



## مدیریت آب و آبیاری (نشریه علمی)

دوره ۱۱ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۰

صفحه‌های ۵۹۱-۵۷۵

DOI: 10.22059/jwim.2021.328276.907

مقاله پژوهشی:

### ارتقای مدیریت بهره‌برداری تلفیقی آب کشاورزی در شبکه آبیاری با هدف تعادل بخشی آبخوان (مورد مطالعاتی: شبکه آبیاری قزوین)

محسن حسینی جلفان<sup>۱</sup>، مهدی یاسی<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۱۳

#### چکیده

تعادل بخشی آبخوان‌های واقع در مناطق کشاورزی نیازمند بهبود عملکرد سامانه انتقال، توزیع و تحویل آب سطحی است. این پژوهشی به بررسی میزان تأثیرگذاری ارتقای عملکرد سامانه توزیع آب (کانال اصلی آبیاری) در تعادل بخشی آبخوان می‌پردازد. در گام نخست، مدل عددی آبخوان دشت قزوین، با کد MODFLOW در نرم‌افزار GMS، به منظور نمایش تأثیر روش‌های بهره‌برداری در کانال اصلی آبیاری، توسعه داده شد. در ادامه، مدل شبیه‌ساز هیدرولیک جریان سامانه توزیع آب در کانال اصلی آبیاری با نرم‌افزار MATLAB توسعه، کالیبره و صحت‌سنجی شده است. در نهایت با سامانه کنترل خودکار پیش‌بین لینک شد. در نهایت تأثیر سامانه کنترل خودکار پیش‌بین بر تعادل بخشی آبخوان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با ارتقای عملکرد سامانه توزیع آب در کانال اصلی آبیاری میزان بهبود شاخص کفایت با ارتقای شیوه بهره‌برداری موجود به سامانه کنترل خودکار متمرکز (MPC) در حدود ۳۰ درصد در نواحی انتهایی شبکه آبیاری است. بر این اساس میزان کاهش برداشت از آبخوان با بهره‌گیری از سامانه کنترل خودکار پیش‌بین در حدود ۴۰۱/۸۶ میلیون مترمکعب در سال است. نتایج مدل‌سازی عددی آبخوان نشان داد که در روش حاضر بهره‌برداری تراز آب زیرزمینی هم‌چنان روند افزایشی افت را حفظ می‌کند. به طوری که نتایج نمایانگر مقدار افت سالانه در حدود ۱۵۰ سانتی متر در روش بهره‌برداری معمول است. به کارگیری سامانه کنترل خودکار متمرکز پیش‌بین سبب افزایش کفایت تحویل آب به آبیگرها شده و هم‌چنین سبب افزایش تراز آب در چاه‌های مشاهداتی موجود در نواحی کشاورزی خواهد شد.

**کلیدواژه‌ها:** آبخوان قزوین، تعادل بخشی آبخوان، تلفات انتقال و توزیع، سامانه کنترل خودکار پیش‌بین (MPC).

### Enhancing the integrated management of agricultural water in an irrigation network with the aim of balancing the aquifer (Case study: Qazvin irrigation District)

Mohsen Hosseini Jolfan<sup>1</sup>, Mehdi Yasi<sup>2\*</sup>

1. Ph.D. Candidate in Hydraulic Structures, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2. Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Received: August 04, 2021

Accepted: October 07, 2021

#### Abstract

Balancing aquifers located in agricultural areas requires improving the performance of the surface water transmission, distribution and delivery system. This study investigates the effectiveness of improving the performance of the water distribution system (main irrigation canal) in balancing the aquifer. In the first step, the numerical model of Qazvin aquifer, with MODFLOW code in GMS software, was developed to show the effect of operation methods in the main irrigation canal. Next, the hydraulic flow simulator model of the water distribution system in the main irrigation canal was developed, calibrated and validated with MATLAB software. Finally, it was linked to the predictive automatic control system. Finally, the effect of predictive automatic control system on aquifer balance was investigated. The results showed that by improving the performance of the water distribution system in the main irrigation canal, the adequacy index improved by upgrading the existing operation method to a centralized automatic control system (MPC). It is about 30% in the end areas of the irrigation district. Accordingly, the rate of reduction of abstraction from the aquifer by using the automatic predictive control system is about 401.86 million cubic meters per year. The results of numerical modeling of the aquifer showed that in the present method, the operation of the groundwater level continues to maintain an increasing trend of decline. As the results show the amount of annual drop of about 150 cm in the usual operation method. The use of predictive centralized automatic control system has increased the adequacy of water delivery to reservoirs and this has led to an increase in water levels in observation wells located in agricultural areas.

**Keywords:** Aquifer storage and recovery, Automatic predictive control system (MPC), Distribution and transfer losses, Qazvin aquifer.

## مقدمه

منابع آب زیرزمینی یک رکن مهم برای امنیت غذایی و احیای اراضی کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (Noori *et al.*, 2021; Dhehibi & Telleria, 2012). بررسی‌ها نشان می‌دهد که منابع آب زیرزمینی با سهم حدود ۳۰/۱ درصد از کل آب‌های شیرین موجود در کره زمین عمده‌ترین منابع آب موجود برای کشاورزی، شرب و صنعت را در بر می‌گیرد (Ketabchi, 2015; Javadi *et al.*, 2017). در حال حاضر، سهم استفاده از آب‌های زیرزمینی به دلیل محدودیت‌های زمانی و مکانی بهره‌برداری از منابع آب سطحی (Doll *et al.*, 2012)، امکان بهره‌برداری آسان‌تر در تأمین تقاضای رو به رشد جمعیت بخش شهری (Banihabib *et al.*, 2018)، توسعه اقتصادی و تغییر در رژیم غذایی (Alcam *et al.*, 2017) افزایش یافته است. به همین دلیل بهره‌برداری بیش از ظرفیت منابع آب زیرزمینی مشکلات متعدد و گاه جبران‌ناپذیر مانند افت تراز سطح آب و کاهش حجم آبخوان (Gian *et al.*, 2006; Campos-Gaytam *et al.*, 2014; Hosseini jolfan *et al.*, 2019; Noori *et al.*, 2021) کیفیت آب زیرزمینی (Kruawal *et al.*, 2005; Zhai *et al.*, 2013) و نشست زمین (Galloway *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2014; Bagheri gavkosh *et al.*, 2021) را سبب شده است. در این خصوص، اولین نشان اتهام به سمت بخش کشاورزی (به‌عنوان مصرف‌کننده عمده منابع آب) رفته است. بخش کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب در اغلب کشورهای دنیا، عملکرد ضعیفی در استفاده بهینه از منابع آب داشته است. طبق برآوردها در ایران، این میزان حدود ۹۰ درصد است که نشانگر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در کشاورزی و آبیاری اراضی است (Madani, 2014; Hosseini jolfan *et al.*, 2019; Salehi *et al.*, 2018).

ازاینرو، تعادل‌بخشی در آبخوان با اعمال مدیریت در بخش کشاورزی از اهمیت به‌سزایی برخوردار است (Hashemy shahdani *et al.*, 2016). در سال‌های اخیر، با توجه به نقش منابع آب زیرزمینی به‌عنوان یک محور توسعه، مطالعات گسترده‌ای پیرامون مسائل مربوط به حفاظت منابع آب و تعادل‌بخشی و پایداری آبخوان صورت گرفته است. در همین زمینه، Gibson *et al.* (2018) به دلایل کاهش منابع آب زیرزمینی ناشی از برداشت بی‌رویه در حوضه آبریز رودخانه یاکیما در ایالت واشنگتن (آمریکا) و امکان‌پذیری اجرای طرح تعادل‌بخشی آبخوان (ASR)<sup>۱</sup> در ۲۸۴ واحد مکان پرداخت. نتایج نشان داد که بیش از ۵۰ درصد از مکان‌های موردارزیابی برای اجرای طرح ASR مناسب هستند و پتانسیل تغذیه آبخوان‌ها در ۲۸۴ واحد مکان برابر ۶۴۰۰ میلیون لیتر در روز است. در مطالعه Kourakos *et al.* (2015)، تأثیر کشاورزی فاریاب در دره مرکزی کالیفرنیا در جهت مدیریت تعادل‌بخشی آبخوان (MAR)<sup>۲</sup> بررسی شد. این بررسی با چهار شیوه بازیافت ظرفیت آب کشاورزی، هشت گزینه در تغییر میزان بازیافت ظرفیت آب و پنج گزینه تغییر زمان در دوره بازیابی ظرفیت آبخوان انجام شد. نتایج نشان داد که در دسترس‌بودن کافی جریان آب، نقش قابل‌توجهی در مدیریت تعادل‌بخشی آبخوان دارد. هم‌چنین مشخص شد اگر محدودیتی در دسترسی به آب وجود داشته باشد، دوره بازیافت ظرفیت آبخوان طولانی‌تر و با نرخ پایین‌تر انجام می‌شود. Sathis *et al.* (2018) با استفاده از مدل شبیه‌ساز MODFLOW به بررسی و انتخاب مکانی مناسب جهت ذخیره سازی و بازیابی آبخوان (ASR) به‌منظور اطمینان از تأمین آب پایدار در ابوظبی (امارات متحده) پرداختند. در این پژوهش از چاه‌ها و حوضچه‌های تزریق برای بالا آوردن تراز آب زیرزمینی و بازیابی آبخوان استفاده شد.

