



Assessing the Effects of Cropping Pattern Changes on Groundwater Resources in Hamedan-Bahar Plain Using System Dynamics Approach

P. Moradi, H. Nozari, * , and R. Bahramloo

PhD student in Water Resources, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. paryamoradi1992@gmail.com

Associate Prof., Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran. h.nozari@basu.ac.ir

Associate Prof, Agricultural and Natural Resources Research and Education Institute, Technical and Engineering Research Department, Hamedan, Iran. r.bahramloo@areeo.ac.ir

Article Info

Research Article

Received: November 17, 2025

Accepted: March 18, 2026

Keywords: Groundwater level, Simulation model, Optimization, Aquifer management

Corresponding author's email: h.nozari@basu.ac.ir

Abstract

In the present study, the soil-water environment and the aquifer of the Hamedan-Bahar Plain were modeled and simulated for 2018-19 to 2022-23, utilizing a system dynamics approach within the Vensim software environment. The degree of fit between the measured and simulated groundwater level values was assessed through the calculation of statistical indices, specifically the root mean square error (RMSE), the normalized root mean square error (NRMSE), the Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient (EF), and correlation coefficient (R^2). The estimated values of these indices for the calibration period (2018-2021) were RMSE = 0.57, NRMSE = 0.02, EF=0.96, $R^2 = 0.96$ and PBIAS=-0.0056, while for the validation period (2021-2023), the values were RMSE= 0.45, NRMSE= 0.01, EF=0.99, $R^2= 0.99$ and PBIAS=0.0054. These results indicate a high degree of accuracy in the model's simulation of groundwater levels. Initial investigations revealed that groundwater extraction exceeded the permitted limits. To evaluate the economic impacts of this over-extraction, an agricultural subsystem comprising of seven key crops (wheat, potato, alfalfa, barley, corn, vegetables, and summer crops) was integrated into the model. The actual performance and net profit derived from the sale of these strategic crops in the Hamedan-Bahar Plain were simulated. Ultimately, two irrigation scenarios were defined based on the water requirements of the crops and the constraints imposed by groundwater withdrawal limits. Consequently, the optimal cultivation pattern for the study area was proposed. The results indicated that the highest net profit for irrigated crops, based on actual conditions during the 2018-2019 amounted to 531,848, 538,363, and 504,579 M. Rials under the three irrigation modes actual conditions, water requirement, and harvest limitation, respectively. The implementation of irrigation practices aligned with crop water requirements not only sustained economic advantages but also minimized damage to the aquifer. This approach resulted in an increase in water levels by three meters relative to the current conditions and facilitated an annual water savings of 26.98 M.m³.

Cite this article: Moradi, p., Nozari, H. and Bahramloo, R., 2026. Assessing the Effects of Cropping Pattern Changes on Groundwater Resources in Hamedan-Bahar Plain Using System Dynamics Approach. *Journal of Water Research in Agriculture*, 39(4), PP.405-429.






نشریه پژوهش آب در کشاورزی

<https://wra.areeo.ac.ir>

بررسی اثر تغییر الگوی کشت بر منابع آب زیرزمینی دشت همدان-بهار با بهره‌گیری از روش پویایی سیستم

پریا مرادی، حامد نوذری*  و رضا بهراملو

دانشجوی دکتری، گروه علوم مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

paryamoradi1992@gmail.com

دانشیار گروه علوم مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

h.nozari@basu.ac.ir

دانشیار مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی، بخش تحقیقات فنی و مهندسی، همدان، ایران.

r.bahramloo@areeo.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۸/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

واژه‌های کلیدی: تراز سطح آب زیرزمینی، شبیه‌سازی، بهینه‌سازی، مدیریت آبخوان

آدرس ایمیل نویسنده مسئول:

h.nozari@basu.ac.ir

در این پژوهش محیط آب و خاک و آبخوان دشت همدان-بهار برای دوره ۹۸-۱۳۹۷ الی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ با روش پویایی سیستم در محیط نرم‌افزار (Vensim)، شبیه‌سازی شد. میزان مطابقت داده‌های شبیه‌سازی شده تراز سطح آب زیرزمینی با داده‌های اندازه‌گیری شده، از طریق محاسبه شاخص‌های آماری، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، ضریب نش-ساتکلیف (EF)، ضریب همبستگی (R^2) و درصد بایاس (PBIAS) ارزیابی شد. مقدار این شاخص‌ها به ترتیب برای دوره واسنجی (۱۳۹۷-۱۴۰۰) برابر، $EF=0.96$ ، $RMSE=0.57$ ، $NRMSE=0.02$ و $PBIAS=-0.0056$ و $R^2=0.96$ و برای دوره اعتبارسنجی (۱۴۰۰-۱۴۰۲) برابر، $EF=0.99$ ، $RMSE=0.45$ ، $NRMSE=0.01$ و $PBIAS=0.0054$ و $R^2=0.99$ برآورد شد و بیانگر دقت مدل در شبیه‌سازی تراز سطح آب زیرزمینی است. نیز، بررسی‌های اولیه نشان داد که میزان برداشت آب زیرزمینی در منطقه یادشده بیشتر از حد مجاز است. بنابراین به‌منظور بررسی اثرات اقتصادی، زیرسیستم کشاورزی شامل هفت محصول عمده منتخب شامل (گندم، سیب‌زمینی، یونجه، جو، ذرت، صیفی‌جات و سبزیجات) به مدل افزوده شد و میزان عملکرد واقعی و سود خالص حاصل از فروش محصولات شبیه‌سازی شد. با توجه به اهمیت منابع آب، دو سناریوی، آبیاری به میزان نیاز آبی محصولات و آبیاری با توجه به محدودیت منابع آب زیرزمینی تعریف شد و الگوی کشت برای منطقه مورد مطالعه پیشنهاد شد. بیشترین مقدار سود خالص برای آبیاری بر اساس شرایط واقعی در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ و همچنین دو سناریوی یادشده به ترتیب برابر با ۵۳۱۸۴۸، ۵۳۸۳۶۳ و ۵۰۴۵۷۹ ریال در سه حالت آبیاری بر اساس شرایط واقعی، نیاز آبی و محدودیت برداشت بود. بنابراین، آبیاری مطابق با نیاز آبی ضمن حفظ سود اقتصادی، کمترین آسیب را به آبخوان وارد کرده و نسبت به شرایط واقعی باعث بهبود تراز سطح آب به میزان سه متر و صرفه‌جویی سالانه ۲۶/۹۸ میلیون متر مکعب آب می‌شود.

استاد: مرادی، پریا، نوذری، حامد، و بهراملو، رضا، ۱۴۰۴. بررسی اثر تغییر الگوی کشت بر منابع آب زیرزمینی دشت همدان-بهار با بهره‌گیری از روش پویایی سیستم. نشریه پژوهش آب

در کشاورزی، ۳۹ (۴)، صص. ۴۰۵-۴۲۹



DOI : 10.22092/JWRA.2026.371359.1100

توانایی روش پویایی سیستم در ارزیابی سناریوهای مدیریتی و پیش‌بینی پیامد سیاست‌های مختلف، آن را به ابزاری مناسب برای مدیریت منابع آب تبدیل کرده است. مطالعات متعددی کارایی این روش را در شبیه‌سازی مسائل مرتبط با آب تأیید کرده‌اند. به‌عنوان نمونه، شی و پو (۲۰۱۳) با استفاده از مدل پویایی سیستم، پایداری منابع آب سنگاپور را ارزیابی کردند و نتایج نشان داد اجرای سیاست‌های مدیریتی می‌تواند موجب بهبود تعادل منابع آب شود. همچنین نوذری و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از این روش، روند کیفی کانال آبیاری نهر شعبان در استان همدان را شبیه‌سازی کرده و عملکرد مناسب مدل را در تحلیل تغییرات کیفی گزارش کردند.

در بخش کشاورزی، بهینه‌سازی الگوی کشت یکی از راهکارهای مؤثر در مدیریت مصرف آب به شمار می‌رود. تغییر الگوی کشت به سمت محصولات با نیاز آبی کمتر و بهره‌وری بالاتر می‌تواند نقش مهمی در کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی داشته باشد. در این رویکرد، تلاش می‌شود ضمن کاهش مصرف آب، عملکرد اقتصادی و بهره‌وری محصولات نیز حفظ یا افزایش یابد.

مطالعات مختلفی به بررسی اثر تغییر الگوی کشت بر مدیریت منابع آب پرداخته‌اند. آدلی و همکاران (۲۰۱۸) با توسعه یک مدل بهینه‌سازی الگوی کشت در مصر نشان دادند که استفاده از محصولات با نیاز آبی کمتر و سودآوری بیشتر می‌تواند درآمد خالص بخش کشاورزی را افزایش دهد. همچنین راث و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته، الگوی کشت بهینه را تعیین کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که سود خالص سالانه کشاورزان از ۰/۹۷۵ به ۱/۰۷ میلیون دلار افزایش یافته است. نتایج این مطالعات بیانگر آن است که اصلاح الگوی کشت می‌تواند ضمن کاهش فشار بر منابع آب، موجب بهبود شاخص‌های اقتصادی بخش کشاورزی نیز شود.

در همین راستا، نظری و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از روش پویایی سیستم، اثر سناریوهای مختلف الگوی کشت، آبیاری کم‌مصرف و توسعه سامانه‌های نوین

تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و افزایش تقاضای آب، فشار فزاینده‌ای را بر منابع آب زیرزمینی وارد کرده است. در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک، آب زیرزمینی به‌عنوان مهم‌ترین منبع تأمین آب شرب و کشاورزی شناخته می‌شود؛ از این رو، مدیریت پایدار این منابع نقش مهمی در تحقق توسعه پایدار دارد. با این حال، مدیریت آب‌های زیرزمینی به دلیل تأثیرپذیری از عوامل متعدد طبیعی و انسانی، فرآیندی پیچیده به شمار می‌رود. عواملی نظیر شرایط اقلیمی، ویژگی‌های زمین‌شناسی، شهرنشینی، تغییر کاربری اراضی و برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها، بر میزان تغذیه و ذخیره منابع آب زیرزمینی اثرگذار هستند (جیا و همکاران، ۲۰۱۹؛ شیهینگ و همکاران، ۲۰۲۲؛ اسداللهی و همکاران، ۲۰۲۴).

در دهه‌های اخیر، برداشت از منابع آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌های ایران به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته و در اغلب موارد، میزان بهره‌برداری از میزان تغذیه آبخوان‌ها فراتر رفته است. تداوم این روند خطر نابودی منابع آب را در پی خواهد داشت (مازندرانی‌زاده و شکوهی‌فر، ۱۴۰۲)؛ بنابراین، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب زیرزمینی به‌منظور جلوگیری از تشدید بحران آب، امری ضروری است.

در این راستا، روش پویایی سیستم (System Dynamics) به‌عنوان یکی از ابزارهای مؤثر در تحلیل و شبیه‌سازی سامانه‌های پیچیده، کاربرد گسترده‌ای در مدیریت منابع آب پیدا کرده است. این روش با در نظر گرفتن روابط متقابل میان متغیرها، حلقه‌های بازخورد و تغییرات زمانی، امکان بررسی رفتار سیستم در شرایط مختلف را فراهم می‌کند. روش پویایی سیستم نخستین بار توسط فارستر (۱۹۶۱) برای تحلیل سامانه‌های پیچیده معرفی شد و تاکنون در حوزه‌های مختلفی از جمله مدیریت منابع آب، محیط‌زیست، اقتصاد و برنامه‌ریزی توسعه مورد استفاده قرار گرفته است.

آبیاری را بر وضعیت آبخوان دشت قزوین ارزیابی کردند. نتایج نشان داد برخی سناریوهای اصلاح الگوی کشت موجب افزایش ۲۱ درصدی بهره‌وری فیزیکی آب و کاهش قابل توجه افت حجم آبخوان شده است. همچنین، نیاز آبی محصولات در سناریوهای مختلف بین ۸۲۰۷ تا ۱۱۶۹۹ مترمکعب در هکتار متغیر بود و نتایج بیانگر تأثیر مستقیم اصلاح الگوی کشت بر بهبود وضعیت آبخوان منطقه است. همچنین، شعبانی و همکاران (۱۴۰۲) اثر تغییر الگوی کشت و بهبود راندمان سامانه‌های آبیاری را بر کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی تحت سناریوهای تغییر اقلیم در دشت کوار بررسی کردند. نتایج نشان داد با طراحی الگوی کشت مناسب و بهبود راندمان آبیاری، می‌توان برداشت از منابع آب زیرزمینی را در شرایط نرمال و خشک بین ۲۱ تا ۴۰ درصد کاهش داد. همچنین، نیاز ناخالص آبیاری محصولات تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم بین ۴ تا ۱۸ درصد افزایش یافت.

در سال‌های اخیر، روش پویایی سیستم به‌عنوان ابزاری مؤثر در شبیه‌سازی، ارزیابی و بهینه‌سازی سامانه‌های منابع آب مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد این روش قابلیت مناسبی در تحلیل هم‌زمان ابعاد هیدرولوژیکی، مدیریتی و اجتماعی-اقتصادی منابع آب دارد. نوذری و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از روش پویایی سیستم، عملکرد سد دز و تأسیسات پایین‌دست آن را شبیه‌سازی و بهینه‌سازی کردند. نتایج ارزیابی مدل با شاخص‌های $RMSE=3.16$ و $SE=0.18$ بیانگر دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی حجم مخزن بود. همچنین مقایسه نتایج مدل با الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) نشان داد روش پویایی سیستم عملکرد مناسب‌تری در تأمین نیاز پایین‌دست و کاهش کمبود آب دارد.

