Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Investigating the effect of agricultural product price forecasting on groundwater level using systems dynamics, in order to simultaneously maintain the welfare of farmers and groundwater resources

Hamed Mazandarani Zadeh[1]✉, Seyedeh Marzieh Hoseini[2]

1. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Science, Imam Khomeini International University ،Qazvin, Iran. Email: mazandaranizadeh@eng.ikiu.ac.ir

2. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Science, Imam Khomeini International University, Qazvin, Email: sm.hosseini74@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: June. 29, 2022

Revised: Dec. 7, 2022

Accepted: Dec. 24, 2022

Published online: Jan. 22, 2023

Keywords:
Scenario,
Decline,
Livelihood,
Efficiency,
Exploitation

ABSTRACT

Taleghan Dam is the main suplier of water required by the agricultural sector of Qazvin plain. Reducing the amount of water allocated to the Qazvin plain irrigation network and uncertainty about the welfare provided by farmers due to the interruption of the time between the production of the crop and its supply to the market, have caused farmers to seek welfare by reducing fallow and draining groundwater resources. In this study, with the aim of preserving groundwater resources and providing livelihood to farmers, the groundwater level in the irrigation network of Qazvin plain is simulated under six scenarios: 1) Continuation of current harvest without increasing cultivated area 2) Increasing cultivated area by reducing fallow 3) Simultaneous optimization of Cultivation pattern and distribution water with price forecasting 4) Simultaneous optimization of water Cultivation pattern and distribution water with price forecasting and reduction of functional vacuum 5) Simultaneous optimization of Cultivation pattern and distribution water with price forecasting and increasing efficiency Irrigation 6) Simultaneous optimization of Cultivation pattern and distribution water with price forecasting, increasing irrigation efficiency and reducing the yield gap using the system dynamics during the years 2002-2037 in Qazvin plain irrigation network. The results showed that the drop in groundwater level under scenario one and two will be on average 1.2 and 2.4 meters per year. Simultaneous optimization of the cultivation pattern and water distribution with price forecasting in scenario three, four and five droped groundwater level to 1.6, 1.4, 1.3 and 1.2 meters annually, while the welfare of farmers is compensated, too.

Cite this article: Mazandarani Zadeh, H., & Hoseini, S. M. (2023). Investigating the effect of agricultural product price forecasting on groundwater level using systems dynamics, in order to simultaneously maintain the welfare of farmers and groundwater resources, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (11), 2565-2582. https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345131.669305

© The Author(s). Publisher: University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345131.669305

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۳، شماره ۱۱ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

ارزیابی اثر پیش‌بینی قیمت محصولات کشاورزی بر کاهش افت تراز آب زیرزمینی با روش پویایی سیستم‌ها

حامد مازندرانی‌زاده[۱]✉، سیده مرضیه حسینی[۲]

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران، ایمیل: mazandaranizadeh@eng.ikiu.ac.ir

۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایرا ، ایمیل: sm.hosseini74@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۴/۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۹/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۳
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۱

واژه‌های کلیدی:
سناریو،
افت،
معیشت،
راندمان،
بهره برداری.

چکیده

سد طالقان تأمین‌کننده اصلی آب مورد نیاز بخش کشاورزی دشت قزوین است. کاهش مقدار آب تخصیص یافته به شبکه آبیاری دشت قزوین از یک سو و عدم اطمینان کشاورزان از قیمت محصولات در هنگام عرضه به بازار که به دلیل وقفه زمانی بین تولید و عرضه محصول به بازار وجود دارد از سوی دیگر سبب شده است که کشاورزان با کاهش آبیش و تخلیه منابع آب زیرزمینی به دنبال تأمین معیشت خود باشند. در این مطالعه با هدف حفظ منابع آب زیرزمینی و تأمین معیشت کشاورزان اقدام به شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی تحت شش سناریو شامل: ۱) تداوم برداشت فعلی بدون افزایش سطح زیر کشت ۲) افزایش سطح زیرکشت از طریق کاهش آبیش ۳) بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت محصولات ۴) بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت و کاهش خلاء عملکردی ۵) بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت و افزایش راندمان آبیاری ۶) بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت، افزایش راندمان آبیاری و کاهش خلاء عملکرد با استفاده از روش پویایی سیستم‌ها طی سال‌های ۱۴۱۶- ۱۳۸۱ در شبکه آبیاری دشت قزوین شده است. تحلیل حساسیت و واسنجی مدل با استفاده از داده‌های مشاهداتی تراز آب زیرزمینی طی سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۸۱ انجام شد. نتایج تحلیل حساسیت مدل حاکی از آن است که تغییرات تراز آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه حساسیت بالایی به ضریب جریان بازگشتی بخش کشاورزی دارد. همچنین نتایج نشان داد متوسط افت سالانه تراز آب زیرزمینی در سناریو یک و دو به ترتیب ۲/۱ و ۲/۴ متر خواهد شد که با بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت در سناریو سه، چهار، پنج و شش ضمن تضمین تأمین رفاه کشاورزان به طور متوسط سالانه به ۱/۶، ۱/۴، ۱/۳ و ۱/۲ متر خواهد رسید.

استناد: مازندرانی‌زاده؛ حامد، حسینی؛ سیده مرضیه، (۱۴۰۱). ارزیابی اثر پیش‌بینی قیمت محصولات کشاورزی بر کاهش افت تراز آب زیرزمینی با روش پویایی سیستم‌ها، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۱۱)، ۲۵۸۲-۲۵۶۵ . https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345131.669305

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345131.669305

مقدمه

رشد سریع جمعیت جهان و توسعه کشاورزی در دهه‌های گذشته و جوابگو نبودن مقدار آب‌های سطحی به نیازهای بشر منجر به افزایش روند پمپاژ آب و در نتیجه کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و تهی شدن سفره‌ها شده است (Mohammadi *et al*., 2018). با توجه به عدم دسترسی کافی به آب‌های سطحی، بخش کشاورزی مقدار زیادی از آب‌های زیرزمینی را مصرف می‌کند. در حال حاضر آب‌های زیرزمینی ۵۵ درصد از تقاضای کل آب در ایران را تأمین می‌کند و بخش کشاورزی بیش از ۹۰ درصد از آب‌های زیرزمینی، در مقایسه با ۸ درصد استفاده خانگی از آب‌های زیرزمینی و ۲ درصد استفاده صنعتی از آب‌های زیرزمینی را مصرف می‌کند (Baniasadi *et al*., 2018). برآورد میزان استخراج آب‌های زیرزمینی سخت است، اما کاهش چشمگیر تراز آب‌های زیرزمینی، تا ۲ متر در سال در برخی از نقاط کشور، نشان‌دهنده وسعت مصرف بخش تجدیدناپذیر آب‌های زیرزمینی است (Baniasadi *et al*., 2018). منابع آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع آب بشمار می‌روند که بهره‌برداری اصولی از آن‌ها می‌تواند در توسعه پایدار فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی یک منطقه، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نقش به سزایی داشته باشد. بهره‌برداری بی‌رویه از این منابع خسارت جبران ناپذیری مانند افت شدید و غیر قابل برگشت سطح آب زیرزمینی، کاهش دبی چاه‌ها را به دنبال دارد (Layani *et al*., 2020). در چنین شرایطی این سوال برای محققین مطرح است آیا می‌توان با اتخاذ راهکارهایی به کاهش افت تراز آب زیرزمینی کمک کرد؟ در این خصوص می‌توان به تغییر الگوی کشت و توزیع آب با در نظر گرفتن رفاه کشاورزان اشاره کرد.

از آنجایی که رفتار پدیده‌هایی همچون تغییرات تراز آب زیرزمینی دارای جنبه‌های مختلفی می‌باشد نیازمند بررسی یکپارچه است. از جمله راهکارها برای این منظور کاربرد پویایی سیستم[1] و مدل‌های علت–معلولی است.

در تفکر سیستمی، منابع آب به عنوان یک سیستم در نظر گرفته می‌شود که از اجزای مختلف تشکیل شده است. با شناسایی و در نظر گرفتن حلقه‌های بازخوردی بین اجزای مختلف، می‌توان دید و بینش کلی از سیستم‌های پیچیده را فراهم کرد و در زمینه برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع آب قدم موثرتری برداشت (Hjorth & Bagheri, 2006; Madani & Marino, 2009; Simonovic, 2012). در سال‌های اخیر، پژوهش‌های زیادی در زمینه بررسی مدیریت منابع آب با استفاده از پویایی سیستم‌ها انجام شده است که در ادامه به بخشی از آن‌ها اشاره می‌شود.

بررسی وضعیت منابع آب دشت ابرکوه با استفاده از مدلی پویا از عوامل موثر بر وضعیت آبخوان و تحلیل روابط علی آن نشان داد مصرف کشاورزی بیشترین تهدید را در دشت دارد. همچنین نتایج شبیه‌سازی سیاست‌های مختلف بر بهبود وضعیت منابع آب با رویکرد پویایی سیستم در نرم‌افزار Vensim نشان داد که سیاست افزایش قیمت آب، طرح بارور کردن ابرها و هم‌چنین کاهش سطح زیر کشت تأثیر مناسبی بر حجم آبخوان دارند (Asadi *et al*., 2022).

Nazari *et al*. (2022) به ارزیابی اثر توسعه سیستم‌های آبیاری، سناریوهای الگوی کشت و کم آبیاری بر بهره‌وری آب در شبکه آبیاری دشت قزوین با روش پویایی سیستم‌ها پرداختند. نتایج نشان داد توسعه آبیاری تحت فشار در سطح شبکه قزوین، موجب افزایش بهره‌وری فیزیکی آب می‌شود و بسته به نوع الگوی کشت و سطح کم آبیاری می‌تواند موجب افزایش و یا کاهش بهره‌وری اقتصادی شود. بیشترین و کمترین حجم آب مورد نیاز سالانه شبکه آبیاری در سناریوهای ترکیبی به ترتیب مربوط به تیمارهای "CPS 3 FI MIDS 15%" و "CPS 8 DI 60% MIDS 45%" به مقدار ۱۱۷۳۸ و ۲۷۶۱ متر مکعب در هکتار بود. بهره‌وری آب اقتصادی در سطح شبکه در سناریوهای الگوی کشت CPS 8 و CPS 4 در مقایسه با بهره‌وری آب اقتصادی الگوی کشت موجود CPS 1 به ترتیب ۵۱ و ۲۵/۲ درصد افزایش داشته است و بهره‌وری آب فیزیکی در سطح شبکه در سناریوهای الگوی کشت CPS 4، CPS 7 و CPS 8 در مقایسه با بهره‌وری آب فیزیکی الگوی کشت موجود به ترتیب ۳۵/۴، ۳۵/۱ و ۲۷/۳ درصد افزایش داشته است.

