



Environment and Water Engineering

Homepage: www.jewe.ir



ISSN: 2476-3683

Research Paper

Numerical Simulation of Bijar-Divandere Plain Aquifer Using MODFLOW Code and Investigation in the Effects of Drought on Its Quantitative Changes

Houshang Ghamarnia^{1*}, Seyedeh Somayeh Enayati Hosseini² and Ata Amini³

¹Professor, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran

²M.Sc. Alumni, Department of Water Resource Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran

³Assoc. Professor, Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sanandaj, Iran

Article information

Received: May 07, 2021

Revised: June 05, 2021

Accepted: June 16, 2021

Keywords:

Kurdistan

Sedimentation

Erosion

Soil Protection

Watershed

*Corresponding author:

hghamarnia@razi.ac.ir



Abstract

In this study, quantitative changes in groundwater in Bijar-Divandere plain with MODFLOW code in GMS software were investigated. Aquifer simulation was performed for a period of six years and a monthly step from October 2010 to June 2016. The SPI annual drought index was calculated for the statistical period of 1987-2015. The results of groundwater simulation showed that during the annual simulation period, there was a decrease of about 0.5 m water level in the aquifer, the intensity of which varied in different areas. Therefore, due to the decrease and taking into account the area and the average amount of storage capacity of the aquifer, the volume of the aquifer has been reduced by about 1.3 MCM per year. The results showed that if the current management process continues, over the next few years we will see a sharp decline in the aquifer and irreparable damage. The results of SPI index also indicated that the drought situation was close to normal, which means that drought has a much lesser effect on the groundwater level of the aquifer in different years.

© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open access article distributed under the CC BY) license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.



Introduction

Groundwater aquifers are unignorable and important freshwater resources. In addition, they are very sensitive to contamination caused by the rapid infiltration of contaminated surface waters. Moreover, Groundwater modeling has been proposed in the recent years as a powerful tool in management, optimization of consumption and forecasting of groundwater resources. In drought condition, groundwater resources play the most important role to compensate different water resources needs. Therefore, it is vital to study and pay attention to the issue of drought to prevent the intensification of damage and its negative conditions. In relation to Bijar-Divandere plain located in Kurdistan province, Iran, no studies have been done so far, and on the other hand, literatures and field visits show quantitative and qualitative changes and a decrease in groundwater aquifer level in the mentioned plain. Therefore, the objective of this study was to simulate groundwater level changes and investigate the effect of drought on the groundwater quantity of the plain using MODFLOW code and SPI drought index.

Material and Methods

The present study was conducted in the Bijar-Divandere study area with code 1309 located in Kurdistan province, in northwestern Iran. According to Demarten classification, the area has a semi-arid climate, land and a structure of sedimentary rocks, especially clay, limestone and sandy mixtures, which is related to the changes of the third geological period. To simulate the groundwater flow of the plain aquifer, the MODFLOW code from the codes in the GMS software was used. To investigate the observational and simulated level of groundwater in the study area, different data of 26 observation wells during statistical period of 6 years (October 2010 to June 2016) were used. Nevertheless, for drought investigation by standard rainfall index, meteorological data used were from year 1987 – 2015. In the studied aquifer, the groundwater level was first plotted by observation wells and

the inlet and outlet flows were determined by drawing iso-potential lines in the aquifer. The groundwater flow equation in the free aquifer under non-steady flow conditions is as equation (1).

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

Where, S_y special watering coefficient, K_x , K_y and K_z are respectively hydraulic coefficient in the direction of x, y and z axes in terms of (l/T), h is the hydraulic head at any point in the aquifer in terms of (l) and " Δx ", Δy and " Δz " are the dimensions of the grid cells (L). The model was calibrated with corrections in the values of hydraulic conductivity and monthly distribution of source and drain parameters of the aquifer. The accepted values at this stage were then taken as the baseline values for further calculations. Drought was assessed using the SPI index in the basin as Eq. (2).

$$SPI = \left(\frac{P_i - P}{SD} \right) \quad (2)$$

Where, P_i is the annual rainfall and P is the average long-term rainfall and SD is the standard deviation of rainfall during the statistical period.

Results

The results showed that the north of the aquifer had hydraulic conductivity with values between 9 to 13 m/day. The lowest value belonged to the eastern part of the aquifer, which varies from 6 to 7.5 m/day. The central area of the aquifer also had values ranging from 7.5 to 9 m/day. In the simulation of groundwater for the steady state conditions (Fig. 1) according to the results obtained for RMSE = 0.8 m, MAE = 0.73 m and $R^2 = 0.999$, the model was able to simulate the groundwater level values with suitable accuracy. For unstable state condition, based on the results of RMSE = 0.88 m, MAE = 0.85 m and $R^2 = 0.99$, the model was able to perform simulation operations with appropriate accuracy as well. The results of the evaluation of SPI drought indices on an annual basis at the 1987-2015 are presented in Table (1).

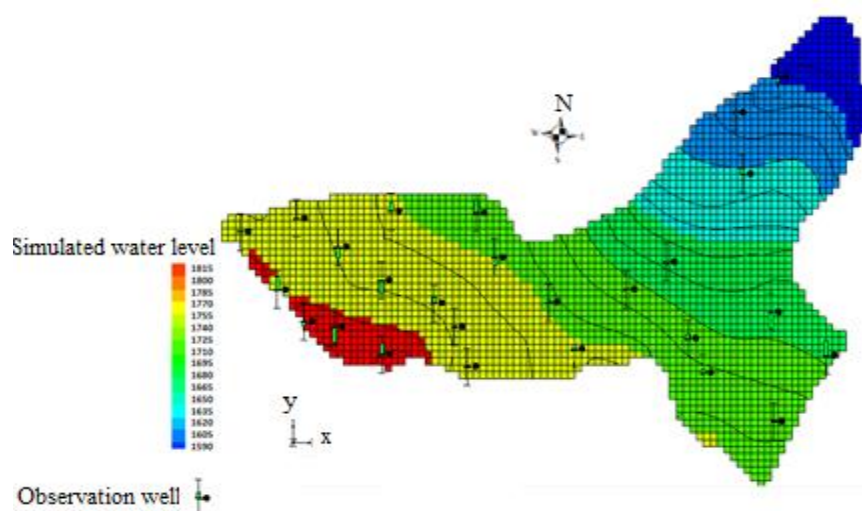


Fig. 1 Simulated groundwater level and calibrated observation wells at steady state condition

Table 1 Status of different years in terms of drought (near to normal) according to SPI drought index

Year	SPI	Year	SPI
1987	0.051	2001	-0.25
1988	0.035	2002	-0.06
1989	-0.009	2003	0
1990	-0.054	2004	-0.015
1991	0.025	2005	-0.044
1992	-0.011	2006	-0.009
1993	0.19	2007	0.31
1994	0.094	2008	0.039
1995	0.024	2009	0.023
1996	0.025	2010	0.03
1997	-0.015	2011	-0.066
1998	-0.017	2012	-0.124
1999	-0.080	2013	-0.010
2000	-0.030	2014	0.008

The SPI index indicates a normal upward statistical period in the aquifer under study. In the period 1997-2002, the highest duration of drought was observed on an annual scale for seven years. In the period 1975-2005, four different drought periods were observed on an annual scale, which are: 1989, 1990, 1997-2002, 2006-2004, 2013-2011. The highest value of SPI index was related to 2007 with a value of 0.31 and the lowest value of SPI index is related to 2001 with a value of -0.25. In general, the results indicated that the model was able to show, well groundwater level changes behavior in aquifer. Therefore, it can be used to implement management scenarios. The results showed that in the study area and during the period of investigation, severe drought did not occur and often the phenomenon of drought with intensity and extent was very low and close to normal. From the results of drought and the decrease of

groundwater level in the same period, it can be concluded that in the aquifer under study, the decrease of groundwater level was not effective due to drought.

Conclusion

According to the findings of this study, it can be concluded that: there was no severe drought and most of the drought phenomenon was very low in intensity and limits and close to normal; in Bijar-Divandarreh plain of Kurdistan province, the decrease of groundwater level was not effective due to drought, but also the other factors such as harvesting increase, climate change and the area under cultivation increase could play a role; during of the annual simulation period, a decrease of 0.5 m in the aquifer was occurred; The volume of Bijar-Divandere plain aquifer was reduced by about 1.1 MCM annually; Different management solutions, such as installing volumetric meters on existing and active wells, blocking unauthorized wells, and other management strategies such as artificially feeding in suitable areas and change of cultivation pattern are necessary to be able for preventing of groundwater draw down.

Data Availability

The data used in this research are presented in the paper.