تلفات آب با توجه به مدیریت بهره‌برداری موجود حدود ۵ تا ۱۰ درصد گزارش شده است ( Hosseini jolfan et al., 2019). هم‌چنین در پژوهش Serrae et al. (2016) در یک شبکه آبیاری اسپانیا مشخص شد که بیش از ۵۰ درصد از آب عرضه‌شده به‌دلیل مدیریت ضعیف بهره‌برداری و نگهداری شبکه، تلف می‌شود. در مطالعه Agide et al. (2016) در چهار منطقه از اتیوپی مشخص شد که عامل ایجاد بازدهی کم و به‌دنبال آن ایجاد بی‌عدالتی در توزیع آب، بهره‌برداری نامناسب از سازه‌های آسیب‌دیده و توسعه زیرساخت‌های آبیاری بدون برنامه‌های مدیریتی مناسب است (Ajide et al., 2016). هم‌چنین در مطالعه Hosseini jolfan et al. (2019) دو سامانه مجزای کنترل خودکار شامل سیستم کنترل غیرمتمرکز تناسبی - انتگرالی و سیستم کنترل خودکار سراسری پیش‌بین در شرایط خشکسالی (کمبود آب) برای شبکه آبیاری قزوین طراحی شد. در ادامه میزان تأثیر بهبود بهره‌برداری منابع آب سطحی بر کاهش آب برداشتی از آبخوان به‌صورت حجمی و بدون بررسی افت تراز سطح آب به‌صورت توزیعی، در محدوده شبکه آبیاری قزوین، بررسی شد. هم‌چنین، انرژی صرفه‌جویی‌شده منتج از عدم پمپاژ و نیز کاهش مقدار CO<sub>2</sub> در اثر بهبود بهره‌برداری سامانه اصلی توزیع و تحویل آب، به تفکیک روش‌های بهره‌برداری معرفی‌شده در این پژوهش، محاسبه شد ( Hosseini jolfan et al., 2019). 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 ( Hosseinzadeh et al., 2017; Hashemy shahdany & Firoozfar, 2017).

در این پژوهش راه‌کار جدیدی در تعادل‌بخشی آبخوان‌هایی که منبع تأمین آب کشاورزی در این مناطق تلفیقی از منابع آب سطحی و آب زیرزمینی می‌باشد، ارائه

نتایج نشان داد که حتی با ۱۰۰ درصد بازیابی، تراز آب زیرزمینی در طی دوره بازیافت به تراز طبیعی آن نمی‌رسد. Knapton et al. (2019) با بیان مشکلاتی نظیر افزایش جمعیت، برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی و خالی‌شدن ذخیره آبخوان در فصل خشک سال در منطقه کشاورزی داروین (استرالیا)، به بررسی مدیریت بازیافت ظرفیت آبخوان (MAR) پرداخت. این ارزیابی نشان داد که MAR در اوایل تا اواسط فصل خشک می‌تواند تأثیر کاهش تراز آب زیرزمینی در فصل خشک در منطقه کشاورزی داروین را به میزان ۵۰۰ هزار مترمکعب در سال کاهش دهد. در این مطالعات سهم تلفات سامانه‌های انتقال، توزیع و تحویل آب سطحی در افزایش راندمان نادیده گرفته شده و مطالعات اغلب محدود به فعالیت‌های درون مزرعه‌ای بوده است.

یکی از عوامل برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در ایران، عدم رضایت کشاورزان از توزیع و تحویل کافی و مناسب منابع آب سطحی در شبکه‌های آبیاری است. با وجود سرمایه‌گذاری‌های چشمگیر دولت در احداث سدهای ذخیره‌ای و شبکه‌های توزیع آب کشاورزی در پایین‌دست آن‌ها، به‌دلیل بهره‌برداری نامطمئن در این شبکه‌ها، هم‌زمان از منابع آب سطحی و زیرزمینی استفاده می‌شود ( Javadi et al., 2017; Hashemy shahdani et al., 2018). از سوی دیگر، عملکرد ضعیف سامانه‌های توزیع آب کشاورزی (به‌دلیل عواملی مانند نقص در طراحی و اجرا، عدم اجرای منظم برنامه‌های دوره بازرسی و نگهداری، و بهره‌برداری با رویکرد بالا به پایین) منجر به ناعدالتی در توزیع آب سطحی بین کشاورزان روستاهای بالادستی و پایین‌دستی شده و از نظر کفایت توزیع آب و هم‌چنین از نظر تأمین بهره‌وری مناسب آب مطلوب نخواهد بود ( Burt, 2013; Hashemy shahdani et al., 2018). در شبکه‌های آبیاری مدرن ایران، میزان

۱- بررسی سامانه کنترل خودکار سراسری پیش‌بین (MPC) به‌عنوان راه‌کار خودکارسازی در کانال اصلی یک شبکه آبیاری،  
۲- طراحی، توسعه و واسنجی مدل بهره‌برداری کنونی و کنترل‌گر MPC برای شبکه آبیاری،  
۳- جمع‌آوری و طبقه‌بندی اطلاعات مربوط به مدل‌سازی عددی آب زیرزمینی،  
۴- طراحی مدل پایدار و ناپایدار آبخوان مورد مطالعه به کمک مدل MODFLOW با استفاده از نرم‌افزار GMS انجام گرفت، تا ضمن شبیه‌سازی وضعیت آب زیرزمینی، تأثیر روش بهره‌برداری موردنظر را در قالب سناریوی تعادل‌بخشی در مدل شبیه‌سازی نموده و نتیجه آن به‌صورت توزیعی قابل ارزیابی شود.  
روند انجام و ارتباط بین مدل‌های توسعه داده‌شده در این پژوهش، در شکل (۱) نشان داده شده است.

