



Modeling and quantitative investigation of the groundwater condition of the South Mehyar-Dasht Asman aquifer using the MODFLOW model

Hossein Hosseinzade Kuhi ^{1*}, Mojtaba Ardestani ²

¹ M.Sc. Student, Department of Water Resources, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

² Professor, Department of Water Resources, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

Introduction

Today, fresh water sources are very important in human life. During the past years, population growth, development of industries, and agriculture have increased the need for water and subsequently increased the withdrawal from groundwater sources. This increase in withdrawal has occurred without considering the capacity of the aquifers. While logically, the exploitation of an aquifer should be limited to its dynamic storage, in most regions, the static reserves of aquifers have been used to a large extent, and it seems impossible to return these aquifers to their original state. The dynamic storage of the aquifer is actually a part of the storage volume of the aquifer, which has fluctuations, and by examining and determining these fluctuations, it is possible to estimate the permissible amount of exploitation of the aquifer. But the static storage of the aquifer, which is very important, is among the old and stable storage that has been stored for many years. The use of static aquifer storage causes events such as subsidence. The drying up and lack of water in many aqueducts, springs, and extraction wells across the country is one of the consequences of the overexploitation of groundwater resources. In the arid and semi-arid climates of Iran, factors such as climate change and water scarcity, along with overexploitation of water resources, especially groundwater resources, have caused the groundwater levels to decrease. In some areas, we are witnessing irreparable subsidence. In this regard, monitoring and controlling the condition of the aquifer using computer models is essential.

Materials and Methods

In the present study, the modeling and quantitative investigation of the groundwater condition of the South Mehyar-Dasht Asman aquifer in the Gavkhoni catchment area has been done by the MODFLOW 2005 model and groundwater modeling system (GMS 10.4.5) software. GMS software is one of the few with good performance and has been used in groundwater studies in many countries worldwide. This software simulates groundwater both quantitatively and qualitatively. The MODFLOW (Modular Ground Water Flow) model is used to simulate groundwater flow in aquifers with specific boundary conditions, assuming the necessary values for hydraulic conductivity and other aquifer parameters. The program allows the user to select only the modules needed to study the desired system for specific hydrogeological processes and activate or deactivate a particular part. These features have made the MODFLOW model the most efficient and accessible groundwater model today. For this purpose, the statistics and information from 15 years ending in 2013 of the Iran Water Resources Management Company and topographical information extracted from satellite data have been used to model the groundwater of the South Mehyar-Dasht Asman aquifer.

Results and Discussion

After running the model, the parameters of hydraulic conductivity, anisotropy, or HANI, RCH, SY, and parallel lines of the groundwater level were obtained. In the next stage, or the calibration stage, the model was calibrated by the parameters mentioned to minimize the difference between the observed water level and the calculated water level. In the sensitivity analysis stage, the calibrated value of the parameters is systematically changed to determine the model's sensitivity to the parameters. In this stage, it was found that the model received the most influence from the parameters of anisotropy and hydraulic conductivity. To validate the model and measure its accuracy, validation was done. The RMS error was 2.21, which is a good value, but for more certainty, the RMSE was also calculated, and its value was 23 %, which is very appropriate considering the long-term simulation period. Finally, the numbers extracted from the FlowBudget engine based on the calibrated MODFLOW model revealed that during the 12-month simulation period, a particular share of the aquifer's fixed

storage was reduced on a daily average basis, resulting in an average drop of 7.5 m in the aquifer's groundwater level during this period. We see that the most significant drop is related to the eastern part of the aquifer.

Conclusion

The coefficient of determination or R-squared correlation was 0.9971, which seems to be a good number compared to other studies. The results showed that the water withdrawal is greater than the aquifer's recharge, and a specific volume of the aquifer storage is always reduced during the simulation period, which caused a drop of 7.5 m in the groundwater level. The groundwater level of the South Mehyar-Dasht Asman aquifer continuously decreases from the western part to the eastern region, and the lowest groundwater level is related to the east part of this aquifer. Declining groundwater levels, water shortage conditions, and overexploitation, increase the risk of subsidence, which is an irreversible event. To prevent this from happening, the amount of water taken from the aquifer should be proportional to its capacity, and control and management measures should be carried out on a large scale. Computer models and up-to-date methods help to maintain and manage these water resources as well as possible. Factors such as the dryness of the Zayandehroud River, excessive harvesting, and lack of water have led to the aggravation of the adverse environmental effects of the Gavkhoni International Wetland, and this has increased the importance of simulating the existing aquifers in this basin. Since, no study has been done on the simulation of the groundwater of South Mehyar aquifer-Dasht Asman and also the duration of the simulation period is 15 years, this research can be a basis for future studies and provide the possibility of comparison with other studies.

Keywords: Calibration, Groundwater, South Mehyar aquifer, Water resources

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the University of Tehran for the financial and logistical supports who significantly contributed during the research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Hossein Hosseinzade Kuhi: Writing-original draft preparation, Resources, Software, Manuscript editing, Formal analysis and investigation, Conceptualization, methodology; **Mojtaba Ardestani:** Visualization, Supervision.

*Corresponding Author, E-mail: hosseinzade96@ut.ac.ir

Citation: Hosseinzade Kuhi, H., & Ardestani, M. (2024). Modeling and quantitative investigation of the groundwater condition of the South Mehyar-Dasht Asman aquifer by using the MODFLOW model. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(1), 1-17.

DOI: 10.22098/mmws.2022.11807.1172

DOR:

Received: 16 November 2022, Received in revised form: 28 December 2022, Accepted: 28 December 2022, Published online: 28 December 2022

Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 1, pp 1-17

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





مدل سازی و بررسی وضعیت کمی آب های زیرزمینی آبخوان مهیار جنوبی-دشت آسمان با استفاده از مدل MODFLOW

حسین حسین زاده کوهی^{۱*}، مجتبی اردستانی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه منابع آب، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۲ استاد، گروه منابع آب، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

در اقلیم خشک و نیمه خشک ایران عواملی مانند تغییر اقلیم و کم آبی در کنار برداشت بیش از ظرفیت منابع آبی به خصوص منابع آب زیرزمینی باعث شده سطوح آب زیرزمینی کاهش یابد و در برخی مناطق شاهد رخداد های غیر قابل جبرانی هم چون فرونشست باشیم. در نتیجه مدیریت و کنترل برداشت از منابع زیرزمینی قبل از وقوع بحران و رسیدن به سطح غیر قابل بازگشت لازم و ضروری است. در این راستا پایش و کنترل وضعیت آبخوان به وسیله مدل های رایانه ای از اهمیت بالایی برخوردار است. در پژوهش حاضر به مدل سازی و بررسی وضعیت کمی آب های زیرزمینی آبخوان مهیار جنوبی-دشت آسمان در حوزه آبریز گاوخونی به وسیله مدل عددی MODFLOW 2005 و نرم افزار GMS 10.4.5 پرداخته شده است. به همین منظور از آمار و اطلاعات ۱۵ ساله منتهی به سال ۱۳۹۰ شرکت مدیریت منابع آب ایران و نیز اطلاعات تراز ارتفاعی مستخرج از داده های ماهواره ای برای مدل سازی آب زیرزمینی آبخوان مهیار جنوبی-دشت آسمان استفاده شد. پارامترهایی چون هدایت هیدرولیکی، ناهمسانی افقی هدایت هیدرولیکی (Anisotropy)، تغذیه (RCH) و آب دهی ویژه (SY) پس از استخراج از مدل مورد واسنجی قرار گرفت. تحلیل حساسیت هر یک از پارامترها نشان داد که مدل عددی نسبت به پارامترهای ناهمسانی افقی هدایت هیدرولیکی و هدایت هیدرولیکی بیشترین تأثیر پذیری را دارد. برای تأمین اعتبار مدل و سنجش دقت آن صحت سنجی صورت گرفت. با توجه به ۱۲۵ ماهه بودن بازه مطالعاتی، صحت سنجی برای ۲۵ درصد انتهایی دوره (۱۳۹۰-۱۳۸۶) انجام شد که خطای اندک در مرحله صحت سنجی مؤید دقت در واسنجی و صحت آبنمود سلول های شبکه ریاضی بود. در نهایت اعداد استخراجی از موتور FlowBudget سوار بر مدل واسنجی شده MODFLOW نشان داد که در دوره ۱۲۵ ماهه شبیه سازی به شکل متوسط روزانه سهم مشخصی از ذخیره ثابت آبخوان کاسته شده است؛ به طوری که متوسط ۷/۵ متر افت تراز آب زیرزمینی طی این دوره در آبخوان مشاهده شد و بیشترین افت مربوط به قسمت شرقی آبخوان بوده است.

واژه های کلیدی: آب زیرزمینی، آبخوان مهیار جنوبی، منابع آب، واسنجی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hosseinzade96@ut.ac.ir

استناد: حسین زاده کوهی، حسین، و اردستانی، مجتبی (۱۴۰۳). مدل سازی و بررسی وضعیت کمی آب های زیرزمینی آبخوان مهیار جنوبی-دشت آسمان با استفاده از مدل MODFLOW. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۱)، ۱-۱۷.
DOI: 10.22098/mmws.2022.11807.1172
DOR:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۲۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۱، صفحه ۱ تا ۱۷

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

طی سال‌های گذشته رشد جمعیت، توسعه صنایع و کشاورزی افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی را به همراه داشته است. افزایش برداشت صورت گرفته در اکثر محدوده‌های مطالعاتی کشور بدون در نظر گرفتن توان آب‌دهی آبخوان‌ها بوده است، درحالی‌که به‌صورت منطقی بهره‌برداری از یک آبخوان باید در حد ذخیره دینامیک آن صورت گیرد. در اکثر مناطق به میزان زیاد از ذخایر استاتیک آبخوان‌ها برداشت شده است که بازگشت چنین آبخوان‌هایی به حالت اولیه خود، امری غیرممکن به نظر می‌رسد. ذخیره دینامیک آبخوان در واقع قسمتی از حجم ذخیره آبخوان بوده که دارای نوساناتی است و با بررسی و تعیین این نوسانات می‌توان میزان مجاز بهره‌برداری از آبخوان را برآورد نمود. ذخایر استاتیک آبخوان نیز در حقیقت ذخایری هستند که طی سالیان متمادی ذخیره شده‌اند و متضمن حفظ و بقای منابع آب زیرزمینی هستند (Nair, 2022). در سال‌های اخیر نیز نه تنها برداشت از منابع کاسته نشده، بلکه به‌صورت روزافزون نیاز به منابع آب تشدید یافته و به‌تبع برداشت از این منابع نیز افزایش یافته است. خشک شدن و کم‌آبی بسیاری از قنات، چشمه‌ها و کاهش دبی و خشکی چاه‌های بهره‌برداری در اکثر نقاط کشور از جمله عواقب برداشت بیش از اندازه منابع آب است. برداشت بیش از اندازه و افت شدید سطح آب و در نتیجه نشست سطح زمین به حدی بوده که در برخی مناطق کشور به بحرانی جدی تبدیل شده است (Iran Water Resources Management Company, 2015). هدف از مدیریت آب‌های زیرزمینی در یک آبخوان، استفاده حداکثری از آن برای رفع نیازهای استفاده‌کنندگان در منطقه است. نحوه مدیریت باید به‌گونه‌ای باشد که از اثرات مخرب ناشی از اضافه برداشت، فرونشست زمین و نامناسب شدن کیفیت آب بر اثر استحصال بیش از اندازه در حال و آینده جلوگیری نماید (Donyaii et al., 2021). در مطالعات هیدروژئولوژی همواره از مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی به‌منظور پیش‌بینی رفتار آب‌های زیرزمینی استفاده شده و این استفاده از مدل‌ها و شبیه‌سازی‌های آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از راه‌های نظارت، کنترل و اعمال مدیریت منابع آب به شمار می‌رود (Gorgani et al., 2017).