Conflicts of interest

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



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir



مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی عددی آبخوان دشت بیجار - دیواندره با استفاده از کد MODFLOW و بررسی تأثیرات خشک‌سالی بر تغییرات کمی آن

هوشنگ قمرنیا^{۱*}، سیده سمیه عنایتی حسینی^۲ و عطا امینی^۳

^۱استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
^۲دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
^۳دانشیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سنندج، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: [۱۴۰۰/۰۲/۱۷]

اریخ بازنگری: [۱۴۰۰/۰۳/۱۵]

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۰/۰۳/۲۶]

واژه‌های کلیدی:

آب زیرزمینی

آبخوان

شاخص SPI

مدل مفهومی

*نویسنده مسئول:

hghamarnia@razi.ac.ir

در این پژوهش به بررسی تغییرات کمی آب زیرزمینی دشت بیجار- دیواندره با کد MODFLOW موجود در نرم‌افزار GMS پرداخته شد. شبیه‌سازی آبخوان برای یک دوره شش ساله و گام ماهانه از مهر سال ۱۳۸۹ تا خرداد سال ۱۳۹۵ انجام و شاخص خشک‌سالی SPI نیز برای دوره آماری ۱۳۶۶-۱۳۹۴ محاسبه شد. نتایج شبیه‌سازی آب زیرزمینی نشان داد که در طول دوره شبیه‌سازی سالانه در حدود ۰/۵ m افت در آبخوان ایجاد شده که شدت آن در ناحیه‌های مختلف متفاوت بود. لذا، با توجه به افت ایجاد شده و با در نظر گرفتن مساحت و مقدار متوسط ضریب ذخیره آبخوان موردنظر، سالانه در حدود ۱/۱ MCM از حجم آبخوان کاسته شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشانگر آن است که اگر همچنان روند مدیریت کنونی ادامه یابد، در طول چند سال آینده شاهد افت شدید آبخوان و خسارت جبران‌ناپذیری خواهیم بود. نتایج شاخص SPI نیز حاکی از وضعیت خشک‌سالی نزدیک نرمال بوده و این بدان معنی است که خشک‌سالی تأثیر بسیار کم‌تری در تراز آب زیرزمینی آبخوان موردنظر در سال‌های مختلف داشته است.

۱- مقدمه

سفره‌های آب زیرزمینی منابع آب شیرین مهمی هستند که نمی‌توان آن‌ها را نادیده گرفت. علاوه بر این، در برابر آلودگی ناشی از جریان نفوذی سریع آب‌های سطحی آلوده که در سنگ شکسته رخ می‌دهد، بسیار حساس هستند (Karay and Hajnal 2015). با استفاده از مدل‌های عددی می‌توان نحوه واکنش آبخوان نسبت به برداشت و تغذیه با روند موجود یا سناریوهای مختلف مدیریتی را پیش‌بینی کرد

(Valivand and Katibeh 2019). مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی در سال‌های اخیر به‌عنوان ابزاری قدرتمند در مباحث مدیریتی، بهینه‌سازی مصرف و پیش‌بینی منابع آب زیرزمینی مطرح شده است (Taheri Tizro and Kamali 2016). در مواقع خشک‌سالی نیز منابع آب زیرزمینی بیشترین نقش را در تأمین نیازها دارند. از این رو ضرورت بررسی و توجه به موضوع خشک‌سالی (مطالعه کمی)

بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی آبخوان زنجان مواجه می‌شود (Panahi et al. 2018). اثر خشک‌سالی بر منابع آب زیرزمینی آبخوان کمیجان استان مرکزی بررسی شد (BayatVarkeshi et al. 2018). نتایج نشانگر آن بود که وقوع خشک‌سالی بیش‌ترین تأثیر را در شاخص آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه داشته است. در ضمن، مقایسه میانگین عمق آب زیرزمینی در سال‌های خشک و تر نیز بیانگر آن بود که وقوع خشک‌سالی منجر به افت عمق آب زیرزمینی به میزان ۱/۱۷ m شده است.

ارزیابی قابلیت مدل‌های خطی تصادفی SARIMA برای پیش‌بینی خشک‌سالی در استان اصفهان با استفاده از شاخص SPI صورت گرفت. نتایج ارزیابی شدت خشک‌سالی ایستگاه‌ها بر اساس شاخص SPI برای دوره (۲۰۲۲-۲۰۱۸) بیانگر وقوع خشک‌سالی ضعیف، طی دوره ۲۰۲۲-۲۰۱۹ برای ایستگاه‌های اصفهان، کاشان و نائین و طی سال ۲۰۱۹ برای ایستگاه‌های شرق اصفهان، شهرضا و کبوترآباد بوده است. همچنین وقوع خشک‌سالی شدید طی سال ۲۰۱۹ برای ایستگاه‌های اردستان و گلپایگان رخ داده است. برای سایر ایستگاه‌ها به‌غیر از ایستگاه اصفهان، کاشان، گلپایگان و نائین، وقوع خشک‌سالی شدید در سال ۲۰۱۸ اتفاق افتاده است (Ghorbani et al. 2019). در پژوهشی، به‌منظور تحلیل وضعیت بارندگی و دوره‌های خشک سالانه، روند تغییرات شاخص SPI سالانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده سیر کاهشی شاخص SPI حاکی از کاهش میزان بارندگی بوده است (Babaei et al. 2019).

شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی آبخوان دشت میناب با استفاده از کد MODFLOW، از کدهای موجود در نرم‌افزار GMS صورت گرفت. براساس بیلان محاسبه‌شده، مجموع تغذیه و تخلیه از آبخوان به ترتیب در حدود ۱۴۰۹/۴۳۳ و $1640/101 \text{ Mm}^3$ می‌باشد که به‌دلیل بیش‌تر بودن میزان خروجی از آبخوان نسبت به ورودی، بیلان دشت منفی بوده و موجب افت شدید تراز آب زیرزمینی در سال‌های آینده خواهد شد (Dastvareh et al. 2020).

در رابطه با دشت بیجار- دیواندره واقع در استان کردستان تاکنون هیچ‌گونه مطالعه‌ای صورت پذیرفته و از طرفی مستندات و بازدیدهای میدانی نشانگر تغییرات کمی و کیفی و افت سطح سفره آب زیرزمینی در دشت ذکر شده می‌باشد. لذا، هدف از این پژوهش شبیه‌سازی تغییرات سطح آب

به‌منظور جلوگیری از تشدید خسارت و پیامدهای منفی حاصل از آن باید مورد مطالعه قرار گیرد (Tamadon and Nozari 2017). (Shishir et al. 2011) مدل‌سازی ترکیبی جریان آب زیرزمینی و تجزیه و تحلیل منطقه بالقوه برای مدیریت آن‌ها در زیر حوضه رودخانه بنگانگا، هند با استفاده از MODFLOW را انجام دادند. نتایج پژوهش نشان داد که افزایش دبی چاه‌ها در مناطق بالقوه فشار کم-تری را به سفره آبخوان وارد می‌کند.

مدل‌سازی آب زیرزمینی آبخوان دلتای مکونگ ویتنام انجام شد، نتایج نشان داد که در آینده میزان دما در منطقه مورد نظر افزایش و بارندگی در فصول خشک کاهش یافته و موجب کاهش ذخیره آب زیرزمینی می‌شود (Shrestha et al. 2016). آب زیرزمینی آبخوان آگرتلا در هند به‌وسیله نرم‌افزار GMS^1 به‌منظور تخمین حجم آب زیرزمینی برای بودجه‌بندی آب، مدل‌سازی گردید و مشخص شد که هد هیدرولیکی در اثر تخلیه از چاه‌ها کاهش و در اثر تغذیه چاه‌ها افزایش می‌یابد (Debbarma et al. 2016). در مطالعه‌ای تأثیر خشک‌سالی بر سطح ایستابی دشت قروه و چهاردولی در طی ۲۵ yr گذشته مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که در دشت مورد نظر، بیش‌ترین افت در قسمت‌های شرقی و جنوبی به‌میزان ۲۴ m رخ داده است (Asadzadeh et al. 2016). آب زیرزمینی دشت بجنورد با استفاده از نرم‌افزار GMS شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد در صورتی که آب پشت سد شیرین دره، آزاد شود، تراز آب زیرزمینی تا ۳ m افزایش می‌یابد (Mohammadzadeh et al. 2017). ارزیابی اثر شبکه آبیاری و زهکشی مارون بر منابع آب زیرزمینی شمال دشت بهبهان به کمک نرم‌افزار GMS و MODFLOW انجام شد. با توجه به سطح ایستابی پیش‌بینی‌شده توسط مدل، در صورت تداوم وضعیت کنونی تا ۱۰ yr آینده، سطح ایستابی در پیژومترهای B16 و B18 به ترتیب به‌میزان ۴/۷۵ m و ۳/۰۷ بالاتر از وضعیت کنونی پیش‌بینی می‌شود که به علت تأثیر شبکه آبیاری خواهد بود (Manabi et al 2018). شبیه‌سازی و تخمین نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار GMS برای دشت زنجان انجام شد، نتایج نشان داد که با فرض مقدار تغذیه ثابت برای فاصله زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۲، تراز آب زیرزمینی با افت شدید ناشی از برداشت

