Journal of Water and Soil Science
Vol. 29, No. 3, 2025, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. DOI: 10.47176/jwss.29.3.70011

Modeling the Quantitative and Qualitative Changes in Groundwater of Garmsar Plain Using the MODFLOW Model

Masoumeh Golestani, Sayed Farhad Mousavi* and Hojat Karami[1]

(Received: February 18-2025 ; Revised: April 26-2025 ; Accepted: July 19-2025)

1. Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
*: Corresponding author, Email: mousavi_sf@yahoo.com

Abstract

Groundwater is a vital resource for meeting drinking, agricultural, and industrial needs in arid and semi-arid regions of Iran. In this study, quantitative and qualitative changes in groundwater in the Garmsar Plain were modeled using GIS, MODFLOW, and MT3DMS software during the period 2011-2013. Spatial and climatic data were comprehensively processed and prepared in the GIS environment, and groundwater flow was simulated using the MODFLOW model, and water quality changes were analyzed using the MT3DMS model. After validation with field data from 2012 to 2013, the model showed acceptable accuracy with statistical indicators of mean absolute error (MAE) in the range of 0.4 to 0.5 meters and root mean square error (RMSE) between 0.5 and 0.6 meters. The modeling results showed that a 15% increase in water withdrawal led to a decrease in the water table of up to 8 meters, a constant withdrawal led to a decrease of 7 meters, and a 15% decrease in withdrawal led to a decrease of 5 meters in the water table. From a quality perspective, the decrease in withdrawal improved the quality of irrigation water but increased the concentration of some pollutants, which requires the development of effective management strategies to protect groundwater resources. The findings of this study illustrate the importance of sustainable exploitation and smart management of groundwater resources in the Garmsar Plain.

Keywords: Quantitative analysis of water resources, Qualitative analysis of water resources, Groundwater resources, Numerical modeling, Garmsar

How to cite this article: Golestani, M., Mousavi, S. F. and Karami, H. 2025. Modeling the Quantitative and Qualitative Changes in Groundwater of Garmsar Plain Using the MODFLOW Model. *J. Water and Soil Sci.* 29(3): 73-95. DOI: 10.47176/jwss.29.3.70011

Copyright © 2025 Golestani et al. Published by Isfahan University of Technology.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

نشریه علوم آب و خاک
سال بیست و نهم/ شماره سوم / پاییز ۱۴۰۴/مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۷۳ تا ۹۵ DOI: 10.47176/jwss.29.3.70011

شبیه‌سازی تغییرات کمّی و کیفی منابع آب زیرزمینی دشت گرمسار با بهره‌گیری از مدل‌های MODFLOW و MT3DMS

معصومه گلستانی، سید فرهاد موسوی* و حجت کرمی[1]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰ ؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۲/۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۲۸)

۱. گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mousavi_sf@yahoo.com

چکیده

آبهای زیرزمینی به‌عنوان منابع حیاتی برای تأمین نیازهای شرب، کشاورزی و صنعتی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. در این مطالعه، مدل‌سازی تغییرات کمّی و کیفی آب‌های زیرزمینی دشت گرمسار در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۲ با استفاده از نرم‌افزارهای GIS، MODFLOW و MT3DMS انجام شد. داده‌های مکانی و اقلیمی به‌صورت جامع در محیط GIS پردازش و آماده‌سازی شد و شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی با مدل MODFLOW و تحلیل تغییرات کیفیت آب با مدل MT3DMS انجام شد. مدل پس از صحت‌سنجی با داده‌های میدانی سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲ با شاخص‌های آماری میانگین خطای مطلق (MAE) در بازه ۰/۴ تا ۰/۵ متر و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین ۰/۵ تا ۰/۶ متر، دقت قابل قبولی از خود نشان داد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که افزایش ۱۵ درصدی برداشت آب منجر به کاهش سطح ایستابی تا ۸ متر، برداشت ثابت کاهش ۷ متر و کاهش ۱۵ درصدی برداشت کاهش ۵ متری سطح آب را به دنبال دارد. از منظر کیفیت، کاهش برداشت باعث بهبود کیفیت آب آبیاری اما افزایش غلظت برخی آلاینده‌ها شد که نیازمند تدوین راهکارهای مدیریتی مؤثر برای حفاظت از منابع آب زیرزمینی است. یافته‌های این پژوهش گویای اهمیت بهره‌برداری پایدار و مدیریت هوشمند منابع آب زیرزمینی دشت گرمسار است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل کمّی منابع آب، تحلیل کیفی منابع آب، منابع آب زیرزمینی، مدل‌سازی عددی، گرمسار

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

مقدمه

در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، منابع آب زیرزمینی به دلیل پایداری نسبی، کیفیت بهتر و ظرفیت ذخیره‌سازی زیاد، نقش مهمی در تأمین آب مورد نیاز برای مصارف مختلف ایفا می‌کنند (۳). ایران نیز با قرار گرفتن در کمربند خشک کره زمین، به شدت به این منابع وابسته است. در شرایطی که میانگین جهانی بهره‌برداری از منابع آب تجدیدپذیر حدود ۳۱ درصد است، ایران بیش از ۸۰ درصد از منابع آبی خود را مصرف می‌کند و از این میان، حدود ۱۱ درصد از ذخایر آب شیرین در حال استفاده مداوم است (۹). چنین آماری نشان‌دهنده فشار مضاعف بر منابع آب کشور، به‌ویژه منابع زیرزمینی است.

یکی از مهم‌ترین چالش‌های منابع آب زیرزمینی در ایران، افت سطح ایستابی و کاهش کیفیت به دلیل برداشت‌های بی‌رویه، به ویژه در بخش کشاورزی است. در بسیاری از مناطق کشور، از جمله دشت گرمسار در استان سمنان، افزایش برداشت از چاه‌ها و قنات‌ها موجب کاهش محسوس سطح ایستابی شده است. آمارها نشان می‌دهند که طی ۱۲ سال اخیر، سطح آب زیرزمینی در این دشت بین ۵ تا ۶ متر کاهش یافته که این مسئله منجر به تهدید نشست زمین و افزایش غلظت آلاینده‌ها، به ویژه شوری، در آب‌های زیرزمینی شده است.

دشت گرمسار به‌عنوان یکی از مناطق مهم کشاورزی استان سمنان، با اقلیم خشک و بارش اندک، به شدت به منابع آب زیرزمینی وابسته است. کاهش کمّی و تغییرات کیفی این منابع، پیامدهای قابل توجهی برای امنیت غذایی، پایداری زیست‌محیطی و توسعه منطقه به همراه دارد. در این شرایط، شناخت دقیق رفتار کمّی و کیفی منابع آب زیرزمینی و بررسی تأثیر عوامل انسانی و طبیعی بر آن‌ها، پیش‌نیاز مدیریت پایدار این منابع است.

با توجه به پیچیدگی پدیده‌های مؤثر بر منابع آب زیرزمینی، استفاده از مدل‌های عددی مانند MODFLOW به‌عنوان ابزارهای تحلیلی و تصمیم‌سازی، در سال‌های اخیر اهمیت زیادی یافته‌اند. این مدل‌ها با شبیه‌سازی دینامیک آبخوان‌ها و بررسی سناریوهای مختلف برداشت و تغییر اقلیم، امکان پیش‌بینی وضعیت آینده منابع آب را فراهم می‌سازند و می‌توانند به تصمیم‌گیران در تدوین سیاست‌های بهره‌برداری مؤثر کمک کنند.

بنابراین، با توجه به وضعیت بحرانی دشت گرمسار، انجام یک مطالعه جامع برای مدل‌سازی کمّی و کیفی منابع آب زیرزمینی منطقه، به‌منظور تحلیل روند تغییرات، شناسایی عوامل مؤثر و ارائه راهکارهای مدیریتی ضروری به نظر می‌رسد. هدف این پژوهش، به‌کارگیری ابزارهای مدل‌سازی عددی برای درک بهتر وضعیت منابع آب زیرزمینی دشت گرمسار و کمک به سیاست‌گذاری‌های مبتنی بر داده در حوزه مدیریت منابع آب است.

شعبانی در پژوهشی در دشت ارسنجان، تغییرات کیفی آب‌های زیرزمینی را با استفاده از پارامترهای EC، pH و TDS بررسی کرد. نتایج نشان داد که غلظت $NO3^-$ از جنوب و جنوب شرق به سمت شمال غرب افزایش یافته و مقادیر EC و TDS نیز از شمال غرب به جنوب شرق روند افزایشی داشته‌اند. همچنین، بررسی کیفیت آب برای مصارف شرب و کشاورزی نشان داد که بیش از ۷۵ درصد منابع آب زیرزمینی این منطقه برای کشاورزی مناسب نیستند (۱۵). ولی‌پور و همکاران، تغییرات کمّی و کیفی آب‌های زیرزمینی در دشت نجف‌آباد استان اصفهان را بررسی کردند. نتایج نشان داد که سطح آب از سال ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۲، به میزان ۲۴/۲۵ متر کاهش یافته است. کیفیت شیمیایی آب بر اساس ۱۵ چاه بررسی شد که بیشتر نمونه‌ها برای مصارف شرب طبق استانداردهای WHO قابل قبول نبودند و تنها ۶۶/۶ درصد از نمونه‌ها برای کشاورزی مناسب بودند (۱۷). دین‌پروژه و همکاران، تغییرات کمّی و کیفی آب زیرزمینی در دشت شبستر – صوفیان را بررسی کردند. نتایج نشان داد که در چاه‌های عمیق، بیشتر متغیرهای کیفی روند افزایشی داشتند؛ درحالی‌که در قنات‌ها، روند کاهشی معنی‌دار دیده شد. در دوره پرآب، کیفیت آب بهبود یافت و در دوره کم‌آب، روند نزولی داشت. غلظت عناصر شیمیایی به ویژه در حاشیه جنوبی دشت، نزدیک دریاچه ارومیه، افزایش یافته بود. درنهایت، ۶۳ درصد از

سری‌های زمانی کیفیت آب روند نامطلوبی داشتند (۲). کریمی و حداد، تغییرات کمّی و کیفی آبخوان دشت مه‌ولات در استان خراسان رضوی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که سطح آب زیرزمینی در دوره ۱۴ساله از ۷۴-۱۳۷۳ تا ۸۷-۱۳۸۶ به‌طور میانگین سالانه ۱/۳۵ متر کاهش یافته است. تخلیه سالانه آب زیرزمینی ۲۵۴ میلیون مترمکعب و کسری مخزن ۹۷ میلیون مترمکعب بوده است. کیفیت آب در شمال شرقی به حاشیه‌های دشت کاهش می‌یابد. همچنین، بیش از ۷۴ درصد نمونه‌ها برای کشاورزی مناسب نبوده و ۵۰ درصد منطقه برای شرب نامناسب است (۸). قبادیان و بهرامی، در دشت خزل همدان نشان دادند که بهره‌برداری بیش از حد و خشکسالی‌ها باعث کاهش سطح آب زیرزمینی به ۸/۵ متر در بازه ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۹ شده است. با استفاده از مدل‌های MODFLOW و GMS، نوسانات سطح آب و طرح تغذیه مصنوعی با ۳۱ چاه تزریق، سطح آب را ۱۹ سانتی‌متر افزایش دادند. همچنین، مدل MT3DMS نشان داد که شعاع تأثیر آلودگی چاه‌های فاضلاب حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر است (۴). پناهی و همکاران، در این مطالعه، نوسانات سطح آب زیرزمینی در آبخوان زنجان را با نرم‌افزار GMS شبیه‌سازی کردند. مدل MODFLOW و GIS برای شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی استفاده شد. داده‌های مورد نیاز شامل مرز آبخوان، تراز زمین، تراز سنگ کف و میزان برداشت از چاه‌ها بود. پس از ایجاد مدل مفهومی، شبیه‌سازی در حالت پایدار انجام شد و نتایج نشان‌دهنده تطابق خوب بین تراز مشاهده شده و محاسبه شده بود. در مدل ناپایدار برای سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۰۲، نتایج دقیق بود. جریان آب از جنوب‌شرقی به شمال غربی تطابق داشت. شبیه‌سازی برای سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۰۷ نشان‌دهنده افت شدید تراز آب به دلیل برداشت بی‌رویه است (۱۲).

جوادی و همکاران، وضعیت منابع آب در دشت اردستان را با مدل MODFLOW بررسی کردند. نتایج نشان داد که استخراج بی‌رویه آب باعث کاهش سطح آب در میانه آبخوان و کمتر شدن آن در بخش‌های غربی شده است. همچنین، جریان آب زیرزمینی در بخش خروجی به‌طور معکوس شده و انتقال آب از بیابان به آبخوان مشاهده شد. این تغییرات نشان‌دهنده مشکلات محیطی و مدیریتی در این منطقه است. این پژوهش تأکید دارد که مدیریت صحیح منابع آب ضروری است تا کیفیت و کمیت آب زیرزمینی در دشت‌های بیابانی بهبود یابد (۶). بیابانی و همکاران، تغییرات کمّی و کیفی آب زیرزمینی در دشت کرج را بررسی کردند. نتایج نشان داد که طی ۱۵ سال، متوسط افت سطح آب زیرزمینی ۱/۰۲ متر بوده که منجر به کاهش کیفیت آب در این منطقه شده است. همچنین، بخشی از دشت به دلیل برداشت بی‌رویه و عدم تغذیه مناسب، با افت سطح آب مواجه شده است. رابطه مستقیم بین هدایت الکتریکی (EC) و غلظت یون‌های اصلی در آب تأیید شد. درنهایت، کاهش بارندگی در برخی سال‌ها نیز با افزایش افت آب زیرزمینی در این دشت مرتبط است (۱).