Hashemi *et al*. (2020) به بررسی نقش محصولات زراعی غیراستراتژیک مختلف بر افت سطح آبخوان دشت قزوین و درآمد کشاورزان با استفاده از مدل سیستم دینامیک و تئوری بازی‌ها پرداختند. نتایج نشان داد آب انتقالی از سد طالقان به دشت قزوین باعث کاهش مقدار افت سطح آبخوان در طول ۱۵ سال به اندازه ۱۰ متر شده است. حساسیت سطح ایستابی و درآمد خالص کشاورزان به تغییرات سطح زیر کشت ۱۷ محصول در دشت قزوین نشان داد درآمد کشاورزان بیشترین حساسیت را به کشت انگور با ردپای بالای اقتصادی دارد و از طرف دیگر سطح ایستابی نیز بیشترین حساسیت را به کشت گندم دارد. همچنین نتایج ارزیابی اثرات حذف برخی محصولات زراعی

1 System dynamics

با نیاز آبی بالا و غیراستراتژیک از الگوی کشت بر درآمد کشاورزان و سطح ایستابی نشان داد سناریو عدم کشت محصولات زراعی غیر استراتژیک به عنوان سناریو تعادلی توسط هر چهار روش حل اختلاف در حالت متقارن انتخاب گردید.

Mahmoodi *et al*. (2020) در مطالعه‌ای به شبیه‌سازی سیستم منابع آب حوضه آبخیز ارازکوسه با استفاده از مدل پویایی سیستم در محیط نرم‌افزار Vensim بر اساس روابط علی و معلولی پرداختند. بر اساس معادله بیلان آب حوضه، میزان آب در دسترس حاصل از منابع آب سطحی و زیرزمینی تخمین زده شد و همچنین نیاز آبی در مصارف مختلف شرب، محیط‌زیست، کشاورزی و صنعت برآورد شد. به این ترتیب بر اساس نیازها و آب در دسترس، مقدار عرضه آب به مصارف مختلف محاسبه و سپس با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی خطی، بهینه‌سازی با دو هدف حداکثرسازی سود اقتصادی حاصل از سطح زیرکشت و حداقل‌سازی آب مصرفی در بخش کشاورزی انجام شد. نتایج نشان داد که ۷۵ درصد تأمین آب مورد نیاز در مصارف مختلف به ویژه بخش کشاورزی در حوضه آبخیز از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. در حالی‌که آب در دسترس حاصل از منابع آب سطحی تقریباً دو برابر بیشتر از آب زیرزمینی است. این موضوع نشان داد که علی‌رغم اینکه بخشی از آب تغذیه شده ممکن است زمانی نقش رواناب داشته باشد اما حجم زیادی از آب در دسترس حوضه به شکل رواناب از دسترس خارج می‌شود. لذا تأمین آب مورد نیاز مصارف مختلف به استفاده بیش از حد از ذخایر آب زیرزمینی منجر می‌شود.

بررسی تأثیر الگوی کشت بر سطح آب زیرزمینی در دشت مهران با استفاده از روش پویایی سیستم تحت سناریوهای مختلف تغییر قیمت انرژی نشان داد تغییر الگوی کشت از یونجه به کلزا همراه با افزایش ۱۰۰ درصدی تعرفه انرژی، دارای بیشترین تأثیر مثبت بر آبخوان و تغییر سطح زیرکشت از یونجه به ذرت همراه با افزایش تعرفه انرژی به میزان ۵۰ درصد، تا حدودی تعادل در سطح آب زیرزمینی دشت را به دنبال دارد (Darvishi *et al*., 2019).

Shirzadi *et al*. (2018) در مطالعه‌ای در حوضه آبریز نیشابور، با استفاده از مدل ترکیبی برنامه‌ریزی ریاضی مثبت[1] (PMP) و روش پویایی سیستم به بررسی اثر تغییر قیمت آب بر الگوی کشت، سود، مصرف آب و تغییر تراز سطح آب زیرزمینی پرداختند. نتایج نشان داد افزایش قیمت آب، تأثیر بسزایی بر تغییر الگوی کشت، کاهش سود، کاهش مصرف آب و در نتیجه بر بهبود سطح تراز آب زیرزمینی دارد. با افزایش قیمت آب آبیاری به ۴۰ درصد، سطح زیرکشت و مصرف آب در تمامی زیرحوضه‌ها برای همه محصولات کاهش داشت. اثر تغیر قیمت بر تراز آب زیرزمینی در یک دوره ۱۲ ماهه نیز نشان داد که افزایش قیمت تا ۲۰ درصد در طول یک سال، منجر به ۰/۳۳ متر بهبود در سطح آب زیرزمینی خواهد شد.

بررسی Huang *et al*. (2022) در حوضه‌ی رودخانه‌ی چوشوی تایوان در خصوص فرونشست زمین با استفاده از پویایی سیستم نشان داد که مسدود کردن چاه‌های غیرمجاز تأثیر متوسطی بر فرونشست زمین دارد، در حالی که اثرات نامطلوب قابل توجهی بر جامعه کشاورزان دارد. همچنین نتایج نشان داد تغییر الگوی کشت به محصولات با نیاز آبی کم، باعث کاهش فرونشست زمین و حفظ درآمد کشاورزان می‌شود.

Barati *et al*. (2019) از پویایی سیستم برای توسعه یک مدل حکمرانی هوشمند آب زیرزمینی[2] (SGG) استفاده کردند تا به سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران کمک کنند اثرات کوتاه مدت و بلندمدت اقدامات، برنامه‌ها و سیاست‌های خود را درک کنند. به این منظور شاخص SGG در مدل پویا شامل چهار شاخص عدالت‌پذیری، کارایی، پایداری و دموکراسی معرفی و در ایران اعمال کردند. نتایج نشان داد تعادل آب زیرزمینی در ایران بحرانی است و روند فعلی حکمرانی آب‌های زیرزمینی در کشور غیرهوشمند است. همچنین نتایج نشان داد بهترین راهکار برای مدیریت این وضعیت، مدیریت هوشمند منابع آب زیرزمینی شامل افزایش نرخ نفوذ و کاهش میزان برداشت است.

Benabderrazik *et al*.(2021) به بررسی اندرکنش بین ابعاد کشاورزی، زیست محیطی و اجتماعی– اقتصادی سیستم‌های تولید گوجه‌فرنگی در مراکش با استفاده از پویایی سیستم و نظرسنجی انجام شده بین ۲۴۴ تولید کننده پرداختند. نتایج نشان داد که بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی بر تولید محصول و رفاه کشاورز تأثیر منفی می‌گذارد. همچنین در آینده نزدیک، کمبود آب پیامدهای طولانی مانند کاهش بهره‌وری برای تولیدکنندگان خواهد داشت.

بررسی عرضه و تقاضای آب در بخشی از استان ژین جیانگ چین با چهار رودخانه اصلی با استفاده از پویایی سیستم نشان داد ظرفیت منابع آب منطقه، امکان تأمین نیازهای توسعه اقتصادی و اجتماعی را در سال‌های اخیر ندارد و باید برای تأمین منابع آب پایدار و توسعه اقتصادی، سیاست‌های حفظ منابع آب افزایش یابد (Liu & Liu, 2019).

---

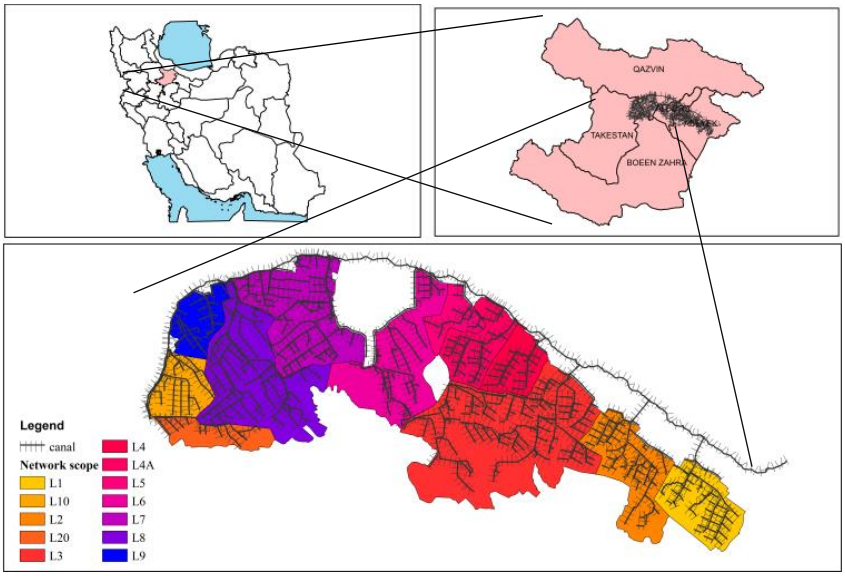
1 Positive Mathematical Programming (PMP)
2 Smart Groundwater Governance

یکی از جنبه‌های بسیار مهم افت سطح آب زیرزمینی، تأثیرگذاری غیر قابل اجتناب آن بر وضعیت اقتصاد کشاورزی است. دشت قزوین بزرگ‌ترین دشت حوضه آبریز دریاچه نمک و یکی از دشت‌های مستعد کشور برای تولید محصولات کشاورزی است که همانند بسیاری از دشت‌های بزرگ کشور با کمبود شدید منابع آب مواجه است. در سال‌های اخیر، افزایش نیاز آب شرب شهر تهران و همچنین کاهش ورودی‌های سد طالقان باعث کاهش آب تخصیص داده شده به شبکه آبیاری دشت قزوین از ۲۵۰ به ۱۵۰–۱۲۰ میلیون مترمکعب در سال شده است (Hosseini & Mazandarani zadeh, 2021). بررسی‌ها نشان می‌دهد که سطح زیر کشت اراضی تحت پوشش شبکه و ترکیب زراعی آن در طی ده سال گذشته علی‌رغم کاهش مقدار آب تخصیص یافته تقریباً ثابت بوده است. این عدم تغییر الگو و سطح زیر کشت علی‌رغم کاهش مقدار آب تخصیص یافته و افت تراز آب زیرزمینی، نشان می‌دهد که کشاورزان به‌منظور تأمین معیشت خود اقدام به برداشت غیر مجاز آب از سفره‌های آب زیرزمینی نموده‌اند (Hosseini & Mazandarani zadeh, 2021). همچنین به دلیل وقفه زمانی که بین تولید و عرضه محصولات کشاورزی به بازار وجود دارد قیمت محصولات پس از عرضه به بازار به‌گونه‌ای تغییر می‌کند که بازار از محصولات تخلیه شود که این مسئله سبب عدم تأمین رفاه کشاورزان (Salami and Rezaei, 2010) و پیامدهای ناشی از تخلیه آب زیرزمینی نظیر تخریب کیفی آبخوان و پیشروی آب شور می‌شود. بنابراین برای حفظ منابع آب زیرزمینی در شبکه آبیاری دشت قزوین و تأمین رفاه کشاورزان لازم است برنامه‌ریزی مناسبی صورت بگیرد. بررسی مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد تاکنون بررسی اثر پیش‌بینی قیمت محصولات کشاورزی بر تراز آب زیرزمینی که موجب تأمین رفاه کشاورزان و حفظ منابع آب زیرزمینی می‌شود مورد توجه محققان قرار نگرفته است. از این رو در این پژوهش به شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در شبکه آبیاری دشت قزوین طی سال‌های ۱۴۱۶– ۱۳۸۱ با هدف تأمین رفاه کشاورزان و حفظ منابع آب زیرزمینی با استفاده از پویایی سیستم تحت شش سناریو ۱) تداوم برداشت فعلی بدون افزایش سطح زیر کشت ۲) افزایش سطح زیرکشت از طریق کاهش آیش ۳) بهینه سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت ۴) بهینه سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت و کاهش خلاء عملکردی ۵) بهینه سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت و افزایش راندمان آبیاری ۶) بهینه سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت، افزایش راندمان آبیاری و کاهش خلاء عملکرد پرداخته شده است.

