

Numerical modeling and trend analysis of Mahabad aquifer quantitative status

Simin Sheikha BagemGhaleh¹ , Hossein Babazadeh^{2*} , Hossein Rezaei³ , Mahdi Sarai Tabrizi⁴ 

¹ Ph.D. Student, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Professor, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

³ Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Abstract

Introduction

Groundwater is an essential natural resource that is widely used to meet domestic, industrial, and agricultural needs. In recent years, the amount of withdrawal from groundwater has been more than the amount of its recharging leading to going out of balance. Since groundwater is in the ground and it is not possible to observe directly, identifying its properties is time-consuming and expensive. On the other hand, problems such as inconsistent and incomplete input information, heterogeneous aquifers, etc., have made groundwater study difficult. In many watersheds, groundwater resources are the strategic and primary source of water supply for different users. However, groundwater extraction has exceeded the amount rate of recharge in many regions around the world, resulting in harmful ecological and environmental problems, such as water level decline, water quality degradation, drying up of wells, increased pumping costs, and land subsidence. Assessing groundwater resources for their available water volume and obtaining an accurate prediction of groundwater levels (GWL) is central to sustainable management (i.e., balancing between demand and supply) of groundwater and surface water resources in a watershed. Therefore, tools such as groundwater modeling are used to solve this problem. Simulation of groundwater flow with mathematical models is an indirect approach to solving problems with lower costs than direct methods. In fact, the use of mathematical modeling is to simulate the natural conditions of the water surface with mathematical relationships. Groundwater modeling is done using differential equations, and one of the most widely used methods in solving groundwater problems is the use of finite differences and finite elements. Accordingly, the groundwater modeling system (GMS) model and the MODFLOW code were used in this research to study the Mahabad aquifer. Next, the trend of changes in the groundwater level of the range was analyzed by non-parametric tests. Accordingly, the groundwater modeling system (GMS) model and the MODFLOW code were used in this research to study the Mahabad aquifer.

Materials and Methods

The study area of Mahabad is located in West Azerbaijan province. GMS software and MODFLOW code were used for groundwater simulation. Using the information from 22 observation wells, exploitation wells information, river information, recharge, and withdrawal from groundwater, the desired model was built. The model was run in September 2015 for the steady state and October 2010- September 2011 for the transient state with a monthly time step. The values for hydraulic conductivity and storage coefficient were calibrated for the steady and transient states, respectively. Aquifer thickness varied from 60 to 200 m, and the cell size was considered 200×200 m. Rainfall infiltration, return flow, and input flows feed the aquifer. Seventeen percent of the monthly rainfall was considered rainfall infiltration that fed the aquifer. Moreover, based on the wells' primary use, return water from the wells was considered about 70, 75, and 20% for drinking water, industrial and agricultural wells, respectively. The GWL is higher in the South part of the aquifer compared to other parts and, as we move from the South part of the aquifer towards its central and southern regions, the GWL declines. In conclusion, the groundwater flows from the upper South part of the aquifer towards its lower part. More exploitation wells are in the aquifer's central section, and most of their extracted water is used for urban and

agricultural purposes. It was then implemented in two stable and unstable modes and its performance was evaluated with root mean square (RMSE), mean absolute error (MAE), and coefficient of determination (R^2) criteria. Various statistical methods have been provided to analyze the trend of time series. Among them, non-parametric methods are more useful in the time series of hydrological variables. These methods are suitable for time series that have elongation or skewness and are independent of the statistical distribution of the time series. In the following, the Mann-Kendall method and Sen's slope were used to determine the trend of the groundwater level at significant levels of 90, 95, 99, and 99.9%.

Results and Discussion

The simulation results showed that there is a very good agreement between the simulation and observational data. The model evaluation criteria including RMSE, MAE, and R^2 for two stable and unstable modes were calculated as 0.84, 0.63, and 0.99, as well as 0.88, 0.72, and 0.98 m, respectively. These values showed the appropriate efficiency of the model. Based on the results, the highest level of groundwater was in the south of the Mahabad aquifer and the lowest level was in the north of the aquifer. The optimized values of hydraulic conductivity, specific yield, aquifer thicknesses, values of exploitation wells, and aquifer transmissivity were determined from the groundwater simulation results. The results of the Mann-Kendall test showed that Haji Khosh, Gapis, and Gorg Tapeh stations had the highest downward trend. So, in these stations, the downward trend was more significant at the level of 0.99%. The Mann-Kendall Z-parameter values were positive for the Qom Qala station, which indicated the rising trend of the underground water level in this area. The results of Sen's slope test also confirmed the results of the Mann-Kendall test. It was so that the Sen's slope test showed that the downward slope of the three stations Haji Khosh, Gapis, and Gorg Tapeh occurs more strongly.

Conclusion

The results of this research showed that GMS and MODFLOW codes are suitable tools for simulating groundwater and the condition of the aquifer with proper accuracy. Also, the results of Mann-Kendall and Sen's slope tests showed that out of 19 wells, almost 18 had a downward trend, which shows that the Mahabad aquifer is not in a favorable condition and with the increase in harvesting and decrease in rainfall, especially in recent years, its situation will worsen. The Mann-Kendall test showed that the Mahabad aquifer is in poor condition so out of the 19 investigated wells, approximately 18 wells had a downward trend in the groundwater level. The age slope estimator method also confirmed the Mann-Kendall results. Examining the obtained results exhibits that the use of new approaches for simulation provides the opportunity to manage and balance the allocation of groundwater resources effectively. Further, the use of new tools can be considered for implementing balancing scenarios related to groundwater resources.

Keywords: Groundwater, Modeling, Mann-Kendall, Sen's Slope, Groundwater Simulation, MODFLOW

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail: h_babazadeh@srbiau.ac.ir

Citation: Sheikha BagemGhaleh, S., Babazadeh, H., Rezaei, H., & Sarai Tabrizi, M. (2023). Numerical modeling and trend analysis of Mahabad aquifer quantitative status. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(2), 1-17.

DOI: 10.22098/mmws.2022.11275.1113

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.2.1.5

Received: 06 August 2022, Received in revised form: 24 August 2022, Accepted: 24 August 2022, Published online: 24 August 2022

Water and Soil Management and Modeling, Year 2023, Vol. 3, No. 2, pp. 1-17

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





مدل سازی عددی و تحلیل روند وضعیت کمی آبخوان مهاباد

سیمین شیخابگم قلعه^۱، حسین بابازاده^{۲*}، حسین رضایی^۳، مهدی سرایی تبریزی^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ استاد، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۳ استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۴ استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

برای مدیریت منابع آب زیرزمینی نیاز به شناخت و عملکرد آبخوان در شرایط طبیعی است. در این راستا، بررسی روند و تغییرات تراز آب زیرزمینی موجب ایجاد مدیریتی پایدار از آن می‌شود. به همین منظور در این پژوهش از کد MODFLOW در نرم‌افزار GMS برای شبیه‌سازی آب زیرزمینی آبخوان مهاباد برای دوره دو ساله از سال ۱۳۸۹-۱۳۹۱ استفاده شد. مدل در دو حالت پایدار و ناپایدار اجرا شد و عملکرد آن با معیارهای خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب تبیین (R^2) مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه، برای تعیین روند تراز آب زیرزمینی از روش‌های من-کندال و روش شیب سن در سطوح معنی‌داری ۰/۹۰، ۰/۹۵، ۰/۹۹ و ۹۹/۹ درصد استفاده شد. نتایج نشان داد که مقادیر RMSE، MAE و R^2 برای حالت ناپایدار به ترتیب ۰/۸۸ متر، ۰/۷۲ متر و ۰/۹۹ است. بر اساس آزمون من-کندال ایستگاه‌های حاجی خوش، گاپیس و گوک‌تپه بیش‌ترین روند نزولی را داشتند. به طوری که در این ایستگاه‌ها روند نزولی بیش‌تر در سطح ۰/۹۹ درصد معنادار بوده است. مقادیر آماره Z من-کندال برای ایستگاه قم‌قلعه مثبت به دست آمد که بیان‌گر روند صعودی تراز آب زیرزمینی این منطقه بود. آزمون شیب سن نیز نشان داد که شیب نزولی سه ایستگاه حاجی خوش، گاپیس و گوک‌تپه با شدت بیش‌تری به ترتیب با شیب ۰/۰۹، -۰/۱۹ و -۱ کاهش پیدا می‌کند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که آبخوان مهاباد در وضعیت مطلوبی قرار ندارد و با افزایش برداشت و کاهش بارش‌ها به‌ویژه در سال‌های اخیر وضعیت آن بدتر نیز خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، آزمون شیب سن، آزمون من-کندال، شبیه‌سازی آب زیرزمینی، مدل‌سازی، MODFLOW

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: h_babazadeh@srbiau.ac.ir

استناد: شیخابگم قلعه، سیمین، بابازاده، حسین، رضایی، حسین، و سرایی تبریزی، مهدی (۱۴۰۲). مدل‌سازی عددی و تحلیل روند وضعیت کمی آبخوان مهاباد. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۲)، ۱-۱۷.

DOI: 10.22098/mmws.2022.11275.1113

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.2.1.5

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۰۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۲، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۶/۰۲

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۲، صفحه ۱ تا ۱۷

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

آب زیرزمینی یک منبع طبیعی مهم است که به‌طور گسترده برای تأمین نیازهای خانگی، صنعتی و کشاورزی استفاده می‌شود (Bashi-Azghadi et al., 2010). بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن؛ ایران در اقلیم بیابانی و علفزار خشک طبقه‌بندی می‌شود و دسترسی به آب همواره یکی از مهم‌ترین چالش‌های کل کشور بوده است. در ایران سالانه هفتاد میلیارد مترمکعب آب برای مصارف مختلف برداشت می‌شود که دو سوم مصرف آب کشور از منابع آب زیرزمینی استحصال می‌شود و این امر نقش حیاتی این منابع را در تأمین نیاز آبی کشور نشان می‌دهد. همچنین، در سال‌های اخیر با افزایش جمعیت و توسعه سریع صنعت و نوسازی کشاورزی، منابع آب زیرزمینی به تدریج در حال کاهش هستند (Malekzadeh et al., 2019). بیان آبی کشور نشان می‌دهد که مقدار تغذیه آب زیرزمینی کمتر از میزان برداشت آن بوده و این باعث افت شدید سطح آب زیرزمینی می‌شود (Kayhomayoon et al., 2021, 2022). از آنجایی که منابع آب زیرزمینی در زیر سطح زمین قرار دارند و به دور از مشاهده مستقیم هستند، درک کامل خواص آن‌ها برای انجام بسیاری از مطالعات اکتشافی زمان‌بر و پرهزینه است. دیگر مشکلاتی مانند مرزهای نامنظم، سفره‌های ناهمگن چندلایه و اطلاعات ورودی متناقض، تحلیل عملی جریان آب زیرزمینی را با چالش‌های بزرگی مواجه کرده است (Edalat et al., 2022).

