Research Paper

The Conjunctive Management of Ground and Surface Water Using Finite Difference Method (Case Study: Dehloran Plain, Farrokhabad Region)

Yousef Eghbali [1], **Mehrdad Shahrbanouzadeh** [2*]

[1] M.Sc. Graduate of Water Resource Engineering, Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.
[2] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.
Email: m.shahrbanouzadeh@jsu.ac.ir. Corresponding Author.

10.22125/iwe.2025.519245.1877.

Received:
April 25, 2025
Accepted:
August 16, 2025
Available online:
December 25, 2025

Keywords:
The Conjunctive Management,
Ground and Surface Water,
Finite Difference Method,
Dehloran Plain,
GMS software

Abstract

Swamping in arid and semi-arid regions has become a critical environmental and agricultural challenge, particularly in areas affected by rising groundwater levels. The Farrokhabad region, located approximately five kilometers southwest of Dehloran city in western Iran, is experiencing such conditions due to elevated water tables. Field observations, community consultations and analysis of prior research indicate that surface water inflows particularly from municipal wastewater and the Abgarm spring play a significant role in exacerbating groundwater rise and land salinization. This study employed the ModFlow numerical model within the GMS software platform to perform a quantitative simulation of the Dehloran aquifer, with the objective of identifying the primary drivers of waterlogging and assessing potential mitigation strategies. Following steady-state and transient calibration and validation, four management scenarios were evaluated over a one-year hydrological period: operation of the Abgarm spring water transfer project, a 50% reduction in surface inflow, activation of licensed abstraction wells, and a 20% increase in groundwater pumping The modeling results revealed that conjunctive management of surface and groundwater particularly the reduction of surface inflow had the most pronounced effect, lowering the water table by up to 3.5 meters in the Farrokhabad monitoring well. This study not only provides a validated hydrological model of the region but also quantitatively demonstrates the impact of human activities on aquifer conditions. The research offers a practical framework for integrated groundwater management and may serve as a transferable model for application in other plains with comparable hydrogeological challenges.

* **Corresponding Author:** Mehrdad Shahrbanouzadeh
Address: Department of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.
Email: m.shahrbanouzadeh@Jsu.ac.ir
Tel: 06142418500-2329

1. Introduction

In recent years, decision-making in water resources management has increasingly been conducted under conditions of uncertainty, due to the rapid and often unpredictable changes in climatic, socio-economic, and political factors. Effective and sustainable management of water resources necessitates the integration of social, economic, and political dimensions into planning and policy-making processes. This is particularly important because climate change variables (such as temperature, precipitation, and evaporation), socio-economic developments (including population growth, economic expansion, and land and water use changes), and institutional and political considerations (such as allocation policies, regulatory frameworks, and governmental interventions) exert both direct and indirect influences on water resource systems (Dong et al., 2013).

Groundwater modeling, as a simplified representation of actual aquifer systems, is a valuable tool that quantitatively describes the spatial and temporal relationships among recharge, discharge, and fluctuations in the water table (Anderson and Woessner, 1992).

Prior to the 1950s, surface water and groundwater were generally treated as two distinct systems. However, the negative consequences of this fragmented approach soon became evident in practice. Burt, (1964) was the first to introduce the concept of conjunctive use, emphasizing the necessity of integrated management of both surface and groundwater resources. Integrated water resource management (IWRM) seeks to coordinate the exploitation of these resources to maximize overall efficiency, minimize environmental degradation, and enhance long-term sustainability.

Recent advances in numerical modeling tools—such as ModFlow and its enhanced versions like MF-OWHM—have enabled more precise analyses of surface–groundwater interactions and more robust evaluations of alternative management scenarios (Hanson et al., 2014; Boyce, 2022).

A review of prior studies in the target region indicates a predominant focus on isolated scenarios, often disregarding critical variables such as surface water flow. Additionally, the primary causes of salinization and the identification of economically viable solutions to the water crisis remain inadequately addressed. In light of these gaps, the present study aims to conduct a comprehensive assessment of the Dehloran aquifer, including analysis of reduced recharge due to diminished surface inflows into the Farrokhabad area, potential aquifer drawdown, and its subsequent impact on the regional water balance. Furthermore, the study seeks to develop a quantitative mathematical model capable of simulating future aquifer conditions. These models can be employed to evaluate various groundwater management scenarios, thereby facilitating the formulation of strategies that not only meet current water demands but also minimize adverse impacts on both the quantity and quality of groundwater resources within the study area.

2. Materials and Methods

The ModFlow groundwater model was developed by the United States Geological Survey (USGS) models in three dimensions using the finite difference method. The numerical models are divided into several groups based on various methods, approximation of the differential equations of flow, and numerical solution methods of the new algebraic equation system, the most applicable of which are the finite element method and the finite difference method. (Kresic, 2007) The ModFlow model, written in Fortran, provides an approximate solution of the differential equations of groundwater flow in porous media based on the finite difference method and the central block method. The following equation is obtained:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial H}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial H}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial H}{\partial z}\right)+q_s=S_s\frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

Where H is the hydraulic load, Kx, Ky, Kz are the permeability coefficient in the x, y, z axes, q_s is the inlet or outlet flow rate, S_s is the specific storage coefficient of porous media and t is time.

In this study, after collecting and examining data related to groundwater in the Dehloran aquifer and preparing the required maps in the Arc GIS environment and using satellite images from Santinel2, meteorological, evapotranspiration, rain gauge and synoptic stations, and extracting the parameters required for calibration and validation of the model, quantitative modeling of the aquifer was carried out using the ModFlow model in the GMS software. In this regard, after entering the data into the GMS modeler, all the available parameters were converted to the ModFlow code in this environment. After running and calibrating the model in a steady state for October 2010 and obtaining the desired results in this stage, the model was calibrated and run in a non-steady state for the water year 2010-2011. After the validation stage for the water year 2019-2020 and obtaining the desired results, the modeling was completed. Finally, after completing the modeling, the feasibility of constructing an underground drain was examined with respect to the design and application of 4 scenarios on different factors of aquifer discharge and recharge.

3. Discussion and Conclusion

The present study, conducted using the ModFlow model within the GMS software platform (version 7.1.3), aimed to quantitatively simulate groundwater flow in the Farrokhabad aquifer located in the Dehloran Plain. The findings highlight the considerable potential of numerical modeling for comprehensive analysis of aquifer dynamics and the evaluation of alternative groundwater management strategies. In comparison with similar studies conducted in other regions of Iran, this research incorporates several distinctive and innovative elements that enhance its scientific rigor and practical relevance.

A notable strength of this study lies in its explicit and quantitative consideration of localized surface recharge sources, including municipal wastewater discharge, the Dehloran wastewater treatment facility, and geothermal spring flows. While many prior studies have focused solely on well abstraction or precipitation as primary recharge components, this research demonstrates—through scenario-based numerical analysis—that a 50% reduction in these surface inputs could lead to a groundwater level decline of approximately 3.5 meters over a one-year period. This result underscores the pivotal influence of anthropogenic and urban factors on the sustainability of the regional aquifer and provides a critical evidence base for urban planning and environmental policy development.

In addition, the study examined the feasibility of implementing a subsurface drainage system. A thorough technical assessment, grounded in the hydrogeological characteristics of the aquifer and the surrounding region, revealed that such an intervention would not be economically viable due to its low operational efficiency and high implementation costs. Based on these findings—and in light of the increasing emphasis on sustainable groundwater use—the study recommends that future research endeavors incorporate detailed economic evaluations into the assessment of management options. Such analyses could involve cost-benefit modeling of scenarios (e.g., drainage infrastructure development, expansion of treatment facilities, controlled abstraction, or artificial recharge enhancement), application of multi-criteria decision analysis (MCDA), and integration of hydro-economic models.

In summary, this study not only offers a validated hydrological model of the Dehloran aquifer but also provides a quantitative evaluation of the nexus between human activities—particularly wastewater management—and aquifer response. While the economic dimension is addressed to a limited extent, the research establishes a conceptual and methodological foundation for future hydrogeological studies that aim to integrate technical modeling with socio-economic and policy considerations. The proposed approach has the potential to serve as a transferable model for similarly affected regions across the country

4. Six important references

1) -Burt O.R. 1964. The economics of conjunctive use of ground and surface water. Hilgardia 36(2):31–111.
2) -Anderson, M. and W. Woessner. 1992. Applied groundwater modeling flow and adjective transport. Academic Press, San Diego, 381.
3) -Kresic N. 2007. Hydrogeology and groundwater modelling. Second edition. CRC press/Taylor and Francis, Bocarton, NewYork, Lindon, P:807.
4) -Dong C., G. Schoups and N. Van de Giesen. 2013. Scenario development for water resource planning and management: A review. Technological Forecasting and Social Change 80(4):749–761.
5) -Hanson R.T., S.E. Boyce, W. Schmid, J.D. Hughes, S.M. Mehl, S.A. Leake, T. Maddock, and R.G. Niswonger. 2014. One-Water Hydrologic Flow Model (MODFLOW-OWHM): U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A51, 120 p., http://dx.doi.org/10.3133/tm6A51.
6) -Boyce S.E., 2022. MODFLOW One-Water Hydrologic Flow Model (MF-OWHM) Conjunctive Use and Integrated Hydrologic Flow Modeling Software, version 2.2.0: U.S. Geological Survey Software Release, https://doi.org/10.5066/P9P8I8GS.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to Mr. Alimoradi, the master of science the Regional Water Company of Ilam for her cooperation in this research.

