



Simulation of Groundwater Balance Using Integrated Surface and Groundwater SWAT-MODFLOW-NWT Model (Case Study: Mahabad Plain)

O. Raja¹, M. Parsinejad^{2*}, M. Tajrishy³

Received: 31-01-2022

Revised: 14-02-2022

Accepted: 07-03-2022

Available Online: 20-05-2022

How to cite this article:

Raja O., Parsinejad M., and Tajrishy M. 2022. Simulation of Groundwater Balance Using Integrated Surface and Groundwater SWAT-MODFLOW-NWT Model (Case Study: Mahabad Plain). Journal of Water and Soil 36(1): 31-52. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.74890.1138](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.74890.1138)

Introduction

Surface and groundwater conjunctively interact at different spatial or temporal scales within a plain. In many plain, surface and groundwater resources are used in combination in agriculture. Therefore, it is important to accurately predict the components of groundwater and surface water balance. Despite the rapid expansion of numerical models over the past two decades, there is still a need for comprehensive and integrated assessment of surface and groundwater components. In particular, the interconnection of both surface and groundwater models is important to connect both surface and groundwater, especially the water balance in the unsaturated root zone. In this study the effect of water recharge due to deep percolation from simultaneous supply of irrigation water from surface and groundwater sources, and rainfall from the SWAT model were used to simulate groundwater balance using the combined MODFLOW-NWT model.

Materials and Methods

In this study, the effect of recharge values obtained from the SWAT model was analyzed to simulate the fluctuation of water table, and groundwater balance components using the integrated model of MODFLOW-NWT model in the Mahabad plain. One of the important steps in quantifying the impact of irrigation management, and the change in land-use on the surface and groundwater balance was the simulated recharge due to the deep percolation of rainfall and irrigation water. This was done by the SWAT model, and was used as the boundary condition to the MODFLOW-NWT model. Calibration and validation of groundwater model were also done by trial-and-error and automatic PEST methods. The simulation period was performed for 10 years from the hydrological year of 2009-2010 to 2018-2019, from which 6 and 4 years were used as the period for calibration and validation were from 2009-2010 to 2014-2015 and 2015-2016 to 2018-2019, respectively. Groundwater balance components are naturally different for different years. Therefore, the study was conducted for dry, wet, and normal years. Hydraulic conductivity and specific yield were the used as initial calibration parameters in the MODFLOW-NWT model.

Results and Discussion

The results showed a higher hydraulic conductivity and specific yield values for the aquifer was in the southern, central, and northeastern areas of the plain, and the lowest values were in the northern and near the outlet of the plain. After the calibration process, the results showed that an average, 9% of rainfall, and 36% of irrigated water percolate to the aquifer. These observations were confirmed based on a satisfactory and acceptable estimate of the water table level of the model for both calibration and validation periods. The statistical RMSE criteria for calibration and validation periods were 0.35 and 0.34 m, respectively. Also, the results of R^2 and NSE criteria were estimated as 0.94 and 0.91 for the calibration period, and 0.93 and 0.89 for

1 and 2- Ph.D. Candidate and Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: parsinejad@ut.ac.ir)

3- Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

the validation period, which indicates that the model was properly calibrated and was well able to simulate groundwater level. The groundwater hydrographs developed from piezometers' readings, show that the recharge values estimated by the SWAT model, considering the change in land use and irrigation management across the plain, were able to properly simulate groundwater level across the aquifer. Specifically, the studies showed a continuous drop in groundwater level created in the southern and southwestern regions of the aquifer (piezometers of Fakhrighah, Gorg tapeh, and Serah Haji Khosh) due to the presence of high-consumption crops such as apple and alfalfa, and the higher number of operation wells.

Conclusion

The results of this study showed that the recharge values obtained from the calibrated SWAT model was crucial parameters for proper simulation of groundwater, and can significantly improve the model results. The results of the main components of the groundwater balance for different years showed that the amount of recharge due to the infiltration of rainfall, and irrigation were different for each year. Also, interactions between surface and groundwater resources vary from about 30 to 50 million cubic meters between years, indicating a significant interaction between the water resources. In general, the SWAT-MODFLOW-NWT model can be used as a practical tool for proper management of surface and groundwater resources under different management scenarios.

