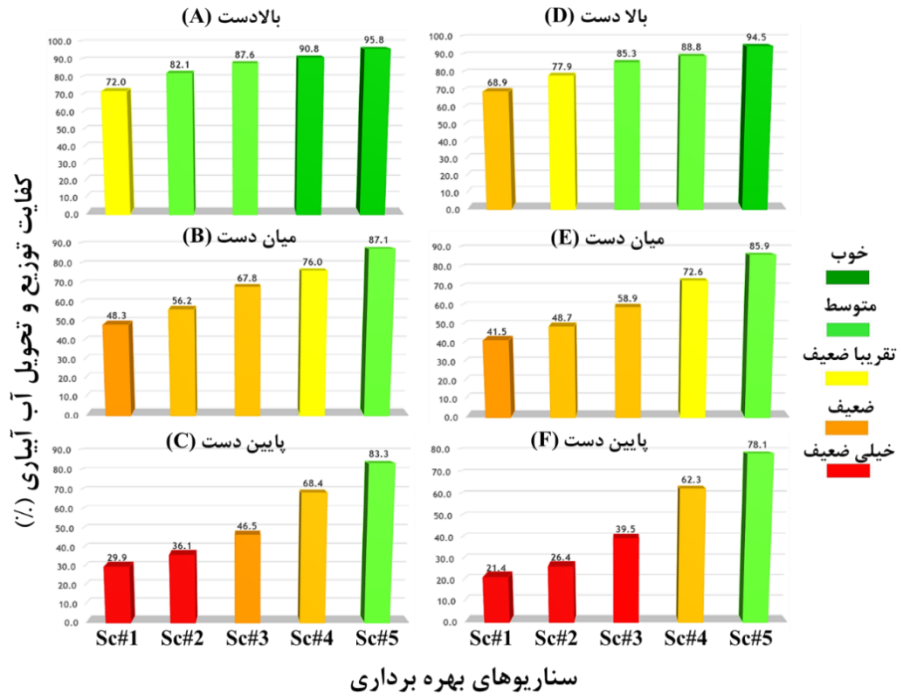
روند کاهشی کفایت تحویل آب از آبگیرهای بالادست تا آبگیرهای پایین‌دست در سناریوی بهره‌برداری، نشان از ضعف مدیریت صحیح توزیع آب و ناکارآمدی شبکه در تحویل آب مورد نیاز آبگیرهای واقع در میان‌دست و به‌ویژه پایین‌دست این کانال دارد. توجیه این پدیده علاوه بر ماهیت کنترل بالادستی بودن بهره‌برداری، به شیوهٔ سازوکار و تنظیم کردن سازه‌های تنظیم سطح آب و نیز سازه‌های آبگیر این سیستم که به صورت دستی (روش سنتی و متکی بر اپراتور) است، برمی‌گردد. نتایج بیانگر آن است که مقادیر کفایت تحویل آب، به‌جز آبگیرهای ابتدایی کانال (واقع‌شده در بالادست هر کانال اصلی)، در بیشترین حالت خود مقدار ۸۰ درصد را تجربه می‌کنند و با کاهش این شاخص برای باقی‌ماندهٔ آبگیرها (واقع در میانه و انتهای پایین‌دست هر کانال) آسیب‌پذیری در آبگیرهای پایین‌دست افزایش یافته و بنابراین، شبکه قادر به تأمین نیاز آبگیرها نیست. این روند کاهشی در سایر سناریوهای بهره‌برداری (در روزهایی از فصل زراعی که آب تحویل‌داده‌شده به شبکه در محدودهٔ ۵-۳۰٪ کاهش یافته بود) نیز به طور واضحی قابل مشاهده بود. به طوری که به ازای کاهش جریان ورودی در محل بند انحرافی در بالادست شبکه، میزان متوسط شاخص کفایت از میزان مطلوب فاصله گرفته است و شرایط مطلوب تحویل آب تنها در تعداد محدودی از آبگیرها (به‌خصوص آبگیرهای واقع‌شده در ابتدای کانال) مشاهده شد. نتایج نشان داد در روزهایی که میزان آب ورودی به شبکه به مقدار ۵٪-، ۱۵٪- و ۳۰٪- کاهش یافت، به‌ترتیب و تنها در ۱۰، ۷ و ۴ آبگیر ابتدایی کانال اصلی شاخهٔ جنوبی (یعنی تنها برای ۲۸، ۱۹ و ۱۱ درصد آبگیرها) شرایط مطلوب بهره‌برداری با شاخص کفایت بالای ۸۰ درصد مشاهده می‌شود و برای سایر آبگیرها مقادیر بسیار کمتری از کفایت تحویل نشان داده شده است.