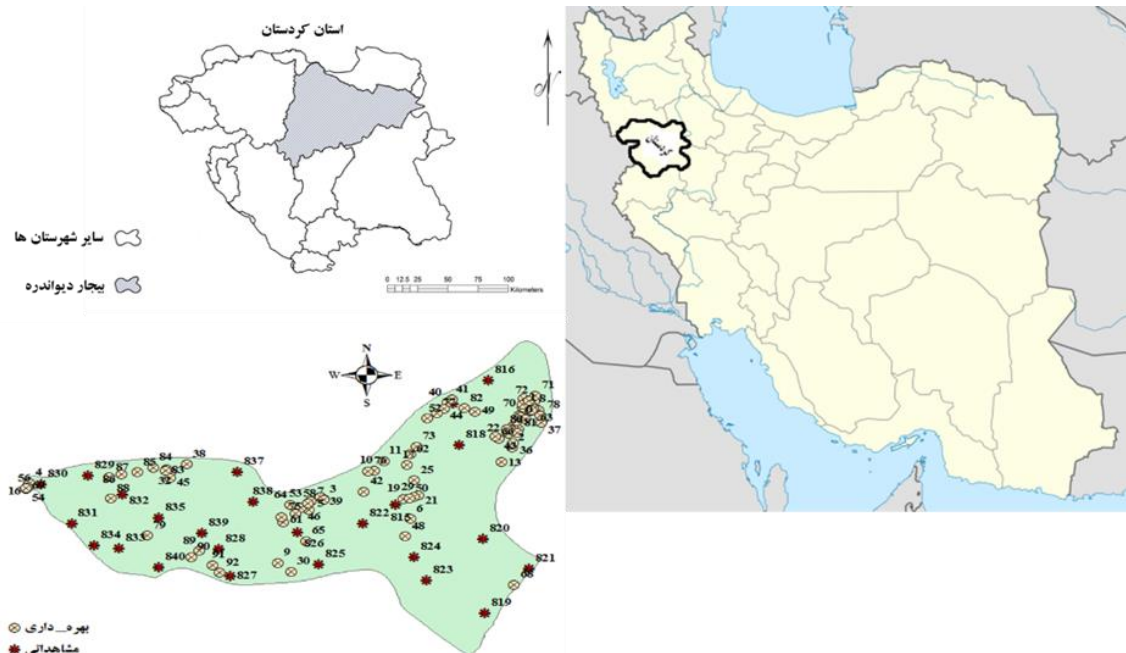
¹Groundwater Modeling System

عرض جغرافیایی 35° و 58° شمالی و ارتفاع از سطح دریا 1650 m ، به ترتیب به عنوان ایستگاه‌های معرف ارتفاعات و دشت استفاده شد. با توجه به اطلاعات این ایستگاه‌ها متوسط ارتفاع ریزش‌های جوی در ارتفاعات 325 mm و در دشت حدود 300 mm می‌باشد. مقادیر درجه حرارت سالانه محدوده مطالعاتی به تفکیک در ارتفاعات و دشت به ترتیب برابر $9/8^{\circ}\text{C}$ و $10/6^{\circ}\text{C}$ است (Kurdistan Regional Water Company 2013). جهت شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی آبخوان دشت بیجار-دیواندره از کد MODFLOW از کدهای موجود در نرم‌افزار GMS استفاده شده است. برای بررسی تراز مشاهداتی و محاسباتی آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه برای دوره آماری ۶ Yr (مهر سال 1389 تا خرداد سال 1395) و جهت بررسی خشک‌سالی به وسیله شاخص بارش استاندارد برای دوره آماری $2015 - 1987$ از داده‌های شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان مربوط به سطح ایستابی ۲۶ حلقه چاه مشاهداتی سطح دشت و داده‌های هواشناسی استان کردستان استفاده گردید. در ادامه عملیات شبیه‌سازی نیز در دو حالت پایدار و ناپایدار صورت گرفته و شاخص SPI محاسبه شد. شکل (۱) موقعیت منطقه تحت پژوهش در سطح کشور، استان، شهرستان و دشت و نیز چاه‌های مشاهده‌ای و در حال بهره‌برداری را نشان می‌دهد (نقشه‌های شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان).

زیرزمینی و بررسی تأثیر خشک‌سالی بر کمیت آب زیرزمینی دشت مزبور با استفاده از کد MODFLOW و شاخص خشک‌سالی SPI می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در محدوده مطالعاتی بیجار- دیواندره با کد 1309 واقع در استان کردستان، در شمال غرب ایران، انجام شد. براساس طبقه‌بندی دمارتن، منطقه مورد نظر دارای اقلیم نیمه‌خشک، زمین و ساختمانی از سنگ‌های رسوبی به‌ویژه ترکیبات رسی، آهکی و شنی مخلوط بوده که مربوط به دگرگونی‌های دوران سوم زمین‌شناسی است. شهرستان بیجار در طول جغرافیایی 35° و 36° شرقی گرینویچ و عرض جغرافیایی 52° و 53° شمالی استوا واقع شده است. ارتفاع متوسط بیجار از سطح دریا 1948 m و متوسط بارش سالیانه منطقه 344 mm است که در مقایسه با آمار بارش سالیانه کشور از بارندگی مناسبی برخوردار می‌باشد. بیش‌ترین میزان بارندگی مربوط به غرب استان کردستان در حدود 800 mm/yr و کم‌ترین میزان بارندگی در ناحیه شرق حدود 320 mm/yr است. بیش‌تر بارندگی ایجاد شده در منطقه مورد نظر در ارتفاعات صورت گرفته و مقدار کمی از آن در دشت ایجاد می‌شود. در این پژوهش، از ایستگاه‌های موجود در محل به نام‌های، نساره علیا با طول جغرافیایی 47° و 45° شرقی و عرض جغرافیایی 35° و 52° شمالی و ارتفاع از سطح دریا 1725 m و خورخوره با طول جغرافیایی 47° و 49° شرقی و



شکل ۱- موقعیت طرح در سطح کشور، استان، شهرستان و دشت

Fig. 1 Location of the project in the country, province, city and plain

۲-۱- شبیه‌سازی آبخوان بیجار - دیواندره

در تعریف مدل آمده است که مدل بدل حالت واقعی است. مدل‌ها انواع مختلفی هستند که مدل‌های ریاضی نیز یکی از آن‌هاست. در این نوع مدل‌ها واقعیت به زبان ریاضی بیان می‌گردد. معمولاً مدل‌های ریاضی برای حل مسائل دنیای واقعی ساخته می‌شوند. برای ساختن مدل‌های ریاضی از آنجایی که حالت واقعی بسیار پیچیده و برخی مواقع قادر به مدل‌سازی تمام جزئیات نیست، لذا، برای تهیه مدل شبیه‌ساز از فرضیات ساده کننده‌ای استفاده می‌گردد. این فرضیات باید به گونه‌ای بوده تا تطابق قابل قبولی بین حالت واقعی و حالت شبیه‌سازی شده موجود باشد.

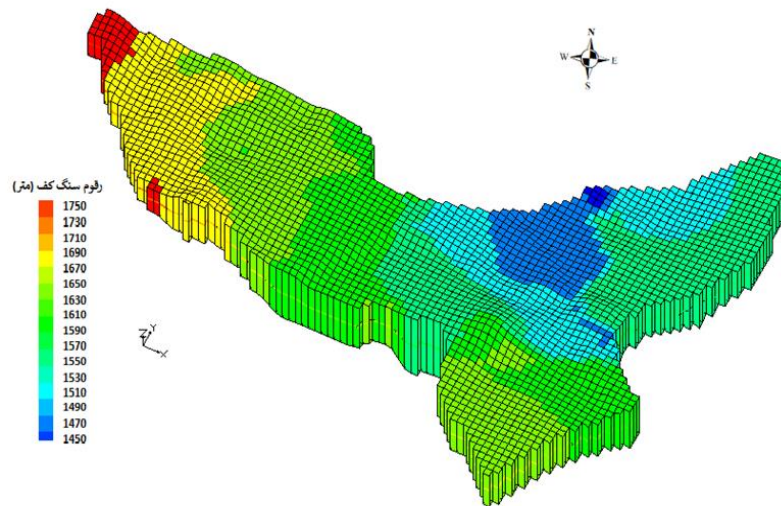
در ضمن، قبل از شروع مدل‌سازی باید هدف از آن و انتظار از نتایج انتهایی به دست آمده جهت برآورده شدن نیازهای مدیریتی آبخوان مشخص باشد. این مدیریت با توجه به شرایط کمی و کیفی محدوده مطالعاتی متفاوت است (Jamalizadeh et al. 2020). پیچیدگی سیستم آبخوان، غیرهمگنی تشکیلات زمین‌شناسی، مقادیر مختلف پمپاژ، تغذیه در زمان‌های متفاوت و غیره، باعث می‌شوند تا برای حل معادلات جریان آب زیرزمینی، مدل‌های عددی جایگزین مدل‌های تحلیلی گردند. روش‌های عددی مدل‌سازی آب زیرزمینی به پنج گروه، روش تفاضلات محدود، روش اجزا محدود، روش معادله انتگرال مرزی، روش تفاضلات محدود و روش جامع و روش اجزا تحلیلی تقسیم می‌شوند. کد MODFLOW، جریان آب‌های زیرزمینی را به روش تفاضلات محدود مرکز شبکه که براساس بسط سری تیلور می‌باشد، مدل‌سازی می‌کند (Ghobadian and Bahrami 2017). اولین قدم در مباحث مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی ساخت مدل مفهومی آن است. در مدل مفهومی عوامل مؤثر بر تراز آب زیرزمینی مشخص می‌گردند. در ادامه، ساختمان آبخوان معرفی و در نتیجه چارچوب آن ساخته می‌شود. علاوه بر عوامل مؤثر، شرایط آبخوان نیز باید تعریف گردد. بنابراین، اطلاعاتی نظیر مرزها، ضخامت، سنگ کف و توپوگرافی آبخوان مورد نیاز می‌باشند. با توجه به موارد گفته‌شده در تحقیق حاضر از نرم‌افزار رابط GMS و کد MODFLOW استفاده شد. MODFLOW قادر است تا به صورت عددی معادلات جریان آب زیرزمینی را برای محیط‌های متخلخل با بهره‌گیری از روش تفاضلات محدود حل می‌کند. در حالت کلی معادله جریان آب زیرزمینی در آبخوان آزاد در شرایط

جریان غیر ماندگار به صورت رابطه (۱) می‌باشد. لذا مراحل تهیه مدل مفهومی آبخوان بیجار- دیواندره به شرح زیر انجام شد.

