مدیریت آب و آبیاری
(نشریه علمی)
دوره ۱۰ ■ شماره ۲ ■ پاییز ۱۳۹۹
صفحه‌های ۲۹۹-۲۸۱

مقاله پژوهشی:

ارزیابی میزان تأثیرگذاری سامانه کنترل خودکار توزیع آب سطحی کشاورزی به‌منظور کاهش برداشت و تعادل بخشی آبخوان در شرایط کم‌آبی (مطالعه موردی: کانال اصلی شبکه آبیاری قزوین)

محسن حسینی جلفان[۱]، سید مهدی هاشمی شاهدانی[۲*]، سامان جوادی[۲]
۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۱۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۲۱

چکیده
این پژوهش به بررسی میزان تأثیر ارتقای عملکرد توزیع آب سطحی کشاورزی در تعادل‌بخشی و احیای آبخوان در شرایط کم‌آبی می‌پردازد. در گام نخست، مدل عددی آبخوان، با کد MODFLOW، به‌منظور تحلیل مکانی تعادل‌بخشی آبخوان توسعه داده شد. در ادامه مدل شبیه‌ساز هیدرولیک جریان سیستم توزیع آب در نرم‌افزار MATLAB توسعه، کالیبره و صحت‌سنجی شد و با مدل کنترل خودکار سیستم بهره‌برداری سامانه توزیع لینک شد. در نهایت با لینک‌نمودن مدل‌های توسعه داده‌شده، تأثیر استفاده از روش ارتقای بهره‌برداری شبکه آبیاری، در قالب سناریو جهت تعادل‌بخشی آبخوان، بررسی شد. نتایج پژوهش نشان داد با ارتقای عملکرد سیستم توزیع آب کشاورزی، حتی در شرایط کم‌آبی، میانگین شاخص کفایت توزیع آب کشاورزی در محدوده‌های زراعی در سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز در حدود ۳۲/۷ درصد بهبود عملکرد داشته است. بر این اساس میزان کاهش برداشت از آبخوان، ٤٥/۳ درصد در روش بهره‌برداری خودکار غیرمتمرکز حاصل شد. نتایج مدل‌سازی عددی آبخوان جهت تحلیل مکانی تعادل‌بخشی آبخوان نشان داد که در روش معمول بهره‌برداری تراز آب زیرزمینی هم‌چنان روند افزایشی افت خود را حفظ می‌کند. به‌طوری‌که نتایج نمایانگر مقدار افت سالانه در حدود ۱۵۰ سانتی‌متر تحت روش معمول بهره‌برداری است. با به‌کارگیری سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز و افزایش کفایت تحویل آب در روش مذکور، این امر سبب افزایش تراز در چاه‌های مشاهده‌ای قرار گرفته در شبکه آبیاری شد. راه‌کار تعادل‌بخشی آبخوان ارائه‌شده در این پژوهش، قابلیت توسعه برای کلیه نواحی زراعی (شبکه آبیاری) دارد که منابع تأمین آب آن به‌صورت تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی است.

کلیدواژه‌ها: تعادل بخش آبخوان، تلفات توزیع و انتقال، توسعه پایدار، سیستم کنترل خودکار، شبکه آبیاری قزوین.

Assessing the Effectiveness of the Centralized Proportional-Integral Control System in Improving Operation Management of the Main Irrigation Canal and Aquifer Storage and Recovery in water shortage conditions (Case study: Qazvin irrigation District)

Mohsen Hosseini Jolfan[1], Seyed Mehdy Hashemy Shahdany[2*], Saman Javadi[2]
1. Former M.Sc. Student in Hydraulic Structures, Department of Irrigation Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.
2. Associate professor, Department of Irrigation, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.
Received: May 03, 2020 Accepted: September 11, 2020

Abstract
The quantitative and qualitative degradation of groundwater resources has become a serious crisis due to high consumption in agriculture, population growth and urbanization, and the industrialization of communities. Rehabilitating groundwater aquifers is one of the main requirements in aquifer management. In this study, the effect of improving the performance of irrigation district and, of course, reducing waste in the process of transfer, distribution and delivery of agricultural water, balancing and rehabilitating aquifers were examined. For this purpose, in the first step, the numerical model of Qazvin aquifer, with the code MODFLOW, was developed for spatial equilibrium analysis of aquifer. Then, the hydraulic simulator model of agricultural water distribution system flow in MATLAB software was developed, calibrated and verified and the automatic control system of the distribution system was linked with the automatic control model. Finally, by linking the developed models, the effect of using the method of improving the operation of the irrigation district, in the form of a scenario for balancing the aquifer, was examined. The results showed that with the improvement of the performance of the agricultural water distribution system, even in low water conditions, the average efficiency index of agricultural water distribution in agricultural areas in the decentralized automatic control system has been about 32.7%. Accordingly, the rate of decline in aquifer harvest was 45.3% in the decentralized automatic operation method. The results of numerical modeling of aquifer for spatial analysis of aquifer balancing showed that in the usual method of groundwater level operation, the increasing trend continues to decrease. The results show an annual drop of about 150 cm under the usual method of operation. By using a decentralized automatic control system and increasing the adequacy of water delivery in this method, this increased the level in the observation wells located in the irrigation district. The equilibrium solution for aquifers presented in this study can be developed for all agricultural areas (irrigation district) whose water supply sources are a combination of surface and groundwater resources.

Keywords: Aquifer storage and recovery, Automatic control system (PI), Distribution and transfer losses, Qazvin irrigation district, Sustainable development.

* نویسنده مسئول Email: Mehdi.hashemy@ut.ac.ir

مقدمه

ایران به‌عنوان یکی از کشورهای واقع در کمربند خشک کره زمین با مشکل کم‌آبی و خشکسالی‌های متناوب مواجه است، به‌طوری‌که با متوسط بارندگی ۲۵۰ میلی‌متر در سال نسبت به ۷۵۰ میلی‌متر میانگین جهانی آن، در گروه کشورهای خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته است (۸ و ۲۰). رشد جمعیت، توسعه صنعتی و گسترش کشاورزی آبی، تقاضای آب در ایران را در دهه‌های اخیر افزایش داده است (۲۰). علاوه بر موارد ذکرشده، توسعه اقتصادی و تغییر رژیم غذایی منجر به افزایش تقاضای آب در تمام بخش‌ها (شرب، صنعت و کشاورزی) و در نتیجه فشار بر منابع آب شده است (۷). تمام این عوامل سبب شده تا به‌دلیل عدم تناسب در تأمین و تقاضای آب، به منابع آب سطحی و زیرزمینی در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان آسیب برسد (۱۳). بررسی مطالعات صورت‌گرفته حاکی از آن است که آب‌های زیرزمینی سهم عمده‌ای از آبیاری اراضی در قسمت‌های مختلف جهان را شامل می‌شود، به‌طوری‌که این مقدار در ایران حدود ۹۰ درصد برآورد شده است (۱۷ و ۲۵). این در حالی است که از یک‌سو با افزایش جمعیت نیاز به تولید محصول بالارفته و از طرف دیگر با رشد مصارف شهری و صنعتی، سهم آب بخش کشاورزی نسبت به گذشته کم‌تر شده است. بنابراین کشاورزی وابسته به آبیاری (در قالب برداشت آب آبیاری از منابع آب زیرزمینی، توزیع منابع آب سطحی در شبکه‌های آبیاری سنتی و مدرن و در نهایت برداشت سنتی از نهرها و رودخانه‌ها) که تقریباً ۴۰ درصد تولید محصولات غذایی را تأمین می‌کند، با یک چالش مواجه شده است (۱۹). لذا در چنین شرایطی ارتقای مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی می‌تواند به‌عنوان یکی از مؤثرترین راه‌کارها در استفاده بهینه از منابع محدود آب کشور تلقی شود (۲). با توجه به این‌که شبکه‌های آبیاری به‌عنوان یکی از اجزای اصلی کشاورزی فاریاب محسوب می‌شوند، ارتقای عملکرد آن‌ها مورد توجه خاص پژوهش‌گران و مدیران صنعت آب قرار گرفته است (۱۵، ۱۶، ۱۷). اما با این وجود، با توجه به عملکرد ضعیف شبکه‌های آبیاری به‌دلیل عواملی نظیر نقص در طراحی و اجرا و نیز فقدان مدیریت بهره‌برداری مناسب، سبب شده که عملکرد اکثر شبکه‌های آبیاری و زهکشی چه از لحاظ فرایندی مثل کفایت و چه خروجی یعنی تولید محصول، مطلوب نباشد (۱۰). عدم مطلوبیت کشاورزان از توزیع و تحویل کافی و مناسب آب سطحی در شبکه‌های آبیاری، سبب شده تا اقدام به برداشت‌های مجاز (و حتی غیرمجاز) از منابع آب زیرزمینی نمایند تا این عدم مطلوبیت کفایت در توزیع آب را جبران نماید (۱۶). با این وجود هرچند بهره‌گیری از منابع آب زیرزمینی به‌عنوان یک منبع مکمل در کنار آب سطحی، عملکرد سامانه‌های بهره‌برداری را از نقطه‌نظر کفایت در توزیع آب بهبود می‌دهد. اما یکی از تأثیرات پمپاژ آب‌های زیرزمینی برای مصارف کشاورزی، اثر سوء آن بر آبخوان می‌باشد. به‌طوری‌که این مهم به‌صورت ایجاد یک توازن منفی در آبخوان‌های ایران به‌دلیل استفاده بیش‌از حد از منابع آب زیرزمینی برای چندین دهه کیفیت و کمیت آب را کاهش داده است (۱ و ۳). از این‌رو، برقراری توازن میان تغذیه آبخوان و برداشت منابع آب زیرزمینی در بخش کشاورزی از اهمیت بسیاری برخوردار است (۱۶ و ۱۷). در سال‌های اخیر، با توجه به کمبود آب مصرفی در بخش کشاورزی، مطالعات گسترده‌ای پیرامون مسائل مربوط به حفاظت منابع آب، تعادل بخشی و پایداری آبخوان با استفاده از مدل‌سازی عددی آب - زیرزمینی صورت گرفته است. به‌عبارت دیگر، با استفاده از مدل ریاضی آبخوان، اثر سناریوهای مختلف بر تراز آب زیرزمینی ارزیابی شده است. سناریوهای فوق‌الذکر در