کلانتری و همکاران با تأکید بر اینکه آبخوان‌ها در ایران به دلیل افزایش تقاضا و کاهش بارش با کاهش ذخیره مواجه‌اند، در پژوهشی وضعیت کمّی و کیفی آبخوان باغملک در خوزستان که تأمین‌کننده آب کشاورزی و سایر نیازهای منطقه است را در دوره ۱۳۹۶-۱۳۸۶ بررسی کردند. برای تحلیل تأثیر بارش‌ها، از شاخص SPI استفاده شد. نقشه‌های سطح آب و افت‌وخیز ترسیم شد. نتایج نشان داد که افت آب در این دوره ۱۳/۰۳ متر بوده است. بیشترین افت در بخش‌های شرقی و مرکزی دشت دیده شد. بررسی داده‌های کیفی با PCA و HCA نشان داد که چاه‌ها به سه گروه تقسیم می‌شوند. همبستگی اصلی میان هدایت الکتریکی، سولفات و کلسیم است. دو عامل اصلی شناسایی شدند: عامل اول که ۶۰/۱۲ درصد تغییرات را توضیح می‌دهد، شامل Na، Mg، Cl، K، Ca، SO4، EC و عامل دوم که ۱۵/۱۵ درصد تغییرات را توضیح می‌دهد، شامل HCO3 است (۷).

جبالبارزی و همکاران در پژوهشی اشاره کردند که دشت جعفریه به دلیل خشکسالی و برداشت بیش از حد از آب‌های زیرزمینی با بحران مواجه است. با توجه به این موضوع، آنان به مدل‌سازی آبخوان دشت جعفریه با مدل MODFLOW در نرم‌افزار GMS پرداختند. مدل بر اساس داده‌های چاه‌های

پیزومتری در دو دوره زمانی (۱۳۸۱-۱۳۷۱ و ۱۳۹۱-۱۳۸۱) شبیه‌سازی و واسنجی شد. نتایج نشان داد که مدل بیشترین حساسیت به تغییرات تغذیه آب زیرزمینی دارد. در دوره ۱۳۸۰ - ۱۳۷۱، افت آبخوان از ۰/۰۵ متر به ۱/۵- متر رسید که بیشترین افت در مناطق شرقی بود. در دوره ۱۳۹۱-۱۳۸۱، افت آبخوان از ۰/۲۶- متر به ۷/۲- متر افزایش یافت، با بیشترین افت در نواحی شمال‌غربی و جنوب‌شرقی (۵).

استادعلی‌عسگری و شایان‌نژاد، تغییرات کمیت و کیفیت آب در آبخوان اصفهان - برخوار را با استفاده از مدل سه‌بعدی MODFLOW و MT3D بررسی کردند. نتایج نشان داد که در دوره‌های خشکسالی و افزایش بهره‌برداری از چاه‌ها، سطح آب به میزان ۰/۱تا ۰/۵ متر کاهش یافته و این روند تهدیدی برای از بین رفتن آبخوان خواهد بود (۱۱).

رنجبر و پیرزاده، با استفاده از نرم‌افزارهای MODFLOW و MT3DMS، جریان کمّی و کیفی آب زیرزمینی دشت هنگام را شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که سطح آب به‌طور غیرخطی کاهش یافته و TDS در دشت و مرزها افزایش یافته است که احتمالاً ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و ساختار سفره‌های آب زیرزمینی است (۱۳).

در پژوهش حاضر، برای برآورد میزان تغذیه و تخلیه آبخوان در دشت گرمسار، از مدل MODFLOW به‌منظور شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی استفاده شد. همچنین، به‌منظور تحلیل کیفیت آبخوان و شبیه‌سازی انتقال آلودگی‌ها، مدل MT3DMS به کار گرفته شد.

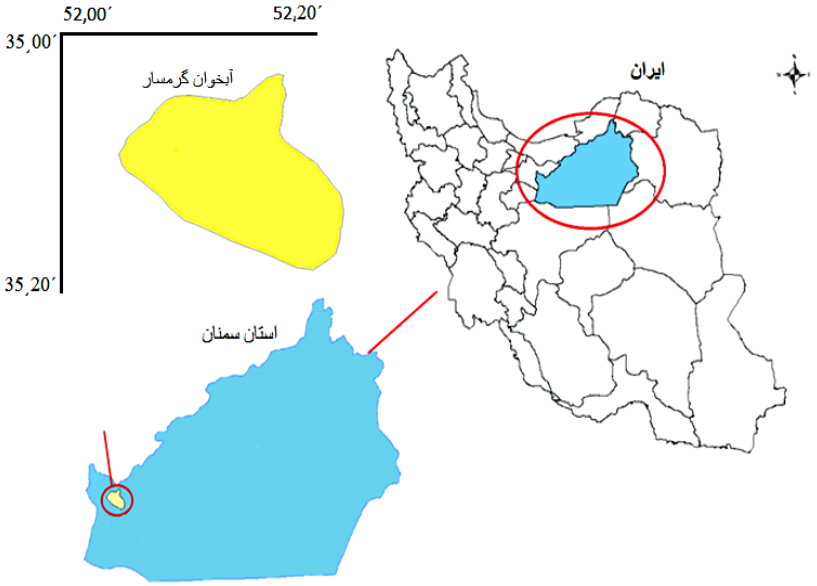
بررسی تغییرات زمانی منابع آب زیرزمینی برای مدیریت پایدار آن‌ها بسیار ضروری است. برای این منظور نصیری و همکاران در مطالعه‌ای روند تغییرات کمّی و کیفی منابع آب زیرزمینی در دشت ساری - نکا در دوره آماری ۱۳۹۴-۱۳۷۰ را تحلیل کرده است. برای ارزیابی روند تغییرات، از آزمون‌های من - کندال و تخمین‌گر شیب سن در دو سطح اطمینان (٪۹۵ و ٪۹۹) استفاده شده است. پارامترهای کمّی شامل تغییرات تراز آب زیرزمینی و پارامترهای کیفی شامل یون‌های Ca^{2+}، Mg^{2+}، Na^{+}، K^{+}، TDS، Cl^{-}، SO_4^{2-} و NO_3^{-} بوده است. نتایج نشان داد که تراز آب زیرزمینی در ۵ چاه مشاهده‌ای روند افزایشی، در ۲ چاه روند کاهشی و در ۹ چاه تغییرات بدون روند داشته است. در بخش کیفی، فقط پارامتر Ca^{2+} در ۳ چاه روند افزایشی معنادار داشت. سایر پارامترهای کیفی یا روند کاهشی داشتند یا تغییرات معنی‌داری نشان ندادند (۱۰).

صالحیان و همکاران نیز در پژوهشی اشاره کردند دشت رفسنجان در استان کرمان، یکی از قدیمی‌ترین مناطق اقتصادی کشور است که عمدتاً به کشت پسته وابسته است. برداشت بی‌رویه آبهای زیرزمینی برای کشاورزی و تولید پسته، منجر به کاهش کمیت و کیفیت آب در این منطقه شده است. این منابع آبی که تنها منبع قابل اطمینان آب در منطقه هستند، کاهش سطح زیر کشت، تولید و بهره‌وری بخش کشاورزی را به همراه داشته و پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به دنبال دارد. برای این منظور آنان تغییرات کمّی و کیفی آب در دشت رفسنجان طی دهه‌های اخیر را بررسی کردند. نتایج نشان داد افزایش حفاری چاه‌ها و برداشت بی‌رویه موجب کاهش سطح آب زیرزمینی، افزایش عمق چاه‌ها و افت کیفیت آب در این منطقه شده است (۱۴).

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهرستان گرمسار، واقع در استان سمنان، در فاصله ۹۵ کیلومتری شرق تهران و ۱۱۰ کیلومتری غرب سمنان قرار دارد و در حاشیه شمالی کویر مرکزی ایران واقع شده است. این شهرستان از شمال با فیروزکوه و دماوند، از شرق با آرادان، از غرب با ایوانکی و از جنوب با آران و بیدگل هم‌مرز است (شکل ۱). مساحت شهرستان گرمسار حدود ۶۸۶۰ کیلومترمربع و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا نزدیک به ۸۵۶ متر است. محدوده مطالعاتی دشت گرمسار با وسعتی حدود ۵۵۳۲ کیلومترمربع، شامل دو ناحیه عمده هموار و کوهستانی است که ویژگی‌های هیدرولوژیک و چالش‌های مدیریتی منابع آب را تحت تأثیر قرار می‌دهد. آبخوان‌های آبرفتی آزاد و لایه‌های



شکل ۱. موقعیت آبخوان گرمسار در استان سمنان و کشور ایران

تحت فشار در این منطقه، نقش مهمی در تأمین منابع آب زیرزمینی ایفا می‌کنند.

داده‌های مکانی

در این مطالعه، به‌منظور تهیه ورودی‌های لازم برای مدل‌سازی تغییرات آب زیرزمینی، داده‌های مکانی منطقه دشت گرمسار ابتدا در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.5 جمع‌آوری و پردازش شد. این داده‌ها شامل مدل رقومی ارتفاع (DEM)، نقشه‌های کاربری اراضی و خاک، موقعیت چاه‌های بهره‌برداری و مشاهده‌ای، خطوط توپوگرافی و سایر اطلاعات هیدروژئولوژیکی مرتبط بود. با استفاده از این داده‌ها، نقشه‌های پایه برای انجام مدل‌سازی هیدرودینامیکی آماده شد.

داده‌های اقلیمی

برای شبیه‌سازی دقیق رفتار آبخوان، داده‌های اقلیمی از قبیل میزان بارندگی، دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی جمع‌آوری شدند. این اطلاعات از ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک منطقه، با همکاری شرکت آب منطقه‌ای سمنان و سازمان هواشناسی کشور تأمین شد. مشخصات کامل ایستگاه‌های مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

داده‌های هیدروژئولوژیکی و پارامترهای مدل

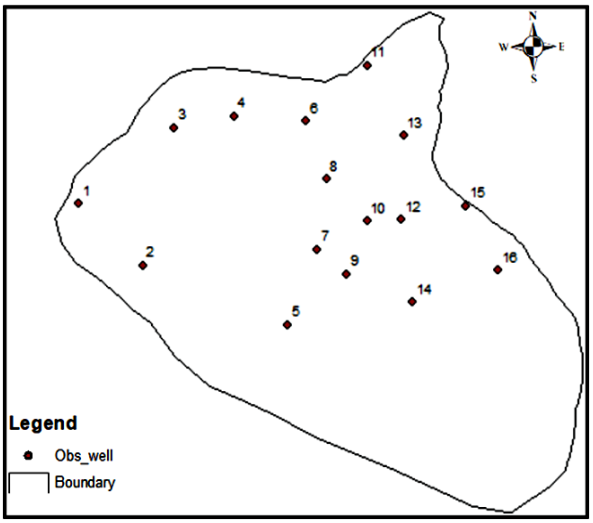
موقعیت دقیق چاه‌های بهره‌برداری و مشاهده‌ای با استخراج داده‌های مکانی و وارد کردن آن‌ها به GIS تعیین شد (شکل‌های ۲ و ۳). علاوه بر این، داده‌های فنی و هیدرولوژیک چاه‌ها شامل عمق، سطح ایستابی و سایر مشخصات فنی از مراجع رسمی گردآوری و بررسی شد. برای تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان، نتایج آزمایش‌های پمپاژ ۱۱ حلقه چاه اکتشافی استفاده شد. مقادیر هدایت هیدرولیکی و ضریب آبدهی ویژه در محیط GIS پردازش شده و با روش‌های درون‌یابی مکانی، دشت گرمسار به ۵ ناحیه هیدروژئولوژیکی تفکیک شد. میانگین پارامترهای هیدرودینامیکی هر ناحیه محاسبه و در نقشه‌های مربوطه نمایش داده شد (شکل‌های ۴ و ۵).