از سوی دیگر، با افزایش دبی در محل آبگیر (بهره‌برداری در سناریو Sc#5)، میزان متوسط شاخص کفایت در ۸۶ درصد آبگیرها بالاتر از ۸۰ درصد به دست آمده که بیانگر مطلوبیت بهره‌برداری است. این در حالی است که وقوع شرایط مورد نظر خطر تشدید نوسان‌ها در

بازه‌های کانال را به همراه داشته و سبب بالازدگی آب از کانال می‌شود. از طرفی دیگر، با توجه به محدودیت زمانی در ایجاد این سناریو، وقوع شرایط مورد نظر بسیار ناپایدار است. بنابراین، با وجود مطلوبیت بهره‌برداری در این سناریو، نمی‌توان از عملکرد بهره‌برداری کانال مورد نظر در سایر سناریوها چشم‌پوشی کرد.



شکل ۳. ارزیابی محلی (نقطه‌ای) شیوهٔ توزیع آب کشاورزی بین آبگیرهای واقع در کانال‌های اصلی شبکهٔ آبیاری آبشار



شکل ۴. پراکندگی مکانی کفایت توزیع آب سطحی (ارزیابی کلی) در شبکهٔ آبیاری آبشار در (A-C) بالادست، میان‌دست و پایین‌دست کانال اصلی شاخهٔ شمالی (D-F) بالادست، میان‌دست و پایین‌دست کانال اصلی شاخهٔ جنوبی، تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری

تعیین سهم هر یک از منابع آب سطحی و زیرزمینی در فعالیت‌های کشاورزی شبکهٔ آبیاری آبشار

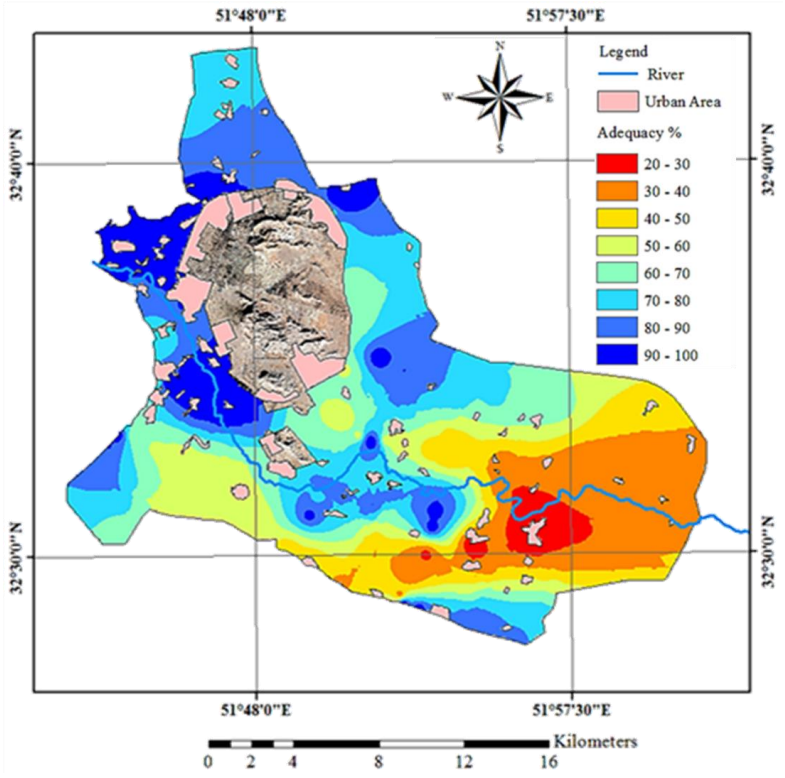
همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، اولین گام در پیاده‌سازی یک چارچوب حسابداری آب به منظور ارتقای شیوهٔ مدیریت تخصیص و توزیع آب در یک شبکهٔ آبیاری، بررسی مکانی شیوهٔ توزیع آب و در نتیجه، تعیین سهم هر یک از منابع آب سطحی و زیرزمینی در تأمین نیاز کشاورزی است. در این راستا، در گام اول اقدام به ارزیابی وضعیت فعلی و عملکرد بهره‌برداری انتقال و توزیع آب شبکهٔ آبیاری آبشار در برخورد با شرایط بهره‌برداری محتمل صورت گرفت. ارزیابی عملکرد بهره‌برداری بستری را ایجاد می‌کند که جنبه‌های مختلف سازه‌ای، هیدرولیکی و مدیریتی و همچنین، تعیین عوامل مؤثر بر بهره‌برداری از شبکه، به منظور ارائهٔ اقدامات لازم برای بهبود وضعیت بهره‌برداری در صورت لزوم انجام شود. در این راستا، ارزیابی عملکرد به‌دست‌آمده در سامانهٔ انتقال و توزیع آب