عمده مطالعات مربوط به کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی با استفاده از افزایش یا کاهش پارامترهای مؤثر در بیلان (۲۱ و ۲۸)، ارزیابی ارتباط میان توسعه بخش کشاورزی، مسائل اجتماعی و تأثیر آن در برداشت از منابع آب زیرزمینی (٤ و ۲۲)، ارزیابی اثربخشی مالچینک در افزایش تراز آب زیرزمینی (۹)، شبیه‌سازی آبیاری، تبخیر و تعرق، رطوبت خاک و استفاده خالص از آب زیرزمینی با الگوی‌های مختلف کشت (۱۲ و ۲۳)، ارزیابی روش‌های آبیاری بر افزایش یا کاهش تراز آب زیرزمینی (۱۸) انجام شده است. با توجه به آن‌چه که بیان شد، استرس در منابع آب زیرزمینی به‌دلیل استفاده گسترده در کشاورزی، افزایش شهرنشینی، صنعتی‌شدن و افزایش جمعیت به‌طور مداوم در حال افزایش است. در نتیجه با توجه به توضیحات فوق، لازم است عملکرد سیستم‌های انتقال، توزیع و تحویل منابع آب در سطح شبکه‌های آبیاری بهبود داده شود. بر همین اساس با بهره‌گیری از روش نوین مدیریت بهره‌برداری کانال‌های آبیاری، که از طریق خودکارسازی فرایند بهره‌برداری صورت می‌پذیرد، عملکرد سامانه اصلی انتقال، توزیع و تحویل منابع آب سطحی تا حد امکان بهبود داده می‌شود تا برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، حداقل در داخل محدوده شبکه‌های آبیاری، به حداقل ممکن برسد. این راه‌کار که با هدف کاهش تلفات ناشی از بهره‌برداری سنتی در کانال‌های آبیاری معرفی می‌شود، مقدار تلفات بهره‌برداری سازه‌های کنترل تنظیم و نیز سازه‌های آبگیری را در طول کانال اصلی به حداقل می‌رساند. در نتیجه حجم کاهش تلفات به‌عنوان یک منبع آب جدید در بهره‌برداری مورد استفاده قرار می‌گیرد، که از این منبع می‌توان در جهت توزیع بین آب‌بران در شرایط خشکسالی برای افزایش شاخص کفایت تحویل آب در سطح شبکه استفاده کرد. هم‌چنین به سبب توانایی بالای سیستم‌های کنترل در بهره‌برداری سازه‌های کنترل و تنظیم سطح آب، امکان اعمال سناریوهای مختلف مدیریتی در فرایند بهره‌برداری کانال امکان‌پذیر خواهد بود. با پیشرفت علم کنترل و ورود سیستم‌های کنترلی به صنعت، امکان به‌کارگیری این سامانه‌ها در بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری نیز فراهم شد (۲٤). سامانه‌های کنترل خودکار خود شامل سامانه کنترل متمرکز و سامانه کنترل غیرمتمرکز هستند و پژوهش‌های متعددی در زمینه به‌کارگیری هر یک از آنها در حال انجام است. همگام با به‌کارگیری سامانه‌های کنترل خودکار غیرمتمرکز، سامانه‌های خودکار متمرکز نیز توسعه یافته‌اند. با این حال، مطالعات نشان می‌دهد که کنترل‌گر موضعی به‌علت سهولت استفاده در کانال‌های آبیاری از محبوبیت خاصی برخوردار است (۳۰). مطالعات مختلفی در مورد بهبود شیوه بهره‌برداری با استفاده از سیستم‌های کنترل در کانال‌های آبیاری انجام گرفته است که به چندین مورد اشاره می‌شود. در این رابطه، زمانی و همکاران (۳۰) در تحقیقی با استفاده از مدل هیدرودینامیک SOBEK و نرم‌افزار MATLAB طراحی و ارزیابی سامانه کنترل سراسری پایین‌دست PI (تناسبی–انتگرالی)[1] را برای یک کانال اصلی موردبررسی قرار داد و نتیجه شد که شیب کف کانال به‌عنوان یک عامل بیش‌ترین تأثیر را روی رفتار جریان و تنظیم کنترلگر مدنظر دارد. هم‌چنین در پژوهشی شاهوردی و همکاران (۲۷) یک مدل ریاضی برای کنترل عمق آب در بالادست سازه‌های چک توسعه دادند. سناریوهای مختلف افزایش و کاهش جریان ورودی شبیه‌سازی شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که حداکثر مقادیر، حداکثر خطای مطلق[2] و خطای مطلق تجمعی[3] به‌ترتیب ۳۰/۰۷ درصد و ۰/۱۵۲ درصد به‌دست آمد. در پژوهشی دیگر یلتقیان خیابانی و همکاران به بررسی کارایی راه‌کار خودکارسازی از دو دیدگاه فنی، با ارزیابی عملکرد تحویل و توزیع آب و دیدگاه اقتصادی پرداخت. شبیه‌سازی بهره‌برداری تحت سناریوهای نوسانی و نرمال در کانال اصلی شبکه آبیاری رودشت انجام

شد. نتایج نشان داد که روش خودکارسازی با غلبه بر نوسانات شدید جریان ورودی تمام نیاز آبگیرها را برطرف و با بهبود ۸۵ درصدی همراه است (۵). به‌طورکلی، زمانی که تعداد بازه‌های کانال و نوسانات جریان محدود است، کنترل‌گرهای کلاسیک، مانند روش تناسبی- انتگرالی، در موارد عملی به‌خوبی عکس‌العمل نشان می‌دهند (۲۹).

با توجه به آن‌چه که بیان شد، لازم است عملکرد سیستم‌های انتقال، توزیع و تحویل منابع آب سطحی در سیستم‌های انتقال آب کشاورزی تا حد امکان بهبود داده شود. از این‌رو، مدیریت هوشمند انتقال و تحویل آب کشاورزی با خودکارسازی سازه‌های تنظیم سطح آب، یکی از اقدام‌های جدی در کاهش مؤثر تلفات بهره‌برداری کانال‌های آبیاری است (۱۵ و ۱۶). چرا که یکی از چالش‌های جدی در زمینه مدیریت منابع آب، سهم بسیار بالای بخش کشاورزی در مصرف منابع آب زیرزمینی و عملکرد و تولید پایین به‌ازای میزان آب مصرفی است که این امر سبب ایجاد یک توازن منفی در آبخوان‌های مناطق خشک شده است (۱۷).

بنابراین در این پژوهش به‌منظور کاهش اضافه‌برداشت از ذخیره استاتیک آبخوان واقع در مناطق کشاورزی که با مسأله کمبود آب مواجه هستند و هم‌چنین برنامه‌ریزی احیای آبخوان در دوره‌های بلندمدت، تأثیر ارتقای عملکرد سیستم‌های توزیع آب کشاورزی تأمین‌شده از منابع آب سطحی موردبررسی قرار می‌گیرد. به‌عبارت دیگر، روش‌های ارتقای سیستم توزیع آب مصرفی کشاورزی موجب افزایش راندمان شده و این افزایش راندمان آب بیش‌تری را در اختیار کشاورزان قرار خواهد داد و آن‌ها را مجاب به بستن چاه‌ها می‌نماید. در نهایت با استفاده از یک مدل آب زیرزمینی اثر بستن چاه‌ها بر تراز آبخوان مورد بررسی و تحلیل قرار خواهد گرفت.

تأمین این مهم، مستلزم پیاده‌سازی سیستم هوشمند بهره‌برداری است که بتواند اعتماد کشاورزان در تأمین آب کافی، پایدار و عادلانه از منبع آب سطحی را تأمین نماید.

با توجه به توضیحات فوق، این پژوهش برای نخستین‌بار به بررسی ارتقای بهره‌برداری سیستم توزیع آب سطحی در شبکه آبیاری قزوین و تأثیر آن بر کاهش سهم استخراج از منابع آب زیرزمینی آبخوان قزوین و بهبود مدیریت بهره‌برداری تلفیقی آب سطحی- زیرزمینی در شرایط کمبود آب می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

روند انجام پژوهش

روند انجام و ارتباط بین مدل‌های توسعه داده‌شده در این پژوهش، در شکل (۱) نشان داده شده است. بر همین اساس به‌منظور دست‌یابی به اهداف این پژوهش، پس از بررسی گزینه‌های پرکاربرد در خودکارسازی بهره‌برداری سیستم‌های توزیع آب کشاورزی در شبکه‌های آبیاری، سیستم کنترل غیرمتمرکز تناسبی- انتگرالی (PI) برای شبکه آبیاری قزوین انتخاب شد. هم‌چنین مدل هیدرودینامیک سیستم توزیع آب کنونی توسعه، کالیبره و صحت‌سنجی شد و وضعیت حال حاضر بهره‌برداری تلفیقی منطقه موردمطالعه، موردبررسی قرار گرفت. کنترل‌گر طراحی‌شده با مدل هیدرودینامیک مذکور لینک شده و تحلیل مکانی تأثیر خودکارسازی سیستم مذکور در کاهش تلفات انتقال، توزیع و تحویل آب، با استفاده از GIS، انجام گرفت. به‌منظور بررسی راه‌کار تعادل‌بخشی معرفی‌شده در این پژوهش بر وضعیت آب زیرزمینی، مدل ماندگار و غیرماندگار آبخوان قزوین به‌کمک مدل MODFLOW با استفاده از نرم‌افزار GMS توسعه داده شد، تا ضمن شبیه‌سازی وضعیت آب زیرزمینی، تأثیر روش نوین بهره‌برداری ذکرشده در این پژوهش را در قالب سناریوی تعادل‌بخشی به مدل اعمال‌شده و نتیجه آن به‌صورت توزیعی ارزیابی گردد.