(۱)
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z h \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t}$$
 در رابطه بالا S_y ضریب آب دهی ویژه، K_x ، K_y و K_z به ترتیب هدایت هیدرولیکی در جهت محورهای x ، y و z برحسب (l/T) ، h بار هیدرولیکی در هر نقطه از آبخوان برحسب (l) و Δx ، Δy و Δz ابعاد سلول‌های شبکه (L) است.

۲-۱-۱- شرایط مرزی آبخوان

یکی از مهم‌ترین عوامل تخلیه و یا تغذیه آبخوان‌ها جریان‌های ورودی و یا خروجی زیرزمینی هستند. در آبخوان مورد مطالعه، در ابتدا تراز آب زیرزمینی توسط چاه‌های مشاهداتی ترسیم و جریان‌های ورودی و خروجی با رسم خطوط هم‌پتانسیل در آبخوان مشخص شدند. بر این اساس جبهه‌های ورودی آب زیرزمینی را می‌توان قسمت‌های غربی سفره و محل تخلیه را قسمت شمال شرقی آن در نظر گرفت. در بقیه مرزهای آبخوان به دلیل آنکه که خطوط هم‌پتانسیل سطح ایستابی عمود بر مرزها بودند، لذا، جریان‌ها از این دو مرز وارد و یا خارج نمی‌شود. ضمناً آبخوان دشت بیجار- دیواندره از یک لایه آبدار آزاد به وجود آمده، بنابراین تراز سطح بالای مخزن همان تراز سطح زمین (آبرفت منطقه) بوده و توپوگرافی سطح زمین به‌عنوان مرز فوقانی آبخوان به مدل معرفی شده است. با استفاده از نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ توپوگرافی دشت و بهره‌گیری از نرم‌افزار GIS متوسط ارتفاع در نقاط مختلف آبخوان استخراج و سپس درون‌یابی گردیده و خطوط هم‌ارتفاع سطح زمین به دست آمد. رقوم سنگ کف و ضخامت آبرفت، با استفاده از بررسی‌های زمین‌شناسی در نقاط مختلف دشت و با بررسی‌های ژئوهیدرولوژی تعیین شد. در نقاط مختلف آبخوان، رقوم سنگ کف با کم کردن ضخامت آبرفت از ارتفاع سطح زمین به دست آمده و سپس رقوم به دست آمده وارد نرم‌افزار GMS شده و با استفاده از کد MODFLOW موجود در آن شبیه‌سازی انجام گرفت. شکل (۲) نقشه هم‌تراز سنگ کف آبخوان بیجار- دیواندره را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نقشه هم‌تراز سنگ کف آبخوان بیجار-دیواندره

Fig. 2 Map of the floor level balance of Bijar-Divandere aquifer

۲-۱-۲- منابع تغذیه

آبخوان دشت بیجار- دیواندره به‌وسیله جریان‌های ورودی زیرزمینی و از رودخانه‌های موجود که شاخه‌هایی از رودخانه اصلی قزل‌اوزن را شامل می‌شود و می‌توان آن را قزل‌اوزن علیا نامید و تا محل تلاقی با رودخانه تلوار ادامه دارد تغذیه می‌شود. همچنین رودخانه یول گشتی یکی از سرشاخه‌های مهم قزل‌اوزن در این محدوده قرار دارد. با توجه به میزان بارندگی در سطح و مساحت دشت، حجم آب تولیدشده در سطح دشت به‌واسطه بارندگی و با لحاظ نمودن شرایط منطقه، وضعیت پوشش گیاهی، عمق آب زیرزمینی، بافت خاک اراضی، نفوذپذیری زمین و سرانجام بالا بودن سطح آب زیرزمینی درصدی از بارش به‌عنوان تغذیه آبخوان در نظر گرفته می‌شود. این مقدار با توجه به عوامل گفته‌شده حدوداً مابین ۵ تا ۱۱/۵٪ متغیر است (Kurdistan Regional Water Company 2013). آب‌های برگشتی از بخش شرب، صنعت و کشاورزی نیز بخش مهمی از منابع تغذیه هستند که در این تحقیق در نظر گرفته شد. براساس مطالعات مختلف حدود ۶۰ تا ۷۰٪ آب شرب، ۶۰ تا ۷۵٪ آب بخش صنعت و حدود ۱۵ تا ۳۰٪ آب بخش کشاورزی مجدد به آبخوان برمی‌گردد (Milan et al. 2018). در آبخوان بیجار- دیواندره نفوذ آب به سفره از بستر رودخانه‌ها انجام می‌شود.

۲-۱-۳- منابع تخلیه

مدل با توجه به اختلاف سطح آب در شبکه مرزی و شبکه‌های اطراف آن و قابلیت انتقال آبخوان در مرزها، مقدار حجم

خروجی را محاسبه می‌کند. مجموع چاه‌های عمیق و نیمه عمیق مورداستفاده و در حال بهره‌برداری برای مصارف کشاورزی، شرب و صنعت در محدوده آبخوان ۱۱۰ حلقه بوده که جمعاً حدود ۳ MCM در سال توسط آن‌ها از آبخوان برداشت می‌شود (Kurdistan Regional Water Company 2013).

۲-۱-۴- ضریب هدایت هیدرولیکی آبخوان

ضریب هدایت هیدرولیکی آبخوان عبارت است از سرعت حرکت آب در خاک. این ضریب در نقاط مختلف دشت به‌وسیله نقشه قابلیت انتقال آبخوان و نقشه هم‌ضخامت لایه آبدار به‌دست‌آمده است. ابتدا با استفاده از رابطه (۲)، مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی در ناحیه‌های مختلف آبخوان تخمین و سپس در مرحله کالیبره، مدل به مقدار نهایی کالیبره گردید.

$$T = K \times B \quad (2)$$

که، T: قابلیت انتقال، K: هدایت هیدرولیکی آبخوان و B: ضخامت اشباع آبخوان می‌باشد.

۲-۱-۵- اجرای مدل در شرایط ماندگار

از آنجایی که شرط اساسی در جریان ماندگار، ثابت بودن سطح آب زیرزمینی نسبت به زمان در طول یک دوره شبیه‌سازی است. لذا، سطح آب خروجی مدل تقریباً همان سطح اولیه خواهد بود. در محدوده آبخوان مورد مطالعه تنظیم مدل در شرایط ماندگار براساس سطح آب مشاهده‌ای مهرماه سال ۱۳۸۹-۹۰ که سطح آب کمترین نوسانات را داشته انجام شد. پس از ورود اطلاعات به مدل، تنظیم ضریب هدایت -

که در آن P_i بارندگی و P میانگین بارندگی بلندمدت و SD انحراف معیار بارش در طول دوره آماری می‌باشد. برای دسته‌بندی خشک‌سالی و ترسالی براساس این شاخص، از معیارها و مقادیر تعریف‌شده و ارائه‌شده در جدولی که توسط مک کی و همکاران در سال ۱۹۹۳ معرفی گردیده، استفاده شده است (Zabolabasi et al. 2019). مطابق مقادیر موجود در جدول، هرگاه مقادیر SPI منفی بوده و مقدار آن به -1 یا کم‌تر برسد معرف وقوع خشک‌سالی است. همچنین مقادیر مثبت آن نشان‌دهنده خاتمه دوره خشک‌سالی است.

۳-۲- آنالیز آماری

نتایج به‌دست‌آمده از مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده تحت سه شاخص آماری مقایسه شده که عبارت‌اند از: ضریب رگرسیونی (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، متوسط خطای مطلق (MAE). در روابط (۴) تا (۶) این شاخص‌ها تعریف‌شده‌اند (Amini et al 2019).

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X-\bar{X})(Y-\bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X-\bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y-\bar{Y})^2}} \right)^2 \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |d_i|}{n} \quad (6)$$

که، X مقادیر اندازه‌گیری شده، \bar{X} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، Y مقادیر برآورد شده، \bar{Y} میانگین مقادیر برآورد شده، d_i اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر برآورد شده و مقدار n تعداد مشاهدات می‌باشد. هر چه مقدار $RMSE$ و قدر مطلق MAE کوچک‌تر باشد، دقت مدل، بالاتر است.

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- شبیه‌سازی آب زیرزمینی در حالت پایدار

در شبیه‌سازی آب زیرزمینی در حالت پایدار، زمان مفهومی نداشته و تغییرات تراز آب زیرزمینی نسبت به زمان صفر است. مدل با داشتن شرایط اولیه مکانی و زمانی معلوم می‌تواند شرایط در گام بعدی را با استفاده از اطلاعات گام قبل محاسبه نماید. شرط اولیه برای مدل‌های کمی آب زیرزمینی، معلوم بودن تراز سطح آب سفره در زمان شروع برای تمام شبکه‌های مدل است. از تراز آب زیرزمینی به‌عنوان نقاط شاهد جهت شبیه‌سازی و کالیبره استفاده می‌گردد. شکل (۳) تراز شبیه‌سازی‌شده آب زیرزمینی و وضعیت چاه-های مشاهداتی بعد از کالیبره و واسنجی در حالت پایدار را

هیدرولیکی و میزان ورودی‌ها و خروجی‌های آبخوان در نقاط مختلف مدل با هدف به حداقل رساندن اختلاف سطح تراز محاسباتی و مشاهده‌ای صورت گرفته تا زمان محقق شدن هدف، کالیبراسیون آبخوان در شرایط جریان ماندگار به پایان رسیده و اطلاعات کالیبره شده در مرحله ماندگار، مبنای شبیه‌سازی در مرحله بعدی یعنی جریان غیرماندگار قرار داده شد همچنین در حالت ماندگار و غیر ماندگار به ترتیب مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه کالیبره می‌گردند.