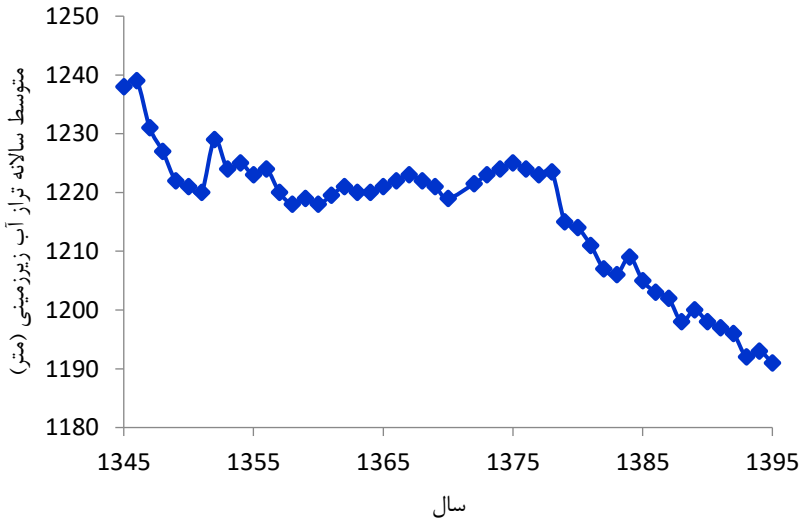
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده شبکه آبیاری دشت قزوین در استان قزوین در فاصله ۱۵۰ کیلومتری غرب شهر تهران بین ۲۰ ˚۳۶ عرض شمالی و ۴۰ ˚۴۹ طول شرقی و ۰۰ ˚۳۶ عرض شمالی و ۳۵ ˚۵۰ طول شرقی واقع شده است. متوسط بارش بلند مدت سالانه در این منطقه ۳۷۶/۲ میلی‌متر و میزان تبخیر آن ۱۲۸ میلی‌متر است (Azizabadi Farahani & Mirzaei, 2020). الگوی رایج این شبکه شامل کشت محصولاتی همچون گندم، ذرت‌علوفه‌ای، کلزا، گوجه‌فرنگی، یونجه، جو، چغندرقند، نخود، لوبیا، سیب‌زمینی، ذرت‌دانه‌ای و عدس است (Organization of Agricultural- Jihad Qazvin). در حال حاضر شبکه آبیاری دشت قزوین دارای ۶۰۰۰۰ هکتار سطح زیرکشت است که از طریق کانال‌های متعددی از سد طالقان تغذیه می‌شود (Qazvin Regional Water Company). محدوده شبکه آبیاری دشت قزوین در شکل (۱) نشان داده شده است. اما مقدار آبی که از این سد برای شبکه تأمین می‌شود کافی نبوده و کشاورزان همواره با مشکل کم آبی مواجه هستند (Azizabadi Farahani & Mirzaei, 2020؛ Hosseini & Mazandarani zadeh, 2021؛ Hosseini *et al*., 2021). کشاورزان برای جبران کمبود آب اقدام به برداشت غیر مجاز از سفره‌های آب زیرزمینی می‌کنند و به طور متوسط سالانه حدود ۳۱۴ میلیون مترمکعب مازاد بر ظرفیت از آب‌های زیرزمینی این دشت برداشت می‌شود که بر اساس متوسط بلند مدت باعث افت سالانه ۱/۵ متر سطح ایستابی شده است (Hosseini Jolfan & Yasi, 2021). شکل ۲ تغییرات تراز سطح ایستابی آبخوان قزوین که بر اساس میانگین‌گیری سالانه ۱۸۲ چاه مشاهده‌ای از سال ۱۳۴۵ تا ۱۳۹۵ بدست آمده است، نمایش می‌دهد که به طور متوسط حدود ۴۵ متر از سال ۱۳۴۵ کاهش یافته است (Janbaz fotamy *et al*., 2020).



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه



شکل ۲. تغییرات سطح ایستابی آبخوان دشت قزوین از سال ۱۳۴۵ تا ۱۳۹۵ با استفاده از داده‌های ۱۸۲چاه مشاهده‌ای (Janbaz Fotamy *et al.*, 2020)

مدل پویایی سیستم

مدیریت منابع آب نیازمند تصمیم‌گیری آینده‌نگر با رویکردی جامع است. علم پویایی سیستم، یک ابزار مدیریتی بر اساس این نگرش می‌باشد. این علم قادر است شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده منابع آب را برای پشتیبانی تصمیم‌گیری انجام دهد. هدف عمده این روش شبیه‌سازی، تسریع و تسهیل یادگیری رفتار سیستم‌ها در شرایط فعلی و آینده است (Alami *et al.*, 2014). پویایی سیستم اولین بار توسط فارستر جهت درک بهتر مسائل راهبردی در سیستم‌های پویای پیچیده معرفی شد. این رویکرد یک روش مدل‌سازی و شبیه‌سازی بازخورد شی‌گرا است که به عنوان روشی که بر اساس تفکر سیستماتیک بنا نهاده شده، برای مطالعه و مدل‌سازی ارتباطات بین اجزاء سیستم‌های پیچیده به کار می‌رود و هدف آن در اختیار گذاشتن روشی برای آشکار شدن مدل ذهنی تصمیم‌گیران و سیاست‌گذاران در یک مسئله است. بازخوردها، متغیر حالت، جریان، تاخیرهای زمانی و رفتار غیرخطی، ضروری‌ترین اجزاء مدل‌سازی پویایی سیستم هستند که سیستم را برای نحوه پاسخگویی به تغییرات مهیا می‌کنند (Forrester, 1997).

در این مطالعه برای بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی در شبکه آبیاری دشت قزوین تحت اثر سناریوهای مختلف از مدل سازی پویایی سیستم استفاده شده است که دارای دو زیرسیستم آب زیرزمینی و کشاورزی–اقتصادی است. هر زیرسیستم دارای متغیرهای کلیدی و روابط متقابل بین آن‌ها است که درک صحیح رفتار سیستم را فراهم می‌آورد.

زیر سیستم آب زیرزمینی

شکل ۳ زیرسیستم آب زیرزمینی را نمایش می‌دهد. در این زیر سیستم مقدار آب ذخیره شده در آبخوان، به عنوان متغیر حالت در نظر گرفته شده است که با میزان جریان ورودی و خروجی به آبخوان مقدار آن تغییر می‌کند و مقدار آن با استفاده از معادله بیلان (رابطه ۱) قابل محاسبه است.

$$\Delta S_{G,t} = Q_{GI,t} - Q_{GO,T}$$ رابطه ۱)

با استفاده از معادله برگشتی (رابطه ۲)، مقدار کل آب ذخیره شده در آبخوان در هر سال قابل محاسبه است.

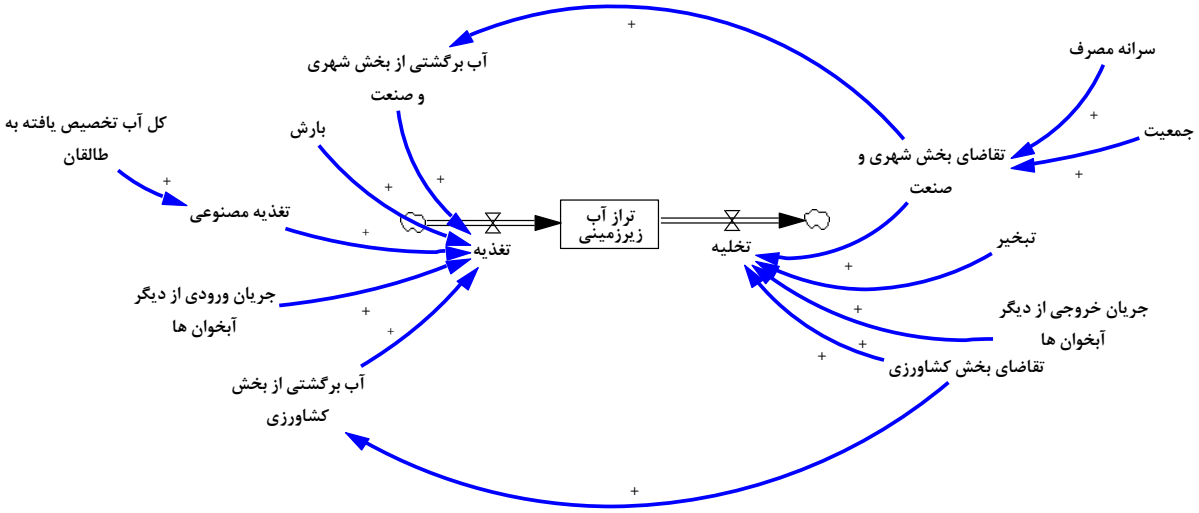
$$S_{G,t} = \Delta S_{G,t} + S_{G,t-1}$$ رابطه ۲)

در روابط ۱ و ۲، $\Delta S_{G,t}$ مقدار ذخیره یا تخلیه آبخوان در سال t، $Q_{GI,t}$ و $Q_{GO,t}$ به ترتیب مقدار جریان ورودی و خروجی به آبخوان در سال t و $S_{G,t}$ مقدار آب موجود در آبخوان در سال t است. مقدار جریان ورودی و خروجی از آبخوان به ترتیب با استفاده از روابط ۳ و ۴ قابل محاسبه است.

$$Q_{GI,t} = D_{agri,t} \times RC_{agri} + Re_{TD,t} + Re^{G}_{r,t} + Inflow^{G}_{an} + (D_I + D_{Dr}) \times RC_{I,DR}$$ رابطه ۳)

$$Q_{GO,t} = D_I + D_{DR} + D_{agri} + E_G + Outflow^{G}_{an}$$ رابطه ۴)

در روابط ۳ و ۴، $D_{agri,t}$ نیاز کشاورزی تأمین شده از آب زیرزمینی در سال t و RC_{agri} ضریب آب برگشتی از کشاورزی، $Re_{TD,t}$ و $Re_{r,t}^{G}$ به ترتیب مقدار تغذیه مصنوعی از سد طالقان و مقدار تغذیه آبخوان از بارندگی در سال t، $Inflow^{G}_{an}$ و $Outflow^{G}_{an}$ جریان ورودی از دیگر آبخوان‌ها و خروجی به دیگر آبخوان‌ها، D_I و D_{Dr} به ترتیب نیاز آبی بخش صنعت و شهری و $RC_{I,DR}$ ضریب آب برگشتی از بخش صنعت و شهری و E_G تبخیر از آبخوان است.