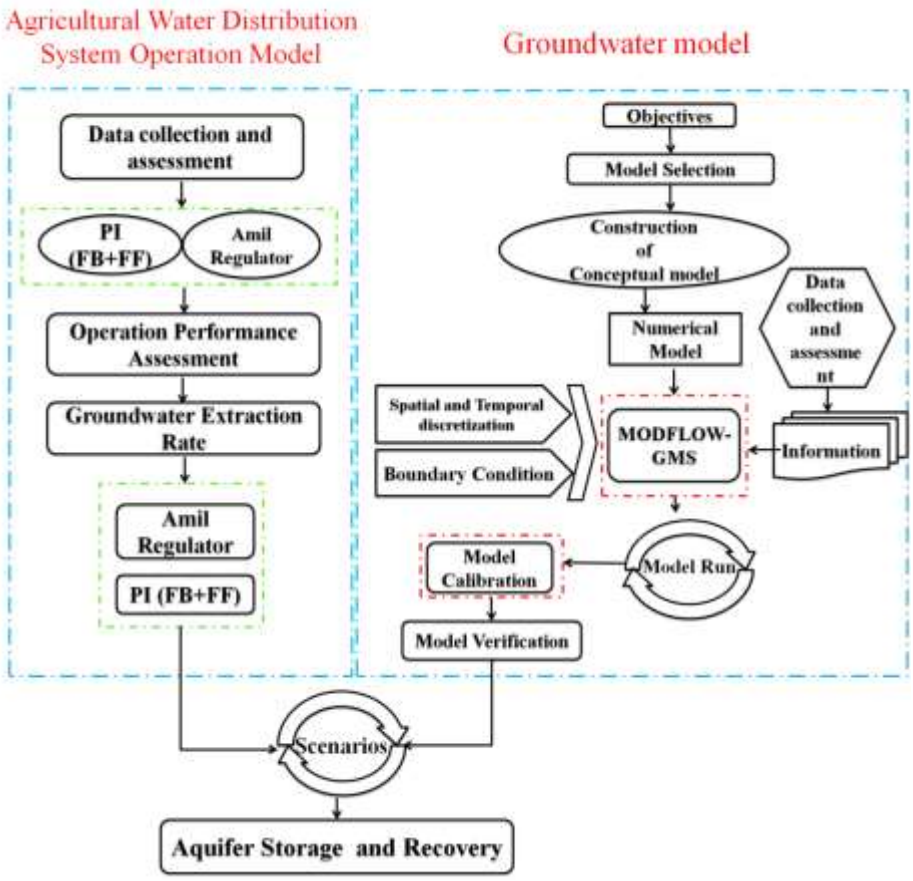

Figure 1. The research methodology

منطقه موردمطالعه

آبخوان قزوین با مساحت ۳۹۵۲/٤ کیلومترمربع در حوضه آبریز دریاچه نمک قرار دارد (شکل ۲). مجموع تغذیه آبخوان دشت قزوین ۱۲٦۰/۵ میلیون مترمکعب در سال است، درحالی‌که مجموع تخلیه این آبخوان به ۱٤۵۸/٦٦ میلیون مترمکعب در سال نیز می‌رسد (۳ و ٦). برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی (حفر چاه‌های غیرمجاز) و کاهش سهمیه منابع آب سطحی این دشت از ذخیره سد طالقان ایجاب می‌کند تا مدیریت تقاضای آب کشاورزی در این دشت بیش‌تر از گذشته موردتوجه قرارگیرد. شبکه آبیاری قزوین از مهم‌ترین مناطق کشاورزی در این دشت می‌باشد (شکل ۲). شبکه آبیاری مذکور با وسعتی معادل ۸۰۰۰۰ هکتار ناخالص و مساحت خالص ٦۰۰۰۰ هکتار است که حدود ۷۲ درصد آن را اراضی درجه یک و دو تشکیل می‌دهد. منابع تأمین آب این شبکه در حال حاضر از منابع آب سطحی (سد مخزنی طالقان) و منابع آب زیرزمینی (چاه‌های مجاز و غیرمجاز موجود در سطح شبکه) است. محدوده شبکه آبیاری شامل نواری به طول ۹۰ کیلومتر که از شرق به رودخانه زیاران، از غرب به حاشیه شهر تاکستان و از شمال به کوه‌های البرز و از جنوب به جاده کمال‌آباد- آبیک محدود می‌شود. ظرفیت کانال اصلی در ابتدای مسیر ۳۰ و در انتها سه مترمکعب می‌باشد. توزیع آب در سطح شبکه توسط ۱۲ کانال درجه دو انجام می‌گیرد. نوع دریچه‌های تنظیم‌کننده سطح آب از نوع آمیل و تنظیم‌کننده چک می‌باشد. هم‌چنین آبگیری توسط دریچه‌های مدول نیرپیک و کشویی انجام می‌شود.

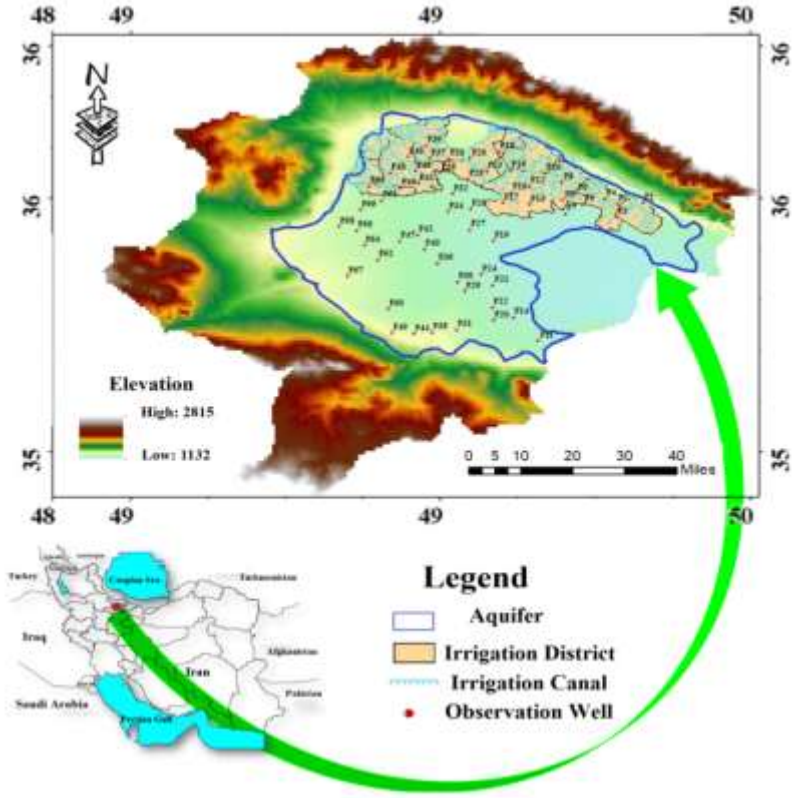

Figure 2. Geographical location of the case study area

شبیه‌سازی بهره‌برداری کانال اصلی آبیاری

شرایط موجود وضعیت بهره‌برداری (دریچه آمیل)

به‌منظور ارزیابی میزان بهبود فرایند بهره‌برداری با به‌کارگیری سامانه‌های کنترل خودکار، لازم است شبیه‌سازی هیدرولیک جریان انجام گیرد. این مهم اغلب با به‌کارگیری مدل‌های هیدرودینامیکی قابل انجام است. که قادر باشد با کنترل‌گرهای طراحی‌شده متصل شده و فرامین کنترلی را به‌صورت همزمان دریافت نماید. در این پژوهش از مدل انتگرالی- تأخیری (ID) استفاده شد، تا شرایط هیدرولیکی موجود در کانال را شبیه‌سازی کرده و امکان تبادل آسان داده‌ها با کنترل‌گرها را فراهم کند. شورمانز در سال ۱۹۹۷ (۲۶) برای طراحی الگوریتم‌های کنترل هر بازه از کانال آبیاری را به دو بخش، مطابق شکل (۳)، تقسیم کرد و مدلی تقریبی آن را به‌شرح ذیل ارائه نمود: قسمتی از کانال که بین دو سازه تنظیم قرار گرفته باشد بازه نامیده می‌شود. هر بازه شامل دو بخش است، این دو بخش عبارت هستند از بخش جریان یکنواخت و بخش منحنی برگشت آب. هر بخش یک مشخصه اصلی دارد که از مجموع این دو، مدل ریاضی کانال به‌نام مدل انتگرالی- تأخیری به‌دست می‌آید. دو مشخصه اصلی هر بازه عبارتند از زمان تأخیر (T_C) و سطح ذخیره (A_S). معادله (۱)، اطلاعات دقیق در مورد فرمولاسیون مدل ID را ارائه می‌دهد.

رابطه (۱)

$$h(k+1) = -\frac{T_c}{A_s} q_{out}(k) + \frac{T_c}{A_s} q_{in}(k-k_d) - \frac{T_c}{A_s} q_{off-take}(k) + h(k)$$

که در آن q_{in} دبی ورودی به بخش یکنواخت جریان؛ q_{canal} دبی ورودی به بخش ذخیره؛ h عمق آب؛ q_{out} دبی خروجی از بخش منحنی برگشت آب، می‌باشد.

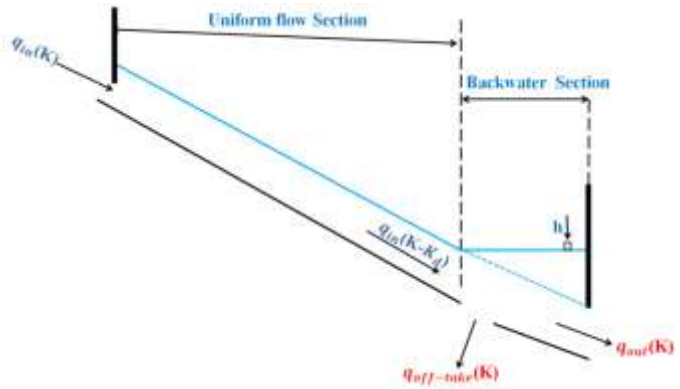

Figure 3. Schematization of a modeled canal reach by integrator delay model

سامانه کنترل خودکار غیرمتمرکز تناسبی- انتگرالی (PI)

کنترل‌گر PI براساس روش کنترل حلقه بسته طراحی می‌شود که در آن متغیر کنترل‌شونده (رقوم سطح آب در این پژوهش) در بالادست سازه تنظیم اندازه‌گیری می‌شود. در این روش، میزان انحراف رقوم سطح آب از رقوم هدف به الگوریتم کنترل بازگردانده می‌شود تا با اندازه‌گیری اقدام تصحیحی، که عبارت است از میزان بازشدگی سازه تنظیم، متغیر کنترل‌شونده (رقوم سطح آب بالادست سازه تنظیم) به سوی مقادیر هدف بازگردانده شود. در این روش اغتشاشات (میزان آب منحرف‌شده در محل آبگیرها یا هر رواناب واردشده به کانال یا منحرف‌شده از آن) حتی اگر شناخته‌شده نباشند، به‌صورت غیرمستقیم و از طریق آثار آن بر خروجی سیستم (رقوم سطح آب هر بازه) در نظر گرفته می‌شود. براساس الگوریتم کنترل تناسبی- انتگرالی، تغییرات دبی عبوری از زیرسازه‌های تنظیم به‌صورت رابطه (۲) قابل محاسبه است (۲۸):

$$\Delta Q_{(k)} = K_i.e_{(k)} + K_p.\left[e_{(k)} - e_{(k-1)}\right] \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه فوق $\Delta Q_{(k)}$ مقدار تغییرات دبی عبوری از سازه‌های تنظیم برحسب مترمکعب بر ثانیه در گام زمانی جاری، e برابر مقدار انحرافات تراز سطح آب از رقوم هدف، اندیس های k و $k-1$ به‌ترتیب نشانگر گام زمانی جاری و گام زمانی قبلی، K_p برابر ضریب تناسبی و K_i برابر ضریب انتگرالی است.