۲-۱-۶- اجرای مدل در شرایط غیرماندگار

هدف از این مرحله از کالیبراسیون، دقیق‌تر نمودن پارامترهای مدل است. در این مرحله، مدل کالیبره شده در شرایط ماندگار، در یک دوره 4 yr مورد تنظیم و پژوهش بیشتر قرار داده شد. تنظیم مدل با تصحیحات انجام‌شده در مقادیر ضریب هدایت هیدرولیکی و توزیع ماهانه پارامترهای تغذیه و تخلیه آبخوان تا اطمینان از تطابق قابل‌قبول بین سطح آب مشاهده‌ای و محاسبه‌شده توسط مدل ادامه یافت. پس‌از آن مقادیر پذیرفته‌شده در این مرحله، به‌عنوان مقادیر پایه جهت محاسبات بعدی لحاظ شد. دوره شبیه‌سازی غیر ماندگار مدل نیز از اول مهر ۸۹ تا آخر خرداد ۹۵ و به‌صورت متوسط ماهانه در نظر گرفته شد. با توجه به آنچه بیان گردید از آبان سال ۱۳۸۹ تا خرداد سال ۱۳۹۴، به‌عنوان گام‌های واسنجی در نظر گرفته شد. همچنین دوره صحت‌سنجی نیز شامل ۱۲ گام از تیرماه سال ۱۳۹۴ تا خردادماه ۱۳۹۵ می‌باشد.

۲-۲- شاخص بارندگی استاندارد شده

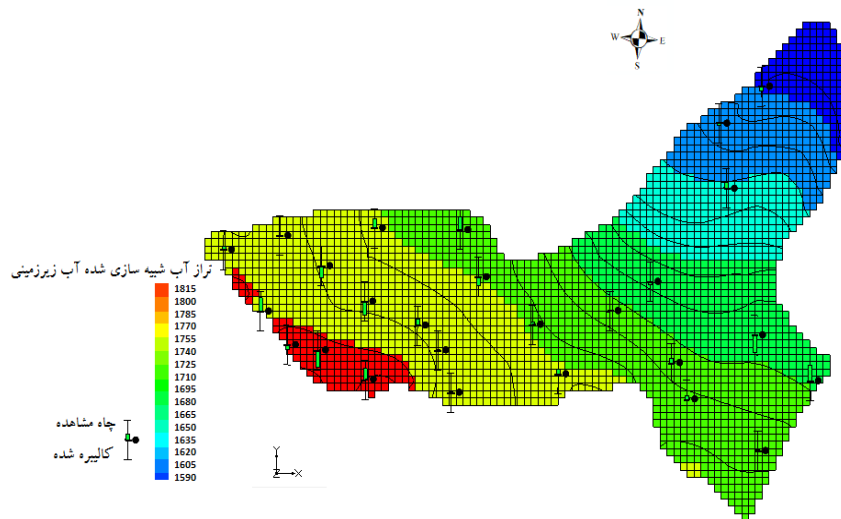
براساس شاخص بارش استاندارد SPI بر محاسبه احتمال وقوع بارندگی برای هر مقیاس زمانی استوار بوده که به‌منظور پیش و تعیین خشک‌سالی در این پژوهش استفاده شده است. این شاخص برای مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ month محاسبه شد. محاسبه مقدار این شاخص شامل برازش تابع چگالی احتمال گاما بر توزیع فراوانی بارندگی برای یک ایستگاه معین است. مقادیر شاخص SPI به‌دست‌آمده از داده‌های بلندمدت بارش برای یک دوره زمانی، از توزیع نرمال تبعیت کرده که دارای میانگین صفر و انحراف معیار یک است. براساس این شاخص، انحراف از میانگین نسبت به انحراف معیار داده‌های آماری بر مبنای رابطه (۳) است.

$$SPI = \left(\frac{P_i - P}{SD} \right) \quad (3)$$

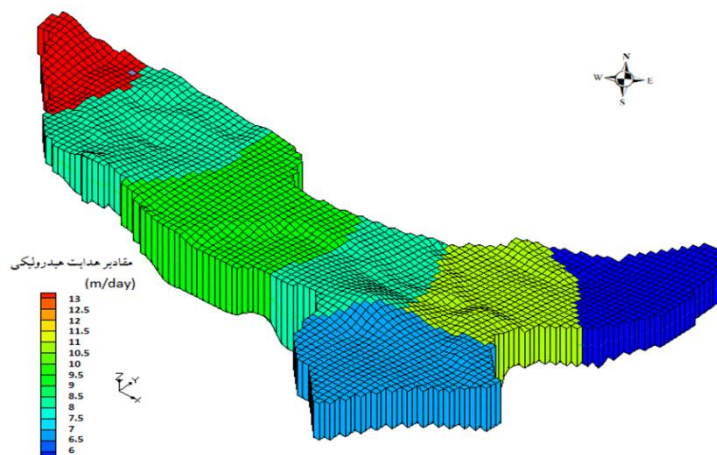
شبهه‌سازی تراز آب زیرزمینی در حالت پایدار، مقادیر هدایت هیدرولیکی در نواحی مختلف به حالت کالیبره درآمدند. در نهایت مناسب‌ترین مقادیر هدایت هیدرولیکی و ناحیه بندی‌ها مشخص شد. شکل (۴) نشان می‌دهد که شمال آبخوان دارای هدایت هیدرولیکی با مقادیری بین ۹ تا ۱۳ m/day می‌باشد. کم‌ترین مقدار آن نیز در قسمت شرق آبخوان بوده که مقادیر آن از ۶ تا ۷/۵ m/day متغیر است. ناحیه مرکزی آبخوان نیز دارای مقادیر متغیری از ۷/۵ تا ۹ m/day است.

نشان می‌دهد. با ارجاع به شکل ملاحظه می‌گردد که تطابق خوبی بین مقادیر چاه‌های مشاهداتی که با رنگ سبز نشان داده شده‌اند و شبهه‌سازی شده وجود دارد.

جهت تعیین اعتبار مدل‌های ساخته شده، نتایج به دست آمده توسط معیارهای آماری ارزیابی خطا کنترل گردید. با توجه به این که $RMSE = 0.08$ m، $MAE = 0.073$ m و $R^2 = 0.999$ و نزدیک به صفر به دست آمدند لذا، مدل با دقت بسیار مناسبی توانسته تا مقادیر تراز آب زیرزمینی را شبهه‌سازی نماید. نتایج به دست آمده نشانگر آن است که در انتهای



شکل ۳- تراز شبهه‌سازی شده آب زیرزمینی و چاه‌های مشاهداتی کالیبره شده در حالت پایدار
Fig. 3 Simulated groundwater level and calibrated observation wells at steady state condition



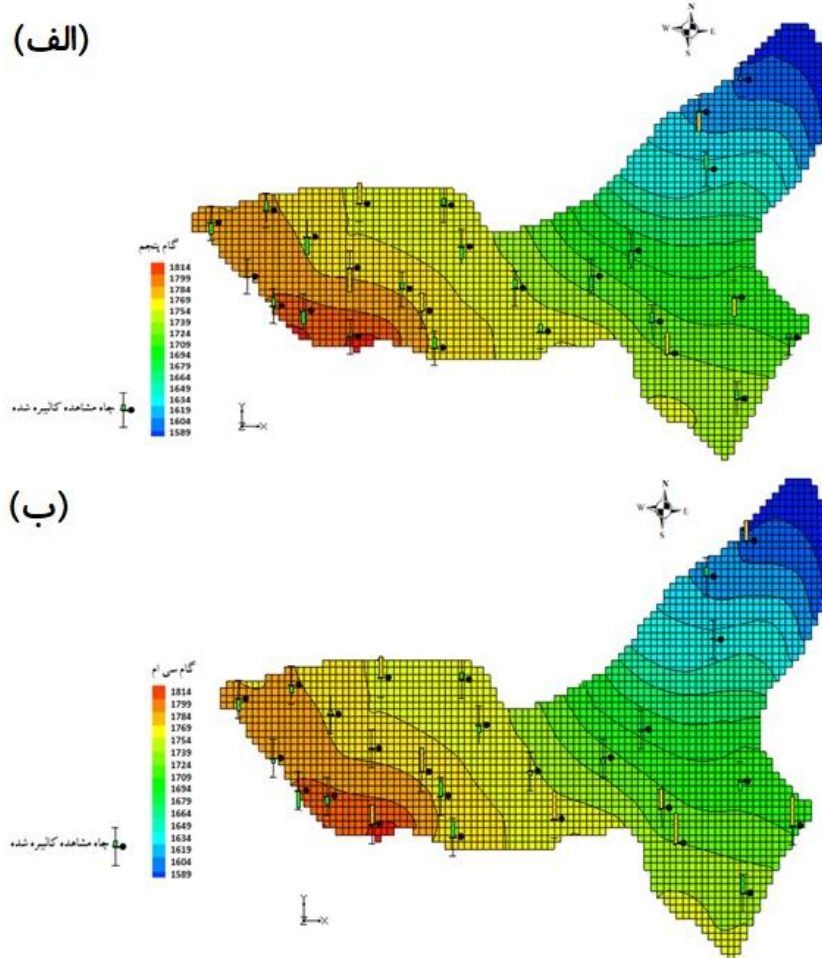
شکل ۴- مقادیر کالیبره شده هدایت هیدرولیکی آبخوان
Fig. 4 Calibrated values of hydraulic conductivity in the aquifer