شکل ۳. نمودار جریان آب زیرزمینی

در روابط ۳ و ۴ برای محاسبه مقدار جریان ورودی و خروجی از دیگر آبخوان‌ها و جریان بازگشتی از کشاورزی، صنعت و شرب از محاسبات شرکت مشاور آبخوان استفاده شده است، مقدار ضریب جریان بازگشتی از کشاورزی، شرب و صنعت به ترتیب ۰/۲۶، ۰/۶ و ۰/۶ منظور شده است و تبخیر هم متوسط بلند مدت ۱۲۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مقدار تغذیه آبخوان از محل بارندگی و سد طالقان بر اساس روابط ۵ و ۶ محاسبه شده است.

$$Re^{G}_{r,t} = (r_t \times EC) \times I \times A_{aq}$$ رابطه ۵)

$$Re_{TD,t} = 0.1 \times AI_{Ta,t}$$ رابطه ۶)

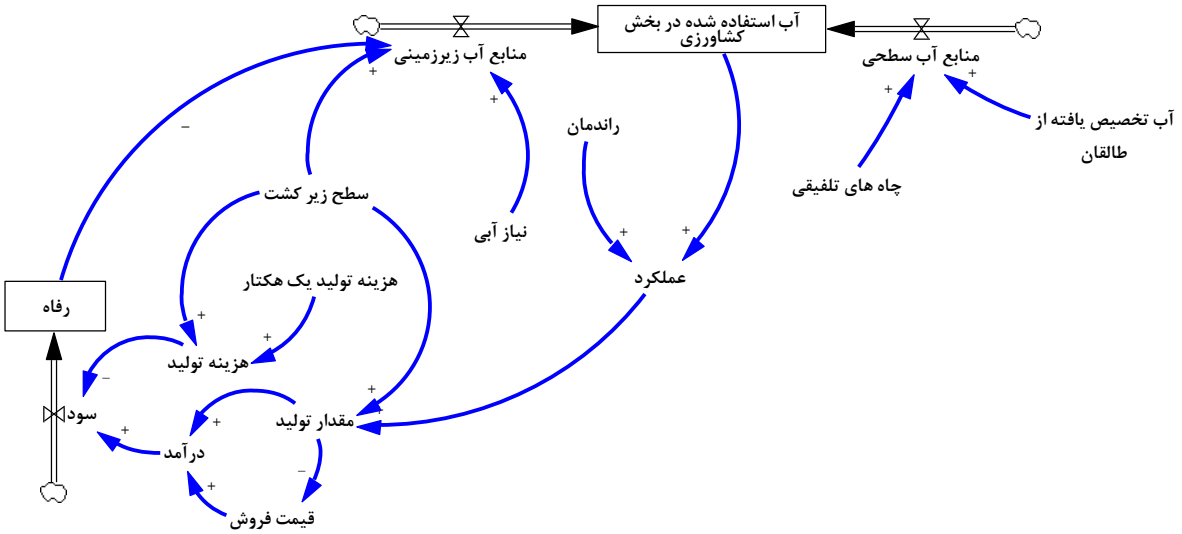
در روابط ۵ و ۶، r_t مقدار بارندگی در دشت قزوین در سال tام، EC ضریب بارندگی موثر برابر ۰/۱۸، I درصد باران نفوذ یافته از بارندگی موثر برابر ۴۴٪، A_{aq} مساحت آبخوان و $AI_{Ta,t}$ مقدار جریان تخصیص یافته از سد طالقان به شبکه آبیاری قزوین است. بنابراین با استفاده از معادله بازگشتی (رابطه ۷) سطح ایستابی در هر سال محاسبه می‌شود (Hashemi *et al.*, 2020).

$$GW_l_t = \frac{S_{G,t}}{A_{aq} \times S} + GW_l_{t-1}$$ رابطه ۷)

در رابطه ۷، GW_l_t هیدروگراف واحد سطح ایستابی در سال t و S ضریب ذخیره آبخوان است.

زیر سیستم کشاورزی- اقتصادی

بخش کشاورزی مصرف‌کننده عمده منابع آب است و نیاز آبی کشاورزی از طریق منابع آب سطحی و زیرزمینی تأمین می‌شود، به‌گونه‌ای که ابتدا از طریق منابع آب سطحی و مازاد نیاز از آب زیرزمینی تأمین می‌شود. مقدار آب به طور مستقیم بر عملکرد محصولات تأثیرگذار است و تغییر عملکرد محصولات کشاورزی بر مقدار تولید، قیمت فروش، هزینه تولید و رفاه کشاورز اثرگذار است. به طور طبیعی در صورت عدم تأمین معیشت کشاورزان به دلیل کمبود منابع آب سطحی، کشاورزان اقدام به افزایش سطح زیر کشت و اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی می‌کنند. نمودار جریان زیر سیستم کشاورزی- اقتصادی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ٤. نمودار جریان کشاورزی- اقتصادی

زیر سیستم کشاورزی تعریف شده در این مطالعه شامل محصولات زراعی کشت شده در شبکه آبیاری دشت قزوین شامل گندم، ذرت‌علوفه‌ای، کلزا، گوجه‌فرنگی، یونجه، جو، چغندرقند، نخود، لوبیا، سیب‌زمینی، ذرت‌دانه‌ای و عدس است. تقاضای بخش کشاورزی در شبکه آبیاری دشت قزوین از رابطه ۸ قابل محاسبه است.

$$AWD = \frac{\sum_{L=1}^{12}\sum_{m=1}^{12}\sum_{P=1}^{p} PET_{(P,m)} \times A_{(P,L)}}{E}$$ رابطه ۸)

در رابطه ۸، AWD حجم تقاضای بخش کشاورزی شبکه آبیاری دشت قزوین بر حسب متر مکعب بر ماه، $PET_{(P,m)}$ میزان تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه P در ماه m بر حسب میلی‌متر بر ماه، $A_{(P,L)}$ سطح زیر کشت گیاه P در بهره‌بردار L بر حسب متر مربع و E راندمان آبیاری است که بر اساس اطلاعات گرفته شده از جهاد کشاورزی ۰/۴۵ است.

مقدار آب مصرف شده در بخش کشاورزی بر اساس رابطه آب_تولید ارائه شده توسط Rao *et al.* (1988) (رابطه ۹) بر عملکرد محصول تأثیرگذار است و مقدار تولید با رابطه ۱۰ برآورد می‌گردد.

$$\frac{Ya}{Ym} = \prod_{i=1}^{n}[1 - Ky_i(1 - \frac{AET_i}{PET_i})]$$ رابطه ۹)

$$Y_z = Y_a \times A$$ رابطه ۱۰)

در روابط ۹و ۱۰، Y_a و Y_m به‌ترتیب عملکرد واقعی و پتانسیل محصول بر حسب تن بر هکتار، AET_i و PET_i به‌ترتیب تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل در مرحله رشد i بر حسب مترمکعب، Ky_i ضریب حساسیت گیاه به کم‌آبی در مرحله رشد i، n کل تعداد مراحل رشد گیاه، Y_z مقدار تولید بر حسب تن و A سطح زیر کشت هر محصول بر حسب هکتار است. عملکرد پتانسیل مطابق جدول ۱ است.

هر گیاه را باید به اندازه‌ای آبیاری نمود (نیاز آبیاری) که تبخیر و تعرق گیاه (نیاز آبی) تأمین شود. این نیاز آبیاری، علاوه بر تبخیر

تعرق از بارش مؤثر نیز اثر می‌پذیرد؛ زیرا بخشی از نیاز آبی (تبخیر تعرق) می‌تواند با بارش تأمین گردد. نیاز آبی گیاه (PET) با استفاده از روابط (۱۱) تا (۱۳) برآورد شد.

رابطه ۱۱) $$dn = ET - P_e$$

رابطه ۱۲) $$ET = dn + P_e$$

رابطه ۱۳) $$PET_i = ET \times A$$

در رابطه ۱۱ و ۱۲، ET تبخیر و تعرق (میلی‌متر بر ماه)، dn عمق خالص آبیاری (میلی‌متر بر ماه) و P_e بارش مؤثر (میلی‌متر بر ماه) است که با استفاده از نرم‌افزار نت‌وات برای محصولات زراعی دشت قزوین به ترتیب مطابق جدول‌های ۲ و ۳ برآورد شده است.

مقدار آب داده شده به هر گیاه (AET) با توجه به حجم آب تخصیص یافته به هر بهره‌بردار، نسبت نیاز آبی گیاهان کشت شده و راندمان آبیاری با استفاده از رابطه ۱۴ برآورد شده است.

رابطه ۱۴) $$AET = demand \times V_{Ig} \times E + P_e \times A$$

در رابطه (۱۴)، demand نسبت نیاز آبی گیاه کشت شده در هر بهره‌بردار بر حسب درصد، V_{Ig} حجم آب تخصیص یافته به هر بهره‌بردار بر حسب مترمکعب بر ماه و E راندمان کل در شبکه آبیاری دشت قزوین است.

رفاه کشاورزان یک متغیر حالت در زیر سیستم اقتصادی است که برای بررسی آن لازم است میزان درآمد کشاورزان با استفاده از رابطه ۱۵ برآورد گردد و سپس با خط فقر محاسبه شده با روش ارائه شده توسط وزارت تعاون، کار و رفاه اجتماعی مقایسه شود.

رابطه ۱۵) $$P_t = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} Yz_{ij} \times (P_{sj} - P_{cj})$$

در رابطه ۱۵، P_t مقدار درآمد کل شبکه، Yz_{ij} مقدار تولید محصول j توسط بهره‌بردار i بر حسب کیلوگرم، P_{sj} قیمت فروش محصول j بر حسب تومان، P_{cj} هزینه تولید محصول j بر حسب تومان بر هکتار است.

جدول ۱- پتانسیل تولید محصولات زراعی شبکه آبیاری دشت قزوین (تن بر هکتار) (Organization of Agricultural- Jihad Qazvin)

محصول	عدس	ذرت‌دانه‌ای	سیب‌زمینی	لوبیا	نخود	چغندرقند	جو	یونجه	گوجه‌فرنگی	کلزا	ذرت‌علوفه‌ای	گندم
پتانسیل تولید	۲	۱۳	۴۵	۵	۳	۱۰۰	۴/۵	۱۵	۱۲۰	۵/۵	۸۰	۷

جدول ۲- عمق خالص آبیاری (میلی‌متر بر ماه) (Organization of Agricultural- Jihad Qazvin)

ماه / نام محصول	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
گندم	۹۲	۱۰۷	۵۲	۰	۰	۰	۷	۰	۰	۰	۱	۲۸
ذرت علوفه‌ای	۰	۸	۸۵	۲۲۲	۲۳۳	۱۳۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰
کلزا	۹۲	۱۰۷	۵۲	۰	۰	۰	۷	۰	۰	۰	۱	۲۸
گوجه‌فرنگی	۱۶	۴۲	۱۹۶	۲۴۵	۲۱۲	۴۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
یونجه	۵۸	۷۵	۱۴۲	۱۶۱	۱۵۵	۱۲۸	۸۰	۲۳	۲	۰	۰	۱۲
جو	۹۲	۸۹	۱۸	۰	۰	۰	۷	۰	۰	۰	۱	۲۸
چغندرقند	۱۳	۴۴	۱۹۶	۲۴۳	۲۲۶	۱۲۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰
نخود	۲۶	۱۰۳	۱۸۳	۶۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
لوبیا	۱۶	۷۳	۱۹۶	۱۶۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
سیب‌زمینی	۱۶	۲۳	۱۹۳	۲۳۴	۲۰۳	۲۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
ذرت دانه‌ای	۰	۱۷	۱۶۷	۲۳۰	۱۹۰	۲۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰
عدس	۲۶	۱۰۴	۱۸۳	۶۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۳- بارش مؤثر (میلی‌متر بر ماه)