در حوزه مدیریت آب زیرزمینی نیز مطالعات متعددی با استفاده از این رویکرد انجام شده است. مختار و آرام (۲۰۱۷) با توسعه مدل پویایی سیستم در دشت فیروزآباد استان فارس، اثر سیاست‌های مدیریتی بر تعادل آب زیرزمینی را بررسی کردند. نتایج نشان داد سیاست‌های

موجود در حفظ تعادل آبخوان کارایی کافی نداشته و برقراری مجدد تعادل آب زیرزمینی طی ۳۰ سال آینده، مستلزم افزایش بهره‌وری آبیاری و کاهش مصرف خالص آب است. هوانگ و همکاران (۲۰۲۲) نیز برای ارزیابی فرونشست ناشی از برداشت بیش از حد آب زیرزمینی در حوضه رودخانه Choshuoi تایوان، سناریوهای مدیریتی مختلفی را شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد انسداد ۱۵۰۰ حلقه چاه، تأثیر محدودی بر کاهش فرونشست داشته، اما پیامدهای نامطلوبی برای بخش کشاورزی به همراه خواهد داشت. همچنین اسداللهی و همکاران (۲۰۲۳) با شبیه‌سازی بیلان آب زیرزمینی حوضه McHenry در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰، تأثیر عوامل اقلیمی، جمعیتی و تغییر کاربری اراضی را بر ذخیره آب زیرزمینی ارزیابی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد رشد جمعیت، افزایش تقاضای آب خانگی و توسعه شهری از مهم‌ترین عوامل کاهش سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه هستند.

در زمینه شبیه‌سازی الگوی کشت و مدیریت آب در ایران نیز پژوهش‌های متعددی انجام شده است. نوذری و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از روش پویایی سیستم، الگوی کشت شبکه آبیاری و زهکشی سمت راست آبشار اصفهان را شبیه‌سازی کرده و عملکرد مناسب مدل را در تحلیل سناریوهای مدیریتی گزارش کردند. همچنین اسدآبادی و همکاران (۱۳۹۸) با مدل‌سازی دشت همدان-بهار در نرم‌افزار Vensim PLE نشان دادند که کنترل تقاضا، توسعه تغذیه مصنوعی و افزایش استفاده از پساب‌های تصفیه‌شده می‌تواند در احیای تعادل آبخوان مؤثر باشد.

علاوه بر این، مطالعات متعددی در دشت همدان-بهار به بررسی جنبه‌های مختلف مدیریت منابع آب زیرزمینی پرداخته‌اند. این مطالعات موضوعاتی نظیر اثر انتقال آب بین‌حوضه‌ای، سناریوهای قیمت‌گذاری آب، تغییر اقلیم، بهره‌وری آب کشاورزی، مبادله آب مجازی و مدیریت برداشت از منابع آب زیرزمینی را مورد ارزیابی قرار داده‌اند (بلالی و همکاران، ۲۰۱۱؛ بلالی و وییگی،

۲۰۱۵؛ سیدان و همکاران، ۱۳۹۶؛ معززی و همکاران، ۱۳۹۹؛ افروزی و همکاران، ۲۰۲۱). نتایج اغلب این پژوهش‌ها بر ضرورت اصلاح الگوی مصرف آب، کنترل برداشت از آبخوان و استفاده از سناریوهای مدیریتی به‌منظور کاهش افت سطح آب زیرزمینی تأکید دارند.

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که روش پویایی سیستم، ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی و مدیریت منابع آب زیرزمینی و ارزیابی سناریوهای مدیریتی است. نتایج اغلب پژوهش‌ها بیانگر آن است که استفاده از این روش می‌تواند در تحلیل رفتار آبخوان، ارزیابی سیاست‌های مدیریتی و بررسی اثر عوامل انسانی و اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی مؤثر باشد. با این حال، بخش قابل‌توجهی از مطالعات انجام‌شده تنها بر برخی مؤلفه‌های آبخوان تمرکز داشته و کمتر به بررسی هم‌زمان اثر تغییر الگوی کشت، برداشت آب زیرزمینی و نیازهای شرب در قالب یک مدل جامع پرداخته‌اند. همچنین در دشت همدان-بهار، علی‌رغم انجام پژوهش‌های متعدد در زمینه مدیریت منابع آب، تاکنون اثر تغییر الگوی کشت بر تراز آب زیرزمینی با استفاده از رویکرد پویایی سیستم به‌صورت جامع مورد بررسی قرار نگرفته است.

بر این اساس، در پژوهش حاضر از روش پویایی سیستم برای شبیه‌سازی مدیریت آب‌های زیرزمینی دشت همدان-بهار در استان همدان استفاده شد. مدل توسعه‌یافته با هدف درک بهتر ساختار سیستم، روابط متقابل میان متغیرها و فرآیندهای مؤثر بر افت سطح آب زیرزمینی طراحی شد. در این پژوهش، اثر سطح زیرکشت و میزان برداشت آب از چاه‌های واقع در آبخوان برای هفت محصول منتخب با بیشترین سطح کشت، بر تغییرات تراز آب زیرزمینی مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دشت همدان-بهار موسوم به سیمینه‌رود، با گستره ۲۴۵۹ کیلومتر مربع در دامنه شمالی ارتفاعات الوند در استان همدان واقع شده است. در حوضه

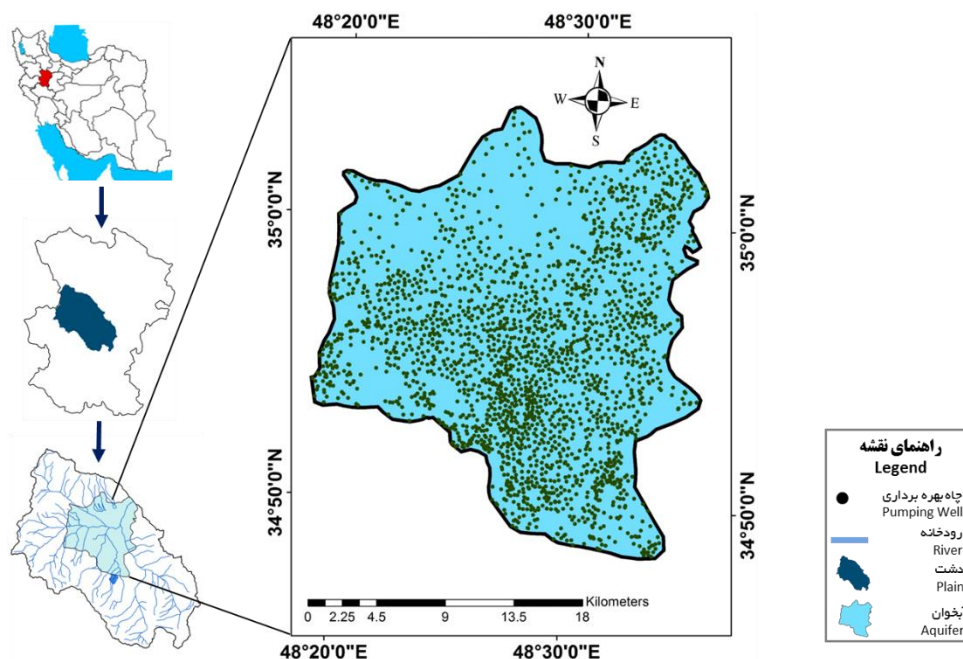
یادشده گستره دشت ۸۸۰ کیلومتر مربع و وسعت آبخوان اصلی (آزاد آبرفتی) ۴۸۲/۶ کیلومتر مربع است. با توجه به مساحت آبخوان و حداکثر پتانسیل برداشت پایدار از آن (برابر با ۱۱۸،۹۹ میلیون مترمکعب در سال) توان آبدهی این آبخوان ۲۴۶/۷ هزار مترمکعب در کیلومتر مربع برآورد شده است (شرکت آب منطقه‌ای استان همدان، ۱۴۰۴). آبخوان همدان-بهار در محدوده ۴۸ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳۳ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۲ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). این دشت بخش مرکزی شهرستان همدان و بخش‌هایی از لالچین، صالح‌آباد و شهرستان بهار را در برمی‌گیرد، تنها خروجی سطحی و زیرزمینی حوضه تنگه‌ای به نام کوشک‌آباد است که در شمال شرق دشت همدان-بهار قرار گرفته و با دشت‌های کبودرآهنگ و قهاوند ارتباط هیدروژئولوژیک دارد (نجف‌آبادی، ۱۳۹۶).

دشت همدان-بهار دارای اقلیمی نیمه‌خشک و سرد با میانگین دمای سالانه ۱۱ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالانه ۳۲۴ میلی‌متر است. این دشت یکی از مناطق ممنوعه است و استخراج آب‌های زیرزمینی از آن اثرات اجتماعی و اقتصادی جبران‌ناپذیری را در طول نیم قرن گذشته داشته که تا به امروز ادامه دارد. رودخانه‌های اصلی این حوضه شامل آبشینه، آلسجرد، عباس‌آباد، مریانج، صالح‌آباد، بهادربیگ و قره‌آجاج هستند که تمامی آن‌ها از ارتفاعات جنوبی کوه‌های الوند سرچشمه می‌گیرند. این رودخانه‌ها پس از پیوستن به یکدیگر، رودخانه اصلی حوضه (سیمینه‌رود) را تشکیل می‌دهند که از سرشاخه‌های رودخانه قره‌چای است. به دلیل بهره‌برداری‌های انجام‌شده از رودخانه‌ها در بالادست دشت همدان-بهار، در این منطقه رودخانه‌ای با جریان دائمی وجود ندارد و تنها در ماه‌های خاصی از سال که بارندگی‌ها افزایش می‌یابد، جریان آب در این رودخانه‌ها برقرار می‌شود (سدآبادی، ۱۳۹۸؛ بلالی، ۲۰۲۴).

تقاضای آب بخش کشاورزی در این دشت بسیار قابل توجه بوده و بیش از ۸۰ درصد منابع آب در این دشت

و بهار را نیز تأمین می‌کند. افزایش استفاده بی‌رویه از آب های زیرزمینی در این دشت باعث کاهش شدید سطح آب در منطقه و ایجاد مشکلاتی از جمله افزایش عمق چاه‌ها، افزایش هزینه‌های پمپاژ و کاهش کیفیت آب شده است (نوذری و زالی، ۱۳۹۲). نقشه دشت و آبخوان همدان-بهار (۱) ارائه شده با جانمایی چاه‌های بهره‌برداری، در شکل (۱) ارائه شده است.

به مصرف کشاورزی می‌رسد (صرامی‌فروشان و همکاران، ۲۰۲۳). آبخوان با نفوذ مستقیم بارندگی‌ها، نفوذ جریان سطحی، آب برگشتی از مصارف کشاورزی، شهری و صنعتی و ورودی‌های زمینی تغذیه می‌شود و با برداشت آب برای مصارف مختلف و خروجی‌های زیرزمینی تخلیه می‌شود. آبخوان موجود در دشت همدان-بهار افزون بر تأمین حدود ۸۰ درصد آب کشاورزی، بخش شایان توجهی (حدود ۵۰ درصد) از آب آشامیدنی شهرستان‌های همدان



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت و آبخوان همدان-بهار
Figure 1- Location of the Hamedan-Bahar plain and aquifer

می‌شود، برداشت از چشمه‌ها و قنوات در این دشت در مقابل تخلیه چاه عدد ناچیزی است.

میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی به تفکیک تعداد منابع همگی بر حسب میلیون متر مکعب (MCM) در جدول (۱) ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه

جدول ۱- متوسط آمار ۲۰ ساله (۱۳۷۷ الی ۱۳۹۷) گزارش بیلان منابع آب (شرکت آب منطقه‌ای استان همدان)

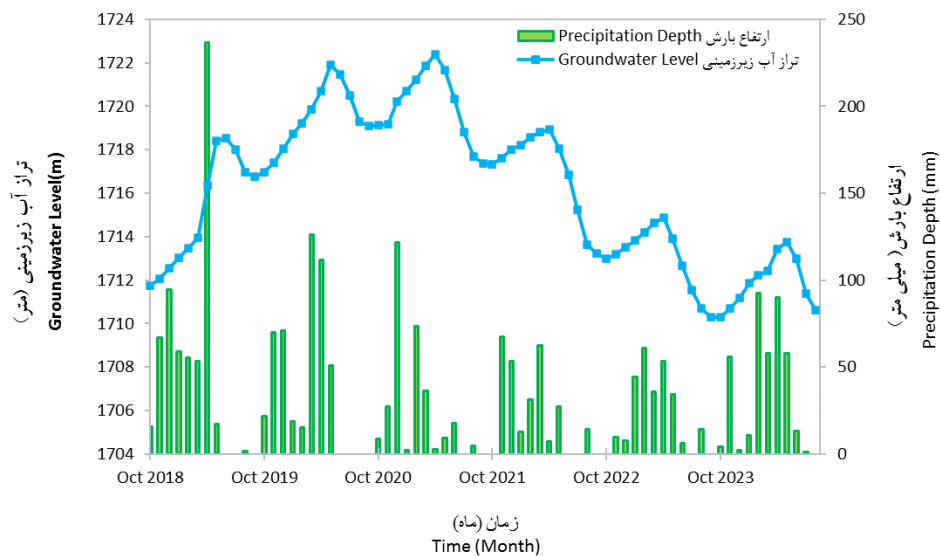
Table 1- Average 20-year statistics (1998–2018) of the water resources balance report (Hamedan regional water company)

مجموع Total number		قنات Number of qanats		تعداد چشمه Number of springs		تعداد چاه Number of wells		دشت همدان-بهار Hamedan-Bahar plain
تخلیه Discharge	تعداد Number	تخلیه Discharge	تعداد Number	تخلیه Discharge	تعداد Number	تخلیه Discharge	تعداد Number	کد Code
183.49	2239	0.15	9	5.75	53	177.59	2177	4117