کشاورزی (شامل کانال‌های اصلی و فرعی) در شبکهٔ آبیاری آبشار از دیدگاه کفایت تحویل و توزیع آب آبیاری صورت گرفت و نتایج حاصل از شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد بهره‌برداری کانال اصلی شبکهٔ آبیاری آبشار شامل شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد وضعیت بهره‌برداری موجود در سامانهٔ انتقال و توزیع، در شرایط مختلف بهره‌برداری - که در روزهای مختلف در یک فصل زراعی رخ می‌دهد - ارائه شد. در ادامه، به منظور ارائهٔ تحلیل مکانی و ارزیابی عملکرد بهره‌برداری شبکهٔ آبشار، مقدار متوسط شاخص محاسبه‌شده (کفایت تحویل و توزیع آب)، با استفاده از نرم‌افزار GIS و بر اساس طیف رنگی برای هر یک از واحدهای درجهٔ ۲ در شکل ۵ ارائه شد. نتایج تحلیل مکانی، امکان بررسی و مقایسهٔ مکانی پراکندگی مقادیر متوسط شاخص کفایت تحویل آب به آبگیرها تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری را فراهم کرده است. مطابق با این شکل در همهٔ سناریوها، شاخص کفایت از بالادست به سمت پایین‌دست روندی نزولی را طی می‌کند. دلیل این امر روش کنترل بالادست در کانال مورد مطالعه است. مقدار شاخص کفایت نشان‌داده‌شده در این شکل بیانگر این است که به طور کلی، بهره‌برداری در امتداد کانال اصلی شاخهٔ شمالی با مقادیر بیشتر، از مطلوبیت بیشتری برخوردار است. به طوری که در امتداد بالادست این کانال، بیشتر مناطق تحت پوشش کفایت ۸۰ -۱۰۰ درصدی دارند که نشان از عملکرد متوسط از نظر شاخص یادشده است. این در حالی است که شاخص مورد نظر در بخش بالادستی کانال اصلی شاخهٔ جنوبی در برخی از مناطق حتی به ۵۰-۶۰ درصد نیز نزول پیدا کرده است. ارزیابی شاخص کفایت در مناطق میان‌دستی و پایین‌دستی نیز گواه بر ضعف شرایط بهره‌برداری در این مناطق دارد. به بیانی، از مناطق تحت پوشش هر کانال از میان‌دست تا پایین‌دست، شاخص کفایت به‌ویژه در بخش پایین‌دست حتی به کمتر از ۳۰ درصد رسیده است.