آماده‌سازی داده‌ها برای مدل‌سازی

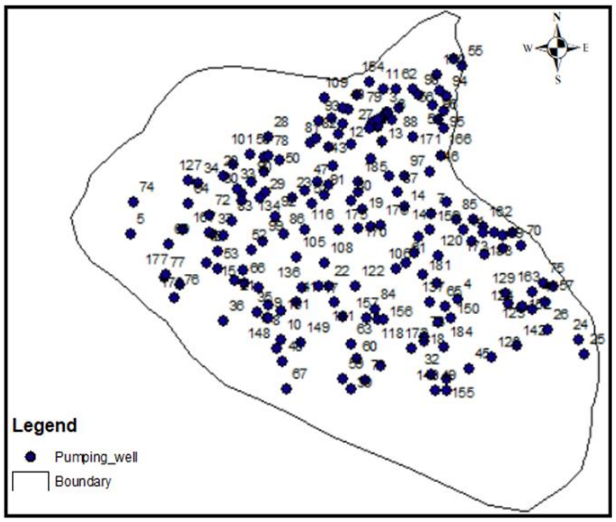
پس از جمع‌آوری و اعتبارسنجی داده‌های مکانی و هیدرولیکی،

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی واقع در محدوده مطالعاتی گرمسار

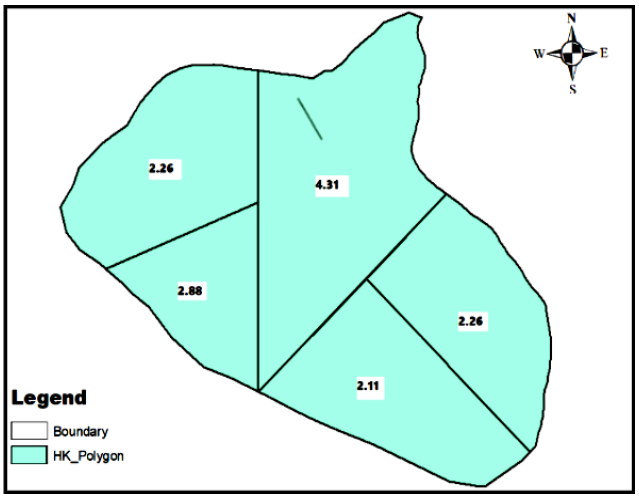
نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
تصفیه‌خانه	باران‌سنجی	۵۲°-۲۲′-۴۱″	۳۵°-۱۵′-۲۹″
گرمسار	باران‌سنجی	۵۲°-۲۰′-۰۵″	۳۵°-۱۳′-۲۹″
تصفیه‌خانه	تبخیر سنجی	۵۲°-۲۲′-۴۱″	۳۵° -۱۹′-۰۰″
گرمسار	تبخیر سنجی	۵۲°-۴۳′-۳۲″	۳۵°-۱۵′-۱۰″



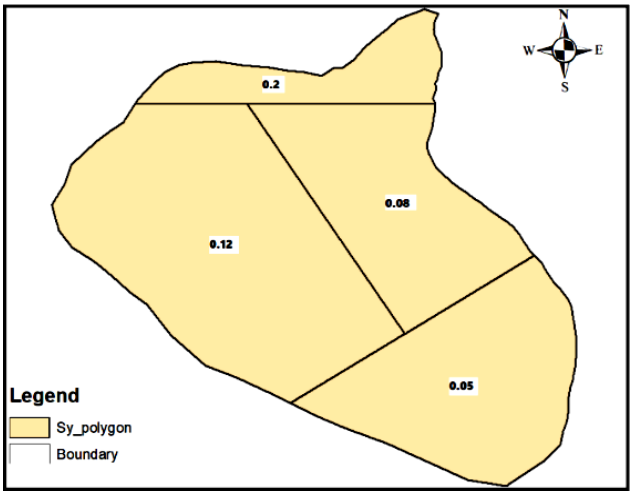
شکل ۲. موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای در محدوده آبخوان گرمسار



شکل ۳. موقعیت چاه‌های پمپاژ در محدوده آبخوان گرمسار



شکل ۴. نقشه پلیگون‌های هدایت هیدرولیکی افقی در دشت گرمسار



شکل ۵. نقشه پلیگون‌های آبدهی ویژه در دشت گرمسار

تمامی اطلاعات به مدل عددی MODFLOW منتقل شده و شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی با استفاده از ساختار شبکه‌ای و لایه‌ای انجام شد. مدل توسعه‌یافته توانایی زیادی در تحلیل دقیق رفتار هیدرودینامیکی آبخوان گرمسار دارد و می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی استفاده شود.

مدل‌ها و نرم‌افزارهای مورد استفاده

نرم‌افزار GMS

نرم‌افزار Groundwater Modeling System (GMS) یکی از ابزارهای پیشرفته و جامع در زمینه مدل‌سازی و تحلیل سیستم‌های آب زیرزمینی است. این نرم‌افزار که با همکاری دانشگاه Brigham Young و مهندسان ارتش ایالات متحده توسعه یافته، امکانات گرافیکی و تحلیلی گسترده‌ای برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی، انتقال آلاینده‌ها و سایر فرایندهای هیدروژئولوژیکی فراهم می‌کند. محیط کاربری GMS به‌گونه‌ای طراحی شده است که از طریق ماژول‌ها و زیربرنامه‌های متعدد، قابلیت تعریف شرایط مرزی، لایه‌های زمین، چاه‌ها، رودخانه‌ها و تغذیه‌ها را برای مدل‌سازی دقیق فراهم می‌کند.

مدل MODFLOW

مدل عددی MODFLOW که توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) توسعه یافته، یکی از پرکاربردترین مدل‌ها در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی است. این مدل از روش تفاضل محدود برای حل معادلات جریان استفاده می‌کند و توانایی شبیه‌سازی سیستم‌های آبخوان در حالت‌های همگن، ناهمگن، ماندگار و غیرماندگار را داراست. در محیط GMS، مدل MODFLOW به‌عنوان هسته اصلی شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی به کار می‌رود و با استفاده از زیربرنامه‌های متعدد مانند Recharge، River، Well و Drain، شرایط مختلف هیدروژئولوژیکی منطقه مدل‌سازی می‌شود.

مدل MT3DMS

مدل MT3DMS یک ابزار عددی برای شبیه‌سازی انتقال آلاینده‌ها در محیط‌های اشباع شده زیرسطحی است که توسط شرکت‌های خصوصی با حمایت USGS توسعه یافته است. این مدل به‌صورت مکمل و یکپارچه با MODFLOW عمل می‌کند و از داده‌های جریان تولید شده توسط آن برای مدل‌سازی انتقال جرم استفاده می‌کند. MT3DMS قادر است فرایندهایی مانند انتشار، همرفت و واکنش‌های ساده را در محیط‌های آب زیرزمینی شبیه‌سازی کند. در استفاده از این مدل، پارامترهایی مانند ضریب پخشیدگی، تخلخل مؤثر و ضرایب واکنش مورد نیاز است. ترکیب این مدل با MODFLOW در نرم‌افزار GMS، امکان تحلیل همزمان رفتار کمّی و کیفی منابع آب زیرزمینی را فراهم می‌کند.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، ابتدا داده‌های لازم برای شبیه‌سازی آبخوان گرمسار با استفاده از مدل MODFLOW برای سال آبی ۱۳۹۰ (مهر تا آذر) گردآوری و وارد مدل شدند. سپس، شبیه‌سازی در حالت پایدار (ماندگار) برای این دوره انجام شد. برای اعتبارسنجی مدل، سه پارامتر کلیدی شامل هدایت هیدرولیکی، هدایت هیدرولیکی غیر ایزوتروپ و تغذیه آبخوان به‌عنوان پارامترهای واسنجی انتخاب شدند.

در مرحله بعد، شبیه‌سازی وضعیت ناپایدار آبخوان به‌صورت ماهانه برای سال‌های آبی ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹ (در مجموع ۱۰۵ گام زمانی یک‌ماهه) انجام شد. در این شبیه‌سازی، تمام عوامل هیدرولوژیک مانند بارش، تبخیر، تغذیه و تخلیه آب لحاظ شد. نتایج اولیه نشان‌دهنده وجود خطاهایی در خروجی مدل بود که ضرورت بهینه‌سازی پارامترها برای افزایش دقت شبیه‌سازی‌ها را نمایان کرد.

بنابراین، در گام چهارم، فرایند واسنجی با اجرای ۲۵ مرتبه مدل انجام و پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه آبخوان به‌صورت بهینه اصلاح شدند. پس از بهینه‌سازی، مدل

دوباره در شرایط ناپایدار اجرا شد. درنهایت، صحت‌سنجی مدل با استفاده از داده‌های چهار چاه مشاهده‌ای منتخب برای سال‌های آبی ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲ انجام شد.

منابع آب زیرزمینی منطقه گرمسار شامل چاه‌های نیمه‌عمیق، چاه‌های عمیق و قنات‌هاست. در این منطقه، ۲ حلقه چاه نیمه‌عمیق، ۲۵ حلقه چاه عمیق و ۲ قنات شناسایی شده‌اند. داده‌های شیمیایی مربوط به منابع آب زیرزمینی از سال ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۲ جمع‌آوری و برای ارزیابی کیفیت آب بررسی شد.

برای تحلیل وضعیت کیفی آب‌های زیرزمینی، داده‌های کیفی از ۲۹ حلقه چاه مشاهده‌ای جمع‌آوری و وارد نرم‌افزار GIS شدند. سپس با استفاده از روش میان‌یابی کریجینگ، نقشه‌های پراکندگی کیفیت آب تهیه شد.

در ادامه، سه سناریو برای پیش‌بینی وضعیت آبخوان گرمسار تا سال ۱۴۱۵ بررسی شد:

- ادامه روند فعلی برداشت آب؛
- کاهش ۱۵ درصدی برداشت آب؛
- افزایش ۱۵ درصدی برداشت آب با هدف بهبود بیلان آب زیرزمینی.

این سناریوها به‌منظور شبیه‌سازی تغییرات کیفیت آب و ارزیابی تأثیرات مدیریتی بر منابع آب به کار گرفته شدند.

بررسی نوسانات تراز آب زیرزمینی

برای دوره ۱۲ساله آینده (۱۴۰۲ تا ۱۴۱۴)، تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان گرمسار با مدل MODFLOW و سه سناریوی مدیریتی زیر شبیه‌سازی شد:

۱- افزایش ۱۵ درصدی برداشت و افزایش ۵ درصدی تغذیه سطحی، ناشی از رشد تقاضای آب و بهبود تغذیه آبخوان؛

۲- تداوم روند کنونی برداشت بدون تغییر در میزان مصرف؛

۳- کاهش ۱۵ درصدی برداشت آب به دلیل سیاست‌های مدیریت منابع و بهینه‌سازی مصرف.

۴- برای تحلیل نتایج، تغییرات سطح آب در چهار نقطه کلیدی آبخوان بررسی شد.

ارزیابی دقت مدل با شاخص‌های آماری

برای سنجش دقت مدل شبیه‌سازی، از سه شاخص آماری متداول یعنی ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE) و میانگین خطا (ME) استفاده شد. این شاخص‌ها میزان تطابق نتایج مدل‌سازی با داده‌های واقعی (مشاهداتی) را نشان می‌دهند و مبنایی برای ارزیابی صحت و اعتبار مدل فراهم می‌کنند.

۱- RMSE (Root Mean Square Error)

شاخص RMSE حساس به مقدار خطاهای بزرگ است و بیشتر تحت تأثیر انحراف‌های شدید قرار دارد (معادله ۱):

$$\sqrt{2(\mathrm{ipi}-\mathrm{o})\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{n}}=\mathrm{RMSE} \qquad (۱)$$

که در آن:

iP: مقدار شبیه‌سازی‌شده توسط مدل

iO: مقدار مشاهده شده

n: تعداد داده‌ها

۲- MAE (Mean Absolute Error)

شاخص MAE میانگین قدرمطلق اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده را محاسبه می‌کند (معادله ۲):

$$|\mathrm{Oi}-\mathrm{Pi}|\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{n}=\mathrm{MAE} \qquad (۲)$$

۳- ME (Mean Error)

شاخص ME میزان میانگین خطای سیستماتیک را نشان می‌دهد و برای بررسی وجود سوگیری (Bias) در مدل کاربرد دارد (معادله ۳):

$$|\mathrm{Oi}-\mathrm{Pi}|\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{n}=\mathrm{ME} \qquad (۳)$$

پهنه‌بندی ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان گرمسار

در راستای شبیه‌سازی دقیق جریان آب زیرزمینی در آبخوان گرمسار، پهنه‌بندی مکانی پارامترهای هیدرودینامیکی از جمله

هـدایت هیـدرولیکی (Hydraulic Conductivity) و آبـدهی ویژه (Specific Yield) انجام شد. این پارامترها نقش کلیدی در تعیین رفتار دینامیکی سیسـتم آب زیرزمینـی دارنـد و پایه‌گـذار دقت مدل‌سازی عددی هستند.