مدیریت تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از روش تفاضل محدود (مطالعه موردی: دشت دهلران، منطقه فرخ‌آباد)

یوسف اقبالی۱، مهرداد شهربانوزاده*۲

تاریخ ارسال:۱۴۰۴/۰۲/۰۶
تاریخ پذیرش:۱۴۰۴/۰۵/۲۵

مقاله پژوهشی

چکیده

زه‌دار شدن اراضی در مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله چالش‌های جدی در مدیریت پایدار منابع آب و خاک به شمار می‌رود. در منطقه فرخ‌آباد، واقع در پنج کیلومتری جنوب‌غربی شهر دهلران، بالا آمدن سطح ایستابی آب زیرزمینی موجب بروز مشکلات زیست‌محیطی و کاهش بهره‌وری اراضی کشاورزی شده است. شواهد حاصل از بازدیدهای میدانی، مصاحبه با ساکنان محلی و تحلیل اسناد مطالعاتی پیشین حاکی از آن است که جریانات سطحی، به‌ویژه پساب شهری و چشمه‌های آب‌گرم، نقش قابل توجهی در تشدید این وضعیت دارند. این پژوهش با هدف شناسایی منشأ زه و ارزیابی راهکارهای مدیریتی، با بهره‌گیری از مدل عددی ModFlow در محیط نرم‌افزارGMS ، به مدل‌سازی کمی آبخوان دشت دهلران پرداخته است. پس از کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل در شرایط ماندگار و غیرماندگار، چهار سناریوی مدیریتی طی یک دوره هیدرولوژیکی یک‌ساله شامل بهره‌برداری از پروژه انتقال آب چشمه آب‌گرم، کاهش ۵۰ درصدی جریان‌های سطحی ورودی، فعال‌سازی تمام چاه‌ها بر اساس پروانه بهره‌برداری و افزایش ۲۰ درصدی برداشت از منابع آب زیرزمینی بررسی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان داد که مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی، به‌ویژه در قالب کاهش ورودی‌های سطحی، مؤثرترین گزینه در کاهش سطح ایستابی بوده و موجب افتی تا حدود ۳/۵ متر در منطقه فرخ‌آباد شده است. این پژوهش، ضمن ارائه مدلی معتبر از شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه، چارچوبی علمی برای تحلیل کمی اثرات انسانی بر منابع آب زیرزمینی فراهم آورده و الگویی قابل تعمیم برای مناطق مشابه ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مدیریت تلفیقی، آب سطحی و زیرزمینی، روش تفاضل محدود، دشت دهلران، نرم‌افزار جی ام اس.

۱ کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور دزفول، دزفول، ایران.
ایمیل: uosef1860@gmail.com
۲ استادیار گروه آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور دزفول، دزفول، ایران.
ایمیل: m.shahrbanouzadeh@ jsu.ac.ir (نویسنده مسئول)

مقدمه

امروزه به دلیل تغییرات سریع و اغلب غیرقابل پیش‌بینی در عوامل اقلیمی، اجتماعی، اقتصادی و سیاسی تصمیم‌گیری‌ها در زمینه مدیریت منابع آب در شرایطی همراه با عدم قطعیت انجام می‌شود. برای مدیریت موفق منابع آب، لازم است کارشناسان، مدیران و برنامه‌ریزان تمامی ابعاد اجتماعی، اقتصادی و سیاسی را در تصمیم‌گیری‌های خود لحاظ کنند؛ چرا که تغییر اقلیم (مانند دما، بارش و تبخیر)، تحولات اجتماعی-اقتصادی (نظیر رشد جمعیت، توسعه اقتصادی و تغییر کاربری اراضی و آب) و نیز ملاحظات مدیریتی (از جمله سیاست‌های تخصیص، قوانین و مداخلات سیاسی) به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر وضعیت منابع آب تأثیر می‌گذارند (Dong et al., 2013).

مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی به‌عنوان فرم ساده‌شده‌ای از سیستم واقعی آبخوان، روابط ریاضی بین تغذیه، تخلیه و نوسانات سطح ایستابی را در فضا و زمان نشان می‌دهد (Anderson and Woessner, 1992). تهیه مدل مفهومی مناسب که بر اساس اطلاعات میدانی باشد، یکی از مراحل کلیدی این فرآیند محسوب می‌شود. در این زمینه، مطالعات مختلفی در ایران و جهان به بررسی اثر مدیریت یکپارچه بر نوسانات سطح ایستابی، بهینه‌سازی تخصیص آب، کنترل فرونشست زمین و ارتقاء کیفیت منابع آب پرداخته‌اند (Majedi et al., 2020; Nourani et al., 2023; Rasmussen et al., 2023; Hashemi et al., 2024; Liu et al., 2024; Naz et al., 2024; Zhang et al., 2024; Khosravi et al., 2025).

پیش از دهه ۱۹۵۰، منابع آب سطحی و زیرزمینی به‌صورت دو سامانه جداگانه در نظر گرفته می‌شدند، اما آثار منفی این رویکرد در عمل مشهود شد. برای نخستین بار، Burt, (1964) مفهوم بهره‌برداری تلفیقی را مطرح کرد و تأکید نمود که این منابع باید به‌صورت یکپارچه مدیریت شوند. مدیریت تلفیقی، بهره‌برداری هماهنگ از منابع آب سطحی و زیرزمینی را با هدف افزایش بهره‌وری، کاهش آثار منفی زیست‌محیطی و ارتقاء پایداری دنبال می‌کند. به‌عنوان نمونه، صفوی و گل‌محمدی (2016) با استفاده از مدل ModFlow، تعاملی بین آب‌های سطحی و زیرزمینی دشت نجف‌آباد را شبیه‌سازی کردند و نقش جریان برگشتی از اراضی کشاورزی و نشت از رودخانه زاینده‌رود را در بیلان منطقه ارزیابی نمودند.

مدیریت منابع آب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به دلیل نوسانات زمانی و مکانی در دسترسی به منابع و افزایش تقاضا برای مصارف کشاورزی و شرب، با چالش‌های جدی‌تری مواجه است (Dong et al., 2013; Ross, 2018). در چنین مناطقی، بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی به‌عنوان راهکاری مؤثر برای مقابله با افت یا بالا آمدن سطح ایستابی مطرح شده است.

پیشرفت‌های اخیر در مدل‌سازی عددی نظیر ModFlowو نسخه‌های توسعه‌یافته آن مانند MF-OWHM[1]، امکان تحلیل دقیق‌تری از اندرکنش بین آب‌های سطحی و زیرزمینی و ارزیابی سناریوهای مختلف مدیریتی را فراهم کرده‌اند (Harbaugh et al., 2000; Hanson et al., 2014, Boyce et al., 2020, Boyce, 2022).

در منطقه دهلران، افزایش سطح ایستابی در بخش‌هایی مانند فرخ‌آباد موجب نگرانی‌هایی شده که به نظر می‌رسد ناشی از ورود جریان‌های سطحی بیش از ظرفیت و نبود مدیریت مناسب در بهره‌برداری از منابع زیرزمینی باشد. ناصری و همکاران (۱۳۹۹،۱۳۹۶) در مطالعات موردی خود با استفاده از نرم‌افزار Visual ModFlow، تأثیر انواع سیستم‌های زهکشی را در سناریوهای هیدرولوژیکی مختلف (مرطوب، نرمال، خشک) بررسی کرده‌اند. نتایج حاکی از آن بود که زهکشی زیرزمینی در مقایسه با چاه‌های پمپاژ، کارایی بیشتری در کاهش سطح آب زیرزمینی دارد. همچنین، Mirlas, (2013) در منطقه آرگامان فلسطین، با بهره‌گیری از مدل ModFlow نشان دادند که طراحی بهینه سیستم زهکشی می‌تواند تا ۳۰٪ نسبت به روش‌های سنتی مقرون به‌صرفه‌تر باشد. در سطح کلان، Ross (2018) با ارائه یک ارزیابی جامع از مدیریت تلفیقی در استرالیا، تأکید کرد که برای تحقق مدیریت مؤثر باید الگوهای جدیدی برای یکپارچه‌سازی منابع و نهادهای مدیریتی تدوین شود.

[1] ModFlow- One-Water Hydrologic flow Model

بررسی مطالعات گذشته در منطقه نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات بر روی سناریوهای خاص متمرکز بوده و اثر متغیرهای مختلف از جمله جریانات سطحی در منطقه را لحاظ ننموده‌اند. همچنین عامل اصلی زه‌دار شدن منطقه و پیدا کردن اقتصادی‌ترین راهکار برای حل بحران منطقه ریشه‌یابی نشده است. با توجه به این موارد، هدف از تحقیق حاضر بررسی وضعیت آبخوان دهلران به صورت یکپارچه، بررسی طرح کاهش تغذیه ناشی از جریلنات سطحی ورودی به منطقه فرخ آباد و امکان افت آبخوان و تأثیر آن در بیلان دشت و همچنین تهیه مدل ریاضی کمی برای شبیه‌سازی وضعیت آبخوان در آینده می‌باشد. با استفاده از این مدل‌ها برای شبیه‌سازی وضعیت کمی آبخوان می‌توان ضمن بررسی اثرات سناریوهای مختلف بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، روش استفاده از منابع آب این محدوده را به گونه‌ای مشخص کرد که ضمن تأمین نیازهای موجود، کمترین اثرات سوء بر کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی در محدوده طرح ایجاد شود.