برای محاسبهٔ دقیق سهم آب زیرزمینی در تأمین آب زیربخش‌های کشاورزی شبکهٔ آبیاری آبشار، از اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری واقع در محدودهٔ شبکهٔ آبیاری آبشار استفاده شد. بر اساس اطلاعات جمع‌آوری‌شده، تعداد ۵۲۶۹ چاه کم‌عمق/نیمه‌عمیق/عمیق (عمق حداقل ۲ متر تا حداکثر ۳۰۰ متر) در محدودهٔ این شبکهٔ آبیاری قرار دارد که بر اساس اطلاعات در دسترس، محدودهٔ دبی برداشتی آن‌ها بین ۰/۲ تا ۶۵ لیتر بر ثانیه متغیر است. روش کار برای محاسبهٔ میزان آب زیرزمینی برداشت‌شده در محدودهٔ شبکهٔ آبیاری به این صورت بود که با مقایسهٔ لایهٔ واحد زارعی درجهٔ ۲ و درجهٔ ۳ با لایهٔ چاه‌ها در نرم‌افزار GIS، چاه‌های واقع در هر محدودهٔ آبیاری مشخص شد. همان‌طور که در شکل ۵ قابل رؤیت است، روند توزیع آب سطحی در بخش‌های بالادست کانال‌های اصلی و نیز آبگیرهای واقع در بالادست هر کانال اصلی و فرعی که موقعیت نزدیک‌تری به بند انحرافی دارند، مناسب و در سایر مناطق غیر قابل اعتماد است. لازم به توضیح است که در سایر شبکه‌های آبیاری کشور ایران نیز همین روند کلی دیده می‌شود و سیستم‌های انتقال، توزیع و تحویل آب سطحی به‌ویژه در شبکهٔ کانال‌های آبیاری روباز به‌هم‌پیوسته در کشور از عملکرد خوبی برخوردار نیستند. بنابراین، ناکارآمدی مدیریت بهره‌برداری حال حاضر شبکه‌های آبیاری در تحویل و توزیع مناسب آب کشاورزی (که از منابع آب سطحی تأمین شده است) موجب شده که بیشتر اراضی زراعی که باید تحت پوشش آب سطحی باشند، به دلیل عدم کفایت در توزیع منابع آب سطحی و ناپایداری در تحویل آب، به طور چشم‌گیری وابسته به منابع آب زیرزمینی شده‌اند. شبکهٔ آبیاری آبشار نیز جدا از این روند نیست و همان‌طور که نتایج ارزیابی عملکرد نشان می‌دهد بهبود مدیریت بهره‌برداری از سامانه‌های انتقال، توزیع و تحویل آب ضروری است، تا ضمن کاهش تلفات بهره‌برداری در آن‌ها، وابستگی کشاورزان واقع در این محدوده‌ها به آب زیرزمینی نیز کاهش یابد.

نتایج نهایی این پژوهش در قالب شکل ۶ به تصویر کشیده شده که در آن سهم هر یک از منابع آب سطحی و زیرزمینی در تأمین آب آبیاری مزارع واقع در شبکهٔ آبیاری آبشار ارائه شده است. نتایج یادشده می‌توانست به ازای واحدهای زراعی درجهٔ ۲ و درجهٔ ۳ ارائه شود، ولی پس از بررسی نتایج به‌دست‌آمده در جلسات مختلف با متخصصان امر بهره‌برداری، دفتر امور آب شهرستان، بهره‌برداران محلی و شرکت بهره‌بردار این شبکهٔ آبیاری و همچنین، در راستای دستیابی به هدف اصلی این تحقیق (تهیهٔ جدول‌های حسابداری آب بر اساس سهم هر یک از منابع آبی)، درنهایت نتایج به تفکیک روستاها ارائه شد. از طرفی،