هدایت هیدرولیکی(K)

نقشه پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی در لایه مبنا (لایه عدد ۳۰) در شکل ۶ نمایش داده شده اسـت. مقـادیر ایـن پـارامتر در مدل، پس از فرایند واسنجی، در محدوده‌ای بین ۰ تا ۳۰ متر بر روز قرار گرفـت. بیشـینه مقـدار هـدایت هیـدرولیکی در نواحی غربی و شمالی آبخوان دیده می‌شود که با رنـگ آبـی مشخص شده‌اند و نشان‌دهنده حضور بافت‌های درشت‌دانه و نفوذپذیر هستند. در مقابل، نواحی مرکـزی و جنـوبی دارای مقادیر کمتری از هدایت هیدرولیکی (کمتر از ۶ متر بر روز) بوده و به رنگ قرمز و نارنجی نشان داده شده‌اند که معـرف محیط‌هـای کم‌نفـوذ ماننـد رسـوبات ریزدانـه یـا لایـه‌های مارنی است.

آبدهی ویژه (Sy)

پهنه‌بندی آبدهی ویژه آبخـوان در لایـه مشخص‌شـده (لایـه عدد ۴۰) نیز در شکل ۷ ارائـه شـده اسـت. ایـن پـارامتر در محدوده ۰/۰۱ تا ۰/۴۱ متغیر است. بیشترین مقـادیر آبـدهی ویژه مربـوط بـه نـواحی بـا مصـالح آبرفتـی متخلخـل‌تر در بخش‌های مرکـزی و غربـی آبخـوان اسـت. چنـین نـواحی، قابلیت زیادی در آزادسازی آب به هنگام افت سطح ایستابی دارند. در مقابل، مقادیر کمتر آبدهی ویژه در مناطق شرقی و جنوبی دیده می‌شود که با بافت‌های فشرده‌تر و نفوذپـذیری کمتر مرتبط هستند.

نتایج

۱- واسنجی و صحت‌سنجی مدل MODFLOW

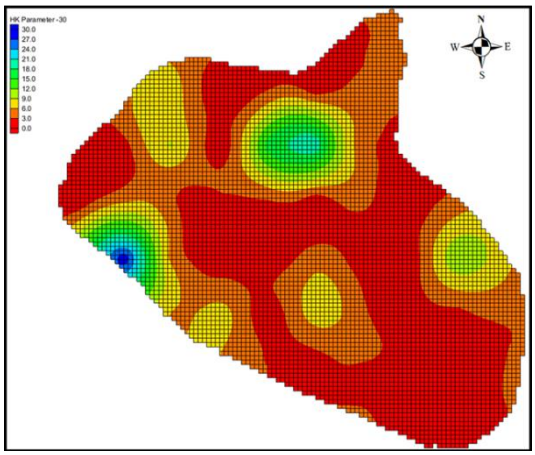
پس از اجرای مـدل جریـان آب زیرزمینـی در شـرایط پایـدار، فراینـد واسـنجی مـدل MODFLOW بـا اسـتفاده از داده‌هـای ۱۶ چاه پیزومتری منطقه انجام شد. نتایج حاصـل نشـان داد کـه مدل توانایی مناسـبی در بازسـازی وضـعیت پایـدار سـفره آب زیرزمینی دارد. شاخص‌های ارزیـابی آمـاری از جملـه میـانگین خطا (ME)، میـانگین خطـای مطلـق (MAE) و ریشـه میـانگین مربعات خطـا (RMSE) در محـدوده قابـل قبـولی قـرار دارنـد؛ به‌گونه‌ای که مقدار خطای مطلق در بیشتر نقاط کمتر از یک متر بوده و انطباق مناسبی میان داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌هـای مشاهده‌ای حاصل شده است (شـکل ۸). همچنـین نقشـه تـراز سطح آب زیرزمینی برای سـال آبـی ۱۳۹۰ (شـکل ۹) مطابقـت خوبی با داده‌های واقعی دارد که گویای اعتبار نتایج مدل است.

۲- تحلیل توزیع هیدرودینامیکی آبخوان

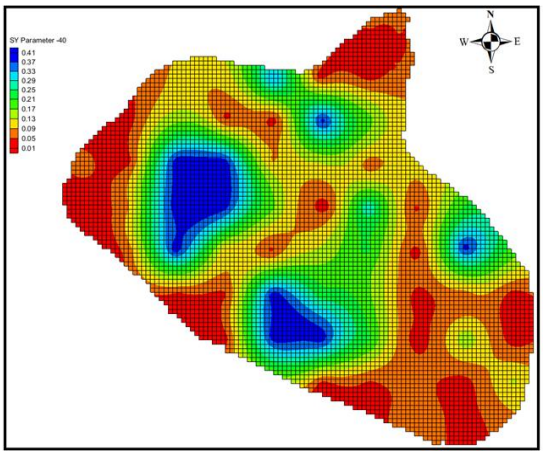
تحلیل توزیع مکـانی تـراز سـطح آب زیرزمینـی نشـان داد کـه مقادیر هد هیدرولیکی در محدوده‌ای بـین ۷۷۵ تـا ۸۳۰ متـر از سطح دریا قرار دارد. این تراز به‌صورت تدریجی از شمال غرب به سـمت جنـوب شـرق کـاهش می‌یابـد و جریـان غالـب آب زیرزمینی در همین راستا صورت می‌گیرد. الگوی مشاهده شـده با شیب توپوگرافی منطقه سازگار بوده و بیـانگر حرکـت آب از مناطق تغذیه به سمت مناطق تخلیه و برداشـت سـنگین اسـت. چنین اطلاعاتی می‌تواند در تدوین برنامـه‌های مـدیریت پایـدار منابع آب زیرزمینی استفاده شود.

۳- ارزیابی آماری عملکرد مدل

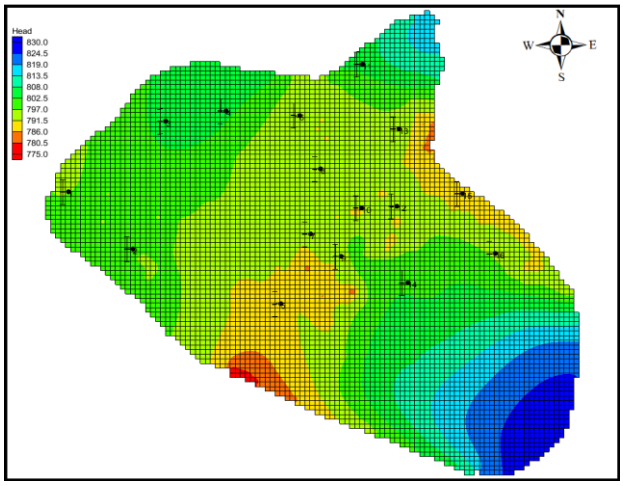
برای تحلیل دقیق‌تر عملکرد مدل، مقادیر آماری مختلف بررسی شد. نتایج نشان دادند که مقدار میـانگین خطـا (ME) در حالـت پایدار در بازه‌ای بین ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۰۶ متر قرار دارد. این مقـدار به دلیل خنثی شدن خطاهای مثبت و منفی، معیار مناسـبی بـرای ارزیابی دقت مدل محسوب نمی‌شود. با این حال، مقـدار MAE در بازه ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۱۶ متر و مقدار RMSE در حـدود ۰/۰۲۰ تا ۰/۰۲۱ متر به‌دست آمد که تأییـدی بـر دقـت زیـاد مـدل در شرایط پایدار است (شکل ۱۰).



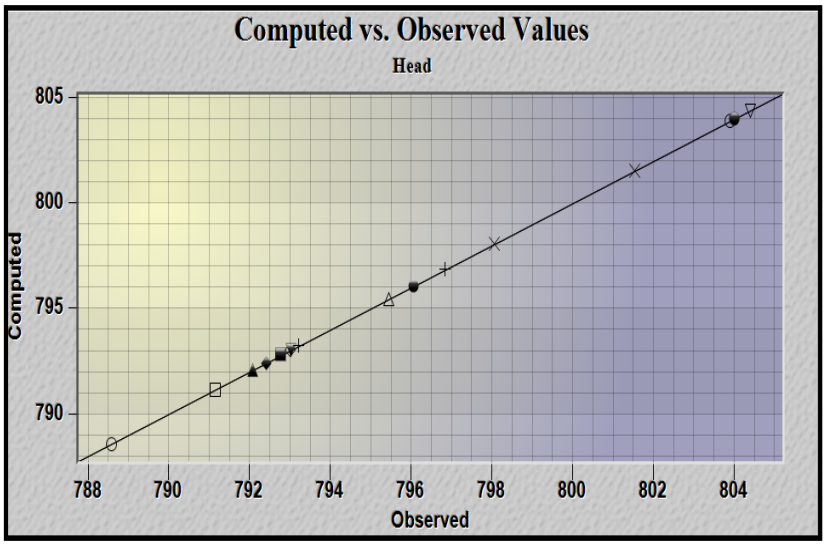
شکل ۶. نقشه پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی



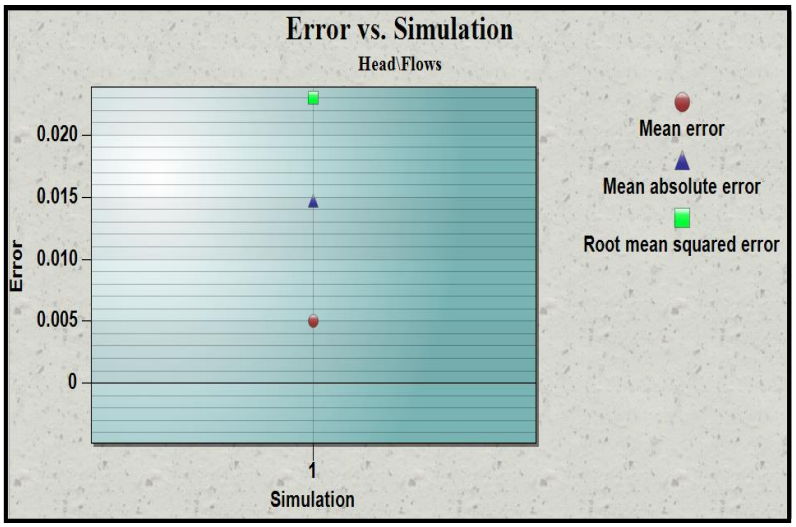
شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی آبدهی ویژه



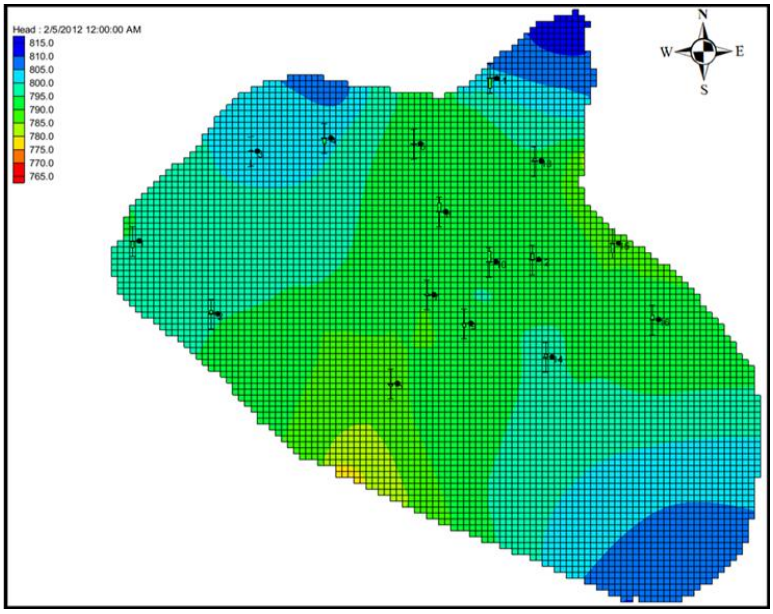
شکل ۸. نمایش خطای پیزومترها در مورد سطح ایستابی در پایان واسنجی حالت پایدار



شکل ۹. مقادیر محاسباتی و مشاهداتی بار هیدرولیکی برای ۱۶ چاه مشاهده‌ای در دوره واسنجی در حالت پایدار



شکل ۱۰. مقادیر خطا برای ارزیابی نتایج محاسباتی و مشاهداتی سطح ایستابی چاه‌های مشاهده‌ای در سال آبی (مهر تا آذر ۱۳۹۰)



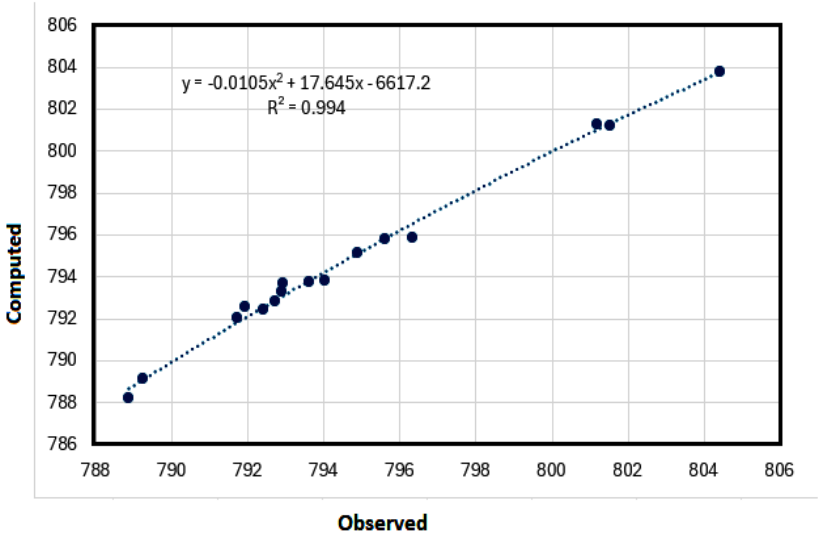
شکل ۱۱. نتایج بصری شبیه‌سازی مدل در شرایط ناپایدار برای سال‌های آبی (۱۳۹۹-۱۳۹۰) با استفاده از پارامترهای بهینه شده واسنجی مدل