مدل‌های آب زیرزمینی ابزار مناسبی برای پایش مداوم کمی و کیفی سفره‌های زیرزمینی هستند. نحوه حرکت و نوسانات آب زیرزمینی در محیط متخلخل با توجه به خواص محیط اطراف آن یکی از پیچیده‌ترین فرآیندهاست. حل این مسائل با شبیه‌سازی با استفاده از روابط ریاضی امکان‌پذیر است (Mohammadi et al., 2021). شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی با مدل‌های ریاضی یک رویکرد غیرمستقیم برای حل مسائل با هزینه کمتر نسبت به روش‌های مستقیم است. در واقع هدف از توسعه مدل‌های ریاضی شبیه‌سازی شرایط طبیعی سطوح آب با استفاده از یک سری روابط ریاضی است. درک منابع آب زیرزمینی از طریق استفاده از مدل‌های ریاضی که قادر به شبیه‌سازی دینامیک یک سیستم آبخوان هستند، بهبود می‌یابد (Boyce et al., 2015).

مدل جریان آب زیرزمینی در واقع مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل است (Mays and Todd, 2005). یکی از پرکاربردترین روش‌ها در حل مسائل آب زیرزمینی، معادلات تفاضل محدود و اجزاء محدود است. این روش‌ها برای ارزیابی جریان‌های پیچیده زیرزمینی و عکس‌العمل سفره‌های ناهمگن،

ناهمسان و ناپایدار با چاه‌های پمپاژ متعدد و شرایط مرزی پیچیده به‌کار گرفته می‌شوند (Marquez et al., 2006). مدل‌هایی که از این روش‌ها بهره می‌برند شامل: مدل GMS و کد MODFLOW بوده که در پژوهش‌های گذشته نیز با موفقیت استفاده شده است. به‌عنوان نمونه، (Azizi et al., 2019) از مدل GMS برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی آبخوان دشت ملکان استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تطابق خوبی بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی برقرار است. Bayat et al. (2020) مدل آب زیرزمینی حوضه گاوخونی در استان اصفهان را برای ۸۶ ماه در حالت‌های پایدار و ناپایدار واسنجی نموده و شش سناریو برای مدیریت آب زیرزمینی تدوین کردند. در پژوهش دیگری، (Dastvareh et al., 2020) از اطلاعات ۱۶ چاه مشاهداتی استفاده کردند تا وضعیت آبخوان دشت میناب را بررسی کنند. آن‌ها با فرض ناپایدار بودن جریان، مدل را با ۱۲ گام زمانی واسنجی کردند و نتیجه گرفتند که مجموع تغذیه به آبخوان ۱۴۰۹/۴۳۳ میلیون مترمکعب و مجموع تخلیه از آبخوان برابر ۱۶۴۰/۱۰۱ میلیون مترمکعب بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که آبخوان روند نزولی دارد که موجب کاهش تراز آب زیرزمینی خواهد شد.

تجزیه و تحلیل داده‌های تراز آب زیرزمینی و پیش‌بینی روند در آینده برای توسعه پایدار و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی ضروری است (Cheraghi et al., 2020). آگاهی از چگونگی تغییرات سطح آب زیرزمینی به درک و شناخت بهتر و صحیح‌تر مدیران از وضعیت حال و گذشته آبخوان به‌منظور مدیریت صحیح حال و آینده آن کمک می‌کند (Roushangar et al., 2020; Adeli et al., 2018). به‌منظور تعیین روند تغییرات متغیرهای منابع آب زیرزمینی، روش‌های آماری ابزاری قدرتمند هستند که استفاده از این روش‌ها نیازمند آگاهی از ماهیت داده‌هاست (Ensaifi Moghaddam et al., 2020). روش‌های پارامتریک به اندازه نمونه‌ها حساس هستند و در صورتی که اندازه نمونه‌ها کوچک باشند، استفاده از روش‌های پارامتریک توصیه نمی‌شود. در این شرایط روش‌های ناپارامتری حتی بهتر از روش‌های پارامتریک عمل می‌کنند (Abareshi et al., 2014). استفاده از روش‌های روندیابی و تحلیل زمانی تغییرات مانند روش‌های ناپارامتری من-کندال و شیب سن ابزار مفیدی برای ارزیابی تغییرات روند است. چرا که کارایی استفاده از این روش‌ها در روندیابی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی در پژوهش‌های (Ebrahimi khusfi et al., 2019; Sahoo et al., 2021; Ensafi Moghaddam et al., 2021) به اثبات رسیده است. در پژوهشی، (Gholami et al., 2021) برای بررسی روند جریان آب زیرزمینی از اطلاعات ۱۷ چاه مشاهده‌ای و آزمون من-کندال

کمی بر سفره آب زیرزمینی دارند، ولی سنگ‌های دولومیتی پرمین و افق‌های الیگومیوسن به لحاظ داشتن درز و شکاف فراوان و احتمال حضور پدیده کارست، تا حدودی در تغذیه حواشی دشت مؤثر هستند. در جنوب دشت به سمت قسمت‌های میانی، که محل فعالیت رودخانه مهاباد است، تغذیه سفره از ارتفاعات و از طریق بستر رودخانه مهاباد با جریان پیوسته در تمام مدت سال صورت می‌گیرد. بررسی آمار درازمدت بارندگی در ایستگاه سینوپتیک مهاباد نشان می‌دهد که حداکثر بارش سالانه در این منطقه ۶۷۸/۴ میلی‌متر و حداقل میزان بارش ۱۷۳/۴ میلی‌متر ثبت شده است. متغیر دما نقش مهمی در وضعیت اقلیم منطقه دارد. شهرستان مهاباد به دلیل قرار گرفتن در ارتفاعات از دمای مناسبی برخوردار است. میانگین حداقل و حداکثر دما طی سال‌های ۱۳۶۳ تا ۱۳۹۲ به ترتیب برابر ۶/۸ و ۱۹/۱ درجه سانتی‌گراد است (Ministry of Energy, 2013).

۲-۲- مدل‌سازی آب زیرزمینی

معادله اساسی جریان در محیط متخلخل، با در نظر گرفتن یک جزء حجم معرف سفره با ابعاد (ΔX) و (ΔY) (در جهت افق) و (ΔZ) (در جهت عمودی) و از ترکیب اصول اساسی نظیر معادله پیوستگی^۱ و اصل بقای انرژی یا جرم مشتق شده است. در شرایط ماندگار بار هیدرولیکی نسبت به زمان تغییر نمی‌نماید، به عبارت دیگر هیچ‌گونه تغییری در ذخیره آبخوان روی نمی‌دهد از معادله لاپلاس^۲ جهت شبیه‌سازی استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی در حالت ناماندگار معادله (۲) یک معادله دیفرانسیل جزئی خطی بوده که با حل آن توزیع مکانی و زمانی بار پیژومتریکی در آبخوان محبوس، غیرهمگن و ناهمسان‌گرد را در شرایط غیرماندگار نشان می‌دهد.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

و همچنین آزمون شیب سن استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در طول دوره آماری مورد مطالعه (۱۳۸۴-۱۳۹۴) سطح ایستابی به میزان ۱۱/۸ متر افت داشته است. Delavar et al. (2021) روند تغییرات کمی سطح ایستابی دشت فیروزآباد را برای دوره ۱۳۷۱ تا ۱۳۹۰ با استفاده از آزمون من-کندال بررسی کردند. نتایج نشان داد که سطح آب زیرزمینی دارای افت مستمر و زیادی بوده است، به طوری که بیش‌ترین افت در سمت شرق به میزان ۲۱ متر بوده است. عمده مطالعات مدیریت منابع آب در منطقه مبتنی بر مطالعات نقطه‌ای با رویکرد بخشی‌نگری است و بخش عمده آن‌ها جهت رفع نیازها و بدون توجه به اثرات یک پروژه بر سایر بخش‌ها انجام می‌شود؛ لذا نگاه جامع به یک حوضه آبریز می‌تواند بسیاری از مشکلات موجود در منطقه را از یک منظر یکپارچه مدیریت نموده، توسعه پایدار را بر اساس عامل کلیدی محدودیت آب به همراه داشته باشد. با وجود این، بررسی وضعیت آب زیرزمینی یک محدوده و تغییرات آن می‌تواند کمک شایانی در تدوین سناریوهای مدیریتی در جهت مدیریت منابع آب زیرزمینی داشته شد. از این‌رو، با بررسی پژوهش‌های گذشته و لزوم بررسی وضعیت آبخوان مهاباد، این پژوهش با هدف بررسی وضعیت آب زیرزمینی انجام شد که تاکنون با وجود پژوهش‌های مشابه در این زمینه، اما آبخوان مذکور مورد مطالعه قرار نگرفته بود. در ابتدا به شبیه‌سازی آبخوان مهاباد با استفاده از کد MODFLOW پرداخته شد. در ادامه، روند تغییرات تراز آب زیرزمینی محدوده، توسط آزمون‌های ناپارامتری مورد تحلیل قرار گرفت. بر همین اساس، هدف از این پژوهش تعیین روند تغییرات سطح آب با استفاده از آزمون من-کندال و تخمین گر شیب سن است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

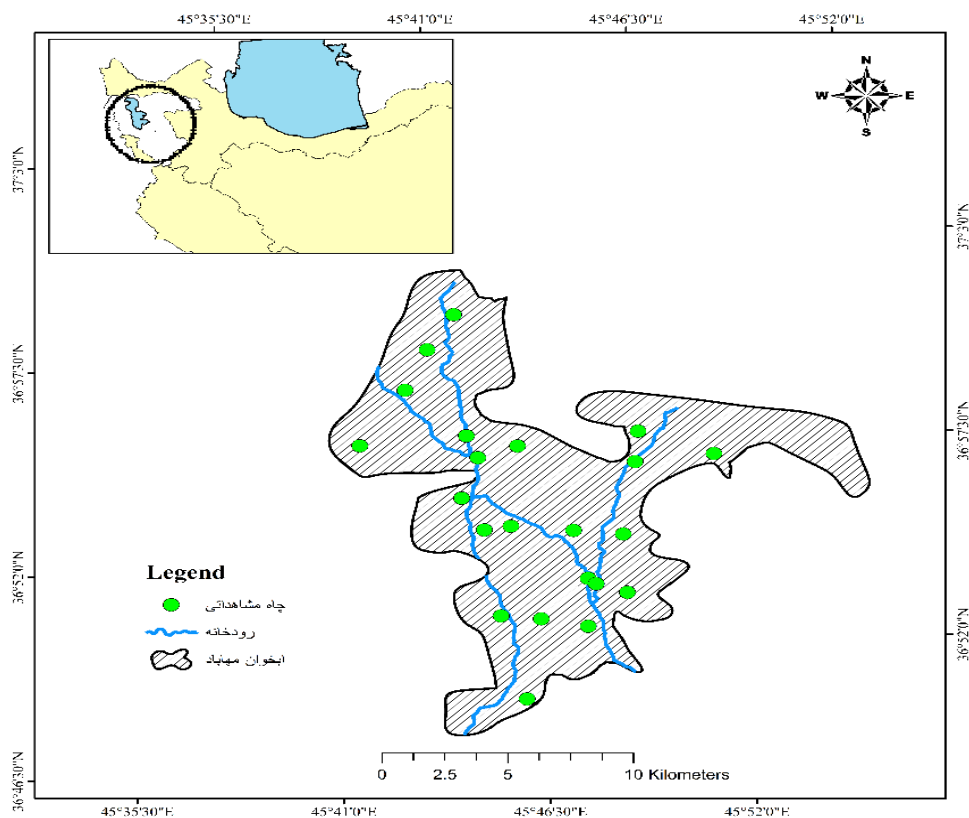
محدوده مطالعاتی مهاباد در استان آذربایجان غربی قرار دارد. این محدوده مطالعاتی با مساحت ۱۵۰۸ کیلومتر مربع حدود ۲/۹ درصد از کل حوضه آبریز دریاچه ارومیه را در بر می‌گیرد. از این میزان ۲۴۹ کیلومتر مربع مربوط به وسعت دشت و ۱۲۵۹ کیلومتر مربع را نیز ارتفاعات محدوده تشکیل می‌دهد. رودخانه مهاباد چای به‌عنوان اصلی‌ترین رودخانه در جهت جنوب به شمال این محدوده مطالعاتی جریان دارد.