تغییرات آب زیرزمینی نسبت به زمان متغیر بوده و به همین منظور گام‌های مختلفی تعریف شده است. در این پژوهش برای واسنجی مدل ۵۶ گام زمانی ماهانه،

۲-۳- شبهه‌سازی آبخوان در حالت ناپایدار در حالت ناپایدار شرایط نسبتاً واقعی و طبیعی آبخوان در نظر گرفته شده است. بنابراین انتظار می‌رود تا

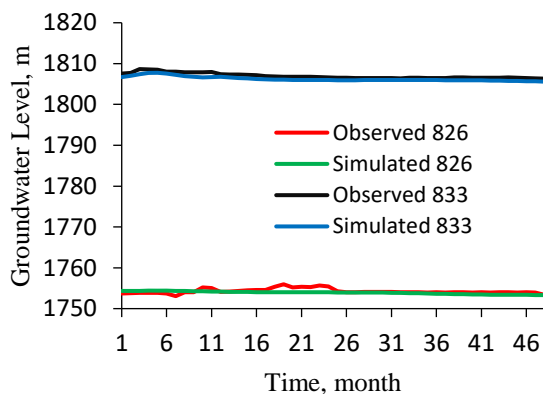
به صورت تصادفی تراز شبیه‌سازی شده در گام‌های ۵ و ۳۰ در شکل (۵) نشان شده است. وضعیت رنگ چاه‌های مشاهداتی حاکی از دقت مناسب شبیه‌سازی در گام‌ها می‌باشد.

از آبان سال ۸۹ تا خردادماه ۹۴ در نظر گرفته شد. بعد از اجرای مدل و با تغییرات مقادیر تغذیه و جریان‌های زیرزمینی ورودی و خروجی که در ماه‌های مختلف متفاوت می‌باشند، تمام گام‌ها کالیبره شدند. در ادامه



شکل ۵- تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و چاه مشاهداتی در حالت ناپایدار، الف- در گام پنجم و ب: در گام سی‌ام

Fig. 5 Simulated groundwater level and observation well in unstable state condition in the a) 5th step and b) 30th step



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

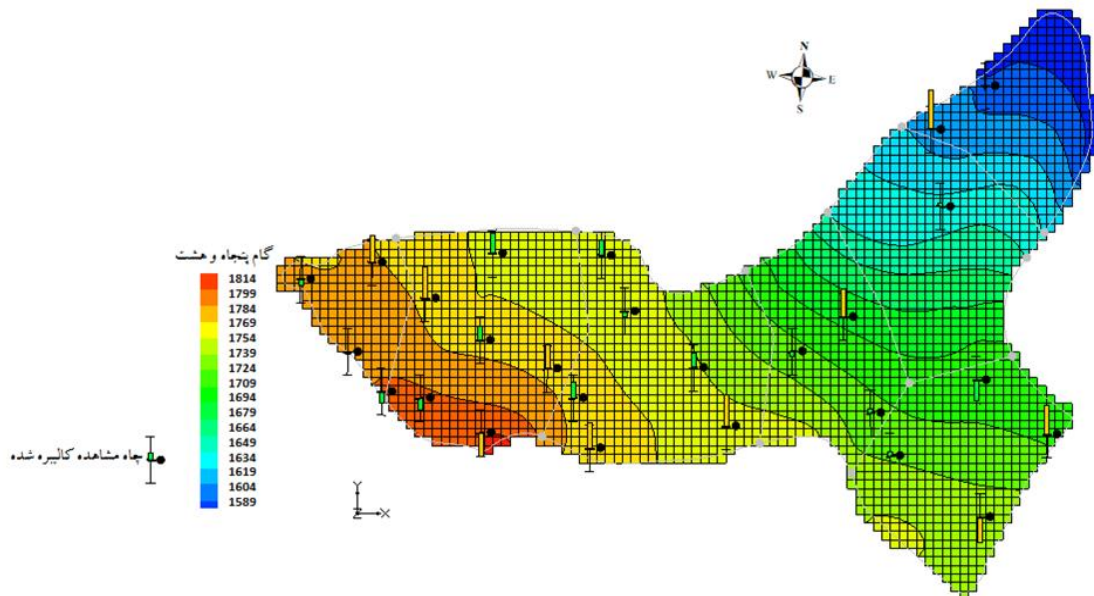
به صورت تصادفی برای چاه‌های شماره ۸۲۶ و ۸۳۳

Fig.6 Simulated and observed values in unstable state at random condition for wells No. 826 and 833

در ادامه ارائه نتایج، برای همه‌ی چاه‌ها مقادیر شبیه‌سازی شده در طول دوره موردنظر با مقادیر واقعی نیز ترسیم گردید. این ترسیم روند شبیه‌سازی در گام‌های مختلف را نشان می‌دهد. به دلیل وجود تعداد زیاد چاه‌های مشاهداتی مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی برخی از آن‌ها به طور تصادفی در شکل (۶) آورده شده است. نتایج نشانگر آن است که انطباق خوبی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برقرار بوده است.

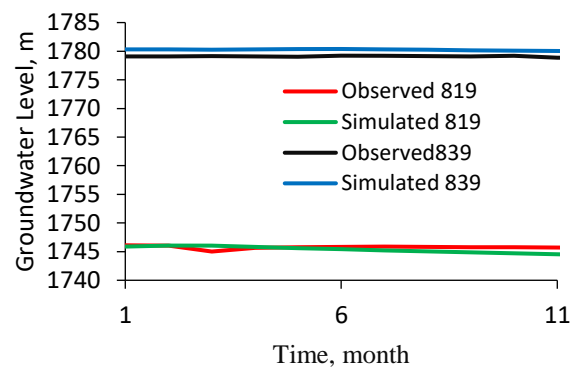
حساسیت خیلی کمتری را نشان داده‌اند. جهت اطمینان از کارایی مدل، عملیات واسنجی صورت پذیرفته است. بنابراین در ادامه نتایج صحت سنجی برای همه چاه‌ها آورده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از مقادیر m $RMSE = 0.188$ ، $MAE = 0.185$ m، و $R^2 = 0.99$ ، $R^2 = 0.96$ ، حاکی از دقت مناسب مدل در حالت صحت سنجی می‌باشد. در ادامه به‌صورت تصادفی یکی از گام‌های شبیه‌سازی شده در حالت صحت سنجی در شکل (۷) آورده شده است. با توجه به شکل و وضعیت چاه‌های مشاهداتی، انطباق قابل قبولی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی به وجود آمده که حاکی از شبیه‌سازی مناسب مدل می‌باشد.

همچنین شاخص‌های نتایج ارزیابی خطا برای حالت ناپایدار محاسبه گردید. با توجه به وجود تعداد زیاد گام‌های زمانی و نزدیک بودن مدل‌سازی به حالت واقعی خطای این بخش نسبت به حالت پایدار بیش‌تر خواهد بود. براساس نتایج m $RMSE = 0.188$ ، $MAE = 0.185$ m، و $R^2 = 0.99$ ، مدل در حالت ناپایدار توانسته است تا با دقت مناسبی عملیات شبیه‌سازی را به انجام برساند. در ادامه مقادیر آبدهی ویژه واسنجی گردید. بیش‌ترین مقدار آن در غرب آبخوان به مقدار ۰/۱۴ به‌دست آمد. در ناحیه مرکزی آبخوان نیز مقدار آن از ۰/۰۷ تا ۰/۰۹٪ متغیر بوده است. در تحلیل حساسیت مدل، پارامتر آبدهی ویژه دارای کم‌ترین حساسیت بوده است. نتایج بیانگر آن است که مقادیر تراز آب زیرزمینی به این پارامتر



شکل ۷- تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و چاه مشاهداتی در حالت ناپایدار صحت سنجی در گام پنجاه‌وهشت (۲۰۱۶/۵/۸)
Fig. 7 Simulated groundwater level and observation well in unstable validation in (58th) step (05.08.2016)

و نتایج سری زمانی شبیه‌سازی شده و واقعی رسم شده است (شکل ۸). نتایج مندرج در شکل (۸) نشانگر آن است که مدل توانسته است تا به‌خوبی رفتار تغییرات تراز آب زیرزمینی را نشان دهد. نتایج کلی نشانگر آن است که شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی با دقت مناسبی انجام شده و می‌توان از آن در جهت اجرای سناریوهای مدیریتی استفاده نمود.