یکی از نرم‌افزارهایی که در مطالعات آب زیرزمینی در بسیاری از کشورهای جهان مورد استفاده قرار گرفته است و کارایی مناسبی دارد، نرم‌افزار^۱ GMS10.4.5 است که عمدتاً از طریق استفاده از روش‌های عددی تفاضل محدود و اجزای محدود به شبیه‌سازی کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی می‌پردازد. از معایب این نرم‌افزار و سایر

نرم‌افزارهای مشابه، عدم انعطاف‌پذیری در ارتباط با برنامه‌های اجرایی نظیر مدل‌های عدم قطعیت و بهینه‌سازی است که ضرورت این مورد در بسیاری از مسائل مدل‌سازی همانند مدیریت آبخوان و بهینه‌سازی کمی و کیفی بهره‌برداری از آن اجتناب‌ناپذیر است (Donyaii and Sarraf, 2021). پژوهش‌گران مختلفی در سرتاسر دنیا از این نرم‌افزار به‌منظور بررسی وضعیت کمی آب زیرزمینی و شبیه‌سازی آن استفاده نموده‌اند. به‌عنوان مثال در پژوهشی که توسط Edalat et al. (2021) صورت گرفته است، مدل‌سازی عددی آب‌های زیرزمینی دشت علی‌آباد قم با به‌کارگیری نرم‌افزار GMS بین سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ انجام شد. اعتبارسنجی مدل و تغییرات سطح آب زیرزمینی پیش‌بینی شده توسط مدل با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های پیرومتریک مقایسه و خطای RMSE، ۱/۴ متر تعیین شد. همچنین، ضریب همبستگی با مقایسه آب‌نمود تغییرات تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و پیش‌بینی شده، ۰/۹۹۵ به‌دست آمد. همچنین، Najafi et al. (2022) آب زیرزمینی آبخوان ساحلی نکا را با استفاده از مدل MODFLOW^۲ هم در دوره پایه (از مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۳) و هم در شرایط تغییر اقلیم (۲۰۲۱-۲۰۴۰) شبیه‌سازی و مقایسه کردند. ضریب تبیین پس از واسنجی مدل در حالت پایه و شرایط غیرماندگار، ۰/۹۸ به‌دست آمد. در پژوهشی Raeisi Dehkordi and Yeganeh Mahzar (2022) با بهره‌گیری از نرم‌افزار GMS به شبیه‌سازی جریان و آلودگی آب زیرزمینی دشت دامنه‌داران پرداختند. واسنجی مدل بر اساس بهینه‌سازی دو پارامتر آب‌دهی ویژه و ضریب هدایت هیدرولیکی انجام گرفت. در ادامه دو سناریو برای پیش‌بینی نوسان آب زیرزمینی و بررسی عملکرد دو پارامتر بهینه شده تعریف شد. نتایج حاکی از عملکرد مناسب بهینه‌ساز هست به‌طوری‌که با دقت مناسبی شرایط فیزیکی آبخوان شبیه‌سازی شده است. همچنین، نتایج مدل انتقال نشان داد که در آبخوان دامنه فقط یک هاله آلودگی در حال شکل‌گیری و با سرعت تقریبی ۱۵ متر در روز در حال گسترش در کل آبخوان است. در مطالعه Sheikha BagemGhaleh et al. (2022) برای بررسی آب زیرزمینی آبخوان مهاباد طی دوره دوساله (۱۳۹۱-۱۳۸۹) مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. از کد MODFLOW و نرم‌افزار GMS برای این شبیه‌سازی استفاده شد و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برابر ۰/۸۸ متر، میانگین خطای مطلق (MAE) برابر ۰/۷۲ متر و ضریب تعیین (R^2) ۰/۹۹ به‌دست آمد. آزمون من-کندال نشان داد که آبخوان مهاباد وضعیت نامناسبی دارد، به‌طوری‌که از ۱۹ چاه مورد بررسی، ۱۸ چاه کاهش تراز آب شده بودند.

² Modular ground water flow

¹ Groundwater modeling system

داد که ذخیره آب زیرزمینی روند کاهشی داشته و بیش‌ترین افت در بین سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ با افت تقریبی ۴۰۰ میلیون مترمکعب است. با توجه به اهمیت حوضه آبریز مهبیار جنوبی، هدف اصلی این پژوهش بررسی وضعیت کمی آبخوان با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

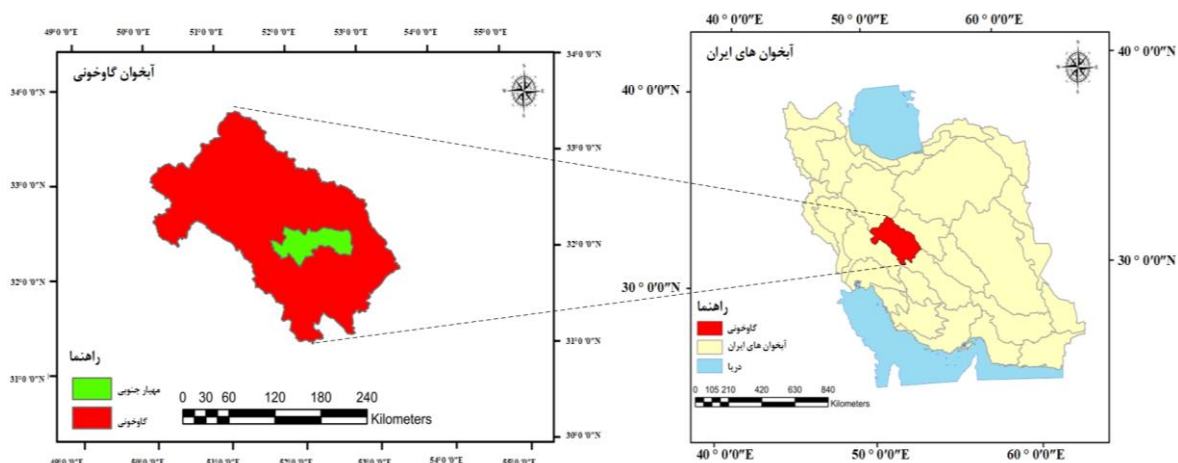
حوزه آبریز درجه دو گاوخونی با مساحت ۴۱۵۵۲/۳ کیلومتر مربع یکی از زیرحوضه‌های ۳۰ گانه درجه دو ایران است. حدود جغرافیایی آن از شمال به حوزه دریاچه نمک، از غرب به حوزه آبریز کارون بزرگ، از شرق به زیرحوضه آبریز کویر سیاه‌کوه و از جنوب به زیرحوضه آبریز کویر سیرجان و مهارلو محصور می‌شود و بین ۱۰' ۳۳° تا ۴۰' ۳۳° عرض شمالی و ۳۰' ۵۰° تا ۲۳' ۵۲° طول شرقی قرار دارد. عواملی چون خشکی زاینده‌رود، برداشت بی‌رویه و وجود کم‌آبی منجر به تشدید آثار نامطلوب محیط زیستی تالاب بین‌المللی گاوخونی شده و همین امر، اهمیت پرداختن به شبیه‌سازی آبخوان‌های موجود در این حوزه آبریز را بالا برده است. در این راستا آبخوان مهبیار جنوبی-دشت آسمان به‌عنوان محدوده مطالعاتی انتخاب شد. محدوده مطالعاتی مهبیار جنوبی-دشت آسمان به همراه ۲۰ محدوده دیگر، حوزه آبریز گاوخونی را شکل می‌دهند که موقعیت آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

مهبیار جنوبی-دشت آسمان با وسعت ۲۵۵۹/۵ کیلومتر مربع در قسمت جنوب شرق حوزه آبریز گاوخونی واقع شده است. ۲۰۷۹/۵ کیلومتر مربع از وسعت محدوده را دشت و ۴۸۰ کیلومتر مربع از وسعت را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. حداقل ارتفاع محدوده (۱۴۷۰ متر) مربوط به بخش شرقی که در مجاورت باتلاق گاوخونی و حداکثر ارتفاع (۲۴۲۸ متر) از سطح دریا، مربوط به قسمت‌های جنوبی است. مساحت دشت در محدوده مطالعاتی مهبیار جنوبی-دشت آسمان برابر با ۲۰۷۹/۵ کیلومتر مربع است و در ۸۷ درصد از مساحت آن آبخوان آبرفتی (۱۷۹۹/۱ کیلومتر مربع) گسترش یافته است. عمده گسترش ارتفاعات در قسمت غربی بوده و مساحتی بالغ بر ۴۸۰ کیلومتر مربع را شامل می‌شود (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۴). در محدوده مطالعاتی مهبیار جنوبی-دشت آسمان هشت حلقه چاه اکتشافی حفر شده در آبخوان آبرفتی مورد آزمایش پمپاژ قرار گرفته است. مقدار بیشینه ضریب قابلیت انتقال با ۱۲۰۰ مترمربع در روز مربوط به چاه اکتشافی منطقه صنعتی رنگ‌سازی است. این آزمایش‌ها در قسمت غربی آبخوان انجام شده و در قسمت‌های شرقی آبخوان آزمایشی انجام نشده است. علی‌رغم این موضوع با توجه به وجود چاه اکتشافی خارا در محدوده