این محدوده در موقعیت جغرافیایی با طول ۴۵ درجه و ۴۳ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۶ دقیقه شمالی قرار گرفته و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۳۸۵ متر است (شکل ۱). دشت مهاباد در دامنه رشته‌کوه‌های لندشیکان قرار دارد و از آب‌وهوای معتدل کوهستانی برخوردار است. ارتفاعات حواشی دشت، تأثیر

^۱Continuity Equation

^۲Conservation of Energy or Mass

Laplace Equation



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی مهاباد، ایران
Figure 1- Location of Mahabad area, Iran

آبخوان نیز جزء مرزهای ناتراوا در نظر گرفته شده‌اند. تعداد کل چاه‌های محدوده مطالعاتی مهاباد در آخرین آماربرداری سراسری (سال ۱۳۸۹-۱۳۹۰) ۸۸۱ حلقه چاه با تخلیه ۲۷ میلیون مترمکب در سال است (شکل ۲). عمده تغذیه آبخوان‌ها از بارندگی و مقدار آب برگشتی از چاه‌های بهره‌برداری صورت می‌گیرد. حدود ۱۷ درصد از بارندگی در محدوده را به‌عنوان تغذیه به آبخوان در نظر گرفته شده است (Ministry of Energy, 2009). در چاه‌های بهره‌برداری و در حالت کلی نیز برای چاه‌های شرب حدود ۶۰ تا ۷۵ درصد از میزان آب مصرفی، برای چاه‌های کشاورزی این میزان درصد کمتر و در حدود ۱۵ تا ۳۰ درصد و در نهایت برای چاه‌هایی از نوع صنعت در حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد میزان آب مصرفی در نظر می‌گیرند (Milan et al., 2018). بنابراین، نیاز است محاسبات مربوطه انجام و در مدل‌سازی در نظر گرفته شود. در این پژوهش برای آب برگشتی کشاورزی، شرب و صنعت به ترتیب ۷۵، ۲۰ و ۵ درصد برداشت از آبخوان در نظر گرفته شد. حدود ۲۲ چاه مشاهداتی نیز مسئولیت کنترل تراز آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی را دارند که نحوه قرارگیری آن‌ها در شکل ۲ آمده است. از مهر ۱۳۸۹ به‌عنوان ماه و سال پایه و شروع مدل‌سازی استفاده شده است. در این حالت مقادیر هدایت هیدرولیکی که تخمین زده شده بود واسنجی می‌شوند و مقادیر واسنجی شده جهت ادامه شبیه‌سازی

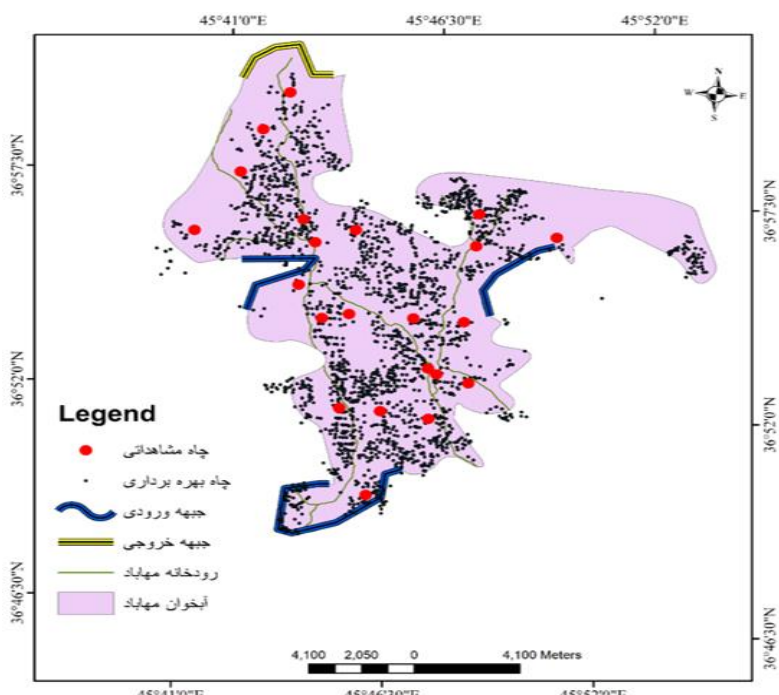
نرم‌افزار GMS ابزار مناسبی جهت واسنجی در اختیار کاربران قرار داده است. این نرم‌افزار از کدهای مختلفی برای شبیه‌سازی آب زیرزمینی، شبیه‌سازی کیفی آب زیرزمینی، شبیه‌سازی آلاینده‌ها، نشت از سدهای خاکی و فروشست زمین برخوردار است. محیط کاربر پسندی دارد و استفاده از ماژول‌های آن بسیار ساده است. کد MODFLOW یکی از معروف‌ترین کدها در این نرم‌افزار است که برای شبیه‌سازی کمی آب زیرزمینی استفاده می‌شود. در این کد مدل مفهومی تعریف می‌شود که شامل محدوده آبخوان، جریان‌های زیرزمینی ورودی و خروجی آبخوان، منابع تغذیه، تخلیه و نقاط مشاهداتی آبخوان است.

۳-۲- شبیه‌سازی آبخوان مهاباد

شبیه‌سازی آب زیرزمینی در دو حالت پایدار و ناپایدار انجام می‌شود. حالت پایدار به‌منظور در نظر گرفتن شرایط نرمال آبخوان و ساخت مدل مفهومی آن انجام می‌شود، اما حالت ناپایدار حالت واقعی آب در نظر گرفته می‌شود. در آبخوان مهاباد، شیب و به‌تبع آن جهت جریان آب زیرزمینی از سمت جنوب به شمال است که با توجه به شکل ۲ جبهه‌های ورودی آب زیرزمینی را می‌توان قسمت‌های جنوبی سفره و محل تخلیه را قسمت شمالی آن در نظر گرفت. همچنین، قسمتی از مرزهای غربی نیز دارای مرز جبهه ورودی است. مرزهای شرقی و قسمتی از مرزهای غربی

چاه بهره‌برداری، تغذیه آبخوان و سایر اطلاعات دیگر که نسبت به زمان متغیر هستند تعیین می‌شود. در این حالت در هر گام زمانی نیاز است مقادیر بین چاه‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی کنترل شود. همچنین در حالت ناماندگار مقادیر اولیه آب‌دهی ویژه به واسنجی نهایی می‌رسند. اگر مدل در حالت ناماندگار به واسنجی نهایی برسد، قابل استفاده برای اجرای سناریوهای مختلف مدیریتی است.

استفاده می‌شود. به علاوه مقدار جریان آب زیرزمینی و خروجی آن نیز کنترل می‌شود. مدل ساخته شده و واسنجی شده در حالت ناماندگار برای حالت ناماندگار استفاده می‌شود. مدل ناماندگار برای دو سال و از مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۱ ساخته شد. در حالت ناماندگار شرایط واقعی آبخوان تا حدودی در نظر گرفته می‌شود. در این حالت گام‌های زمانی مختلفی در مقیاس ماهانه یا سالانه تدوین می‌شود. برای هر گام زمانی نیز مقادیر چاه‌های مشاهداتی،



شکل ۲- جبهه‌های ورودی و خروجی آبخوان مهاباد

Figure 2- Input and output fronts of Mahabad aquifer

استفاده می‌شود که در آن فرض صفر بر تصادفی بودن و نبود روند در سری داده‌ها و فرض یک بیان‌گر وجود روند است. در این آزمون ابتدا اختلاف بین هر یک از مشاهدات با تمام مشاهدات

پس از آن محاسبه و پارامتر S نیز از رابطه ۳ تعیین می‌شود:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j + x_k) \quad (3)$$

در این رابطه، n تعداد مشاهدات سری و x_j و x_k به ترتیب داده‌های زام و k ام سری هستند. در مرحله بعد واریانس S با یکی از رابطه‌های ۴ محاسبه می‌شود:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{f=1}^m f(f-1)(2f+5)}{18} \quad (4)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

در این رابطه، n و m معرف تعداد دنباله‌هایی است که در آن‌ها دست کم یک داده تکراری وجود دارد. همچنین، t بیان‌گر فراوانی داده‌های بارزش یکسان در یک دنباله (تعداد گره‌ها) است. در

۲-۴- آزمون‌های ناپارامتری

برای تحلیل روند سری‌های زمانی روش‌های آماری مختلفی ارائه شده است. در بین آن‌ها روش‌های ناپارامتری در سری زمانی متغیرهای هیدرولوژیکی کاربرد بیشتری دارد (Xu et al., 2003). این روش‌ها برای سری زمانی که دارای کشیدگی یا چولگی باشند، مناسب بوده و مستقل از توزیع آماری سری زمانی هستند (Roushangar et al., 2020; Ershad Hosseini et al., 2021).

۲-۴-۱- آزمون من-کندال

یکی از آزمون‌های پرکاربرد در روش ناپارامتری، آزمون من-کندال است که توسط من (۱۹۴۵) و سپس کندال (۱۹۷۰) بسط و توسعه یافته است. در این آزمون از دو فرض صفر و یک

^۱Mann

^۲Kendall

مقادیر داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نسبت به هم و خط $y=x$ رسم و در شکل ۴ قابل مشاهده است. مطابق این شکل مشخص می‌شود که مقادیر بر خط رگرسیونی قرار دارند و مقدار ضریب تبیین آن نیز در حدود ۰/۹۸۹ است که حاکی از دقت مناسب از نظر معیار ارزیابی ضریب تبیین است. مدل ساخته شده علاوه بر دقت چشمی و رگرسیونی توسط معیارهای ارزیابی خطا نیز کنترل می‌شود. از آنجایی که هر چه مقادیر RMSE و MAE به صفر نزدیک‌تر باشند نشان از دقت مناسب مدل‌سازی است. مقادیر ۰/۸۷ و ۰/۷۴ به ترتیب برای RMSE و MAE بیان‌گر شبیه‌سازی مناسب مدل‌سازی هستند.