محاسبه ضرایب تناسبی و انتگرالی (K_p و K_i) براساس فرمول پیشنهادی شورمانز (۲۶) برای طراحی کنترل‌گر تناسبی- انتگرالی انجام گرفت. براساس قوانین تنظیم ارائه‌شده توسط شورمانز محاسبه ضرایب تناسبی بر پایه چهار پارامتر سیستم که عبارتند از سطح ذخیره در شرایط بهره‌برداری (A_s)، گام زمانی کنترل (T_c)، رزونانس ماکزیمم در جریان حداقل (R_p) و بسامد رزنانس ماکزیمم در جریان حداقل بازه کانال (ω_r) و به‌صورت روابط (۳) و (٤) قابل محاسبه است (۲٦):

$$K_p = \frac{1}{2}.\sqrt{\frac{A_s.\omega_r}{R_p}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$k_i = \frac{T_c.\omega_r}{12.R_P} \quad \text{رابطه (٤)}$$

اصولاً طراحی سیستماتیک یک کنترل گر کلاسیک در کانال‌های آبیاری می‌تواند به دو شیوه کنترل بالادست یا پایین‌دست آن‌ها انجام شود. در این پژوهش کنترل‌گرهای PI به شیوه بالادست و در حالت کنترل پسخور[٤] و پیشخور[٥] طراحی شده است. شکل (٤) کاربرد کنترل‌گر طراحی‌شده این پژوهش، در چند بازه ابتدایی کانال را نشان می‌دهد.

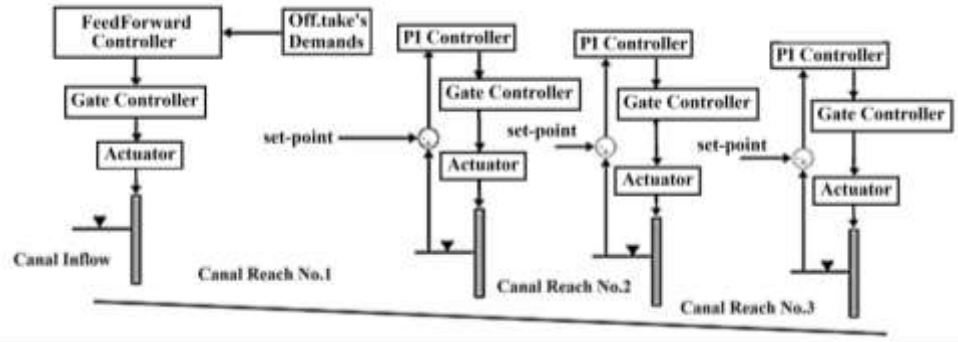

Figure 4. PI controller combining by feedback methods at main irrigation canal

همان‌طورکه در این شکل مشخص است، ورودی هر کنترل‌گر رقوم اندازه‌گیری‌شده سطح آب در بالادست هر سازه تنظیم می‌باشد. براساس میزان خطای سطح آب اندازه‌گیری‌شده از رقوم هدف، متغیر کنترلی محاسبه‌شده و میزان بازشدگی دریچه مشخص می‌شود. شایان ذکر است که در روش کنترل PI با حالت تلفیق کنترل پسخور و پیشخور، انعطاف‌پذیری بیش‌تری به‌واسطه استفاده از کنترل‌گر پیشخور برای مصرف‌کنندگان در نظر گرفته شده و امکان هر گونه تغییر در میزان آب تحویلی در حدود ۱۲ ساعت قبل از شروع آبگیری مهیا می‌گردد. بنابراین برنامه آبیاری در شیوه مذکور به‌صورت کنترل شده می‌باشد.

شاخص‌های ارزیابی عملکرد

شاخص کفایت تحویل آب

براساس تعریف ارائه شده مولدن و گیت (۲۲)، شاخص کفایت تحویل آب عبارت است از:

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

که در آن، PA شاخص کفایت برای کل سیستم؛ T فواصل زمانی در نظر گرفته شده برای ارزیابی عملکرد؛ R تعداد کل آبگیرهای اندازه‌گیری‌شده؛ Q_D دبی تحویلی؛ Q_R دبی موردنیاز.

براساس توصیه مولدن و گیت (۲۲)، طبقه‌بندی شاخص کفایت به‌صورت جدول (۱) بیان می‌شود.

Table 1. Water supply adequacy index classification

	Performance classes		
Indicator	Good	Mediocre	Poor
Adequacy(PA)	0.9-1.0	0.8-0.89	< 0.8

شاخص‌های مبتنی بر خطای سطح آب کنترل شده در کانال

رایج‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد مورد استفاده در پژوهش‌های مختلف عبارتند از حداکثر خطای مطلق (MAE) وخطای مطلق تجمعی (IAE) (۱۱ و ۲۲).

$$MAE = \frac{\max(\left|y_t - y_{target}\right|}{y_{target}}$$

که در آن، y_t تراز سطح آب مشاهده‌شده (محاسبه‌شده با مدل شبیه‌سازی جریان) در زمان t و y_{target} تراز سطح آب هدف.

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

که در این رابطه Δt فاصله بین گام‌های زمانی اعمال تنظیمات و T دوره اجرای آزمون می‌باشد.

مدل‌سازی کمی آبخوان

به‌منظور شبیه‌سازی اثر سناریوی کاهش برداشت آب، از مدل MODFLOW با استفاده از نرم‌افزار GMS استفاده شد (١٤). کد MODFLOW یکی از قابل‌اطمینان‌ترین و پرکاربردترین کدهای شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی است که جریان‌های زیرزمینی را با استفاده از روش‌های تفاضل

محدود شبیه‌سازی می‌کند (۱٤). به‌منظور شبیه‌سازی و حل معادلات جریان آب زیرزمینی شبکه‌بندی آبخوان به‌صورت شبکه ۲۵۰×۲۵۰ متر وارد مدل MODFLOW گردید. نفوذ از بارندگی، نفوذ ناشی از جریانات برگشتی کشاورزی، شرب و صنعت، نفوذ از رواناب سطحی، تغذیه ناشی از جریان ورودی آب زیرزمینی که به‌صورت جبهه‌های با بار ثابت (GHB) در نظر گرفته شد به‌عنوان پارامترهای تغذیه مدل‌سازی اعمال شد. میزان بارگذاری سفره آب از آبیاری با توجه به فصول کشاورزی متغیر است. برای ماه‌های غیرکشاورزی، این مقدار صفر است و برای ماه‌های کشاورزی، این درصد مشابه درصد آب برگشتی از چاه‌ها (۳۰٪–۲۰ درصد) است. در مورد چاه‌های آشامیدنی و صنعتی، میزان شارژ در حدود ۷۵–٦۰ درصد است. هم‌چنین، در حدود ۱۰–۲۰ درصد از شارژ بار آب سفره متعلق به بارش است. هم‌چنین برداشت از چاه‌های بهره‌برداری، تبخیر و تعرق در خروجی آبخوان که سطح آب زیرزمینی کم‌تر از پنج متر است، جبهه‌های خروجی با بار ثابت (GHB) به‌عنوان پارامترهای تخلیه مدل‌سازی وارد مدل شد. در واقع کلیه عوامل تأثیرگذار و مؤثر بر وضعیت هیدرولیکی آبخوان بایستی در نظر گرفته شود. شکل (۵) خلاصه‌ای از پارامترها، میزان تغذیه ناشی از بارندگی و رواناب منطقه با تقسیم‌بندی آبخوان از نظر کاربری اراضی و شبکه جریان برآورد و در مدل مفهومی وارد شد.

آبخوان در یک دوره دو ساله (۱۳۹۳–۱۳۹۵) با دوره تنش (stress priod) ماهانه مدل‌سازی شد. دوره آماری مدل‌سازی شامل یک سال برای واسنجی و یک سال برای صحت‌سنجی مدل تا سال آبی ۱۳۹۵ مورد استفاده قرار گرفت.

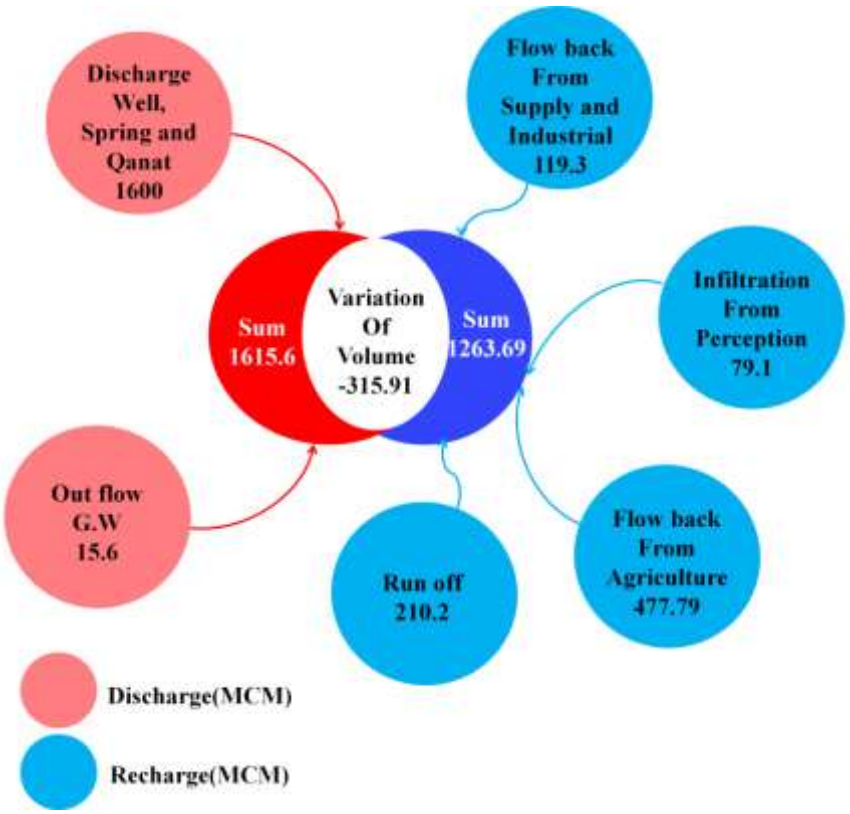

Figure 5. Abstract of water balance in Qazvin aquifer

گام زمانی شبیه‌سازی به‌صورت ماهانه و مهرماه ۱۳۹۳ با توجه به کم‌ترین تغییرات تراز آب، کم‌ترین حساسیت آبخوان به منابع تغذیه و تخلیه و داده‌های موجود برای شبیه‌سازی حالت ماندگار مدل انتخاب شد. مدل ماندگار در واقع بیانگر اولین گام زمانی مدل‌سازی است که براساس معادلات حرکت آب زیرزمینی می‌باید در آن پارامتر هدایت هیدرولیکی واسنجی شود. اولین گام مدل‌سازی تهیه مدل مفهومی آبخوان قزوین می‌باشد که بر مبنای منابع تغذیه و تخلیه آبخوان، مرز محدوده مدل‌سازی، تبخیر و تعرق و هم‌چنین استراتیگرافی آبخوان آماده می‌شود.