۴- نتایج شبیه‌سازی ناپایدار و تحلیل روند زمانی

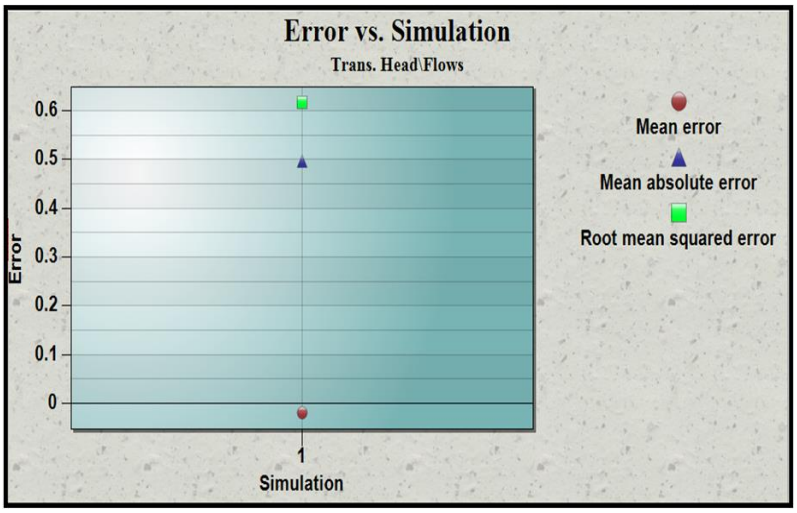
در ادامه، مدل MODFLOW برای شرایط ناپایدار در دوره زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹ اجرا شد (شکل ۱۱). استفاده از پارامترهای بهینه شده منجر به نتایجی با دقت زیاد شد؛ به‌طوری که مقدار ضریب تعیین (R^2) نزدیک به یک محاسبه شد (شکل ۱۲). در این دوره، مقدار میانگین خطا بین ۰/۰۲- تا ۰/۰۱ متر گزارش شد که به تنهایی معیار دقیقی برای قضاوت نیست، اما مقادیر MAE و RMSE به‌ترتیب در محدوده ۰/۴ تا ۰/۵ متر و ۰/۵ تا ۰/۶ متر به‌دست آمدند که نشانگر عملکرد مناسب مدل در شرایط ناپایدار است (شکل ۱۳).

۵- تحلیل روند تغییرات سطح آب زیرزمینی

چهار حلقه چاه مشاهداتی از نقاط مختلف دشت به‌منظور بررسی روند تغییرات سطح آب انتخاب شدند. بررسی‌های انجام‌شده نشان



شکل ۱۲. مقادیر محاسباتی و مشاهداتی بار هیدرولیکی در ۱۶ چاه مشاهده‌ای در انتهای دوره واسنجی حالت ناپایدار



شکل ۱۳. مقادیر خطا برای ارزیابی نتایج محاسباتی و مشاهداتی چاه‌های مشاهده‌ای در شرایط ناپایدار

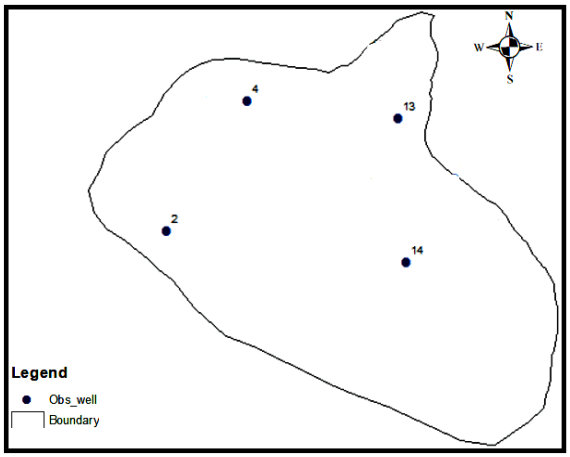
داد که طی بازه زمانی مدل‌سازی، روندی نزولی در سطح ایستابی این چاه‌ها دیده می‌شود. برای نمونه، چاه شماره ۱۳ کاهش میانگین ۷ متری، و چاه‌های شماره ۱۴، ۴ و ۲ کاهش‌هایی به‌ترتیب معادل ۶، ۲/۵ و ۵ متر را ثبت کرده‌اند (شکل‌های ۱۴ و ۱۵). این کاهش مستمر نشان‌دهنده افت کمّی منابع آب زیرزمینی طی سال‌های اخیر در منطقه مورد مطالعه است.

۶- اعتبارسنجی نهایی مدل

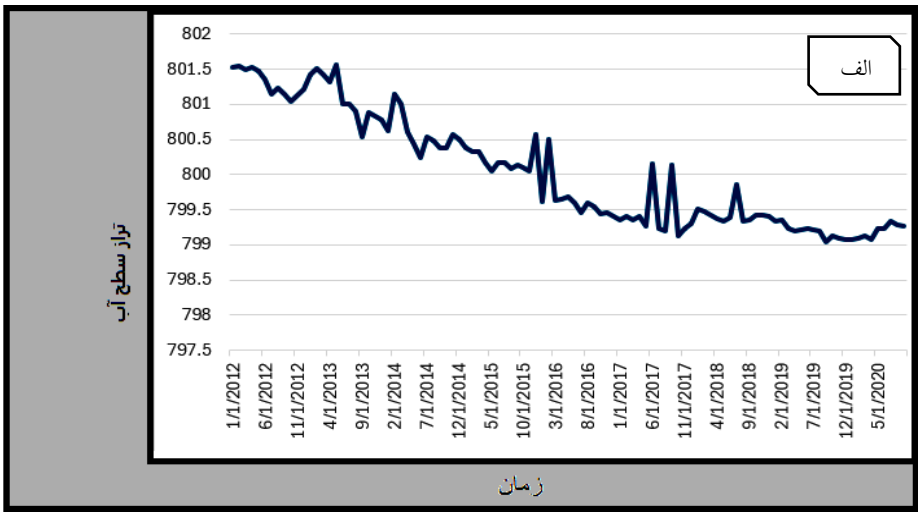
برای اطمینان از قابلیت اعتماد مدل، صحت‌سنجی نهایی آن در دوره زمانی ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲ با استفاده از داده‌های چهار چاه منتخب انجام شد. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی‌شده با داده‌های مشاهده‌ای نشان‌دهنده انطباق مطلوب و تبیین مناسب تغییرات بوده و مقدار ضریب تعیین (R^2) نزدیک به یک نیز تأییدکننده اعتبار نتایج مدل در این بازه زمانی است (شکل ۱۶).

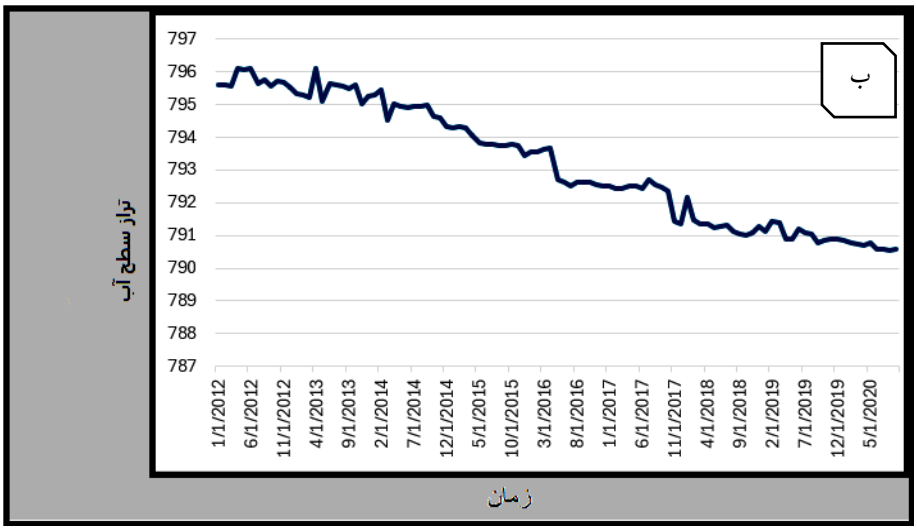
اعتبارسنجی نهایی مدل

ارزیابی صحت مدل در سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲ بر اساس داده‌های چهار چاه منتخب نشان داد که تطابق داده‌های مشاهده‌ای



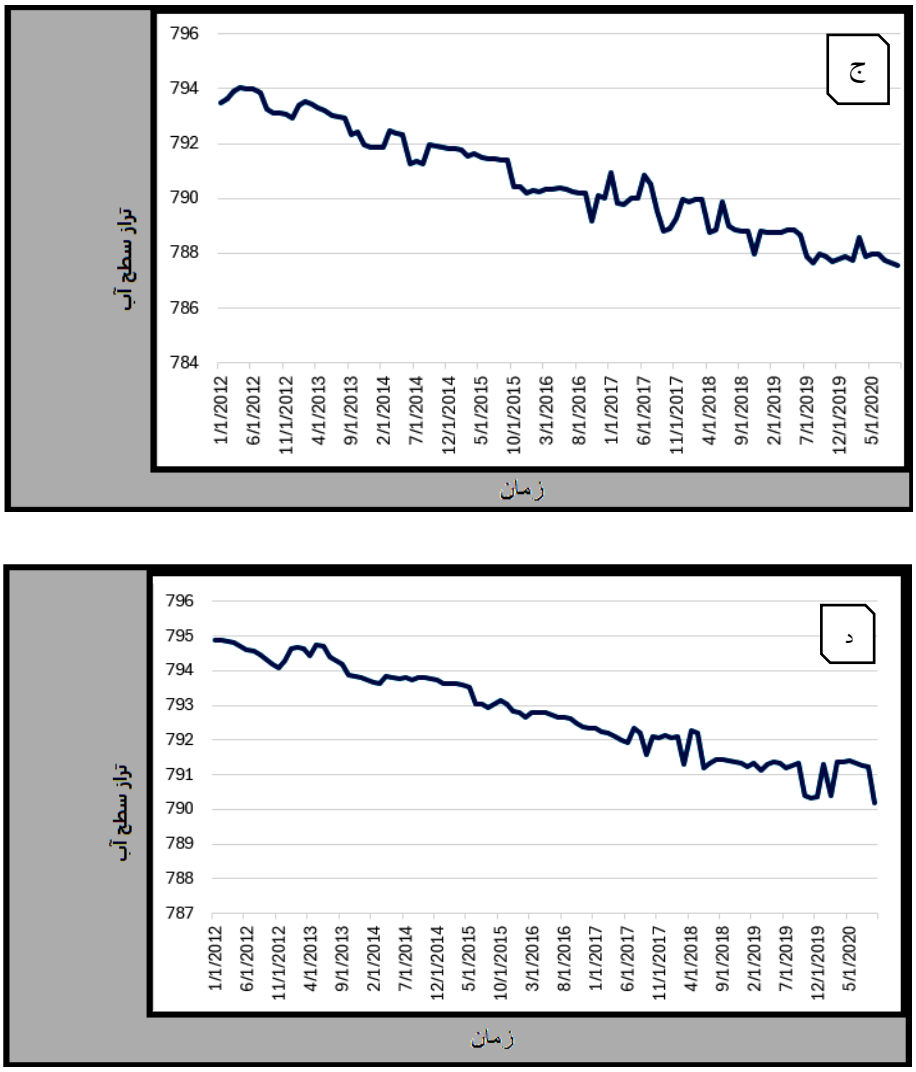
شکل ۱۴. موقعیت چهار چاه مشاهده‌ای انتخاب شده برای بررسی تغییرات سطح آب در دوره ناپایدار





شکل ۱۵. تغییرات تراز سطح چاه‌های پیزومتری انتخابی در دوره ناپایدار (۱۳۹۹-۱۳۹۰)

الف) چاه شماره ۴، ب) چاه شماره ۱۴، ج) چاه شماره ۱۳ و د) چاه شماره ۲



شکل ۱۵. تغییرات تراز سطح چاه‌های پیزومتری انتخابی در دوره ناپایدار (۱۳۹۹-۱۳۹۰)