ماه / نام محصول	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
گندم	۲۳	۲۶	۰	۰	۰	۰	۰	۱۶	۱۳	۸	۱۹	۲۹
ذرت علوفه‌ای	۰	۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
کلزا	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
گوجه‌فرنگی	۱۲	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
یونجه	۲۲	۲۶	۰	۰	۰	۰	۰	۲۰	۲۰	۱۵	۲۲	۲۹
جو	۲۳	۲۶	۰	۰	۰	۰	۰	۱۶	۱۳	۸	۱۹	۲۹
چغندرقند	۱	۲۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
نخود	۲۲	۲۶	۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
لوبیا	۱۲	۲۶	۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
سیب‌زمینی	۱۲	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
ذرت دانه‌ای	۰	۲۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
عدس	۲۲	۲۶	۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

مقدار تقاضای آب زیرزمینی برای کشاورزی تحت تأثیر رفاه کشاورزان است و رفاه کشاورزان به درآمد آن‌ها بستگی دارد. قیمت فروش محصولات کشاورزی یکی از عوامل تأمین کننده درآمد کشاورزان است که به دلیل فاصله زمانی که میان تصمیم کشاورز به تولید یک محصول و عرضه آن به بازار وجود دارد قیمت محصولات پس از عرضه به بازار به‌گونه‌ای تعیین می‌گردد که بازار از این محصولات تخلیه شود که این مسئله سبب عدم اطمینان خاطر کشاورزان از تأمین رفاه‌شان می‌گردد و با برداشت غیر مجاز آب زیرزمینی و کاهش آیش با هدف افزایش تولید به دنبال تأمین رفاه هستند. محصولات کشت شده در شبکه آبیاری دشت قزوین از نظر تعیین قیمت فروش، به دو گروه قابل تقسیم است. گروه اول شامل گندم، جو، چغندرقند و کلزا است که دارای قیمت خرید تضمینی هستند و قیمت آن هر ساله از سوی دولت تعیین می‌گردد و گروه دوم شامل ذرت‌علوفه‌ای، گوجه‌فرنگی، یونجه، نخود، لوبیا، سیب‌زمینی، ذرت‌دانه‌ای و عدس است که قیمت آن‌ها وابسته به مقدار تولید است. برای پیش‌بینی قیمت محصولات دارای خرید تضمینی از رگرسیون غیر خطی و محصولات فاقد خرید تضمینی از تابع تقاضا معکوس که قیمت را به صورت تابعی از مقدار عرضه بیان می‌کند می‌توان استفاده کرد (Hosseini *et al.*, 2021). کشش قیمتی تقاضا برای ذرت‌علوفه‌ای، گوجه‌فرنگی، یونجه، نخود، لوبیا، سیب‌زمینی، ذرت‌دانه‌ای و عدس به ترتیب ۰/۵۰۸-، ۱/۱۱۱-، ۰/۹۵۴-، ۰/۹۱۴-، ۰/۳۷۴-، ۰/۵۲۹-، ۰/۳۶۳- و ۰/۳۳۲- توسط Hoseini *et al.* (2021) گزارش شده است.

واسنجی و تحلیل حساسیت

واسنجی مدل توسعه داده شده برای آبخوان دشت قزوین برای دوره زمانی ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۵ با توجه به مقادیر مشاهده‌ای تراز آب زیرزمینی با هدف کاهش خطای مدل در تخمین تراز آب زیرزمینی صورت گرفته است. همچنین حساسیت تراز آب زیرزمینی مدلسازی شده توسط نرم‌افزار پویایی سیستم، نسبت به تغییر ضریب نفوذ بارش، تغذیه مصنوعی، ضرایب بازگشتی در بخش کشاورزی، شرب و صنعت مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور میزان حساسیت تراز آب زیرزمینی نسبت به هر یک از موارد مذکور با ثابت نگه داشتن سایر عوامل و با استفاده از رابطه ۱۶ محاسبه شده است.

$$S = \left|\frac{M - O}{O}\right| \times 100 \quad \text{رابطه ۱۶)}$$

که در آن، S میزان حساسیت (درصد)، M مقدار تراز آب زیرزمینی مدلسازی شده به ازای تغییر پارامترهای مورد نظر (متر)، O مقدار تراز آب زیرزمینی مدلسازی شده در شرایط مبنا (متر) است.

سناریوها

بخش اعظم منابع آب سطحی دشت قزوین از طریق سد طالقان تأمین می‌گردد که کاهش آب تخصیص یافته از سد طالقان به دشت قزوین سبب شده است که کشاورزان به‌منظور تأمین معیشت خود اقدام به برداشت غیرمجاز آب از چاه‌ها نمایند. وجود بیش از ۲۵۰۰ حلقه چاه غیرمجاز در استان با حجم برداشت ۳۵۰ میلیون مترمکعب، افت مستمر سطح آب زیرزمینی را در پی داشته است (Asaadi *et al.*,

2019). علی‌رغم تخلیه سفره آب‌های زیرزمینی توسط کشاورزان، همچنان معیشت اغلب آن‌ها به‌دلایل مختلف از جمله نوسانات قیمت محصولات با اشکال مواجه است. از این رو در این مطالعه سعی شده است به بررسی راهکارهای موثر بر تأمین رفاه کشاورزان و حفظ آب زیرزمینی پرداخته شود. در این راستا ۶ سناریو زیر مورد بررسی قرار گرفته است.

سناریو ۱- تداوم برداشت فعلی بدون افزایش سطح زیرکشت

بررسی درآمد شبکه آبیاری دشت قزوین از سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۵ نشان می‌دهد که کشاورزان برای تأمین رفاه به طور متوسط حدود ۳۵ درصد از حجم آب مورد نیاز خود را از منابع آب زیرزمینی برداشت می‌کنند. در این سناریو به شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی از سال ۱۳۹۶ تا ۱۴۱۶ در صورت تداوم برداشت ۳۵ درصد از حجم آب مورد نیاز کشاورزی از منابع آب زیرزمینی بدون افزایش سطح زیرکشت پرداخته شده است.

سناریو ۲- افزایش سطح زیرکشت با کاهش آبیش

عدم تأمین رفاه کشاورزان سبب شده است که کشاورزان تمایل به رعایت آبیش نداشته باشند و با افزایش سطح زیر کشت و تخلیه منابع آب زیرزمینی اقدام به تولید محصول بیشتر و تأمین رفاه نمایند. در این سناریو به شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی با افزایش سطح زیر کشت با کاهش ۵ درصدی آبیش در هر سال و با فرض اینکه مقدار آب تخصیص یافته به شبکه آبیاری دشت قزوین ۱۵۰ میلیون مترمکعب در سال و الگوی کشت و توزیع آب مطابق وضعیت فعلی است، طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۱۶ پرداخته شده است.

سناریو ۳- بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت

کشاورزان با هدف تأمین رفاه اقدام به تولید بیشتر محصولات کشاورزی با اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی می‌نمایند. ولی به دلیل وقفه زمانی که بین تصمیم کشاورز به تولید یک محصول و عرضه آن به بازار وجود دارد قیمت محصولات کشاورزی پس از عرضه به بازار به گونه‌ای تعیین می‌گردد که بازار از آن محصول خالی گردد. در این سناریو با هدف تأمین رفاه کشاورزان به شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی با بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت و با فرض اینکه مقدار آب تخصیص یافته به شبکه آبیاری دشت قزوین ۱۵۰ میلیون مترمکعب در سال و سطح زیرکشت مطابق وضعیت فعلی است، پرداخته شده است. این مدل دارای ۲۶۴ متغیر است که ۱۳۲ متغیر مربوط به بهینه‌سازی توزیع آب بین ۱۱ بهره‌بردار در ۱۲ ماه و ۱۳۲ متغیر مربوط به بهینه‌سازی سطح زیر کشت ۱۲ محصول میان ۱۱ بهره‌بردار است. ۲۶۴ متغیر با استفاده از الگوریتم ژنتیک پس از ۵۰۰۰ بار تکرار در محیط نرم‌افزار Matlab استخراج می‌شود. تابع هدف و قیدهای مربوط به آن مطابق روابط ۱۷ تا ۲۲ است.

$$\mathrm{MAXP_t} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} \mathrm{Ya_{ij}} \times \mathrm{A_{ij}} \times (\mathrm{P_{sj}} - \mathrm{P_{cj}}) \qquad \text{رابطه ۱۷)}$$

$$\frac{\mathrm{Ya}}{\mathrm{Ym}} = \prod_{i=1}^{n} [1 - \mathrm{Ky_i}(1 - \frac{\mathrm{AET_i}}{\mathrm{PET_i}})] \qquad \text{رابطه ۱۸)}$$

Subject to: رابطه ۱۹)

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{m=1}^{12} \mathrm{AET_{im}} \leq 150 \text{ mcm} \qquad \text{رابطه ۲۰)}$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} \mathrm{A_{ij}} \leq \sum_{j=1}^{m} \mathrm{A_i} \qquad \text{رابطه ۲۱)}$$

$$\mathrm{P_{sj}} \leq 2\mathrm{P_{sj-1}} \qquad \text{رابطه ۲۲)}$$

در روابط فوق، $\mathrm{Ya_{ij}}$ عملکرد واقعی محصول j ام در بهره‌بردار i برحسب تن بر هکتار، $\mathrm{A_{ij}}$ سطح زیر کشت محصول j ام در بهره‌بردار i برحسب هکتار، $\mathrm{P_{sj}}$ قیمت فروش پیش‌بینی‌شده محصول j ام بر حسب تومان، $\mathrm{P_{cj}}$ هزینه تولید محصول j ام برحسب تومان بر هکتار، $\mathrm{AET_{it}}$ آب تخصیص داده‌شده در ماه t به بهره‌بردار i و $\mathrm{A_i}$ سطح زیر کشت هر بهره‌بردار برحسب هکتار و $\mathrm{A_{ij}}$ سطح زیر کشت محصول j در بهره‌بردار i بر حسب هکتار است که مجموع سطح زیر کشت محصولات در هر بهره‌بردار نباید از سطح زیر کشت آن بهره‌بردار بیشتر

شود.

سناریو ٤- بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت و کاهش خلاء عملکردی

با توجه به محدودیت منابع آب، افزایش بهره‌وری آب برای دستیابی به امنیت آبی اهمیت بالایی دارد. یکی از اقدامات اساسی در این حوزه کاهش خلاء عملکرد در کشت محصولات است. در این سناریو با کاهش ۱۰ درصدی خلاء عملکردی به شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی با بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت و با فرض اینکه مقدار آب تخصیص یافته به شبکه آبیاری دشت قزوین ۱۵۰ میلیون مترمکعب در سال و سطح زیرکشت مطابق وضعیت فعلی است، طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۱۶پرداخته شده است. این مدل دارای ۲۶۴ متغیر است که ۱۳۲ متغیر مربوط به بهینه‌سازی توزیع آب بین ۱۱ بهره‌بردار در ۱۲ ماه و ۱۳۲ متغیر مربوط به بهینه‌سازی سطح زیر کشت ۱۲ محصول میان ۱۱ بهره‌بردار است. ۲۶۴ متغیر با استفاده از الگوریتم ژنتیک پس از ۵۰۰۰ بار تکرار در محیط نرم‌افزار Matlab استخراج می‌شود. تابع هدف و قیود همانند روابط ۱۷ تا ۲۲ است.