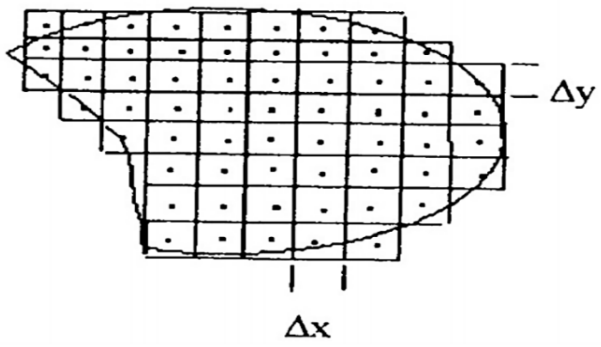
مواد و روش‌ها

تئوری ریاضی مدل مادفلو

مدل آب زیرزمینی مادفلو توسط سازمان تحقیقات زمین‌شناسی آمریکا (USGS) در سالهای ۲۰۰۰-۱۹۸۴ تهیه شده است و جریان را به صورت سه‌بعدی و به روش تفاضل محدود مدل می‌نماید. مدل‌های عددی بر اساس روش‌های گوناگون، تقریب‌سازی معادلات دیفرانسیل جریان و روش‌های حل عددی سیستم معادلات جبری جدید به چندین گروه تقسیم‌بندی می‌شوند که کاربردی‌ترین آنها، روش عناصر محدود و تفاضل محدود می‌باشد. Kresic, (2007) مدل ModFlow که با زبان فرترن نوشته شده است، بر پایه روش تفاضل محدود و به روش بلوک مرکزی، حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جریان آب زیرزمینی را در محیط متخلخل فراهم می‌کند (شکل ۱). Harbaugh et al., (2000) هدف از حل معادله جریان آب زیرزمینی، تعیین ارتفاع سطح ایستایی آب زیرزمینی در گام‌های زمانی مختلف، با فرض در دست بودن ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هیدرولیکی آبخوان در سلول‌های مختلف و همچنین وضعیت تغذیه و تخلیه آن برای دوره زمانی مورد نظر است. در واقع، برای هر دوره زمانی، مجموعه معادلات حاکم بر جریان آب نوشته شده و با توجه به شرایط اولیه و شرایط مرزی به روش تکرار حل می‌شوند و تراز سطح آب متغیرهای کمی مورد نظر را در سلول‌های مختلف در انتهای ماه به دست می‌دهند. معادله حاکم در این مدل در قالب رابطه (۱) آورده شده است:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial H}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial H}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial H}{\partial z}\right)+q_s = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \qquad (۱)$$

که در آن x ، y و z جهت جریان، t زمان، K ضریب هدایت هیدرولیکی، H تراز آب زیرزمینی، qs دبی ورودی/خروجی وSs ذخیره ویژه می باشد.



شکل (۱): شبکه بندی تفاضل محدود با هسته مرکزی Fetter(1994)

یکی از نرم‌افزارهای پیشرفته برای مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی نرم افزار GMS[1] است. این نرم افزار شبیه‌سازی کمی و کیفی آب زیرزمینی را به کمک ابزارهایی موجود در آن به روش تفاضل محدود و روش اجزاء محدود برای ده نوع مدل آب زیرزمینی انجام می‌دهد. مدل‌هایی که نرم‌افزار GMS پشتیبانی می‌کند چهار دسته هستند که شامل:

- مدل‌های شبکه سه‌بعدی MT3MS, ART3D, SEAM3D, MODFLOW, MODPATH, UTCHEM
- مدل تحلیلی MODEAM
- مدل دو بعدی SEEP2D
- مدل سه بعدی FEMWATER

(قدرتی و ثعباتی، ۱۳۹۱).

بعد از تشکیل مدل مفهومی اطلاعات مورد نیاز وارد مدل می‌گردد. در مدل‌های هیدروژئولوژیکی پیچیده با تعداد زیادی پارامتر مقایسه‌ای بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی خطا وجود دارد که بررسی آنها از طریق چشمی طاقت‌فرسا است و از معیار خطای RMSE که یکی از پرکاربردترین معیارهای مجاسبه خطا می‌باشد استفاده می‌شود.

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum(x_0 - xi)^2}}{n} \qquad (۲)$$

x_0 = مقادیر مشاهداتی، x_i = مقادیر محاسباتی، n= تعداد داده‌ها

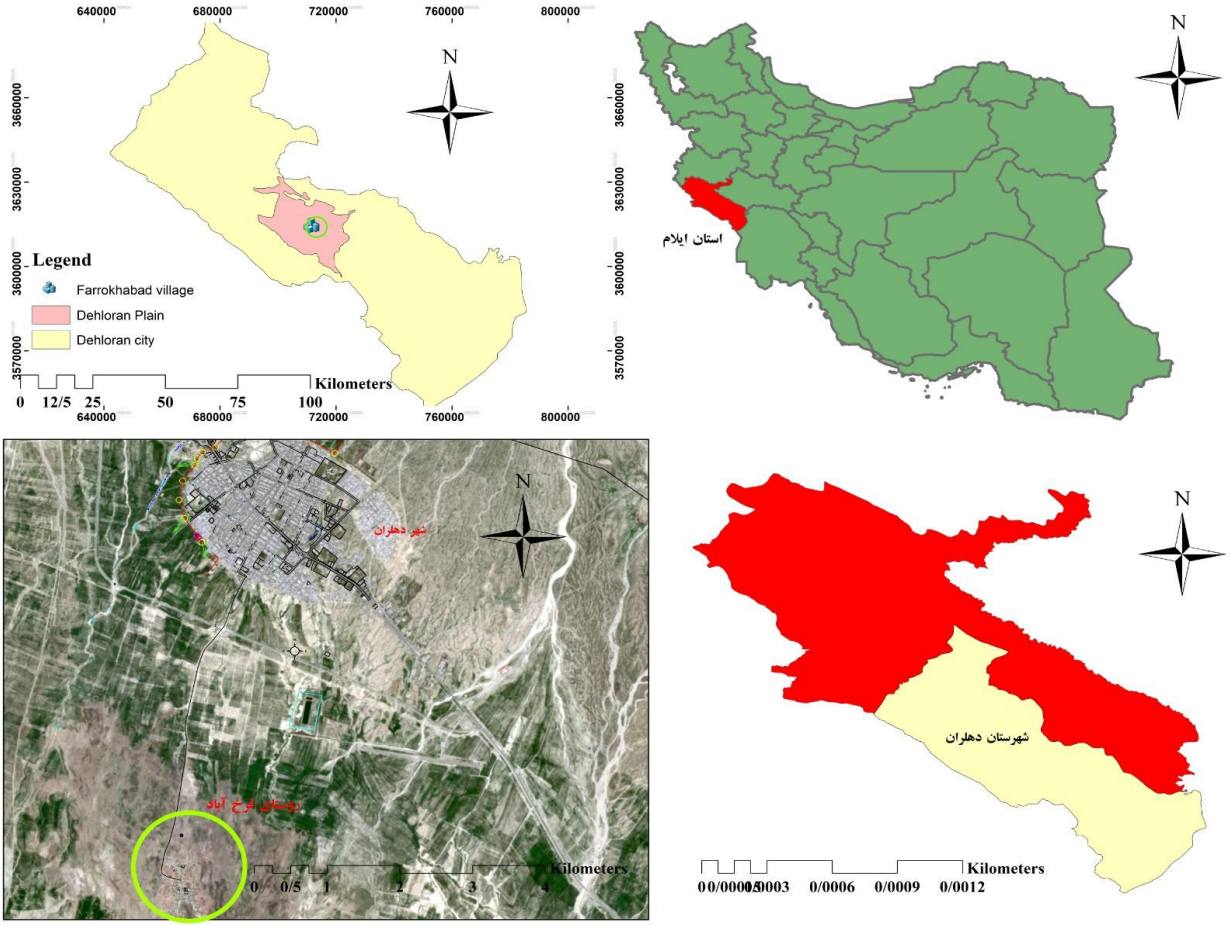
همچنین از خواص مهم نرم‌افزار GMS، نمایش تصویری میزان خطای ایجاد شده بین بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی در کنار پیزومترها و در هنگام کالیبراسیون مدل است. این موضوع کمک می‌کند که وضعیت واسنجی را بعد از هر اجرای مدل نمایش دهد.

منطقه مورد مطالعه و تعریف روند کلی اجرای تحقیق

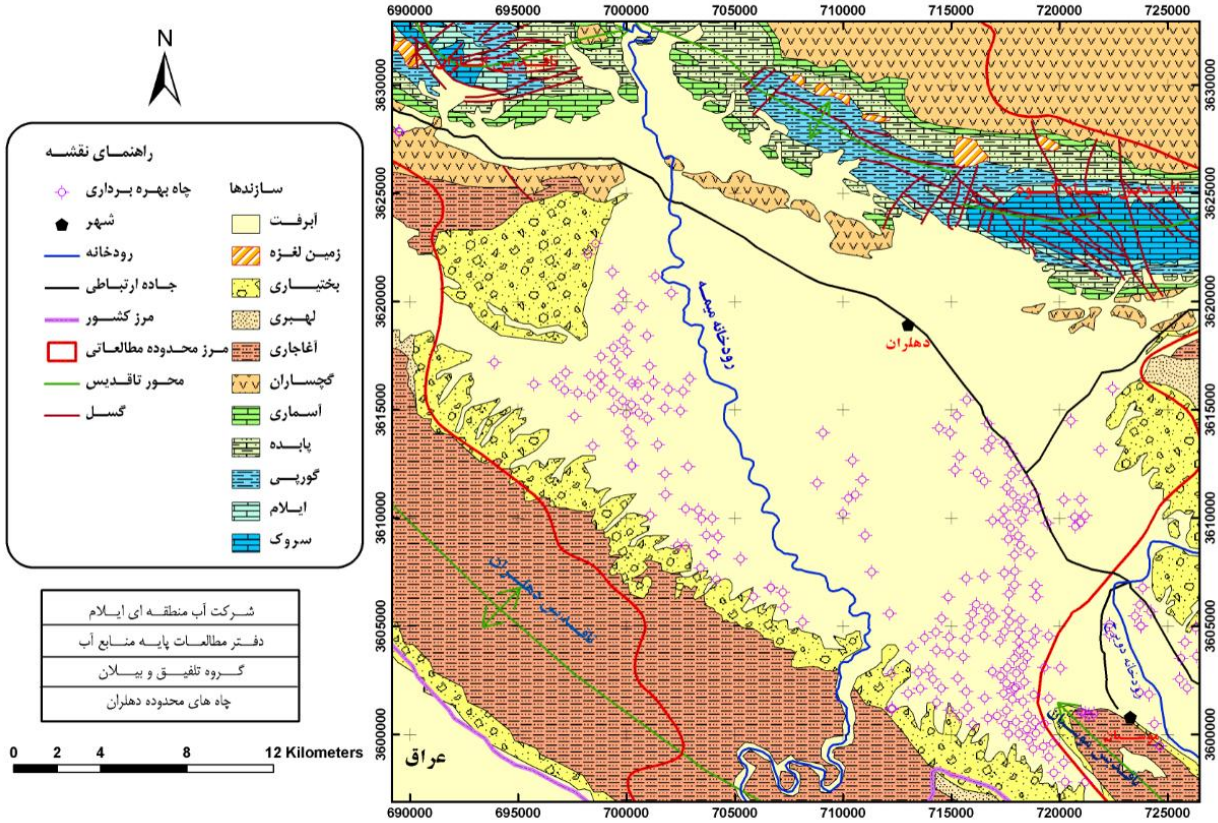
محدوده مورد مطالعه در حدود تقریبی عرض جغرافیائی ۲۸-۳۲ تا ۵۰-۳۲ شمالی و طول جغرافیایی ۰۱-۴۷ تا ۴۷-۲۲ شرقی و با ارتفاع ۲۱۱ متر در جنوب غرب ایران واقع شده است. وسعت کل حوضه آبریز دهلران ۲۷۱۰/۲۶ کیلومتر مربع است که ۲۲۱۸/۷۱ کیلومتر مربع آن را ارتفاعات و ۴۹۱/۵۵ کیلومتر مربع آن را دشت تشکیل می‌دهد. اقلیم آن گرم تا نیمه خشک و میانگین بارش سالانه حدود ۱۱۰ میلیمتر گزارش شده است (مهاب قدس، ۱۳۸۷). روستای فرخ‌آباد که موضوع بررسی این مطالعه است در حدود پنج کیلومتری جنوب‌غرب شهر دهلران واقع شده است. این روستا در بخش میانی دشت دهلران قرار دارد. شکل (۲) و (۳)، موقعیت و نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهند.