(Taheri and Kamali 2017) دشت توپسرکان را توسط مدل MODFLOW تحت دو سناریوی ده ساله مدل‌سازی کردند که در سناریوی اول ادامه روند فعلی برداشت و در سناریوی دوم افزایش بازده آبیاری منطقه مورد مطالعه به میزان ۲۰ درصد و کاهش برداشت‌ها مد نظر قرار گرفت که در هر دو سناریو کاهش سطح ایستابی در سطح دشت قابل مشاهده بود. در ادامه، Pourhaghi et al. (2015) پس از شبیه‌سازی آبخوان دشت دلفان لرستان به‌وسیله نرم‌افزار GMS و مدل MODFLOW به این نتیجه رسیدند که با کاهش ۲۰ درصدی آب‌دهی چاه‌های بهره‌برداری می‌توان افت سطح آب زیرزمینی را طی ۱۰ سال آینده به‌طور چشم‌گیری جبران نمود. در سایر پژوهش‌ها مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی آبخوان دشت نمدان استان فارس توسط Saghi-Jadid and Ketabchi (2019) با استفاده از مدل MODFLOW و الگوریتم بهینه‌سازی فراکاوای مورچه‌ها صورت گرفته است. در این پژوهش ابتدا وضعیت آبخوان در دو حالت ماندگار و غیرماندگار برای یک دوره هفت‌ساله از سال ۱۳۹۱ تا ۱۳۸۵ واسنجی شد و در بازه زمانی ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۵ مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. سپس در قسمت پیش‌بینی وضعیت آبی، تأثیر سه شاخص احیاء، پایداری و پرشدگی در راستای طرح احیاء و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی کشور محاسبه شد. نتایج آن‌ها نشان داد که تحت اعمال شاخص احیاء بهترین نتیجه به‌دست آمده است و در این سناریو، سطح تراز آب زیرزمینی ۱۰/۶ متر افزایش یافته است. در پژوهشی (Abdelhalim et al. 2019) اثر افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی شهر مینیا کشور مصر را با استفاده از مدل MODFLOW در دوره زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۳ مورد بررسی قرار داده و پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آب‌دهی ویژه سناریوهای مورد نظر را واسنجی کردند. نتایج حاصل از بررسی سناریوها نشان دادند که ۲۵ تا ۵۰ درصد افزایش برداشت از آب زیرزمینی در مقایسه با شرایط فعلی، موجب کاهش ۱۰/۹ تا ۳۸/۹ هزار مترمکعبی ذخیره آبخوان می‌شود. مطالعه صورت گرفته بر دشت تهران توسط (Ranjbar and Ehteshami 2019) نشان داد برداشت بیش‌از حد منابع آب زیرزمینی در سال‌های اخیر باعث تخریب سازند آبرفتی در سطح وسیع شده است. هدف از این مطالعه، استفاده از توانایی مدل عددی و الگوریتم‌های داده‌محور برای پیش‌بینی قوی و سریع فرونشست زمین بود. به این ترتیب از مدل کامپیوتری MODFLOW برای تعیین تأثیر نوسانات آب زیرزمینی بر میزان فرونشست از طریق حوضه تهران استفاده شد. در این راستا، (Ahmadi 2017) با استفاده از مدل شبیه‌ساز WEAP، مصارف و منابع آب دشت قزوین را در یک بازه ۱۰ ساله بررسی کرد. نتایج حاصل از سناریوی مرجع نشان

به سمت شرق، امکان درون یابی این ضرایب وجود دارد (Iran Water Resources Management Company, 2015). موقعیت محدوده آبخوان گاوخونی نسبت به سایر آبخوان های ایران و موقعیت محدوده مطالعاتی مهیار جنوبی-دشت آسمان در آبخوان گاوخونی در شکل ۱ ارائه شده است.

مطالعاتی اسفنداران که در نزدیکی مرز محدوده مورد نظر است و نیز ارتباط این دو آبخوان در این ناحیه امکان استفاده از نتایج این آزمایش برای تعیین ضرایب هیدرودینامیک آبخوان مهیار جنوبی-دشت آسمان وجود دارد. با توجه به تغییرات کم ارقام ضرایب هیدرودینامیک چاه ها به خصوص از نواحی مرکزی دشت



شکل ۱- موقعیت محدوده آبخوان گاوخونی (سمت راست) و موقعیت محدوده مطالعاتی مهیار جنوبی-دشت آسمان (سمت چپ)

Figure 1- Location of Gavkhoni aquifer boundary (right side) and South Mehyar-Dasht Asman study boundary location (left side)

آبرفتی $3/2$ میلیون مترمکعب و از سه دهانه چشمه، $4/9$ میلیون مترمکعب آب زیرزمینی تخلیه می شود. بیشترین اعماق سطح آب زیرزمینی آبخوان مهیار جنوبی-دشت آسمان در نیمه غربی آبخوان وجود دارد و در یک روند کلی از غرب به شرق از عمق سطح آب کاسته می شود. بیشترین و کمترین عمق سطح آب به ترتیب در حوالی روستای پرزان برابر با 130 متر و در مجاورت باتلاق گاوخونی برابر با یک متر وجود دارد.

در محدوده غربی دشت که در گذشته جزء جبهه های اصلی تغذیه دشت بوده برای جریان آب زیرزمینی به سمت ارتفاعات معکوس شده است که این روند غیرطبیعی در جهت جریان آب زیرزمینی، می تواند به علت چاه های عمیق حفر شده در حاشیه ارتفاعات این ناحیه در سال های اخیر باشد. در حوالی پرزان و حیدرآباد و سهراهی محمدآباد مخروط آفت تشکیل شده است. مخروط آفت ایجاد شده در سهراهی محمدآباد به گونه ای است که موجب معکوس شدن جهت جریان آب زیرزمینی به این سمت در محدوده شده و رژیم طبیعی حرکت آب زیرزمینی به سمت باتلاق را به کلی برهم زده است. دلایل اصلی تغییرات به وجود آمده برای جریان آب زیرزمینی در آبخوان مهیار جنوبی-دشت آسمان را می توان خشکسالی، برداشت بی رویه از آبخوان، کاهش ضریب ذخیره آبخوان با افزایش عمق و عدم انتقال آب زاینده رود توسط کانال های آبرسانی دانست. رقوم حداکثر منحنی های تراز آبخوان برابر با 1680 متر در مجاورت آبخوان قمشه (جنوب غربی

۲-۲- جمع آوری اطلاعات

در پژوهش حاضر از آمار و اطلاعات متوسط (دوره ۴۵ ساله تا سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۸۹) هواشناسی و آب سطحی، تغییرات طولانی مدت (۱۵ ساله منتهی به سال ۱۳۹۰) سطح آب زیرزمینی و میزان تخلیه آب زیرزمینی منطبق بر آماربرداری شرکت مدیریت منابع آب ایران برای مدل سازی آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی مهیار جنوبی-دشت آسمان استفاده شده است. بر اساس همین مطالعات تنها ورودی آب سطحی به محدوده مطالعاتی مهیار جنوبی-دشت آسمان از طریق محدوده قمشه به میزان $13/5$ میلیون مترمکعب است. این محدوده به دلیل بارش کم و شیب ناچیز، فاقد جریان سطحی قابل توجه است و حتی بخشی از رواناب ورودی از محدوده قمشه نیز در این محدوده از طریق نفوذ یا تبخیر تلف می شود.

در محدوده آبخوان مهیار جنوبی-دشت آسمان تعداد ۴۲۳ حلقه چاه بهره برداری با تخلیه $78/6$ میلیون مترمکعب، هشت رشته قنات با تخلیه $3/3$ میلیون مترمکعب و سه دهانه چشمه با تخلیه $4/9$ میلیون مترمکعب موجود است. منابع ذکر شده همگی جز یک مورد در دشت واقع شده و تنها یک حلقه چاه در ارتفاعات وجود دارد که موجب تخلیه دو میلیون مترمکعب آب زیرزمینی از ارتفاعات می شود. 417 حلقه چاه بهره برداری در آبخوان آبرفتی حفر شده و $77/3$ میلیون مترمکعب آب توسط آن ها برداشت می شود. از هفت رشته قنات موجود در آبخوان

نظر گرفته شده است، میزان جریان سطحی خروجی و زیرزمینی خروجی از محدوده نیز به ترتیب ۱۲/۹ و ۴/۴ میلیون مترمکعب است. تبخیر از آب زیرزمینی نیز ۶ میلیون مترمکعب برآورد شده است. نهایتاً تفاضل بین ورودی‌ها و خروجی‌ها در محدوده مطالعاتی مهیار جنوبی طی سال‌های آبی ۱۳۷۶-۱۳۷۵ تا ۱۳۹۰-۱۳۸۹ برابر ۳۳/۸- میلیون مترمکعب برآورد شده است که این میزان مربوط به بهره‌برداری بیش‌تر از میزان تغذیه آب زیرزمینی از آبخوان است. در آخرین سال آبی دوره شبیه‌سازی یا به عبارتی سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۰ میزان کل مصارف کشاورزی، شرب و صنعت در محدوده مطالعاتی مهیار جنوبی برابر با ۹۳/۲ میلیون مترمکعب بوده که ۷۸/۶ میلیون مترمکعب از آن توسط تخلیه از چاه‌های بهره‌برداری، ۶/۱ میلیون مترمکعب توسط چشمه و قنات و مابقی از آب سطحی تأمین شده است. در ادامه تراز متوسط آب زیرزمینی در آبخوان مهیار جنوبی- دشت آسمان در جدول ۱ و شکل ۲ ارائه شده است.

تراز متوسط آب زیرزمینی همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، روندی نزولی را در ۱۵ سال آبی منتهی به سال ۹۰ طی کرده است. این افت تراز سطح آب زیرزمینی چیزی حدود ۷/۵ متر است که نتیجه بیشینه برداشت آب زیرزمینی از آبخوان مهیار جنوبی- دشت آسمان به شمار رفته و فرونشست و ترک‌های بزرگ ناشی از آن را در این منطقه مشاهده شد.

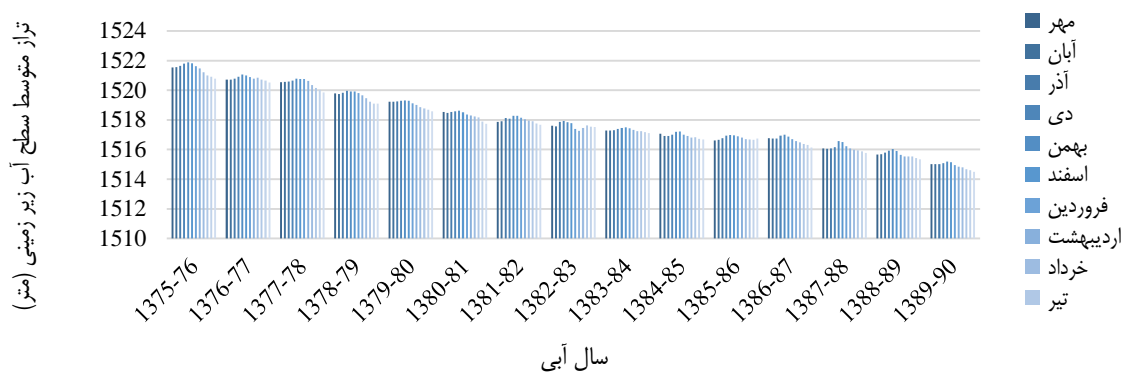
آبخوان) و رقوم حداقل برابر با ۱۴۶۰ متر از سطح دریا مربوط به انتهای آبخوان در مجاورت باتلاق گاوخونی است. از قسمت‌های شرقی حوزه آبریز و حواشی به سمت مرکز و محل خروجی (انتهای شرقی آبخوان) گرادیان هیدرولیکی کاهش می‌یابد. این آبخوان در مناطق غربی از طریق آبخوان قمشه و از ارتفاعات نواحی جنوبی و شمالی تغذیه شده و در انتهای آبخوان در شرق و در مجاورت باتلاق گاوخونی به این باتلاق تخلیه می‌شود.

آبخوان آبرفتی مهیار جنوبی-دشت آسمان در دوره شبیه‌سازی از نظر بررسی افت به دو بخش غربی و شرقی قابل تقسیم است. عمده افت این آبخوان در بخش غربی بوده و از سه تا ۲۹ متر تغییر می‌کند، اما در بخش شرقی این روند افت از پنج تا صفر متر (در نزدیکی باتلاق گاوخونی) تغییر می‌کند. بیش‌ترین میزان افت طی ۱۵ ساله منتهی به سال ۹۰ در حوالی چاه‌های مشاهده‌ای چغاسیاه و شمال آجر تاکی که در حاشیه ارتفاعات غربی آبخوان قرار دارند و حوالی چاه مشاهده‌ای شمال پوزان ثبت شده است. حجم کل بارش در محدوده مهیار جنوبی برابر با ۲/۲۶۲ میلیون مترمکعب است که از این مقدار، تنها ۳۱/۵ میلیون مترمکعب بر سال تبدیل به بارش مفید می‌شود و مابقی توسط تبخیر از دسترس خارج می‌شود. جریان سطحی ورودی و انتقالی و جریان زیرزمینی ورودی به محدوده نیز به ترتیب برابر ۲۱/۹ و ۵/۹ میلیون مترمکعب است. میزان کل مصرف در محدوده ۹۳/۵ میلیون مترمکعب است که از این میزان ۶۹/۷ میلیون مترمکعب به‌عنوان مصرف خالص و مابقی به‌عنوان آب برگشتی در

جدول ۱- تراز متوسط آب زیرزمینی در آبخوان مهیار جنوبی- دشت آسمان (متر) (Iran Water Resources Management Company, 2015)

Table 1- Average level of groundwater in the South Mehيار-Dasht Asman aquifer (m) (Iran Water Resources Management Company, 2015)

شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	سال آبی
1520.79	1520.92	1521.01	1521.21	1521.48	1521.63	1521.83	1521.88	1521.81	1521.64	1521.56	1521.55	75-76
1520.53	1520.65	1520.72	1520.86	1520.79	1520.9	1521.01	1521.07	1520.91	1520.79	1520.73	1520.72	76-77
1519.86	1520.03	1520.16	1520.35	1520.64	1520.77	1520.77	1520.79	1520.66	1520.59	1520.56	1520.55	77-78
1519.11	1519.11	1519.23	1519.46	1519.67	1519.82	1519.93	1519.92	1519.97	1519.83	1519.75	1519.8	78-79
1518.59	1518.68	1518.77	1518.87	1519.02	1519.12	1519.29	1519.31	1519.29	1519.24	1519.22	1519.22	79-80
1517.74	1517.89	1518.18	1518.23	1518.3	1518.37	1518.51	1518.62	1518.59	1518.53	1518.48	1518.53	80-81
1517.67	1517.76	1517.91	1517.95	1518.04	1518.14	1518.27	1518.28	1518.08	1518.13	1517.91	1517.87	81-82
1517.53	1517.55	1517.63	1517.46	1517.26	1517.4	1517.79	1517.84	1517.93	1517.87	1517.56	1517.61	82-83
1517.11	1517.17	1517.24	1517.25	1517.33	1517.44	1517.5	1517.46	1517.4	1517.3	1517.28	1517.29	83-84
1516.67	1516.73	1516.83	1516.81	1516.92	1517	1517.21	1517.19	1517.01	1516.92	1516.91	1517.06	84-85
1516.75	1516.66	1516.68	1516.71	1516.81	1516.89	1516.97	1516.99	1516.94	1516.77	1516.65	1516.62	85-86
1516.14	1516.32	1516.38	1516.48	1516.58	1516.7	1516.87	1517.01	1516.94	1516.74	1516.75	1516.77	86-87
1515.77	1515.88	1515.95	1515.99	1516.08	1516.23	1516.51	1516.57	1516.16	1516.07	1516.05	1516.07	87-88
1515.34	1515.42	1515.53	1515.54	1515.54	1515.65	1515.91	1516.03	1515.93	1515.8	1515.69	1515.66	88-89
1514.5	1514.61	1514.68	1514.79	1514.84	1514.96	1515.14	1515.18	1515.08	1515.02	1515.01	1515.01	89-90



شکل ۲- مقایسه تراز متوسط آب زیرزمینی در آبخوان مورد مطالعه (Iran Water Resources Management Company, 2015)

Figure 2- Comparison of the average level of groundwater in the study aquifer (Iran Water Resources Management Company, 2015)

2007). این مدل در واقع حل تفاضل محدود برای معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر جریان آب زیرزمینی است. مدل MODFLOW به منظور شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در سفره‌هایی با شرایط مرزی مشخص و با فرض مقادیر لازم جهت هدایت هیدرولیکی و دیگر پارامترهای سفره کاربرد دارد (Hoaglund et al., 2002). برنامه موردنظر به زبان فورترا ۷۷ است و بر روی بسیاری از رایانه‌ها قابل اجراست. طراحی قطعه‌های برنامه این توانایی را به کاربر می‌دهد که برای فرآیندهای خاص هیدروژئولوژیکی، فقط ماژول‌هایی که برای مطالعه سیستم مورد نظر نیاز دارد، انتخاب نماید و قطعه خاصی را فعال یا غیرفعال کند. این ویژگی‌ها باعث شده است که مدل MODFLOW امروزه به عنوان کارآمدترین و قابل دسترس‌ترین مدل آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. وجود بسته‌های مختلف در این مدل سبب شده که از آن، به منظور مطالعه انواع آبخوان‌ها استفاده شود.

۲-۴- واسنجی

واسنجی مدل به این معنی است که اختلاف سطح آب مشاهداتی و محاسباتی به حداقل خود در حد شرایط معقول و واقع منطقه برسد. یعنی برای کاهش این اختلاف نباید از آمار و شرایط غیرواقع آبخوان استفاده کرد، بلکه باید با تغییرات جزئی و در حد اندازه این عوامل باعث واسنجی مدل شد. دو عامل حاکم و مؤثر بر روند تغییرات سطح آب در آبخوان تغییرات ضریب هدایت هیدرولیکی و تغذیه از سطح است؛ به سبب نبود مطالعات اکتشافی، الزام به واسنجی پارامترهای ناهمسان‌گردی افقی هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره، قابلیت انتقال در شبکه آبراه‌ای و قابلیت انتقال در مرزهای پویا نیز وجود داشت. در آبخوان‌های آزاد شرایط حاکم اساساً شرایط غیرماندگار است که باید واسنجی مدل در این شرایط صورت گیرد.

۲-۵- واسنجی و تحلیل حساسیت

۲-۳- مدل GMS

یکی از پیشرفته‌ترین و کامل‌ترین بسته‌های مدل‌سازی آب زیرزمینی، GMS است که انواع مختلف مدل‌های عددی را پشتیبانی می‌کند. GMS برای هر یک از مراحل شبیه‌سازی آب زیرزمینی شامل توصیف منطقه مورد مطالعه، تهیه مدل مفهومی، ایجاد شبکه، زمین‌آمار، واسنجی، مجسم‌سازی و غیره ابزار مناسب را فراهم می‌آورد. GMS هم از مدل تفاضل محدود و هم از مدل عناصر محدود پشتیبانی می‌کند (König and Weiss, 2009). در واقع GMS شامل یک رابط کاربری و تعدادی کدهای تحلیلی نظیر MODFLOW، MODPATH، MT3DMS، FEMWATER، MODAEM و غیره است. رابط کاربری GMS توسط آزمایشگاه پژوهش مدل‌سازی محیط زیست از دانشگاه بیرگام یانگ با مشارکت مؤسسه تحقیقاتی مهندسی آب ارتش آمریکا تهیه شده است. این نرم‌افزار به صورت تجاری در دسترس است.

از نکات جالب نرم‌افزار GMS، طراحی به صورت ماژول است که این توانایی را به کاربر می‌دهد که به دلخواه ماژول‌ها را انتخاب کرده و فقط قابلیت‌هایی را که برای مدل‌سازی آب زیرزمینی مورد نیاز است، انتخاب نماید. در نتیجه می‌توان قسمت‌های مورد نیاز برنامه را جداگانه تهیه نمود.

از جمله کدهایی که کاربرد گسترده‌ای داشته و از مقبولیت بالایی نزد هیدروژئولوژیست‌ها برخوردار بوده و در این پژوهش از آن برای حل معادلات جریان آب زیرزمینی در آبخوان مهیار جنوبی-دشت آسمان استفاده شده است، کد رایانه‌ای MODFLOW است. MODFLOW مخفف Modular Ground Water Flow است. این ماژول‌ها به صورت بسته گروه‌بندی شده‌اند که هر بسته در ارتباط با قسمتی از سیستم هیدروژئولوژیکی به کار گرفته می‌شود. تقسیم برنامه به تعدادی برنامه‌های فرعی باعث می‌شود که استفاده‌کننده به راحتی بتواند مؤلفه‌های مختلف هیدروژئولوژیکی را شبیه‌سازی نماید (Kresic, 2007).

بنابراین، مقادیر اخیر در قالب مدل مفهومی به مدل شبیه‌ساز در فرم پایدار معرفی شد. در مرحله دوم واسنجی فرم پایدار این مقادیر در قالب نقاط پایلوت به مدل معرفی و مقادیر بهینه به دست آمد. در نهایت فایل رستری در دوره بلندمدت ۱۲۵ ماهه واسنجی، برای پارامتر مذکور با میان‌یابی IDW نقاط پایلوت (شکل ۳)، به دست آمد و مقادیر هدایت هیدرولیکی در آن بین ۰/۳۷-۱۲۹/۹۲ و با میانگین ۲۵/۶۸، میان ۱۸/۷۲ و انحراف معیار ۲۱/۴۲ متغیر است (متر در روز).

با توجه به این که در مدل MODFLOW آن چه به عنوان هدایت هیدرولیکی شناخته می‌شود، معادل هدایت هیدرولیکی افقی است و نه مقدار کل این ضریب، پس مقدار حداکثر هدایت هیدرولیکی به دست آمده در مرحله واسنجی قابل قبول بوده و آن چنان که دانسته می‌شود، مقدار هدایت هیدرولیکی افقی می‌تواند چندین برابر هدایت هیدرولیکی کل و عمودی باشد.

مقدار ناهمسانی افقی هدایت هیدرولیکی (Anisotropy) یا HANI در مرحله اول با توجه به نبود محاسبات صحرایی و آزمایشگاهی دقیق، به تمام سلول‌ها به مقدار یک معرفی شد. در مرحله دوم یا مرحله واسنجی فرم پایدار همین مقادیر به عنوان مقادیر اولیه تحت نقاط پایلوت به مدل وارد و مقادیر بهینه در این مرحله حاصل شد. در نهایت فایل رستری در دوره بلندمدت ۱۲۵ ماهه واسنجی، برای پارامتر مذکور با میان‌یابی IDW نقاط پایلوت، حاصل شد (شکل ۴). مقادیر ناهمسانی افقی هدایت هیدرولیکی یا Anisotropy آن بین ۰/۰۰۸۹ و ۹/۸۸۵ با میانگین ۲/۱۹۱، میان ۱/۱۲۶ انحراف معیار ۲/۳ متغیر است.

با استفاده از اطلاعات موجود از بیلان آبی منطقه مقدار تغذیه یا RCH محاسبه و با استفاده از زون‌بندی (یک زون کلی) با اعداد برابر به حوزه آبریز اطلاق شد. در این مرحله مقادیر به دست آمده در قالب مدل مفهومی به شبیه‌سازی در فرم پایدار معرفی شد. سپس در مرحله واسنجی فرم پایدار، همین مقدار با پایلوت‌دهی مشابه با پلیگون هدایت هیدرولیکی به مدل وارد و مقادیر بهینه پارامتر در این مرحله حاصل شد. در نهایت در دوره واسنجی بلندمدت ۱۲۵ ماهه، برای پارامتر مذکور، فایل رستری حاصل شد (شکل ۵) که در آن اعداد بین ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۰۶ با میانگین ۰/۰۰۰۲، میان ۰/۰۰۰۱ و انحراف معیار ۰/۰۰۰۲ متغیر است (متر در روز در متر).

تحلیل حساسیت در واقع به معنی مشخص نمودن حساسیت مدل نسبت به پارامترهای متفاوتی است که به آن اعمال شده است. در میان تحلیل حساسیت مقادیر واسنجی شده هدایت هیدرولیکی و پارامترهای ثابت در مراحل واسنجی به صورت سیستماتیک تغییر داده می‌شود. بزرگی تغییرات بار هیدرولیکی نسبت به مقادیر بار هیدرولیکی واسنجی شده، معیار حساسیت حل مسأله نسبت به آن پارامتر خاص است. در این بین عواملی که عکس‌العمل مدل به تغییرات آن‌ها بیش‌تر بوده، یا به عبارتی مدل نسبت به آن‌ها حساسیت بیش‌تری نشان می‌دهد، از اهمیت بیش‌تری برخوردار است.

۲-۶- صحت‌سنجی

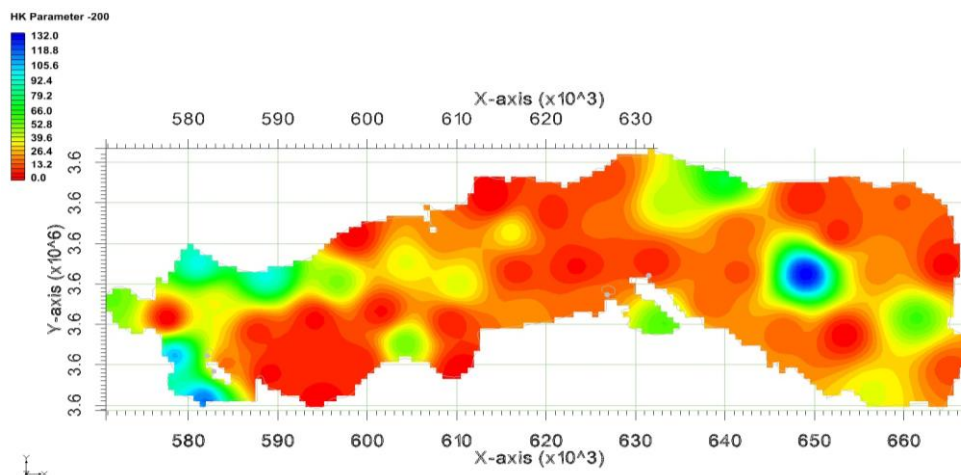
هدف از تعیین صحت مدل، ایجاد اطمینان بیش‌تر در مدل با استفاده از مجموعه مقادیر پارامترهای واسنجی شده و لایه‌های اطلاعاتی دوره دیگر است. اگر پارامترهای مدل واسنجی شده نظیر شرایط مرزی، تنش‌ها و توزیع خصوصیات هیدروژئولوژیکی (نفوذپذیری، قابلیت انتقال، تخلخل مؤثر) صحیح باشند، مجموعه داده‌های مستقل صحرایی باید به‌طور نزدیک شرایط مرزی و تنش‌های جدید مدل را برازش کنند. اگر مدل اجرا شده با شرایط تغییر یافته مذکور توزیع بار هیدرولیکی را ایجاد کند که به‌طور نزدیک با مجموعه داده‌های مذکور سازگار باشد، مدل صحت‌سنجی شده است (Kresic, 2007).

۳- نتایج و بحث

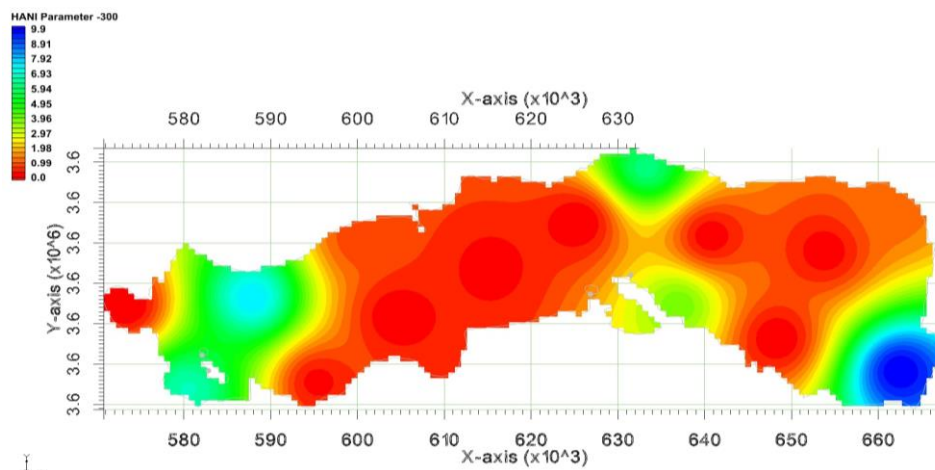
۳-۱- مدل‌سازی

همان‌طور که اشاره شد مدل‌سازی آبخوان مهیار جنوبی-دشت آسمان توسط نرم‌افزار GMS10.4.5 و کد MODFLOW نسخه 2005 با استفاده از آمار و اطلاعات شرکت مدیریت منابع آب ایران و نیز اطلاعات مربوط به تراز ارتفاعی سطح زمین (www.earthexplorer.usgs.gov) صورت پذیرفت.

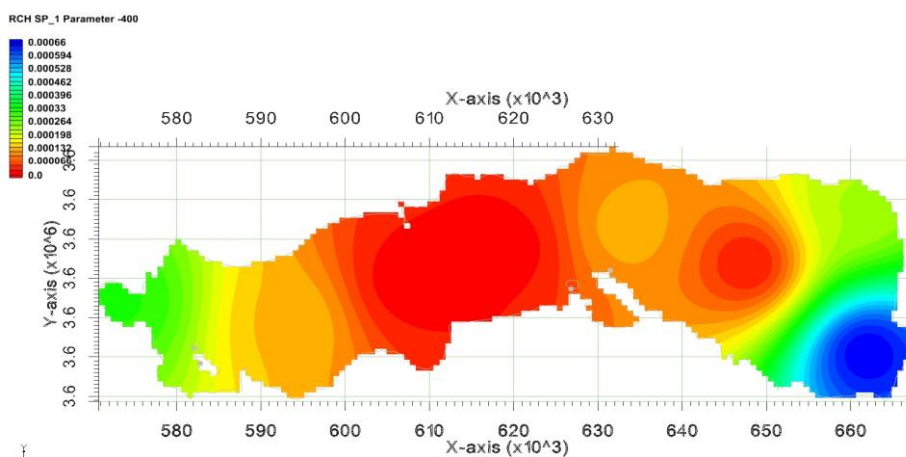
در مرحله اول مقدار هدایت هیدرولیکی محاسبه و با استفاده از محاسبات روابط قابلیت انتقال به منطقه اطلاق شد. دقت و صحت‌یابی تخمین اولیه این سطح پیوسته نیز بر پایه بافت آبخوان به‌صورت عمده Gravel و طبق پژوهش Domenico and Schwartz (1990) بوده است (www.aqtesolv.com)، که می‌تواند با تعیین یک ضریب تأثیر برگرفته از چاه‌های پمپاژ تصحیح شود. به این صورت که در هر منطقه‌ای که چاه مقدار بیش‌تری پمپاژ کند، منعکس‌کننده قابلیت انتقال بالاتر است.



شکل ۳- نمایی از فایل رستری هدایت هیدرولیکی
Figure 3 - A view of the hydraulic conductivity raster file



شکل ۴- نمایی از ناهمسانی افقی هدایت هیدرولیکی
Figure 4- A view of the horizontal heterogeneity of hydraulic conductivity



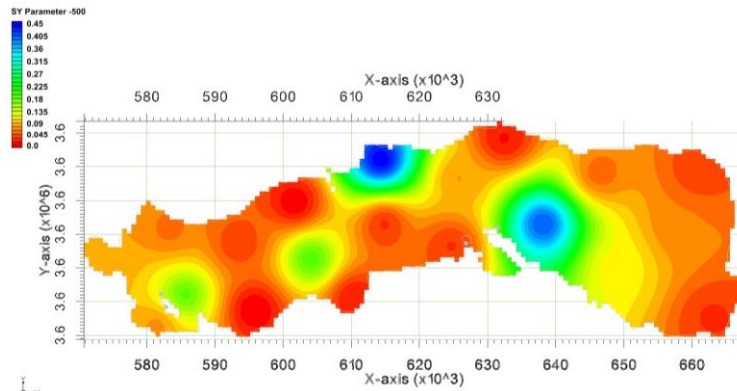
شکل ۵- نمایی از فایل رستری مقدار تغذیه یا RCH
Figure 5 - A View of the feeding amount or RCH raster file

تمام سلول‌ها معرفی شد. سپس در مرحله واسنجی فرم ناپایدار همین مقادیر به‌عنوان مقادیر اولیه در قالب نقاط پایلوت به مدل وارد و مقادیر بهینه در این مرحله حاصل شد. در دوره واسنجی

مقدار آب‌دهی ویژه یا ظرفیت مخصوص آب‌دهی که با عبارت SY نشان داده می‌شود در مرحله سوم مدل‌سازی با توجه به محاسبات صحرایی و آزمایشگاهی به مقدار مفروض اولیه به

۰/۰۰۱ و ۰/۴۴۴ با میانگین ۰/۱۰۳، میانه ۰/۰۷۷ و انحراف معیار ۰/۰۸۳ متغیر است (متر).

بلندمدت ۱۲۵ ماهه، برای پارامتر مذکور با میان‌یابی IDW نقاط پایلوت، فایل رستری حاصل شد (شکل ۶) که مقادیر در آن بین

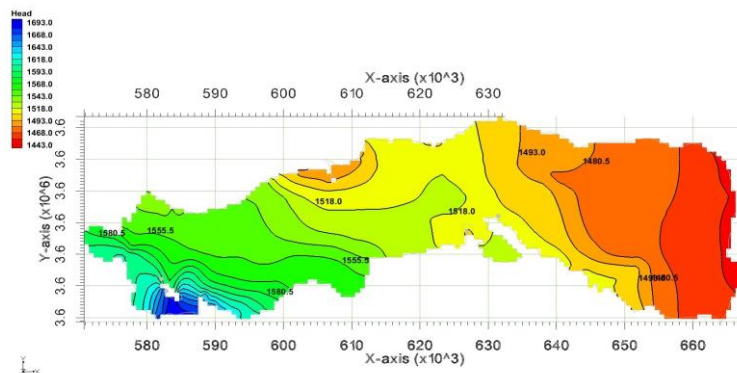


شکل ۶- نمایشی از مقدار آب‌دهی ویژه یا SY

Figure 6- A view of the amount of specific hydration or SY

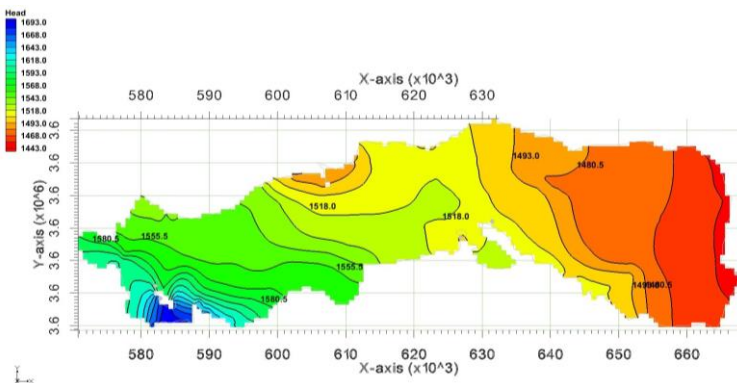
نمایان‌گر سلول‌های خشک هستند و این سلول‌ها در معیار GMS سلول‌هایی هستند که عمق آب تا سنگ کف در آن‌ها کم‌تر از ۱۰ متر است. با این حال جهت جریان بر پایه خطوط هم‌مقدار ترسیم شد. هم‌چنین، شکل ۸ خطوط هم‌مقدار تراز آب زیرزمینی را در دوره‌ی انتهایی ۱۲۵ ماهه نمایش می‌دهد.

خطوط هم‌مقدار تراز آب زیرزمینی یا به عبارتی مکان هندسی مجموعه نقاطی که دارای سطح آب زیرزمینی برابر نسبت به یک سطح‌مینا می‌باشند، برای کل آبخوان در ماه اول شبیه‌سازی در شکل ۷ به نمایش در آمده است. نکته‌ای که باید به آن توجه داشت این است که برخی از سلول‌های آبخوان غیرفعال هستند و



شکل ۷- سطح آب و خطوط هم‌مقدار برای کل آبخوان در ماه اول شبیه‌سازی

Figure 7 - Water level and contour lines for the entire aquifer in the first month of simulation



شکل ۸- سطح آب و خطوط هم‌مقدار برای کل آبخوان در ماه آخر شبیه‌سازی

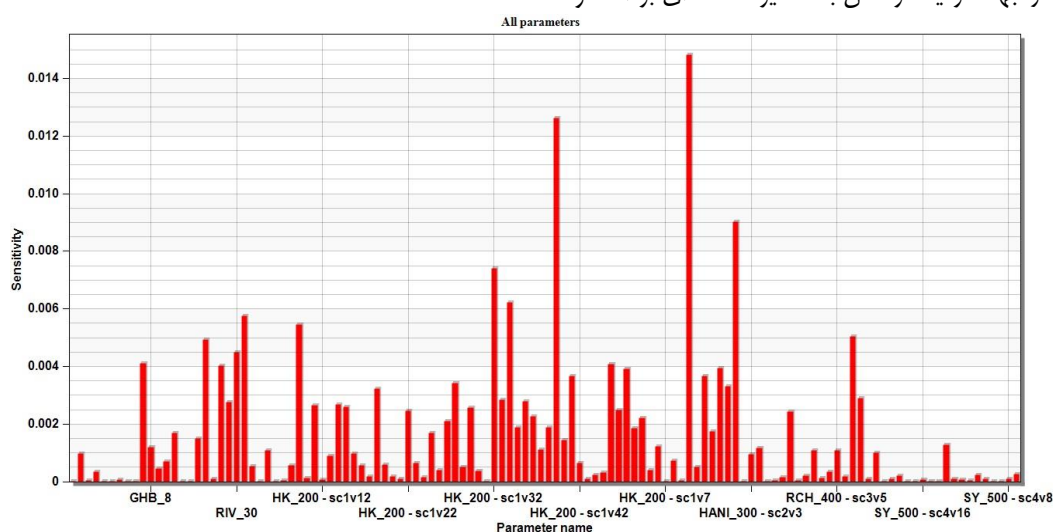
Figure 8 - Water level and contour lines for the entire aquifer in the last month of simulation

۳-۲- واسنجی و تحلیل حساسیت

به‌منظور واسنجی مدل لازم است عوامل ورودی مدل در جهت موردنظر تغییر داده شود تا بین بار آبی محاسباتی و مشاهداتی توافق مطلوبی حاصل شود. بنابراین، ابتدا باید مدل نسبت به عوامل ورودی تحلیل حساسیت شود و عوامل حساس و رتبه حساسیت آن‌ها مشخص شود. از بین عوامل حساس باید ابتدا عواملی انتخاب شود که دقت کمتری دارند. یعنی عواملی که عکس‌العمل مدل به تغییرات آن‌ها بیش‌تر بوده؛ یا به‌عبارتی مدل نسبت به آن‌ها حساسیت بیش‌تری نشان می‌دهد. این عوامل از اهمیت بیش‌تری برخوردارند زیرا با تغییرات کم‌تر در این پارامترها می‌توان گام بزرگ‌تری در جهت نزدیک‌تر شدن به مقادیر مشاهده‌ای برداشته و

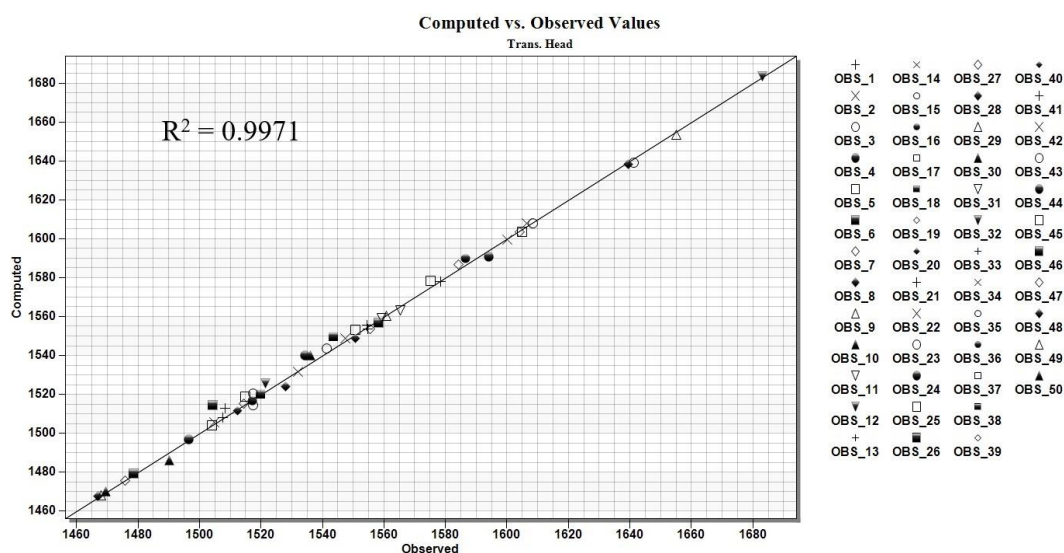
خطاها را به حداقل رسانید. سپس با تغییر عوامل حساس در جهت موردنظر مدل را واسنجی نمود. در شکل ۹، تحلیل حساسیت پارامترها در مرحله واسنجی ناپایدار ارائه شده است.

در شکل ۱۰، تحلیل حساسیت پارامترهایی چون تغذیه (RCH)، هدایت هیدرولیکی (HK)، شبکه آبراه‌های (RIV)، ناهمسانی افقی هدایت هیدرولیکی (HANI)، مقدار آب‌دهی ویژه یا ظرفیت مخصوص آب‌دهی (SY) و مرزهای تراوا (HGB) در مرحله واسنجی ناپایدار در یک نمودار به‌صورت یک‌جا به نمایش در آمده است.



شکل ۹- تحلیل حساسیت پارامترها در مرحله واسنجی ناپایدار در یک نمودار

Figure 9 - The sensitivity analysis graph of the parameters in the unstable calibration stage



شکل ۱۰- نمودار همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی برای پیزومترهای موجود در منطقه

Figure 10 - Correlation diagram between observed and calculated values for piezometers in the area

دست‌یابی به این مقدار تا حد بسیار زیادی غیرممکن به نظر می‌رسید. همچنین، عامل دیگری که مدل‌سازی را می‌تواند در این مورد با مشکلات بزرگ مواجه سازد، اُفت شدید سطح آب در آبخوان به سبب وجود برداشته‌های بیش‌از حد مجاز و حفر چاه‌های غیرمجاز و خشکسالی و غیره است. درعین‌حال انتظار می‌رفت واسنجی مدل با تفاوت زیاد همراه شود. با این همه در نهایت آب‌نمود چاه‌ها در محدودهٔ انحراف استاندارد داده‌های پی‌زومتری با تطبیق نسبی حاصل شده و خطای کل نیز به قدر مطلوب کاهش داشت. مقدار RMSE برای مدل حاضر با تقسیم RMS با رقم ۲/۲۱ بر حد اختلاف کمینه از بیشینه به مقدار ۹/۴، در چاه‌های پی‌زومتری منطقه، عدد نرمال شدهٔ ۲۳ درصد را به دست آمد، که برای دورهٔ طولانی‌مدت شبیه‌سازی، مناسب است.

۳-۳-۳- صحت‌سنجی

پس از طراحی مدل و اعمال داده‌ها، سپس اجرای مدل و درنهایت تحلیل حساسیت و واسنجی، برای تأمین اعتبار مدل و سنجش دقت در پیش‌بینی وضعیت آیندهٔ آبخوان، صحت‌سنجی مدل صورت گرفت. در صحت‌سنجی، یک مدل باید بتواند تحت استرس‌های متفاوت مانند تغییرات برداشت یا تغییر در میزان تغذیه، بدون تغییر در ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان و منطقه‌بندی‌های به دست آمده برای هدایت هیدرولیکی و آب‌دهی ویژه، شرایط طبیعی را تا حد قابل قبولی شبیه‌سازی نماید. در غیر این صورت مدل مقبولیت ندارد و ترکیب پارامترهای به کار رفته درست نبوده است. در نتیجه این چرخه تا صحت‌سنجی بعدی ادامه پیدا می‌کند. برای اطمینان از مدل ساخته شده در آبخوان مهیار جنوبی-دشت آسمان، فرآیند واسنجی در یک دورهٔ ۱۲۵ ماهه صورت پذیرفت؛ بنابراین، با توجه به ۱۲۵ ماهه بودن بازهٔ مطالعاتی، مرحلهٔ صحت‌سنجی عملاً برای ۲۵ درصد ماه‌نهایی از ماه ابتدایی شکل گرفت که خطای اندک در مرحلهٔ صحت‌سنجی مؤید دقت در واسنجی صورت گرفته و صحت آب‌نمود سلول‌های شبکهٔ ریاضی بود. در شکل ۱۰ همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی برای پی‌زومترهای موجود در منطقه با حداقل خطای مطلوب حاصل شد که در آن داده‌های مشاهداتی (محور افقی) و محاسباتی (محور عمودی) و ضریب تعیین یا به عبارتی R^2 مقدار ۰/۹۹۷ به دست آمد.

۳-۴- بیان خروجی مدل

Flow_Budget یک موتور ریاضی است که توسط USGS برای محاسبهٔ بیان آبی در مدل MODFLOW توسعه یافته است. اعداد استخراجی از موتور FlowBudget سوار بر مدل واسنجی شده MODFLOW نشان می‌دهد در دورهٔ ۱۲۵ ماههٔ

در این پژوهش، از روش تحلیل حساسیت تلفیقی با مرحلهٔ واسنجی استفاده شده است. نتایج خروجی تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر در واسنجی آبخوان مهیار جنوبی-دشت آسمان، نشان‌دهندهٔ تأثیر حداکثری پارامترهای هدایت هیدرولیکی و ناهمسان‌گردی هدایت هیدرولیکی به خصوص در برخی از پایلوت‌هاست. بر همین اساس، ویرایش‌های صورت گرفته بر مرزهای با بار هیدرولیکی پویا (مدل مفهومی) حدود پارامترهای با حساسیت زیاد، خطای کل واسنجی را در آخرین مرحله از مراحل چهارگانهٔ واسنجی به حداقل مطلوب کاهش داد. این خطا در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- خطای مرحلهٔ واسنجی
Table 2-Error of the calibration stage

مقدار	ویژگی
-0.22	میانگین باقیمانده (Head)
1.47	میانگین باقیمانده مطلق (Head)
2.21	ریشه میانگین مربع باقیمانده (Head)
0.00	میانگین باقیمانده (Flow)
0.00	باقیمانده مطلق (Flow)
0.00	ریشه میانگین مربع باقیمانده (Flow)
0.00	میانگین وزنی باقیمانده (Head+Flow)
0.00	میانگین وزنی مطلق باقیمانده (Head+Flow)
0.00	ریشه میانگین مربعات وزنی باقیمانده (Head+Flow)
0.00	مجموع مجذور وزن باقیمانده (Head+Flow)
2	دقت نمایش داده شده

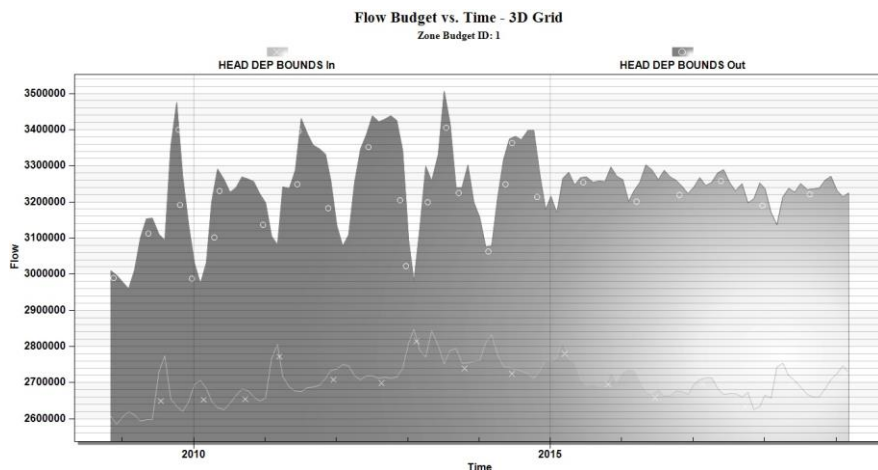
خطای RMS برابر ۲/۲۱ بوده که ممکن است در نگاه اول مقدار این خطا بالا به نظر رسد، اما باید توجه کرد که به دلیل نسبی بودن این خطا معیار مشخصی برای سنجش عددی آن وجود ندارد و صرفاً گفته می‌شود که کم‌تر بودن آن بهتر خواهد بود. با این حال به منظور بررسی دقیق‌تر این که آیا عدد نهایی مطلوب است یا خیر، باید خطای RMS را به نرمال آن (NRMSE) تبدیل کرد که در این حالت تنها کافی است تا مقدار RMSE بر حدود تغییرات بین بیشینه و کمینهٔ داده‌های مشاهداتی به صورت رابطهٔ (۱) تقسیم شود:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{MAX_{Observation} - MIN_{Observation}} \quad (1)$$

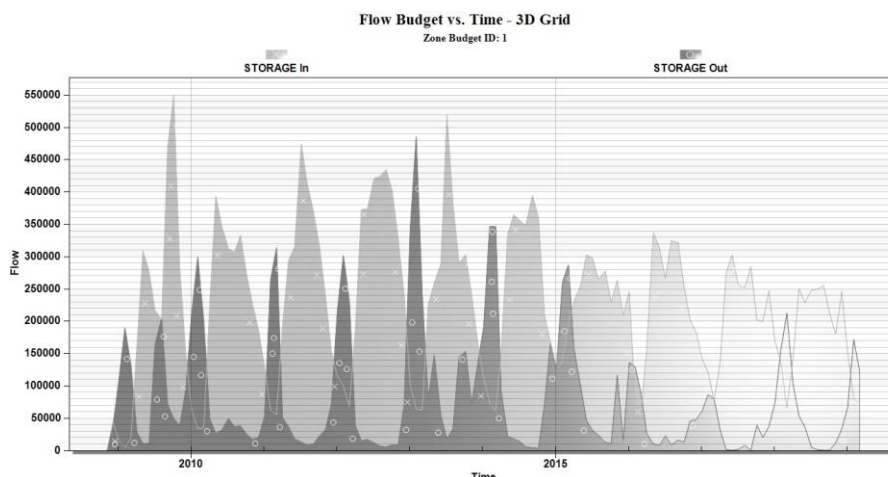
هم‌چنان که دیده می‌شود، نتیجهٔ رابطه (۱) به صورت درصد خواهد بود که اگر مقدار این درصد کم‌تر از ۱۰ درصد باشد مدل‌سازی مطلوب، اگر کم‌تر از ۳۰ درصد باشد مدل‌سازی مناسب اما با مقدار مشخصی خطای قابل بررسی، و اگر بیش از مقدار ۵۰ درصد باشد، دارای خطای بزرگ قابل بررسی است. با توجه به عدم وجود اطلاعات کافی از منطقه (به‌ویژه سنگ کف)

در شکل ۱۲، نمای سه‌بعدی از آبخوان به‌نمایش در آمده است که تغییرات ارتفاعی به طریق طیف رنگی در آن معین شده است و به‌صورت سلولی شبکه تفاضل محدود را برای ساختار کد ریاضی جریان آب زیرزمینی نشان می‌دهد.

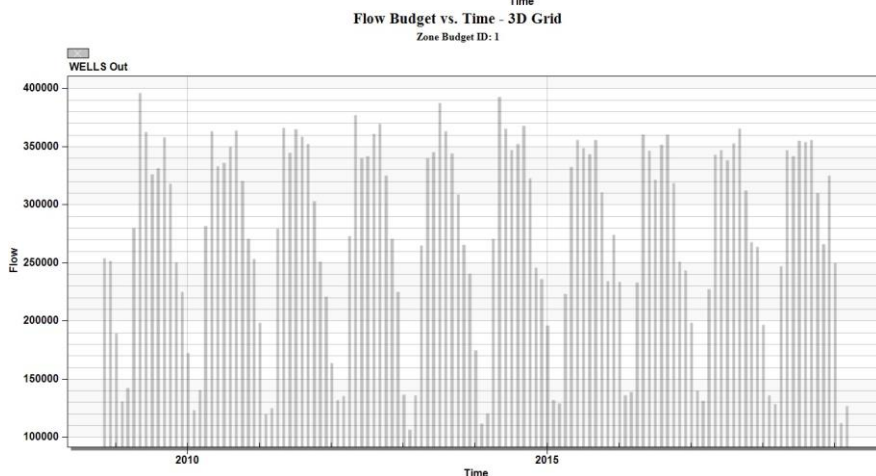
شبیه‌سازی به شکل متوسط روزانه سهم مشخصی از ذخیره ثابت آبخوان کاسته شده است. این کاهش با توجه به نزول سطح آب در آبخوان مهیار جنوبی-دشت آسمان، معادل با کسری مخزن در طول دوره بوده است. شکل ۱۱ تغییرات حجم آب ورودی و خروجی از مجموع مرزهای با بار پیوسته و شبکه آبراه‌های را نشان می‌دهد.



(الف)



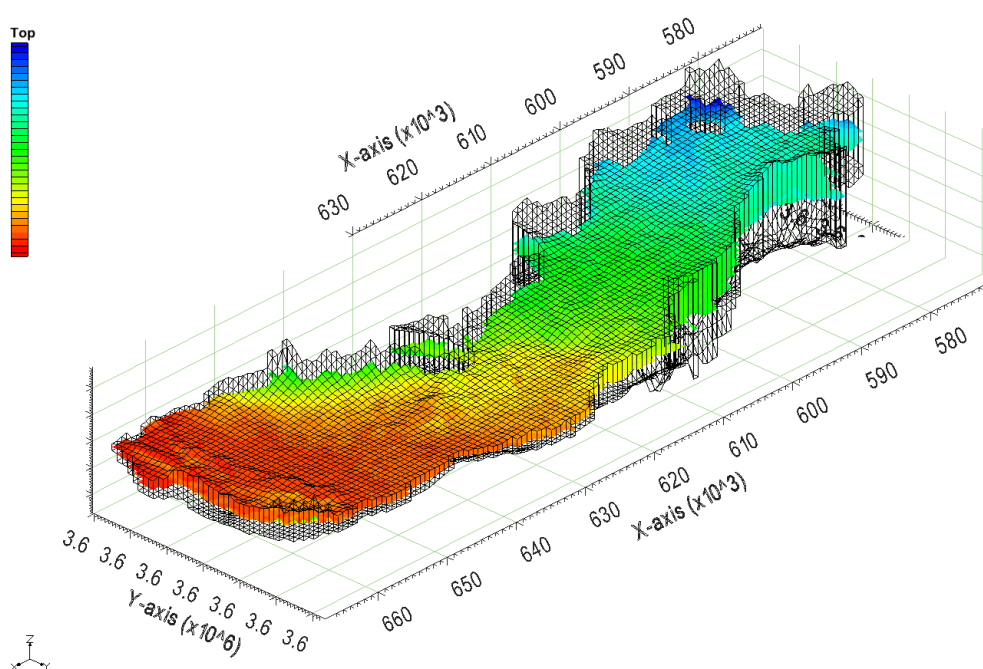
(ب)



(ج)

شکل ۱۱- نمودارهای خروجی مدل: مقایسه دبی ورودی و خروجی از مرزهای پویا (الف)، مقایسه حجم ذخیره ورودی و خروجی (ب) و دبی چاه‌های بهره‌برداری (ج)

Figure 11- Model output charts: comparison of inlet and outlet flow from dynamic boundaries (a), comparison of input and output storage volume (b), and flow rate of exploitation wells (c)



شکل ۱۲- نمای سه‌بعدی آبخوان مهیار جنوبی- دشت آسمان
Figure 12 - 3D view of South Mehyar-Dasht Asman aquifer

موجود در این حوزه آبریز را بالا برده است. بدیهی است مدل‌های رایانه‌ای و بروز کمک شایانی به حفظ و مدیریت هرچه بهتر این منابع آبی می‌نماید. با توجه به این‌که مطالعه‌ای در خصوص شبیه‌سازی آب زیرزمینی آبخوان مهیار جنوبی- دشت آسمان صورت نگرفته است و طول دوره شبیه‌سازی ۱۵ ساله، این امکان را فراهم می‌کند که این پژوهش مبنایی برای مطالعات آتی باشد و امکان مقایسه مطالعات با داده‌های بروز را با این پژوهش مهیا کند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی مدل با داده‌های جدیدتر بروز شده و نتایج مدل شبیه‌سازی شده با پژوهش حاضر مقایسه شود.

سپاسگزاری

از همکاری و مساعدت شرکت مادر تخصصی مدیریت منابع آب ایران در انجام مراحل مختلف پژوهش از جمله در اختیار قرار دادن داده‌ها و از دانشگاه نهران جهت حمایت معنوی از این پژوهش قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش باهدف بررسی و مدل‌سازی آب زیرزمینی آبخوان مهیار جنوبی-دشت آسمان اقدام به ایجاد و توسعه مدل مفهومی در بستر نرم‌افزار GIS و با استفاده از کد رایانه‌ای MODFLOW شد. به‌همین منظور از داده‌های خام شرکت مدیریت منابع آب ایران و اطلاعات مربوط به تراز ارتفاعی سطح زمین (مستخرج از www.earthexplorer.usgs.gov متعلق به سازمان زمین‌شناسی آمریکا) به‌عنوان داده‌های ورودی به مدل مفهومی استفاده شد. مدل رایانه‌ای MODFLOW در دوره ۱۲۵ ماهه شبیه‌سازی شد و پس از طی فرآیند صحت‌سنجی، حد کل خطا به ۲/۲۱ کاهش یافت و با توجه به رویکرد خودکار واسنجی و صحت‌سنجی، کم‌ترین انحراف آماری بر روی پارامترهای بهینه‌سازی ایجاد شد و ضریب تعیین (R^2) برابر ۰/۹۹۷ شد که در مقایسه با مطالعات (Edalat et al. (2021 و Najafi et al. (2022) با ضرایب تعیین ۰/۹۹۵ و ۰/۹۸ عدد مناسبی است.

در نهایت توسط موتور ریاضی FlowBudget بیان خروجی مدل به‌دست آمد. نتایج نشان داد در ۱۵ سال آبی منتهی به سال ۱۳۹۰، تراز آب زیرزمینی دچار افت ۷/۵ متری شده است. بیش‌ترین افت مربوط به سمت شرقی آبخوان و در نزدیکی تالاب گاوخونی رخ داده است. با توجه عواملی چون خشکی زاینده‌رود، برداشت بی‌رویه و وجود کم‌آبی منجر به تشدید آثار نامطلوب محیط زیستی تالاب بین‌المللی گاوخونی شده و همین امر، اهمیت پرداختن به شبیه‌سازی آبخوان‌های

مشارکت نویسندگان

و بازیابی مقاله و کنترل نتایج؛ مجتبی اردستانی: مفهوم سازی، راهنمایی و مشاوره.

حسین حسین زاده کوهی: تحلیل های نرم افزاری/آمار، نگارش نسخه اولیه مقاله، بازیابی متن مقاله، تحلیل های آمار، ویرایش

منابع

صاغی جدید، مهدی، و کتابچی، حامد (۱۳۹۸). مدیریت احیاء منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل تلفیقی شبیه سازی عددی- بهینه سازی فراکوشی جامعه مورچه ها. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۵(۲)، ۱۱۹-۱۳۳. doi: 20.1001.1.17352347.1398.15.2.10.9

طاهری تیزرو، عبدالله، و کمالی، مرتضی (۱۳۹۸). شبیه سازی آبخوان دشت توپسرکان با مدل MODFLOW و ارزیابی وضعیت آب زمین شناسی تحت شرایط موجود و آینده. *مهندسی منابع آب*، ۱۲(۴۰)، ۸۹-۱۰۴. doi:20.1001.1.20086377.1398.12.40.8.4

عدالت، علی، رجبی، علی محمد، و خداپرست، مهدی (۱۴۰۱). مدل سازی عددی جریان آب زیرزمینی دشت علی آباد قم به منظور پیش بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی و هدایت هیدرولیکی. *انجمن زمین شناسی مهندسی ایران*، ۱۵(۲)، ۴۹-۶۷. https://www.jiraeg.ir/article_147517.html

گرگانی، شهرام، بافکار، علی، و فاطمی، سیداحسان (۱۳۹۶). پیش بینی استعداد آلودگی آب های زیرزمینی با استفاده از شاخص دراستیک و تحلیل سری های زمانی سالانه (مطالعه موردی: دشت ماهیدشت کرمانشاه. *سلامت و محیط زیست*، ۱۰(۳)، ۳۱۷-۳۲۸. <https://ijhe.tums.ac.ir/article-1-5962-fa.html>

نجفی، سجاد، شرافتی، احمد، و کاردان مقدم، حمید (۱۴۰۱). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر تغییرات تراز آب زیرزمینی در آبخوان ساحلی ساری نکا. *مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۳(۲)، ۳۱۲-۳۳۲. doi:10.22125/iwe.2022.162660

احمدی، علیرضا (۱۴۰۱). اثر افزایش راندمان کاربری آب بر بهبود وضعیت منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل WEAP در دشت قزوین. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۱)، ۵۳-۶۲. doi:10.22098/mmws.2022.9333.1034

پورحقی، امیر، رادمنش، فریدون، و ملکی، عباس (۱۳۹۴). شبیه سازی آبخوان دشت لرستان-دلفان و بررسی سناریوهای مدیریتی با استفاده از مدل MODFLOW. *آب و خاک*، ۲۹(۴)، ۸۸۶-۸۹۷. doi:10.22067/jsw.v0i0.30359

دنیایی، علیرضا، و صراف، امیرپویا (۱۴۰۰). کالیبراسیون مدل توزیعی هیدرولوژیکی WetSpa با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی چندهدفه عنکبوت بیوه سیاه و NSGA-II. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۵(۳)، ۷۲۱-۷۳۶. doi:20.1001.1.2008794.2.1400.15.3.20.4

دنیایی، علیرضا، صراف، امیرپویا، و احمدی، حسن (۱۴۰۰). بهره برداری از مخزن سد گلستان در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از الگوریتم بهینه سازی چندهدفه نهنگ بهبود یافته. *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۱۲(۲۳)، ۲۳۸-۲۵۰. doi:10.52547/jwmmr.12.23.238

رئیس دهکردی، محمدرضا، و یگانه مظهر، امیرحسین (۱۴۰۱). بهینه سازی ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان ها با روش های عددی، مطالعه موردی آبخوان دامنه داران. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۱)، ۲۶۲-۲۷۸. doi:10.22098/mmws.2022.11683.1155

شرکت مدیریت منابع آب ایران (۱۳۹۴). گزارش بیلان منابع آب محدوده مطالعاتی مهبیار جنوبی-دشت آسمان.

References

Abdelhalim, A., Sefelnasr, A., & Ismail, E. (2019). Numerical modeling technique for groundwater management in Samalut City, Minia Governorate, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences* 12(124), 1-18. doi:10.1007/s12517-019-4230-6

Ahmadi, A. (2022). The effect of increasing water use efficiency on improving the status of groundwater resources using WEAP model in Qazvin Plain. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(1), 53-62. doi: 10.22098/mmws.2022.9333.1034. [In Persian]

Domenico, P.A., & Schwartz, F.W. (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology*. New York, John Wiley and Sons.

Donyaii, A.R., & Sarraf, A.P. (2021). Calibration of WetSpa distributed hydrological model using NSGA-II and black widow multi-objective optimization algorithms, *Iranian Journal of*

Irrigation & Drainage, 15(3), 721-736. doi: 20.1001.1.20087942.1400.15.3.20.4 [In Persian]

Donyaii, A.R., Sarraf, A., & Ahmadi, H. (2021). Operation of the Golestan Dam Reservoir in Climate Change Conditions Using an Improved Multi-Objective Whale Optimization Algorithm, *Journal of Watershed and Management Research*, 12(23), 238-250. doi: 10.52547/jwmmr.12.23.238. [In Persian]

Edalat, A., Rajabi, A.M., & 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*, 15(2), 49-67. https://www.jiraeg.ir/article_147517.html?lang=en [In Persian]

Gorgani, S., Bafkar, A., & Fatemi, S. (2017). Prediction of groundwater pollution potential

- using the DRASTIC index and annual time series analysis(case study: Plain Mahidasht, Kermanshah). *Iranian Journal of Health and Environment*, 10(3), 303-317. <http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-5962-fa.html> [In Persian]
- Hoaglund III, J.R., Huffman, G.C., & Grannemann, N.G., (2002). Michigan basin regional ground water flow discharge to three Great Lakes. *Groundwater*, 40(4), 390-406. doi:10.1111/j.1745-6584.2002.tb02518.x
- Iran Water Resources Management Company, (2015). Water resource balance report of the South Mehyar-Dasht Asman study area. [In Persian]
- König, L.F., & Weiss, J.L. (2009). Groundwater: modelling, management and contamination. UK. Nova Science Publishers.
- Kresic, N. (2007). Grounwater chemistry, Hydrogeology and groundwater modeling. Taylor and Francis Group, Boca Raton, 828 pages.
- Nair, A. (2022). Trend analysis of hydro-climatological factors using a bayesian ensemble algorithm with reasoning from dynamic and static variables. *Atmosphere*, 13(12), 1961. doi:10.3390/atmos13121961
- Najafi, S., Sharafati, A., & Kardan moghaddam, H. (2022). Evaluating the effect of climate change on groundwater level changes in the Sari-Neka coastal aquifer. *Irrigation and Water Engineering*, 13(2), 312-332. doi:10.22125/iwe.2022.162660 [In Persian]
- Pourhaghi, A., Radmanesh, F., & Maleki, A. (2015). Simulation of Delfan-Lorestan aquifer and investigation of management scenarios by using MODFLOW model. *Journal of Water and Soil* 29(4), 886-897. doi:10.22067/jsw.v0i0.30359. [In Persian]
- Raeisi Dehkordi, M., & Yeganeh Mazhar, A.H. (2022). Optimization of aquifers' hydrodynamic coefficients by numerical modelling, A case study of Damaneh-Daran. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(1), 2692-278. doi:10.22098/mmws.2022.11683.1155. [In Persian]
- Ranjbar, A., & Ehteshami, M. (2019). Development of an uncertainty based model to predict land subsidence caused by groundwater extraction (Case study: Tehran Basin). *Geotechnical and Geological Engineering* 37(4), 3205–3219. doi:10.1007/s10706-019-00837-w
- Saghi-Jadid, M., & Ketabchi, H. (2019). Restoration management of groundwater resources using the combined model of numerical simulation-evolutionary ant colony optimization. *Iran-Water Resources Resrarch*, 15(2), 119-133. dor: 20.1001.1.17352347.1398.15.2.10.9 [In Persian]
- 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 Modelling*, 3(2), 1-17. doi: 10.22098/mmws.2022.11275.1113
- Taheri Tizro, A., & Kamali, M. (2019). Groundwater modeling by MODFLOW model in Toyerkan aquifer and evaluation of hydrogeological state under present and future conditions. *Water Engineering*, 12(40), 89-104. dor: 20.1001.1.20086377.1398.12.40.8.4. [In Persian]