سناریو ٥- بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت و افزایش راندمان آبیاری

راندمان کل در شبکه آبیاری دشت قزوین طبق اعلام مرکز تحقیقات کشاورزی استان قزوین (بر اساس حاصل‌ضرب راندمان کاربرد، انتقال و توزیع) ۴۵ درصد است. در این سناریو به شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی با بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت و افزایش ۱۰ درصدی راندمان کل طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۱۶ و با فرض اینکه مقدار آب تخصیص یافته به شبکه آبیاری دشت قزوین ۱۵۰ میلیون مترمکعب در سال و سطح زیرکشت مطابق وضعیت فعلی است، پرداخته شده است. این مدل دارای ۲۶۴ متغیر است که ۱۳۲ متغیر مربوط به بهینه‌سازی توزیع آب بین ۱۱ بهره‌بردار در ۱۲ ماه و ۱۳۲ متغیر مربوط به بهینه‌سازی سطح زیر کشت ۱۲ محصول میان ۱۱ بهره‌بردار است. ۲۶۴ متغیر با استفاده از الگوریتم ژنتیک پس از ۵۰۰۰ بار تکرار در محیط نرم‌افزار Matlab استخراج می‌شود. تابع هدف و قیود همانند روابط ۱۷ تا ۲۲ است.

سناریو ٦- بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت، افزایش راندمان آبیاری و کاهش خلاء عملکرد

در این سناریو به شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی با کاهش ۱۰ درصدی خلاء عملکرد و افزایش ۱۰ درصدی راندمان آبیاری با بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت و با فرض اینکه مقدار آب تخصیص یافته به شبکه آبیاری دشت قزوین ۱۵۰ میلیون مترمکعب در سال و سطح زیرکشت مطابق وضعیت فعلی است، طی دوره ۱۳۹۶ تا ۱۴۱۶پرداخته شده است. این مدل دارای ۲۶۴ متغیر است که ۱۳۲ متغیر مربوط به بهینه‌سازی توزیع آب بین ۱۱ بهره‌بردار در ۱۲ ماه و ۱۳۲ متغیر مربوط به بهینه‌سازی سطح زیر کشت ۱۲ محصول میان ۱۱ بهره‌بردار است. ۲۶۴ متغیر با استفاده از الگوریتم ژنتیک پس از ۵۰۰۰ بار تکرار در محیط نرم‌افزار Matlab استخراج می‌شود. تابع هدف و قیود همانند روابط ۱۷ تا ۲۲ است.

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک عبارت از یک جستجوی چندجانبه موازی و هدایت‌شده بر اساس نظریه تکامل است که با شبیه‌سازی فرآیندهای بقای عضو برتر در علم زیست‌شناسی، اقدام به یافتن بهترین پاسخ یک مسئله می‌نماید. عملگرهای الگوریتم ژنتیک شامل انتخاب، پیوند و جهش است که به ترتیب از آن‌ها استفاده می‌شود تا نسل بعد به وجود آید. عملگر انتخاب، کروموزوم‌های قوی‌تر را به نسل‌های بعدی انتقال می‌دهد. عملگرهای پیوند و جهش با ترکیب و تغییر کروموزوم‌ها به تولید کروموزوم‌های جدید و جستجو در فضای مسئله برای رسیدن به جواب‌های بهتر کمک می‌کند (Piadeh Koohsar *et al.*, 2019).

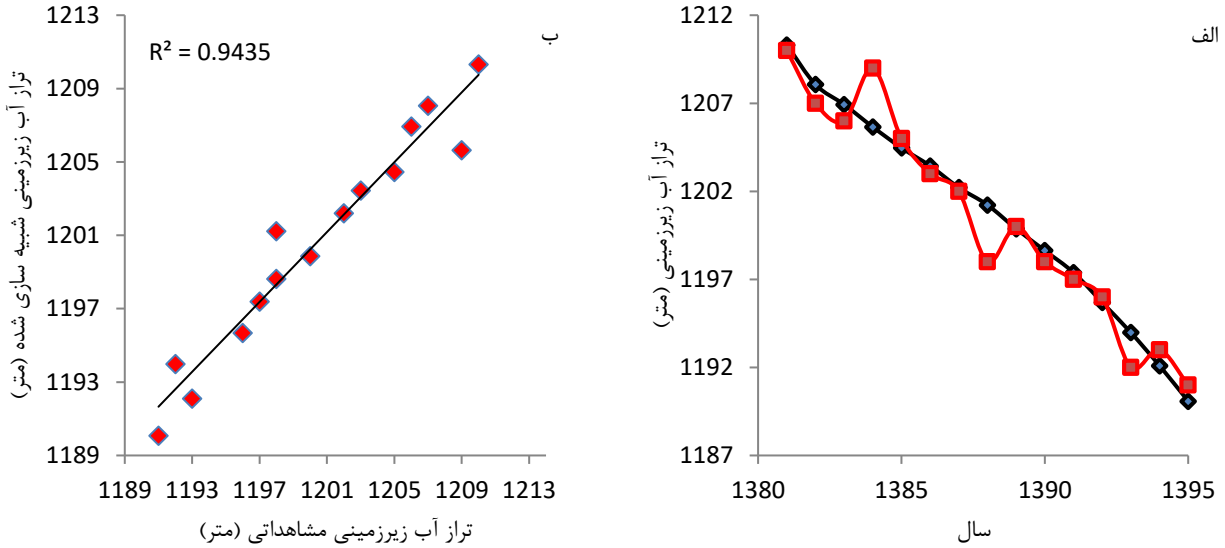
داده‌ها

اطلاعات استفاده شده در این پژوهش شامل خط فقر، الگوی کشت، الگوی توزیع آب، قیمت فروش محصولات، قیمت خرید تضمینی، هزینه تولید، عملکرد و ضریب حساسیت گیاه به تنش آبی در استان قزوین از سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۵ است. این اطلاعات از سازمان‌های مربوط شامل وزارت تعاون، کار و رفاه اجتماعی، جهاد کشاورزی، شرکت آب منطقه‌ای و درگاه ملی آمار جمع آوری شدند.

نتایج و بحث

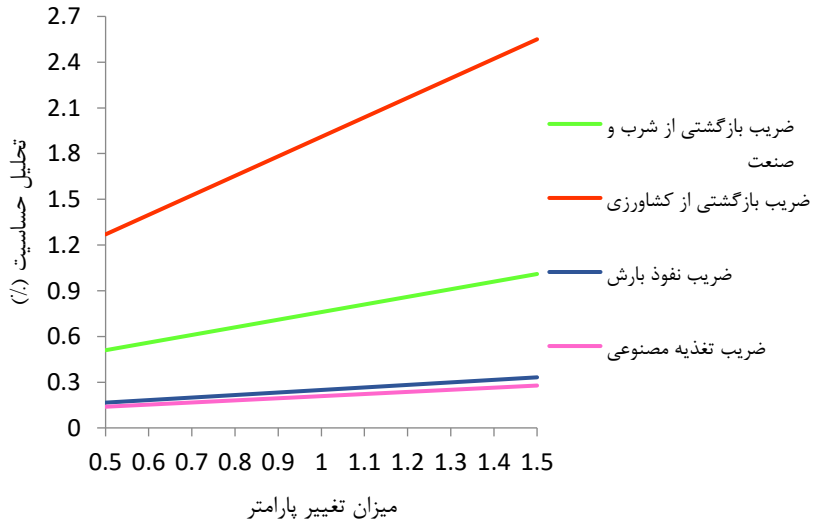
واسنجی و تحلیل حساسیت

در پژوهش حاضر از مقادیر مشاهده‌ای تراز آب زیرزمینی در دوره آماری ۱۵ ساله (۱۳۸۱ تا ۱۳۹۵) برای واسنجی مدل استفاده شده است. فرآیند واسنجی طی تکرارهای مختلف و مقایسه تغییرات سری زمانی تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده با آمار مشاهده‌ای با هدف کاهش خطا در تخمین تراز آبخوان صورت پذیرفته است. در شکل ۵ نمودار پراکنش تغییرات تراز آبخوان شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای و سری زمانی تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد مدل هیدروگراف واحد آب زیرزمینی را با ضریب همبستگی ۰/۹۴ و میانگین قدر مطلق خطا ۱ شبیه‌سازی نموده است.



شکل ۵. الف) هیدروگراف واحد سطح ایستابی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده (۱۳۹۵-۱۳۸۱) و ب) نمودار پراکنش سطح ایستابی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده (۱۳۹۵-۱۳۸۱)

نتایج تحلیل حساسیت مدل پویایی نسبت به تغییر ۰/۵ تا ۱/۵ برابری ضرایب نفوذ بارش، تغذیه مصنوعی و ضریب جریان بازگشتی بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت مطابق شکل ۶ است. همانگونه که مشاهده می‌شود تراز آب زیرزمینی در قزوین بیشترین حساسیت را نسبت به ضریب بازگشتی از بخش کشاورزی دارد.

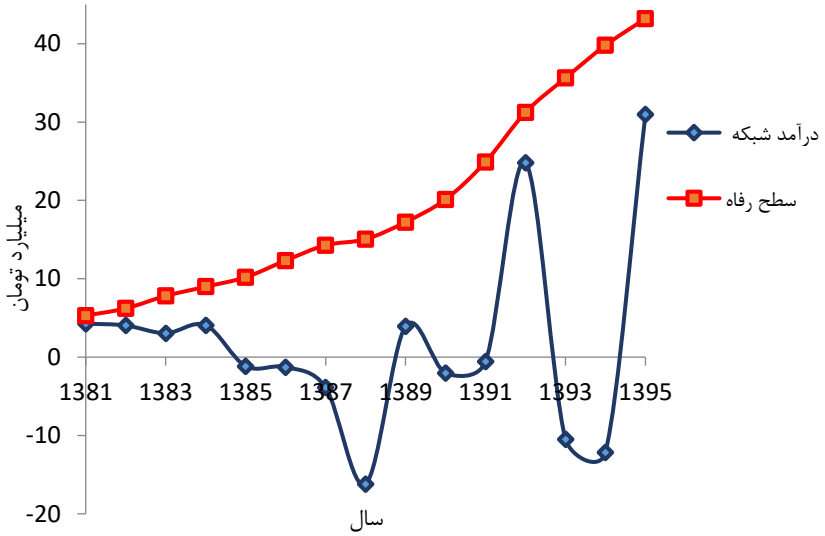


شکل ٦. حساسیت تراز آب زیرزمینی قزوین نسبت به تغییر ۰/۵ تا ۱/۵ برابری پارامترهای مدنظر

تغییرات سطح آبخوان

مقایسه درآمد کشاورزان شبکه آبیاری دشت قزوین در صورت عدم برداشت آب غیر مجاز از منابع آب زیرزمینی با سطح رفاه آنان از سال

۱۳۸۱ تا ۱۳۹۵ در شکل ۷ نشان می‌دهد میان درآمد کشاورزان و رفاه آنان اختلاف زیادی وجود دارد و کشاورزان برای تأمین معیشت ناگزیر به تخلیه منابع آب زیرزمینی هستند. از سوی دیگر با توجه به روند افزایش جمعیت و تغییر اقلیم، احتمال افزایش مقدار آب تخصیص یافته از سد طالقان به شبکه آبیاری دشت قزوین زیاد نیست و لازم است از منابع محدود حداکثر بهره‌وری صورت گیرد. به همین دلیل سناریوهای سه، چهار، پنج و شش مورد بررسی قرار گرفت.