هیدروگراف معرف آب زیرزمینی

در سال‌های اخیر به دلیل خشکسالی و توسعه اراضی کشاورزی و کاهش نزولات و همچنین بحران تأمین آب شرب شهرستان همدان در تابستان ۱۴۰۱، برداشت از منابع آب زیرزمینی افزایش یافته و موجب محدودیت در منابع آب منطقه شده و مشکلات متعددی در این دشت به وجود آورده است. در سال ۱۳۷۲ به علت منفی شدن بیلان و حساسیت تأمین آب شرب شهرهای همدان، بهار و لالچین، ممنوعیت توسعه بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی دشت همدان-بهار، اعمال شد. از سال آبی ۷۱-۱۳۷۰ روند کلی هیدروگراف آب زیرزمینی دشت نزولی شد که نشانگر بروز افتی مداوم همراه با کاهش ذخایر آب زیرزمینی است. بر اساس گزارش‌های مربوط به هیدروگراف دریافت شده از شرکت آب منطقه‌ای همدان، میزان افت آبخوان از سال آبی ۷۱-۱۳۷۰ تا سال ۰۳-۱۴۰۲ برابر ۲۲/۸۸ متر گزارش شده و حاکی از تغییرات نگران‌کننده در کاهش ذخایر آب

زیرزمینی منطقه بوده و علت اصلی آن برداشت بیش از حد مجاز از آب‌های زیرزمینی منطقه، خصوصاً از طریق چاه‌های کشاورزی است (گزارش منابع و مصارف، شرکت آب منطقه‌ای استان همدان، ۱۴۰۳). نتایج محاسبات تخلیه ماهانه چاه‌ها در محدوده آبخوان در شکل (۲) ارائه شده است. در شکل یادشده تراز سطح آب زیرزمینی در مقابل بارش ماهانه در دشت همدان-بهار در دوره زمانی ۱۳۹۷ الی ۱۴۰۳ ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برداشت از سفره آب زیرزمینی دشت همدان-بهار صعودی است که این افزایش در سال‌های خشک شدیدتر می‌شود. برداشت بیش از حد از سفره، اثر خود را به صورت افت سطح ایستابی آبخوان نشان می‌دهد. در دو سال ۱۳۹۷ الی ۱۳۹۹، تراز سطح آب افزایشی است که دلیل آن افزایش متوسط بارش سالانه است، اما با کاهش نزولات جوی، از سال ۱۴۰۰ الی ۱۴۰۳ تراز سطح آب به‌طور متوسط حدود ۲/۹۴- متر کاهش یافته است.



شکل ۲- هیدروگراف معرف آب زیرزمینی آبخوان همدان - بهار سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ الی ۰۳-۱۴۰۲

Figure 2- Representative groundwater hydrograph of the Hamedan-Bahar aquifer during the 2018-2019 to 2023-2024 water years

آن‌ها، این سال، سال مبنا انتخاب شد. تعداد و میزان تخلیه از چاه‌ها در داخل آبخوان در جدول (۲) ارائه شده است. بر اساس این جدول، تعداد چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق موجود در این دشت به ترتیب ۱۲۴۷ و ۹۳۰ حلقه در سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ و همچنین میزان برداشت از چاه‌های داخل

تخلیه از چاه‌ها در محدوده مطالعاتی همدان-بهار به علت کامل بودن آمار و اطلاعات سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ در زمینه تخلیه از چاه‌های مشاهداتی آبخوان به تفکیک برای مصارف مختلف شرب، کشاورزی و صنعت و همچنین مشخص بودن محصولات و سطح زیرکشت

آبخوان در بخش کشاورزی، شرب و صنعت به ترتیب ۱۵۱/۷۹، ۱۶/۷۲ و ۹ میلیون متر مکعب محاسبه شده است.

جدول ۲- متوسط بهره‌برداری از آبخوان همدان-بهار برای تأمین مصارف مختلف (بر حسب میلیون متر مکعب)
Table 2- Average groundwater extraction from the Hamedan-Bahar aquifer for various water uses (MCM)

صنعت Industrial	کشاورزی Agricultural	شرب Domestic	تعداد Number	نوع منبع Source type
3.88	110.59	14.92	1247	چاه عمیق Deep wells
5.175	41.20	1.79	930	چاه نیمه عمیق Semi-deep wells
9.06	151.79	16.72	2177	کل چاه‌ها Total wells

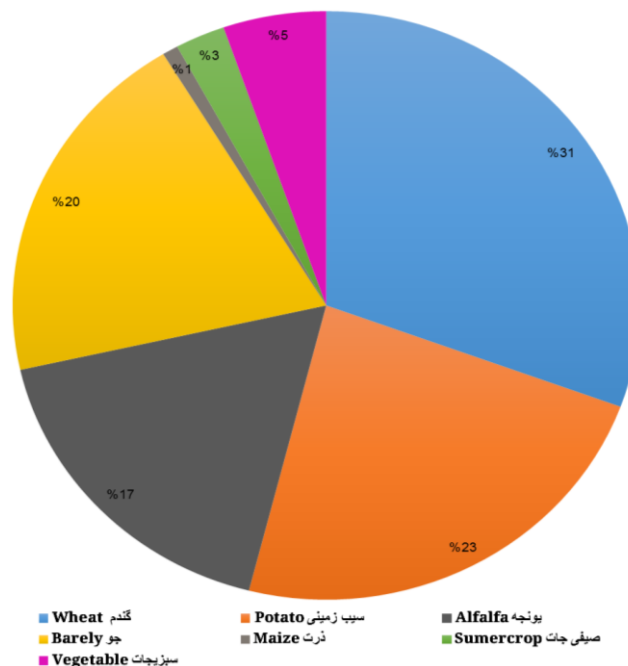
مصارف کشاورزی

پوشش می‌دهد؛ بنابراین برای برآورد سطح زیرکشت محصولات آبی در دشت یادشده، سطح اراضی آبی هر شهرستان به سطح کل اراضی آبی آن شهرستان مشابه با پژوهش امینی باستانی و همکاران (۱۳۹۲) و افروزی و زارع ایبانه (۱۳۹۹)، تعیین و درصد اراضی آبی هر شهرستان در دشت همدان-بهار محاسبه شد. نتایج نشان داد که ۱۵ درصد از اراضی آبی شهرستان همدان و ۶۵ درصد اراضی آبی شهرستان بهار در دشت همدان-بهار واقع شده‌است؛ بنابراین، سطح زیر کشت محصولات مختلف در دشت تعیین شد که در جدول و شکل (۳) ارائه شده است. با توجه به این شکل، ملاحظه می‌شود که ۳۱ درصد از اراضی آبی دشت همدان-بهار تحت کشت گندم و ۲۳ درصد سیب‌زمینی و باقی‌مانده شامل محصولاتی مانند جو، یونجه، ذرت، سبزیجات و صیفی‌جات است.

آب زیرزمینی منبع اصلی مصارف کشاورزی، خانگی و صنعتی است و مصارف کشاورزی با میزان ۸۸/۷ درصد عمده‌ترین مصرف در دشت همدان-بهار را تشکیل می‌دهد. از جمله محصولات عمده آبی در دشت همدان-بهار، گندم، یونجه، سیب‌زمینی، جو، سیر، خیار، هندوانه، کدو تنبل، چغندرقد، کلزا، ذرت دانه‌ای و لوبیا است که اطلاعات مربوط به سطح زیرکشت، میزان نیاز آبی هر محصول در یک هکتار، آب‌بها، کلیه هزینه‌های کاشت، داشت و برداشت و عملکرد پتانسیل و قیمت تضمینی هر محصول از سازمان جهاد کشاورزی-واحد برنامه‌ریزی دریافت شد. سطح زیر کشت ارائه‌شده در دفترچه جهاد کشاورزی بر اساس مرز شهرستان‌ها است، از سوی، دشت همدان-بهار بخش‌هایی از دو شهرستان همدان و بهار را

جدول ۳- سطح زیر کشت محصولات آبی دشت همدان- بهار به تفکیک محصولات عمده (هکتار)
Table 3- Cultivated area of major irrigated crops in the Hamedan-Bahar plain (ha)

سبزیجات Vegetables	صیفی جات Summer crops	ذرت Maize	جو Barely	یونجه Alfalfa	سیب‌زمینی Potato	گندم Wheat	محصولات آبی Irrigated Crops شهرستان County
1163	211	135	4620	5285	4300	7250	همدان Hamedan
1273	766	213	4621	3570	5940	7084	بهار Bahar
1238	600	189/6	4620	4084	5448	7133	دشت همدان-بهار Hamedan-Bahar Plain



شکل ۳- درصد سطح زیرکشت محصولات زراعی آبی در دشت همدان-بهار

Figure 3- Percentage of cultivated area under irrigated crops in the hamedan-bahar plain

بافت خاک در دشت همدان-بهار

در دشت همدان-بهار بیشترین مساحت مربوط به محدوده‌های لومی و لومی رسی است و در مقابل، بافت رسی کمترین مساحت را به خود اختصاص می‌دهد. با توجه به بافت خاک منطقه، مقدار متوسط پارامترهایی از جمله رطوبت حجمی ظرفیت زراعی $\theta(F_C)$ ، رطوبت حجمی نقطه پژمردگی θ_{WP} ، رطوبت حجمی اشباع θ_S ، به ترتیب برابر با ۰/۲۵، ۰/۱۲، و ۰/۲۹ برآورد شد (FAO,56).

نیاز آبی محصولات

به‌منظور محاسبه تبخیر-تعرق گیاهی در برآورد نیاز آبی، از رابطه (۱) استفاده شد در این رابطه، K_C ضریب گیاهی (بدون بعد) و ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر در روز)، هست که ET_0 و K_C برای محصولات عمده در دشت همدان-بهار از سامانه نیاز آب برآورد شد.

$$ET_{crop} = K_C \cdot ET_0 \quad (1)$$

K_C به عواملی از جمله مرحله رشد گیاه و شرایط آب و هوایی منطقه بستگی دارد. مقادیر ضریب گیاهی در مرحله ابتدائی رشد (K_C-ini)، مرحله توسعه (K_C-dev)، مرحله

میانی رشد (K_C-mid) و مرحله نهایی رشد (K_C-end) مطابق پیشنهاد فائو، برآورد شد و در جدول (۴) ارائه شد. بر اساس نشریه FAO-56 مراحل رشد گیاه به ترتیب زیر تعریف می‌شوند:

مرحله اولیه: مرحله اولیه از تاریخ کاشت تا تقریباً ۱۰٪ پوشش زمین ادامه دارد. طول دوره اولیه به شدت به نوع محصول، رقم محصول، تاریخ کاشت و آب‌وهوا بستگی دارد.

توسعه گیاه: از پایان مرحله اولیه تا زمانی که پوشش گیاه تقریباً کامل شود ادامه دارد. در این دوره، رشد گیاه سریع است، سطح برگ‌ها افزایش می‌یابد و تبخیر و تعرق هم‌زمان زیاد می‌شوند.

میانه رشد: این مرحله شامل دوره رشد کامل گیاه و شروع گل‌دهی یا باردهی است. مرحله میانه رشد طولانی‌ترین مرحله برای گیاهان چندساله و بسیاری از گیاهان یک‌ساله است و K_C به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

مرحله انتهایی رشد: از آغاز رسیدن یا زرد شدن گیاه تا برداشت ادامه دارد. در این مرحله سطح برگ‌ها کاهش یافته و تعرق کم می‌شود.

جدول ۴- ضرایب گیاهی (آلن و همکاران، ۱۹۹۸)
Table 4- Crop coefficients (Kc) (Allen et al., 1998)

حد اکثر ارتفاع گیاه h (m)	انتهایی K _{C-end}	میانی K _{C-mid}	توسعه K _{C-dev}	ابتدایی K _{C-ini}	محصول Crop
1	0.7	1.04	0.81	0.45	گندم (زمستانه) Winter Wheat
1	0.58	1.04	0.57	0.46	جو (زمستانه) Winter Barley
0.6	0.76	1.05	0.75	0.43	سیبزمینی Potato
0.7	0.70	1.03	0.83	0.55	یونجه Alfalfa
0.3	0.73	0.99	0.32	0.29	سیر Garlic
0.3	0.70	0.99	0.73	0.52	خیار Cucumber
2	0.79	1.04	0.8	0.51	ذرت علوفه‌ای Forage Maize

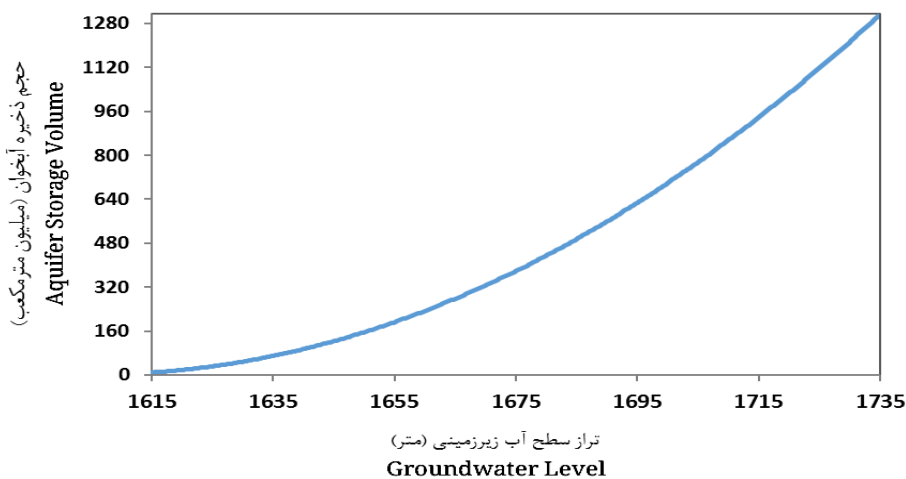
عملکرد محصول

در این پژوهش، به منظور محاسبه عملکرد سالانه محصول از رابطه (۲) بر اساس نشریه فنی FAO33 استفاده شد. در این رابطه، Y_a و Y_m به ترتیب عملکرد واقعی و پتانسیل محصولات کشت شده در منطقه (کیلوگرم در هکتار) و ET_0 و ET_a به ترتیب تبخیر-تعرق واقعی و تبخیر-تعرق گیاه مرجع و K_y ضریب حساسیت به تنش آبی و بی بعد است.

$$Y_a = Y_m \left[1 - K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_0} \right) \right] \quad (2)$$

منحنی تراز- حجم آبخوان

برای بررسی تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی، داده‌های مربوط به تراز سطح ایستابی آبخوان همدان-بهار از واحد مطالعات شرکت آب منطقه‌ای استان همدان دریافت و در مقابل حجم ذخیره آبخوان ترسیم شد. بدین منظور برای محاسبه حجم آبخوان با استفاده از نقشه اتوکدی آبرفت آبخوان یادشده، ابتدا مقادیر سطوح مخزن در هر تراز ارتفاعی برآورد و سپس بر اساس رابطه تراز- سطح و مقدار ضریب ذخیره آبخوان (۰/۰۵) حجم آب محصور بین هر دو خط تراز محاسبه و در نهایت حجم‌های به دست آمده در مقابل تراز سطح آب نسبت به سطح دریا ترسیم و در شکل (۴) ارائه شد.