پس از ورود کلیه پارامترهای بیلان آب زیرزمینی به مدل مفهومی، شبیه‌سازی در دو حالت ماندگار و غیرماندگار انجام گرفت. شبیه‌سازی در حالت ماندگار در اولین گام زمانی مربوط به مهرماه ۱۳۹۳ و پس‌از آن شبیه-سازی در حالت غیرماندگار با تعریف ٢٤ گام زمانی ماهانه تا شهریورماه ۱۳۹۵ انجام گرفت.

پس از مدل‌سازی آبخوان جهت اجرای سناریوهای بهره‌برداری، دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل انجام گرفت. براساس معادلات حرکت آب زیرزمینی در حالت ماندگار و غیرماندگار پارامترهای آبخوان دو پارامتر هدایت هیدرولیکی در حالت ماندگار و آب‌دهی ویژه آبخوان برای حالت غیرماندگار جهت واسنجی انتخاب شد.

نتایج و بحث

وضعیت بهره‌برداری کانال اصلی

هدف اصلی در سناریوی تعریف‌شده در این پژوهش، بررسی وضعیت بهره‌برداری کانال اصلی در شرایط کمبود آب (خشکسالی) می‌باشد. بر همین اساس، بهره‌برداری کانال اصلی شبکه آبیاری قزوین با هدف بررسی توانایی‌های سامانه کنترل خودکار در شرایط کمبود آب (خشکسالی) مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق این سناریو، با ثابت نگهداشتن مقدار تقاضا در آبگیرها میزان دبی ورودی در طول کانال اصلی با ۲۰ درصد کاهش مواجه می‌شود. شبیه‌سازی بهره‌برداری کانال اصلی به‌طور جداگانه برای هرکدام از دو شیوه بهره‌برداری (بهره‌برداری معمول و بهره‌برداری با استفاده از سامانه کنترل خودکار تناسبی انتگرالی) انجام شد و میزان مطلوبیت بهره‌برداری کانال اصلی براساس شاخص‌های ارزیابی عملکرد مورد ارزیابی قرار گرفت.

با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول (۲) می‌توان بیان کرد که در شیوه بهره‌برداری معمول، میانگین شاخص‌های ارزیابی عملکرد محاسبه‌شده خطای مطلق و خطای مطلق تجمعی در کانال اصلی به‌ترتیب ۳۵/۳۷ و ۱۰/۲۸ درصد است. هم‌چنین با توجه به نتایج حاصل‌شده می‌توان بیان کرد که شاخص کفایت تحویل آب برای بازه اول و دوم به‌ترتیب به مقدار ۹۳ و ٨٦ درصد است، که با احتساب ۳۰ درصد تلفات انتقال و توزیع این مقادیر کاهش می-یابند، پس درنتیجه میزان مطلوبیت آب تحویلی براساس رتبه‌بندی شاخص کفایت کم‌تر از ۸۰ درصد بوده و تمام چاه‌های موجود در این دو محدوده به‌صورت صددرصد بهره‌برداری می‌شوند. این در حالی است که کفایت تحویل آب برای بازه‌های سه تا ده بدون درنظرگرفتن تلفات انتقال و توزیع مطلوب نبوده است، به‌طوری‌که آب به بازه‌های انتهایی کانال نمی‌رسد.

هم‌چنین با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول (۲) می‌توان بیان کرد که در شیوه بهره‌برداری معمول، تأمین آب کافی در محل مزارع با استفاده صددرصدی از منابع آب زیرزمینی برای روش بهره‌برداری معمول (دریچه‌های آمیل) در سناریوی کم‌آبی، کانال اصلی قابل‌توجیه می‌باشد (شکل ٦).

Table 2. The calculated operational performance indicators for water shortages conditions

Operation method	Canal reaches	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Amil regulator	MAE	20.20	27.4	28.8	32.4	29.3	3.6	38.4	43.7	47.1	51.8
	IAE	0.43	7.3	7.7	8.3	9.7	11.4	11.8	14.8	15.7	15.7
	Adequacy	93	86	76	75	70	70	-	-	-	-

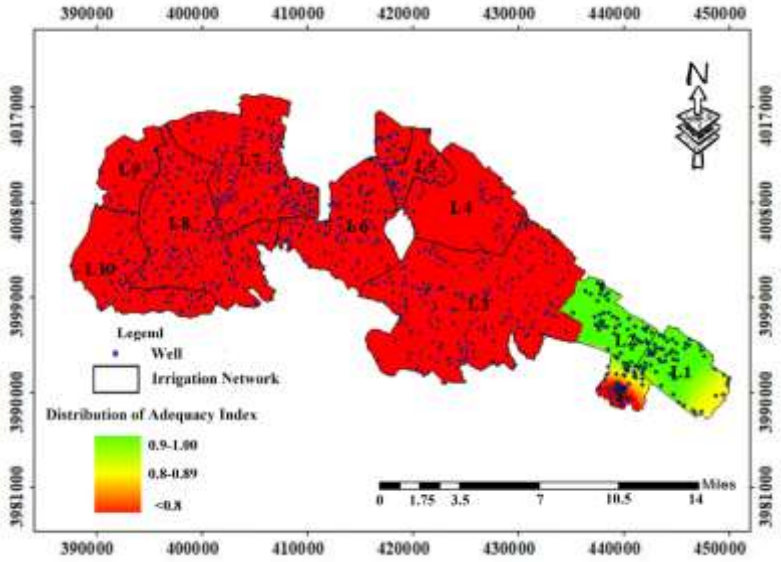

Figure 6. Operation status of the shortage scenario (Amil regulator)

با این وجود، نتایج سناریوی فوق‌الذکر که ناشی از کاهش ۲۰ درصدی جریان ورودی به کانال است، نشان از ناتوانی شیوه بهره‌برداری حال حاضر کانال اصلی با استفاده از روش مذکور است. بنابراین وضعیت بهره‌برداری شبیه‌سازی‌شده کانال اصلی در سناریوی کم‌آبی گواه این مطلب است که بهره‌برداری تلفیقی از چاه و کانال نقش قابل‌توجهی در بهبود عملکرد آبیاری شبکه دارد. بااین‌حال، گفتنی است که در شیوه بهره‌برداری با استفاده از سازه‌های آمیل (وضع موجود) عملکرد مناسبی در تحویل کافی آب به لترال‌ها نداشته و بهره‌برداری از چاه در مناطق تحت پوشش این لترال‌ها الزامی می‌باشد.

هم‌چنین با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول (۳) می‌توان بیان کرد که در شیوه بهره‌برداری با به‌کارگیری سامانه کنترل خودکار PI با ترکیب پس‌خور و پیش‌خور، میانگین شاخص‌های ارزیابی عملکرد محاسبه‌شده خطای مطلق و خطای مطلق تجمعی در کانال اصلی به‌ترتیب ۹/۲۳ و ۵/۳۶ درصد است. که مقدار خطای مطلق نسبت به‌روش معمول بهره‌برداری به میزان ۲۶/۱۴ درصد بهبود یافته است. هم‌چنین میزان بهبود خطای مطلق تجمعی نسبت به‌روش بهره‌برداری معمول به میزان ٤/۹۲ درصد است. بنابراین با به‌کارگیری سامانه کنترل خودکار PI (FB+FF) در مقایسه با شیوه بهره‌برداری اول، شاهد بهبود کفایت تحویل آب در طول کانال اصلی شده است. با افزایش کفایت تحویل آب با به‌کارگیری سامانه کنترل خودکار PI (FB+FF) شاهد افزایش میزان عدم برداشت آب از آبخوان منتج از عدم پمپاژ خواهیم بود.

برهمین اساس و با توجه به نتایج ارائه‌شده شاخص کفایت در جدول (۳)، کفایت تحویل آب برای شیوه بهره‌برداری PI (FB+FF) برای بازه‌های ۱ تا ٤، تقریباً مطلوب ارزیابی می‌شود.

Table 3. The calculated operational performance indicators for water shortages conditions

Operation method	Canal reaches	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PI (FB)	MAE	4.1	5.6	6	7	8.4	9.5	10.7	12.7	12.5	14.8
	IAE	2.6	3.3	3.4	3.9	4.6	5.5	5.9	6.7	8.2	9.5
	Adequacy	90	88	86	85	79	78	77	74	72	70

به‌طوری‌که با درنظرگرفتن تلفات انتقال و توزیع به‌ترتیب مساحت‌های ۷۲، ٦۹، ٦۷ و ٦٦ درصد از مساحت کل هر محدوده به میزان ۹۰-۱۰۰ درصد کفایت تحویل آب دارند، که از نظر رتبه‌بندی شاخص کفایت این میزان مناسب است. با توجه به شکل (۷) این نواحی با رنگ سبز مشخص است که در نتیجه چاه‌های استحصال آب زیرزمینی واقع‌شده در این نواحی، به‌طور کامل خاموش و از چرخه استحصال خارج می‌شوند. هم‌چنین کفایت تحویل آب برای شیوه بهره‌برداری سامانه کنترل خودکار PI، برای بازه‌های ۵ تا ۷ از نقطه نظر کفایت تحویل آب عملکرد مناسبی نداشته است. به‌طوری‌که نواحی محدود در این بازه‌ها مساحتی کم‌تر از ٦۰ درصد از مساحت کل با کفایت ۱۰۰ درصد آبگیری می‌کنند. هم‌چنین روش مذکور برای بازه‌های ۸ تا ۱۰ از نقطه‌نظر کفایت تحویل آب عملکرد مناسبی نداشته، به‌طوری‌که آب به این بازه‌ها نمی‌رسد. با محاسبه مساحت تحت پوشش شاخص کفایت ۹۰ درصد (که با رنگ زرد در مشخص است) این نکته قابل‌ذکر است که چاه‌های قرار گرفته در این نواحی کاهش ۵۰ درصدی استحصال منابع آب زیرزمینی را دارند. هم‌چنین با محاسبه مساحت تحت پوشش کفایت کم‌تر از ۸۰ درصد، مشخص می‌شود که حلقه چاه‌های قرار گرفته در این نواحی به‌صورت صددرصد از منابع آب زیرزمینی استفاده می‌کنند، که در شکل (۷) با رنگ قرمز مشخص است.

نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل کمی آب زیرزمینی

یکی از عوامل مهم در اجرای دقیق مدل، شناسایی عوامل حساس و واسنجی این عوامل جهت به‌دست‌آوردن نتایج بهینه می‌باشد. با توجه به اجرای مدل و آنالیز حساسیت مدل، دو عامل هدایت هیدرولیکی و ضریب آب‌دهی ویژه به‌عنوان عوامل حساس در مدل ماندگار و غیرماندگار مشخص شد. براساس این دو عامل، مدل واسنجی شد. شکل (۸) مقادیر نهایی هدایت هیدرولیکی و آب‌دهی ویژه را نمایش می‌دهد.

واسنجی مدل ماندگار آب زیرزمینی با تغییر در مقادیر هدایت هیدرولیکی به‌گونه‌ای انجام پذیرفت، که حداقل خطای ممکن بین تراز آب زیرزمینی مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده برقرار باشد. مبنای خطای شبیه‌سازی برای مدل‌سازی در طول دوره مدل‌سازی اختلاف کم‌تراز ۱۰۰ سانتی‌متر بین تراز سطح آب مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده می‌باشد. جدول (٤) میزان خطای مدل نهایی ماندگار و غیرماندگار برای آبخوان قزوین را نشان می‌دهد. نتایج تحلیل خطا حاکی از دقت مناسب مدل برای مدل‌سازی غیرماندگار دارد. این نتایج نشان می‌دهد که میانگین مجذور خطا یعنی اختلاف بین تراز آب زیرزمینی مشاهده‌شده با تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی‌شده در کلیه ۵۹ پیزومتر مدل کم‌تر از ٤۹ سانتی‌متر است.

پس از واسنجی مدل ماندگار در آبخوان قزوین، شبیه‌سازی اولیه و پس از آن واسنجی مدل کمی آبخوان برای پارامتر آب‌دهی ویژه (Sy) آبخوان برای مدت زمان یک سال انجام و پس‌از آن برای صحت‌سنجی دوره یک سال بعد انتخاب شد. مقدار خطای مدل در حالت غیرماندگار مطابق جدول (٤) ارائه شد. در حالت غیرماندگار میانگین مجذور خطا بین تراز آب زیرزمینی

مشاهده‌شده با شبیه‌سازی‌شده در کلیه پیزومترهای آبخوان طی یک سال کم‌تر از ۸۹ سانتی‌متر می‌باشد که دقت مناسب مدل را برای صحت‌سنجی و اجرای سناریوهای موجود نشان می‌دهد. شکل (۹) مقادیر واسنجی در حالت غیرماندگار برای چهار چاه مشاهده‌ای را نشان می‌دهد.

Table 4. Error in quantitative model in steady and un-steady

Error parameter	Steady model	Un-steady model
Mean error	0.41	-0.045
Abs error	0.11	0.61
RMSE	0.49	0.89

یکی از علت‌ها و ضرورت‌های استفاده از یک مدل مناسب، کنترل و بررسی رفتار هیدرولیکی آبخوان در مقابل برداشت‌ها و اطلاعات گذشته است که باید تطابق کافی بین نتایج مشاهده‌ای و نتایج به‌دست‌آمده از مدل وجود داشته باشد. به این منظور از صحت‌سنجی مدل غیرماندگار برای یک سال پایانی مدل‌سازی استفاده شده است که نتایج ارائه‌شده حاکی از دقت مناسب مدل است. شکل (۱۰) صحت‌سنجی نتایج را برای سال پایانی مدل‌سازی نشان می‌دهد.

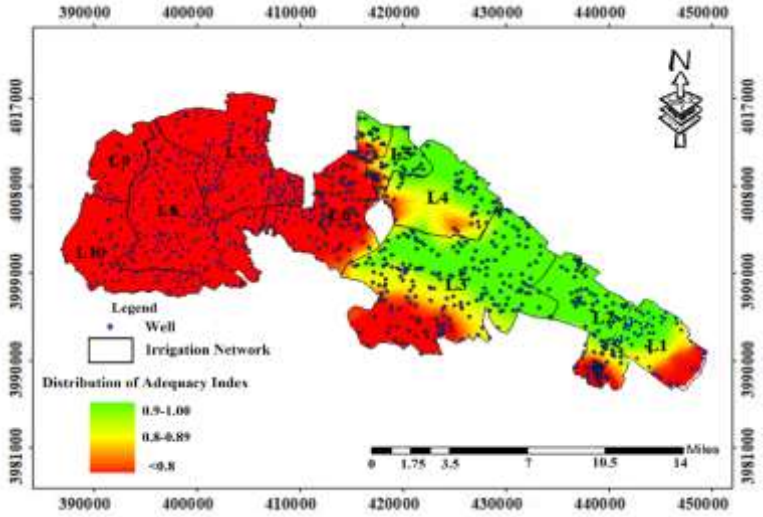

Figure 7. Operation status of the shortage scenario (PI (FB+FF))

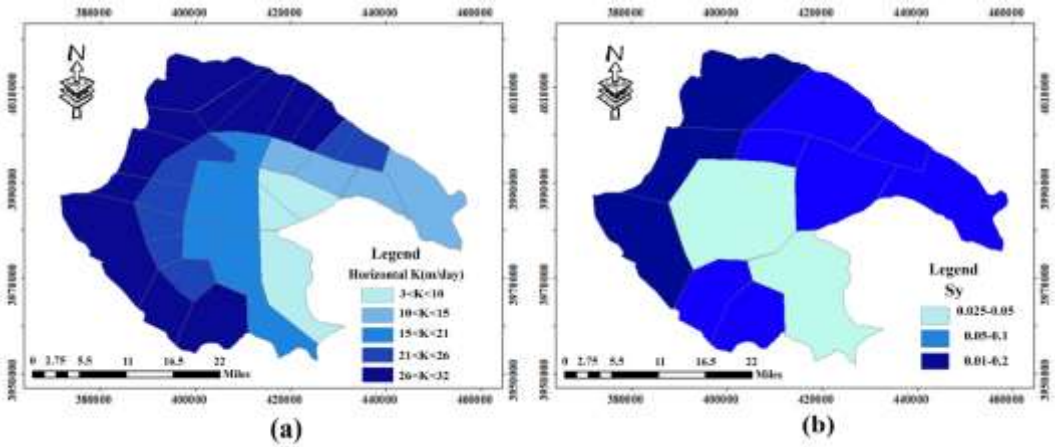

Figure 8. (a) Hydraulic conductivity calibrated in quantitative model, (b) Special calibrated discharge in quantitative model

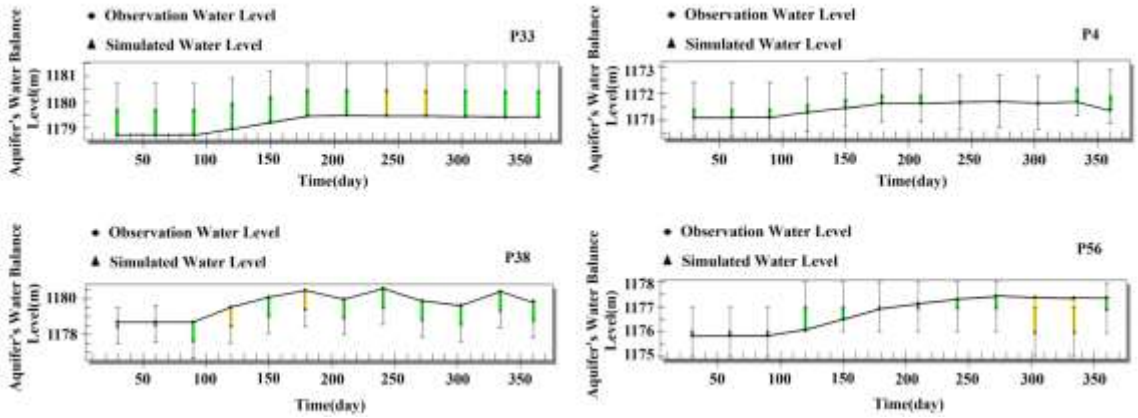

Figure 9. The observed and simulated water level for four sample pizometer in calibration stage

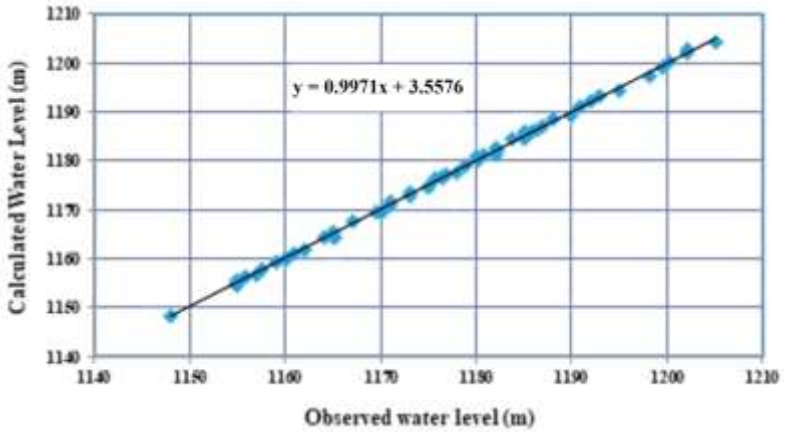

Figure 10. Validation quantitative model

بررسی تغییرات وضعیت آبخوان پس از اعمال روش‌های بهره‌برداری

استفاده از مدل آب زیرزمینی جهت بررسی رفتار یک سیستم در شرایط فعلی و آینده مورد استفاده قرار می‌گیرد. لذا به‌منظور شبیه‌سازی اثر سناریوهای کاهش برداشت آب در این پژوهش از مدل آبخوان استفاده شد. وضعیت فعلی اقلیمی و مدیریتی آبخوان در یک دوره دو ساله مدل‌سازی شد و نتایج به‌صورت توزیعی نمایش داده شد. استفاده از مدل مفهومی آبخوان با توجه به قابلیت توزیعی بودن نتایج، می‌تواند اثر بخشی روش بهره‌برداری توسعه داده‌شده در این پژوهش را در هر بخش از آبخوان نشان دهد.