در این مطالعه، پس از جمع‌آوری و بررسی داده‌های مرتبط با آب زیرزمینی آبخوان دهلران و تهیه نقشه‌های مورد نیاز در محیط Arc GIS و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Santinel2، داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، تبخیرسنجی، باران‌سنجی و سینوپتیک و استخراج پارامترهای مورد نیاز برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل، اقدام به مدل‌سازی کمی آبخوان بوسیله مدل ModFlow در نرم افزار GMS گردید. در این راستا پس از وارد نمودن داده‌ها به نرم افزار GMS تمامی پارامترهای موجود به کد ModFlow در این محیط تبدیل شد. پس از اجرا و واسنجی مدل در حالت ماندگار برای مهر ماه ۱۳۹۹ و کسب نتایج مطلوب در این مرحله، مدل در حالت غیرماندگار برای سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ کالیبره و اجرا گردید. بعد از مرحله اعتبارسنجی برای سال آبی ۹۹-۱۳۹۸و کسب نتایج مطلوب، مدل‌سازی به اتمام رسید. در نهایت پس از اتمام مدل‌سازی نسبت به طرح و اعمال سناریو بر روی عوامل مختلف تخلیه و تغذیه آبخوان، احداث زهکش زیرزمینی و در کل اثر مدیریت تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی بررسی گردید.

[1] Grounwater Modelling System



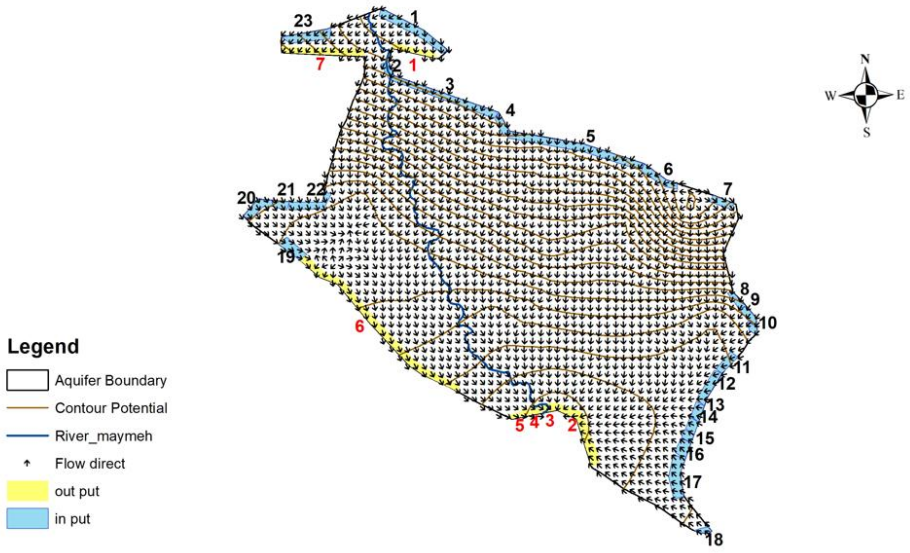
شکل (۲): موقعیت محدوده مطالعاتی دهلران(آب منطقه‌ای استان ایلام، ۱۳۸۸)



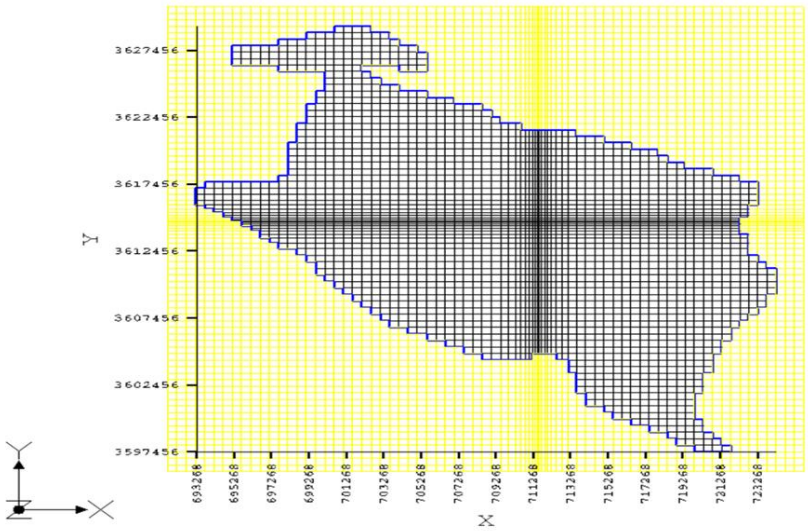
شکل (۳): نقشه زمین‌شناسی دشت دهلران (آب منطقه ای استان ایلام، ۱۳۸۸)

مدل مفهومی و عددی آبخوان دشت دهلران

ساختار مدل مفهومی آبخوان دشت دهلران شامل محدوده مدل‌سازی، چاه‌های بهره‌برداری و پیزومتری، میزان تغذیه از سطح (شامل بارش، آب برگشتی از چاه‌های بهره‌برداری، شبکه آبیاری میمه و دویرج، چشمه‌های آب گرم و فاضلاب شهر دهلران)، توزیع اولیه مقدار پارامترهای هیدروژئولوژی (هدایت هیدرولیکی و آبدهی وِیژه) است. در این تحقیق مدل‌سازی دو بعدی آبخوان انجام شده بطوریکه در راستای قائم آبخوان تک لایه در نظر گرفته شده است. برای تعیین الگوی تغذیه از سطح زمین ۲۱ ناحیه تغذیه متأثر از محل قرارگیری شبکه چاه‌های بهره‌برداری، شبکه‌های آبیاری، رودخانه میمه، زمین‌شناسی منطقه و پیزومترها در سطح دشت تعریف شده است (شکل ۳). شرایط مرزی مدل مشتمل بر مرزهای هد و مرزهای نفوذ ناپذیر هستند که دارای دو ورودی اصلی آب زیرزمینی می‌باشد که در شمال و شرق دشت واقع شده است و قسمت عمده آب زیرزمینی از دو جبهه تأمین می‌گردد. همچنین تنها جبهه خروجی آبخوان در قسمت جنوب شرقی واقع شده است که در شکل (۴) نشان داده شده است. پس از تهیه مدل مفهومی، شبکه‌بندی مدل براساس وسعت منطقه، وضعیت زمین‌شناسی، تراکم چاه‌های بهره‌برداری، توپوگرافی شکل مرزهای محدوده و میزان اطلاعات موجود انجام شد. جهت تمرکز بر منطقه مطالعاتی فرخ آباد ابعاد شبکه ۱۰۰ در ۱۰۰ متر و برای سایر نقاط دشت ۵۰۰ در ۵۰۰ متر در نظر گرفته شد. در مجموع تعداد کل سلول‌های محاسباتی ۲۸۴۴ عدد، که شامل ۸۰ سطر و ۷۸ ستون می باشد. شبکه سلول‌بندی شده آبخوان در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۴): نقشه محدوده بیلان، جهت جریان آب زیرزمینی و شرایط مرزی آبخوان دشت دهلران (سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹)



شکل (۵): شبکه سلول بندی شده مدل مادفلو برای منطقه مورد مطالعه دهلران-فرخ آباد

پارامترهای ورودی به مدل

مهمترین پارامترهای ورودی شامل جریان ورودی و خروجی زیرزمینی، تغذیه از طریق نزولات جوی، تغذیه از جریان‌های سطحی، تغذیه از طریق آب برگشت کشاورزی، تخلیه توسط چاه‌های بهره‌برداری، تخلیه و تغذیه از چشمه‌ها و تغذیه ناشی از فاضلاب‌های شهری است که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در جدول (۱) خلاصه پارامترهای بیلان آبخوان دهلران و بر حسب میلیون متر مکعب در سال ارائه شده است.