شکل ۴- تراز سطح آب و حجم آبخوان در دشت همدان-بهار

Figure 4- Groundwater level and aquifer storage volume in the Hamedan-Bahar plain

روش پویایی سیستم

روش پویایی سیستم با درک تعاملات بازخورد ذاتی و رفتارهای غیرخطی سیستم، یک رویکرد قوی و تحلیلی برای درک و مدیریت سامانه‌های پیچیده ارائه می‌دهد (شین و همکاران، ۲۰۲۲). در این روش، از حلقه‌های بازخورد برای ارزیابی ارتباط بین اجزای سیستم استفاده می‌شود که شامل یک حلقه بازخورد مثبت (تقویت‌کننده) یا یک حلقه بازخورد منفی (متعادل‌کننده) است. در تحقیق حاضر، از محیط برنامه‌نویسی Vensim که از سری نرم‌افزارهای مناسب برای ارزیابی پویایی سامانه‌ها هست، استفاده شد. این ابزار یک محیط مدل‌سازی شیء‌گرا است که امکان ایجاد مدل‌های پیچیده منابع آب را با سهولت بیشتری نسبت به زبان‌های برنامه‌نویسی مرسوم به وجود می‌آورد. این نرم‌افزار می‌تواند به‌طور هم‌زمان به حل معادلات غیرخطی بین چندین متغیر بپردازد. با استفاده از این نرم‌افزار، حلقه‌های علت و معلولی (CLDS) را می‌توان به نمودارهای ذخیره و جریان (SFDS) تبدیل کرد. روش SD با حل تکراری معادلات دیفرانسیل موجود در سیستم به روش تفاضل محدود رفتار را در دوره شبیه‌سازی نشان می‌دهد. به‌طوری‌که بعد از اجرای مدل، رفتار تمامی متغیرهای موجود قابل ملاحظه خواهد بود. نرم‌افزار یادشده تحلیل حساسیت نتایج را به‌صورت تصویری به همراه قابلیت‌های مختلف پشتیبانی تصمیم‌گیری ارائه می‌دهد.

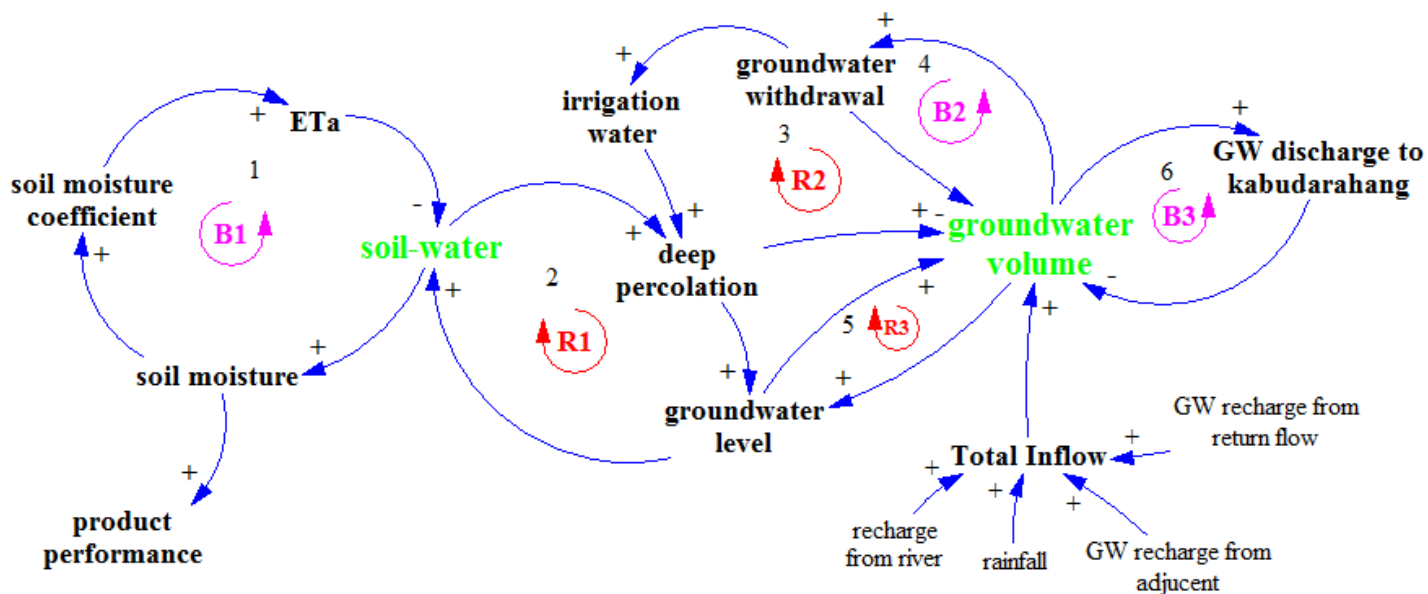
ساختار مدل

هدف مدل‌سازی در این تحقیق ایجاد و توسعه یک مدل شبیه‌سازی برای منطقه مورد مطالعه و همچنین بهینه‌سازی مدل برای بهره‌برداری پایدار از آب زیرزمینی دشت همدان-بهار، از طریق تعیین الگوی کشت بهینه، با هدف حفظ حداکثر درآمد خالص کشاورزان و با در نظر

گرفتن محدودیت برداشت از آب زیرزمینی و حفظ تعادل تراز سطح آب زیرزمینی است.

حلقه‌های علت-معلولی

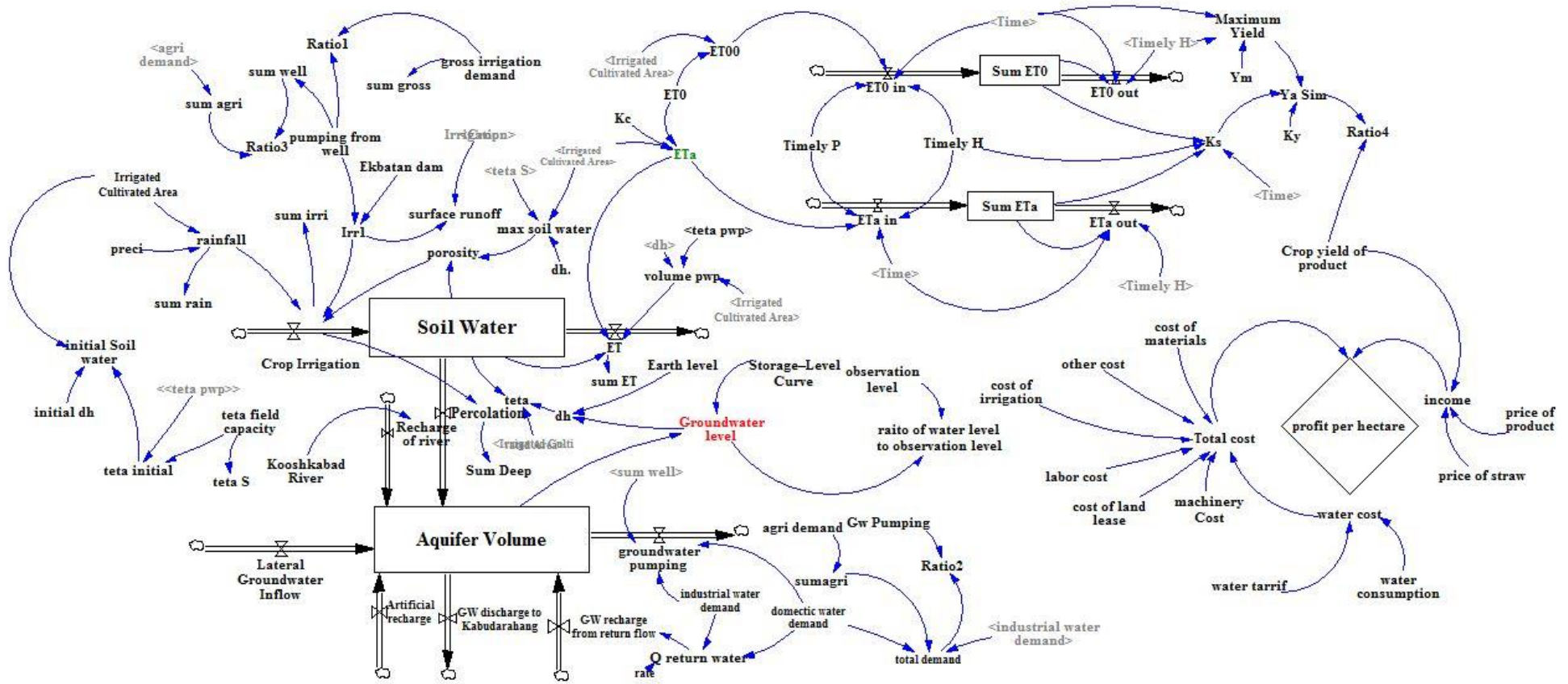
در روش SD، روابط کیفی پارامترهای یک سیستم با حلقه‌های علی به تصویر کشیده می‌شود. قطبیت روابط به‌صورت مثبت (R) یا منفی (B) مشخص می‌گردد به‌طوری‌که رابطه مثبت نشان‌دهنده تغییر هم‌جهت و رابطه منفی نشان‌دهنده تغییر خلاف جهت بین متغیر علت و معلول است (مهدوی‌نیا و مختار، ۲۰۱۹). حلقه‌های علت و معلولی دشت همدان-بهار که شامل محیط آب-خاک و آبخوان بوده به‌صورت شکل (۵) ارائه شده است. در این نمودار، سه حلقه تقویت‌کننده (حلقه‌ی مثبت) و سه حلقه متعادل‌کننده (حلقه‌ی منفی) وجود دارد. حلقه اول، تعامل بین تبخیر-تعرق واقعی و ذخیره آب-خاک را نشان می‌دهد و از نوع منفی است. حلقه دوم بیانگر اثر ذخیره آب-خاک بر نفوذ عمقی و تراز آب زیرزمینی است. حلقه سوم نیز به اثر برداشت آب زیرزمینی و نفوذ ناشی از آبیاری در اراضی کشاورزی مربوط بوده و یک حلقه تقویت‌کننده ایجاد می‌کند. در حلقه چهارم، رابطه بین حجم ذخیره آبخوان و برداشت از چاه‌ها نشان داده شده است. حلقه پنجم ارتباط مستقیم بین ذخیره آب زیرزمینی و تراز آب را بیان می‌کند. در نهایت، حلقه ششم اثر تخلیه آبخوان به دشت کبودرآهنگ را نشان می‌دهد که منجر به کاهش ذخیره آب زیرزمینی می‌شود. لازم به ذکر است که در این پژوهش برای جلوگیری از تکرار ساختارهای مدل‌سازی، از قابلیت Subscript در نرم‌افزار استفاده شده است. به این ترتیب، ساختار مدل برای هفت محصول زراعی، یکسان در نظر گرفته شده و تنها مقادیر ورودی و پارامترها متفاوت هستند.



شکل ۵- حلقه‌های علت-معلولی محیط آب-خاک و آبخوان دشت همدان-بهار
Figure 5- Causal loop diagrams of the soil-water system and the Hamedan-Bahar aquifer

نمودار حالت-جریان
شکل (۶) نمودار حالت-جریان محیط آب-خاک و آبخوان را در این پژوهش نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که محیط آب-خاک (soil-water) و حجم ذخیره آبخوان نیز به صورت کمکی بوده که در جدول (۵) ارائه شده است.

نمودار حالت-جریان
شکل (۶) نمودار حالت-جریان محیط آب-خاک و آبخوان را در این پژوهش نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که محیط آب-خاک (soil-water) و حجم ذخیره آبخوان نیز به صورت کمکی بوده که در جدول (۵) ارائه شده است.