۳-۳- تحلیل نتایج شبیه‌سازی آب زیرزمینی

هیدرو گراف واحد آبخوان شبیه‌سازی شده نشانگر آن است که تراز آب زیرزمینی در طول دوره شبیه‌سازی به مقدار m ۳ افت داشته است (شکل ۹). علی‌رغم کم بودن مساحت آبخوان تحت مطالعه، نتایج شبیه‌سازی نشانگر افت سالیانه‌ای

شکل ۸- مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در صحت سنجی برای چاه‌های شماره ۸۱۹ و ۸۳۹
Fig. 8 Simulated and observed values in validation for wells No. 819 and 839

در ادامه، به‌صورت تصادفی چند چاه مشاهداتی انتخاب

عبارت‌اند از: (۱۹۸۹ و ۱۹۹۰)، (۱۹۹۷-۲۰۰۲)، (۲۰۰۶-۲۰۰۴)، (۲۰۱۱-۲۰۱۳). همچنین بیشترین مقدار شاخص SPI، مربوط به سال ۲۰۰۷ با مقدار ۰/۳۱ و کم‌ترین مقدار شاخص SPI مربوط به سال ۲۰۰۱ با مقدار -۰/۲۵ می‌باشد.

جدول ۱- وضعیت سال‌های مختلف از نظر خشک‌سالی (نزدیک به نرمال) با توجه به شاخص خشک‌سالی SPI

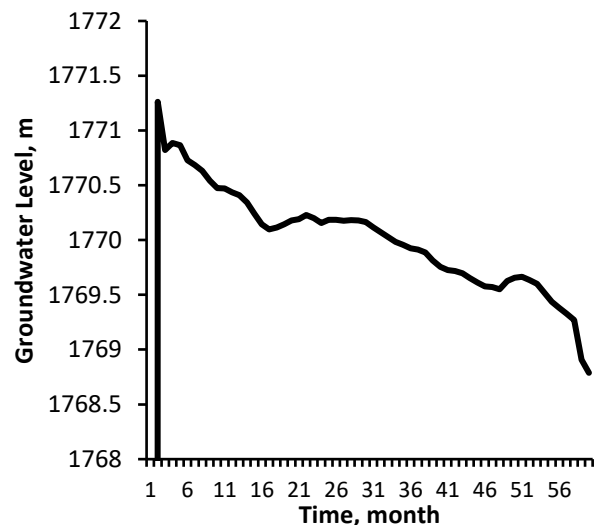
Table 1 Status of different years in terms of drought (near to normal) according to SPI drought index

Year	SPI	Year	SPI
1987	0.051	2001	-0.25
1988	0.035	2002	-0.06
1989	-0.009	2003	0
1990	-0.054	2004	-0.015
1991	0.025	2005	-0.044
1992	-0.011	2006	-0.009
1993	0.19	2007	0.31
1994	0.094	2008	0.039
1995	0.024	2009	0.023
1996	0.025	2010	0.03
1997	-0.015	2011	-0.066
1998	-0.017	2012	-0.124
1999	-0.080	2013	-0.010
2000	-0.030	2014	0.008

نتایج به‌دست‌آمده نشانگر آن است که در محدوده مطالعاتی و در طول دوره موردنظر، خشک‌سالی شدیدی رخ نداده و اغلب پدیده خشک‌سالی با شدت و حد و حدود بسیار کم و نزدیک به وضعیت نرمال بوده است. از نتایج حاصل از خشک‌سالی و افت تراز آب زیرزمینی در دوره مشابه می‌توان نتیجه گرفت که در آبخوان تحت مطالعه، افت تراز آب زیرزمینی مؤثر از خشک‌سالی نبوده است. در این رابطه می‌توان عوامل دیگری همچون افزایش برداشت‌ها، تغییرات اقلیمی، افزایش سطح زیر کشت را می‌توان مقصر دانست.

تاکنون هیچ‌گونه پژوهشی بر روی آبخوان بیجار- دیواندره توسط سایر محققان انجام نپذیرفته است تا بتوان نتایج حاصله از این پژوهش را مقایسه نمود. با این وجود، نتایج حاصل از این پژوهش نشانگر آن است که مقادیر هدایت هیدرولیکی برای آبخوان بیجار- دیواندره بین 5m/day تا 15m/day متغیر بوده است که با نتایج (Zakeriniri et al. 2017) در شبه‌سازی عددی سفره‌های آب‌های زیرزمینی با استفاده از MODFLOW برای آبخوان دشت زنجان که مقادیر هدایت هیدرولیکی بین ۹ تا 10m/day به‌دست‌آمده، مطابقت دارد و همچنین براساس نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر، مقادیر آبدهی ویژه آبخوان در حدود ۴ تا ۱۴٪ و متوسط افت تراز آب زیرزمینی 0.7m و با در نظر

معادل 0.5m می‌باشد. با توجه به مساحت آبخوان که در حدود $159/6\text{km}^2$ و ضریب ذخیره متوسط آبخوان نیز در حدود $1/4\%$ می‌باشد. لذا، افت ایجادشده در حجم آبخوان در حدود $1/1\text{mm}^3$ در سال برآورد می‌گردد. بررسی‌های به‌عمل‌آمده نشانگر آن است که اگر روند افت تراز آب زیرزمینی مطابق با وضعیت حال پیش رود، در ادامه روند سری زمانی مقادیر تراز آب زیرزمینی به‌شدت کاهش‌یافته و در نتیجه کاهش حجم مخزن آب زیرزمینی آبخوان تحت مطالعه بیش‌تر خواهد شد.



شکل ۹- هیدروگراف واحد آبخوان (مهر سال ۱۳۸۹ - خردادماه سال ۱۳۹۵)

Figure 9- Hydrograph of the aquifer unit (October 2010 - June 2016)

۳-۴- تحلیل خشک‌سالی

نتایج ارزیابی شاخص‌های خشک‌سالی SPI در مقیاس سالانه در دوره پایه (۱۹۸۷-۲۰۱۵) در جدول (۱) ارائه‌شده است. طبق نتایج ارائه‌شده در جدول (۲)، در دوره پایه (۱۹۸۷-۲۰۱۵) شاخص SPI نشان‌دهنده یک دوره آماری نرمال به بالا در آبخوان تحت مطالعه می‌باشد. در بررسی مقادیر SPI کوچک‌تر از صفر و تداوم دوره‌های خشک طی دوره آماری پایه مشخص شد که در ۱۵ سال از دوره آماری (۱۹۸۷-۲۰۱۵) مقادیر شاخص SPI کوچک‌تر از صفر بوده است. همچنین نتایج نشانگر آن است که دوره خشک ۱۹۹۷-۲۰۰۲ بیشترین تداوم خشک‌سالی را در مقیاس سالانه به مدت هفت سال داشته است. در نهایت طبق آمار ارائه‌شده از شاخص SPI، در طول دوره پایه (۱۹۷۵-۲۰۰۵)، چهار دوره خشک‌سالی متفاوت در مقیاس سالانه موجود بوده که

داشته است. در تحقیق دیگری، Shagayegh and Soltanei (2011) نیز عنوان نموده‌اند که شاخص SPI با مقیاس‌های زمانی ۶ و ۱۲ ماهه بهترین عملکرد را در برآورد و ارزیابی خشک‌سالی استان یزد را داشته‌اند. Karemei and Akbarei Nodehey (2019) نیز ضمن بررسی وضعیت خشک‌سالی‌های استان مازندران، شاخص SPI را بر سایر شاخص‌ها ارجحیت دانسته‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به یافته‌های این پژوهش می‌توان نتیجه‌گیری کرد که:

۱- در محدوده مطالعاتی و در طول دوره موردنظر، خشک‌سالی شدیدی رخ نداده و اغلب پدیده خشک‌سالی با شدت و حد و حدود بسیار کم و نزدیک به وضعیت نرمال بوده است.

۲- بررسی‌های انجام‌شده نشانگر آن است که در دشت بیجار- دیواندره استان کردستان افت تراز آب زیرزمینی مؤثر از خشک‌سالی نبوده، بلکه عوامل دیگری همچون افزایش برداشت‌ها، تغییرات اقلیمی، افزایش سطح زیر کشت می‌توانند در آن نقش داشته باشند.

۳- نتایج شبیه‌سازی آب زیرزمینی نشان داد که در طول دوره شبیه‌سازی سالانه در حدود $0/5$ m افت در آبخوان ایجاد شده که شدت آن در ناحیه‌های مختلف متفاوت است.

۴- با توجه به افت ایجادشده و با در نظر گرفتن مساحت و مقدار متوسط ضریب ذخیره آبخوان موردنظر، سالانه در حدود $1/1$ MCM از حجم آبخوان کاسته شده است.

پیشنهاد می‌شود با ایجاد راهکارهایی مدیریتی، همچون نصب کنترلهای حجمی، اجرای طرح‌های تعادل بخشی، مسدود نمودن چاه‌های غیرمجاز، راهکارهای مدیریتی دیگری در جهت کاهش تبخیر، احداث بندهایی در جهت تغذیه مصنوعی در محل‌های مناسب، تغییر الگوی کشت به‌منظور جلوگیری از کاشت گیاهان پرمصرف و یا ترکیبی از راهکارهای ارائه‌شده بتوان تا حدودی از افت آب زیرزمینی آبخوان موردنظر جلوگیری به عمل آورد.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده شده (یا تولیدشده) در این پژوهش در متن مقاله ارائه شده است.