شکل ۵ مقادیر واسنجی شده هدایت هیدرولیکی را نشان می‌دهد. با ارجاع به شکل مشخص است که شمال آبخوان مقادیر هدایت هیدرولیکی بین ۲/۵ تا ۶ متر در روز را دارد. بیش‌ترین مقدار آن نیز در قسمت جنوب شرقی آبخوان بوده که مقادیر آن از ۱۶/۵ تا ۲۹ متر در روز متغیر است. این مقادیر در ناحیه مرکزی آبخوان نیز از ۸ تا ۱۲ متر در روز متغیر هستند. نتایج مقادیر هدایت هیدرولیکی با زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی نیز همخوانی دارد، به طوری که در ابتدای آبخوان عموماً موارد تشکیل‌دهنده ساختمان آبخوان درشت‌دانه هستند. لذا بیش‌ترین هدایت هیدرولیکی در این ناحیه مشاهده می‌شود. کم‌ترین مقدار هدایت هیدرولیکی نیز مربوط به انتهای آبخوان است که ریزدانه‌ها تشکیل‌دهنده ساختمان آبخوان هستند.

۳-۲- نتایج تراز آب زیرزمینی در حالت ناماندگار

در این پژوهش برای واسنجی مدل، ۲۴ گام زمانی ماهانه و از آبان ۱۳۸۹ در نظر گرفته شده است. پس از اجرای مدل و با تغییرات مقادیر تغذیه و جریان‌های زیرزمینی ورودی و خروجی که در ماه‌های مختلف متفاوت هستند، تمام گام‌ها واسنجی شدند. شکل ۶ مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی چاه‌های مشاهداتی برای حالت ناماندگار را به صورت سری زمانی در چند چاه به عنوان چاه‌های نمونه (چاه P6، P14 و P2) نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که انطباق خوبی بین مقادیر ذکر شده برقرار است. با توجه به محور y مقادیر بین مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ناچیز و کم‌تر از یک متر هستند. به علاوه در چاه‌های ترسیم شده مدل به خوبی توانسته است تغییرات تراز آب زیرزمینی را به درستی تشخیص دهد.

نهایت نیز آماره Z با استفاده از یکی از رابطه‌های (۵) استخراج می‌شود:

$$z = \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} \quad \text{for } S > 0 \quad (5)$$

$$z = 0 \quad \text{for } S = 0$$

$$z = \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} \quad \text{for } S < 0$$

فرضیه صفر در صورتی پذیرفته می‌شود که شرایط زیر برقرار باشد:

$$|Z| < Z_{\alpha/2}$$

Z سطح معناداری است که برای آزمون در نظر گرفته می‌شود و Z_{α} آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌داری است. در صورتی که Z مثبت باشد، روند سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن آن، روند نزولی در نظر گرفته می‌شود (Mann, 1945; Kendall, 1970). این آزمون در سه سطح معناداری ۰/۹۰، ۰/۹۵ و ۰/۹۹ درصد انجام شد. در صورتی که آماره من-کندال بین ۰/۹۶+ و ۰/۹۶- قرار داشته باشد، روند غیرمعنی‌دار، بزرگ‌تر از ۰/۹۶+ روند صعودی و بمعنی‌دار و کم‌تر از ۰/۹۶- روند نزولی را نشان می‌دهد.

۲-۴- آزمون شیب سن

شیب سن بزرگی روند یکنواخت را نشان می‌دهد که با β نمایش داده می‌شود و آن شیب خط روند یکنواخت در سری داده‌ها را نمایش می‌دهد (Shamsudduha et al., 2009).

$$\beta_{gk} = \text{Median} \left(\frac{x_{igk} - x_{jgk}}{i - j} \right), \quad (6)$$

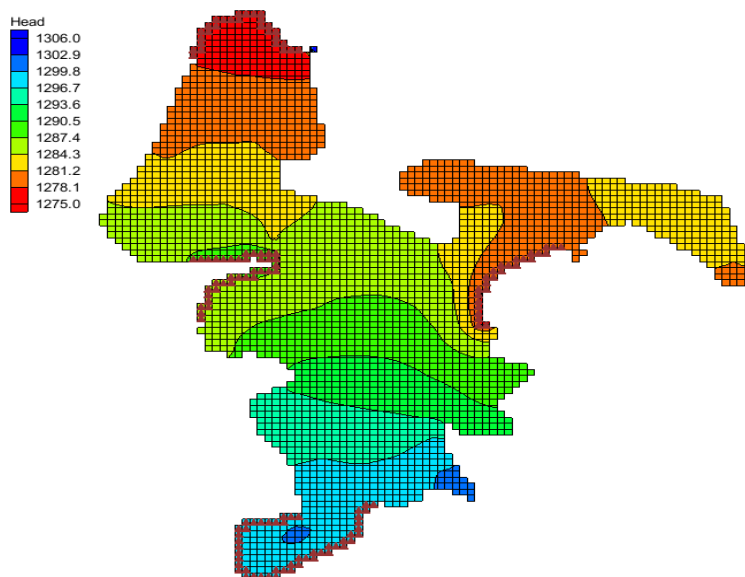
$$\forall 1 \leq i \leq j \leq n$$

که در آن β_{gk} برآوردگر شیب خط روند برای ایستگاه k ام در ماه g ام است مقادیر مثبت β نشان‌دهنده روند افزایشی و مقادیر منفی نشان‌دهنده روند کاهشی است. هر دو آزمون مورد بررسی در محیط ماکرو اکسل پیاده‌سازی شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج شبیه‌سازی در حالت ماندگار

مطابق آنچه که در بخش قبلی بیان شد مدل آب زیرزمینی ابتدا در حالت پایدار اجرا شد. از روش سعی و خطا برای واسنجی مدل مذکور استفاده شد. شکل ۳ وضعیت چاه‌های مشاهداتی را پس از واسنجی در حالت ماندگار و تراز آب زیرزمینی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که تمام چاه‌های مشاهداتی موجود در آبخوان دارای رنگ سبز هستند و تطابق خوبی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده وجود دارد. بیش‌ترین تراز آب زیرزمینی در جنوب آبخوان قرار دارد. شمال آبخوان محل خروجی آب زیرزمینی نیز دارای کم‌ترین تراز آب زیرزمینی است.

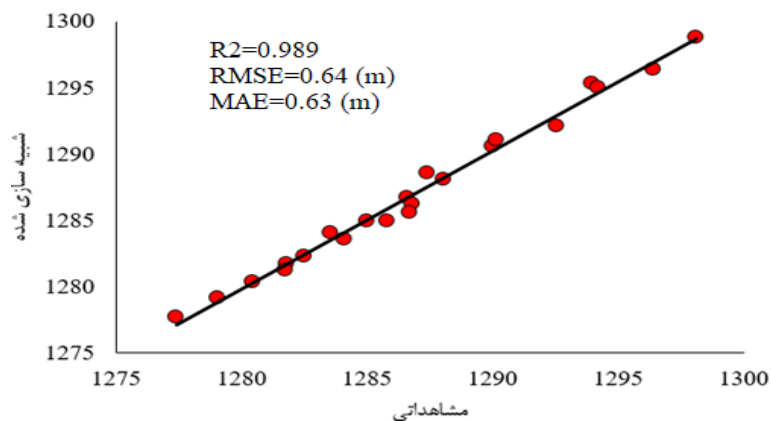


الف

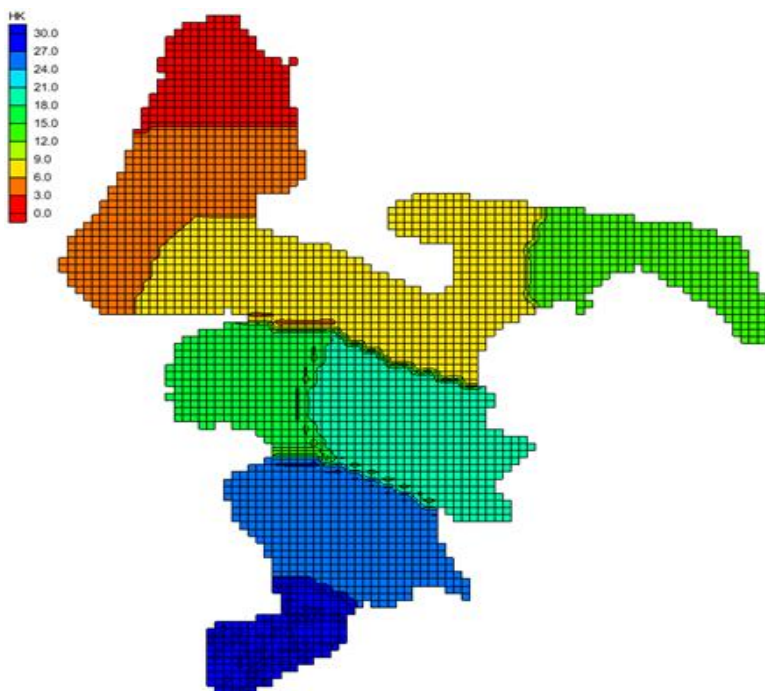


ب

شکل ۳- تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در حالت ماندگار (الف) و وضعیت چاه‌های مشاهداتی پس از واسنجی مدل (ب)
Figure 3- Simulated groundwater level in steady state (a), and Status of observation wells after model calibration (b)