شکل ۶- نمودار حالت و جریان محیط آب-خاک و آبخوان دشت همدان-بهار

Figure 6- Stock and flow diagram of the soil-water environment and the Hamedan-Bahar aquifer

جدول (۵) - مشخصات متغیرهای استفاده شده در نمودار حالت-جریان شکل (۶)

Table 5- Specifications of variables used in the state-flow diagram of figure (6)

پارامتر Parameter	توضیحات Description	واحد Unit
Soil Water	محیط آب-خاک (لایه غیراشباع)	MCM
Crop Irrigation	حجم آب مورد نیاز برای آبیاری محصولات دشت	MCM/Month
ET	حجم تبخیر-تعرق از سطح خاک و گیاه	MCM/Month
Percolation	نفوذ عمقی از لایه غیراشباع به آبخوان	MCM/Month
Aquifer Volume	حجم ذخیره آبخوان	MCM
Recharge of river	تغذیه از رودخانه و آب سطحی	MCM/Month
Lateral Groundwater Inflow	جریان ورودی آب زیرزمینی از مرزهای جانبی	MCM/Month
Artificial recharge	تغذیه مصنوعی آبخوان	MCM/Month
GW recharge from return flow	تغذیه آبخوان از طریق جریان بازگشتی (شرب و صنعت)	MCM/Month
GW discharge to Kabudarahang	تخلیه به دشت کبودرآهنگ	MCM/Month
Groundwater pumping	برداشت ماهانه از آبخوان برای مصارف کشاورزی، شرب و صنعت	MCM/Month
Groundwater level	تراز سطح آب زیرزمینی	M
Storage-Level Curve	منحنی حجم-تراز برای محاسبه تراز سطح آب	M
Profit per hectare	سود خالص حاصل از فروش محصولات	Rial/hectare

که در آن‌ها: n تعداد ماه‌های دوره مورد مطالعه، Y_m مقادیر اندازه‌گیری شده در هر ماه، Y_p مقادیر پیش‌بینی شده با مدل Vensim، \bar{Y}_m میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده و \bar{Y}_p میانگین داده‌های پیش‌بینی شده است.

محاسبه شاخص‌های بهره‌وری آب

به منظور ارزیابی کارایی مصرف آب در سیستم آب-خاک و آبخوان دشت همدان-بهار، از شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی (WP_p) و بهره‌وری اقتصادی آب (WP_e) استفاده شد. این شاخص‌ها به عنوان معیارهای مکمل در مقایسه نتایج شبیه‌سازی سناریوهای مدیریتی به کار گرفته شدند (اسلامی و همکاران، ۱۴۰۳).

$$WP_p = \frac{Y}{W} \quad (۸)$$

$$WP_e = \frac{NP}{W} \quad (۹)$$

که در آن‌ها: Y عملکرد کل محصول (کیلوگرم بر هکتار)، W حجم آب مصرفی (متر مکعب در هکتار)، NP سود خالص حاصل از فروش محصول (میلیون ریال) است.

ارزیابی مدل

در این پژوهش، به منظور اطمینان از عملکرد مدل از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، خطای استاندارد (SE) و ضریب کارایی نش-ساتکلیف (EF) و درصد بایاس (PBIAS) مطابق معادلات ۳ الی ۷ استفاده شد (سیفی و همکاران، ۲۰۲۰، تران-چاوز و همکاران، ۲۰۲۲). استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_m - Y_p)^2}{n}} \quad (۳)$$

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{Y}_m} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_m - Y_p)^2}{n}} \quad (۴)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Y_m - \bar{Y}_m)(Y_p - \bar{Y}_p)]^2}{\sum_{i=1}^n (Y_m - \bar{Y}_m)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Y_p - \bar{Y}_p)^2} \quad (۵)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_m - Y_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_m - \bar{Y}_m)^2} \quad (۶)$$

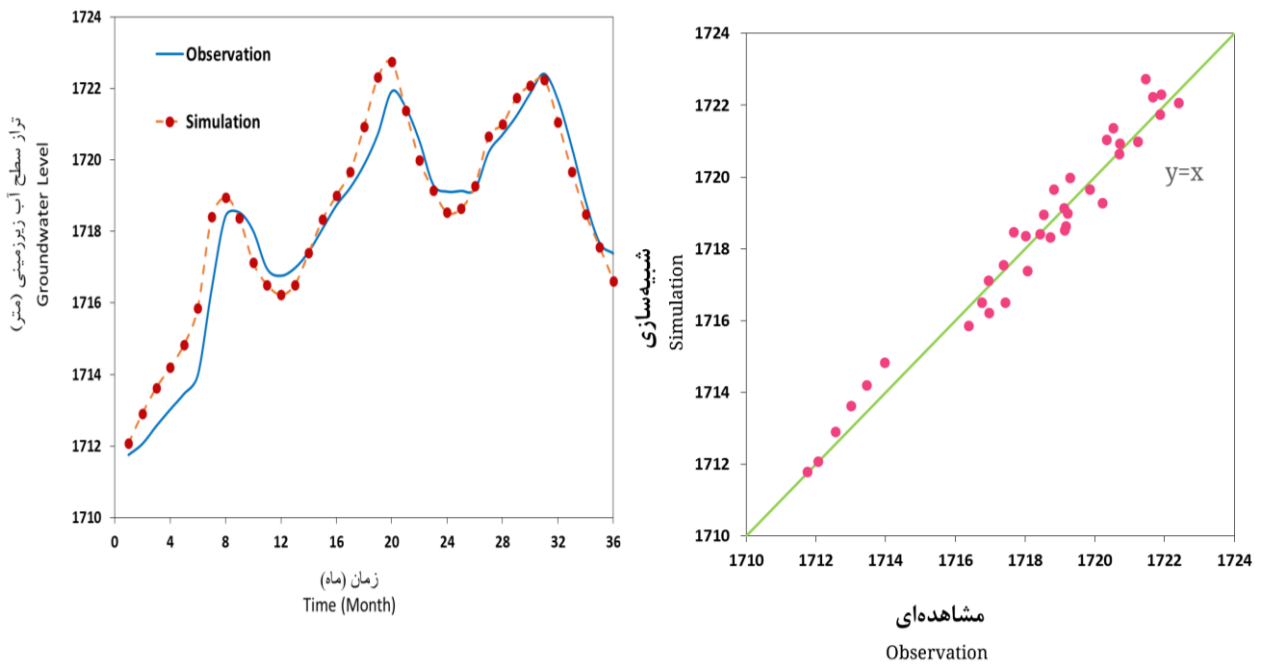
$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_m - Y_p)}{\sum_{i=1}^n Y_p} * 100 \quad (۷)$$

نتایج و بحث

نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل

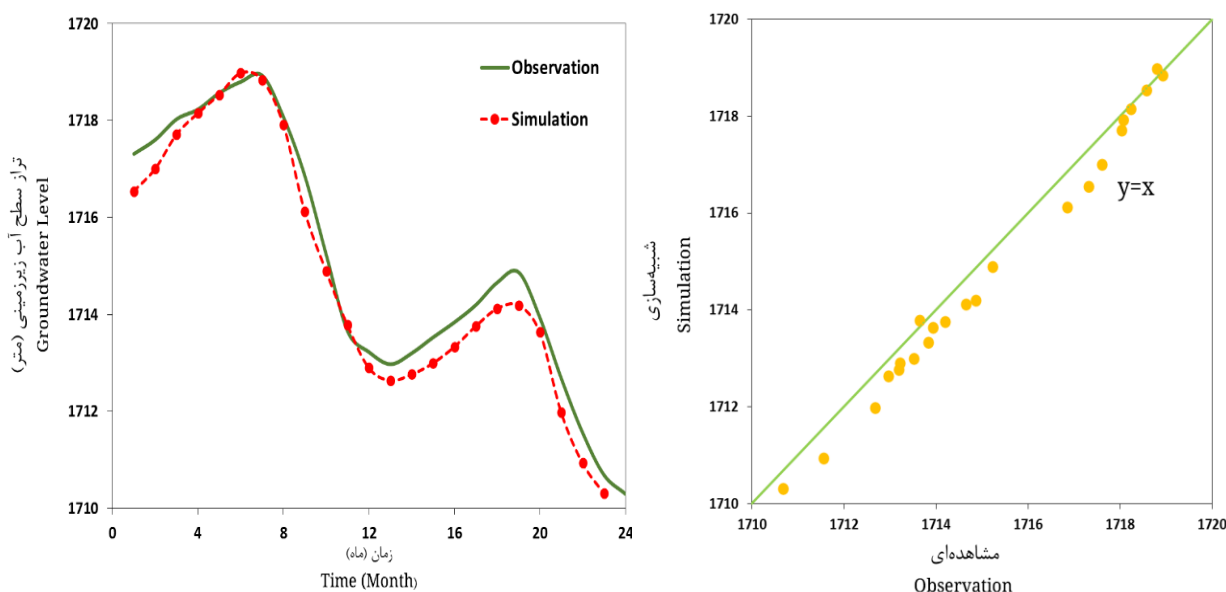
به‌منظور بررسی انطباق نتایج شبیه‌سازی با داده‌های مشاهده‌ای ابتدا مدل برای دوره سه‌ساله (۱۳۹۷-۱۴۰۰) واسنجی و سپس برای دوره دو ساله (۱۴۰۲-۱۴۰۰) اعتبارسنجی شد. شاخص‌های ارزیابی، $RMSE$ ، $NRMSE$ ، EF ، R^2 و $PBIAS$ برای تراز سطح آب در دوره واسنجی به ترتیب برابر با ۰/۵۷، ۰/۰۲، ۰/۹۶، ۰/۹۶ و ۰/۰۵۶- برای اعتبارسنجی، مقادیر این شاخص‌ها به ترتیب برابر با ۰/۴۵، ۰/۰۱، ۰/۹۹/۹۹، ۰/۰۵۴ (همگی بی‌بعد) هست. مقادیر پایین $RMSE$ و $NRMSE$ نشان‌دهنده خطای کم مدل در شبیه‌سازی تراز سطح آب

زیرزمینی است. همچنین مقادیر بالای EF و R^2 بیانگر انطباق مناسب داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و دقت مطلوب مدل است. از سوی دیگر، مقادیر بسیار کوچک $PBIAS$ نشان‌دهنده ناچیز بودن سوگیری مدل بوده، به‌طوری‌که مقدار منفی این شاخص در دوره واسنجی بیانگر بیش‌برآوردی و مقدار مثبت آن در دوره اعتبارسنجی نشان‌دهنده کم‌برآوردی مدل است. همچنین برای مقایسه بهتر نتایج، خط نیمساز نیز در شکل‌های (۷) و (۸) ترسیم شد. با توجه به نزدیکی داده‌ها به خط نیمساز می‌توان چنین استنباط کرد که مدل یادشده در شبیه‌سازی توأمان محیط آب-خاک و آبخوان همدان-بهار دارای دقت بالایی است.



شکل ۷- تراز آب زیرزمینی مشاهده و شبیه‌سازی شده (واسنجی)

Figure 7- Comparison of observed and simulated groundwater levels during the calibration period

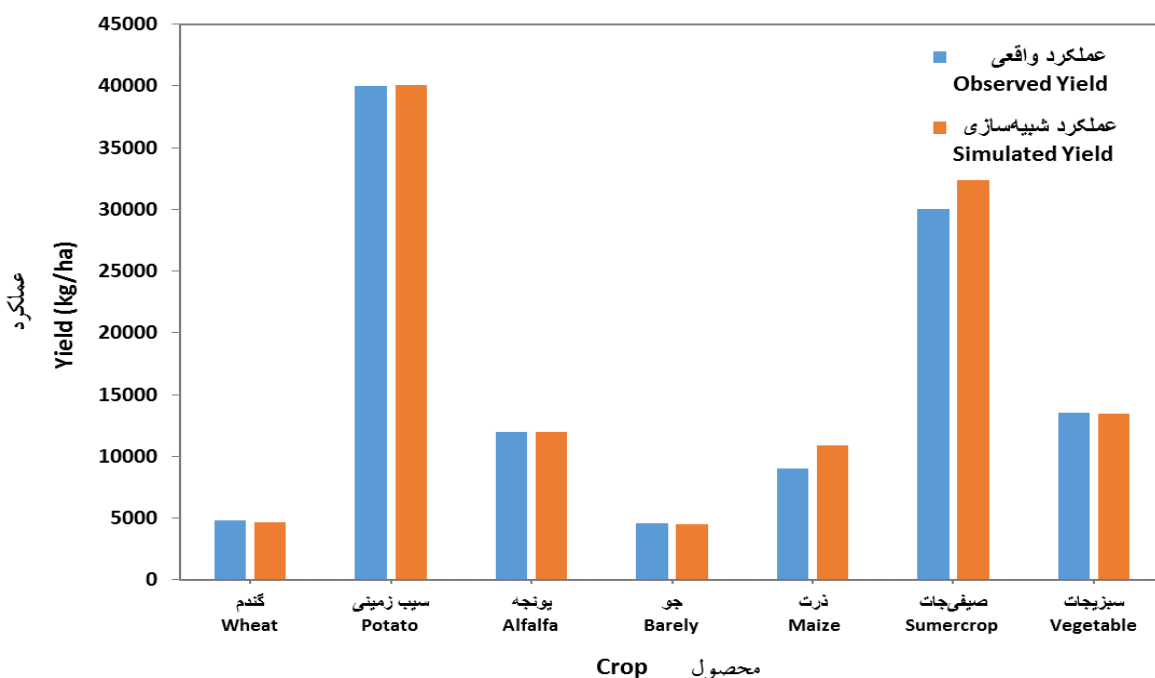


شکل ۸- تراز آب زیرزمینی مشاهده و شبیه‌سازی شده (اعتبارسنجی)
 Figure 8- Comparison of observed and simulated groundwater levels during the validation period

عملکرد واقعی شاخص‌های آماری، $RMSE$ ، $NRMSE$ و R^2 در سال زراعی (۱۳۹۷-۹۸) محاسبه شد. این شاخص‌ها به ترتیب برابر با $۴۳۳/۲۸$ (کیلوگرم بر هکتار)، $۰/۰۳$ و $۰/۹۹$ محاسبه شد که بیانگر دقت بالای نتایج مدل نسبت به شرایط واقعی است (شکل ۹).