#### منطقه مورد مطالعه

این پژوهش با تمرکز بر روی آبخوان قزوین که یکی از بزرگ‌ترین آبخوان‌های ایران است، انجام شد. آبخوان قزوین در حوضه آبریز دریاچه‌نمک و در محدوده طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵۳ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۵ درجه و ۶۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۷ دقیقه شمالی قرار دارد و ارتفاع آن حداکثر برابر ۲۹۷۱ و حداقل ۱۱۰۰ متر و متوسط حدود ۱۲۵۰ متر از سطح دریا است. در محدوده آبخوان قزوین به‌ویژه در ناحیه ورودی به دشت تغذیه‌کننده آبخوان بوده و برخی از آن‌ها به‌ویژه در نواحی خروجی از دشت که سطح آب زیرزمینی نزدیک به سطح زمین می‌باشد زهکش آبخوان هستند. منابع آب سطحی و زیرزمینی واردشده به آبخوان قزوین از غرب به شرق و شمال به جنوب حرکت کرده و در نهایت از قسمت شرقی که یک شوره‌زار است،

شده است. در این راستا و با پیروی از رویکرد کاهش برداشت آب زیرزمینی، نحوه پراکندگی مکانی کاهش برداشت با استفاده از یک روش سیستماتیک متشکل از دو بخش ۱- مدل‌سازی هیدرولیکی و ۲- مدل بهره‌برداری اتوماتیک کانال اصلی آبیاری بررسی شده است. سناریوی تعادل‌بخشی 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. به‌منظور کاهش اضافه‌برداشت از ذخیره استاتیک آبخوان‌های واقع در مناطق کشاورزی و برنامه‌ریزی احیای آبخوان‌ها در دوره‌های بلندمدت، به بهبود عملکرد سامانه‌های انتقال، توزیع و تحویل آب سطحی پرداخته شده است. برای دستیابی به این هدف، اقداماتی مانند درخواست صدور مجوزهای جدید برای احداث چاه کشاورزی، احداث غیرقانونی چاه‌ها، کف کنی چاه‌های نیمه‌عمیق موجود، و پرداخت یارانه دولتی در تأمین برق کشاورزی، باید در محدوده شبکه توزیع آب سطحی به حداقل برسد. تأمین این شرایط نیازمند پیاده‌سازی سامانه‌های هوشمند بهره‌برداری است که بتواند اعتماد کشاورزان در تأمین آب کافی، پایدار و عادلانه از منبع آب سطحی را تأمین نماید. این پژوهش، به بررسی تأثیر ارتقای بهره‌برداری از یک سامانه توزیع آب سطحی بر کاهش سهم منبع آب زیرزمینی در مدیریت بهره‌برداری تلفیقی آب سطحی- زیرزمینی می‌پردازد. برای این منظور، کانال اصلی شبکه آبیاری قزوین، در شرایط نرمال موردنظر قرار گرفته است.

#### مواد و روش‌ها

##### روند انجام پژوهش

این پژوهش در چهار گام اصلی به شرح ذیل انجام خواهد شد.

ارتقای مدیریت بهره‌برداری تلفیقی آب کشاورزی در شبکه آبیاری با هدف تعادل‌بخشی آبخوان (مورد مطالعاتی: شبکه آبیاری قزوین)

محدودیت منابع آب سطحی در این دشت، بخش عمده آب آبیاری از منابع زیرزمینی تأمین می‌شود. این عامل باعث کاهش سالیانه ۱/۵ متر سطح سفره آب زیرزمینی شده است (Noori *et al.*, 2021).

به سمت کویر قم خارج می‌شود (شکل ۲). مجموع تغذیه آبخوان دشت قزوین ۱۲۶۰ میلیون مترمکعب در سال است، در حالی‌که مجموع تخلیه این آبخوان به ۱۴۵۸ میلیون مترمکعب در سال نیز می‌رسد. باتوجه به

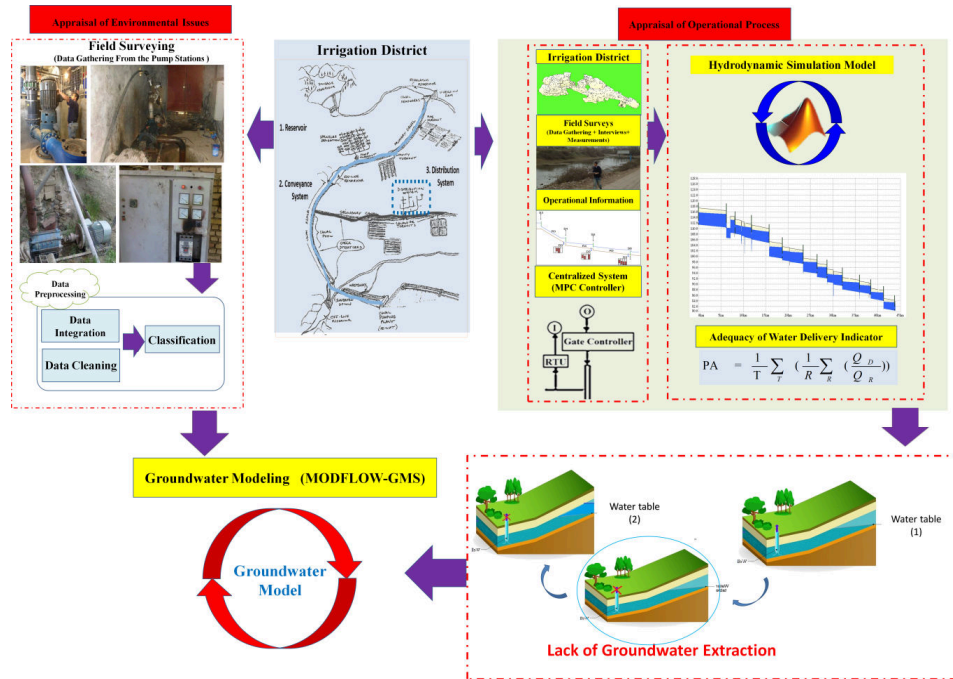


Figure 1. The research methodology

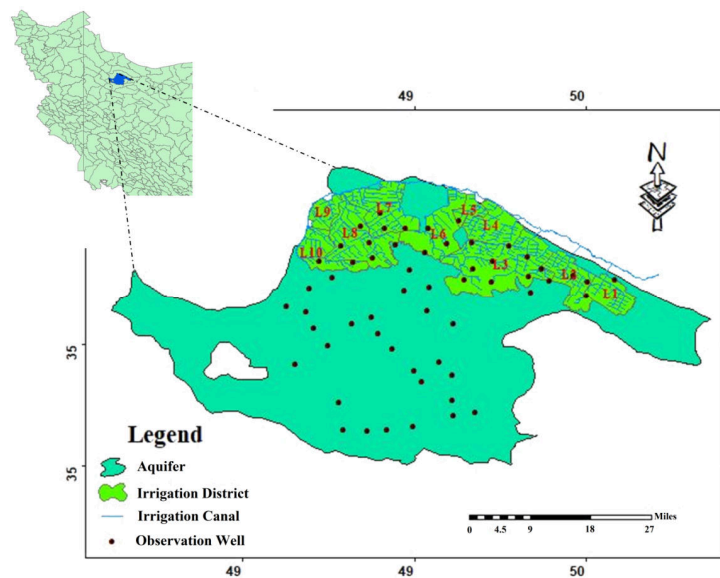


Figure 2. Geographical location of the case study area

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۱ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۰

کنترل‌گرهای طراحی شده متصل شده و فرامین کنترلی را به صورت هم‌زمان دریافت نماید. در این پژوهش از مدل انتگرالی - تأخیری (ID) (که در قسمت شبیه‌سازی کانال اصلی ذکر شده است) استفاده شد، تا شرایط هیدرولیکی موجود (روش معمول بهره‌برداری) در کانال را شبیه‌سازی کرده و امکان تبادل آسان داده‌ها با کنترل‌گرها را فراهم کند. هم‌چنین میزان مطلوبیت بهره‌برداری کانال اصلی بر اساس شاخص‌های ارزیابی عملکرد در این پژوهش، مورد ارزیابی قرار گرفت.

آزمون سامانه کنترل خودکار پیش‌بین طراحی شده در این پژوهش، در سناریوی "شرایط حاضر بهره‌برداری کانال اصلی شبکه آبیاری قزوین" مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف اصلی بررسی وضعیت موجود بهره‌برداری کانال اصلی در شرایط نرمال بهره‌برداری بوده است. منظور از بهره‌برداری نرمال زمانی است که برداشت آب در آبگیرهای کانال اصلی، با یک برنامه زمانی مشخص و به دور از هرگونه تغییرات شدید (کمبود آب) به سامانه کانال اصلی انجام گیرد. در این سناریو تمام چاه‌های بهره‌برداری موجود در شبکه آبیاری، از منابع آب زیرزمینی استفاده می‌کنند.