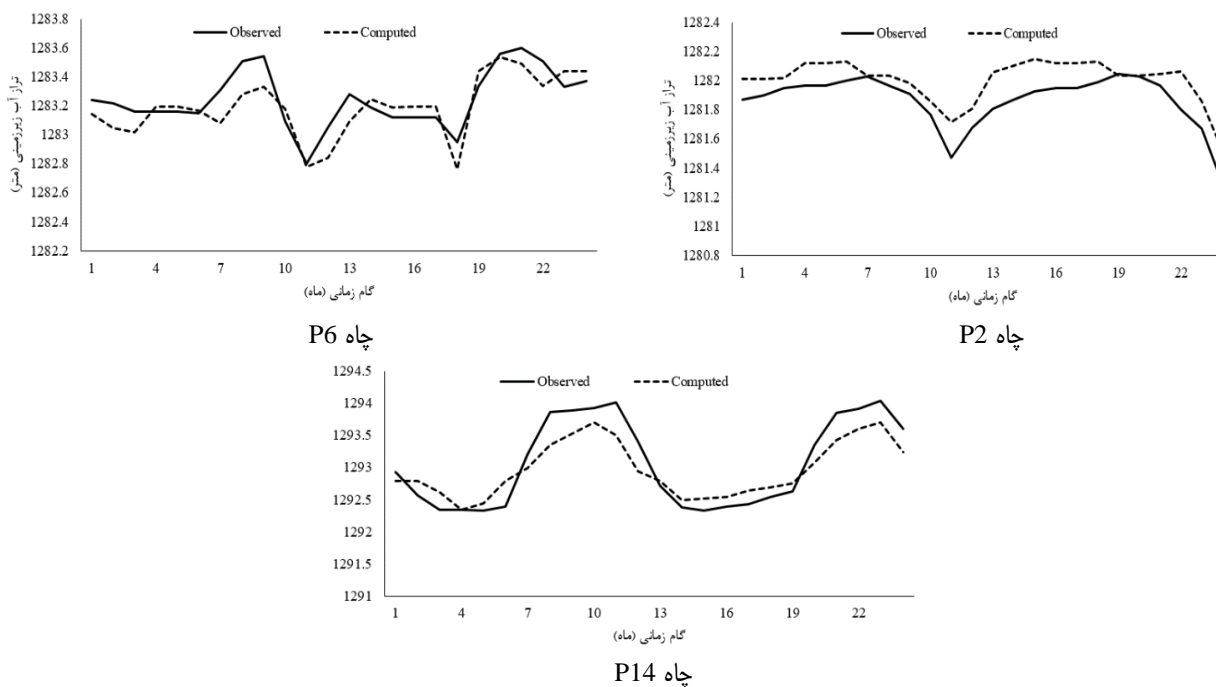


شکل ۴- مقادیر تراز مشاهداتی و شبیه‌سازی برای حالت ماندگار
Figure 4- Observational and simulated groundwater level values for steady state



شکل ۵- مقادیر واسنجی شده هدایت هیدرولیکی آبخوان

Figure 5- Calibrated values of aquifer hydraulic conductivity



شکل ۶- مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در حالت ناماندگار

Figure 6- Simulated and observed values in unsteady state

توضیحات داده شده مقادیر RMSE برابر ۰/۸۸ نشان‌دهنده دقت مناسب مدل در حالت ناپایدار است. علاوه بر این، مقادیر ضریب تبیین و MAE به ترتیب برابر ۰/۹۸ و ۰/۷۲ متر است که در محدوده مناسبی از خطا قرار دارند.

همچنین با توجه به شکل روند تغییرات تراز آب زیرزمینی در دو چاه P14 و P6 کمی زیاد است که مدل شبیه‌ساز تا حدودی توانسته است تغییرات تراز آب زیرزمینی ماهانه را تخمین زند. در انتها و همانند حالت ماندگار، نتایج ارزیابی شاخص‌های ارزیابی خطا برای حالت ناماندگار در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به

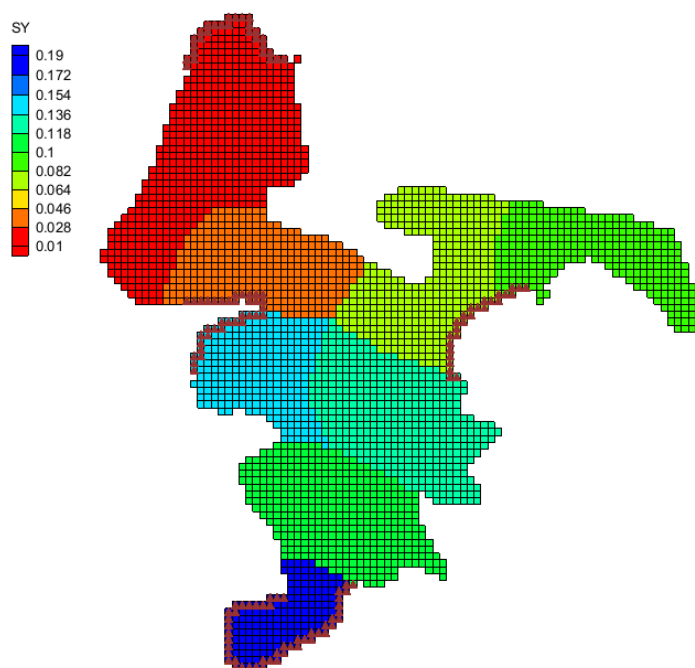
جدول ۱- نتایج ارزیابی معیار خطا برای حالت ناماندگار

Table 1 - Results of error criterion evaluation for unsteady state

MAE (m)	R ²	RMSE (m)	حالت مدل
0.72	0.98	0.88	ناماندگار

مرکز آبخوان از ۸/۵ تا ۱۳ درصد متغیر است. با وجود این، مقادیر آب‌دهی ویژه همواره با گزارشات زمین‌شناسی منطقه هم‌خوانی دارند. به‌طوری‌که بیش‌ترین درصد مقادیر آب‌دهی ویژه در قسمت جنوبی و جنوب غرب آبخوان واقع است مناطقی که در آن مواد درشت‌دانه تشکیل‌دهنده آن هستند.

شکل ۷ مقادیر ضریب ذخیره واسنجی شده محدودۀ مطالعاتی را نشان می‌دهد. مقادیر آب‌دهی ویژه واسنجی شده بین ۱/۹ تا ۱۹ درصد متغیر است. بیش‌ترین مقادیر آن مربوط به ناحیۀ جنوب غربی آبخوان است. جنوب شرقی آن نیز دارای کم‌ترین مقادیر ضریب ذخیره است. مقادیر آب‌دهی ویژه در



شکل ۷- مقادیر ضریب ذخیره واسنجی شده در حالت ناماندگار

Figure 7- Calibrated storage coefficient values in unsteady state

۹۰ درصد معنادار است. برای ایستگاه قره‌خان مشاهده می‌شود روند تغییر برای ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و سالانه صعودی است و مقادیر آن‌ها کم‌تر از ۱/۶۴+ بوده و برای شهرپور روند نزولی با سطح معناداری ۹۰ درصد است. در ایستگاه قشلاق-گپی در خرداد تراز آب زیرزمینی بدون روند بوده و برای بقیۀ ماه‌ها بیش تر روند نزولی داشته است. مقدار آمارۀ من-کندال برای کوسه کهریز برای بهمن و خرداد به‌ترتیب برابر ۱/۸۶- و ۲/۰۱- به دست آمده است و به‌ترتیب در سطح اطمینان ۹۰ و ۹۵ درصد معنادار هستند. در محدودۀ اراضی گردگروی روند نزولی تراز آب زیرزمینی افزایش پیدا می‌کند و می‌توان در بیش‌تر ماه‌ها خصوصاً در شش ماهۀ دوم سال روند نزولی افزایش می‌یابد و در این ماه‌ها روند نزولی در سطح ۹۵ درصد معنادار است، اما در ماه‌های آذر و دی مقادیر آمارۀ من-کندال به‌ترتیب برابر با ۲/۶۵- و

۳-۳- نتایج روند تراز آب زیرزمینی با استفاده از آزمون من-کندال نتایج آزمون من-کندال به‌منظور تشخیص روند تراز آب زیرزمینی در جدول (۲) ارائه شده است. آزمون من-کندال برای داده‌های تراز آب زیرزمینی ۱۹ چاه مشاهداتی در سال‌های ۱۳۸۰-۱۳۹۶ محاسبه شد. برخی از اعداد داخل جدول دارای توان با چهار علامت +، *، ** و *** هستند که به‌ترتیب سطوح معناداری ۹۰، ۹۵، ۹۹ و ۹۹/۹ درصد را نشان می‌دهند. در صورتی‌که مقادیر شاخص من-کندال زیاد (مثبت یا منفی) شوند تعداد ستاره‌ها نیز افزایش خواهد یافت. مطابق جدول ۳، در اراضی دارلک، قزل قویی، و گرد گروی با وجود این‌که میانگین سالانۀ تراز آب زیرزمینی دارای روند نزولی است، اما این روند در سطح هیچ احتمالی معنادار نیست. روند تراز آب زیرزمینی در دارلک نزولی است و در مهر با آمارۀ من-کندال برابر ۱/۷۴- در سطح احتمال

است، هم‌چنین روند کلی تراز آب زیرزمینی برای سالانه سه راه حاجی خوش نزولی است و مقدار شاخص من-کندال $-۲/۸۸$ و ۹۹ درصد معنادار است.

تراز آب زیرزمینی برای دو منطقه گاپیس و گوکتپه در وضعیت مطلوبی قرار ندارد. برای گاپیس، کم‌ترین مقدار شاخص من-کندال برابر $۲/۱۶$ - و برای مرداد است و بیش‌ترین مقدار این شاخص برابر $۳/۶۴$ - و برای مهر است که البته می‌توان چنین استنباط کرد که در این مناطق و مناطق گوکتپه کشاورزی زیادی صورت می‌گیرد و منبع اصلی تأمین آب، آب زیرزمینی است. برای منطقه گاپیس روند تراز آب به‌شدت نزولی است و روند سالانه آن نیز نزولی و در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنادار است. از میان چاه‌های مورد مطالعه، تراز آب زیرزمینی گوکتپه دارای شدیدترین روند نزولی است. چرا که روند نزولی تراز آب زیرزمینی در این چاه در سطح اطمینان $۹۹/۹$ درصد معنادار است.

$۲/۶۹$ - بوده و معناداری آن‌ها در سطح اطمینان ۹۹ درصد است. منطقه لچ نیز حالتی مشابه با گردگروی دارد، با این تفاوت که در محدوده لچ، روند تراز آب زیرزمینی نزولی است و تقریباً در نیمه دوم این روند در سطح اطمینان ۹۵ درصد است و در ماه‌هایی ابتدایی روند نزولی نسبتاً کم است. اما در سایر مناطق باقی‌مانده شرایط متفاوت‌تر است. این مناطق شامل اراضی گردگروی، سه راه حاجی خوش، قم‌قلعه، گاپیس و گوکتپه است که روند نزولی تراز آب زیرزمینی در این مناطق شدیدتر است. نکته‌ای که در مورد این چاه‌ها وجود دارد، اولاً، این‌که روند افزایشی تقریباً در بین آن‌ها مشاهده نمی‌شود؛ ثانیاً، در نیمه دوم سال برای این چاه‌ها روند نزولی بسیار شدید و در سطح اطمینان $۹۹/۹$ درصد معنادار است. برای سه راه حاجی خوش، کاهش تراز آب زیرزمینی در آذر و دی به اوج خود می‌رسد و مقدار شاخص من-کندال برای این دو ماه به ترتیب $-۳/۳$ و $-۳/۷$ محاسبه شده

جدول ۲- نتایج آزمون من-کندال برای آب زیرزمینی
Table 2- Results of Mann-Kendall test for groundwater