با توجه به این موضوع که مدیریت مشارکتی در مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی یا سایر امور مدیریتی در این زمینه از جمله تعادل‌بخشی آبخوان‌ها، دارای اولویت بالا برای متولیان آب کشور است، بنابراین تعیین سهم منابع آب به تفکیک واحدهای مدیریتی که منطبق بر واحدهای سیاسی بوده و مراجع تصمیم‌گیر محلی یا منطقه‌ای مشخصی داشته باشد، بر اهمیت اجرای سریع‌تر و مؤثرتر این نوع امور مشارکتی می‌افزاید. دلایل دیگر اقتصادی، زیست‌محیطی، فنی و از همه مهم‌تر اجتماعی نیز در ارائهٔ نتایج به تفکیک روستاها و واحدهای مدیریتی تأثیرگذار بود. به عنوان مثال، بهره‌بردار محلی برای هر بخش شبکه که معمولاً در یکی از روستاهای آن منطقه ساکن است، علاوه بر آشنایی با ساکنان بومی روستاهای واقع‌شده در مجاورت یک کانال فرعی شبکه، از مشکلات سازه‌ای، فنی یا خطرات طبیعی و انسان‌ساز (خرابی تعمدی تأسیسات شبکه یا آب‌دزدی‌های مداوم) به‌خوبی مطلع است. بنابراین، گزینش چنین بهره‌برداری می‌تواند تأثیر انکارناپذیر و مهمی در پیاده‌سازی هر راهکار مؤثر مدیریتی به منظور بهبود وضعیت منابع آب منطقه از جمله چارچوب حسابداری آب، روش‌های مدیریت مشارکتی در بهره‌برداری از منابع آب سطحی، نظارت دقیق‌تر بر کاهش ساعت‌های کارکرد ایستگاه‌های پمپاژ محلی با هدف کنترل برداشت آب زیرزمینی، پیاده‌سازی مؤثر پروژه‌های سالیانهٔ تعمیر و نگهداری توسط دفتر بهره‌برداری از شبکهٔ آبیاری و درنهایت، تعیین روش‌های سازه‌ای/غیرسازه‌ای/ کنترل خودکار/ نیمه‌خودکار در بهسازی، مدرن‌سازی و نوسازی شبکه‌های توزیع آب سطحی در مناطق کشاورزی ایفا کند. بنابراین، با توجه به دلایل یادشده و سایر ملاحظات مطرح‌شده و شرایط خاص موقعیت این شبکهٔ آبیاری که در مجاورت با مناطق مسکونی و روستاهای نزدیک به شهر اصفهان واقع شده و به خلاف عمده مطالعات مشابه صورت‌گرفته در بحث مدیریت بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری، به جای واحدهای زراعی درجهٔ ۲ و درجهٔ ۳، روستاهای واقع در محدودهٔ شبکه به عنوان واحدهای مستقل زراعی در نظر گرفته شد و نتایج نهایی این پژوهش (شکل ۶) به تفکیک آن‌ها ارائه شد.



شکل ۵. پراکندگی مکانی کفایت توزیع آب سطحی (ارزیابی منطقه‌ای) در شبکهٔ آبیاری آبشار در (A-C) بالادست، میان‌دست و پایین‌دست کانال اصلی شاخهٔ شمالی (D-F) بالادست، میان‌دست و پایین‌دست کانال اصلی شاخهٔ جنوبی، تحت سناریوهای مختلف بهره‌برداری

شکل ۶. سهم مشخص‌شده از برداشت آب سطحی و زیرزمینی به تفکیک روستاهای واقع در محدودهٔ شبکهٔ آبیاری آبشار

نتیجه‌گیری

با توجه به عملکرد ضعیف شبکه‌های آبیاری، بهبود عملکرد آن‌ها گامی ضروری در راستای افزایش بهره‌وری آب محسوب می‌شود. نخستین مرحله به این‌منظور، ارزیابی وضع موجود بهره‌برداری است. روش‌های کمی و کیفی متعددی برای ارزیابی شبکه‌های آبیاری موجود است، که یکی از این روش‌ها، شبیه‌سازی بهره‌برداری در کانال‌های آبیاری و استفاده از اطلاعات آن به منظور کمی‌سازی شاخص‌های ارزیابی است. ارزیابی تحویل و توزیع آب به صورت نقطه‌ای، منطقه‌ای و کلی، با در نظر گرفتن نظرات متخصصان امر بهره‌برداری، می‌تواند دیدگاه واقع‌بینانه‌تری را در اختیار مدیر شبکه قرار دهد و امکان بررسی عملکرد