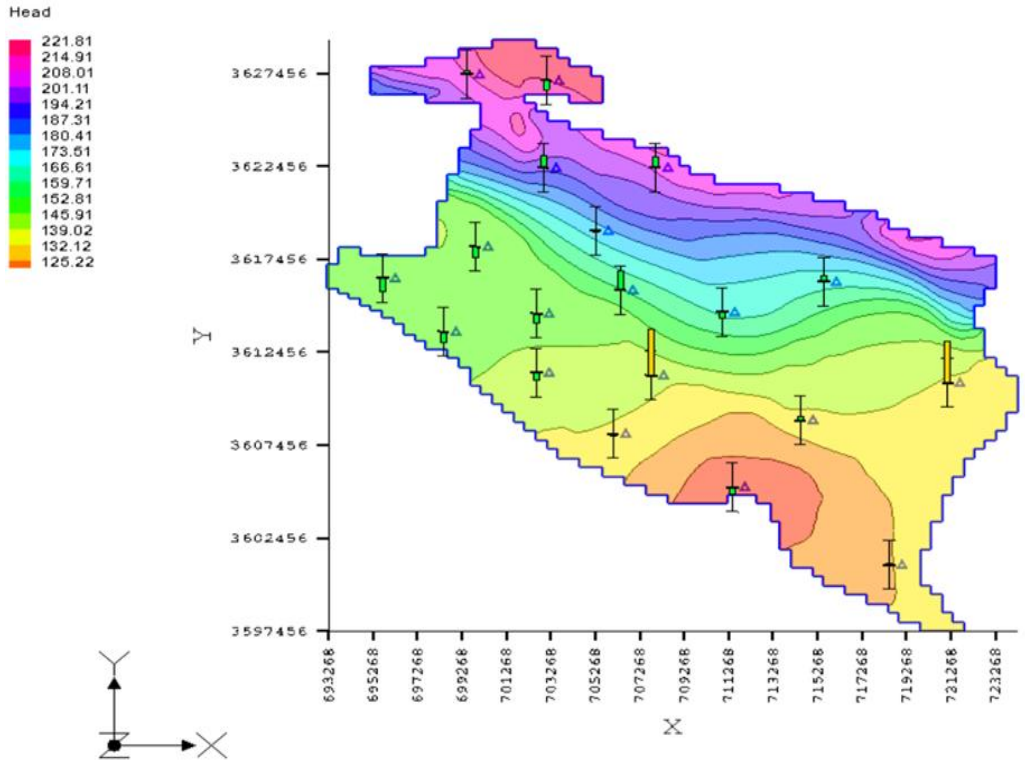
جدول (۱): خلاصه پارامترهای بیلان آبخوان دهلران در سال آبی۱۴۰۰- ۱۳۹۹ (آب منطقه ای ایلام، ۱۳۹۹)

پارامترهای بیلان	تغذیه (MCM)
تغذیه از سطح دشت	
جریان ورودی زیرزمینی	۳۱/۱۳
نفوذ مؤثر از بارندگی	۱/۷۸
نفوذ مؤثر از جریان‌های سطحی و سیلاب	۱۹/۶۹
نفوذ مؤثر از آب برگشتی چاه‌های کشاورزی (۳۰٪)	۱۳/۲
حجم آب نفوذ یافته حاصل از آب سطحی منتقل شده (شبکه میمه و دویرج (۲۵٪)	۱۷/۱۵
نفوذ مؤثر از آب برگشتی شهری و صنعتی	۱/۱۱
نفوذ مؤثر از چشمه های منطقه	۲/۳۶
جمع نفوذ مؤثر	۸۶/۴۲
تخلیه از سطح دشت	تخلیه (MCM)
جریان خروجی زیرزمینی	۵/۹۹
آب زهکشی شده به رودخانه میمه	۸
برداشت از آبخوان جهت مصرف کشاورزی	۴۷
برداشت از آبخوان جهت مصرف ضرب و صنعت	۵/۹۷۸
تبخیر از سطح آب زیرزمینی	۲/۸
جمع تخلیه	۶۹/۴۸
تغییرات حجم ذخیره مخزن آب زیرزمینی	۱۷/۳۷

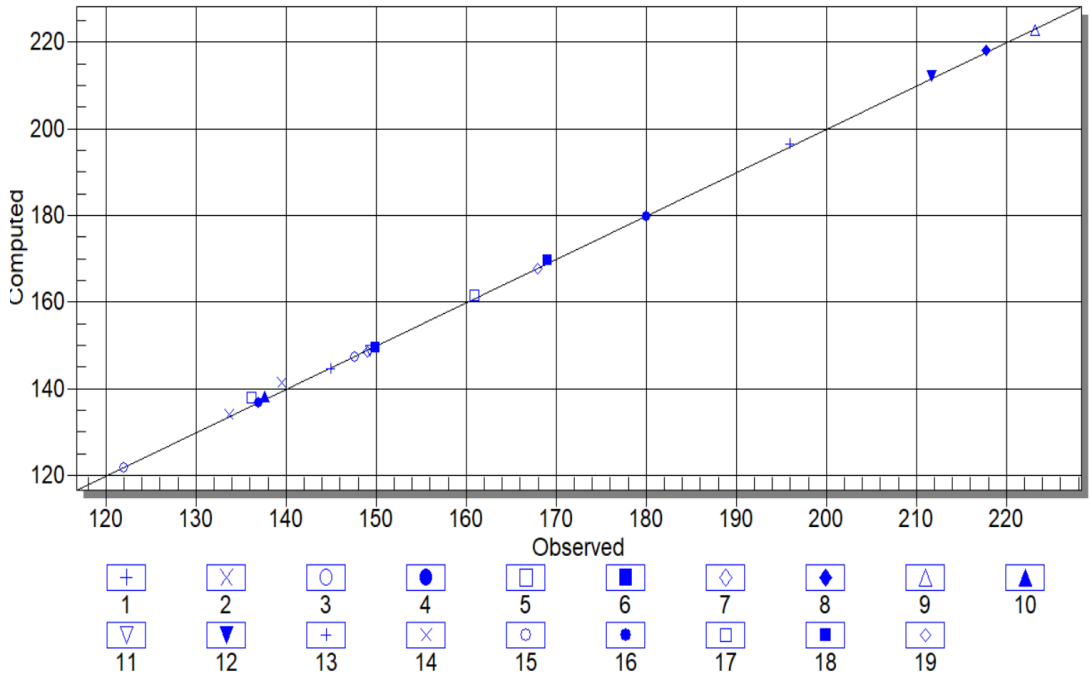
اجرای مدل

کالیبراسیون مدل عددی در حالت ماندگار

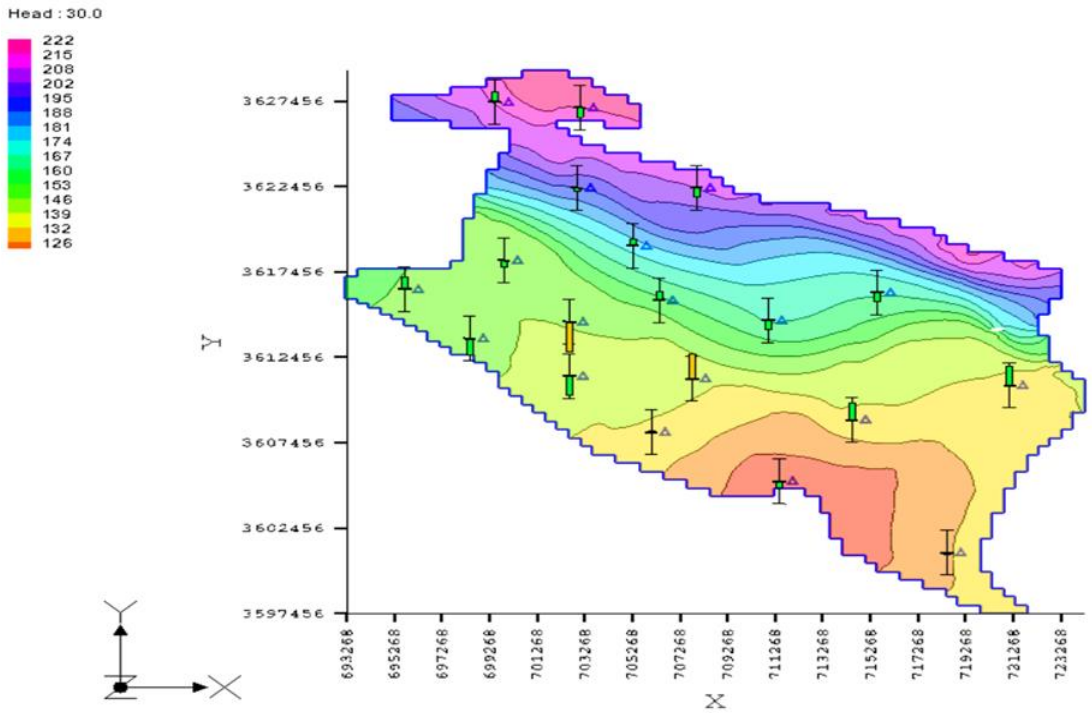
پس از توسعه مدل مفهومی در گام اول مدل به فرم ماندگار و به شکل پیش رو با موتور مادفلو ۲۰۰۰ اجرا شد، اجرای مدل در حالت پایدار برای گام زمانی اول (مهر ماه سال ۱۳۹۹) در مرحله اول مدل‌سازی انجام شد. نتایج با توجه به عدم قطعیت حاکم در برخی از پارامترهای ورودی با خطای بالا همراه گردید. در مرحله نخست، تنظیم دستی پارامترهای تغذیه از سطح و هدایت هیدرولیکی در مدل انجام و خروجی‌های مدل با تراز چاه‌های مشاهده‌ای کنترل و در نهایت مدل در حالت ماندگار کالیبره گردید. در مرحله بعد کالیبراسیون در حالت غیر ماندگار برای سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ صورت گرفت و مدل کالیبره گردید. اشکال (۶) و (۷) به ترتیب، نمایش تصویری اجرای مدل بعد از کالیبراسیون دستی و نمودار مقایسه‌ای تراز آب مشاهده‌ای و محاسباتی پس از کالیبراسیون و با RMSE=0.718 در حالت ماندگار برای ۱۹ پیزومتر موجود در منطقه می‌باشد و همچنین اشکال (۸) و (۹) کالیبراسیون RMSE=0.848 در حالت غیرماندگار را نشان می‌دهد.