چاه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	سالانه
اراضی دارلک	-0.08	0.3	-0.68	-0.83	0.99	0.49	-1.56	-1.06	-0.04	0.57	1.52	0.49	-0.72
اراضی درباس	-1.25	-1.25	-2.7**	-2.12*	-1.1	-2.01*	-2.35*	-2.1**	-2.7**	-2.8**	-2.9**	-2.01*	-2.58*
اراضی قره خان	-2.1*	-2.01*	-2.4**	-2.8**	-2.24*	-1.1	-2.7**	-2.54*	-2.43*	-2.96**	-2.8**	-3.3***	-2.9**
اراضی قزل قویی	-0.38	0.15	-0.8	-1.4	-1.33	-0.76	-1.02	-0.57	-0.8	-0.76	-0.6	-0.38	-0.68
اراضی کوسه	-0.42	0.57	-0.83	-0.53	-0.46	-2.7*	-1.06	-1.03	-1.1	-1.52	-1.7*	-1.29	-0.64
اراضی گردگروی	-1.06	-0.8	-1.29	-1.14	-2*	-1.63	-2*	-2.2*	-2.6**	-2.6**	-2.4*	-1.82	-2.01*
دارلک	-0.64	-0.19	-0.99	-1.3	-0.23	-0.83	-1.74+	-0.83	-0.49	-0.57	-0.5	-0.3	-0.83
حاجی خوش	-2.5*	-2.2**	-2.7**	-2.5*	-2.6**	-2.35*	-2.7**	-3**	-3.3***	-3.37***	-2.9**	-3.2**	-2.8**
قره خان	-0.87	-1.29	0.76	0.08	0.34	1.9+	-0.15	0.46	-0.19	-1.14	-0.9	0.91	0.15
قشلاق	-1.14	1.02	0.84	-0.30	0.04	0.04	-0.87	-1.71+	-1.56	-1.52	-2.2*	-1.52	-0.98
قشلاق-قویی	-0.83	0.19	0.00	-0.8	-0.76	0.15	-1.29	-1.37	-0.83	-1.67+	-1.4	-1.06	-0.91
قم‌قلعه	2.01*	2.12*	2.42*	2.96**	3.1**	3.1**	2.31*	2.8**	3.1**	2.35*	2.12*	2.5*	2.95**
کهنه ده	-1.48	-1.63	-1.9*	-2.3*	-2.3*	-2.7**	-2*	-2.4*	-2.1*	-2.2*	-2.2*	-1.55	-2.35*
کوسه کهریز	-0.91	-1.6	-2.1*	-1.22	-1.18	-0.42	-0.72	-1.48	-1.22	-1.37	-1.8+	-1.56	-1.36
گاپیس	-2.5*	-3.2**	-3.2**	-3.6***	-2.16*	-3.3***	-3.6***	-3.5***	-3.6***	-3.3***	-3.3**	-3.1***	-3.5**
گابازله	-1.63	-1.98*	-0.49	-1.21	-1.67+	-1.21	-1.14	-2.27*	-2.7**	-2.5*	-2.9**	-2.42*	-2.2*
گردگروی	-0.99	-0.57	-0.8	-1.1	-1.06	-1.59	-0.91	-0.91	-0.98	-0.23	0.00	-0.34	-0.61
گوکتپه	-3.8**	-4.17***	-4.06***	-4.29***	-4.25***	-4.13***	-4.25***	-4.48***	-4.43***	-4.3***	-4.32***	-4.42***	-4.55***
لچ	-1.33	-1.74+	-1.29	-1.4	-1.93+	-2*	-2.5*	-2.5*	-2.2*	-2*	-2.4*	-1.93+	-2.35*

هم‌خوانی دارد. در پژوهش Karampoor (2018) تراز آب زیرزمینی برای ایستگاه آبگیر دارای روندی نزولی و در سطح اطمینان $۹۹/۹$ درصد معنادار بود. هم‌چنین، مقادیر شاخص من-کندال برای ایستگاه مورد نظر بین $۳/۲۲$ - تا $۴/۷۵$ - بود. نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی زیادی نیز با نتایج پژوهش Mousavi (2016) far دارد. آن‌ها همانند این پژوهش، چندین چاه مانند

کم‌ترین و بیش‌ترین مقادیر شاخص من-کندال به ترتیب برابر $۳/۸۳$ - و $۴/۴۸$ - و برای ماه‌های فروردین و آبان است. مقدار شاخص من-کندال برای سالانه برابر $۴/۵۵$ - است که این نشان می‌دهد آب زیرزمینی این محدوده نیاز به مدیریت جامع دارد. نتایج شاخص من-کندال محاسبه شده برای ایستگاه گوکتپه تا حدود زیادی با نتایج پژوهش Karampoor (2018)

آلونی، برجویی و جوانمردی-ده ترکان روند تراز آب زیرزمینی در گزارش کردند. وضعیت نزولی شدید و در سطح اطمینان معناداری ۹۹/۹ درصد را

جدول ۳- نتایج آزمون شیب سن برای آب زیرزمینی
Table 3- Result of Sen's slope test for groundwater

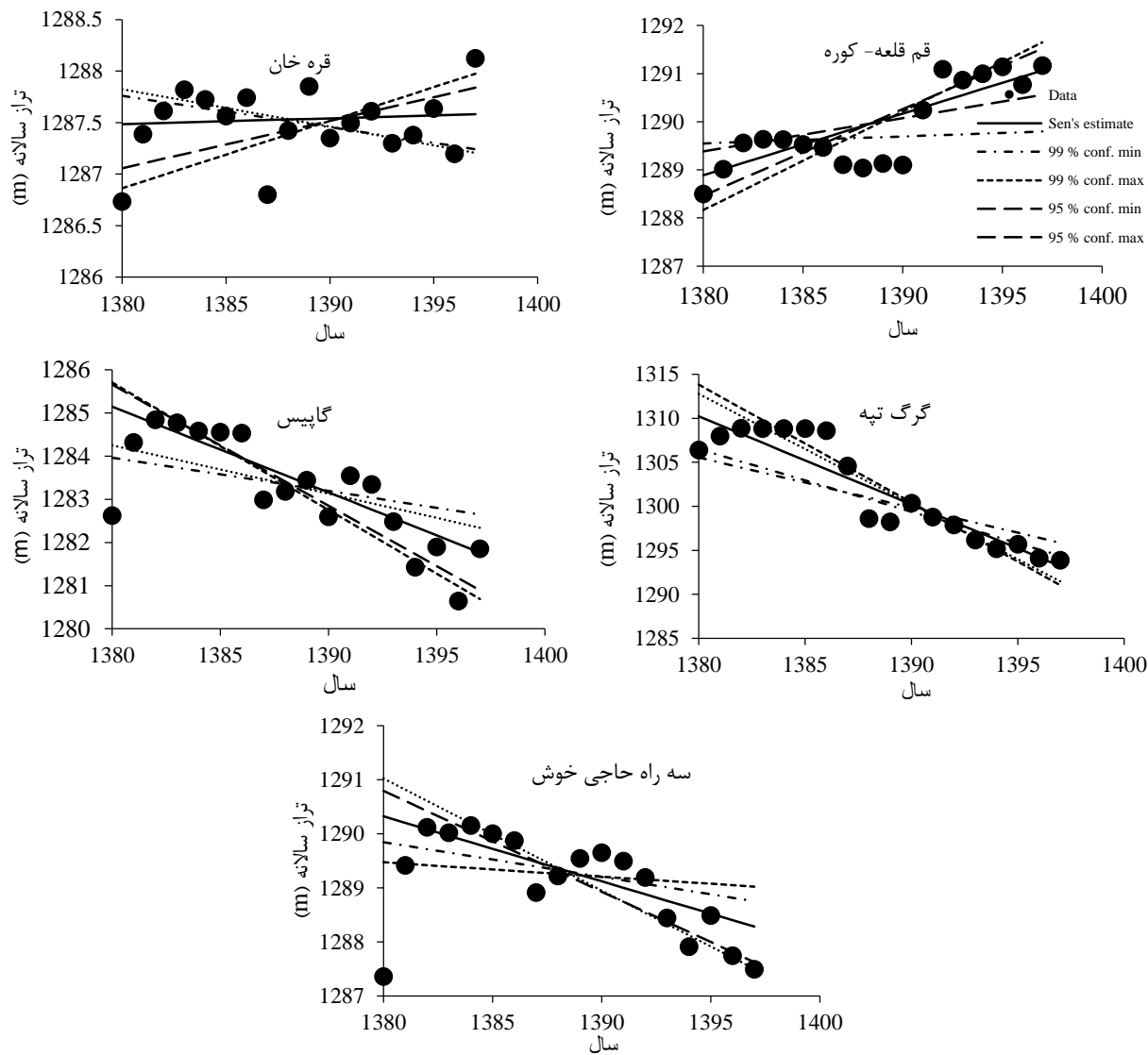
سالانه	اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر
-0.008	0.005	0.014	0.01	0.00	-0.014	-0.029	0.006	0.02	-0.014	-0.017	0.002	0.00	اراضی دارلک
-0.07°	-0.094°	-0.11**	-0.13**	-0.13**	-0.12**	-0.098°	-0.069°	-0.039	-0.07°	-0.07**	-0.084	0.08	اراضی دریاز
-0.095**	-0.1***	-0.09**	-0.1**	-0.08°	-0.09°	-0.1°	-0.05	-0.1°	-0.11**	-0.12°	-0.1°	-0.08°	اراضی قره خان
-0.014	-0.07	-0.028	-0.04	-0.037	-0.031	-0.052	-0.018	-0.025	-0.041	-0.018	0.012	0.02	اراضی قزل گیی
-0.022	-0.023	-0.03+	-0.037	-0.03	-0.031	-0.034	-0.07°	-0.007	-0.023	-0.015	0.01	0.01	اراضی کوسه کهریز
0.1°	-0.105+	-0.12°	-0.12**	-0.12**	-0.12*	-0.1	-0.069	-0.086°	-0.066	-0.068	-0.056	-0.06	اراضی گردگروی
0.023	-0.016	-0.014	-0.02	-0.035	-0.049	-0.023+	-0.025	-0.008	-0.036	-0.017	-0.005	0.01	دارلک
-0.09**	-0.12**	-0.123**	-0.15***	-0.15***	-0.15**	-0.14**	-0.125°	-0.104°	-0.103*	-0.1**	-0.09**	-0.1°	سه راه حاجی خوش
0.006	-0.022	-0.028	-0.025	-0.004	-0.008	-0.005	0.031+	0.013	0.001	0.009	-0.027	-0.2	قره خان
-0.019	-0.023	-0.04°	-0.028	-0.029	-0.05°	-0.037	0.002	0.00	-0.008	0.013	0.022	0.03	قره قشلاق
-0.036	-0.04	-0.043	-0.06+	-0.039	-0.054	-0.048	0.004	-0.02	-0.019	0.00	0.004	0.04	قزل گیی-قره قشلاق
0.12**	0.139°	0.11°	0.12°	0.12**	0.12**	0.11°	0.13**	0.12**	0.13**	0.12°	0.114°	0.1°	قم‌قلعه-کوره
-0.04°	-0.031	-0.04°	-0.04°	-0.04°	-0.04°	-0.04°	0.04**	-0.05°	-0.06°	-0.03°	-0.021	0.03	کهنه ده
-0.01	-0.017	-0.01+	-0.007	-0.009	-0.008	-0.006	-0.006	-0.022	-0.014	0.01*	-0.014	0.00	کوسه کهریز
-0.19**	-0.15***	-0.2***	-0.2***	-0.17***	-0.19***	-0.2***	-0.26***	0.151°	0.22***	0.17**	-0.163**	-0.17°	گاپیس
-0.1°	-0.1°	-0.1**	-0.09°	-0.1**	-0.12°	-0.083	-0.093	-0.1°	-0.0106	-0.025	-0.12°	0.07	گابازله
-0.014	-0.003	0.00	-0.031	-0.045	-0.054	-0.035	-0.05	-0.038	-0.028	-0.022	-0.02	0.02	گرد گروی
-1***	-0.89***	-0.89***	-0.9***	-0.9***	-0.96***	-0.99***	-1.03***	-1.07***	-0.018***	-1***	-0.952***	-0.8***	گوک‌تپه
-0.09°	-0.09°	-0.11°	-0.09°	-0.1°	-0.11°	-0.11°	-0.12°	-0.15°	-0.106	-0.087	-0.1°	0.06	لج