تیم‌های مختلف بهره‌برداری را نیز میسر سازد. بنابراین در پژوهش حاضر، کانال‌های اصلی و فرعی شبکهٔ آبیاری آبشار در استان اصفهان با بهره‌گیری از مدل شبیه‌ساز هیدرودینامیک انتگرالی ـ تأخیری ایجاد شد. پس از کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل، دقت آن مورد تأیید قرار گرفت. مدل کالیبره‌شده به ازای سناریوهای مختلف بهره‌برداری اجرا شده و از خروجی‌های آن برای ارزیابی تحویل و توزیع آب در محل آبگیرها (نقطه‌ای)، مناطق بالادست، میان‌دست و پایین‌دست کانال (منطقه‌ای)، در کل کانال (کلی) و ارائهٔ تحلیل مکانی مطلوبیت تحویل و توزیع آب استفاده شد. نتایج ارزیابی تحویل و توزیع آب با استفاده از شاخص کفایت توزیع آب آبیاری نشان داد تحویل و توزیع آب در کانال مورد مطالعه در ارزیابی‌های نقطه‌ای، منطقه‌ای و کلی مطلوب نبوده و نیازمند ارائهٔ راهکارهایی به منظور بهبود عملکرد کانال است. با توجه به وضعیت بهره‌برداری حال حاضر شبکهٔ آبیاری آبشار، پروژه‌های مدرن‌سازی، بهسازی و نوسازی راهکارهای مناسبی به منظور ارتقای عملکرد این شبکه محسوب می‌شوند. در این راستا، بهره‌گیری از روش‌هایی همچون کنترل دستی بهبودیافته با استفاده از گوشی هوشمند [۲۲]، کنترل خودکار محلی [۱۲] و کنترل خودکار مرکزی [۱۴] می‌توانند مؤثر واقع شوند. همچنین، همان‌طور که در اهداف تحقیق نیز گفته شد، نتایج تحلیل مکانی توزیع آب سطحی و در ادامه سهم تعیین‌شدهٔ منابع آب سطحی و زیرزمینی در روستاهای واقع‌شده در محدودهٔ شبکهٔ آبیاری آبشار، به عنوان ورودی اصلی محاسبات جدول‌های تأمین و مصرف فیزیکی (معروف به جدول‌های PSUT) در ساختارهای مختلف روش‌های حسابداری آب مانند روش حسابداری سریع و روش حسابداری آب اقتصادی‌ـ زیست‌محیطی قابل استفاده است. در واقع نتایج این تحقیق، پراکندگی مکانی/زمانی و شیوهٔ تأمین آب سطحی/زیرزمینی برای هر محدودهٔ اقتصادی (منظور محدوده‌های کشاورزی مختلف در سطح شبکهٔ آبیاری که از دیدگاه حسابداری آب به عنوان یک زیربخش اقتصادی تلقی می‌شود) را به صورت دقیق مشخص می‌کند. همچنین نتایج این تحقیق، به عنوان معیار تصمیم‌گیری برای پیاده‌سازی تدریجی پروژه‌های بهسازی، مدرن‌سازی و نوسازی شبکهٔ آبیاری آبشار اصفهان (و سایر شبکه‌های آبیاری کشور) قابل استفاده خواهد بود.

منابع

[1]. Barkhordari S, Hashemy Shahdany SM. A systematic approach for estimating water losses in irrigation canals. Journal of Water Science and Engineering. 2022;15(2):161-169.

[2]. Orojloo M, Hashemy Shahdany SM, Roozbahani A. Risk assessment of main transmission line in irrigation networks with application of fuzzy hierarchical method. Journal of Water and Soil Conservation. 2017;24(5):25-47. [Persian]

[3]. Yaltaghian Khiabani M, Hashemy Shahdany SM. Design of automatic control system to equitable water distribution under water shortages and inflow fluctuation operational conditions, Case study of Roodasht Irrigation district. Journal of Water and Soil Conservation. 2018;25(5):185-200. [Persian]

[4]. Azargashb S, Hashemy M, Roozbahani A. Estimation of the minimum amount of seepage and operational losses in the earthen canals using ant colony optimization algorithms. Journal of Water and Soil Conservation. 2020;27(6):67-84. [Persian]

[5]. Barkhordari S, Hashemy Shahdany SM, Taghvaeian S, Firoozfar AR, Meastre JM. Reducing losses in earthen agricultural water conveyance and distribution systems by employing automatic control systems. Computer and Electronics in Agriculture. 2020;168:105-122.