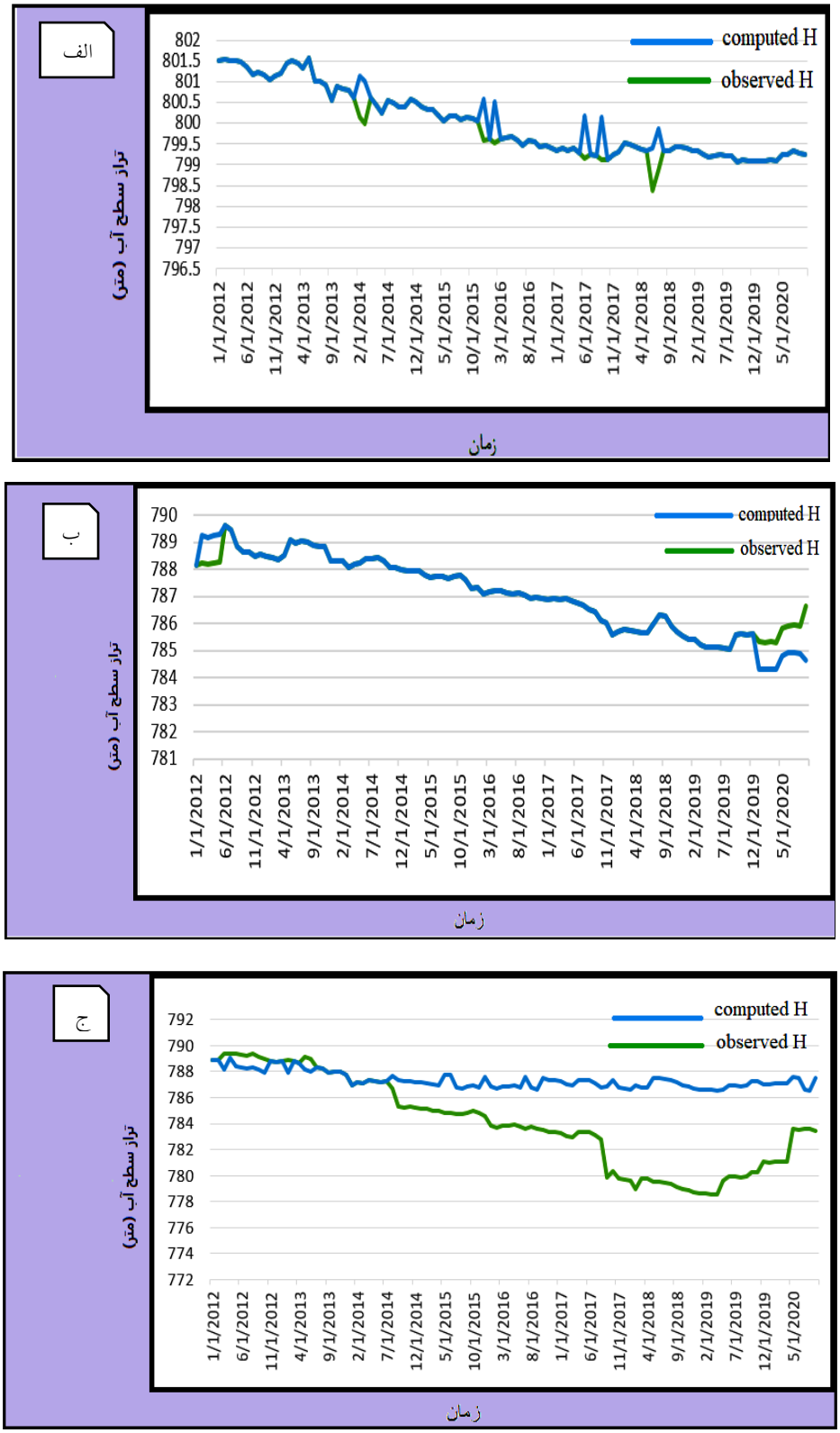
الف) چاه شماره ۴، ب) چاه شماره ۱۴، ج) چاه شماره ۱۳ و د) چاه شماره ۲ (ادامه شکل ۱۵)

مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده بسیار مناسب است. ضریب تبیین (R^2) نزدیک به یک، اعتبار و دقت زیاد مدل را به‌خوبی نشان می‌دهد (شکل ۱۶).

ارزیابی مدل MT3DMS در محیط GMS برای شبیه‌سازی کیفیت آب زیرزمینی

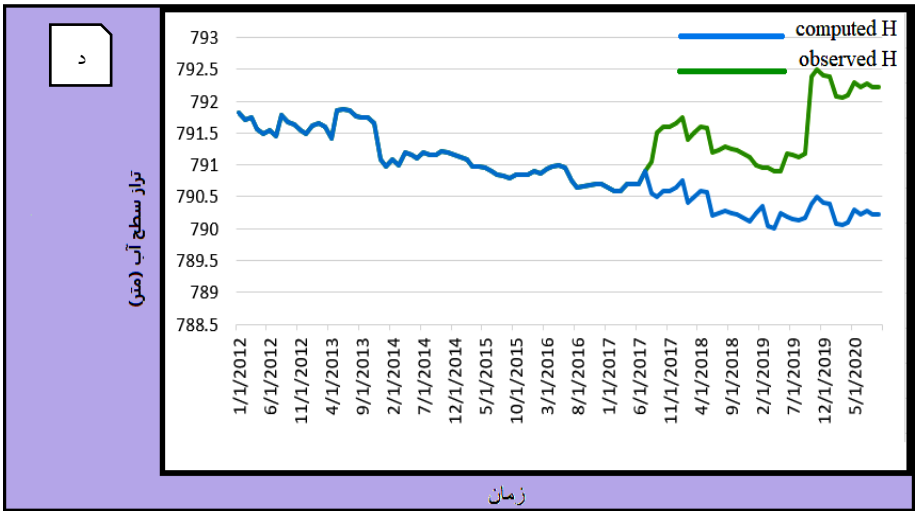
برای شبیه‌سازی کیفیت آبخوان، ابتدا مدل MODFLOW به‌منظور محاسبه جریان آب زیرزمینی اجرا شد. سپس نتایج مدل کمّی به‌عنوان ورودی مدل MT3DMS برای شبیه‌سازی انتقال و گسترش آلاینده‌ها در محیط زیرزمینی استفاده شد. مدل MT3DMS به‌طور خاص برای تحلیل پدیده‌هایی مانند نشت آلاینده‌ها از منابع نقطه‌ای مانند مخازن یا محل‌های دفن پسماند طراحی شده و امکان شبیه‌سازی عددی و تصویری توزیع مکانی آلودگی را فراهم می‌کند.

توسعه مدل نیازمند دسترسی به پارامترهای کلیدی مانند تخلخل مؤثر و ضریب پخشیدگی طولی و عرضی است. علاوه بر این، دقت شبیه‌سازی کیفی به دقت محاسبات کمّی وابسته است؛ بنابراین واسنجی دقیق مدل MODFLOW نقش اساسی در افزایش صحت نتایج مدل MT3DMS ایفا می‌کند.



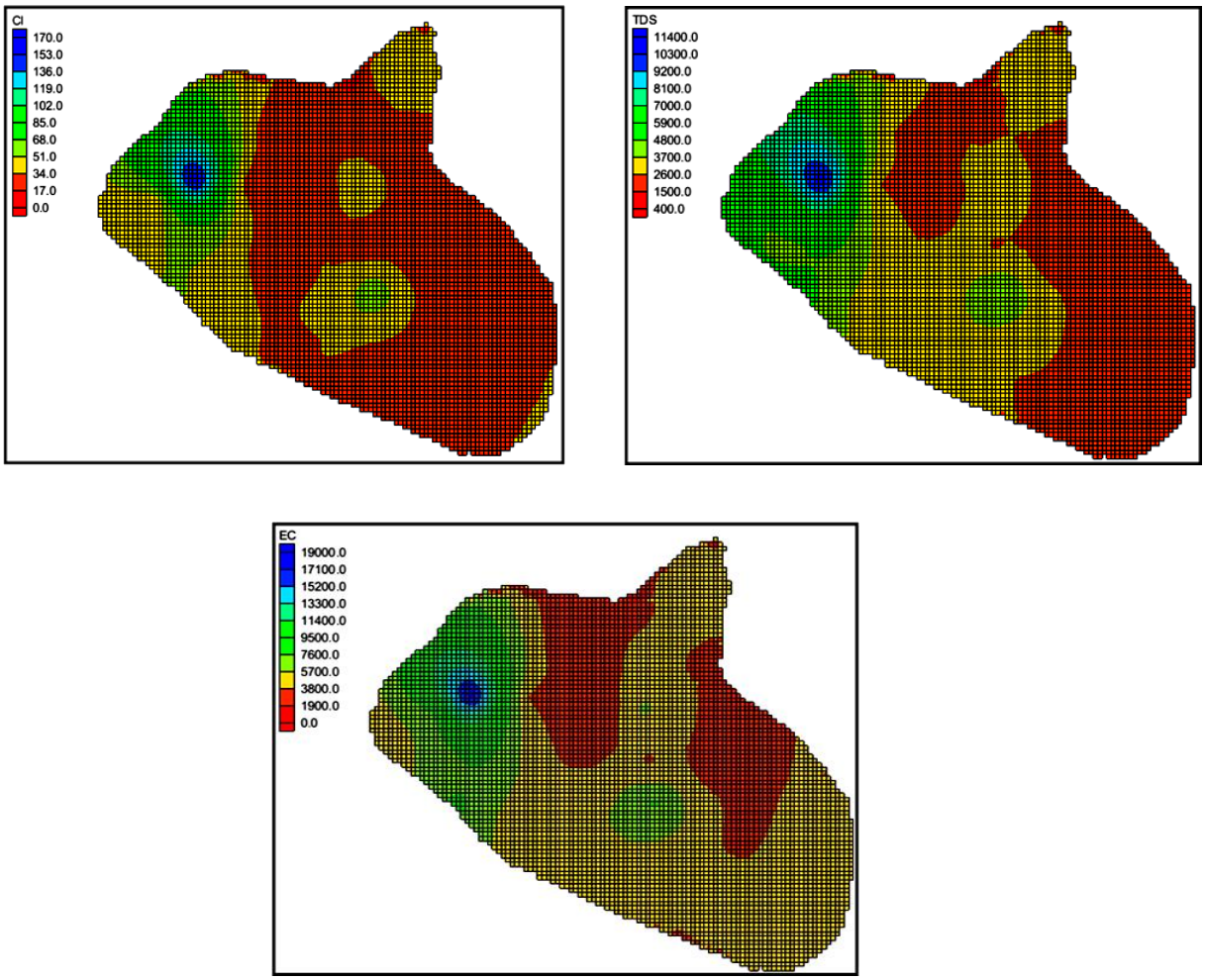
شکل ۱۶. مقادیر محاسباتی در مقابل مقادیر مشاهداتی بار هیدرولیکی در چاه‌های مشاهده‌ای در طول دوره صحت‌سنجی

الف) چاه شماره ۴، ب) چاه شماره ۵، ج) چاه شماره ۱۵ و د) چاه شماره ۱۶

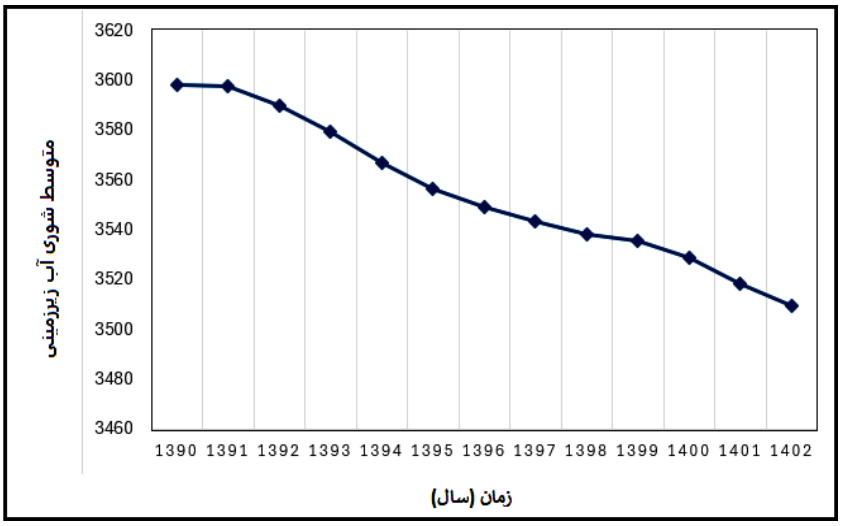


شکل ۱۶. مقادیر محاسباتی در مقابل مقادیر مشاهداتی بار هیدرولیکی در چاه‌های مشاهده‌ای در طول دوره صحت‌سنجی