سالانه نیز برای پنج ایستگاه منتخب در شکل ۸ ارائه شده است. در این نمودار مقادیر متوسط سالانه تراز آب زیرزمینی در محور عمودی و سال نیز در محور افقی مشخص شده است. در این شکل مقادیر بیشینه و کمینه شیب سن در سطح اطمینان ۹۵ و

۳-۴ نتایج روند تراز آب زیرزمینی با استفاده از آزمون شیب سن نتایج آزمون شیب سن در جدول ۴ ارائه شده است. همانند روش آزمون من-کنندال، در این روش نیز سطح معناداری با +، *، ** و *** مشخص شده است. نمودار شیب سن تراز آب زیرزمینی

که مقدار شیب در قم‌قلعه نسبت به قره‌خان بیش‌تر است. همچنین، مقادیر شیب سن سالانه برای این دو منطقه به‌ترتیب $۰/۰۰۶$ و $۰/۱۲۸$ است که برای چاه قم‌قلعه-کوره در سطح $۹۹/۹$ درصد معنادار است.

۹۹ درصد نشان داده شده است. مطابق شکل هر چه قدر نتیجه منفی‌تر باشد، شیب روند بیش‌تر است و با نزدیک شدن به صفر منحنی حالت افقی پیدا می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که سطح آب زیرزمینی در منطقه قره‌خان و قم‌قلعه-کوره حالت صعودی دارد



شکل ۸- نتایج روند شیب تراز آب زیرزمینی برای برخی ایستگاه‌ها

Figure 8- The results of the groundwater level slope trend for some stations

بیش‌تری به‌ترتیب با شیب $۰/۰۹$ ، $۰/۱۹$ و ۱ - نزول می‌کند. کم‌ترین میزان تغییر در چاه‌های مشاهداتی نیز مربوط به چاه‌های اراضی دارک و قره‌خان است که به‌ترتیب سالانه با شیب حدود $۰/۰۰۸$ و $۰/۰۰۶$ - تغییر می‌کنند. با وجود این و در طول دوره مورد بررسی ($۱۳۸۰-۱۳۹۶$) حدود ۶۰ سانتی‌متر به‌طور متوسط آبخوان کاهش تراز آب زیرزمینی داشت.

تغییرات روند آب زیرزمینی و نتایج شبیه‌سازی آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی نشان داد که آب زیرزمینی در برخی مناطق

مطابق با نتایج جدول ۴ و شکل ۸ برای بقیه چاه‌های پیژومتری واقع در محدوده مطالعاتی شیب تراز آب زیرزمینی به‌صورت نزولی است. در چاه پیژومتری گوک‌تپه، سه‌راه‌حاجی خوش و گاپیس، تراز آب زیرزمینی با شیب بیش‌تری افت می‌کند که این واقعیت از شکل ۸ نیز قابل استنباط است. در چاه‌های پیژومتری مانند اراضی قره‌خان و سه‌راه‌حاجی خوش نیز شیب روند زیاد است و در سطح احتمال ۹۹ درصد معنادار است. شیب نزولی سه ایستگاه حاجی‌خوش، گاپیس و گوک‌تپه با شدت

۱- تطابق بسیار خوبی بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی در حالت ماندگار برقرار بود، به طوری که بیش‌ترین تراز آب زیرزمینی در جنوب آبخوان و کم‌ترین تراز نیز در شمال آبخوان بود.

۲- معیارهای ارزیابی مدل شامل RMSE، MAE و R^2 برای دو حالت ماندگار به ترتیب ۰/۸۴، ۰/۶۳، ۰/۹۹ و ۰/۸۸، ۰/۷۲ و ۰/۹۸ محاسبه شد که این مقادیر نشان از کارایی مدل دارد.

۳- در حالت غیرماندگار نیز تطابق مناسبی بین دو گروه داده مشاهداتی و شبیه‌سازی مشاهده شد.

۴- آزمون من-کندال نشان داد که آبخوان مهاباد وضعیت نامناسبی دارد، به طوری که از ۱۹ چاه مورد بررسی، تقریباً ۱۸ چاه دارای روند نزولی در تراز آب زیرزمینی بودند. در بین چاه‌های مورد مطالعه، سه چاه گاپیس، گوک‌تپه و سه‌راهی حاجی خوش بیش‌تر روند نزولی را داشتند، درحالی که چاه قم‌قلعه-کوره دارای بیش‌ترین روند صعودی بود.

۵- روش تخمین‌گر شیب سن نیز تأییدکننده نتایج من-کندال بود، به طوری که شیب نزولی دو ایستگاه گاپیس و گوک‌تپه با شدت بیش‌تری رخ می‌دهد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده، بررسی تغییرات بارش و تغییرات تراز آب زیرزمینی و بررسی معنادار بودن آن ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به پتانسیل منابع آب سطحی مناسب در محدوده مورد بررسی استفاده توامان و بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی پیشنهاد می‌شود. بررسی عوامل انسان‌ساز و اقلیمی و همچنین تفکیک اثر این عوامل در تغییرات تراز آب زیرزمینی منطقه برای بهبود و تکمیل این پژوهش پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

نویسندگان مایلند از همکاری و مساعدت شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی جهت در اختیار دادن اطلاعات و داده‌های این پژوهش تشکر و قدردانی به عمل آورند.

افضلی، علی (۱۴۰۰). تجزیه و تحلیل روند تغییرات زمانی کیفیت منابع آب زیرزمینی با استفاده از آزمون ناپارامتری منکندال و روش تخمین‌گر شیب سن نمونه پژوهش: دشت یزد-اردکان. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۲(۴)، ۸۷-۱۰۶. doi:10.22108/gep.2021.127620.1404
انصافی مقدم، طاهره (۱۳۹۹). بررسی روند تغییرات سالانه، فصلی و ماهانه تراز آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: زیرحوضه میقان اراک). *تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۲۷(۳)، ۵۱۶-۵۴۴. doi:10.22092/ijdr.2020.6785.1075
چراغی، سیدعلی، نجفی، بهالدین، شجری، شاهرخ، و جوان، محمود (۱۳۹۹). بررسی روند تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی در دشت سروستان-استان فارس. *پژوهش‌های آب‌بازرسی*

آبخوان دارای ظرفیت مناسبی است و افت زیادی را تجربه نمی‌کند. در برخی ناحیه‌ها نیز افت آب زیرزمینی قابل‌ملاحظه است که نیازمند استفاده تلفیقی بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی هست (Kayhomayoon et al., 2021). نتایج شبیه‌سازی آب زیرزمینی نیز نشان داد که مدل‌های عددی، مانند MODFLOW قابلیت خوبی در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی دارند و توانایی این مدل در مطالعات و مدل‌سازی آب زیرزمینی اکثر آبخوان‌های کشور به اثبات رسید (Milan et al., 2018). نتایج این پژوهش در بخش بررسی روند آب زیرزمینی با آزمون‌های مختلف هم‌سو با نتایج پژوهش‌های Delavar et al. (2021) در استفاده از آزمون من-کندال برای بررسی روند کمی تراز آب زیرزمینی دشت فیروزآباد و (Gholami et al., 2021) در استفاده از آزمون من-کندال برای بررسی روند کمی تراز آب زیرزمینی دشت تویسرکان بود. نتایج این پژوهش نیز اهمیت و لزوم بررسی آزمون‌های ناپارامتری وضعیت تراز آب زیرزمینی قبل از انجام سناریوهای مدیریتی را نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف شبیه‌سازی آب زیرزمینی آبخوان مهاباد و نیز تعیین روند تراز آب زیرزمینی آن با استفاده از آزمون‌های من-کندال و شیب سن انجام شد. در ابتدا از نرم‌افزار GMS و کد MODFLOW برای شبیه‌سازی آب زیرزمینی در دو حالت ماندگار و غیر ماندگار استفاده شد. در ادامه از دو آزمون من-کندال و تخمین‌گر شیب سن برای بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی استفاده شد. نتایج کلی بیان‌گر تغییرات کم شیب در بیش‌تر چاه‌های مورد بررسی بود اما در برخی چاه‌ها میزان روند کاهشی تا حدودی چشم‌گیر بود که می‌توان به چاه‌های مشاهداتی گاپیس، سه راه حاجی خشک و گوک‌تپه اشاره کرد. خلاصه‌ای از نتایج به‌دست آمده به شرح زیر است:

منابع

ابارشی، فرزانه، مفتاح هلقی، مهدی، و دهقانی، امیراحمد (۱۳۹۳). روند تغییرات کیفیت آب زیرزمینی دشت زرین گل با استفاده از آزمون ناپارامتری من کندال اصلاح شده و تخمین‌گر شیب سن. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)*، ۲۱(۳)، ۷۹-۱۰۰. doi:10.1001.1.23222069.1393.21.3.4.3
ابراهیمی خوسفی، زهره، ولی، عباسعلی، قضاوی، رضا، و خسروشاهی، محمد (۱۳۹۸). بررسی میزان تغییرات سطح ایستابی و حجم ذخایر آبی آبخوان‌های غربی تالاب گاوخونی در دوره آماری ۱۳۷۰-۱۳۹۲. *پژوهش آب ایران*، ۱۱۳(۴)، ۱۱۳-۱۲۳.
ارشادحسینی، محدثه، کشتکار، امیررضا، حسینی، سسید موسی، و