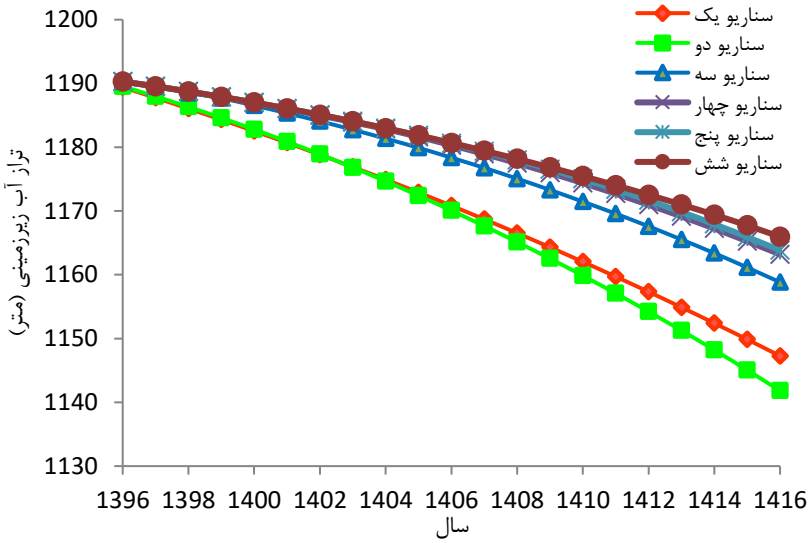
شکل ۷. مقایسه درآمد کشاورزان از سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۵ بدون برداشت غیرمجاز آب زیرزمینی با سطح رفاه

تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده بر اساس سناریوهای مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است و مطابق جدول ۴ انتظار می‌رود تراز آب زیرزمینی به ترتیب بر اساس سناریو یک، دو، سه، چهار، پنج و شش به طور متوسط سالانه ۲/۱، ۲/۴، ۱/۶، ۱/۴، ۱/۳ و ۱/۲ متر کاهش یابد. شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در سناریو سه نشان می‌دهد الگوی فعلی کشت و توزیع آب در شبکه آبیاری دشت قزوین اقتصادی نیست و با بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت ضمن تضمین تأمین معیشت کشاورزان و بهره‌وری حداکثر از منابع آب و خاک، مقدار افت تراز آب زیرزمینی تا سال ۱۴۱۶در مقایسه با سناریو یک و دو به ترتیب ۱۰/۷ و ۱۶/۳ متر کمتر کاهش می‌یابد.

یکی از عوامل موثر در تولید و مدیریت منابع آب و خاک، کاهش خلاء عملکرد است. نتایج بررسی عملکرد محصولات در سطح شبکه آبیاری دشت قزوین نشان داده است که همه محصولات زراعی کشت شده به سطح عملکرد قابل حصول (۷۵ تا ۸۵ درصد عملکرد پتانسیل) نرسیده‌اند و خلاء عملکردی وجو دارد (Uossef gomrokchi, 2021). در سناریو چهار شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی با بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت و کاهش ۱۰ درصدی خلاء عملکرد نشان داد تراز آب زیرزمینی تا سال ۱۴۱۶در مقایسه با سناریوهای یک، دو و سه به ترتیب ۱۵، ۲۰/۶ و ۴/۴ متر کمتر کاهش می‌یابد. علاوه بر خلاء عملکردی یکی دیگر از عوامل موثر در کاهش تلفات آب، افزایش راندمان آبیاری است که یکی از اصول اساسی در کشاورزی پایدار به شمار می‌آید (Kanooni, 2007). شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در سناریو پنج با افزایش ۱۰ درصدی راندمان کل آبیاری با بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت، کاهش افت ۰/۶۳ متری تراز آب زیرزمینی را در مقایسه با سناریو چهار نشان داد. مقایسه میزان افت تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در سناریو چهار و پنج نشان می‌دهد تأثیر افزایش راندمان آبیاری بیشتر از کاهش خلاء عملکردی بر افت تراز آب زیرزمینی در شبکه آبیاری دشت قزوین است و همانطور که نتایج پژوهش Ahmadi (2022) نشان داده است افزایش راندمان آبیاری باعث کاهش حجم آب برداشت شده از منابع آب زیرزمینی می‌گردد که جایگزینی سامانه‌های نوین آبیاری، مانند آبیاری میکرو در دشت قزوین به‌جای روش‌های سنتی آبیاری، سبب کاهش هدررفت حجم عظیمی از منابع آبی منطقه می‌شود. همچنین بررسی توامان کاهش خلاء عملکردی و افزایش راندمان آبیاری با بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت بر تراز آب زیرزمینی در سناریو شش بیشترین کاهش افت تراز آب زیرزمینی را در مقایسه با ۵ سناریو دیگر نشان می‌دهد و در صورت تحقق این امر افت آب زیرزمینی در مقایسه با سناریو یک و دو به ترتیب ۴۲ و ۴۹ درصد کاهش می‌یابد.

جدول٤. تغییرات تراز آب زیرزمینی در شبکه آبیاری دشت قزوین بر اساس سناریوهای شبیه‌سازی شده

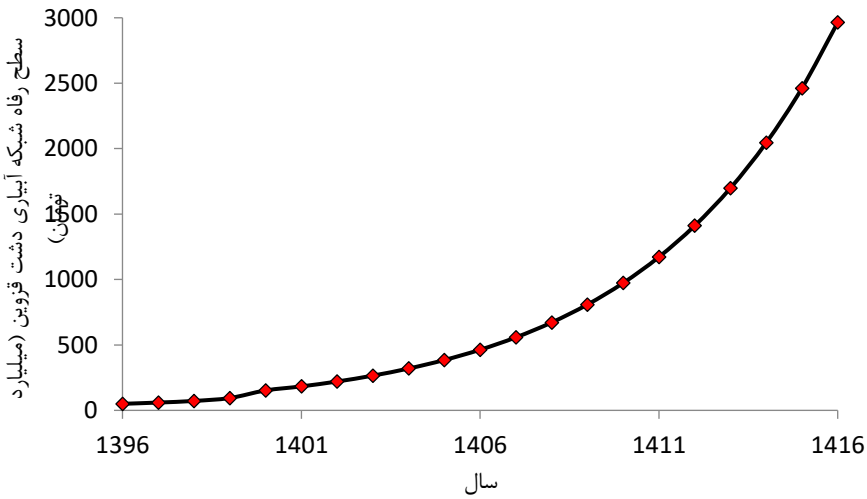
سناریو	متوسط افت آب زیرزمینی (متر)	کاهش تراز آب زیرزمینی از سال ۱۳۹٦ تا ۱٤۱٦ (متر)
یک	۲/۱	۴۲/۱۳
دو	۲/۴	۴۷/۷۱
سه	۱/۶	۳۱/۴۷
چهار	۱/۴	۲۷/۰۹
پنج	۱/۳	۲۶/۴۶
شش	۱/۲	۲۴/۳۳



شکل ۸. تراز آب زیرزمینی تحت سناریوهای مختلف

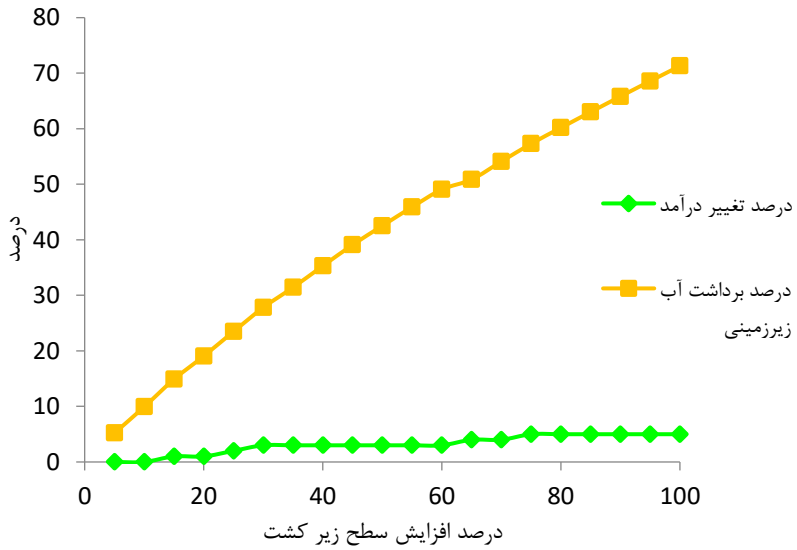
تغییرات معیشت کشاورزان

در این پژوهش خط فقر ۵۰ درصد متوسط سالانه هزینه خانوار بر اساس گزارش وزارت تعاون، کار و رفاه اجتماعی در نظر گرفته شده است و با استفاده از متوسط هزینه خانوار ارائه شده توسط مرکز ملی آمار ایران از سال ۱۳۵۳ تا ۱۳۹۹ (۷۵ درصد واسنجی و ۲۵ درصد صحت‌سنجی) خط فقر برای سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۱۶ پیش‌بینی شد. در شکل ۹ سطح رفاه در شبکه آبیاری دشت قزوین طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۹. سطح رفاه پیش‌بینی شده برای شبکه آبیاری دشت قزوین

در سناریوهای سه، چهار، پنج و شش با در نظر گرفتن سطح رفاه کشاورزان در شبکه آبیاری دشت قزوین اقدام به اجرای مدل و تعیین میزان برداشت آب از منابع زیرزمینی شده است بنابراین معیشت کشاورزان در سناریوهای ذکر شده تأمین می‌گردد و درآمد حاصل از سناریوهای فوق حداقل برابر با سطح رفاه پیش‌بینی شده برای شبکه آبیاری دشت قزوین در شکل ۹ است. بررسی وضعیت معیشت کشاورزان تحت سناریو یک نشان می‌دهد به دلیل مناسب نبودن الگوی فعلی کشت و توزیع آب با محدودیت منابع آب، برداشت ۳۵ درصد از حجم آب مورد نیاز بخش کشاورزی از منابع آب زیرزمینی تضمین کننده تأمین رفاه کشاورزان نیست و کشاورزان به منظور اطمینان از تأمین معیشت اقدام به کاهش آیش و افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی می‌کنند که در سناریو دو به بررسی این مسئله پرداخته شد. درصد تغییرات درآمد کشاورزان و برداشت آب زیرزمینی در سناریو دو در شکل ۱۰ نمایش داده شده است و همانطور که در شکل ۱۰ مشخص است عدم رعایت آیش سبب افزایش چشمگیری در درآمد نمی‌شود بلکه افزایش سطح زیر کشت منجر به افزایش هزینه‌های تولید می‌گردد و کشاورزان با برداشت آب زیرزمینی صرفا به جبران هزینه‌های تولید می‌پردازند و افزایش سطح زیر کشت تأثیر چندانی بر افزایش درآمد کشاورزان ندارد و همان طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است در صورت کشت ۱۰۰ درصدی زمین لازم است ۷۱ درصد از حجم آب مورد نیاز بخش کشاورزی از منابع آب زیرزمینی تخلیه گردد که در این صورت تنها ۵ درصد درآمد کشاورزان در مقایسه با شرایطی که آیش رعایت می‌گردد افزایش می‌یابد و همانطور که نتایج پژوهش Baniasadi *et al.* (2018) و Taghizadeh & Soltani (2013) نشان داده است پیش‌بینی می‌شود که رفاه کشاورزان به طور چشمگیری با افت تراز آب زیرزمینی کاهش پیدا کند.