Keywords: Mahabad plain, MODFLOW-NWT, Recharge Component, SWAT, Water table

شبیه‌سازی بیلان آب زیرزمینی با استفاده از مدل تلفیقی و جامع آب سطحی و زیرزمینی SWAT-MODFLOW-NWT (مطالعه موردی: دشت مهاباد)

امید رجا^۱ - مسعود پارسی نژاد^{۲*} - مسعود تجریشی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶

چکیده

آب‌های سطحی و زیرزمینی در مقیاس‌های مختلف مکانی یا زمانی باهم در ارتباط می‌باشند. از طرفی منابع آب سطحی و زیرزمینی به‌صورت تلفیقی در کشاورزی استفاده می‌شود؛ بنابراین مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی و سطحی باید با دقت مناسبی تعیین گردند. در این مطالعه، تأثیر مقادیر تغذیه حاصل از مدل SWAT به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های ورودی مدل‌های آب زیرزمینی در شبیه‌سازی تراز سطح ایستابی و مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW-NWT به‌عنوان یک مدل جامع و یکپارچه منابع آب سطحی و زیرزمینی در دشت مهاباد بررسی شد. با استفاده از مقادیر یکنواخت تغذیه و به‌صورت درصدی از بارندگی و کل آب آبیاری در سطح آبخوان بدون توجه به تأثیر تفاوت برداشت و نفوذ عمقی در سطح کاربری اراضی در موقعیت‌های مختلف نمی‌توان به‌درستی نوسانات سطح آب زیرزمینی در سطح آبخوان را شبیه‌سازی کرد؛ لذا یکی از مراحل مهم، تعیین مقادیر آبیاری با توجه به تفاوت کاربری اراضی و تغذیه ناشی از نفوذ عمقی بارندگی و آب آبیاری از منابع آب سطحی و زیرزمینی بود. این مهم توسط مدل SWAT انجام و به‌عنوان شرایط مرزی به مدل MODFLOW-NWT تعریف شد. واسنجی و اعتبارسنجی مدل آب زیرزمینی نیز به روش‌های سعی و خطا و روش خودکار PEST انجام شد. دوره شبیه‌سازی به مدت ۱۰ سال از سال آبی ۸۹-۱۳۸۸ تا ۹۸-۱۳۹۷ انجام شد که به ترتیب ۶ و ۴ سال آبی از ۸۹-۱۳۸۸ تا ۹۴-۱۳۹۳ و ۹۵-۱۳۹۴ تا ۹۸-۱۳۹۷ به‌عنوان دوره واسنجی و اعتبارسنجی در نظر گرفته شدند. با توجه به این‌که الگوی تشکیل مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی برای سال‌های آبی مختلف متفاوت است؛ لذا مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی برای سه سال معرف خشک‌سالی، ترسالی و نرمال نیز بررسی شد. هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره آبخوان پارامترهای ورودی و واسنجی در مدل MODFLOW-NWT بودند. نتایج واسنجی نشان داد بیش‌ترین میزان هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه در نواحی جنوبی، مرکزی و شمال شرقی دشت است و در حاشیه شمالی و در نزدیکی خروجی دشت به کمترین میزان خود می‌رسد. پس از فرآیند واسنجی، نتایج نشان داد به‌طور متوسط حدود ۹ درصد از آب بارندگی و ۳۶ درصد از مصارف آب در بخش کشاورزی به آبخوان نفوذ می‌کند. نتایج حاکی از برآورد رضایت‌بخش و قابل‌قبول تراز سطح ایستابی مدل برای هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی بود. به‌طوری‌که نتایج معیار RMSE برای تراز سطح ایستابی در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب مقدار خطای ۰/۳۵ و ۰/۳۴ متر به دست آمد. همچنین، نتایج معیارهای R^2 و NSE نیز برای دوره واسنجی ۰/۹۴ و ۰/۹۱ و برای دوره اعتبارسنجی ۰/۹۳ و ۰/۸۹ برآورد شد که مؤید آن است که مدل به‌خوبی واسنجی شده و قادر بوده نوسانات سطح آب زیرزمینی را با دقت مناسبی شبیه‌سازی کند. بررسی نتایج اجزای اصلی بیلان آب زیرزمینی برای سه سال آبی ۹۶-۱۳۹۵ (سال خشک)، ۹۷-۱۳۹۶ (سال نرمال) و ۹۸-۱۳۹۷ (سال تر) نشان داد میزان تغذیه ناشی از نفوذ آب بارندگی و جریانات برگشتی آب کشاورزی در هر سه سال متفاوت است. همچنین، فعل‌وانفعالات بین منابع آب سطحی و زیرزمینی بین سال‌های آبی از حدود ۳۰ تا ۵۰ میلیون متر مکعب متغیر است که نشان‌دهنده اندرکنش قابل‌توجه بین این منابع است. به‌طور کلی نتایج