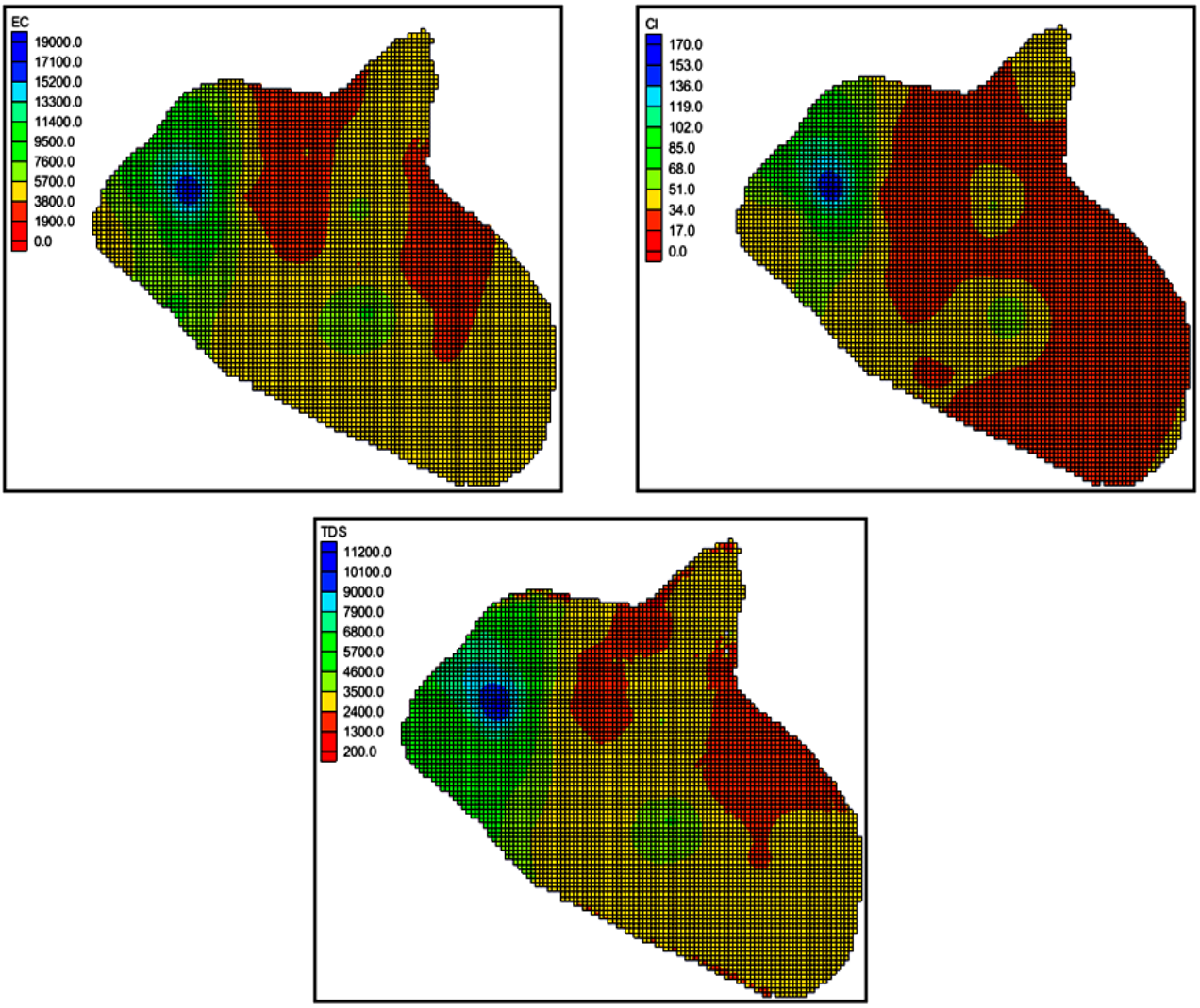
الف) چاه شماره ۴، ب) چاه شماره ۵، ج) چاه شماره ۱۵ و د) چاه شماره ۱۶ (ادامه شکل ۱۶)



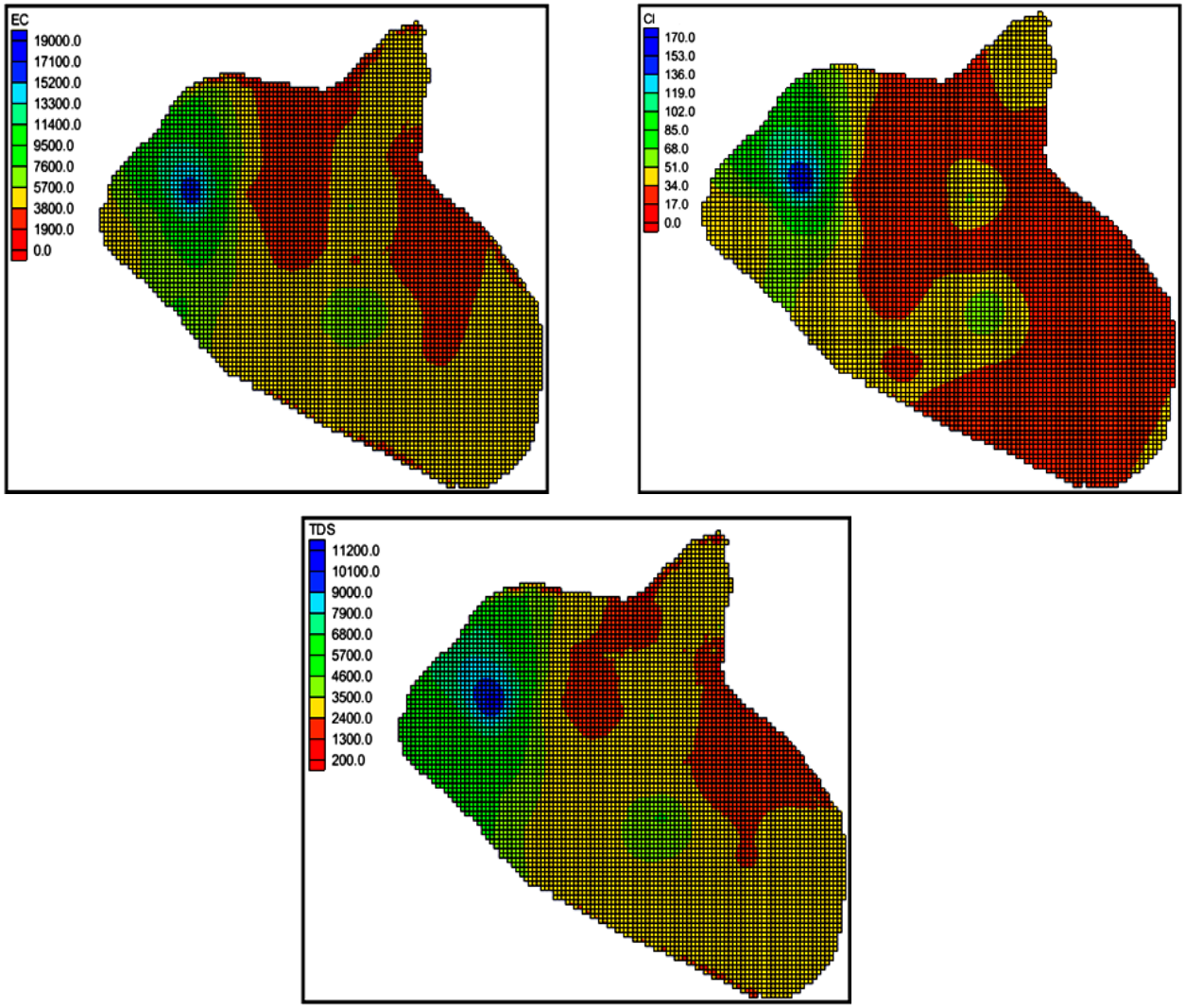
شکل ۱۷. مقادیر پارامترهای TDS، Cl و EC در پایان دوره مدل‌سازی حالت ناپایدار (سال ۱۴۰۲)



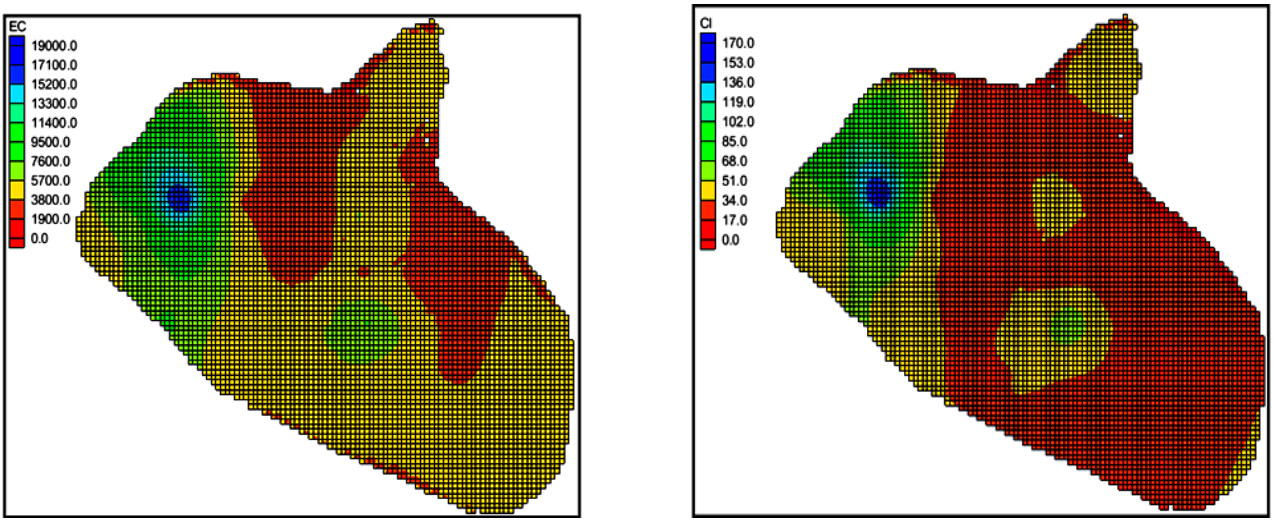
شکل ۱۸. کموگراف دشت گرمسار در سال‌های ۱۴۰۲-۱۳۹۰



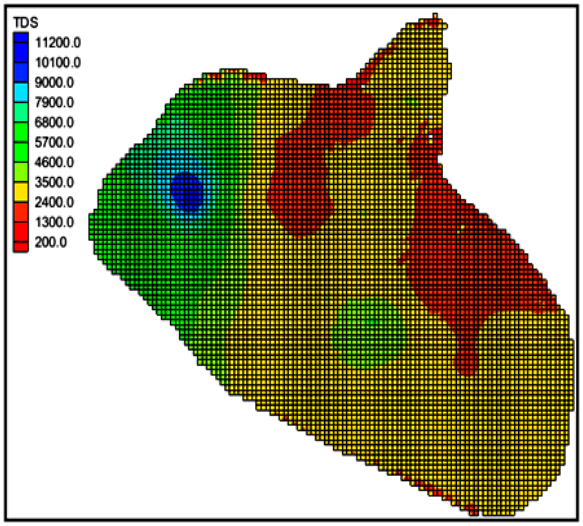
شکل ۱۹. نمودار تغییرات پارامترهای Cl و EC و TDS در انتهای دوره پیش‌بینی ۱۲ ساله پس از اعمال سناریوی اول



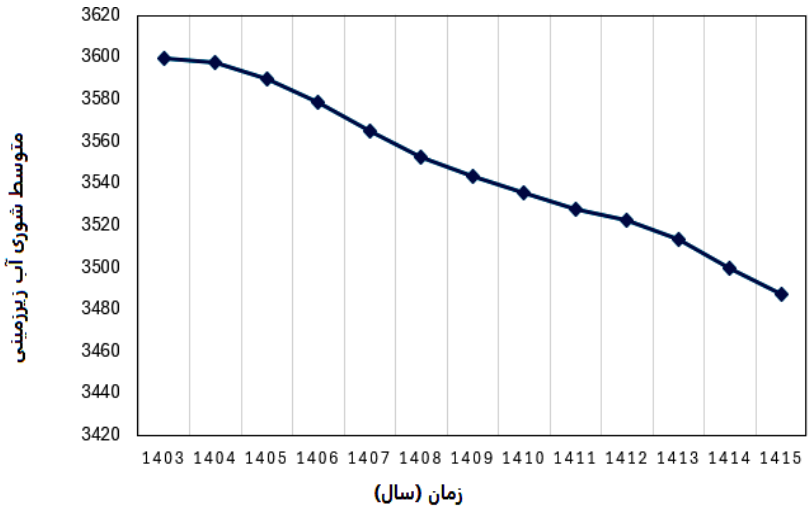
شکل ۲۰. نمودار تغییرات پارامترهای Cl و EC و TDS در انتهای دوره پیش‌بینی ۱۲ ساله پس از اعمال سناریوی دوم



شکل ۲۱. نمودار تغییرات پارامترهای Cl و EC و TDS در انتهای دوره پیش‌بینی ۱۲ ساله پس از اعمال سناریوی سوم



شکل ۲۱. نمودار تغییرات پارامترهای Cl و EC و TDS در انتهای دوره پیش‌بینی ۱۲ ساله پس از اعمال سناریوی سوم (ادامه شکل ۲۱)



شکل ۲۲. نمودار پیش‌بینی کموگراف آبخوان آبرفتی دشت گرمسار برای دوره ۱۴۰۳ تا ۱۴۱۵

تحلیل کیفی منابع آب زیرزمینی

در این مطالعه، کیفیت منابع آب زیرزمینی آبخوان گرمسار طی دوره ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۲ با استفاده از مدل MT3DMS شبیه‌سازی شد.