بنابراین هدف از مدل‌سازی بررسی گزینه‌های چگونگی به تعادل رساندن بیلان، نمایش وضعیت آتی آبخوان تحت سناریوهای مختلف هیدرولوژیکی، بررسی صحت و سقم داده‌های مدل مفهومی و دنباله‌روی از روش‌های استاندارد مدل‌سازی ریاضی توأم با ارائه واسنجی می‌باشد.

به‌منظور تعیین تراز مطلوب آب زیرزمینی و تعیین روند تغییرات افت آب در کل آبخوان، تحلیل روند افت آب زیرزمینی انجام گرفت.

شکل (۱۱) نشان‌دهنده هیدروگراف آبخوان از سال ۱۳۸٤ تا سال ۱۳۹٤ می‌باشد که با استفاده از مقادیر تراز گزارش‌شده از پیزومترهای موجود در دشت به‌دست آمده

است. نتایج حاکی از آن است که میانگین تجمعی تغییر سطح ایستابی آبخوان ۱۲/٤۲- متر به ۲۷/٦٥- متر رسیده است که نشان‌دهنده افت ۱٥/۲۳ متر می‌باشد.

بر این اساس می‌توان دریافت که رفتار تراز آب زیرزمینی بدون اعمال سناریوهای کاهش برداشت، با روند کاهشی همراه است.

پس از صحت‌سنجی مدل کمی آبخوان و تایید دقت مناسب، نمایش تراز آب در مدل تا سال ۱۳۹٥ و در قالب سناریوی کاهش برداشت تعریف‌شده در این پژوهش تحت روش بهره‌برداری معرفی‌شده انجام گرفت. در ادامه توزیع تراز آب زیرزمینی با اعمال سناریو کاهش برداشت ارائه می‌گردد.

بر این اساس با بهره‌گیری از روش کنترل خودکار PI پس‌خور با ترکیب پیش‌خور به میزان ۳٥/٤ درصد در میزان برداشت آب از آبخوان در محدوده شبکه آبیاری، صرفه‌جویی شد. همان‌طورکه پیش‌تر بیان گردید، سناریوی بهره‌برداری بیانگر شرایط کمبود آب (۲۰ درصد کاهش ورودی جریان آب به شبکه آبیاری)، بدون تغییر در تقاضای آبگیرها می‌باشد.

شکل (۱۲) تراز آب زیرزمینی بدون اعمال سناریو معرفی شده است که با توجه به نتایج هیدروگراف، حاکی از ادامه افت آبخوان با روند افزایشی نسبت به دوره‌های قبل تحت شرایط نرمال می‌باشد.

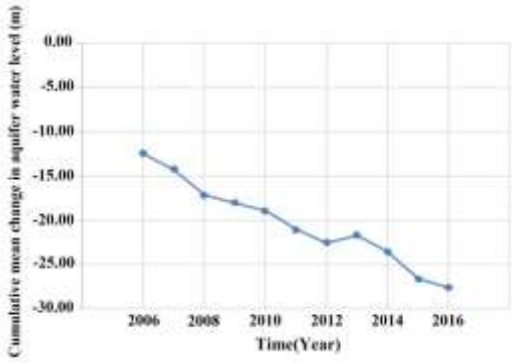

Figure 11. Groundwater level behavior

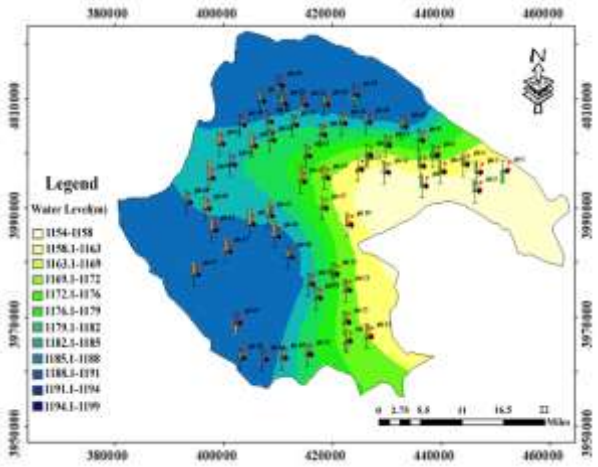

Figure 12. Groundwater level distribution in Amil regulator

به‌منظور اجرای سناریوی کاهش برداشت در روش بهره‌برداری سامانه کنترل خودکار تناسبی- انتگرالی PI پس‌خور با ترکیب پیش‌خور، کاهش برداشت براساس توضیحاتی که پیش‌تر بیان شد، وارد مدل مفهومی آبخوان شد. با تعریف سناریوی کاهش برداشت آب از آبخوان، میزان آب برگشتی در بخش کشاورزی محاسبه و این حجم از میزان تغذیه آبخوان کسر و در مدل مفهومی اعمال شد. کاهش برداشت از آب زیرزمینی فقط برای چاه‌های کشاورزی قرارگرفته در محدوده شبکه آبیاری در مدل در نظر گرفته شد. هم‌چنین این نکته قابل‌ذکر است که سطوح کاهش برداشت در هر ماه در مدل اعمال شد. با توجه به نتایج حاصله، میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی برای هرکدام از نواحی شبکه آبیاری قزوین محاسبه شد.

بر این اساس با بهره‌گیری از سامانه کنترل خودکار تناسبی- انتگرالی PI (FB+FF)، ۳۵/٤ درصد در میزان برداشت آب از آبخوان در محدوده شبکه آبیاری صرفه‌جویی شد.

شکل (۱۳) نتایج کاهش برداشت آب در نواحی کشاورزی و افزایش تراز سطح آب زیرزمنی در مقایسه با روش معمول بهره‌برداری برای روش بهره‌برداری کلاسیک (PI) را در پیزومترها و کل آبخوان نمایش می‌دهد. با توجه به شکل (۱۳) که بیانگر افزایش تراز سطح آب زیرزمینی در مقایسه با روش معمول بهره‌برداری است. مشخص می‌شود که در چاه‌های مشاهداتی که در نواحی میانی شبکه آبیاری قرار دارد، افزایش تراز داشته است. دلیل این امر کاهش برداشت منابع آب زیرزمینی در نواحی میانی شبکه در مقایسه با روش معمول بهره‌برداری است.

براساس نتایج به‌دست‌آمده در محدوده چاه مشاهده‌ای ۱۸ (شهر صنعتی) در سطح کاهش برداشت مذکور میزان تراز سطح آب به میزان ۱/۳ متر افزایش یافت. هم‌چنین برای چاه مشاهده‌ای ۳۳ (چوبیندر) که در شبکه آبیاری قرار دارد سطح تراز آب زیرزمینی به میزان ۱/۷ متر نسبت به‌روش معمول بهره‌برداری افزایش یافت. نتایج برای چاه مشاهده‌ای ۵۳ (رحمت آباد راهدارخانه) حاکی از آن است که تراز آب به میزان ۰/۳ متر نسبت به روش معمول بهره‌برداری بهبود یافته است.

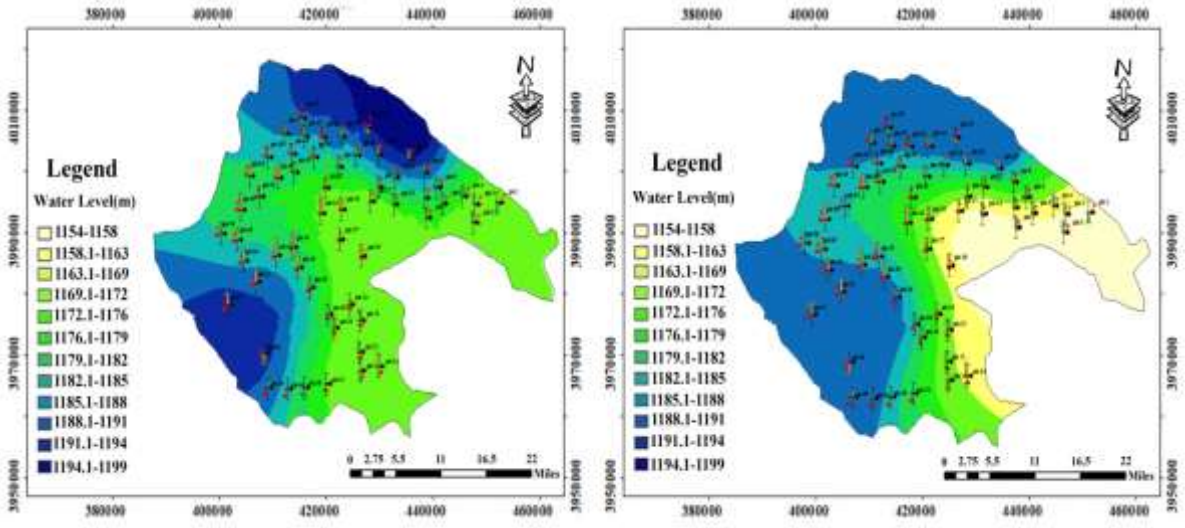

Figure 13. Groundwater level distribution in PI (FB+FF)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تلاش بر این بود تا راه‌کار جدیدی در تعادل‌بخشی آبخوان‌هایی ارائه شود، که منبع تأمین آب کشاورزی در این مناطق تلفیقی از منابع آب سطحی و آب زیرزمینی می‌باشد. در این راستا و با پیروی از روش مرسوم کاهش برداشت آب زیرزمینی، که یکی از تکنیک‌های مدیریت برداشت آب از آبخوان است، نحوه پراکندگی مکانی کاهش برداشت با استفاده از یک روش سیستماتیک مشخص گردید. روش مذکور از دو جز اصلی ۱- مدل‌سازی هیدرولیکی و ۲- مدل بهره‌برداری اتوماتیک کانال اصلی آبیاری تشکیل شده است. با ایجاد یک ارتباط دوسویه بین دو جز مذکور، شبیه‌سازی کانال اصلی آبیاری با استفاده از روش بهره‌برداری کلاسیک امکان‌پذیر شد. به‌طور خلاصه، مدل‌سازی کانال اصلی آبیاری در محدوده شبکه آبیاری این امکان را فراهم می‌کند که محل کاهش برداشت از آب زیرزمینی و میزان کاهش برداشت در هر روز را برای مدل عددی آب زیرزمینی مشخص می‌کند. بنابراین سناریوی تعادل‌بخشی کاهش برداشت ارائه‌شده در این پژوهش، برخلاف سناریوی متداول کاهش برداشت (که تمام چاه‌های واقع در آبخوان به یک نسبت ثابت پمپاژ آب را کاهش می‌دهند) کاهش برداشت متغیر مکانی دارد.