شبیه‌سازی عملکرد محصول

پس از شبیه‌سازی محیط آب-خاک و آبخوان دشت همدان-بهار و اعتبارسنجی نتایج حاصل از مدل، با اضافه کردن زیرسیستم مربوط به عملکرد محصول به مدل اصلی، عملکرد مدل شبیه‌ساز بررسی و برای مقایسه با



شکل ۹- عملکرد واقعی و شبیه‌سازی حاصل از مدل Vensim، محصولات در سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۸
 Figure 9- Comparison of observed and simulated crop yields using the Vensim model during the 2018-2019 crop year

قرار گرفت (جدول ۷). با توجه به مقادیر سود خالص ارائه شده در جدول یاد شده برای هفت محصول در پنج سال زراعی، می‌توان مطرح نمود، مدل در شبیه‌سازی هزینه و درآمد و در نهایت سود خالص عملکرد بالایی داشته است.

با توجه به هزینه‌های ثابت و متغیر و سود حاصل از فروش محصولات، میزان سود به هزینه برای هفت محصول منتخب در سال زراعی (۹۷-۱۳۹۸) الی (۱۴۰۱-۱۴۰۲) مطابق با نیاز آبی محصولات و پتانسیل برداشت از منابع آب زیرزمینی به کمک گزینه Subscript مورد بررسی

جدول ۷- میزان درآمد به هزینه محصولات عمده در دو حالت واقعی و نتایج حاصل از مدل Vensim

Table 7- Comparison of the Income-to-Cost Ratio of major agricultural products between actual conditions and Vensim model results

سبزیجات Vegetables	صیفی جات Summer Crops	ذرت Maize	جو Barley	یونجه Alfalfa	سیب‌زمینی Potato	گندم Wheat	محصول Crop	سال Year
1.20	1.18	1.07	1.07	1.08	1.11	1.16	واقعی Actual	1397-1398 2018-2019
1.20	1.27	1.29	1.05	1.07	1.11	1.12	شبیه‌سازی Simulated	
1.25	1.33	1.10	1.09	1.08	1.14	1.10	واقعی Actual	1398-1399 2019-2020
1.26	1.41	1.26	1.05	0.99	1.16	1.10	شبیه‌سازی Simulated	
1.41	1.46	1.20	1.19	1.08	1.27	1.19	واقعی Actual	1399-1400 2020-2021
1.44	1.50	1.39	1.19	1.05	1.21	1.19	شبیه‌سازی Simulated	
1.45	1.55	1.19	1.05	1.63	1.24	1.07	واقعی Actual	1400-1401 2021-2022
1.48	1.55	1.37	1.15	1.66	1.18	1.09	شبیه‌سازی Simulated	
1.21	1.06	1.24	1.23	1.15	1.27	1.15	واقعی Actual	1401-1402 2022-2023
1.23	1.08	1.43	1.38	1.22	1.23	1.15	شبیه‌سازی Simulated	

شد که آبیاری محصولات مطابق با نیاز آبی آن‌ها بر اساس آمار دریافت شده از سایت نیاز آب (ارائه شده در ستون دوم جدول ۸) و در سناریوی دوم، آبیاری با توجه به محدودیت میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی (مقدار مجاز و پتانسیل برداشت از آب زیرزمینی) مطابق یا تغذیه برای سال (۱۳۹۷-۱۳۹۸) الی (۱۴۰۱-۱۴۰۲) مطابق ستون سوم جدول (۸) تعریف و شبیه‌سازی شد و با آبیاری بر اساس شرایط واقعی مقایسه شد. از سویی، با توجه به عدم امکان تغییر ناگهانی الگوی کشت در منطقه، محدودیت ۱۵ درصد تغییر در سطح زیرکشت هر یک از محصولات دشت نسبت

اجرای مدل بهینه‌سازی

در نظر گرفتن سودآوری محصولات کشت شده از موارد مهمی است که برای کشاورزان یک منطقه اهمیت دارد. از سوی دیگر با توجه به منابع آب محدود و ممنوعه بودن دشت همدان-بهار از نظر حفر چاه جدید و بهره‌برداری غیرمجاز از آب زیرزمینی، الگوی کشتی را باید پیشنهاد نمود که باعث کاهش افت تراز سطح آب نشود و از سوی دیگر فروش محصولات برای کشاورزان صرفه اقتصادی داشته باشد. بدین منظور در این پژوهش دو سناریو در نظر گرفته شد. در سناریوی شماره یک، فرض

به شرایط فعلی در دو سناریوی اعمال شده در نظر گرفته شد و مدل برای پنج سال اجرا شد. بر اساس آمار ارائه شده در جدول (۸)، مشاهده می‌شود که پتانسیل برداشت از آبخوان دارای سیر نزولی بوده و ارائه الگوی کشت مناسب و جلوگیری از اضافه برداشت راهکاری حیاتی خواهد بود.

جدول ۸- پتانسیل برداشت آب زیرزمینی از آبخوان همدان-بهار

Table 8- Groundwater extraction potential of the Hamedan-Bahar aquifer

پتانسیل برداشت از آب زیرزمینی Groundwater extraction potential (MCM)	نیاز آبی Crop water requirement (MCM)	سال آبی Water year
285.66	157.04	1397-1398 2018-2019
262.33	163.25	1398-1399 2019-2020
203.85	232.44	1399-1400 2020-2021
192.10	267.07	1400-1401 2021-2022
172.04	223.17	1401-1402 2022-2023

قیمت تمام شده هر محصول بر حسب ریال بر کیلوگرم است.

در روابط (۱۲) و (۱۳)، CPC_c کل هزینه‌های صرف شده حاصل از کاشت (P_c)، داشت (G_c)، برداشت (H_c)، اجاره زمین (L_c)، آماده‌سازی زمین (Pre_c) همگی بر حسب (ریال بر هکتار)، W_p قیمت آب مصرفی هر یک از محصولات زراعی (ریال بر متر مکعب) و W_{co} مقدار آب مصرفی برای هر یک از محصولات زراعی (متر مکعب) است.

محدودیت‌ها

به منظور تعیین الگوی کشت بهینه و بهره‌برداری پایدار از منابع آب زیرزمینی، دو دسته محدودیت سطح زیرکشت و منابع آب زیرزمینی به صورت روابط (۱۴) و (۱۵) تعریف شد:

$$st: \sum_c A_c \leq TA \quad (14)$$

$$\sum_c [(GW_c * A_c)] \leq GWP \quad (15)$$

در رابطه (۱۴)، TA کل سطح زیر کشت منطقه مورد مطالعه بر حسب هکتار و در رابطه (۱۵) GW_c آب مورد نیاز برای آبیاری هر محصول بر حسب میلی متر و GWP پتانسیل آب

الگوی کشت بهینه دشت همدان-بهار تابع هدف

در این پژوهش، بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات با هدف بیشینه کردن نسبت سود به هزینه (سود اقتصادی) مطابق رابطه (۱۰) با استفاده از الگوریتم Powell در محیط برنامه‌نویسی VENSIM انجام شد.

$$MaxZ_i = \sum_c (Income_c / Cost_c) \quad (10)$$

که در آن: Z_i تابع درآمد به هزینه، c محصولات موجود در الگوی کشت، $Income_c$ درآمد حاصل از محصولات و $Cost_c$ کل هزینه‌های صرف شده بر حسب میلیون ریال است.

دو متغیر درآمد و هزینه به ترتیب مطابق روابط (۱۱) الی (۱۳) عبارت‌اند از:

$$Income_c = \sum_c (Y_{ac} * A_c * P_c) \quad (11)$$

$$Cost_c = \sum_c CPC_c * A_c \quad (12)$$

$$CPC = (P_c + G_c + H_c + L_c + Pre_c) + (W_p * W_{co}) \quad (13)$$

در رابطه (۱۱)، Y_{ac} عملکرد محصولات بر حسب کیلوگرم در هکتار، A_c مساحت هر محصول بر حسب هکتار، P_c

زیرزمینی در آبخوان همدان-بهار بر حسب میلیون متر مکعب است.

محدودیت فرمول (۱۴) مربوط به سطح زیر کشت محصولات است. این محدودیت بدین دلیل است که مجموع سطح زیر کشت همه محصولات از مساحت کل دشت بیشتر نشود. بر اساس محدودیت ارائه‌شده در رابطه (۱۵) میزان برداشت از سفره آب زیرزمینی در هر سال نباید از میزان تغذیه سالانه آبخوان بیشتر باشد تا سطح سفره ثابت بماند و منجر به افت تراز سطح آب زیرزمینی نشده و پایداری آبخوان حفظ شود.

برآورد پارامترهای اقتصادی

در این قسمت، زیرسیستم مربوط به هزینه‌های ثابت و متغیر، عملکرد و سود خالص حاصل از کشت هفت محصول عمده (گندم، سیب‌زمینی، یونجه، جو، ذرت، صیفی‌جات و سبزیجات) برای پنج سال آبی (۱۳۹۷-۱۳۹۸) الی (۱۴۰۱-۱۴۰۲) شبیه‌سازی و سپس مدل با توجه به دو سناریوی تعریف‌شده در سال آبی (۱۳۹۷-۱۳۹۸) بهینه‌سازی شد و نتایج حاصل با اعمال ۱۵ درصد تغییر در سطح زیرکشت در سال زراعی مبنا در جدول (۹) ارائه گردید لازم به توضیح است که محصول عمده در گروه صیفی‌جات، خیار و در گروه سبزیجات، سیر است.

جدول ۹- پارامترهای اقتصادی برآوردی برای سناریوهای مختلف (میلیون ریال)

Table 9- Estimated economic parameters under different scenarios (Million Rials)

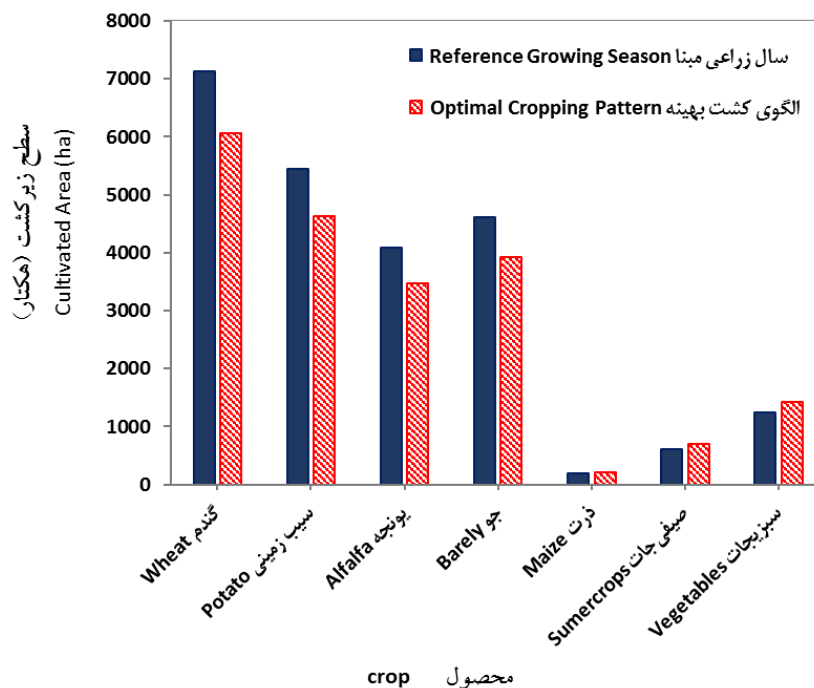
پتانسیل برداشت از آبخوان			نیاز آبی محصولات			مقادیر مشاهده‌ای			محصول زراعی Field Crop
Groundwater extraction potential			Crop water requirement			Observed values			
درآمد به هزینه B/C	هزینه Cost	درآمد Rev.	درآمد به هزینه B/C	هزینه Cost	درآمد Rev.	درآمد به هزینه Benefit-Cost	هزینه Cost	درآمد Revenue	
1.12	413,823	464,024	1.12	486,851	545,910	1.16	486,851	564,146	گندم Wheat
1.11	2,003,006	2,224,696	1.11	2,356,478	2,617,290	1.11	2,356,478	2,611,886	سیب‌زمینی Potato
1.07	559,894	600,553	1.07	658,699	706,533	1.08	658,699	708,496	یونجه Alfalfa
1.05	258,738	270,717	1.05	304,397	318,490	1.06	304,397	323,377	جو Barley
1.29	41,070	53,169	1.29	35,713	46,234	1.07	35,713	38,227	ذرت Maize
1.27	259,245	329,883	1.27	225,430	286,855	1.18	225,430	265,896	صیفی‌جات Summer Crops
1.20	495,350	592,662	1.20	430,739	515,358	1.20	430,739	518,129	سبزیجات Vegetables

با توجه به جدول (۹)، متوسط نسبت درآمد به هزینه محصولات برای سه حالت آبیاری بر اساس مقادیر مشاهده‌ای، نیاز آبی محصولات و پتانسیل برداشت از منابع آب زیرزمینی به ترتیب ۱/۱۲، ۱/۱۶ و ۱/۱۶ است. همچنین سود خالص محصولات زراعی در سه حالت یادشده به ترتیب ۵۳۱۸۴۸، ۵۳۸۳۶۳ و ۵۰۴۵۷۹ میلیون ریال

محاسبه شد. ملاحظه می‌شود که بیشترین مبلغ سود خالص مربوط به زمانی است که آبیاری با توجه به نیاز آبی محصولات صورت گیرد؛ بنابراین با توجه به میزان سود خالص، هزینه‌ها و ارزش آب زیرزمینی مصرفی می‌توان نتیجه گرفت که مصرف آب با توجه به نیاز آبی گیاه، بیشترین عملکرد را از نظر اقتصادی دارا است. پس از تعیین

Vensim، الگوی کشت اعمال شده واقعی با الگوی کشت بهینه حاصل از مدل مقایسه و در شکل (۱۰) ارائه شد.