به‌منظور ارزیابی کیفیت، پارامترهای کلیدی شامل مجموع جامدات محلول (TDS)، کلراید (Cl) و هدایت الکتریکی (EC) به‌عنوان شاخص‌های اصلی انتخاب شدند.

نتایج مدل‌سازی (شکل ۱۷) نشان می‌دهد که در پایان سال آبی ۱۴۰۲، بیشترین غلظت آلاینده‌ها در نواحی غربی آبخوان متمرکز بوده و شوری آب به بیشترین مقادیر خود در این مناطق رسیده است. این موضوع حاکی از تأثیر تجمع آلاینده‌ها بر افت کیفیت منابع آب زیرزمینی در بخش‌های مرکزی و غربی دشت بوده و نشان‌دهنده نیاز به مداخلات مدیریتی مؤثر برای کاهش مخاطرات کیفی است.

تحلیل روند تغییرات شوری در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۲

شکل ۱۸ روند تغییرات شوری آب زیرزمینی را در بازه ۱۲ ساله نمایش می‌دهد. بر اساس نتایج مدل، میانگین

غلظت TDS از حدود ۳۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در سال ۱۳۹۰ به حدود ۳۴۷۰ میلی‌گرم بر لیتر در سال ۱۴۰۲ کاهش یافته است. این کاهش بیانگر بهبود نسبی کیفیت منابع آب در سطح آبخوان است.

عوامل مؤثر بر کاهش شوری

- **کاهش برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی** از طریق اجرای طرح‌های مدیریت بهره‌برداری.
- **بهبود روش‌های آبیاری** نظیر گسترش آبیاری قطره‌ای که موجب کاهش نفوذ املاح به سفره می‌شود.
- **تغییرات اقلیمی مثبت** از جمله افزایش بارندگی و کاهش تبخیر در برخی سال‌ها.
- **کاهش بار آلودگی‌های شیمیایی** به واسطه محدودسازی مصرف کودها و نمک‌های شیمیایی در کشاورزی.

پیامدهای مثبت کاهش شوری

- ارتقای کیفیت منابع آب برای مصارف شرب و کشاورزی.
- بهبود عملکرد محصولات کشاورزی و افزایش کارایی استفاده از منابع خاک.
- کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی به اکوسیستم‌های طبیعی.
- تقویت پایداری بلندمدت منابع آب در منطقه.

در مجموع، کاهش شوری را می‌توان به‌عنوان یکی از نتایج مثبت اقدامات مدیریتی و بهبود شرایط بهره‌برداری از آب زیرزمینی در منطقه دانست.

پیش‌بینی روند آتی کیفیت آب زیرزمینی

به‌منظور پیش‌بینی تغییرات آتی کیفیت منابع آب زیرزمینی طی ۱۲ سال آینده، مدل MODFLOW برای شبیه‌سازی جریان و مدل MT3DMS برای تحلیل کیفیت به‌صورت ترکیبی به کار گرفته شد. مدل مفهومی آبخوان با درنظرگرفتن منابع آلاینده بالقوه و مسیرهای انتشار آن‌ها به‌روزرسانی شد تا دقت شبیه‌سازی افزایش یابد.

بر اساس نتایج مدل (شکل ۲۱-۱۹)، در صورت تداوم شرایط فعلی، افزایش تدریجی در غلظت پارامترهای TDS، Cl و EC پیش‌بینی می‌شود. این روند افزایشی ناشی از تجمع تدریجی آلاینده‌ها در آبخوان و کاهش خودپالایی طبیعی آن است که در بلندمدت می‌تواند تهدیدی جدی برای کیفیت منابع آب به ویژه در مناطق پرجمعیت و کشاورزی‌محور محسوب شود.

بررسی تغییرات شوری آب‌های زیرزمینی در دوره ۱۴۰۳ تا ۱۴۱۵

نمودار شکل ۲۲ روند تغییرات شوری آب‌های زیرزمینی در بازه زمانی ۱۴۰۳ تا ۱۴۱۵ را نشان می‌دهد. در ابتدای این دوره، شوری آبها در حدود ۳۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بوده که تا پایان سال ۱۴۱۵ به حدود ۳۴۵۰ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافته است. این کاهش نمایانگر بهبود قابل توجه کیفیت آب زیرزمینی در این بازه زمانی است.

عوامل مؤثر در کاهش شوری شامل کاهش مصرف بی‌رویه منابع آب، بهبود روش‌های آبیاری، استفاده از فناوری‌های نوین در مدیریت منابع آب و همچنین تأثیرات اقلیمی مثبت است. این تغییرات عمدتاً ناشی از تلاش‌های مستمر به‌منظور حفاظت و بهبود کیفیت منابع آب زیرزمینی و افزایش بهره‌وری آب در بخش‌های مختلف به شمار می‌روند.

کاهش شوری علاوه بر بهبود کیفیت آب، پیامدهای مثبت اقتصادی و اجتماعی نیز به همراه دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به افزایش بازدهی کشاورزی، کاهش آلودگی‌های شیمیایی و تأمین آب با کیفیت مطلوب‌تر برای مصارف انسانی و صنعتی اشاره کرد. این روند می‌تواند به‌عنوان شاخصی مهم برای سنجش اثربخشی سیاست‌ها و برنامه‌های مدیریتی در حوزه منابع آب زیرزمینی محسوب شده و مبنایی برای تدوین استراتژی‌های جدید برای مقابله با بحران‌های آبی در آینده باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به‌منظور بررسی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت گرمسار، از مدل عددی MODFLOW بهره گرفته شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی شرایط پایدار نشان داد که مدل با دقت قابل قبولی قادر به بازسازی وضعیت هیدرودینامیکی آبخوان است. اعتبارسنجی مدل با استفاده از داده‌های ۱۶ چاه پیزومتری منطقه نشان داد که اختلاف میان ترازهای شبیه‌سازی‌شده و داده‌های مشاهداتی اندک بوده و شاخص‌های آماری نظیر میانگین خطای مطلق (MAE) کمتر از ۰/۱۶ متر و جذر میانگین مربعات خطا(RMSE) حدود ۰/۲۲ متر، گویای عملکرد رضایت‌بخش مدل است.

بررسی نتایج شبیه‌سازی ناپایدار در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹ نیز روند نزولی سطح آب زیرزمینی را در بیشتر چاه‌های مشاهده‌ای تأیید کرد. بیشترین کاهش تراز آب در برخی از چاه‌ها به بیش از ۷ متر رسید که این امر مؤید برداشت‌های بی‌رویه، کاهش تغذیه طبیعی آبخوان و تأثیر تغییرات اقلیمی است.

از منظر کیفی، تحلیل داده‌های شوری (TDS) در بازه ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۲ نشان‌دهنده کاهش نسبی در میزان شوری آب زیرزمینی بود که می‌تواند نتیجه اقدامات مدیریتی، محدودسازی برداشت‌های بی‌رویه و یا تغییر در الگوی مصرف آب در منطقه باشد. این یافته‌ها از اهمیت تداوم سیاست‌های حفاظتی و ضرورت پایش مستمر کیفیت منابع آب حکایت دارند.

مطالعات تطبیقی با پژوهش طباطبائی‌فر و همکاران (۱۶) نیز نشان داد که وضعیت کمّی آبخوان در سال‌های اخیر با افت شدید همراه بوده است. دلایلی مانند افت دبی رودخانه حبله‌رود، برداشت‌های غیرمجاز، کاهش بارندگی و پروژه‌های نامناسب انتقال آب، از عوامل اصلی این بحران به‌شمار می‌آیند. این وضعیت بر لزوم بازنگری در سیاست‌های مدیریتی و اجرای راهکارهای مبتنی بر شبیه‌سازی عددی و داده محور تأکید دارد.

در مجموع، نتایج این پژوهش اهمیت بهره‌گیری از ابزارهای مدل‌سازی عددی مانند MODFLOW در تحلیل رفتار آبخوان، ارزیابی سناریوهای مدیریتی و تدوین راهبردهای پایدار در مدیریت منابع آب زیرزمینی را به‌خوبی نشان می‌دهد. پیشنهاد می‌شود با تلفیق نتایج حاصل از این مطالعه و اطلاعات میدانی دقیق‌تر، نقشه راهی برای بهینه‌سازی بهره‌برداری و افزایش پایداری منابع آب دشت گرمسار تدوین شود.

منابع مورد استفاده

References

1. Biabani, L., G. A. Zehtabian, H. Khosravi and M. Hanifeh Pour. 2019. Evaluation of the trend of quantitative and qualitative changes in groundwater of Karaj Plain. *Iranian Rangeland and Desert Research* 26(1): 158-17.
2. Dinpajouh, Y., A. Fakherifard, M. A. Hassanpouregham and V. Beheshti Vayfan. 2015. Analysis of the trend of groundwater quality changes in the Shabestar-Sufian plain. *Irrigation Science and Engineering* 38(1): 55-69.
3. Ghazavi, R. and M. Ramezani-Sarbandari. 2016. Investigating the impact of changes in precipitation and groundwater withdrawal on quantitative and qualitative changes in aquifer water (case study of Rafsanjan Plain). *Hydrogeomorphology* 4(12): 111-129.
4. Ghobadian, R. and Bahrami, Z. 2017. Numerical study of applying quantitative and qualitative scenarios to the Khazal Plain aquifer of Hamadan Province using MODFLOW and MT3DMS models. *Journal of Rangeland and Watershed Management* 69(4): 1043-1062.
5. Jabalbarzi, B., G. R. Zehtabian, A. Tavili and H. Khosravi. 2020. Evaluation of changes in groundwater table levels in the Jafariyeh Plain using GMS software and MODFLOW code. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering* 14(50): 51-58.
6. Javadi, S., H. Kardan Moghaddam and A. Neshat. 2018. Evaluation and Simulation of Groundwater Flow in Aquifers Enclosed With Desert Saline Areas (Case study: Isfahan Province-Ardestan aquifer). *Water Harvesting Research* 3(1&2): 15-27.
7. Kalantari, N., A. Irani-Asl and H. Mohammadi. 2022. Quantitative and qualitative study of Baghmalek aquifer using statistical analysis, hydrochemical methods and GIS. *Hydrogeology* 7(1): 11-24.
8. Karimi, M. and M. R. Haddad. 2016. Investigation of quantitative and qualitative changes in groundwater resources of Mah-Valat plain. *Iranian Journal of Watershed Science and Engineering* 9(31): 23-31.

9. Khajeh, M., A. Bazrafshan, H. Vaqarfard and Y. Esmaeilpour. 2014. Quantitative and qualitative study of groundwater resources in the Persian plain. *Spatial Planning and Development* 18(4): 71-96.
10. Nasiri, M., M. Hamidi and H. Kardan Moghadam. 2023. Evaluation of the trend of quantitative and qualitative changes in groundwater resources (Case study: Sari-Naka aquifer). *Aquifer and Qanat* 3(2): 109-122.
11. Ostad-Ali-Askari, K. and M. Shayannejad. 2021. Quantity and quality modelling of groundwater to manage water resources in Isfahan-Borkhar aquifer. *Environment, Development and Sustainability* 23(11): 15943-15959.
12. Panahi, M., F. Mishaghi and P. Asgari. 2018. Simulation and estimation of groundwater level fluctuations using GMS (case study of Zanjan plain). *Quarterly Journal of Environmental Sciences* 16(1): 1-14.
13. Ranjbar, A. and B. Pirzadeh. 2022. Investigation of groundwater status of Hengam plain using quantitative and qualitative models (MODFLOW and MT3DMS). *Journal of Iranian Water Engineering Research* 1(1): 27-44.
14. Salehian, S., S. Hasanian, M. Kadkhodaei and R. Monshi Zadeh. 2024. Investigating quantitative and qualitative (EC) changes of underground water in Rafsanjan Plain. *Irrigation and Water Engineering* 14(4): 179-198.
15. Shabani, M. 2009. Investigation of changes in groundwater quality in the Arsanjan plain. *Journal of Natural Geography* 1(3): 71-82.
16. Tabatabaifar, M., G. Zehtabian, M. Rahimi, H. Khosravi and S. Niko. 2022. Investigating temporal and spatial changes in groundwater quality and quantity in the Garmsar Plain. *Desert Ecosystem Engineering* 3(4): 91-102.
17. Vali pour, H., M. Sayari, N. Bayat and F. Forutan. 2014. Qualitative and Quantitative Evaluation of Groundwater in Isfahan Najaf Abad Study Area. *Journal of Middle East Applied Science and Technology (JMEAST)* 16(4): 523-530.