### شبیه‌سازی بهره‌برداری کانال اصلی آبیاری

#### شرایط موجود بهره‌برداری کانال اصلی آبیاری (دریچه آمیل)

به منظور ارزیابی میزان بهبود فرایند بهره‌برداری، با به‌کارگیری سامانه کنترل خودکار، لازم است شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در سامانه مورد مطالعه و ارزیابی عملکرد وضعیت موجود توزیع آب انجام گیرد تا با کنترل‌گر طراحی شده متصل شده و فرامین کنترلی را به صورت 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

برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی (حفر چاه‌های غیرمجاز) و کاهش سهمیه منابع آب سطحی این دشت از ذخیره سد طالقان سبب شده تا مدیریت تقاضای آب کشاورزی در این دشت بیش‌تر از گذشته مورد توجه قرارگیرد. شبکه آبیاری قزوین با وسعتی معادل ۸۰۰۰۰ هکتار ناخالص و مساحت خالص ۶۰۰۰۰ هکتار (که حدود ۷۲ درصد آن را اراضی درجه ۱ و ۲ تشکیل می‌دهد)، از مهم‌ترین مناطق کشاورزی در این دشت است (شکل ۲). در حال حاضر، تأمین آب این شبکه از منابع آب سطحی (سد مخزنی طالقان) و منابع آب زیرزمینی (چاه‌های مجاز و غیرمجاز موجود در سطح شبکه) است. مشخصات کلی شبکه آبیاری قزوین در جدول (۱) ارائه شده است. براساس مطالعات پیشین (Hosseini Jolfan et al., 2019)، محدودیت تأمین آب، پایین‌بودن راندمان آبیاری (انتقال و توزیع و کاربرد آب در مزرعه)، مشارکت‌نداشتن آب‌بران در نگهداری شبکه آبیاری، از مشکلات شبکه آبیاری قزوین است که در بهره‌برداری این شبکه باید مورد بازبینی قرار گیرد.

Table 1. General specifications of Qazvin plain irrigation district

The length of the main canal	94 km - the initial 3.5 km is performed as a flume.
Main canal capacity	At the beginning of the district is 30 cubic meters per second and at the end is 3 cubic meters per second.
Length of grade 2 canals	217 km with 10 canals
Length of grade 3 canals	270 km
Length of grade 4 canals	540 km
Canal coverage	Concrete

### سناریوی بهره‌برداری

به منظور ارزیابی میزان بهبود فرایند بهره‌برداری با به‌کارگیری سامانه کنترل خودکار، شبیه‌سازی هیدرولیک جریان انجام گرفت. این مهم اغلب با به‌کارگیری مدل‌های هیدرودینامیکی قابل انجام است، که قادر باشد با

بازه به تراز هدف، با تنظیم سطح آب بالادست و نیز میزان باز شدگی دریاچه‌ها بیان می‌شود. کنترل‌گر MPC با بهره‌گیری از ترکیب دو عامل افق زمانی و مدل ریاضی کانال تحت کنترل (مدل داخلی سامانه) اقدام به پیش‌بینی متغیرهای هیدرولیکی سامانه در آینده می‌نماید. فرمان‌های کنترل در هر گام زمانی براساس وضعیت هیدرولیکی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری‌های لحظه‌ای در کانال مشخص می‌شود (Overloop, 2006). سیمای کلی مدل کنترل‌گر MPC در یک سامانه آبی در شکل (۴) مشاهده می‌شود. در این پژوهش، از مدل فضای حالت خطی به‌دست‌آمده از رابطه سنت و نانت گسسته شده جهت تعریف مدل داخلی MPC استفاده شده است (Overloop et al., 2005).

در کنترل سامانه آبی به روش MPC از مدل فضای حالت که امکان فشرده‌سازی رابطه چند متغیره مدل‌های خطی را مهیا می‌کنند، جهت بیان مدل داخلی استفاده می‌شود. مدل فضای حالت در سامانه کانال‌ها را می‌توان در حالت کلی به فرم زوج رابطه (۲) بیان نمود (Overloop, 2006).

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A(k)x(k) + B_u u(k) + B_d d(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (2)$$

داده‌ها با کنترل‌گر را فراهم کند. Schuurmans (1997) برای طراحی الگوریتم‌های کنترل، هر بازه از کانال آبیاری را مطابق شکل (۳) به دو بخش، تقسیم کرد، و مدلی تقریبی آن را ارائه نمود. در این روش، 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 رابطه حاکم بر مدل ID را ارائه می‌دهد.

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

### سامانه کنترل خودکار متمرکز پیش‌بین

سامانه کنترل خودکار متمرکز پیش‌بین (MPC)، یک سامانه کنترلی است که در طراحی آن علاوه بر روش کنترل پس‌خور و پیش‌خور، یک روش بهینه‌سازی برای محاسبه متغیر خروجی کنترل‌گر (رقوم سطح آب) استفاده می‌شود. وظیفه کنترل‌گر رساندن سطح آب پایین‌دست

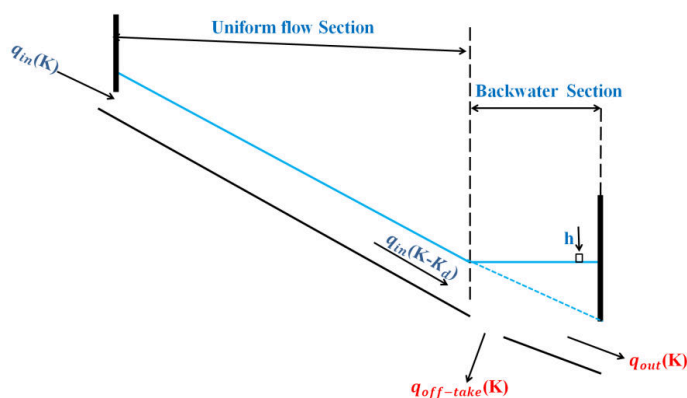


Figure 3. Schematization of a modeled canal reach by Integrator Delay model

Molden and Gate (1990)، طبقه‌بندی شاخص کفایت به صورت جدول QR دبی مورد نیاز است. براساس توصیه (۲) است.

**Table 2. Water supply adequacy index classification**

Indicator	Performance Classes		
	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 عبارتند از حداکثر خطای مطلق (MAE) و خطای مطلق تجمعی (IAE) می‌باشد (Clemmens et al., 1998; Molden & Gates, 1990).

$$MAE = \frac{\max(|y_t - y_{target}|)}{y_{target}} \quad (6)$$

$$IAE = \frac{\sum_{t=0}^T (|y_t - y_{target}|) \Delta t}{y_{target}} \quad (7)$$

که در آن،  $y_t$  تراز سطح آب مشاهده شده (محاسبه شده با مدل شبیه‌سازی جریان) در زمان  $t$  و  $y_{target}$  تراز سطح آب هدف،  $\Delta t$  فاصله بین گام‌های زمانی اعمال تنظیمات و  $T$  دوره اجرای آزمون است.

تابع هدف مورد استفاده برای سامانه کانال به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود (Overloop, 2006).

$$\min J = X^T \cdot Q \cdot X + U^T \cdot R \cdot U \quad (3)$$

که در آن  $J$  تابع هدف بوده و می‌باید حداقل شود،  $X$  متغیرهای حالت،  $U$  اعمال کنترلی،  $Q$  ماتریس وزن برای متغیرهای حالت و  $R$  ماتریس وزن برای اعمال کنترلی می‌باشند. با تعریف  $h_{ref}$  به عنوان مقدار هدف و تعریف خطا به شکل رابطه (۳) و جایگذاری آن در رابطه (۲) می‌توان رابطه میزان خطا در هر بازه کانال را بر اساس جریان ورودی و جریان‌های خروجی محاسبه نمود (Overloop et al., 2008).

$$e(k) = h(k) - h_{ref} \quad (4)$$

### شاخص‌های ارزیابی عملکرد شاخص کفایت تحویل آب

براساس تعریف Molden & Gate (1990)، رابطه شاخص کفایت تحویل آب عبارت است از (رابطه ۵):

$$PA = \frac{1}{T} \sum_T \left( \frac{1}{R} \sum_R \left( \frac{Q_D}{Q_R} \right) \right) \quad (5)$$

که در آن،  $PA$  شاخص کفایت برای کل سامانه،  $T$  فواصل زمانی در نظر گرفته شده برای ارزیابی عملکرد،  $R$  تعداد کل آبیگرهای اندازه‌گیری شده،  $Q_D$  دبی تحویلی،