گرفتن مساحت و مقدار متوسط ضریب ذخیره آبخوان سالانه در حدود $1/1$ mm³، از حجم آبخوان مورد مطالعه کاسته شده است که با نتایج (2017) Yari and Darzi Naft در پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی تحت سناریوهای مختلف مدیریتی با استفاده از مدل MODFLOW، استان قم، که مقادیر آبدهی ویژه آبخوان در حدود ۷ تا ۴۰٪ به- دست آمد و نتایج گزارش شده (2020) Dastvarah et al. در بررسی و شبیه‌سازی نوسانات دشت زنجان در تخمین افت شدید ناشی از برداشت بی‌رویه دشت مزبور هماهنگی دارد.

(2020) Jamalizadeh et al. نیز در پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های سری زمانی و کد MODFLOW و GIS برای دشت رفسنجان، با مشاهده نتایج هیدروگراف واحد معرف کل آبخوان مشخص نمودند، که سالانه به‌طور متوسط آبخوان مورد مطالعه افتی برابر $0/93$ m داشته که تطابق با نتایج این پژوهش را در بردارد.

در بررسی مقادیر SPI کوچک‌تر از صفر و تداوم دوره‌های خشک‌سالی طی دوره آماری پایه مشخص شد که در ۱۵ سال از دوره آماری (۱۹۸۷-۲۰۱۵) مقادیر شاخص SPI کوچک‌تر از صفر بوده است. همچنین نتایج نشانگر آن است که دوره خشک ۱۹۹۷-۲۰۰۲ بیشترین تداوم خشک‌سالی را در مقیاس سالانه به مدت هفت سال داشته است. در نهایت طبق آمار ارائه‌شده از شاخص SPI، در طول دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۷۵)، چهار دوره خشک‌سالی متفاوت در مقیاس سالانه موجود بوده که عبارت‌اند از: (۱۹۸۹ و ۱۹۹۰)، (۱۹۹۷-۲۰۰۲)، (۲۰۰۴-۲۰۰۶)، (۲۰۱۱-۲۰۱۳) و همچنین بیش‌ترین مقدار شاخص SPI، مربوط به سال ۲۰۰۷ با مقدار $0/31$ و کم‌ترین مقدار شاخص SPI مربوط به سال ۲۰۰۱ با مقدار $-0/25$ می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج (2019) Babaei et al. در بررسی روند دوره‌های خشکی سالانه شمال غرب کشور در طی یک دوره ۳۳ ساله با استفاده از شاخص‌های مختلف از جمله SPI، که نتایج به‌دست‌آمده توسط آن‌ها نشانگر سیر کاهش شاخص SPI، کاهش میزان بارش در منطقه، علی‌رغم آن بهبود پراکندگی بارش در طول سال، وقوع جهش‌های نزولی شاخص SPI در ایستگاه مراغه و کاهش روند خشک‌سالی در اغلب ایستگاه‌هاست، مطابقت دارد. در ضمن Brokhney and Morady (2015) عنوان نمود که شاخص SPI بهترین عملکرد را در تخمین خشک‌سالی استان خراسان رضوی

تضاد منافع نویسندگان

منافعی در رابطه با نوشتن و یا انتشار این مقاله ندارند.

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد

References

- Amini, A., Kolahchi, A. A., Al-Ansari, N., Moghadam, M. K. and Mohammad, T. (2019). Application of TRMM precipitation data to evaluate drought and its effects on water resources instability. *Appl. Sci.* 9(24), 5377. doi: [10.3390/app9245377](https://doi.org/10.3390/app9245377)
- Asadzadeh, F., Kaki, M., Shakiba, S. and Raea, B. (2016). Impact of drought on groundwater quality and groundwater level in Qorveh-Chardoli Plain. *Iran Water Resour. Res.*, 12(3), 153-165 [In Persian].
- Babaei, S., Ghazavi, R. and Hosseinkhah, M. (2019). Studying Trends in Annual Dry Periods Using the AMDSL, ANDSPs and SPI Indices. *J. Soil Water Sci.*, 29(4), 121-133.
- BayatVarkeshi, M., Farahani Dastjani, M. and GhabaeiSough, M. (2018). Effect of meteorological drought on groundwater resources (Case study: Komijan aquifer in Markazi Province). *Iran Water Resour. Res.*, 14(1), 114-124 [In Persian].
- Brokhany, M. and Morady, H. R. (2015). Zoning and determining the best drought index in Khorasan Razavi. *J. Arid Reg. Geogra. Stud.*, 19, 70-84 [In Persian].
- Dastvareh, J., Naserianasl, Z., Amiridomari, S. and Hasanvand, H. (2020). Modeling groundwater level and investigating the status of the aquifer of Minab plain. *Geogr. Human Relat.*, 3(2), 51-59.
- Debbarma, J., Roy, P. K., Halder, S., Banerjee, G. and Pal, M. (2016). Estimating groundwater volumetric mass balance with hydraulic head using groundwater modeling system in Tripura, India. *Asian J. Current Res.*, 1(1), 19-29.
- Ghobadian, R. and Bahrami, Z. (2017). Numerical study of quantitative and qualitative scenarios on Khazal plain aquifer in Hamadan province with MODFLOW and MT3DMS models. *Iranian J. Nat. Resour.*, 69(4), 1043-1062 [in Persian].
- Ghorbani, H., Vali, A. and Zarepour, H. (2019). Prediction and investigation of meteorological drought using SARIMA time series and SPI index in Isfahan Province. *J. Water Soil Sci.*, 23(4), 313-328.
- Jamalizadeh, M., Bazrafshan, M., Mahdavinajafabadi, R., Azareh, A. and Rafieasardouni, E. (2020). Predicting groundwater level fluctuations using time series and GMS models, Case study: Rafsanjan plain. *Echo. Hydrol.*, 7(1), 97-109 [In Persian].
- Karay, G. and Hajnal, G. (2015). Modelling of groundwater flow in fractured rocks. *IAHR. Procedia Environ. Sci.*, 25, 142-149.
- Karemei, V. and Akbary Nodehy, D. (2019). Comparison of meteorological drought indices in Mazandaran. *J. Nivar.* 43 (106-107), 69-78 [In Persian]. doi: [10.30467/NIVAR.2019.134702.1092](https://doi.org/10.30467/NIVAR.2019.134702.1092)
- Kurdistan Regional Water Company Report. (2013). Water resources balance of, Bijar, Divandere study area in the year 2010-2011. 200 pages.
- Manabi, M., Egdernazhad, A. and Daneshian, H. (2018). Evaluation of maroon irrigation and drainage network effect on groundwater resources in north Behbahan plain using Modflow Model (GMS Software Code). *Sc. J. Water Sci. Eng.*, 8(19), 41-54.
- Milan, S.G., Roozbahani, A. and Banihabib, M. E. (2018). Fuzzy optimization model and fuzzy inference system for conjunctive use of surface and groundwater resources. *J. Hydrol.*, 566, 421-434.
- Mohammadzadeh, H., Altafidadgar, M. and Nassery, H. (2017). Prediction of the effect of water supplying from Shirindare dam on the Bojnourd aquifer using MODFLOW 2000. water resources and the regime of water bodies. *Water Resour.*, 44(2), 216-225.
- Panahi, M., Misaghi, F. and Asgari, P. (2018). Simulation and estimation of groundwater level fluctuations using GMS (Case study of

- Zanjan plain). *J. Environ. Sci.*, 10(1), 1-14.
- Shagayegh, E. and Soltanei, S. (2011). Comparison of meteorological drought indices in Yazd province. *J. Water Soil Sci.*, 5(7), 231-249. [In Persian].
- Shishir, G., Chahar, B. R. and Graillot, D. (2011). Combined use of groundwater modeling and potential zone analysis for management of groundwater. *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform.*, 13, 127-139.
- Shrestha, S., Bach, T. V. and Pandey, V. P. (2016). Climate change impacts on groundwater resources in Mekong Delta under representative concentration pathways scenarios. *Environ. Sci. Policy*, 61, 1-13.
- Taheri Tizro, A., and Kamali, M. (2016). Modeling of Tuyserkhan plain aquifer with MODFLOW model and evaluation of hydrogeological status under current and future conditions. *J. Water Resour. Eng.*, 9(31), 45-60 [In Persian].
- Tamadon, F. and Nozari, H. (2017). Study of the effects of drought on the quantity and quality of groundwater in Zarghan plain of Fars during the years 2011 to 2016. *J. Environ. Geol.*, 11, 77-84 [In Persian].
- Valivand, F. and Katibeh, H. (2019). Evaluation of the slightly long-term effects of current management and operational conditions on Varamin Plain Aquifer. *J. Water Soil Conserv. Res.*, 26(2), 251-261. [In Persian].
- Yari, R. and Darzi Naft Chali, A. (2017). Prediction of groundwater level fluctuations under different management scenarios using MODFLOW model. *J. Irrig. Water Eng. Res.*, 30, 103-115. [In Persian].
- Zabolabasi, F., Malbosi, Sh., Babanian, I. and Asmari, M. (2019). Drought monitoring of large Karun watershed using spi index (1978-2014). *Newar Ext. Sci. J.*, (104-105), 27-40.
- Zakeriniri, M., Soltani, Sh. and Dabdab, B. (2017). Numerical simulation of groundwater aquifers using MODFLOW, a case study: Zanjan plain. *Water Resour. Syst. Manag. J.*, 1(3), 57-78. [In Persian].