نتایج کاربردی بهره‌گیری از سناریوی تعادل‌بخشی توسعه داده‌شده این پژوهش، به‌طور خلاصه به شرح ذیل ارائه می‌گردد.

جمع‌بندی نتایج حاصل از شبیه‌سازی و ارزیابی توزیع آب کشاورزی نشان داد که کفایت توزیع آب سطحی در شرایط کم‌آبی (میزان آب سطحی تأمین‌شده کاهش می‌یابد) در محدوده‌های بالادست، میان‌دست و پایین‌دست نواحی کشاورزی تحت روش معمول بهره‌برداری از ۹۳ درصد در ناحیه یک به صفر در ناحیه ۱۰ تنزل می‌یابد. نتیجه این توزیع غیرمطمئن آب سطحی، تشدید برداشت آب زیرزمینی در نواحی انتهایی بوده که در مجموع به‌طور سالانه ٤٠١/٨٦ میلیون مترمکعب آب از چاه‌های مجاز حفرشده توسط کشاورزان برداشت می‌شود.

هم‌چنین با ارتقای سیستم توزیع آب سطحی به سیستم کنترل خودکار، کفایت توزیع آب در محدوده‌های بالادست، میان‌دست و پایین‌دست، در مقایسه با شرایط بهره‌برداری موجود، به‌طور میانگین در حدود ۳۲/۷ در شرایط کم‌آبی، بهبود عملکرد نشان داد. که بهبود حاصل‌شده در توزیع آب سطحی به معنی کاهش برداشت از آب زیرزمینی بوده که پس از تعیین حدود مکانی آن، میزان کاهش برداشت به تفکیک هر چاه در محدوده تعیین و به‌عنوان ورودی جدید مدل آب زیرزمینی وارد مدل MODFLOW شد.

نتایج مدل‌سازی عددی آبخوان موردمطالعه نشان داد که در دوره مدل‌سازی میزان کاهش برداشت آب زیرزمینی به‌ازای پیاده‌سازی سناریوی تعادل‌بخشی، در حدود ۱۸۲ میلیون مترمکعب به‌ترتیب برای روش بهره‌برداری PI را به‌همراه داشته است.

لازم به ذکر است که فرضیه در نظر گرفته‌شده برای تحقق هدف مذکور آن است که اقداماتی از قبیل درخواست صدور مجوزهای جدید احداث چاه کشاورزی، احداث غیرقانونی این چاه‌ها، کف‌کنی چاه‌های نیمه‌عمیق موجود، ارائه سوبسیدهای دولتی در تأمین برق کشاورزی، در نواحی کشاورزی به حداقل برسد.

جهت بهبود فرایند بهره‌برداری تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی در شبکه‌های آبیاری با شرایط فوق‌الذکر و انجام پژوهش‌های آتی، پیشنهادات زیر ارائه می‌گردد:

- تعیین چارچوب انتخاب روش بهره‌برداری مناسب و تأثیر آن بر آبخوان براساس دغدغه‌های اجتماعی و اقتصادی.
- ارزیابی تعادل‌بخشی آبخوان به‌صورت توزیع زمانی.

پی‌نوشت‌ها

1. Proportional Integral Controller
2. Maximum Absolute Error (MAE)
3. Integral of Absolute Magnitude of Error (IAE)
4. Feedback
5. Feed-forward

منابع

۱. جوادی، س.، کاردان‌مقدم، ح. (۱۳۹۸). شبیه‌سازی سه‌بعدی تهاجم جبهه‌های آب‌شور در آبخوان‌های کویری با استفاده از مدل SEAWAT. مدیریت آب و آبیاری. ۹ (۲)، ۲۶۲-۲۵۱.

۲. حسینی‌جلفان، م.، هاشمی شاهدانی، م.، جوادی، س.، و بنی‌حبیب، م.ا. (۱۳۹۷). ارزیابی اثربخشی بهبود بهره‌برداری از منابع آب سطحی در کاهش برداشت آب از آبخوان (مطالعه موردی: شبکه آبیاری قزوین). تحقیقات منابع آب ایران. ١٤ (٤)، ١٣٢-١٤٦.

۳. حسینی‌جلفان، م. (۱۳۹۷). بررسی تأثیر دو راه‌کار خودکارسازی و بهره‌برداری تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی در بهبود مدیریت بهره‌برداری کانال اصلی شبکه آبیاری از دیدگاه رابطه آب- انرژی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تهران- تهران.

٤. غفوری‌خرانق، س.، بنی‌حبیب، م.ا.، جوادی، س. (۱۳۹۸). ارزیابی اجتماعی سناریوهای حکمرانی آب زیرزمینی. مدیریت آب و آبیاری. ۹ (۲)، ۳۱۹-۳۰۵.

۵. یلتقیان‌خیابانی، م.، هاشمی شاهدانی، م.، بنی‌حبیب، م.ا.، و حسنی، ی. (۱۳۹۸). امکان‌سنجی به‌کارگیری روش‌های غیرسازه‌ای و خودکارسازی در ارتقای بهره‌برداری از سامانه‌های توزیع آب (مطالعه موردی: شبکه آبیاری رودشت). مدیریت آب و آبیاری. ۹(۱)، ۱۲۷-۱۰۹.

٦. وزارت نیرو، (١٣٩٤)، گزارش برنامه کاهش و تعادل آب زیرزمینی، ۷۲.

7. Alcamo, J., Henrichs, T., & Rösch, T. (2017). World water in 2025: Global modeling and scenario analysis for the world commission on water for the 21st century.
8. Amiri, M. A., & Mesgari, M. S. (2018). Analyzing the spatial variability of precipitation extremes along longitude and latitude, northwest Iran. *Kuwait Journal of Science*, 45 (1), 121-127.
9. Banihabib, M. E., Vaziri, B., & Javadi, S. (2018). A model for the assessment of the effect of mulching on aquifer recharging by rainfalls in an arid region. *Journal of hydrology*, 567, 102-113.
10. Burt, C. M. (2013). The irrigation sector shift from construction to modernization: What is required for success?. *Irrigation and drainage*, 62 (3), 247-254.
11. Clemmens, A. J., Kacerek, T. F., Grawitz, B., & Schuurmans, W. (1998). Test cases for canal control algorithms. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 124 (1), 23-30.
12. Dash, C. J., Sarangi, A., Singh, D. K., & Adhikary, P. P. (2019). Numerical simulation to assess potential groundwater recharge and net groundwater use in a semi-arid region. *nvironmental monitoring and assessment*, 191 (6), 371.
13. Gude, V. G. (2017). Desalination and water reuse to address global water scarcity. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 16 (4), 591-609.
14. Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C., & McDonald, M. G. (2000). MODFLOW-2000, The U. S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process. *Open-file Report. U. S. Geological Survey*, (92), 134.
15. HASHEMY, S. M., Firoozfar, A., Maestre, J. M., Mallakpour, I., Taghvaeian, S., & Karimi, P. (2018). Operational performance improvements in irrigation canals to overcome groundwater overexploitation. *Agricultural Water Management*, 204, 234-246.
16. HASHEMY, S. M., FIRROZFAR, A., Sadeghi, S., & ADIB, M. E. (2016). Performance assessment of decentralized automatic control system for applying in operation of a main irrigation canal under inflow fluctuations. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 66, 137-152.

17. Hosseini Jolfan, M., Hashemy Shahdany, S. M., Javadi, S., Mallakpour, I., & Neshat, A. (2020). Effects of canal automation on reducing groundwater extraction within irrigation districts: Case study of Qazvin irrigation district. *Irrigation and Drainage*, 69 (1), 11-24.
18. Jin, X., Chen, M., Fan, Y., Yan, L., & Wang, F. (2018). Effects of mulched drip irrigation on soil moisture and groundwater recharge in the Xiliao River Plain, China. *Water*, 10 (12), 1755.
19. Litrico, X., & Fromion, V. (2009). Modeling and control of hydrosystems. *Springer Science & Business Media*, New York, 409.
20. Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis?. *Journal of environmental studies and sciences*, 4 (4), 315-328.
21. Mazza, R., La Vigna, F., & Alimonti, C. (2014). Evaluating the available regional groundwater resources using the distributed hydrogeological budget. *Water resources management*, 28 (3), 749-765.
22. Molden, D.J., & Gates, T.K. (1990). Performance measures for evaluation of irrigation-water-delivery systems. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 116 (6), 804-823.
23. Qadir, A., Ahmad, Z., Khan, T., Zafar, M., Qadir, A., & Murata, M. (2016). A spatio-temporal three-dimensional conceptualization and simulation of Dera Ismail Khan alluvial aquifer in visual MODFLOW: a case study from Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(2), 149.
24. Rogers, D. C., & Goussard, J. (1998). Canal control algorithms currently in use. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124(1), 11-15.
25. Rousta, I., Soltani, M., Zhou, W., & Cheung, H.H. (2016). Analysis of extreme precipitation events over central plateau of Iran. *American Journal of Climate Change*, 5(3), 297-313.
26. Schuurmans, J., Clemmens, A. J., Dijkstra, S., Hof, A., & Brouwer, R. (1999). Modeling of irrigation and drainage canals for controller design. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 125 (6), 338-344.
27. Shahverdi, K., & Monem, M. J. (2015). Application of reinforcement learning algorithm for automation of canal structures. *Irrigation and drainage*, 64 (1), 77-84.
28. Sheikhipour, B., Javadi, S., & Banihabib, M. E. (2018). A hybrid multiple criteria decision-making model for the sustainable management of aquifers. *Environmental Earth Sciences*, 77 (19), 712.
29. Van Overloop, P. J., Schuurmans, J., Brouwer, R., & Burt, C. M. (2005). Multiple-model optimization of proportional integral controllers on canals. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131 (2), 190-196.
30. Zamani, S., Parvaresh Rizi, A., & Isapoor, S. (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), 519-534.