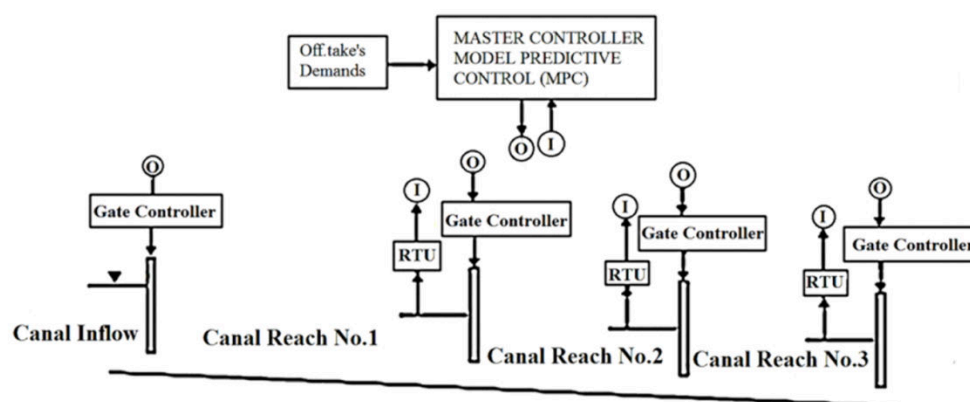


Figure 4. Schematic of the control system (MPC)



## مدل‌سازی آبخوان

از مهم‌ترین معیارهای انتخاب مدل، کارایی مدل در شبیه‌سازی شرایط طبیعی با در نظر گرفتن ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان، و همچنین عمومیت کاربرد و اعتماد به مدل برای شرایط مختلف، کاربری ساده و قابلیت نمایش نتایج است. کد MODFLOW یکی از قابل اطمینان‌ترین و پرکاربردترین کدهای شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی است که جریان‌های زیرزمینی را با استفاده از روش‌های تفاضل محدود شبیه‌سازی می‌کند (Harbaugh *et al.*, 2000). چهار نرم‌افزار معتبر حاوی کد MODFLOW و کدهای متصل به آن PMWIN، Visual MODFLOW، Groundwater Vistas و GMS می‌باشند که با استفاده از روش تفاضل محدود به مدل‌سازی جریان و لایه‌های آبدار زیرزمینی می‌پردازند. در این میان، مدل GMS در مقایسه با مدل‌های دیگر از کارایی بیشتری برخوردار بوده، و قابلیت اشتراک داده‌ها با نرم‌افزار پرکاربرد GIS را نیز دارد. در این تحقیق، برای شبیه‌سازی اثر سناریوی کاهش برداشت آب، از مدل MODFLOW با استفاده از نرم‌افزار GMS استفاده شد. شرایط مرزی اولیه واردشده به مدل MODFLOW در سه گروه Areal Property، Source/Sink و Observation Points طبقه‌بندی شد. ایجاد لایه‌های مربوط به مرز آبخوان، چاه‌های بهره‌برداری و رودخانه در قالب گروه Source/Sink وارد مدل MODFLOW گردید. همچنین خواص لایه‌های آبخوان مانند ضریب هیدرولیکی افقی، تغذیه سطحی (بارندگی مؤثر، آب برگشتی از سامانه توزیع آب سطحی کشاورزی، رواناب، آب برگشتی از چاه‌های بهره‌برداری کشاورزی) و تغذیه ناشی از جریان ورودی آب زیرزمینی که به‌صورت جبهه‌های General Head (GHB) در نظر گرفته شد و تحت گروه Areal Property وارد مدل MODFLOW گردید. در این پژوهش، سطوح قرائت شده آب زیرزمینی در ۵۹ چاه مشاهده‌ای تحت عنوان گروه Observation Points

وارد مدل MODFLOW شد. همچنین شبکه‌بندی آبخوان به‌صورت شبکه ۲۵۰×۲۵۰ متر وارد مدل شد. مطابق شکل (۵)، پارامترها تغذیه و تخلیه که با تقسیم‌بندی آبخوان از نظر کاربری اراضی و شبکه جریان برآورد گردید، در مدل مفهومی وارد شد. با مراجعه به شکل (۵)، میزان نفوذ از بارندگی، نفوذ ناشی از جریان‌های برگشتی کشاورزی، شرب و صنعت، نفوذ از رواناب سطحی، تغذیه ناشی از جریان ورودی آب زیرزمینی که به‌صورت جبهه‌های General Head (GHB) در نظر گرفته شد، به‌عنوان پارامترهای تغذیه مدل‌سازی اعمال شد. همچنین برداشت از چاه‌های بهره‌برداری، تبخیر و تعرق در خروجی آبخوان (سطح آب زیرزمینی کمتر از پنج متر است)، جبهه‌های خروجی با بار ثابت (GHB)، به‌عنوان پارامترهای تخلیه، وارد مدل شد.

پس از ورود کلیه پارامترهای بیان آب زیرزمینی به مدل مفهومی، شبیه‌سازی در دو حالت پایدار و ناپایدار انجام گرفت. آبخوان در یک دوره سه ساله (۱۳۹۴-۱۳۹۷) با دوره تنش ماهانه مدل‌سازی شد. دوره آماری مدل‌سازی شامل ذی‌سال برای واسنجی و یک سال برای صحت‌سنجی مدل تا سال آبی ۱۳۹۷ مورد استفاده قرار گرفت. گام زمانی شبیه‌سازی به‌صورت ماهانه و مهرماه ۱۳۹۴ با توجه به کم‌ترین تغییرات تراز آب، کم‌ترین حساسیت آبخوان به منابع تغذیه و تخلیه و داده‌های موجود برای شبیه‌سازی حالت پایدار مدل انتخاب شد. مدل پایدار در واقع بیانگر اولین گام زمانی مدل‌سازی است، که براساس معادلات حرکت آب زیرزمینی می‌باید در آن پارامتر هدایت هیدرولیکی واسنجی شود. شبیه‌سازی در حالت ناپایدار با تعریف ۳۶ گام زمانی ماهانه تا شهریورماه ۱۳۹۷ 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 ناپایدار پارامتر آبدهی ویژه آبخوان جهت واسنجی انتخاب شد.

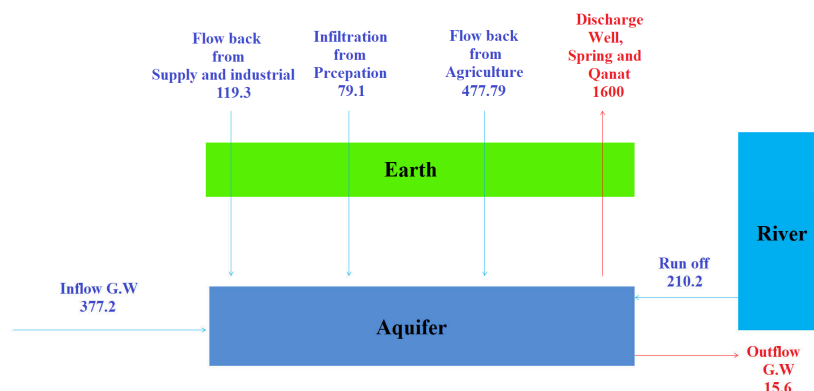


Figure 5. Abstract of water balance in Qazvin aquifer

مقدار شاخص‌های ارزیابی محاسبه شده خطای مطلق و خطای مطلق تجمعی عملکرد در ۱۰ بازه کانال اصلی به ترتیب برابر ۱۴/۳۲ و ۹/۳۴ درصد به دست آمده است. هم‌چنین نتایج حاصل شده حاکی از آن است که میانگین شاخص کفایت تحویل آب از حدود ۱۰۰ درصد در بازه اول به ۷۲ درصد در بازه آخر رسیده است، که با احتساب ۳۰ درصد تلفات انتقال و توزیع این مقادیر کاهش می‌یابند. بنابر تقسیم‌بندی ارائه شده شاخص کفایت توسط Molden & Gate (1990)، کفایت تحویل آب برای بازه‌های ۱ و ۲ مطلوب بوده در حالی که بازه‌های ۳ تا ۱۰ با وجود این که مقدار آب تأمین شده در سراب کانال مطابق با کل نیازهای اعلام شده در روز شبیه‌سازی بوده، از نقطه نظر کفایت تحویل آب عملکرد مناسبی نداشته است. بنابراین تأمین آب کافی در محل مزارع با استفاده از آب زیرزمینی، به عنوان منبع مکمل در کنار منبع آب سطحی، قابل توجیه می‌باشد. در نتیجه تمام چاه‌های موجود در این نواحی به صورت صددرصد بهره‌برداری می‌شوند. هم‌چنین با توجه به نتایج جدول (۳) می‌توان بیان کرد که شیوه بهره‌برداری معمول (وضع موجود)، عملکرد مناسبی در تحویل کافی آب به لترال‌ها نداشته و بهره‌برداری از چاه در مناطق تحت پوشش این لترال‌ها الزامی می‌باشد (شکل ۶).