الگوی کشت بهینه پیشنهادی با اعمال تغییر ۱۵ درصدی در سطح زیر کشت محصولات در دشت همدان-بهار با مدل



شکل ۱۰- مقایسه الگوی کشت بهینه مدل و الگوی کشت واقعی

Figure 10- Comparison between the model-optimized and actual cropping patterns

شکل (۱۰)، حداکثر سطح زیرکشت مجاز به هریک از سه محصول یاد شده اختصاص داده شده است. این امر به دلیل نسبت درآمد به هزینه بالای این سه محصول به ترتیب برابر ۱/۲۹، ۱/۲۷ و ۱/۲۰ است که آن‌ها را به سودآورترین محصولات منطقه تبدیل کرده است؛ بنابراین، افزایش سطح زیرکشت این محصولات بیشترین تأثیر را در تحقق اهداف مدل، یعنی بیشینه‌سازی سود خالص و کاهش برداشت از آبخوان، خواهد داشت.

بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب آبیاری

با توجه به عملکرد و سطح زیرکشت محصولات ارائه شده در جدول (۱۰)، شاخص بهره‌وری فیزیکی آب (کیلوگرم بر مترمکعب) و شاخص اقتصادی آب (ریال بر مترمکعب) محاسبه و نتایج آن در جدول (۱۱) ارائه شد.

در شکل یاد شده مشاهده می‌شود که سطح زیرکشت سه محصول ذرت، صیفی جات و سبزیجات نسبت به شرایط واقعی افزایش یافته است. بالاترین سطح زیرکشت حاصل از تغییر ۱۵ درصدی برای این سه محصول به ترتیب برابر با ۲۱۸/۰۴، ۶۹۰ و ۱۴۲۳/۷ هکتار است. در راستای دستیابی به بیشترین نسبت درآمد به هزینه و کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی، مجموع سطح زیرکشت محصولات آبی منطقه مورد مطالعه برابر با ۲۰۴۲۴ هکتار تعیین شد. انتظار می‌رود مدل به منظور حفظ محدودیت برداشت از آب زیرزمینی و حداکثر سازی سود خالص تمایل به کاهش سطح زیرکشت محصولات با نسبت درآمد به هزینه پایین و افزایش سطح زیرکشت محصولات با سود خالص بالاتر داشته باشد. نتایج همچنین بیانگر کاهش سطح زیرکشت در تمامی محصولات به جز ذرت، صیفی جات و سبزیجات است؛ به عبارت دیگر، مطابق نمودار ارائه شده در

جدول ۱۰- عملکرد، سطح زیر کشت و الگوی کشت بهینه محصولات زراعی
Table 10- Yield, cultivated area, and optimal cropping pattern for crops

ردیف No.	نام محصول Crop name	عملکرد (کیلوگرم در هکتار) Yield (kg ha ⁻¹)	سطح زیر کشت (هکتار) Cultivated area (ha)	الگوی کشت پیشنهادی (هکتار) Optimal cropping pattern (ha)
1	گندم Wheat	4800	7133	6063
2	سیب‌زمینی Potato	40000	5448	4631
3	یونجه Alfalfa	12000	4084	3471
4	جو Barley	4600	4620	3927
5	ذرت Maize	9000	189.6	218
6	سبزیجات Vegetables	30000	600	690
7	صیفی‌جات Summer Crops	13500	1238	1424

جدول ۱۱- نتایج بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب برای محصولات زراعی
Table 11- Physical and economic water productivity results for agricultural crops

سناریو Scenario	سود خالص کل Net profit (Million Rials)	آب مصرفی Irrigation water use (MCM)	بهره‌وری فیزیکی Physical water productivity (kg m ⁻³)	بهره‌وری اقتصادی Economic water productivity (Rials m ⁻³)
شرایط واقعی Actual conditions	531848	151.6	2.37	3508
نیاز آبی Crop water requiremen	538363	124.62	2.88	4320
محدودیت برداشت Groundwater extraction limit	504579	107	2.96	4716

نتایج نشان می‌دهد که با کاهش مصرف آب و مدیریت بهینه برداشت، حتی با وجود کاهش جزئی سود خالص، کارایی اقتصادی و فیزیکی مصرف آب به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد.

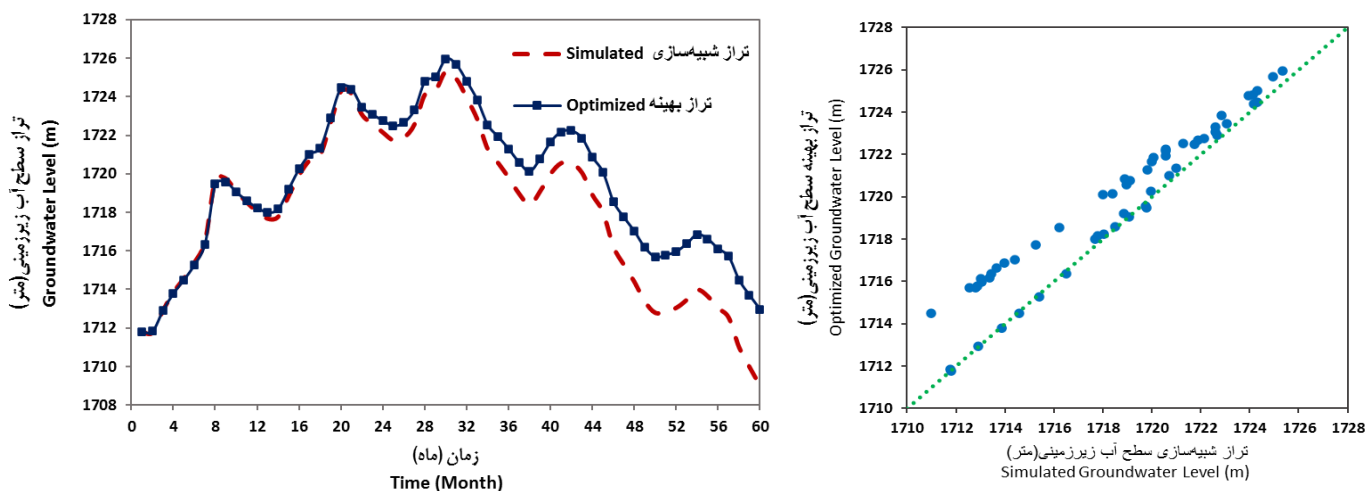
بهبود شرایط آبخوان

شکل (۱۱) تغییرات تراز آب زیرزمینی آبخوان همدان-بهار را در دو حالت شبیه‌سازی و بهینه‌سازی حاصل از اجرای مدل طی دوره پنج‌ساله ۱۳۹۷ الی ۱۴۰۲ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اعمال الگوی کشت پیشنهادی در بازه زمانی ۳۶ الی ۶۰ منطبق بر سال‌های

همان‌طور که مشاهده می‌شود، شاخص بهره‌وری اقتصادی آب برای کل دشت همدان-بهار در شرایط واقعی برابر با ۳۵۰۸ ریال بر متر مکعب بوده، درحالی‌که این شاخص در سناریوی آبیاری مطابق با نیاز آبی به حدود ۴۳۲۰ ریال بر متر مکعب افزایش یافته است. بیشترین مقدار بهره‌وری اقتصادی آب مربوط به سناریوی محدودیت برداشت از منابع آب زیرزمینی با مقدار تقریبی ۴۷۱۶ ریال بر متر مکعب است. همچنین بالاترین میزان شاخص بهره‌وری فیزیکی آب آبیاری برای کل دشت یادشده مربوط به سناریوی محدودیت برداشت بوده که برابر با ۲/۹۶ کیلوگرم به ازای هر واحد متر مکعب آب مصرفی است.

اجرای این الگو موجب افزایش تراز سطح آب زیرزمینی به میزان حدود سه متر در پایان دوره مذکور شده است.

زراعی ۱۴۰۰ الی ۱۴۰۲ که در آن میزان نزولات از ۵۱۱/۵۴ به ترتیب به ۲۰۸/۶۳، ۲۴۱/۷۵ میلی متر کاهش یافته است می تواند نقش مؤثری در بهبود وضعیت آبخوان داشته باشد.



شکل ۱۱- مقایسه تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی حاصل از مدل Vensim در دشت همدان-بهار
Figure 11- Comparison of simulated and optimized groundwater levels using the Vensim model in the Hamedan-Bahar plain

محدودیت‌های قانونی: به منظور تحقق الگوی کشت پیشنهادی، ضروری است که مراجع ذی‌ربط محدودیت‌های قانونی در زمینه استفاده از منابع آب و زمین را اعمال کند. بنابراین، تغییر الگوی کشت و تعادل بخشی آبخوان‌ها نیازمند برنامه‌ریزی جامع و همکاری بین‌سازمانی است تا این محدودیت‌ها شناسایی و برطرف شود.

محدودیت‌های شاخص بهره‌وری در بهینه‌سازی

در تولید محصولات کشاورزی، صرف درآمد زیاد و بهره‌وری اقتصادی، نمی‌تواند معیار مناسبی برای انتخاب الگوی کشت مناسب محصولات در مناطق مختلف باشد. برای مدیریت منابع آب در بخش کشاورزی نیز آگاهی از میزان شاخص بهره‌وری آب محصولات در مناطق مختلف شرط لازم است، ولی کافی نیست؛ بنابراین، با توجه به سیاست‌ها و اهداف کشور در زمینه‌هایی چون حفظ آب، تأمین امنیت غذایی، اشتغال‌زایی و ایجاد درآمد می‌توان بسته به هدف مورد نظر، از شاخص بهره‌وری آب استفاده کرد و تفسیرهای متفاوتی ارائه نمود. از این رو، در تحقیق

محدودیت‌های اجرایی تغییر الگوی کشت و تعادل بخشی آبخوان

تغییر الگوی کشت و تعادل بخشی آبخوان‌ها در کشور از اهمیت بالایی برخوردار است. با این حال، اجرای این تغییرات با محدودیت‌های متعددی مواجه است. از جمله مهم‌ترین این محدودیت‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه: تغییر الگوی کشت ممکن است مستلزم سرمایه‌گذاری‌های اولیه باشد که برای کشاورزان کوچک به‌ویژه دشوار است. علاوه بر این، عدم وجود بازار مناسب برای محصولات جدید می‌تواند انگیزه کشاورزان را کاهش دهد.

مقاومت در برابر تغییر: کشاورزانی که به الگوهای سنتی عادت کرده‌اند، ممکن است در پذیرش تغییرات دشواری‌هایی را تجربه کنند. در این راستا، اجرای تغییرات نیازمند آموزش و افزایش آگاهی در خصوص مزایای تغییر الگوی کشت است.

حاضر برای انتخاب الگوی کشت بهینه، علاوه بر شاخص‌های بهره‌وری آب، محدودیت میزان برداشت آب زیرزمینی نیز به‌عنوان یک معیار مهم زیست‌محیطی در نظر گرفته شد. انجام پژوهش‌های تکمیلی در راستای ارزیابی جامع و چندمعیاره با در نظر گرفتن سایر اهداف و ملاحظات پایداری ضروری است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج پژوهش بیانگر آن است که مدل پویایی سیستم از دقت مناسبی در شبیه‌سازی تراز سطح آب زیرزمینی و عملکرد محصولات برخوردار بوده و مقادیر شاخص‌های آماری در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی، انطباق مطلوب نتایج شبیه‌سازی با شرایط واقعی را تأیید می‌کند. همچنین، مدل توسعه‌یافته توانایی مناسبی در بررسی هم‌زمان شرایط آبخوان، محیط آب‌وخاک و عملکرد محصولات دارد.

بررسی شاخص‌های بهره‌وری آب حاکی از آن است که بهره‌وری اقتصادی آب از ۳۵۰۸ ریال بر مترمکعب در شرایط واقعی، به ۴۳۲۰ ریال بر مترمکعب در سناریوی آبیاری مطابق نیاز آبی و ۴۷۱۶ ریال بر مترمکعب در سناریوی محدودیت برداشت از منابع آب زیرزمینی افزایش یافته است. علاوه بر این، بیشترین مقدار بهره‌وری فیزیکی آب آبیاری مربوط به سناریوی محدودیت برداشت بود که بیانگر بهبود کارایی مصرف آب در اثر مدیریت بهینه برداشت از منابع آب زیرزمینی است. با این وجود، نتایج اقتصادی بیانگر آن بود که بیشترین نسبت سود به هزینه مربوط به سناریوی آبیاری بر اساس نیاز آبی محصولات است.

در مقایسه با سایر پژوهش‌ها که از روش پویایی سیستم برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی منابع آب استفاده کرده‌اند، اغلب تمرکز بر شبیه‌سازی آبخوان یا دشت به‌صورت منفرد و بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی بوده است. همچنین در برخی مطالعات انجام‌شده در دشت همدان-بهار نیز بیشتر تمرکز بر تحلیل بیلان آب زیرزمینی و اثر سیاست‌های مدیریتی بوده است (مانند بلالی و

همکاران، ۲۰۱۱؛ سیدان و همکاران، ۱۳۹۶؛ افروزی و همکاران، ۲۰۲۱؛ اسدآبادی و همکاران، ۱۳۹۸). درحالی‌که در پژوهش حاضر علاوه بر شبیه‌سازی آبخوان، محیط آب‌وخاک با در نظر گرفتن شرایط واقعی و همچنین زیرسیستم اقتصادی مدل به‌صورت یکپارچه در ساختار مدل توسعه‌یافته لحاظ شده است که این امر موجب جامعیت بیشتر مدل و امکان تحلیل هم‌زمان ابعاد هیدرولوژیکی و اقتصادی سیستم شده است.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، ادامه وضعیت فعلی بهره‌برداری می‌تواند موجب تداوم فشار بر آبخوان دشت همدان-بهار شود. در مقابل، اعمال تغییر ۱۵ درصدی در الگوی کشت، ضمن حفظ سود خالص حاصل از فروش محصولات، موجب بهبود تراز سطح آب زیرزمینی به میزان حدود ۳ متر و صرفه‌جویی سالانه ۲۶/۹۸ میلیون مترمکعب آب شد؛ بنابراین، اصلاح الگوی کشت، کنترل برداشت از منابع آب زیرزمینی و آبیاری متناسب با نیاز آبی محصولات می‌تواند نقش مؤثری در پایداری منابع آب زیرزمینی دشت همدان-بهار داشته باشد.