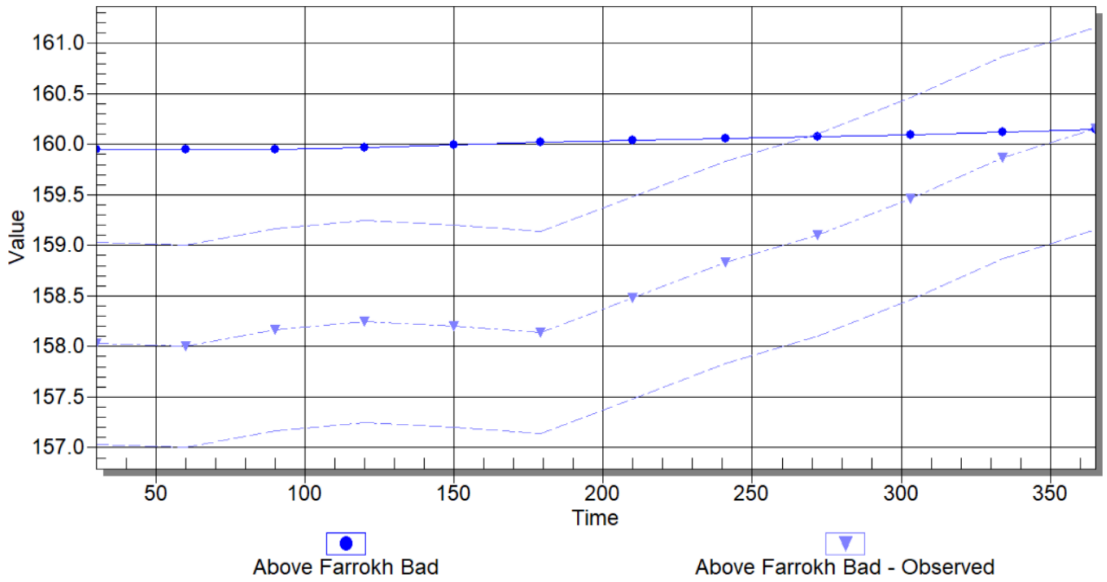
شکل(۶): اجرای مدل بعد از کالیبراسیون در حالت ماندگار



شکل (۷): نمودار مقایسه‌ای تراز آب زیرزمینی مشاهده‌ای و محاسباتی پس از کالیبراسیون(بر حسب متر از سطح دریا)



شکل (۸): اجرای مدل بعد از کالیبراسیون در حالت غیرماندگار



شکل (۹): نمودار مقایسه‌ای سری زمانی تراز آب مشاهده‌ای و محاسباتی در حالت غیرماندگار چاهک روستای فرخ‌آباد (زمان بر حسب روز)

اعتبار سنجی مدل غیرماندگار

برای تعیین کارایی مدل غیرماندگار آب زیرزمینی، از داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای مربوط به سال‌های آبی ۱۳۹۸ تا ۱۳۹۹ به مدت یک سال استفاده شد. بر این اساس، مقادیر مرزی، مقادیر برداشت چاه‌ها و تغذیه از سطح آبخوان به صورت ماهانه با استفاده از داده‌های سال آبی مورد نظر تهیه و به مدل وارد شد. در این مرحله، مدل عددی اجرا شده و نتایج به دست آمده با داده‌های واقعی مقایسه شد. نتایج حاصل از مدل عددی میزان خطای

RMSE=0.906 می‌باشد.

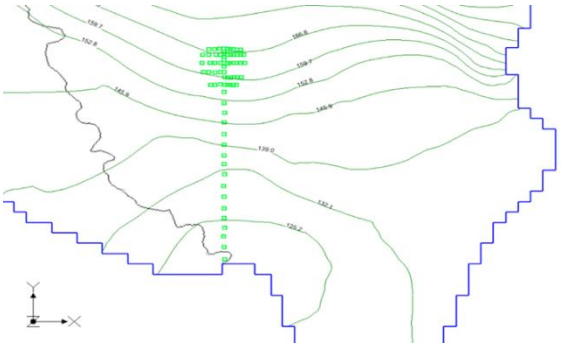
اعمال سناریوهای مدیریتی

سناریوی ۱ (وضع موجود)

سناریو اول که با عنوان سال پایه در مدل تعریف شد (مهر ۱۳۹۹ تا مهر ۱۴۰۰)، بیان‌کننده وضعیت موجود منطقه است. در این سناریو با حفظ شرایط کنونی و آغاز بهره‌برداری از پروژه انتقال آب چشمه‌های آبگرم که با هدف آبیاری اراضی بالادست منطقه مطالعاتی اجرا شده است. آب مورد نیاز حدود ۶۰۰ هکتار از اراضی دیم تأمین خواهد شد و تغذیه سطحی این اراضی افزایش می‌یابد.

سناریوی ۲ (اعمال زهکش زیرزمینی)

در سناریو دوم سیستم زهکشی شامل ترکیبی از زهکش‌های جمع‌کننده اصلی و زهکش‌های لوله‌ای با آرایش ترکیبی از شبکه‌های منظم، موازی در نظر گرفته شد. برای این‌کار در ابتدا زهکش جمع‌کننده اصلی رسم شد، بدین صورت که تراز رودخانه میمه در نقطه‌ای که قرار بود زه آب به‌درون آن ریخته شود، مشخص شد و با شیب مناسب تا محل نصب زهکش امتداد داده شد. سپس با کم‌کردن تراز به دست آمده در محل احداث زهکش از تراز رودخانه عمق نصب زهکش تعیین شد، تا بدین وسیله زه آب توسط نیروی ثقل زمین جابه‌جا شود .زهکش‌های جمع‌کننده فرعی نیز با رعایت شیب رسم شد. (شکل ۱۰).



شکل (۱۰): طرح زهکش اعمال شده به محدوده مورد مطالعه در مدل

سناریوی ۳ (فعال بودن تمامی چاه‌های بهره‌برداری)

طی بررسی عملکرد سالیانه چاه‌های بهره‌برداری مشخص شد حدود ده درصد از چاه‌های بهره‌برداری تحت پوشش شبکه‌ها بخصوص چاه‌های منطقه فرخ آباد کاملاً خاموش بوده است. همچنین چاه‌های بهره‌برداری در محدوده شبکه دویرج به‌طور عمده در ماه‌های بهمن، اسفند و فروردین بدلیل استفاده از شبکه آبیاری دویرج، هزینه‌های برق و استهلاک چاه‌ها غیرفعال می‌باشند. بنابراین در این سناریو چاه‌ها را براساس پروانه‌ی بهره‌برداری تماماً در مدل فعال گردیدند.

سناریوی ۴ (افزایش ۲۰ درصدی برداشت از چاه‌های بهره‌برداری)

در این سناریو برداشت از چاه‌ها براساس پروانه بهره‌برداری با افزایش ۲۰درصدی اعمال گردید تا تاثیر آن بر تراز متوسط دشت مشخص گردد.

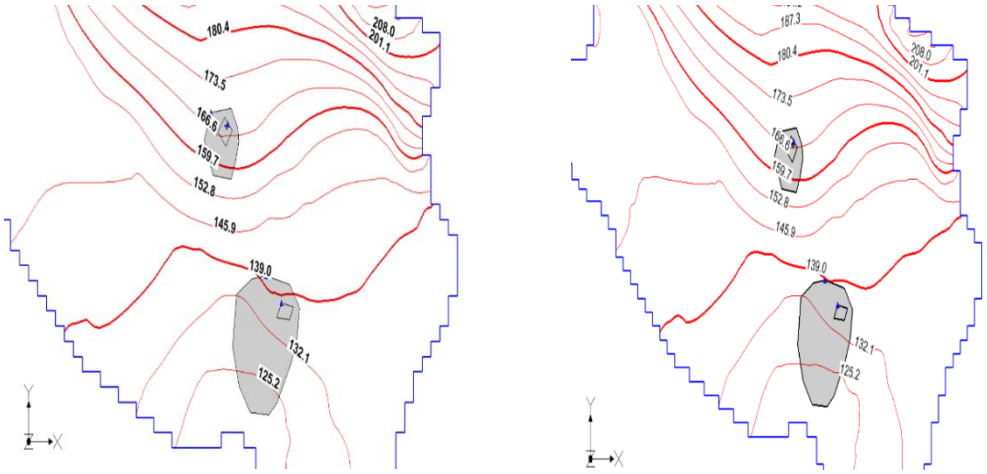
سناریوی ۵ (کاهش۵۰ درصدی تغذیه ناشی از جریانات سطحی منطقه)

در سناریو پنجم کاهش جریانات سطحی وارد شده به منطقه مورد مطالعه قرار گرفت. مساحت منطقه تبخیری براساس آمار چاه‌های مشاهداتی در مهرماه سال ۹۹ تا عمق ۵ متر در منطقه فرخ‌آباد ۳۲۶ هکتار می‌باشد بنابراین کاهش ۵۰ درصدی تغذیه از آب‌های سطحی(چشمه آب گرم، فاضلاب سطحی شهر دهلران و تخلیه آب از تصفیه خانه دهلران) به مدل اعمال گردید.

نتایج و بحث

نتایج اعمال سناریوی اول در مدل

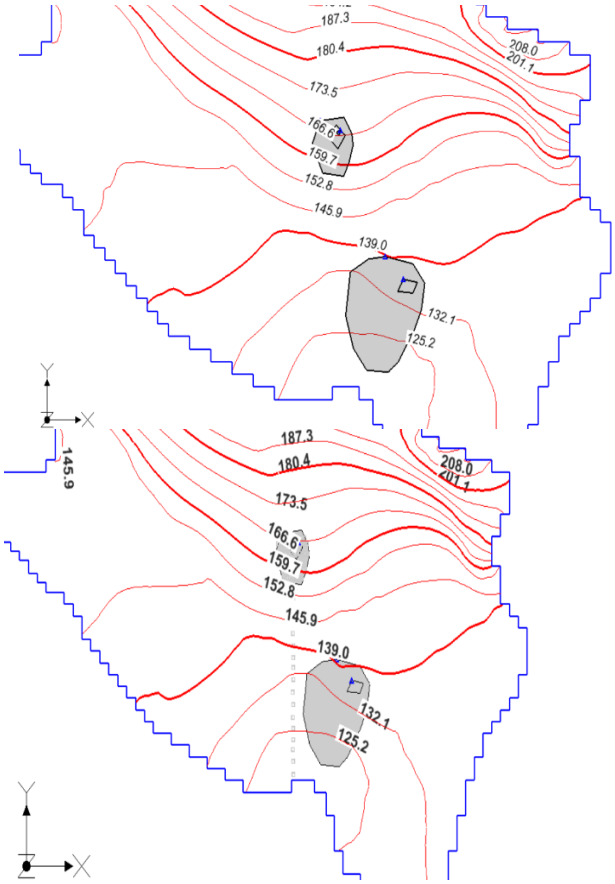
در سناریوی اول با اجرای پروژه انتقال آب گرم چشمه‌ها به جنوب دهلران جهت آبیاری ۶۰۰ هکتار از اراضی بالادست منطقه فرخ آباد، باعث افزایش تغذیه سطحی شده و سطح آب در پیزومتر منطقه مطالعاتی ۰/۴۹ متر افزایش خواهد داشت.