به منظور ارزیابی میزان بهبود فرایند بهره‌برداری با به کارگیری سامانه‌های کنترل خودکار، لازم است شبیه‌سازی هیدرولیک جریان انجام گیرد. این مهم اغلب با به کارگیری مدل‌های هیدرودینامیکی قابل انجام است که قادر باشند با کنترل‌گرهای طراحی شده لینک شده و فرامین کنترلی را به صورت آنالین دریافت نمایند. با توجه به تعداد محدود این شبیه‌سازها و هم‌چنین هزینه بالای خریداری این نرم‌افزارهای تجاری، در این پژوهش مدل ریاضی هیدرولیک جریان در کانال قزوین در نرم‌افزار MATLAB توسعه داده شده تا امکان تبادل اطلاعات با کنترل‌گرها به راحتی امکان‌پذیر باشد.

## نتایج و بحث

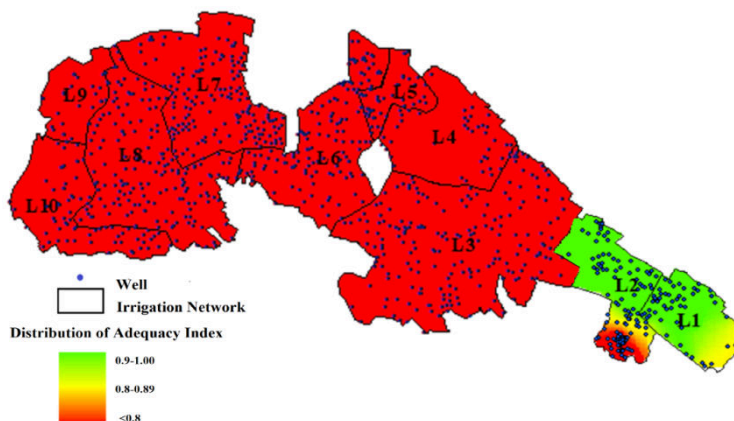
### وضعیت بهره‌برداری کانال اصلی شبکه آبیاری

شبیه‌سازی بهره‌برداری کانال اصلی به طور جداگانه برای هر کدام از دو شیوه بهره‌برداری (بهره‌برداری معمول و بهره‌برداری سامانه کنترل خودکار پیش‌بین) انجام شد و میزان مطلوبیت بهره‌برداری کانال اصلی براساس شاخص‌های ارزیابی عملکرد مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۳) می‌توان بیان کرد در شیوه بهره‌برداری معمول، که وظیفه کنترل و تنظیم سطح آب را سازه‌های هیدرومکانیکال آمیل به عهده دارند، حداکثر

ارتقای مدیریت بهره‌برداری تلفیقی آب کشاورزی در شبکه آبیاری با هدف تعادل‌بخشی آبخوان (مورد مطالعاتی: شبکه آبیاری قزوین)

**Table 3. The calculated operational performance indicators for normal operation scenario**

Operation method	Canal Reaches	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Amil Regulator	MAE	4.55	6.07	6.23	6.79	8.24	9.6	11.09	11.88	12.97	14.23
	IAE	3.24	3.27	3.24	3.24	3.73	4.1	4.11	4.78	7.34	9.34
	Adequacy	100	95	92	90	85	82	80	77	72	72



**Figure 6. Operation status of the normal operation scenario (Amil Regulator)**

#### 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 پایدار و ناپایدار مشخص شد. براساس این دو عامل، مدل واسنجی شد. در انجام واسنجی برای دو پارامتر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه از لوگ‌های حفاری موجود در منطقه، نتایج آزمایش‌های پمپاژ و برآورد انتقال و مطالعات پیشین نیز جهت تدقیق نتایج استفاده شد. شکل (۸) مقادیر نهایی هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه را نمایش می‌دهد.

واسنجی مدل پایدار 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 مجاز شبیه‌سازی در طول دوره مدل‌سازی اختلاف کم‌تر از ۱۰۰ سانتی‌متر

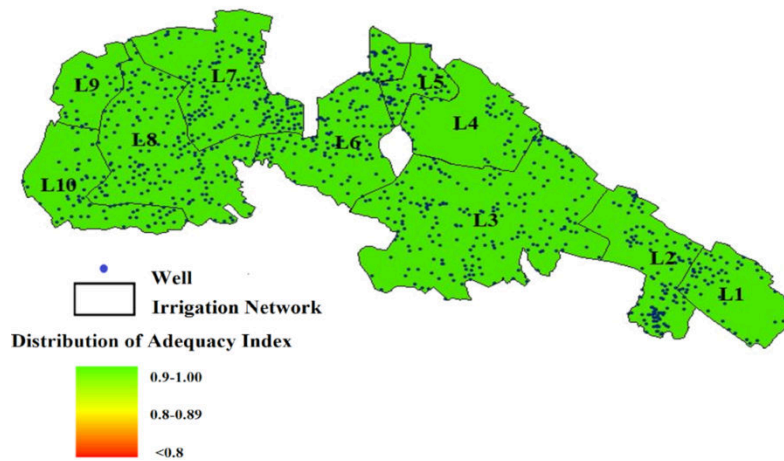
با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول (۴) می‌توان بیان کرد که در شیوه بهره‌برداری با به‌کارگیری سامانه کنترل خودکار پیش‌بین، میانگین شاخص‌های ارزیابی عملکرد محاسبه‌شده خطای مطلق و خطای مطلق تجمعی در کانال اصلی به‌ترتیب ۹/۶ و ۵/۶ درصد است. بنابراین با به‌کارگیری سامانه کنترل خودکار پیش‌بین (MPC) در مقایسه با شیوه‌های بهره‌برداری اول، شاهد بهبود کفایت تحویل آب در طول کانال اصلی شده است. با افزایش کفایت تحویل آب با به‌کارگیری سامانه کنترل خودکار پیش‌بین شاهد افزایش میزان عدم برداشت آب از آبخوان خواهیم بود. به‌طوری‌که می‌توان بیان کرد، سامانه کنترل خودکار پیش‌بین به نحو قابل‌قبولی در توزیع آب، تحت سناریوی بهره‌برداری نرمال انجام داده است. به‌گونه‌ای که هر سه شاخص ارزیابی عملکرد در جدول (۴) و هم‌چنین شکل (۷) نمایانگر آن است که کنترل‌گر پیش‌بین در تمام بازه‌ها به نحو قابل‌قبولی در توزیع آب عمل می‌کند.

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 ۴۹ سانتی‌متر است.