- عدالت، علی، رجبی، علی محمد، و خداپرست، مهدی (۱۴۰۱). مدل‌سازی عددی جریان آب زیرزمینی دشت علی‌آباد قم به‌منظور پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی و هدایت هیدرولیکی. *نشریه انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران*، در حال انتشار.
- عزیزی، فرحناز، اصغری مقدم، اصغر، و ناظمی، امیرحسین (۱۳۹۸). شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و نفوذ آب شور در آبخوان دشت ملکان. *علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران*، ۱۳(۴۵)، ۳۲-۴۳. doi:20.1001.1.20089554.1398.13.45.7.1
- غلامی، فاطمه، زارعی، حیدر، و معروفی، صفر (۱۴۰۰). تحلیل روند تغییرات پارامترهای کمی و کیفی آب زیرزمینی دشت تویسرکان با آزمون ناپارامتری من کندال. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۱(۱)۴۴، ۱۲۷-۱۴۰. doi:10.22055/jise.2021.20618.1487
- محمدی، آرمان، و قاتینی حصاروئی، مهناز (۱۴۰۰). مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی آبخوان آستانه-کوچصفهان. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۱(۳)۴۴، ۲۹-۴۴. doi:10.22055/jise.2020.22058.1582
- وزارت نیرو (۱۳۹۳). گزارش جامع مطالعات منابع آب حوضه دریاچه ارومیه.
- وزارت نیرو (۱۳۸۷). مطالعات بهنگام‌سازی بیان منابع آب محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز دریاچه ارومیه منتهی به سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۰.
- (پژوهش و سنجش زندگی)، ۳۳(۲)، ۸۲-۹۶. doi:10.22092/wmej.2019.128069.1283
- دستواره، جلیل، ناصریان اصل، زهرا، حسوند، هانیه، و امیری دوماری، سحر (۱۳۹۹). مدل‌سازی تراز آب زیرزمینی و بررسی وضعیت آبخوان دشت میناب. *جغرافیا و روابط انسانی*، ۳(۲)، ۵۰-۵۹. doi:10.22034/gahr.2020.247817.1442
- دلاور، حجت، وهاب‌زاده کبریا، قربان، قربانی، جمشید، و اشرفی، محمدرضا (۱۴۰۰). بررسی روند تغییرات کمی سطح ایستابی طی سال‌های ۹۰-۱۳۷۱ با آزمون من-کندال (مطالعه موردی: دشت فیروزآباد، استان فارس، ایران). *یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی*، ۱۵(۳۰)، ۱۶۵-۱۷۶. doi:10.22084/nfag.2021.23609.1451
- روشنگر، کیومرث، نورانی، وحید، و دولتشاهی، مه‌ری (۱۳۹۹). بررسی و تعیین روند تغییرات تراز آب زیرزمینی با استفاده از تبدیل موجک گسسته و آزمون‌های ناپارامتری (مطالعه موردی: دشت آذرشهر). *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۶(۱)، ۱۰۲-۱۱۵. doi:10.22055/jise.2020.22058.1582
- عادلی، بهزاد، محمدی کنگرانی، حنا، سعیدالدین، امیر، بذرافشان، ام‌البنین، و آرمین، محسن (۱۳۹۷). ارزیابی کیفی و کمی سفره‌های آب زیرزمینی با به‌کارگیری روش WQI و آزمون من-کندال (مطالعه موردی: دشت سرخون-استان هرمزگان). *اکوهیستورولوژی*، ۵(۳)، ۸۰۱-۸۱۱. doi:10.22059/ije.2018.244156.761

References

- Abareshi, F., Meftah Halghi, M., & Deghani, A. A. (2014). The trend of groundwater quality parameters in Zarringol Plain using nonparametric Mann-Kendall and Sen's Methods. *Journal of Water and Soil Conservation*, 21(3), 79-100. doi:10.1001.1.23222069.1393.21.3.4.3 [In Persian]
- Adeli, B., Kangarani, H., Sadodin, A., Bazrafshan, O., & Armin, M. (2018). Using the WQI method and the Mann-Kendall test to assess the qualitative and quantitative status of groundwater aquifers (case study: Sarkhoon plain, Hormozgan province). *Iranian journal of Ecohydrology*, 5(3), 801-811. doi:10.22059/ije.2018.244156.761 [In Persian]
- Azizi, F., Asghari Moghaddam, A., & Nazemi, A. (2019). Groundwater flow and salinity intrusion simulation in malekan plain aquifer. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 13(45), 32-43. doi:10.1001.1.20089554.1398.13.45.7.1 [In Persian]
- Bashi-Azghadi, S.N., Kerachian, R., Bazargan-Lari, M.R., & Solouki, K. (2010). Characterizing an unknown pollution source in groundwater resources systems using PSVM and PNN. *Expert Systems with Applications*, 37(10), 7154-7161. doi:10.1016/j.eswa.2010.04.019
- Bayat, M., Eslamian, S., Shams, G., & Hajiannia, A. (2020). Groundwater level prediction through GIS software—case study of Karvan area, Iran. *Quaestiones Geographicae*, 39(3), 139-145. doi:10.2478/quageo-2020-0028
- Boyce, S.E., Nishikawa, T., & Yeh, W.W. (2015). Reduced order modeling of the Newton formulation of MODFLOW to solve unconfined groundwater flow. *Advances in Water Resources*, 83, 250-262. doi:10.1016/j.advwatres.2015.06.005
- Cheraghi, S., Nagafi, B., Shajari, S., & Javan, M. (2020). The trend of changes in groundwater quantity and quality in the Sarvestan Plain of Fars Province. *Watershed Management Research Journal*, 33(2), 82-96. doi:10.22092/wmej.2019.128069.1283 [In Persian]
- Dastvareh, J., Naserianasl, Z., hasanvand, H., & Amiri Domari, S. (2020). Modeling groundwater level and investigating the aquifer status of Minab plain. *Geography and Human Relationships*, 3(2), 50-59. doi:10.22034/gahr.2020.247817.1442 [In Persian]
- Delavar, H., VahabzadahKbriya, G., Ghorbani, J., & Ashrafi, M. (2021). Investigating of quantitative trend changes in Aquifer water table during 1992-2011 by Mann-kendall test

- (Case study: Firoozabad plain, Fars province, Iran). *New Findings in Applied Geology*, 15(30), 165-176. doi:10.22084/nfag.2021.23609.1451 [In Persian]
- Ebrahimi Khusfi, Z., vali, A., Ghazavi, R., & khosroshahi, M. (2019). An investigation of the changes in the water table and the storage of western aquifers of Gavkhouni wetland during 1981-2013. *Iranian Water Researches Journal*, 13(4), 113-123. [In Persian]
- Edalat, A., Rajabi, A., & Khodaparast, M. (2022). Numerical modeling of groundwater flow in Ali Abad Plain of Qom to predict fluctuations of the water table and hydraulic conductivity. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, (In Press). [In Persian]
- Ensafi Moghaddam, T. (2020). Trend analysis of annual, seasonal and monthly groundwater level (Case study: Sub-basin of Arak Mighan). *Iranian Journal of Rangeland and Desert Research*, 27(3), 516-544. doi:10.22092/ijrdr.2020.6785.1075 [In Persian]
- Ershad Hosseini, M., Keshtkar, A., Hosseini, S., & Afzali, A. (2021). Analysis of temporal trend of groundwater quality using nonparametric Mann-Kendall and Sen's methods (Case study: Yazd-Ardakan Plain). *Geography and Environmental Planning*, 32(4), 87-106. doi:10.22108/gep.2021.127620.1404 [In Persian]
- Flores-Márquez, E.L., Jiménez-Suárez, G., Martínez-Serrano, R.G., Chávez, R.E., & Pérez, D.S. (2006). Study of geothermal water intrusion due to groundwater exploitation in the Puebla Valley aquifer system, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 14(7), 1216-1230. doi:10.1007/s10040-006-0029-0
- Gholami, F., Zarei, H., & Marofi, S. (2021). Trend Analysis of Groundwater Quantity and Quality Parameters (Case Study: Tuyserkan Plain). *Irrigation Sciences and Engineering*, 44(1), 127-140. doi:10.22055/jise.2021.20618.1487 [In Persian]
- Kayhomayoon, Z., Babaeian, F., Ghordoyee Milan, S., Arya Azar, N., & Berndtsson, R. (2022). A combination of metaheuristic optimization algorithms and machine learning methods improves the prediction of groundwater level. *Water*, 14(5), 751. doi:10.3390/w14050751
- Kayhomayoon, Z., Azar, N.A., Milan, S.G., Moghaddam, H.K., & Berndtsson, R. (2021). Novel approach for predicting groundwater storage loss using machine learning. *Journal of Environmental Management*, 296, 113237. doi:10.1016/j.jenvman.2021.113237
- Kendall, M.G. (1970). *Rank Correlation Methods*. 2nd Edition: NewYork: Hafner.
- Malekzadeh, M., Kardar, S., & Shabanlou, S. (2019). Simulation of groundwater level using MODFLOW, extreme learning machine and Wavelet-Extreme Learning Machine models. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100279. doi:10.1016/j.gsd.2019.100279
- Mann, H.B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Journal of Econometrica*, 13, 245-259.
- Mays, L.W., & Todd, D.K. (2005). *Groundwater hydrology*. Third addition: John Wily and Sons, Inc., Arizona State University.
- Milan, S.G., Roozbahani, A., & Banihabib, M.E. (2018). Fuzzy optimization model and fuzzy inference system for conjunctive use of surface and groundwater resources. *Journal of Hydrology*, 566, 421-434. doi:10.1016/j.jhydrol.2018.08.078
- Ministry of Energy, (2013). Comprehensive report on studies of water resources of Urmia Lake basin. [In Persian]
- Ministry of Energy, (2009). Studies on updating the balance of water resources of the study areas of the catchment area of Lake Urmia, ending with the year 2009-2010. [In Persian]
- Mohammadi, A., & Ghaeini-Hessaroeeyeh, M. (2021). Groundwater Modeling of Astaneh-Kuchesfehan Aquifer. *Irrigation Sciences and Engineering*, 44(3), 29-44. doi:10.22055/jise.2020.22058.1582 [In Persian]
- Roushangar, K., Nourani, V., & Dolatshahi, M. (2020). Investigation and trend identification of groundwater level variations using discrete wavelet transform and non-parametric tests (case study: Azarshahr plain). *Iran-Water Resources Research*, 16(1), 102-115. doi:10.1001.1.17352347.1399.16.1.8.2 [In Persian]
- Sahoo, S., Swain, S., Goswami, A., Sharma, R., & Pateriya, B. (2021). Assessment of trends and multi-decadal changes in groundwater level in parts of the Malwa region, Punjab, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 14, 100644. doi:10.1016/j.gsd.2021.100644
- Shamsudduha, M., Chanller, R.E., Taylor, R.G., & Ahmed, K.M. (2009). Recent trends in groundwater levels in a highly seasonal hydrological system: The Ganges-Brahmaputra- Meghana delta. *Hydrology and Earth System Science*, 13, 2373- 2385. doi:10.5194/hess-13-2373-2009, 2009
- Xu, Z.X., Takeuchi, K., & Ishidaira, H. (2003). Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation. *Journal of Hydrology*, 279(1-4), 144-150. doi:10.1016/S0022-1694(03)00178-1