شکل ۱۰. بررسی تأثیر تغییر سطح زیر کشت بر تخلیه آب زیرزمینی و درآمد کشاورزان

مدل‌های بهینه‌سازی

بررسی الگوی کشت بهینه‌سازی شده در سناریوهای سه، چهار، پنج و شش نشان می‌دهد کشت محصولات دارای خرید تضمینی در شبکه آبیاری دشت قزوین اقتصادی‌تر از محصولاتی است که قیمت آن وابسته به مقدار تولید است. بر اساس خروجی‌های مدل مناسب‌ترین محصول برای کشت در شبکه آبیاری دشت قزوین از لحاظ تأمین رفاه کشاورزان و حفظ منابع آب زیرزمینی گندم است.

نتیجه‌گیری

برداشت بیش از حد از سفره‌های آب زیرزمینی به علت عدم مدیریت صحیح منجر به کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در بخش‌های زیادی از کشور شده است و از آنجایی که اقتصاد کشور تا حدود زیادی بر پایه کشاورزی است و کشاورزی نیز وابسته به آب است، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی رفاه کشاورزان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بخش زیادی از منابع آب سطحی در قزوین از سد طالقان تأمین می‌گردد که در طی چند سال اخیر به دلیل خشکسالی و افزایش شرب شهر تهران مقدار آب تخصیص یافته به شبکه آبیاری دشت قزوین کاهش پیدا کرده است. عدم تغییر الگوی کشت علی‌رغم کاهش آب تخصیص یافته سبب تخلیه منابع آب زیرزمینی از سوی کشاورزان و افت تراز

سطح ایستابی در قزوین شده است. با توجه به اهمیت منابع آب زیرزمینی در این پژوهش ضمن مقایسه خروجی‌های مدل و داده‌های مشاهداتی به شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی تحت شش سناریو در طی دوره زمانی ۱۴۱۶- ۱۳۹۶ با استفاده از پویایی سیستم پرداخته شد. بررسی نتایج نشان می‌دهد پیش‌بینی قیمت محصولات کشاورزی سبب تضمین رفاه کشاورزان و کاهش افت تراز آب زیرزمینی می‌گردد به گونه‌ای که با بهینه‌سازی الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت در سناریو سه مقدار افت تراز آب زیرزمینی در مقایسه با سناریو یک و دو به ترتیب به طور متوسط سالانه ۵۰ و ۸۰ سانتی‌متر کاهش می‌یابد و همانطور که Hoseini *et al*. (2021) در پژوهشی در شبکه آبیاری دشت قزوین نشان دادند پیش‌بینی قیمت تأثیر زیادی بر تأمین معیشت کشاورزان و حفظ منابع زیرزمینی و استفاده صحیح از منابع محدود آب دارد. اگرچه با بهینه‌سازی همزمان الگوی کشت و توزیع آب با پیش‌بینی قیمت، افزایش راندمان آبیاری و کاهش خلاء عملکردی ضمن تأمین رفاه کشاورزان می‌توان مقدار افت تراز آب زیرزمینی را کاهش داد اما همچنان افت تراز آب زیرزمینی زیاد است و با توجه به جایگاه کشاورزی در اقتصاد قزوین و کمبود منابع آب لازم است تدابیر جدی‌تری در خصوص تأمین رفاه کشاورزان صورت گیرد تا تمایل کشاورزان به تخلیه منابع آب زیرزمینی کاهش یابد و یکی از راهکارهای جلوگیری از افت تراز آب زیرزمینی تشکیل بازار آب است. بازار آب می‌تواند همانند هر نهاد دیگری، با حفظ حقوق مالکیت و در پی آن، برقراری بعضی ضوابط برای بهره‌برداران، اجازه مبادله‌ی داوطلبانه آب در مقابل یک مقدار اقتصادی (قیمت) را بدهد و می‌تواند یک راه حل امیدبخش جهت افزایش کارایی اقتصادی آب باشد که کشاورزان با فرصت‌های ایجاد شده در آن از طریق بهبود شیوه‌های مدیریت تأمین آب، برای خرید و فروش آب اقدام نمایند که این امر منجر به کاهش مصرف کشاورزان از منابع آب‌های زیرزمینی می‌شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Alami, M. T., Farzin, S., Ahmadi, M. H., & Aghabalaee, B. (2014). System dynamics modeling of dam and groundwater for optimal water management (Case study: Golak Dam). *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 44(74), 1-12. (In Persian)

Asaadi, M. A., Khalilian, S., & Mousavi, S. H. (2019). Management of irrigation water allocation and cropping pattern with emphasis on deficit irrigation strategy (case study: Qazvin irrigation network). *Iran-Water Resources Research*, 14(5), 1-14. (In Persian)

Asadi, M., Mirghafouri, S., Boroumandzad, Y., & Alemzade, M. (2022). Optimal exploitation management of the Abarkouh aquifer plain with system dynamics approach. *Water and Soil Science*. doi: 10.22034/ws.2021.27688.2150. (In Persian)

Azizabadi Farahani, M., & Mirzaei, F. (2020). Optimal model of irrigation network operational management to maximize profit (case study: Ghazvin irrigation network). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(9), 2149-2162. (In Persian)

Baniasadi, M., Zare Mehrjordi, M., Mehrabi Boshrababd, H., Mirzaei, H., & Rezaei Estakhrooye, A. (2018). Social welfare decrease due to the drop in groundwater level (case study of Wheat Farmers in Orzuiyeh plain). *Agricultural Economics and Development*, 26(2), 165-194. (In Persian)

Barati, A. A., Azadi, H., & Scheffran, J. (2019). A system dynamics model of smart groundwater governance. *Agricultural Water Management*, 221, 502-518.

Benabderrazik, K., Kopainsky, B., Tazi, L., Jörin, J., & Six, J. (2021). Agricultural intensification can no longer ignore water conservation–A systemic modelling approach to the case of tomato producers in Morocco. *Agricultural Water Management*, 256.

Darvishi, E., Hooshmand, A., Alizadeh, H., & Izadpanah, Z. (2019). Evaluation of the effect of cropping pattern on groundwater resources of Mehran plain using the system dynamics approach under scenarios of energy price changes. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 8(2), 121-134. (In Persian)

Forrester, J. W. (1997). Industrial dynamics. *Journal of the Operational Research Society*, 48(10), 1037-1041.

Hashemi, M., Mazandarani zadeh, H., Daneshkare Arasteh, P., & Zarghami, M. (2020). Evaluation of management policies to simultaneously maintain groundwater resources and farmers' livelihoods using the system dynamics and game theory. *Iran-Water Resources Research*, 16(3), 1-17. (In Persian)

Hjorth, P., & Bagheri, A. (2006). Navigating towards sustainable development: a system dynamics approach. *Futures*, 38, 74–92.

Hoseini, S., Mazandarani zadeh, H., & Nazari, B. (2021). Simultaneously management of surface and groundwater resources and increasing farmers' resilience to water scarcity by predicting the price of

agricultural products and using GA (Case study of irrigation and drainage network of Qazvin plain). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(2), 563-576. (In Persian)

Hosseini Jolfan, M., & Yasi, M. (2021). Enhancing the integrated management of agricultural water in an irrigation network with the aim of balancing the aquifer (Case study: Qazvin irrigation District). *Water and Irrigation Management*, *11*(3), 575-591. (In Persian)

Hosseini, S., & Mazandarani zadeh, H. (2021). Optimal water allocation among agricultural consumers using crop pattern change approach to improve farmers' livelihood. *Irrigation Sciences and Engineering*. (In Persian)

Huang, Y. H., Lai, Y. J., & Wu, J. H. (2022). A system dynamics approach to modeling groundwater dynamics: case study of the Choshui river basin. *Sustainability*, 14(3).

Janbaz fotamy, M., Kholghi, M., Abdeh Kolahchi, A., & Roostaei, M. (2020). Land subsidence assessment due to groundwater exploration by using differential radar interferometry technique, case study: Qazvin province. *Iran-Water Resources Research*, 16(3), 133-147. (In Persian)

Kanooni, A. (2007). Evaluation of furrow irrigation efficiency under different management in Moghan region.*Journal of Agricultural Engineering Research*, 8(2). (In Persian)

Layani, G., Bakhshoodeh, M., & Zibaei, M. (2020). A system dynamics approach for evaluating the impacts of water demand management policies in Kheirabad river basin. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 51(2), 195-216. (In Persian)

Liu, X., & Liu, Y. (2019, October). The study on supply and demand of water resources in Alar city based on the system dynamics model. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1324, No. 1, p. 012017). IOP Publishing.

Madani, K., & Marino, M. A. (2009). System dynamics analysis for managing Iran's Zayandeh-Rud river basin. *Water Resources Management*, 23, 2163-2187. (In Persian)

Mahmoodi, Z., Bahremand, A., Abdollahi, K., Mirabbasi, R., Saddodin, A., Kouhestani, S., & Komaki, C. (2020). Optimal planning for available water allocation based on groundwater sustainability index in Arazkoose watershed using dynamic system approach. *Iranian Water Researches Journal*, 14(3), 45-59. (In Persian)

Mohammadi, H., Akbarpour, A., & Bagheri, A. (2018). Modeling the interaction of water resources and value added in the Birjand Plain. *Journal of Modeling in Engineering*, 16(55), 279-298. (In Persian)

Nazari, B., Liaghat, A., & Parsinejad, M. (2020). Investigation of Irrigation Systems Development, Cropping Pattern Scenarios, and Deficit Irrigation on Water Productivity in Qazvin Irrigation Network by Systems Dynamics. *Irrigation Sciences and Engineering*, 44(4), 93-108. (In Persian)

Organization of Agricultural- Jihad Qazvin. https://qazvin.maj.ir/

Piadeh Koohsar, J., Mazandarani zadeh, H., & Sadr, S. (2019). Evaluation of GA and PSO optimization algorithms in operation of multi-reservoir systems case study: Gorgan-Rood basin dams. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(2), 239-250. (In Persian)

Qazvin Regional Water Company. https://www.qzrw.ir/st/273

Rao, N. H., Sarma, P. B. S., & Chander, S. (1988). A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. *Agricultural Water Management*, 13(1), 25-32.

Salami, H., & Rezaei, S. (2010). Forecasting meat prices: An inverse demand approach. *Journal of Economics and Agriculture Development*, 24(3), 298-303. (In Persian)

Shirzadi, S., Sabouhi, M., Davary, K., & Keikha, A. (2018). Survey of the stability and balance of the aquifer in order to achieve sustainable management (Case Study: Nishabour basin). *Agricultural Economics Research*, 10(39), 187-220. (In Persian)

Simonovic, S. P. (2012). Managing water resources: methods and tools for a systems approach. Routledge.

Taghizadeh, S., & Soltani, G. (2013). The impact of groundwater over-extraction on farmers, welfare: The case of wheat producers in Fasa county. *Agricultural Economics Research*, 5(17), 1-22. (In Persian)

Uossef gomrokchi, A. (2021). Estimation of potential yield and yield gap of major crops in Qazvin irrigation network. *Water Resources Engineering*, 14(50), 75-88. (In Persian)