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: parsinejad@ut.ac.ir)

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

این مطالعه نشان می‌دهد اعمال تغذیه تخمینی مدل SWAT همراه با واسنجی هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه می‌تواند در بهبود برآورد نوسانات سطح آب زیرزمینی توسط MODFLOW-NWT کمک شایانی نماید. نهایتاً از مدل تلفیقی می‌توان به‌عنوان یک ابزار کاربردی در تبیین الگوی بهره‌برداری مناسب از منابع آب تلفیقی سطحی و زیرزمینی تحت تأثیر سناریوهای مختلف مدیریتی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: تراز سطح ایستابی، دشت مهاباد، مؤلفه تغذیه، SWAT، MODFLOW-NWT

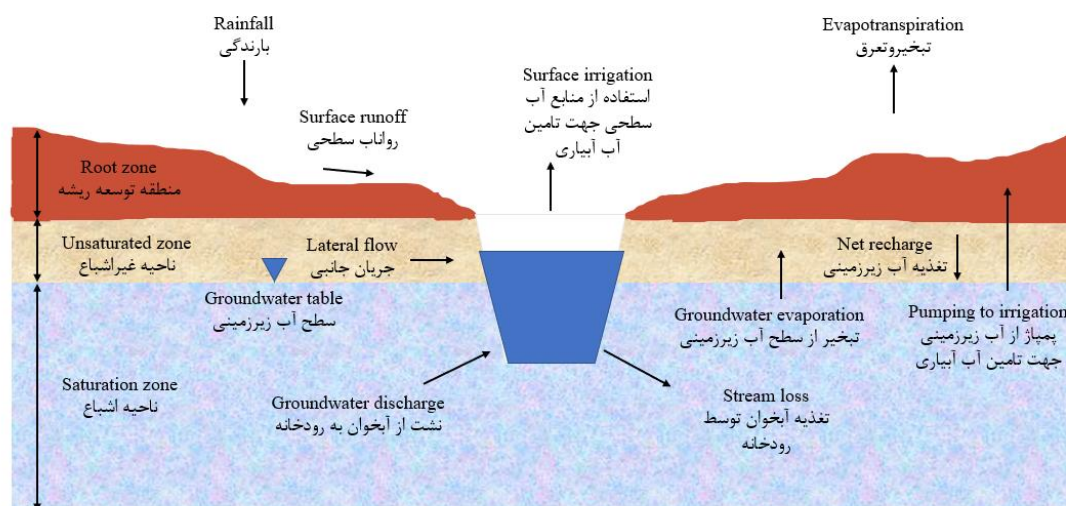
مقدمه

که بتواند کلیه فرآیندهای در حال انجام در سامانه‌های سطحی و زیرسطحی را مدنظر قرار دهد (شکل ۱)؛ بنابراین، ارائه یک مدل جامع با خصوصیات خاص مقیاس زمانی و مکانی که بتواند اثربخشی الگوهای بهره‌برداری تلفیقی بر مؤلفه‌های بیلان آب در محدوده مطالعاتی را برآورد کند به‌طورقطع خواهد توانست زیرساخت‌های لازم برای حل تناقضات بین عرضه و تقاضای منابع آب را فراهم آورد (Kardan Moghaddam et al., 2018).

مدل MODFLOW به‌عنوان یک مدل استاندارد شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در حالت پایدار و ناپایدار پذیرفته‌شده است (Barazzuoli et al., 2008; Palma and Bentley, 2007; Sibanda et al., 2009; