Research Paper

Simulation of Groundwater Level in Nahavand Plain Using MODFLOW

Yousef Kakavand [1], **JavadMozaffari**[2*]

[1] MSc student, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment ،Arak University,

[2] Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Water Research Institute, Faculty of Agriculture and Environment ،Arak University

10.22125/IWE.2023.169895

Received:
June 26, 2021
Accepted:
September 26, 2021
Available online:
April 11, 2023

Keywords:
MODFLOW, Aquifer, Budget, Agriculture well

Abstract

Understanding the trends of groundwater level changes and its prediction can be important in water resources management. In this study, the simulation of groundwater level changes in Nahavand plain was performed using MODFLOW mathematical model and considering the parameters affecting the phenomenon. First, the calibration and validation process was performed over a statistical period of 120 months. Then, four scenarios (current harvest conditions and 10, 30 and 50% reduction in agricultural wells harvesting) were investigated to predict future groundwater level changes. The results indicate that the mathematical model used to simulate the Nahavand aquifer has 21% relative error of NRMSE, which confirms the proper modeling after considering the prediction process. It was also found that 0 and 10% scenarios would decrease groundwater level in the future .A 30% reduction in operating capacity leads to constant conditions and a reduction of more than 50% creates a positive balance in the long term.

1. Introduction

Understanding the trends of groundwater level changes and its prediction can be important in water resources management. Yaoutia et al. (2008) in the study of Boarg aquifer in the plains of northern Morocco, using Modflow code in GMS, presented different scenarios. In this study, it was concluded that the recharge parameter is more sensitive than other parameters such as hydraulic conductivity and non-transmittance. In the study of Gaura et al. (2011), a new method was proposed to evaluate groundwater resources by combining numerical modeling and spatial modeling using GIS. This hybrid modeling was applied in the Bangana River Basin of India. The results showed that increasing discharge from wells puts a lot of stress on the aquifer. Therefore, by creating a series of areas artificial recharge to rainwater, the groundwater level in the region can be prevented. In the research of Pourhaghi et al. (2015), the Lorestan-Delfan plain aquifer was simulated. In order to predict the future status of the aquifer, they implemented two options to continue the current exploitation process and the option of reducing operation by 20% for the next 10 years. The model showed that the groundwater level in the next 10 years will decrease by -7.8 meters and -5.83 meters, respectively. Chakraborty et al. (2020) simulated the Purba Plain in India with Modflow software. They concluded that the groundwater flow was moving from south to north. The actual data also showed good agreement with the software used. Therefore, the purpose of this research is to use Modflow software to simulate Nahavand plain and to consider different water use scenarios to predict groundwater level in the future.

[*] **Corresponding Author:** Javad Mozaffrai
Address: Department of Water Science and Engineering, Water Research Institute, Faculty of Agriculture and Environment ،Arak University
Email: J-mozafari@araku.ac.ir
Tel: 08632623520

2. Materials and Methods

In this study, the simulation of groundwater level changes in Nahavand plain aquifer was performed. Nahavand plain with an area of 1690 square kilometers is located in the northeast of the Zagros Mountains. Nahavand city with geographical coordinates is located at 48 degrees and 24 minutes east longitude and 23 degrees and 22 minutes north latitude.The roundwater is simulated using MODFLOW mathematical model. First, the calibration and validation process was performed over a statistical period of 120 months. To do this, 12 months were set for validation.Then, four scenarios (current harvest conditions and 10, 30 and 50% reduction in agricultural wells harvesting) were investigated to predict future groundwater level changes.

3. Results

The results indicate that the mathematical model for simulating the aquifer has a 21% relative error of NRMSE, which confirms proper modeling after considering the prediction process. Simulation of groundwater level changes was performed using a verification period. Comparing the results of this method with the leading model shows that the mathematical model has been able to accurately predict the discharge for the same period of simulation in 10, 30 and 50 percent reduction scenarios from the discharge wells. The trend of long-term changes in the hydrograph of the unit of the network of grid cells indicates a decline in the downward trend if 10% reduction was achieved, the aquifer condition stabilized if 30% reduction was applied, and the return to the moderate slope increased to 50% Percentage of harvest was from saturated aquifer reservoir.

4. Discussion and Conclusion

In the Nahavand aquifer, the MODFLOW mathematical model was calibrated in a period of 108 months and validated in 12 months. The relative error value of NRMSE was a confirmation of the favorable modeling, which is shown in accordance with the research of Chakraborty et al. (2020). Four forecasting scenarios were used to generate water level in ten consecutive years in GMS software. Despite the fact that it is unrealistic, it will decrease by 30 to 50% on the flow rate of the wells in the region, only in this case, we can expect to prevent further decline in quality or return conditions for the future periods.

5. Six important references

1) Chakraborty, S., Maity, P.K. & Das, S. (2020) .Investigation, simulation, identification and prediction of groundwater levels in coastal areas of Purba Midnapur, India, using MODFLOW. Environment, Development and Sustainability 22, 3805–3837.
2) Cho, J. Barone, V, A. Mostaghimi, S., 2009, Simulation of land use impacts on groundwater levels and streamflow in a Virginia watershed, agricultural water management, V 96, P 1–11.
3) Gaura, S. Chahar, B, R. Graillota, D., 2011, Combined use of groundwater modeling and potential zone analysis for management of groundwater, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, V 13, P 127–139.
4) Hu, Y. Moiwo, J, P. Yang, Y. Han, S. Yang, Y., 2010, Agricultural water-saving and sustainable groundwater management in Shijiazhuang Irrigation District, North China Plain, Journal of Hydrology, V 393, P 219–232.
5) Pourhaqi, A. Radmanesh, F. And Malek, A. 2015. Simulation of Lorestan-Delfan plain aquifer and study of management scenarios using MODFLOW model. Journal of Water and Soil. No. 29 (4), pp. 886-897.
6) Yaoutia, F, E. Mandourb, A, E. Khattacha, D. Kaufmannc, O., 2008, Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco), Journal of Hydro-environment Research, V 2, Issue 3, P 192–209.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران
سال سیزدهم. شماره پنجاه و یک . بهار ۱۴۰۲

شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی دشت نهاوند با استفاده از MODFLOW

یوسف کاکاوند[۱]، جواد مظفری[۲]*

تاریخ ارسال:۱۴۰۰/۰۴/۰۶
تاریخ پذیرش:۱۴۰۰/۰۷/۲۲

مقاله پژوهشی

چکیده

بررسی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی و پیش‌بینی آن در مدیریت منابع آبی اهمیت بسزایی دارد. در این پژوهش شبیه‌سازی تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت نهاوند با استفاده از مدل ریاضی MODFLOW و با در نظر گرفتن پارامترهای موثر بر پدیده انجام شده است. ابتدا فرآیند واسنجی و صحت سنجی در یک دوره آماری ۱۲۰ ماه انجام گرفت. سپس چهار سناریو (شرایط برداشت فعلی و ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد کاهش برداشت از چاه‌های کشاورزی) برای پیش بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی در آینده بررسی گردید. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که مدل ریاضی استفاده شده جهت شبیه‌سازی آبخوان نهاوند دارای ۲۱ درصد خطای نسبی NRMSE می‌باشد که موید مدل سازی مناسب پس از بررسی فرآیند پیش بینی است. همچنین مشخص گردید که سناریوی ۰ و ۱۰ درصد سبب کاهش تراز آب زیرزمینی در آینده خواهد شد. مقدار کاهش ۳۰ درصدی بهره‌برداری منجر به ایجاد شرایط ثابت و کاهش بیش از آن تا مقدار ۵۰ درصد قادر به جبران کسری مخزن در دوره‌ای بلند مدت است.

واژه‌های کلیدی:MODFLOW، آبخوان، بیلان، چاه کشاورزی

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، Yousekakavand@gmail.com
[۲] (مسوول مقاله) دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، پژوهشکده آب، دانشگاه اراک، Javad_370@yahoo.com، ۰۹۳۵۲۱۸۰۹۱۶

مقدمه

کاهش سطح تراز آب زیرزمینی دشت‌ها باعث افزایش هزینه استحصال آب و افزایش مصرف انرژی، کاهش کیفیت آب و ظهور پدیده فرونشست زمین می‌گردد. به عنوان اثرات ثانوی، با کاهش حجم آب قابل برداشت منابع زیرزمینی و افزایش هزینه استحصال آب، سطح زیرکشت محصولات کاهش و قیمت محصولات افزایش می‌یابد. یکی دیگر از عواملی که باعث بحرانی شدن وضعیت منابع آب زیرزمینی شده است، تغییر شرایط و رژیم تغذیه طبیعی سفرهای آب زیرزمینی است. در برخی از دشت‌ها، ساخت و سازهای هیدرولیکی نامناسب بر روی رودخانه‌ها انجام شده و باعث کاهش تغذیه مناسب آبخوان پایین دست شده است (قدرتی و ثعبانی، ۱۳۹۱). جهت فایق آمدن بر مشکلات منابع آب زیرزمینی، به مدیریت جامع فرابخشی و یکپارچه منابع آب سطحی و زیرزمینی و لحاظ کردن عوامل سیاسی، فرهنگی، اجتماعی و مشارکت دادن تمامی ذی‌نفعان و تشکل‌ها و اصناف در این مدیریت همه جانبه‌نگر نیاز می‌باشد. از عوامل بسیار تاثیر گذار در بخش فنی مدیریت یکپارچه، شناخت علمی و دقیق وضعیت دشت‌ها و منابع آب آن است؛ که این شناخت از طریق تولید اطلاعات پایه در بخش‌های هواشناسی، هیدرولوژی، هیدروژئولوژی و... و بررسی عالمانه آن‌ها بدست می‌آید. پس از شناخت وضعیت موجود، باید سناریوها و گزینه‌های متعدد علمی، مهندسی و مدیریتی را جهت ایجاد یک مدیریت صحیح و متعادل مورد آزمون و بررسی قرار داد. این بررسی‌های علمی نیاز به ابزارهای گوناگون دارد که یکی از آن‌ها مدل ریاضی است. مدل‌های ریاضی، بررسی تغییرات وضعیت موجود و آینده سفره‌های آب زیرزمینی را با لحاظ کردن عوامل متعدد موثر در آن، امکان‌پذیر ساخته است. لذا با استفاده از آن‌ها می‌توان با صرف کمترین هزینه و زمان، تنها با جمع آوری اطلاعات مربوط به ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم آب زیرزمینی وضعیت آبخوان را شبیه‌سازی کرد. این نوع مدل‌های شبیه‌ساز قادرند تاثیرات متقابل آب‌های سطحی و زیرزمینی را در دوره‌های کوتاه و بلند مدت ارایه دهند، که از مهم‌ترین این مدل‌های می‌توان به MODFLOW اشاره کرد. کارکرد مدل‌های عددی هر روز بیشتر شده است. در مطالعه آبخوان آزاد بوارگ در دشت‌های شمال مراکش ضمن مدل‌سازی دشت با استفاده از کد مادفلو در محیط GMS سناریوهای مختلف متناسب با مکان‌های مختلف دشت ارایه شد (Yaoutia et al., 2008). در این مطالعه این نتیجه حاصل گشت که پارامتر تغذیه نسبت به سایر پارامترها همچون هدایت هیدرولیکی و انتقال ناپذیری از حساسیت بیشتری برخوردار است. در مطالعه آبخوان ایالات ویرجینیا از مدل سه بعدی جریان برای تعیین تاثیر فعالیت‌های توسعه‌ی زمین بر رژیم جریان زیرسطحی استفاده گردید (Cho et al., 2009). آن‌ها پس از واسنجی مدل در شرایط ماندگار، سه سناریو را با هشت رویکرد بکار گرفته و در نهایت با ارایه راهکارهایی پیشنهاد نمودند که یک مدل توزیعی-سطحی به صورت پویا می‌تواند به طور کامل تناقضات مکانی و زمانی بین مدل‌های سطحی و زیرسطحی را حل کند. در بررسی اثر تونل سازی در جنوب تایوان با استفاده از نرم افزار GMS مدل مفهومی این منطقه ایجاد گردید (Yang et al, 2009). در این مطالعه که از دو کد MODFLOW و FEMWATER همزمان استفاده شد؛ آنها به این نتیجه رسیدند که تونل ساخته شده، با توجه به میزان برداشت فعلی از منابع آب زیرزمینی نمی‌تواند در منابع آب زیرزمینی و چشمه‌های آب گرم نواحی اطراف تونل تاثیر منفی داشته باشد. در مطالعه‌ای تحت عنوان "صرفه جویی در آب کشاورزی و مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی در شمال چین از مدل MODFLOW استفاده شد (Hu et al., 2010). نتایج این مدل‌سازی نشان دادکه ۲۹/۲ درصد کاهش در آبیاری و ۱۰ درصد کاهش در پمپاژ می‌تواند علاوه بر کاهش افت سفره، وضعیت آن را به قبل از توسعه کشاورزی در ۷۴ سال قبل برساند. در یک مطالعه یک روش جدید برای ارزیابی منابع آب زیرزمینی با ترکیب مدل‌سازی عددی و به کارگیری مدل‌سازی مکانی با استفاده از GIS ارایه شد (Gaura et al, 2011). این مدل‌سازی ترکیبی، در حوضه رودخانه بنگانای هند بکار گرفته شد. نتایج نشان داد که افزایش تخلیه از چاه‌ها تنش زیادی روی آبخوان اعمال می‌کند. لذا با ایجاد یک سری مناطق مستعد برای استحصال آب باران می‌توان از افت سطح آب زیرزمینی در منطقه جلوگیری کرد. با مطالعه آبخوان ساحلی شمال شرق

تونس، مدل جامع سه بعدی منطقه را به کمک MODFLOW و ArcView ساخته شد (Lachaal et al., 2012). به عنوان نتیجه آن‌ها عنوان کردند که این مدل برای مناطق دیگر با شرایط زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی مشابه به عنوان یک ابزار مدیریتی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در یک مطالعه ضمن تشریح لزوم استفاده از DSS در مدیریت منابع آبی، نرم افزارهای موجود تشریح و مقایسه گردید (Page et al., 2012). نتایج کلی این شبیه-سازی نشان داد که ۸۳ ماه از ۸۴ ماه به طور میانگین دارای کسری بودجه ۱۵ و دیگری دارای کسری بودجه ۳۹ میلیون متر مکعبی می‌باشد. آن‌ها همچنین نشان دادند که این سیستم پشتیبان تصمیم گیری عملیاتی، قادر است برنامه ریزی‌های جایگزین را بررسی و ارتباط آن را با کاربران آب تسهیل نماید. در پژوهشی به شبیه سازی آبخوان دشت لرستان- دلفان پرداخته شد (پورحقی و همکاران، ۱۳۹۴). آن‌ها به منظور پیشبینی وضعیت آینده آبخوان دو گزینه ادامه روند فعلی بهره برداری و گزینه کاهش ۲۰ درصدی بهره‌برداری در شرایط خشکسالی و ترسالی تدوین و مدل را برای۱۰ سال آینده اجرا کردند. اجرای مدل در شرایط خشکسالی و ترسالی نشان داد سطح آب زیرزمینی در ۱۰ سال آینده به ترتیب ۷/۸- متر و ۵/۸۳- متر افت می‌کند. محققان به شبیه‌سازی عددی مسیر جریان آب زیرزمینی آبخوان دشت همدان–بهار پرداختند و نتیجه گرفتند طولانی‌ترین مسیر انتقال جریان در حرکت رو به جلو ۴۳۴۰۰ متر و در حرکت رو به عقب ۸۲۷۰ متر می‌باشد (بیات و همکاران، ۱۳۹۷). همچنین نتایج نشان داد روند فعلی جریان آب زیرزمینی، افزایش سطح آلودگی آبخوان را در پی خواهد داشت. عزیزی و همکاران(۱۳۹۸) به شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و نفوذ آب شور در آبخوان دشت ملکان با استفاده از نرم‌افزار GMS پرداختند. نتایج نشان داد که مدل توانسته رفتار سیستم واقعی را به خوبی توصیف کند و تطبیق خوبی بین نتایج شبیه سازی مدل با داده های مشاهداتی برقرار شده‌است. همچنین، برداشت بی رویه از منابع آب‌زیرزمینی در حالیکه موجب افت سطح ایستابی شده است، گسترش نفوذ آب شور را در قسمت شمال‌غربی دشت تسریع و در نتیجه باعث افت کمی و کیفی در این بخش از آبخوان گردیده است. جعفرزاده و همکاران (۱۳۹۹) به ارزیابی عملکرد روش‌های عددی در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در بیرجند پرداختند. سه روش مبتنی بر روش‌های تفاضل محدود(FD) ، اجزای محدود (FE) و بدون شبکه (Mfree) بررسی شد. ارزیابی نتایج عددی بدست آمده نشان داد که عملکرد هر سه مدل عددی قابل قبول است ولی با افزایش پیچیدگی‌های شبیه‌سازی در مطالعه میدانی، از دقت روش‌های عددی مبتنی بر مِش نظیر FD و FE کاسته شد. Chakraborty و همکاران (۲۰۲۰) به شبیه سازی دشت پوربا در هند با نرم‌افزار Modflow پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که جریان آب زیرزمینی از جنوب به سمت شمال در حال حرکت است. همچنین داده‌های واقعی مطابقت خوبی را با نرم‌افزار مورد استفاده نشان داد. بنابراین هدف از پژوهش استفاده از نرم‌افزار Modflow برای شبیه‌سازی دشت نهاوند و درنظرگیری سناریوهای مختلف مصرف آب برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی درآینده می‌باشد.

مواد و روش ها

تئوری ریاضی مدل MODFLOW

در یک برنامه رایانه‌ای مدل آب زیرزمینی، سیستمی از معادلات جبری (ماتریس) حل می‌شود. این ماتریس، تقریبی از مدل ریاضی است که توسط معادلات دیفرانسیل جریان آب زیرزمینی تدوین شده است (Bear, 1990). این مرحله شامل بیان مدل مفهومی‌در قالب معادلات ریاضی است. به عبارت دیگر طی این مرحله مدل مفهومی از سیستم فیزیکی به سیستم ریاضی تبدیل می‌گردد. مدل ریاضی، معمولاً از یک دستگاه معادلات شامل معادله حاکمه (اغلب به شکل معادلات دیفرانسیل جزیی)، شرایط مرزی و شرایط اولیه مربوط به آن تشکیل شده است. معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های آزاد در حالت کلی به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial h}{\partial z}\right)=Sy\frac{\partial h}{\partial t} \quad (۱)$$

که در این معادله h ارتفاع سطح آب زیرزمینی، S_y آبدهی ویژه، K هدایت هیدرولیکی در جهت‌های x، y، و z سفره آب زیرزمینی است. حل معادلات ماتریسی در کد MODFLOW توسط موتورهایی مشابه SIP صورت

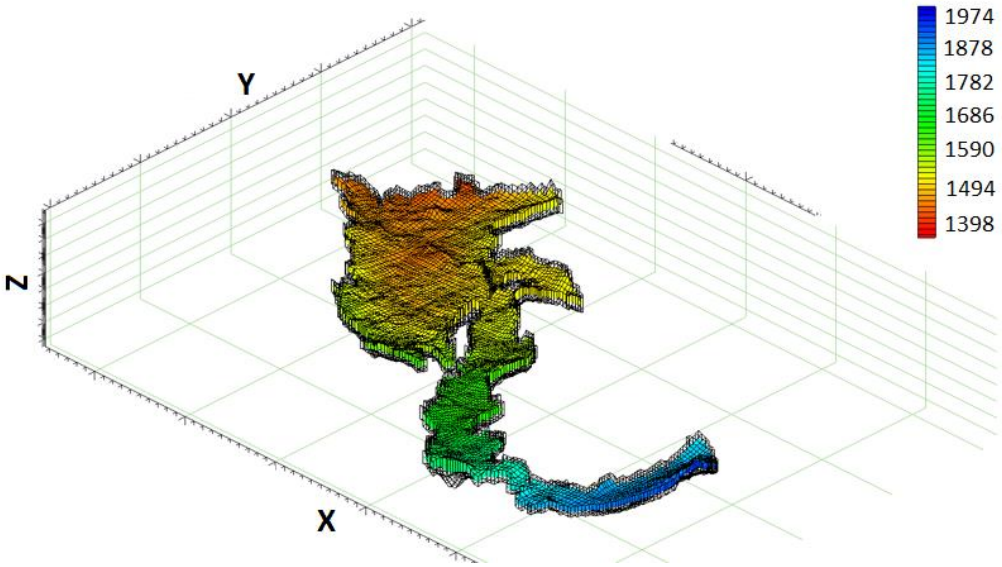
می‌پذیرد. در اصل SIP یک روش برای حل سامانه معادلات خطی بزرگ، توسط عمل تکرار می‌باشد. معادله تفاضل محدود برای یک سلول با شناسه گره i,j,k در یک شبکه مدل نوشته می‌شود؛ که بیانگر روابط میان سطوح آب در گره i,j,k و همچنین در تمامی شش سلول مجاور آن در پایان دوره زمانی است. به دلیل آنکه ممکن است هر معادله درگیر هفت مقدار مجهول شود، و به این دلیل که مقدار نامشخص سطح آب در هر معادله تا مقدار بعدی در شبکه تغییر می‌کند، مقدار معادله وارد شده در شبکه باید به شکل متقارن در هر گام زمانی حل شود. در اصل شکل معادلات جریان به صورت ماتریسی معادله (۲) در نظر گرفته می‌شود.

$$[A]\{h\} = \{q\} \qquad (۲)$$

که در آن [A] ماتریس ضراب سطح آب، {h}یک بردار مقادیر سطح آب، و {q} معادل بردار شرایط سمت راست معادله جریان است.. نکته قابل توجه آن است که ماتریس [A] به صورت Sparse است، به این معنی که تعداد بسیار کمی از عناصر آن ناصفر می‌باشد، و تمامی قطرهای آن به جز هفت مورد دارای مقادیر صفر شده است و بر همین پایه از تئوری امکان اجرای تفاضل محدود معادلات جریان میسر می‌گردد.

موقعیت جغرافیایی آبخوان مورد مطالعه

دشت نهاوند با وسعت حوضه آبریز ۱۶۹۰ کیلومتر مربع یکی از دشت های حوضه عملیاتی آبریز کرخه می‌باشد که در شمال شرق ارتفاعات زاگرس قرار گرفته است. شهر نهاوند با مختصات جغرافیائی در موقعیت ۴۸ درجه و ۲۴ دقیقه طول شرقی و ۲۳ درجه و ۲۲ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. آبخوان آبرفتی این ناحیه از نوع آزاد است که در نواحی غربی بیشترین ضخامت را دارا می‌باشد. در سایر نقاط دشت و بویژه نواحی شرقی حوضه نیز زهکش‌ها و جریانات زیرسطحی محدودی وجود دارد که عمدتا در زیر بستر آبراهه‌ها و مسیل‌ها جریان داشته و آبخوان‌های محدود و محلی با توان آبدهی ضعیفی را بوجود آورده‌اند و معمولا توسط قنوات و چاه‌های نیمه عمیق کم آب بهره‌برداری می‌گردند. نتایج حاصل از حفاری چاه‌های مشاهده‌ای گویای آن است که سنگ کف بخش وسیعی از دشت از جنس مارن و گچ سازند گچساران بوده و در حاشیه ارتفاعات شرق دشت شرقی نیز اغلب از جنس آهک مارنی و بخش‌هایی از نواحی غربی دشت شرقی و نواحی شرقی دشت میانی شامل ماسه سنگ و کنگلومرای سازند بختیاری می‌باشد. لایه‌های ماسه سنگی و مارنی سازند آغاجاری نیز بخش‌هایی از سنگ کف دشت غربی را تشکیل می‌دهد. این سنگ کف، ساختار ناودیس گونه داشته و شیب عمومی آن از حاشیه ارتفاعات شمال و شمال غرب بطرف جنوب و جنوب شرق می‌باشد. جهت جریان آب‌های زیرزمینی این ناحیه تقریباً در تمام نقاط همسو با جهت جریانات سطحی و در مجموع از جنوب و جنوب شرق بطرف شمال و شمال غرب می‌باشد. شیب سطح آب زیرزمینی این ناحیه در شمال دشت حدود ۵ در هزار می‌باشد که به طرف پهنه‌های آبرفتی نواحی میانی دشت شرقی به حدود ۱۳در هزار می‌رسد و به سمت نواحی انتهایی دشت نیز از مقدار آن کاسته می‌شود. در پهنه آبرفتی نواحی میانی حوضه نیز شیب در ورودی دشت حدود ۲ در هزار و در نواحی انتهایی دشت حدود ۷ در هزار می‌باشد. دشت نهاوند و ارتفاعات پیرامون آن (محدوده طبیعی نهاوند) یک حوضه باز است. علاوه بر این‌که شبکه‌های جاری داخل این حوضه به خارج از آن زهکشی می‌شوند، همچنین دارای جریان‌های ورودی ازحوضه‌های مجاور نیز می‌باشد، که عبارت‌اند از رودخانه خرم آباد ملایر و قُلقُل رود تویسرکان. هر دو رود از شمال با برشی که در ارتفاعات شمالی نهاوند ایجاد کرده‌اند وارد دشت نهاوند شده و به رودخانه گاماسیاب می‌پیوندند. شکل (۱) مدل سه‌بعدی آبخوان مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل (۱): مدل سه بعدی آبخوان نهاوند

اجرای مدل عددی

پس از توسعه مدل مفهومی بر پایه شرایط رابط گرافیکی و پیش پردازش داده‌های خام، در گام اول مدل به فرم پایدار و به شکل پیشرو در نسخه ۱۰ نرم افزار GMS اجرا شد. نهایتا موتور محاسباتی PCG2 با ۱۰۰ تکرار Outer و Inner و با حد بحرانی تغییرات همگرایی ۰/۰۱ متر و همچنین حد بحرانی خطای همگرایی ۰/۰۱ متر مکعب در روز انتخاب گردید. دوره زمانی انتخاب شده برای واسنجی و صحت سنجی یک دوره ۱۰ ساله از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ در نظر گرفته شد. ۱۰۸ ماه از این دوره برای واسنجی و ۱۲ ماه برای صحت سنجی درنظر گرفته شد. نهایتا برای پیش‌بینی وضعیت آینده تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی برای کاهش مصرف ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد چاه‌های کشاورزی بررسی گردید.

نتایج و بحث

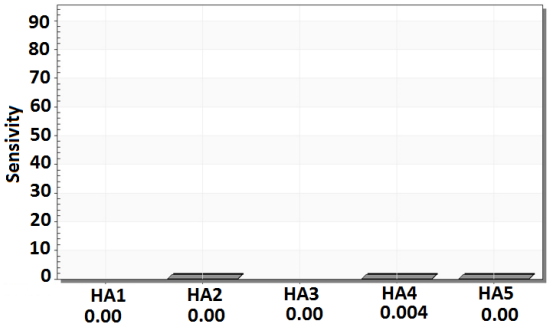
واسنجی مدل

به منظور انجام عملیات واسنجی در شرایط ماندگار و غیر ماندگار با اختصاص یک عدد کلیدی منفی و مجزا به پوشش‌های مدل مفهومی و با حدس اولیه در حدود کمینه و بیشینه معقول، پارامترهای هدایت هیدرولیکی افقی، ناهمسانگردی افقی هدایت هیدرولیکی، تغذیه از سطح، آبدهی ویژه، مرزهای تراوا و شبکه آبراهه‌ای بهینه شد. پس از اجرای مدل واسنجی با ۳۰ بار تکرار، مقادیر بهینه نهایی پارامترها ارائه شده است و مقادیر بهینه پارامتر هدایت هیدرولیکی افقی، ناهمسانگردی افقی، آبدهی ویژه و تغذیه از سطح نیز در قالب نقاط پایلوت استخراج گردید.

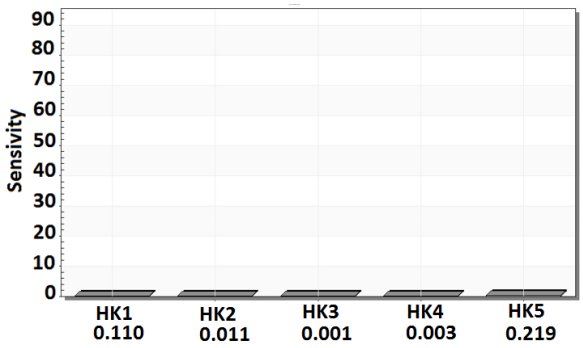
تحلیل حساسیت

به منظور بررسی اهمیت هر یک از پارامترهای واسنجی و استخراج سهم هر یک در کاهش خطای کل از تحلیل حساسیت استفاده می‌گردد. در مرحله واسنجی ناپایدار جهت کاهش خطای کل و همچنین پیشگیری از انتقال عمده خطا بر روی یک پارامتر منحصربفرد، مجموعا با چهار بار اصلاح مدل مفهومی نتایج بهینه حاصل شد. در هر مرحله اصلاحی، با استفاده از نمودارهای تحلیل حساسیت، بررسی تأثیر تمامی پارامترهای دخیل در گام واسنجی مقدور بود. نمودارهای تحلیل حساسیت در مرحله واسنجی ناپایدار به شرح اشکال (۲) تا (۷) بود. در این اشکال، محور

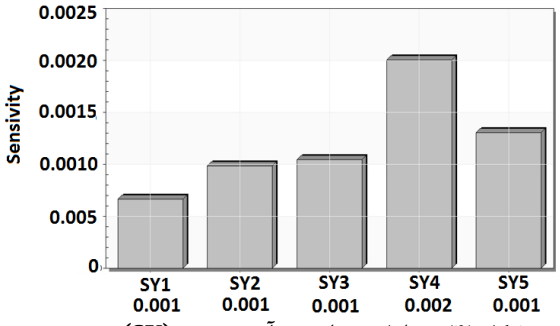
افقی شماره پایلوت و محور عمودی واریانس خطا را برای آخرین تکرار واسنجی نمایش می‌دهد.



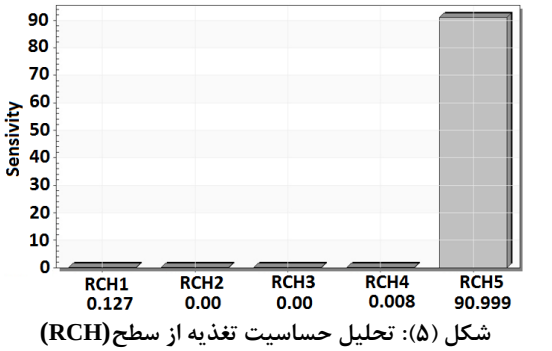
شکل (۲): تحلیل حساسیت ناهمسانگردی افقی(HA)



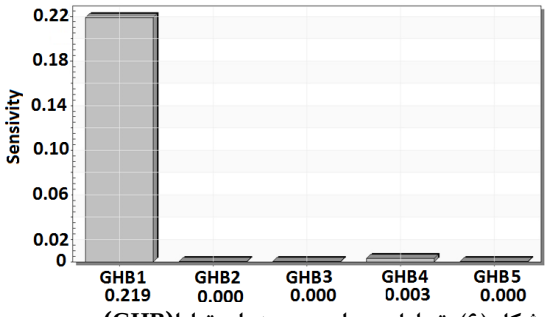
شکل (۳): تحلیل حساسیت هدایت هیدرولیکی افقی(HK)



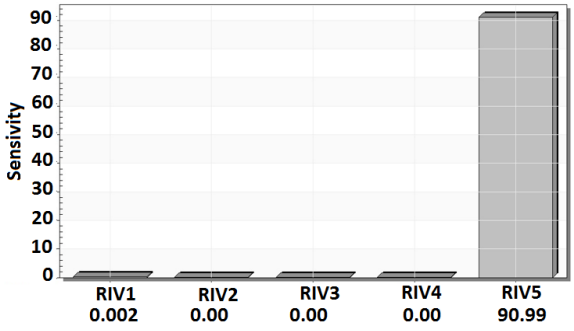
شکل (۴): تحلیل حساسیت آبدهی ویژه(SY)



شکل (۵): تحلیل حساسیت تغذیه از سطح(RCH)



شکل (۶): تحلیل حساسیت مرزهای تراوا(GHB)



شکل (۷): تحلیل حساسیت شبکه آبراهه‌ای(RIV)

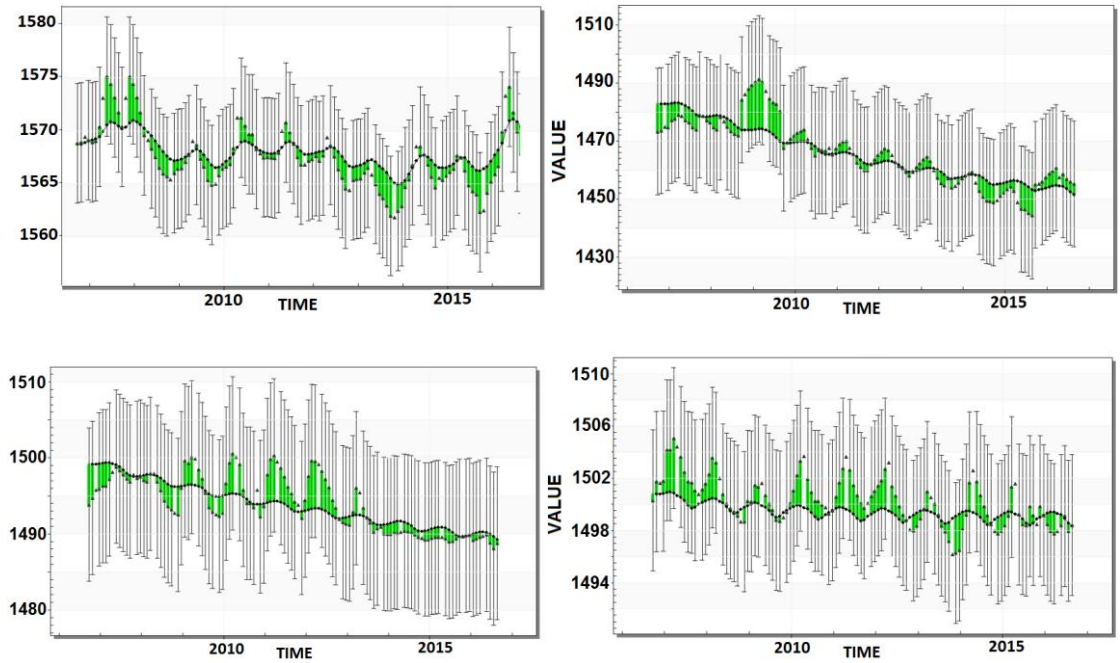
در این پژوهش، از روش تحلیل حساسیت تلفیق شده با مرحله واسنجی استفاده شده است. نتایج خروجی از آنالیز حساسیت پارامترهای موثر در واسنجی آبخوان نهاوند، نشان دهنده تأثیر حدأکثری تغذیه از سطح در عدد کلیدی ۱۳ به عنوان شناسه پایلوت‌های واسنجی و همچنین تأثیر اندک پایلوت‌های هدایت هیدرولیکی افقی بود؛ بعلاوه در نمودار

اشکال بالا می‌توان تأثیر پایین پایلوت‌های ناهمسانگردی افقی هدایت هیدرولیکی را مشاهده نمود. درباره واسنجی صورت گرفته بر آبدهی ویژه پایلوت شماره ۱۲، پارامتر مرزهای تراوا خط شماره ۵۰ و شبکه آبراهه‌ای خط شماره ۱۳ را دارای بیشتر اثر کاهش خطا در آخرین تکرار دانست. بر همین اساس، ویرایش‌های صورت گرفته بر مرزهای با بار هیدرولیکی پویا (مدل مفهومی) در حدود پارامترهای با حساسیت زیاد، خطای کل واسنجی را در آخرین مرحله از مراحل چهار گانه واسنجی به حدأقل مطلوب کاهش داد.

به این ترتیب مقدار خطای نسبی RMSE معادل با ۲/۶۱ می‌باشد. این عدد بسته به مقدار پایه خطا می‌تواند حدود متفاوتی را اختیار کند، بنابراین برای فهم بهتر از مقدار مطلوب این خطای نسبی باید آن را نرمال سازی کرد. به این مفهوم که بر اساس معادله (۳) به NRMSE تبدیل شود.

$$NRMSE=[RMSE/(MAXObs-MINObs)] \quad (۳)$$

همچنان که دیده می‌شود. نتیجه معادله بالا به صورت درصد خواهد بود که اگر مقدار این درصد کمتر از ۱۰٪ باشد مدل سازی مطلوب، اگر کمتر از ۳۰٪ باشد مدل سازی مناسب اما با مقدار مشخصی خطای قابل بررسی، و اگر بیش از این مقدار باشد دارای خطای بزرگ قابل بررسی است.



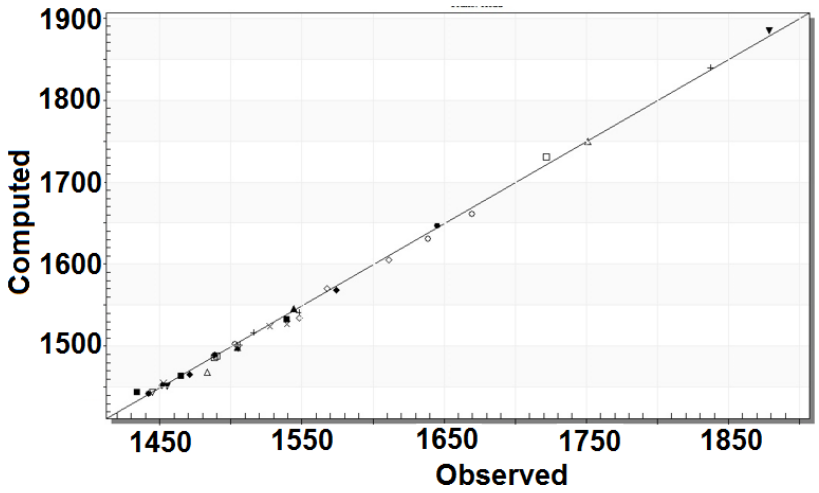
شکل (۸):خطای شماتیک مقادیر مشاهداتی در مقابل داده‌های محاسباتی چهار چاه مورد بررسی

در اینجا با تقسیم رقم RMSE بدست داده شده معادل با ۲/۶۱ بر حدود ۱۲/۳۷ متر اختلاف بیشینه از کمینه، منتج از میانگین حسابی پیزومترهای منطقه، مقدار ۲۱٪ معادل با مدل سازی مناسب حاصل شد. شکل (۸) چهار چاه مشاهداتی تصادفی با پراکندگی جامع در سطح دشت را برای نمایش نتایج واسنجی مطلوب نشان می‌دهد. در این نمودارهای محور افقی گام‌های زمانی و محور عمودی تراز سطح آب را نمایش می‌دهد.

صحت سنجی

برای اطمینان از مدل ساخته شده در آبخوان نهاوند، فرآیند واسنجی در یک دوره ۱۰۸ ماهه صورت پذیرفت و بنابراین با توجه به ۱۲۰ ماهه بودن بازه مطالعاتی، گام صحت‌سنجی عملا برای ۱۲ ماه آتی ۱۰۸ ماه ابتدایی شکل گرفت که خطای اندک در مرحله صحت‌سنجی موید دقت در واسنجی صورت گرفته و صحت هیدروگراف سلول‌های شبکه ریاضی بود. نمودار شبیه‌سازی سطح آبخوان در دوره

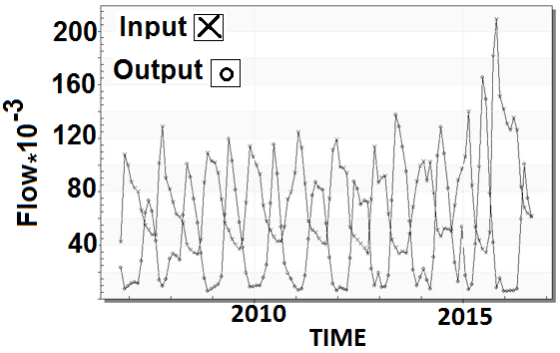
زمانی ۱۲۰ ماهه برای همه چاه‌های مشاهداتی، با حدأقل خطای مطلوب حاصل گردید که در شکل (۹) نمودار خطا برای این مرحله آمده است. در این شکل محورهای افقی و عمودی به ترتیب مقادیر محاسباتی و مشاهداتی تراز سطح آب را نشان می‌دهد.



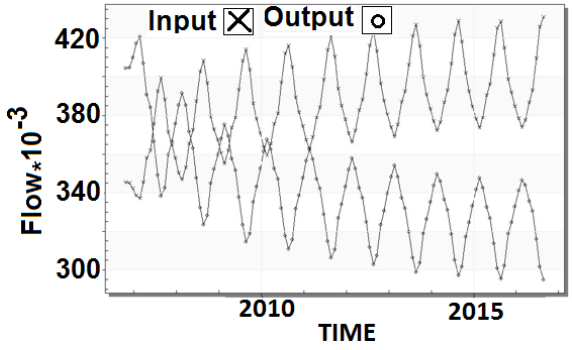
شکل (۹): خطای مقادیر محاسباتی در مقابل داده‌های مشاهداتی در مرحله صحت سنجی

بیلان خروجی مدل

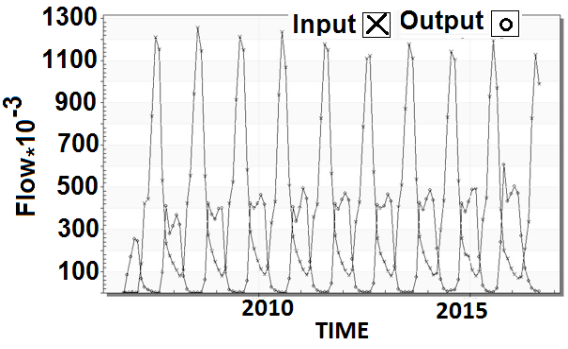
مدل Flow_Budget یک موتور ریاضی است که توسط USGS برای محاسبه بیلان آبی در مدل MODFLOW توسعه یافته است. اعداد استخراجی از موتور FlowBudget سوار بر مدل واسنجی شده MODFLOW نشان می‌دهد در دوره ۱۲۰ ماهه شبیه‌سازی به شکل متوسط در طی ده سال در حدود ۹۱۰ میلیون متر مکعب آب از ذخیره ثابت آبخوان کاسته شده است؛ اشکال (۱۰) تا (۱۳) بیلان المان-های مهم آبخوان را نشان می‌دهد.



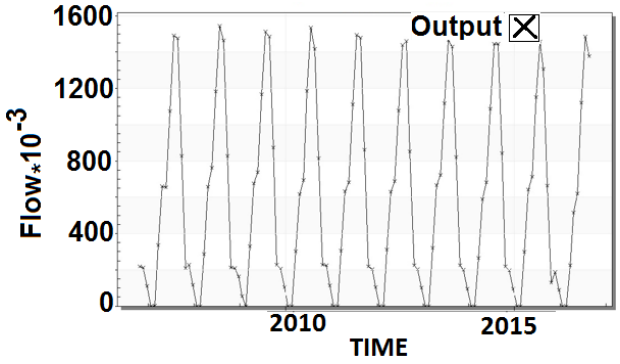
شکل (۱۰): جریان ورودی و خروجی از مرزهای با بار پویا



شکل (۱۱): حجم جریان تخلیه و تغذیه شبکه آبراهه‌ای

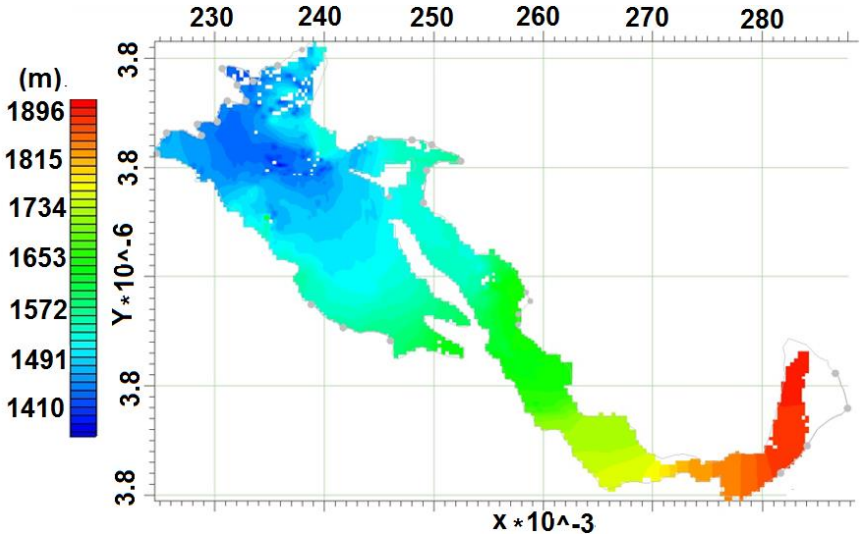


شکل (۱۲): حجم ذخیره ورودی و خروجی



شکل (۱۳): حجم برداشت توسط چاه‌های بهره برداری

اشکال (۱۰) تا (۱۳) مشخص می‌کند که مقدار آب ورودی به ناحیه علاوه بر وابستگی به شرایط فیزیکی آبخوان نهاوند، نظیر ضرایب هیدرودینامیکی و ثقل، به مقدار دبی پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری وابستگی مستقیم دارد. بنابراین با افزایش برداشت از آبخوان تغییر در مقدار حجم جریان تبادلی از المان‌های موثر در بیلان قابل انتظار خواهد بود. شکل (۱۴) سطح آب زیرزمینی آبخوان نهاوند را در آخرین گام زمانی بازه ۱۲۰ ماهه نشان می‌دهد.



شکل (۱۴): تراز آب زیرزمینی آبخوان نهاوند در پایان دوره با ادامه روند برداشت حاضر از چاه‌ها

پیش بینی

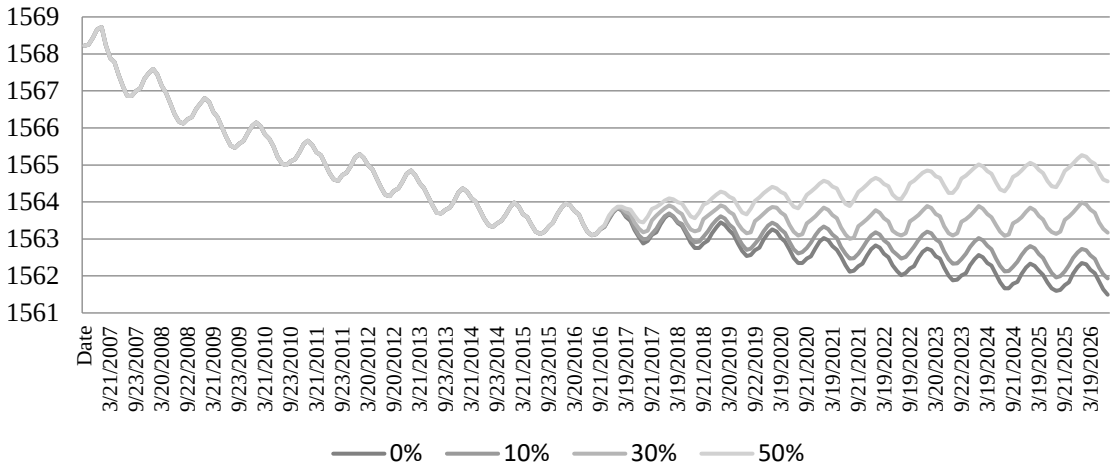
بهمنظور پیش بینی شرایط آتی آبخوان نهاوند می‌توان از مدل تفاضل محدود در بازه‌ای معادل با طول دوره شبیه‌سازی استفاده کرد. این امر منوط به امتداد شرایط مرزی آبخوان برای سال پایانی مدل‌سازی است. انتخاب یک سال به عنوان تغییر شرایط بر پایه این نکته است که تغییر فصول بر سطح آب زیرزمینی در یک سال موثر است. در شکل (۱۹)، سه سناریو برای آینده در نظر گرفته شده است.

عمده دلیل افت کیفیت پارامترهای آب زیرزمینی که با افزایش غلظت نمایش داده می‌شود را می‌توان وابسته به تنها عامل تغییرات کمی یعنی برداشت‌های زارعان و در مقدار محدودی شرب و صنعتی دانست. چاه‌های بهره‌برداری در این بازه زمانی روند برداشت افزایشی داشته و همچنین بر تعدد منابع هم افزوده شده است. این به همراه چاه‌های غیر مجاز و دبی‌های غیر مجاز عامل درجه یک افت کیفیت منابع آبی دشت نهاوند برشمرده می‌شود. با این حال آنچنان

که در بخش بیلان مشاهده شد، ظرفیت استحصال در پی آسیب آبخوان کاهش یافته است.

به منظور پیش بینی شرایط آتی آب زیرزمینی نهاوند، با توجه به اینکه آبخوان از مرحله بحران عبور کرده و احتمال تشدید تصاعدی این شرایط وجود دارد، از مدل MODFLOW بدست داده شده به منظور پیش بینی روند تغییرات هیدروگراف واحد آبخوان در بازه‌ای معادل با دوره شبیه سازی استفاده شد. نتایج این پیش بینی در سه مورد سناریو که بر پایه تغییر دبی بهره برداری بخصوص بر چاه-های کشاورزی تعریف شد می‌باشند.

شکل (۱۵) هیدروگراف واحد بهره برداری را برای یک نمونه چاه منتخب تصادفی، در گستره آبخوان نهاوند نشان می‌دهد. به این ترتیب در هر مورد اعمال سناریو از شدت استخراج آب با درصدهای معین کاسته شده است.



شکل (۱۵): هیدروگراف واحد آبخوان دشت نهاوند در سناریوهای پیش بینی کاهش برداشت

همچنان که در شکل بالا قابل مشاهده است. سناریو اول امتداد شرایط حاضر بر پایه دبی در آخرین سال بهرهبرداری (مدل سازی) و با تثبیت شرایط مرزی و تثبیت روند تغییرات خطی و غیرخطی المان‌های مدل می‌باشد. سه سناریو دیگر که به ترتیب ۱۰ درصد، ۳۰ درصد و ۵۰ درصد کاهش برداشت از چاه‌های کشاورزی می‌باشد. بر طبق شکل، کاهش ۵۰ درصدی برداشت تنها سناریویی است که می‌تواند سبب افزایش تراز سطح آب زیرزمینی گردد. در صورتی که قرار بر تثبیت شرایط باشد، کاهش ۳۰ درصدی برداشت می‌تواند این سناریو را تثبیت کند.

نتیجه گیری

توسعه مدل ریاضی تفاضل محدود و با شرط واسنجی مطلوب، مستلزم وجود طیف وسیعی از داده‌های هیدروژولوژیکی و هیدرولوژیکی آبخوان است. در آبخوان نهاوند مدل ریاضی MODFLOW در دوره ۱۰۸ ماه مورد واسنجی و در ۱۲ ماه مورد صحت سنجی قرار گرفت. مقدار نرمال شده خطای نسبی NRMSE به عدد ۲۱ درصد، موید مدل سازی مطلوب پس از بررسی فرآیند صحت سنجی بود که با پژوهش Chakraborty و همکاران (۲۰۲۰)، مطابقت نشان می‌دهد. بررسی شرایط بیلان خروجی مدل MODFLOW نشان می‌دهد که بیشتر مقدار حجم جریان از طریق منابع بهره برداری و بخصوص چاه‌های با ماهیت کشاورزی از حجم ذخیره ثابت آبخوان کسر می‌گردد. طبق پژوهش Gaura و همکاران (۲۰۱۱) در حوضه رودخانه بنگانای هند، افزایش تخلیه از چاه‌ها تنش زیادی روی آبخوان اعمال می‌کند که با ایجاد تغذیه مصنوعی در مناطق مناسب می‌توان از افت سطح آب زیرزمینی جلوگیری کرد.

بعلاوه بررسی‌ها نشان داد که بخش عمده‌ای از کسری مخزن در فصول تر از مرزهای پویا با توجه به قرارگیری ناحیه مطالعاتی در محدوده کوهستانی تأمین می‌گردد. بخشی از شبکه آبراهه‌ای این محدوده، مشخص کننده نقش زهکشی تعدادی از آبراهه‌ها می‌باشد. این نقش بخصوص در نواحی با ارتفاع کمتر دشت که سرعت و جهت جریان بیشتر و متراکم‌تر است مشاهده می‌شود. با این وجود سهم تغذیه کننده بودن آبراهه‌ها در بازه مطالعاتی بسیار بیش‌تر از نقش زهکشی آنها بوده است. در بخش پیش بینی مدل در بازه‌ای معادل دوره شبیه سازی، سناریو اول امتداد شرایط حاضر بر پایه دبی در آخرین سال بهره برداری (مدل سازی) و با تثبیت شرایط مرزی و تثبیت روند تغییرات خطی و غیرخطی المان‌های مدل می‌باشد. سه سناریو دیگر که به ترتیب ۱۰ درصد، ۳۰ درصد و ۵۰ درصد کاهش برداشت از چاه‌های کشاورزی بود. به بیانی دیگر بر اساس چهار سناریوی پیش بینی بر روی مدل شبیه سازی کمی آبخوان، اقدام به تولید رقوم سطح آب در ده سال متوالی پس از ابتدای ماه پایانی شبیه سازی در نرم افزار GMS شد. بر این طریق که تمامی شرایط بر طبق آخرین سال در نظر گرفته شد. دبی چاه‌های بهره برداری به عنوان یکی از اساسی ترین عناصر تاثیرگذار بر تغییرات سطح آب در آبخوان به مقادیر ۰ و ۱۰ و ۳۰ و ۵۰ درصد کاهش داده شد. این کاهش در کل آبخوان یکسان بود. دبی پایه در هر سناریو آنچنان که اشاره شد، ۱۲ ماهه منتهی به آخرین تاریخ مدل سازی اولیه بود. می‌توان بیان داشت که کاهش برداشت کمتر از ۳۰ درصد نمی‌تواند روند نزولی تراز آبخوان را متوقف نماید. مقدار کاهش ۳۰ درصدی دبی بهره‌برداری منجر به ایجاد شرایط ثابت و کاهش بیش از آن تا مقدار ۵۰ درصد قادر به جبران کسری مخزن در دوره‌ای بلند مدت است. نکته مهم در تاخیر جبران کسری مخزن با وجود کاهش ۵۰ درصدی برداشت را می‌توان در از دست رفتن بخشی از قابلیت ذخیره سفره دانست. پورحقی و همکاران(۱۳۹۴) برای دشت دلفان لرستان گزینه شرایط بهره‌برداری فعلی و همچنین کاهش ۲۰ درصدی بهره‌برداری را برای ۱۰ سال آینده اجرا کردند که نشان داد سطح آب زیرزمینی حتی برای ۲۰ درصد کاهش بهره‌برداری نیز افت خواهد داشت. بنابراین در این دشت نیز مانند دشت مورد پژوهش، کاهش مصرف آب زیادی مورد نیاز می‌باشد. این مساله نشان دهنده وضعیت بغرنج دشت‌های کشور در شرایط حاضر است. به این ترتیب باید از راهکارهای دیگری چون روش‌های تغذیه مصنوعی نیز استفاده شود. با وجود غیر واقع بینانه بودن اعمال کاهش برداشت ۳۰ تا ۵۰ درصد بر روی دبی بهره برداری چاه‌های منطقه، تنها در این حالت است که برای دوره‌های آتی می‌توان انتظار جلوگیری از افت بیش از پیش کیفیت و یا برگشت شرایط به دوره‌های پیشین را داشت.

منابع

بیان، م. فصیحی، ر. و زارع. ح. ۱۳۹۷. شبیه‌سازی عددی مسیر جریان آب زیرزمینی آبخوان دشت همدان–بهار. مجله سلامت و محیط زیست، فصلنامه علمی پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط ایران. ش۱۱(۱)، ص ۴۹-۶۲.

پورحقی، ا. رادمنش، ف. و ملکی. ع. ۱۳۹۴. شبیه سازی آبخوان دشت لرستان- دلفان و بررسی سناریوهای مدیریتی با استفاده از مدل MODFLOW . نشریه آب و خاک. شماره ۲۹(۴)، ص ۸۸۶-۸۹۷.

جعفرزراده، ا.، سیوکی، ع. و پورضا، م. ۱۳۹۹. ارزیابی عملکرد روش‌های عددی در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان بیرجند). مجله پژوهشی هیدروژئولوژی. انتشار آنلاین.عزیزی، ف. اصغری مقدم، ا. و ناظمی، ا. ۱۳۹۸. شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و نفوذ آب شور در آبخوان دشت ملکان. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۳(۴۵): ص ۳۲-۴۳.

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

Chakraborty, S., Maity, P.K. & Das, S. (2020) .Investigation, simulation, identification and prediction of groundwater levels in coastal areas of Purba Midnapur, India, using MODFLOW. Environment, Development and Sustainability V22, P3805–3837.

Cho, J. Barone, V, A. Mostaghimi, S., 2009, Simulation of land use impacts on groundwater levels and streamflow in a Virginia watershed, agricultural water management, V 96, P 1–11.

Gaura, S. Chahar, B, R. Graillota, D., 2011, Combined use of groundwater modeling and potential zone analysis for management of groundwater, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, V 13, P 127–139.

Hu, Y. Moiwo, J, P. Yang, Y. Han, S. Yang, Y., 2010, Agricultural water-saving and sustainable groundwater management in Shijiazhuang Irrigation District, North China Plain, Journal of Hydrology, V 393, P 219–232.

Lachaal, F. Mlayah, A. dir, M, B. Tarhouni, J. Leduc, C., 2012, Implementation of a 3-D groundwater flow model in a semi-arid region using MODFLOW and GIS tools: The Ze ´ ramdine–Be ´ni Hassen Miocene aquifer system (east-central Tunisia), Computers & Geosciences, V 48, P 187–198.

Page, M, L. Berjamy, B. Fakir, Y. Bourgin, F. Jarlan, L. Abourida, A. Benrhanem, M. Jacob, G. Huber, M. Sghrer, F. Simonneaux, V. Chehbouni, G., 2012, An Integrated DSS for Groundwater Management Based on Remote Sensing. The Case of a Semi-arid Aquifer in Morocco, Water Resour Manage, V 26, P 3209–3230.

Yang, F, R. Lee, C, H. Kung, W, J. Yeh, H, F., 2009, The impact of tunneling construction on the hydrogeological environment of Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project in Taiwan, Engineering Geology, V 103, P 39–58.

Yaoutia, F, E. Mandourb, A, E. Khattacha, D. Kaufmannc, O., 2008, Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco), Journal of Hydro-environment Research, V 2, Issue 3, P 192–209.

Simulation of Groundwater Level in Nahavand Plain Using MODFLOW

Yousef Kakavand[1], Javad Mozaffari [2]*

Abstract

Understanding the trends of groundwater level changes and its prediction can be important in water resources management. In this study, the simulation of groundwater level changes in Nahavand plain was performed using MODFLOW mathematical model and considering the parameters affecting the phenomenon. First, the calibration and validation process was performed over a statistical period of 120 months. Then, four scenarios (current harvest conditions and 10, 30 and 50% reduction in agricultural wells harvesting) were investigated to predict future groundwater level changes. The results indicate that the mathematical model used to simulate the Nahavand aquifer has 21% relative error of NRMSE, which confirms the proper modeling after considering the prediction process. It was also found that 0 and 10% scenarios would decrease groundwater level in the future .A 30% reduction in operating capacity leads to constant conditions and a reduction of more than 50% creates a positive balance in the long term.

Key words: MODFLOW, Aquifer, Budget, Agriculture well

[1] MSc student, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment ،Arak University, Yousefkakavand@gmail.com

[2] Corresponding Author, Associate Professor, Faculty of Agriculture and Environment ،Department of Water Science and Engineering, Arak University, Water Research Institute Javad_370@yahoo.com