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده اثر تغییرات اقلیمی، عدم قطعیت پارامترهای مدل و توسعه سناریوهای مدیریتی جامع‌تر در راستای بهبود تصمیم‌گیری در مدیریت منابع آب مورد بررسی قرار گیرد. همچنین لحاظ منابع آب سطحی و بررسی تعامل آن‌ها با آب زیرزمینی می‌تواند تحلیل جامع‌تری از سیستم منابع آب دشت ارائه دهد. علاوه بر این، بررسی روند رشد تقاضای آب شرب و کشاورزی نیز می‌تواند در ارتقای دقت مدل مؤثر باشد. در نهایت، به‌کارگیری مدل‌های بهینه‌سازی ترکیبی و مقایسه نتایج آن با خروجی مدل پویایی سیستم توصیه می‌گردد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بدین‌وسیله مراتب سپاس و قدردانی خود را ابتدا از دانشگاه بوعلی سینا به دلیل حمایت مالی پروژه مذکور و همچنین سازمان جهاد کشاورزی استان همدان و مدیر محترم برنامه‌ریزی و بررسی‌های اقتصادی شرکت آب منطقه‌ای همدان، به‌دلیل همکاری در ارائه داده

و اطلاعات مورد نیاز پژوهش و نیز راهنمایی‌های ارزنده
در طول انجام این تحقیق، صمیمانه ابراز می‌دارند.
تعارض منافع
در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این
مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

فهرست منابع

۱. اسدآبادی، احسان، اسدی، علی و کلانتری، خلیل، ۱۳۹۸. مدل‌سازی پویای نظام آب‌های زیرزمینی در آبخوان همدان- بهار. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۰ (۹)، صص. ۲۳۳۳-۲۳۴۰.
- 10.22059/IJSWR.2019.273832.668096
۲. اسلامی، امیر، شیروانیان، عبدالرسول و زارعیان، غلامرضا، ۱۴۰۳. تأثیر اصلاح الگوی کشت بر بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب آبیاری محصولات زراعی در استان فارس (بررسی موردی: دشت قادراآباد-مادرسلیمان). *تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی*، ۲۵ (۹۴)، صص. ۱۷-۳۸.
- https://doi.org/10.22092/idser.2024.366325.1583
۳. افروزی، علی، ۱۴۰۰. مدل‌سازی آب زیرزمینی دشت همدان-بهار با رویکرد مدیریت جامع منابع آب و تغییر اقلیم. رساله دکتری، رشته مهندسی منابع آب- گرایش آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان.
- امینی‌بازبانی، سمیرا، زارع ایبانه، حمید و اکبری، مهدی، ۱۳۹۳. برآورد دما و شاخص پوشش گیاهی سطح زمین با استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدور (مطالعه موردی: استان همدان). *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۶ (۳)، صص. ۳۳۳-۳۴۸.
- doi:10.22059/jphgr.2014.52135
۴. جوزی، سید علی، عطائی، صدف و رونیاسی، نسیم، ۱۳۹۶. ارزیابی آسیب‌پذیری محیط زیستی آب‌های زیرزمینی دشت بهار همدان به روش‌های تلفیقی AVI و GODS، DRASTIC. *نشریه حفاظت و بهره‌برداری از منابع طبیعی*، ۶ (۲)، صص. ۶۵-۸۲.
- 10.22069/EJANG.2019.8270.1233
۵. دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا، سالنامه آماری آب کشور ۱۳۹۴-۱۳۹۳، صص. ۳۰۲.
۶. دفتر مطالعات پایه منابع آب، گروه مطالعات آب‌های زیرزمینی، شرکت سهامی آب منطقه‌ای همدان، ۱۴۰۱.
۷. سیدان، سیدمحسن و قدمی‌فیروزآبادی، علی، ۱۳۹۷. برآورد مبادله آب مجازی محصولات عمده زراعی (مطالعه موردی استان همدان). *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۹ (۱)، صص. ۱۰۲-۱۱۱.
۸. سیدان، سیدمحسن، کهنسال، محمدرضا، و قربانی، محمد، ۱۳۹۶. دستیابی به مسیر بهینه استحصال از منابع آب زیرزمینی با اعمال اثرات جانبی در دشت همدان- بهار. *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۸ (۱۵)، صص. ۱۹۱-۲۰۱.
۹. شرکت آب منطقه‌ای تهران، تهیه بیلان منابع آب منتهی به سال آبی ۹۸ - ۱۳۹۷ در حوضه آبریز دریاچه نمک، مطالعات آب‌های زیرزمینی، جلد سوم، خرداد ۱۴۰۲. صص. ۱۱۷.
۱۰. شرکت مهندسی مشاور آبخوان، معاونت مطالعات پایه منابع آب، مطالعات بهنگام سازی بیلان منابع آب حوزه آبریز دریاچه نمک، گزارش بیلان منابع آب محدوده مطالعاتی همدان-بهار (۴۱۱۷) مرداد ۱۳۹۲.
۱۱. شعبانی، محمدکاظم، عابدی کوپایی، جهانگیر، اسلامیان، سعید، گوهری، علیرضا. (۱۴۰۲). تأثیر تغییر الگوی کشت و بهبود راندمان سیستم‌های آبیاری بر کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی تحت سناریوهای تغییر اقلیم (مطالعه موردی: دشت کوار)، *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۶ (۱)، صص. ۴۷-۶۳.
- doi: 10.22055/jise.2022.38791.1994

۱۲. صرامی‌فروشانی، ترانه، بلالی، حمید و موحدی، رضا، ۱۴۰۰. ارزیابی شاخص‌های حکمرانی منابع آب زیرزمینی در بخش کشاورزی ایران: کاربرد چارچوب حکمرانی سازمان همکاری و توسعه اقتصادی در دشت همدان - بهار، *تحقیقات اقتصاد و توسعه کشاورزی ایران*، ۵۲(۳)، صص. ۶۱۵-۵۹۱.
- doi: 10.22059/ijaedr.2021.313265.668972**
۱۳. عزیزاده، امین، ۱۳۹۰. اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد. ص ۹۱۱.
۱۴. فتحی، سعید. شبیه‌سازی و ارزیابی اثرات انتقال آب از سد تالوار بر آبخوان دشت همدان-بهار، ۱۳۹۱، پایان‌نامه ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
۱۵. مازندرانی زاده، حامد و شکوهی‌فر، یاسمن، ۱۴۰۲. اثربخشی راهکارهای مدیریتی حفظ منابع آب زیرزمینی دشت مرودشت-خرامه با استفاده از پویایی سیستم‌ها. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴(۳)، صص. ۴۷۲-۴۵۵.
- 10.22059/ijswr.2023.351412.669399**
۱۶. مرادی، پریا، ۱۳۹۷. شبیه‌سازی و بهینه‌سازی عملکرد سد با استفاده از روش مدل‌سازی پویایی سیستم، مطالعه موردی سد تنظیمی و بند انحرافی دز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان.
۱۷. معززی، فاطمه، یآوری، غلامرضا، موسوی، سید حبیب‌الله و باقری، مهرداد، ۱۳۹۹. ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر کشاورزی دشت همدان-بهار با تأکید بر بهره‌وری آب و امنیت غذایی. *مجله اقتصاد و توسعه کشاورزی*، ۳۴(۳)، صص. ۳۰۵-۳۲۳.
- doi: 10.22067/jead.2020.17793.0**
۱۸. مهدوی نجف‌آبادی، عاطفه، ۱۳۹۶. ارائه الگوی کشت بهینه متناسب با پارامترهای خاک و اقلیم مبتنی بر مدیریت کیفی منابع آب زیرزمینی در دشت‌های همدان-بهار و شهرکرد. پایان‌نامه دکتری مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا.
۱۹. نظری، بیژن، لیاقت، عبدالمجید، پارسی نژاد، مسعود. (۱۴۰۰). ارزیابی اثر توسعه سیستم‌های آبیاری، سناریوهای الگوی کشت و کم‌آبیاری بر بهره‌وری آب در شبکه آبیاری قزوین به روش پویایی سیستم‌ها، علوم و مهندسی آبیاری، ۴۴(۴)، صص. ۱۰۸-۹۳.
- doi: 10.22055/jise.2020.28076.1819**
۲۰. نوذری، حامد و زالی، عادل، ۱۳۹۲. بررسی وضعیت برداشت از آب زیرزمینی آبخوان دشت همدان. *نشریه دانش آب و خاک*، ۲۳(۴) صص. ۲۹۰ - ۲۷۷.
۲۱. نوذری، حامد، آزادی، سعید و مازوجی، ندا. ۱۳۹۸، شبیه‌سازی روند کیفی کانال آبیاری نهر شعبان با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم. *مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۹(۳)، صص. ۲۲۳-۲۱۲.
۲۲. وفائی، مریم، نوذری، حامد و معروفی، صفر، ۱۳۹۹. تعیین حداقل قیمت آب شرب و بهینه‌سازی زمان جایگزینی لوله‌های شبکه توزیع آب شهری. *مجله آب و فاضلاب*، ۳۲(۳)، صص. ۳۹-۲۱.
23. Adly, N., Noiser, S., Kassem, N., Mahrous, M. and Salah, R. 2018. Modelling the optimal cropping pattern to 2030 under different climate change scenarios: A study on Egypt. *African Journal of Agricultural and Resource Economics*, 13(3), pp.224-239.
24. Afruzi, A., Zare Abyaneh, H. and Abdolabadi, H. 2021. Local strategies to manage groundwater depletion under climate change scenarios—a case study: Hamedan-Bahar Plain (Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 14(15), p.1548
25. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998). *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 56(97), e156.
26. Asadollahi, A., Sohrabifar, A., Ghimire, A.B., Poudel, B. and Shin, S., 2024. The impact of climate change and urbanization on groundwater levels: A system dynamics model analysis. *Environmental Protection Research*, pp. 1-15.

27. Balali, H., and Viaggi, D., 2015. Applying a system dynamics approach for modeling groundwater dynamics to depletion under different economical and climate change scenarios. *Water*, 7(10), pp. 5258-5271.
28. Balali, H., Khalilian, S., Viaggi, D., Bartolini, F. and Ahmadian, M., 2011. Groundwater balance and conservation under different water pricing and agricultural policy scenarios: A case study of the Hamadan-Bahar plain. *Ecological Economics*, 70(5), pp. 863-872.
29. FAO. (2017). the future of food and agriculture: Trends and Challenges. Rome, FAO.
30. Forrester, J.W. (1997). Industrial dynamics. *Journal of the Operational Research Society* 48(10), 1037–1041.
31. Huang, Y.H., Lai, Y.J. and Wu, J.H., 2022. A system dynamics approach to modeling groundwater dynamics: case study of the Choshui River basin. *Sustainability*, 14(3), p.1371.
32. Jia, X., O'Connor, D., Hou, D., Jin, Y., Li, G., Zheng, C., Ok, Y.S., Tsang, D.C. and Luo, J., 2019. Groundwater depletion and contamination: Spatial distribution of groundwater resources sustainability in China. *Science of the Total Environment*, 672, pp.551-562.
33. Mahdavinia, R. and Mokhtar, A., 2019. Dealing with sustainability in groundwater management using system dynamics approach, A case study in Iran. *Sustainable Water Resources Management*, 5(4), pp.1405-1417.
34. Mokhtar, A. and Aram, S., 2017. Systemic insights into agricultural groundwater management: Case of Firuzabad Plain, Iran. *Water Policy*, 19(5), pp.867-885.
35. Nozari, H., Moradi, P. and Godarzi, E., 2021. Simulation and optimization of control system operation and surface water allocation based on system dynamics modeling. *Journal of Hydroinformatics*, 23(2), pp.211-230.
36. Roberts, E. B. (1981). *Managerial Applications of System Dynamics* (No. 04; HD31, R6.).
37. Rath, A., Samantaray, S., and Swain, P. C. (2019). Optimization of the cropping pattern using cuckoo search technique. In *Smart Techniques for a Smarter Planet: Towards Smarter Algorithms* (pp. 19-35). Cham: Springer International Publishing.
38. Sarami-Foroushani, T., Balali, H., Movahedi, R., Kurban, A., Värnik, R., Stamenkovska, I.J. and Azadi, H., 2023. Importance of good groundwater governance in economic development: The case of western Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, 21, p.100892.
39. Scheihing, K.W., Fraser, C.M., Vargas, C.R., Kukurić, N. and Lictevout, E., 2022. A review of current capacity development practice for fostering groundwater sustainability. *Groundwater for Sustainable Development*, 19, p.100823.
40. Shin, S., Aziz, D., Jabeen, U., Bano, R. and Burian, S.J., 2022. A trade-off balance among urban water infrastructure improvements and financial management to achieve water sustainability. *Urban Water Journal*, 19(2), pp.195-207.
41. Xi, X. and Poh, K.L. 2013. Using system dynamics for sustainable water resources management in Singapore. *Procedia Computer Science*, 16:157-166.