شکل (۱۱): تراز آب زیرزمینی قبل و بعد از اعمال سناریوی شماره یک در محل های تبخیری

نتایج اعمال سناریوی دوم در مدل

در سناریو شماره دو بعد از اعمال زهکش زیرزمینی و اجرای مدل، تراز سطح ایستابی در پیزومتر منطقه فرخ‌آباد به اندازه ۱/۵۳ متر کاهش یافت (شکل ۱۲).

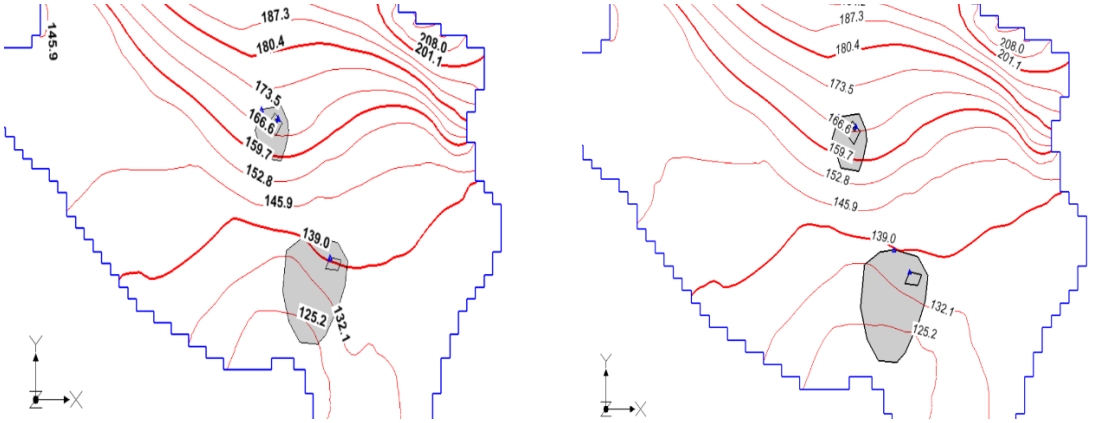


شکل (۱۲): نقشه افت سطح ایستابی قبل و بعد از اعمال زهکش زیرزمینی

نتایج اعمال سناریوی سوم در مدل

سناریوی سوم در مدل یعنی استفاده از ظرفیت کامل چاه‌های بهره‌برداری بطور متوسط باعث کاهش متوسط تراز آب زیرزمینی به اندازه ۸/۱۵ سانتی‌متری در سطح

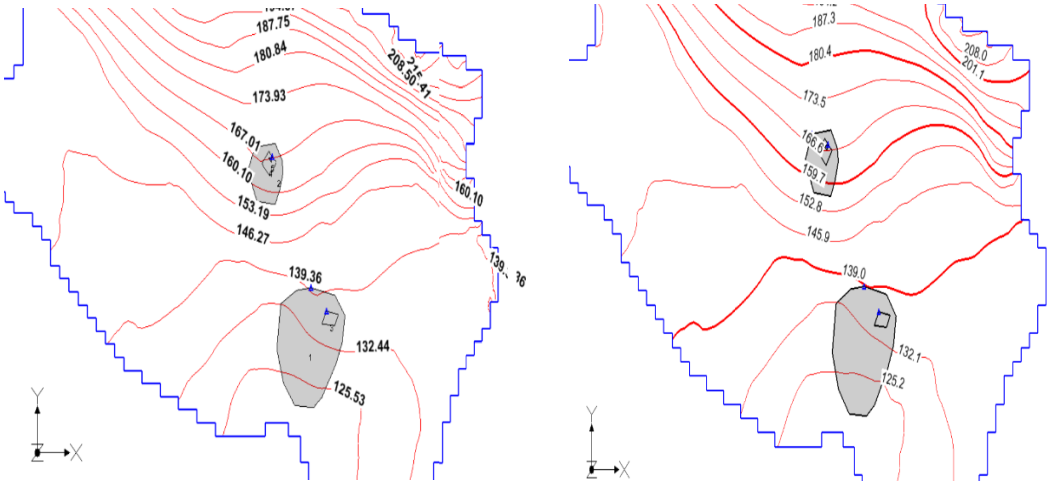
آبخوان می‌شود که به علت تراکم کم چاه‌های بهره‌برداری در منطقه مطالعاتی فرخ‌آباد، این سناریو تأثیر زیادی بخصوص در بازه زمانی کوتاه مدت در منطقه مطالعاتی ندارد (شکل ۱۳).



شکل (۱۳): تراز آب زیرزمینی قبل و بعد از اعمال سناریوی شماره ۳ با تمرکز بر محل‌های تبخیری منطقه مطالعاتی

نتایج اعمال سناریوی چهارم در مدل

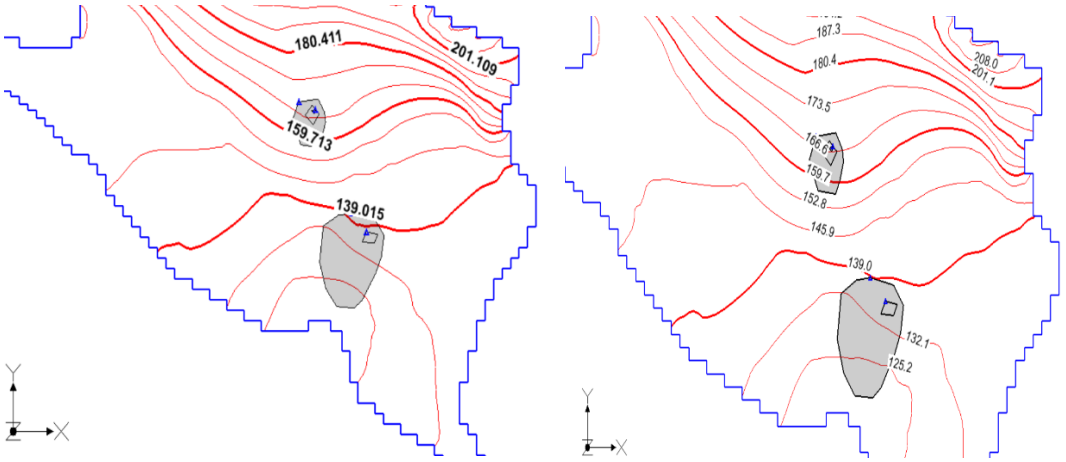
در سناریو شماره ۴ ، برداشت از چاه‌های براساس پروانه بهره‌برداری و افزایش ۲۰ درصدی اعمال گردید و نتیجه آن کاهش تراز متوسط ۰/۳۹ متر سطح آب در آبخوان می‌باشد (شکل ۱۴).



شکل (۱۴): تراز آب زیرزمینی بعد از اعمال سناریوی شماره چهار با تمرکز بر محل‌های تبخیری منطقه مطالعاتی

نتایج اعمال سناریوی پنجم در مدل

در سناریوی پنجم یعنی کاهش ۵۰ درصدی تغذیه سطحی در مدل، سطح آب در پیزومتر شماره ۱۹ (منطقه فرخ‌آباد) به اندازه ۳/۵ متر، پیزومتر شرق نیروگاه (شماره۶) به اندازه ۲/۸۹ متر و پیزومتر جنوب‌شرقی امامزاده اکبر(شماره۱۰) به اندازه ۱/۱۹ متر کاهش یافتند و عمق آب در منطقه تبخیری فرخ‌آباد به بالای ۵ متر می‌رسد (شکل ۱۵).



شکل (۱۵): تراز آب زیرزمینی قبل و بعد از اعمال سناریوی شماره ۵ با تمرکز بر محل‌های تبخیری منطقه مطالعاتی

نتایج سناریوهای مختلف مدیریتی در منطقه فرخ‌آباد نشان داد که تغییر در میزان تغذیه سطحی تأثیر بیشتری بر سطح آب زیرزمینی نسبت به تغییرات در برداشت دارد. افزایش تغذیه از طریق انتقال آب گرم موجب بالا رفتن تراز آب (۰/۴۹ متر) شد، در حالی که کاهش تغذیه سطحی باعث افت شدید سطح ایستابی تا ۳/۵ متر در برخی پیزومترها گردید. در مقابل، افزایش برداشت از چاه‌ها حتی تا ۲۰ درصد، کاهش محدودتری در سطح آب (حداکثر ۰/۳۹ متر) داشت. این یافته‌ها بر اهمیت مدیریت تغذیه برای حفظ پایداری منابع آب زیرزمینی تأکید دارند.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق، که با استفاده از مدل ModFlow در قالب نرم‌افزار GMS (نسخه ۷.۱.۳) و با هدف شبیه‌سازی کمی جریان آب زیرزمینی آبخوان فرخ‌آباد دشت دهلران انجام شد، نشان‌دهنده کارایی بالای مدل‌سازی عددی در تحلیل وضعیت آبخوان و ارزیابی سناریوهای مدیریتی مختلف است. در مقایسه با مطالعات مشابه در سایر دشت‌های کشور، این پژوهش دارای چند ویژگی برجسته و نوآورانه است که ارزش علمی و کاربردی آن را افزایش می‌دهد.