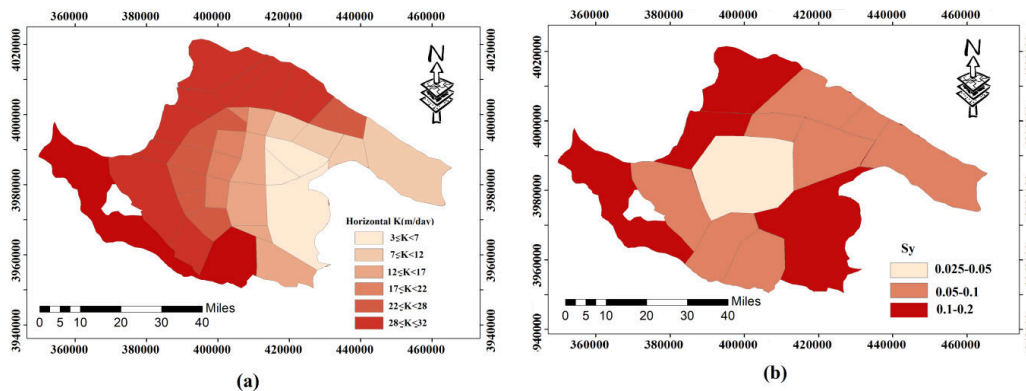
بین تراز سطح آب مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده می‌باشد. جدول (۵) میزان خطای مدل نهایی پایدار و ناپایدار برای آبخوان قزوین را نشان می‌دهد. نتایج تحلیل خطا حاکمی از دقت مناسب مدل برای مدل‌سازی ناپایدار

**Table 4. The calculated operational performance indicators for normal operation scenario**

Operation method	Canal Reaches	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MPC	MAE	0.06	0.08	0.09	0.14	0.1	0.12	0.13	0.09	0.09	0.06
	IAE	0.43	0.44	0.37	0.52	0.89	0.88	0.72	0.56	0.45	0.38
	Adequacy	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100



**Figure 7. Operation status of the normal operation scenario (MPC)**



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

**Table 5. 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

مفهومی آبخوان با توجه به قابلیت توزیعی بودن نتایج آن، می‌تواند اثربخشی روش بهره‌برداری توسعه داده‌شده در این پژوهش را در هر بخش از آبخوان نشان دهد. هدف از مدل‌سازی بررسی گزینه‌های چگونگی به تعادل‌رساندن بیلان آبی، پیش‌بینی وضعیت آبی آبخوان تحت سناریوهای مختلف هیدرولوژیکی، بررسی درستی داده‌های مدل مفهومی، و دنباله‌روی از روش‌های استاندارد مدل‌سازی ریاضی هم‌زمان با واسنجی می‌باشد.

در این پژوهش، به‌منظور تعیین تراز مطلوب آب زیرزمینی و تعیین روند تغییرات افت آب در کل آبخوان، روند افت آب زیرزمینی بررسی شد. پس از صحت‌سنجی مدل کمی آبخوان و تأیید دقت آن، تراز آب در مدل تا سال ۱۳۹۷ و در قالب سناریوی مطرح‌شده انجام گرفت. میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی برای هرکدام از نواحی شبکه آبیاری، تحت شیوه معمول بهره‌برداری (دریچه آمیل) و سامانه کنترل خودکار پیش‌بین (MPC) محاسبه شد، که توزیع تراز آب زیرزمینی با اعمال شیوه‌های بهره‌برداری مطرح‌شده در ادامه ارائه می‌شود. همان‌طورکه پیش‌تر بیان شد، سناریوی بهره‌برداری در شرایط نرمال، بدون تغییر در تقاضای آبیگرها می‌باشد. شکل (۱۰) تراز آب زیرزمینی در روش معمول بهره‌برداری را نمایش می‌دهد، که نمایانگر تداوم افت سطح آبخوان با روند افزایشی نسبت به دوره‌های قبل، تحت شرایط نرمال می‌باشد.

برای واسنجی مدل پایدار در آبخوان دشت قزوین، شبیه‌سازی اولیه و واسنجی مدل برای پارامتر آبدهی ویژه (Sy) آبخوان برای مدت زمان دو سال (۱۳۹۶-۱۳۹۷) انجام و پس از آن برای صحت‌سنجی دوره یک سال بعد (۱۳۹۶-۱۳۹۷) انتخاب شد. مقدار خطای مدل در حالت ناپایدار در جدول (۵) ارائه شده است. در حالت ناپایدار میانگین مجذور خطا بین تراز آب زیرزمینی مشاهده‌شده با شبیه‌سازی‌شده در کلیه پیزومترهای آبخوان طی دو سال کم‌تر از ۸۹ سانتی‌متر می‌باشد، که دقت مناسب مدل را برای صحت‌سنجی و اجرای سناریوی موجود نشان می‌دهد. صحت‌سنجی مدل ناپایدار برای یک سال پایانی (۱۳۹۶-۱۳۹۷) مدل‌سازی استفاده شد، نتایج ارائه‌شده حاکی از دقت مناسب مدل است. شکل (۹) صحت‌سنجی نتایج را برای سال پایانی مدل‌سازی نشان می‌دهد.

### بررسی تغییرات وضعیت آبخوان پس از اعمال روش‌های بهره‌برداری

استفاده از مدل آب زیرزمینی جهت بررسی رفتار یک سامانه در شرایط فعلی و آینده مورد‌استفاده قرار می‌گیرد. به‌منظور شبیه‌سازی اثر سناریوهای کاهش برداشت آب در این پژوهش از مدل آبخوان (واسنجی و تأییدشده) استفاده شد. وضعیت فعلی اقلیمی و مدیریتی آبخوان در یک دوره سه ساله (۱۳۹۴-۱۳۹۷) مدل‌سازی شد و نتایج به‌صورت توزیعی نمایش داده شد. استفاده از مدل

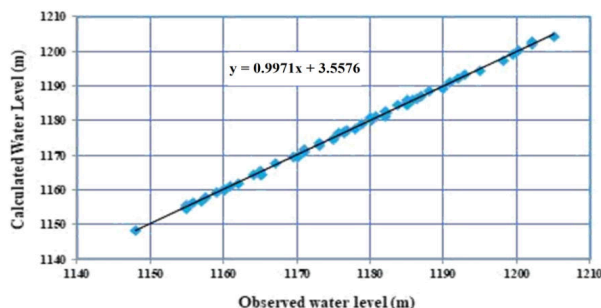


Figure 9. Validation Quantitative model

شکل (۱۱) نتایج کاهش برداشت آب در نواحی کشاورزی و افزایش تراز سطح آب زیرزمینی در مقایسه با روش معمول بهره‌برداری برای روش بهره‌برداری سامانه کنترل خودمکار پیش‌بین (MPC) را در پیزومترها و کل آبخوان نمایش می‌دهد. با توجه به شکل (۱۱) 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 (نواحی شرق آبخوان) 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

۵۳ در سطح کاهش برداشت مذکور میزان تراز سطح آب به میزان ۱/۶ متر نسبت به روش معمول بهره‌برداری افزایش یافت. همچنین برای چاه مشاهده‌ای ۴۸ (واقع در جنوب‌شرقی آبخوان)، سطح تراز آب زیرزمینی به میزان ۱/۰۶ متر نسبت به شیوه بهره‌برداری معمول افزایش یافت. نتایج برای چاه مشاهده‌ای ۱۴ که در محدوده شبکه آبیاری قرار دارد، نشان داد که تراز آب به میزان دو متر نسبت به روش معمول بهره‌برداری بهبود یافته است. در نتیجه با توجه به مدل‌سازی و ارزیابی نتایج می‌توان بیان کرد، با بهره‌گیری از سامانه کنترل خودکار پیش‌بین (MPC)، ۱۰۰ درصد در میزان برداشت آب از آبخوان در محدوده شبکه آبیاری، صرفه‌جویی خواهد شد.