[6]. Management and Planning Organization. Public regulations design of irrigation and drainage networks, Magazine No. 281. 2004. [Persian]

[7]. Fipps G. Potential water savings in irrigated agriculture for the Rio grande planning region (Region M). Texas Water Resources Institute. 2005.

[8]. Akkuzu E, Ünal HB, Karataş BS. Determination of water conveyance losses in the Menemen open canal irrigation network. Turkish Journal of Agriculture and Forestry. 2014;31(1):11-22.

[9]. Kedir Y. estimation of conveyance losses of Wonji-Shoa Sugar Cane Irrigation Scheme in Ethiopia. Journal of Environment and Earth Science. 2015;5(17):2224-3216.

[10]. Jadhav PB, Thokal RT, Mane MS, Bhange HN, Kale SR. improving conveyance efficiency through canal lining in command area: A Case Study. International Journal of Engineering Innovation & Research. 2014;3(6):820-826.

[11]. Karimi Avargani H, Hashemy Shahdany SM, Hashemi Garmdareh SE, Liaghat A. determination of water losses through the agricultural water conveyance, distribution, and delivery system, Case study of Roodasht Irrigation District, Isfahan. Water and Irrigation Management. 2020;10(1):143-156. [Persian]

[12]. Serra P, Salvati L, Queralt E, Pin C, Gonzalez O, Pons X. estimating water consumption and irrigation requirements in a Long-Established Mediterranean Rural Community by remote sensing and field data. Irrigation and Drainage. 2016;65(5):578-88.

[13]. Shahrokhnia MA, Olyan Ghiasi A. methods of seepage estimation in canals and evaluation of seepage and distribution efficiency in Doroodzan irrigation system. Journal of Water Management in Agriculture. 2018;4(2):27-36. [Persian]

[14]. Riahi H, Abbasi N, Mollaei A. evaluation of operational and maintenance problems in Kerman irrigation canals. Iranian Journal of Irrigation and Drainage.2013;7(2):167-177. [Persian]

[15]. Maroufi S, Soltani H. estimations of conveyance and distribution efficiencies in Shawour irrigation and drainage network using an exponential equation. Journal of Agricultural Research.2006;6(1):36-47. [Persian]

[16]. Sheyni A, Noori M, Minaei S. Investigation of water losses and providing guidelines to reduce water in DEZ irrigation network (Case study: Sabili and E4 Channels). Journal on Water Engineering. 2015;3(2);87-98. [Persian]

[17]. Abbasi F, Sohrab F, Abbasi N. Evaluation of irrigation efficiencies in Iran. Irrigation and Drainage Structures Engineering Research. 2017;17(67):113-120. [Persian]

[18]. Mohammadi A, Rizi AP, Abbasi N. Field measurement and analysis of water losses at the main and tertiary levels of irrigation canals: Varamin Irrigation Scheme, Iran. Global Ecology and Conservation. 2019;18:e00646.

[19]. Lee EH, Kim JH. Design and operation of decentralized reservoirs in urban drainage systems. Journal of Water. 2017;9(4):246.

[20]. Hashemy shahdany SM, Monem MJ, Isapoor S. Using inline storage in automatic control systems to improve the operation process in the main irrigation channel, Case study of Dez network irrigation channel. Journal of Hydraulic. 2012;7(3):1-14. [Persian]

[21]. Van Overloop PJ, Negenborn RR., De Schutter B, Van De Giesen NC. Predictive control for national water flow optimization in the Netherlands. Intelligent Infrastructures. 2010;42:439-461.

[22]. Schuurmans J, Schuurmans W, Berger H, Meulenberg M, Brouwer R. Control of water levels in the Meuse river. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 1997;123(3):180-184.

[23]. Isapoor S, Montazer A, Van Overloop PJ, Van De Giesen N. Designing and evaluating control systems of the Dez main canal. Irrig. Drain. 2011;60(1):70-79.

[24]. Molden DJ, Gates TK. Performance measures for evaluation of irrigation-water-delivery systems. Journal of Irrigation and Drainage Engineering.1990;116(6):804-823.