یکی از مهم‌ترین مزایای این مطالعه، توجه دقیق و کمی به تأثیر منابع تغذیه سطحی موضعی همچون فاضلاب شهری، تصفیه‌خانه دهلران و جریان چشمه‌های آب گرم است. در حالی که در بسیاری از پژوهش‌های مشابه صرفاً به تغییر در برداشت از چاه‌ها یا بارندگی به عنوان منابع ورودی مدل پرداخته شده است. این تحقیق با تحلیل عددی سناریوهای کاهش تغذیه سطحی، نشان داده است که کاهش ۵۰ درصدی این منابع می‌تواند افت تراز آب زیرزمینی تا حدود ۳.۵ متر را در بازه‌ای یک‌ساله ایجاد نماید. این یافته، نقش کلیدی عوامل انسانی و شهری را در پایداری آبخوان منطقه به‌خوبی آشکار می‌سازد و می‌تواند مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های شهری و زیست‌محیطی قرار گیرد.

همچنین، در ارزیابی سناریوی احداث زهکش زیرزمینی، پژوهش حاضر با بررسی فنی و نگاه دقیق به خصوصیات هیدروژئولوژیکی منطقه و آبخوان به این نتیجه رسیده است که به‌دلیل بازده پایین و هزینه‌های بالای اجرایی، این گزینه از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست و با توجه به نتایج این پژوهش و اهمیت روزافزون بهره‌برداری پایدار از منابع آب زیرزمینی پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آینده، رویکرد اقتصادی با دقت و جزئیات بیشتری در تحلیل گزینه‌های مدیریتی لحاظ شود. این امر می‌تواند شامل برآورد هزینه-فایده اجرای سناریوهای مختلف (مانند نصب زهکش‌ها، توسعه تصفیه‌خانه‌ها، کاهش برداشت یا افزایش

تغذیه مصنوعی)، تحلیل اقتصادی چندمعیاره(MCDA[1]) و حتی استفاده از مدل‌های تلفیقی هیدرو-اقتصادی باشد. بهره‌گیری از چنین رویکردهایی می‌تواند امکان مقایسه واقعی‌تری بین گزینه‌های مختلف مدیریتی فراهم آورده و به تصمیم‌سازی علمی و اجرایی در سطوح برنامه‌ریزی منطقه‌ای و ملی کمک شایانی نماید. همچنین پیشنهاد می‌شود در تدوین سناریوهای آینده، نظرات کارشناسان اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی نیز به‌صورت بین‌رشته‌ای لحاظ شود تا راه‌کارهای ارائه شده، جامع و قابل اجرا باشند

از سوی دیگر، تحقیق حاضر به محدودیت‌های موجود در داده‌های ورودی مدل نیز توجه داشته است. با اشاره به کمبود چاه‌های مشاهده‌ای و عدم کفایت داده‌های به‌روز مربوط به قابلیت انتقال و آبدهی ویژه (که غالباً از آزمایش‌های پمپاژ قدیمی به‌دست آمده‌اند)، نیاز به انجام آزمون‌های دقیق‌تر و گسترده‌تر پمپاژ برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود که این واقع‌بینی در تحلیل داده‌ها و پیشنهاد اقدامات بهبودی، می‌تواند حائز اهمیت باشد.

در مجموع، تحقیق حاضر علاوه بر ارائه یک مدل هیدرولوژیکی معتبر از آبخوان دشت دهلران، توانسته است ارتباط بین فعالیت‌های انسانی (همچون مدیریت فاضلاب) و شرایط آبخوان را به‌صورت کمی بررسی کند، در تصمیم‌سازی مدیریت منابع آب نگاهی هر چند ناچیز به رویکرد اقتصادی داشته و در نهایت، نقشه راهی را برای ارتقای داده‌های هیدروژئولوژیکی در مطالعات آینده ترسیم کرده است و این رویکرد می‌تواند به عنوان الگویی قابل تعمیم برای دیگر دشت‌های کشور با شرایط مشابه مورد توجه قرار گیرد.

منابع

شرکت سهامی آب منطقه ای ایلام. ۱۳۸۸.گزارش توجیهی پیشنهاد ممنوعیت توسعه بهره برداری آبخوان دشت دهلران: دفتر مطالعات پایه منابع آب، گروه تلفیق و بیلان.

شرکت سهامی آب منطقه ای ایلام. ۱۳۹۹.گزارش بیلان آب در محدوده مطالعاتی دشت دهلران: دفتر مطالعات پایه منابع آب، گروه تلفیق و بیلان.

شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس، ۱۳۸۷. گزارش مطالعات نیمه تفصیلی و تهیه مدل ریاضی کمی و کیفی آب زیرزمینی دشت دهلران.

قدرتی، م. و ع. ثعبانی. ۱۳۹۱. مدل‌های ریاضی آب‌های زیرزمینی آموزش کاربردی مدل GMS. انتشارات سیمای دانش، ۲۱۰.

ناصری، ح.، م. سعیدی، ف. علیجانی و ص. علیمرادی. ۱۳۹۶. بررسی علت بالا آمدن سطح ایستابی دشت فرخ آباد دهلران با تاکید بر بیلان آب، دومین کنفرانس ملی هیدرولوژی ایران. شهرکرد: دانشگاه شهرکرد.

ناصری، ح.، م. سعیدی، ف. علیجانی و ص. علیمرادی. ۱۳۹۹. شبیه‌سازی تأثیر زهکشی در پائین انداختن سطح ایستابی دشت فرخ‌آباد، دهلران، مجله پژوهش‌های دانش زمین، سال یازدهم، شماره۴۲، ۲۲۴-۲۰۹.

Anderson M. and W. Woessner. 1992. Applied groundwater modeling flow and adjective transport. Academic Press, San Diego, 381.

Boyce S.E., 2022. MODFLOW One-Water Hydrologic Flow Model (MF-OWHM) Conjunctive Use and Integrated Hydrologic Flow Modeling Software, version 2.2.0: U.S. Geological Survey Software Release, https://doi.org/10.5066/P9P8I8GS.

Boyce S.E., R.T. Hanson, I. Ferguson, W. Schmid, W. Henson, T. Reimann, S.M. Mehl, and M.M. Earll. 2020. One-Water Hydrologic Flow Model: A MODFLOW based conjunctive-use simulation software: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A60, 435 p., https://doi.org/10.3133/tm6A60.

Burt O.R., 1964. The economics of conjunctive use of ground and surface water. Hilgardia 36(2):31–111.

[1]Multi-Criteria Decision Analysis

Dong C., G. Schoups and N. Van de Giesen. 2013. Scenario development for water resource planning and management: A review. Technological Forecasting and Social Change 80(4):749–761.

Fetter, C. W., 1994. Applied Hydrogeology. New York: Prentice Hall Publiching. P: 691.

Hanson R.T., S.E. Boyce, W. Schmid, J.D. Hughes, S.M. Mehl, S.A. Leake, T. Maddock, and R.G. Niswonger. 2014. One-Water Hydrologic Flow Model (MODFLOW-OWHM): U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A51, 120 p., http://dx.doi.org/10.3133/tm6A51.

Harbaugh A.W., E.R. Banta, M.C. Hill and M.G. McDonald. 2000. Modflow-2000, The U.S. geological survey modular ground-water model-user guide to modularization concepts and the groundwater flow process. Open-file report, U. S. Geological Survey (92):134.

Hashemi S.A., A. Robati, M. Momeni Raghabadi and M.A. Kazerooni Sadi. 2024. Conjunctive management of groundwater and surface water resources using a hybrid simulation–optimization method, Journal of Hydroinformatics 26 (5): 998–1013., https://doi.org/10.2166/hydro.2024.220.

Khosravi M., A. Afshar, P. Perona, D.A. Barry, A. Salavitabar and A. Ghaheri. 2025. Stochastic optimization to maximize water supply index in conjunctive use of surface and groundwater. Journal of Hydrology, 648, Article 132377. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132377.

Kresic N., 2007. Hydrogeology and groundwater modelling. second edition. CRC press/Taylor and Francis, Bocarton, NewYork, Lindon, P:807.

Liu S.M., M.Z. Bai and M.Z. Bai. 2024. Groundwater level rise and geological structure influences on land deformation dynamics: insights from managed aquifer recharge operations in Beijing, China. Frontiers in Earth Science, 12, Article 1469772. https://doi.org/10.3389/feart.2024.1469772.

Majedi H., H. Fathian, A. Nikbakht-Shahbazi and N. Zohrabi. 2020. Integrated surface and groundwater resources allocation simulation to evaluate effective factors on greenhouse gases production, Water Supply, 20 (2): 652–666.

Mirlas V., 2013. ModFlow Modeling to Solve Drainage Problems in the Argaman Date Palm Orchard, Jordan Valley, Israel. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 139(8), 612- 624.

Naz I., H. Fan, R.W. Aslam, A. Tariq, A. Quddoos, A. Sajjad, W. Soufan, K.F. Almutairi and F. Ali. 2024. Integrated geospatial and geostatistical multi-criteria evaluation of urban groundwater quality using water quality indices. Water, 16(17), 2549. https://doi.org/10.3390/w16172549.

Nourani V., A.H. Ghareh Tapeh, K. Khodkar and J.J. Huang. 2023. Assessing long-term climate change impact on spatiotemporal changes of groundwater level using autoregressive-based and ensemble machine learning models. Journal of Environmental Management, 336, 117653. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117653.

Rasmussen P., J. Kidmose, A.J. Kallesoe, P.B.E. Sandersen, R. Schneider, and T.O. Sonnenborg. 2023. Evaluation of adaptation measures to counteract rising groundwater levels in urban areas in response to climate change. Hydrogeology Journal, 31(1), 35–52. https://doi.org/10.1007/s10040-022-02573-7.

Ross A., 2018. Speeding the transition towards integrated groundwater and surface water management in Australia. Journal of Hydrology. 567:1–10.

Safavi H.R., M.H. Golmohammadi and S. Sandoval-Solis. 2016. Scenario analysis for integrated water resources planning and management under uncertainty in the Zayandehrud river basin. Journal of Hydrology 539:625–639.

Zhang X., A. Castelletti, X. Wang and P. Guo. 2024. Robust Stackelberg equilibrium water allocation patterns in shallow groundwater areas. Water Resources Research, 60(8), Article e2023WR035373. https://doi.org/10.1029/2023WR035373.