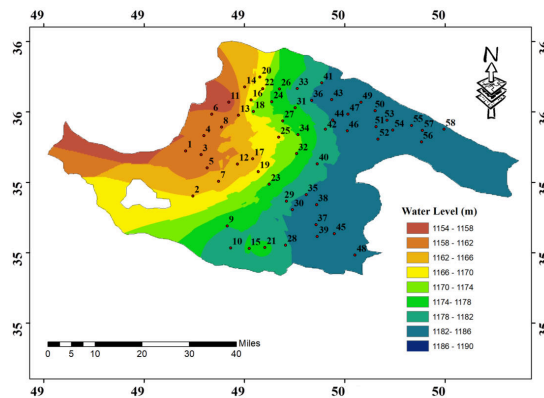


Figure 10. Groundwater Level Distribution in Amil Regulator

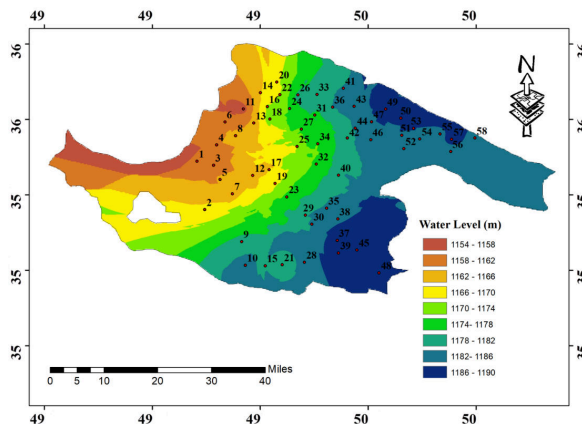


Figure 11. Groundwater Level Distribution in MPC

## نتیجه‌گیری

تنش آبی در منابع آب زیرزمینی به دلیل مصرف گسترده در بخش کشاورزی و افزایش جمعیت و توسعه شهرنشینی و صنعتی شدن جوامع پیوسته در حال افزایش است. سطح آب‌های زیرزمینی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک رو به کاهش فزاینده است. تزریق به سفره آب زیرزمینی یکی از روش‌های مدیریت آبخوان است که با استفاده از آن می‌توان رواناب سطحی یا آب اضافی کانال را برای تغذیه و بازیافت ظرفیت آبخوان مورد استفاده قرار داد. هدف از این پژوهش معرفی گزینه خودکارسازی سامانه‌های انتقال و توزیع آب کشاورزی و بررسی میزان اثربخشی راه‌کارهای بهبود و ارتقای سامانه بهره‌برداری بر کاهش برداشت آب از آبخوان بوده است. فرضیه تحقق این هدف آن است که اقداماتی مانند درخواست صدور مجوزهای جدید احداث چاه کشاورزی، احداث غیرقانونی چاه‌ها، کف‌کنی چاه‌های نیمه‌عمیق موجود و پرداخت یارانه دولتی در تأمین برق کشاورزی در محدوده‌های شبکه‌های توزیع آب سطحی به حداقل برسد. برای این منظور مدل ریاضی آبخوان دشت قزوین به کمک نرم‌افزار GMS تهیه شد، تا با شبیه‌سازی آبخوان، تأثیر روش بهره‌برداری موردنظر در این پژوهش را در قالب سناریوی مطرح‌شده به‌عنوان تنش‌های قابل پیش‌بینی به مدل اعمال شود، تا اثربخشی آن در بازیافت ظرفیت آبخوان ارزیابی شود. آزمون مدل‌سازی برای سناریوی بازیافت آب در محدوده کانال اصلی شبکه آبیاری قزوین انجام شد. سناریوی ارائه‌شده در این پژوهش جهت تعادل بخش آبخوان برخلاف سناریوی کاهش برداشت متداول (کاهش برداشت برابر در تمام چاه‌های موجود در آبخوان) کاهش برداشت برای هر محدوده از شبکه آبیاری ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی توزیع آب در کانال اصلی آبیاری نشان داد که کفایت توزیع آب در شرایط نرمال بهره‌برداری در محدوده‌های بالادست، میان‌دست و

پایین‌دست شبکه آبیاری تحت روش معمول بهره‌برداری کاهش می‌یابد. به طوری که شاخص کفایت در ناحیه یک شبکه آبیاری از ۱۰۰ درصد به ۷۲ درصد در بازه انتهایی می‌رسد. نتیجه این توزیع غیرمطمئن در کانال اصلی شبکه آبیاری، برداشت سالانه ۴۰۱ میلیون مترمکعب آب از چاه‌های مجاز حفرشده توسط کشاورزان است. نتایج پژوهش نشان داد که در شرایط نرمال با ثابت نگه‌داشتن میزان تقاضا در آبیگرها، سامانه توسعه داده‌شده "کنترل خودکار متمرکز پیش‌بین" توانایی بالایی در کنترل توزیع آب در طول کانال اصلی شبکه آبیاری را دارد. به طوری که آبیگری در تمام آبیگرهای بالادست تا پایین‌دست کانال نشان‌گر بهبود شرایط بهره‌برداری، در مقایسه با شرایط معمول بهره‌برداری بوده است. نتایج حاصل از سناریوی شبیه‌سازی مطرح‌شده نشان می‌دهد که میزان بهبود شاخص کفایت با ارتقای شیوه بهره‌برداری موجود به کنترل خودکار متمرکز (MPC) در حدود ۳۰ درصد در نواحی انتهایی شبکه آبیاری است. بر این اساس میزان کاهش برداشت از آبخوان دشت قزوین برای شیوه بهره‌برداری کنترل خودکار متمرکز پیش‌بین (MPC) برابر با حدود ۴۰۱/۸۶ میلیون مترمکعب در سال است. جهت بهبود فرایند بهره‌برداری تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی در شبکه‌های آبیاری با شرایط مشابه شبکه قزوین، پیشنهاد می‌شود؛ ۱- الگوی کشت مناسب و ارزیابی اقتصادی روش بهره‌برداری و تأثیر آن بر تعادل‌بخشی آبخوان تعیین شود و ۲- تعادل‌بخشی آبخوان با فرض تکرار شرایط گذشته، برای سال‌های آینده به صورت توزیع زمانی ارزیابی و پیش‌بینی شود.

## پی‌نوشت‌ها

1. Aquifer Storage and Recovery (ASR)
2. Managed Aquifer Recharge (MAE)
3. Model Predictive Control (MPC)
4. Maximum Absolute Error (MAE)
5. Integral of Absolute Magnitude of Error (IAE)

overexploitation. *Agricultural Water Management*, 204, 234-246.

Hosseini Jolfan, M., Hashemy Shahdany, S. M., Javadi, S., Mallakpour, I., & Neshat, A. (2019). Effects of canal automation on reducing groundwater extraction within irrigation districts: Case study of Qazvin irrigation district. *Irrigation and Drainage*, 69(1), 11-24.

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.

Kourakos, G., Dahlke, H. E., & Harter, T. (2019). Increasing groundwater availability and seasonal base flow through agricultural managed aquifer recharge in an irrigated basin. *Water Resources Research*, 55(9), 7464-7492.

Kruawal, K., Sacher, F., Werner, A., Müller, J., & Knepper, T.P. (2005). Chemical water quality in thailand and its impacts on the drinking water production in thailand. *Science of the total environment*, 340(1-3), 57-70.

Litrico, X., & Fromion, V. (2009). *Modeling and control of hydrosystems*. Springer Science & Business Media; 2009 Sep 17.

Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis?. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 4(4), 315-328.

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.

Noori, R., Maghrebi, M., Mirchi, A., Tang, Q., Bhattarai, R., Sadegh, M., ... & Madani, K. (2021). Anthropogenic depletion of Iran's aquifers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(25), 1-25.

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.

Rogers, D. C., & Goussard, J. (1998). Canal control algorithms currently in use. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124(1), 11-15.

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.

Shahverdi, K., & Monem, M. J. (2015). Application of reinforcement learning algorithm for automation of canal structures. *Irrigation and drainage*, 64(1), 77-84.

## تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

## منابع

Alcama, 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.

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), 24-45.

Bagheri, M., Hosseini, S. M., Ataie-Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimian, H., Morovat, F., & Ashrafi, S. (2021). Land subsidence: A global challenge. *Science of The Total Environment*, 778, 146193.

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.

Burt, C. M. (2013). The irrigation sector shift from construction to modernization: What is required for success?. *Irrigation and Drainage*, 62(3), 247-254.

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.

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. *Environmental monitoring and assessment*, 191(6), 371.

Harbaugh, A.W., Banta, E. R., Hill, M.C., & McDonald, M.G. (2000). MODFLOW-2000, 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.

Hashemi, S.M., Firoozfar, A., Sadeghi, S., & Adib-Majd, 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*, 17(66), 137-152.

Hashemy, S.M., Firoozfar, A., Maestre, J.M., Mallakpour, I., Taghvaeian, S., & Karimi, P. (2018). Operational performance improvements in irrigation canals to overcome groundwater



- 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.
- 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.
- 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.
- Gude, V.G. (2017). Desalination and water reuse to address global water scarcity. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 16(4), 591-609.
- Gude, V.G. (2017). Desalination and water reuse to address global water scarcity. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 16(4), 591-609.
- 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.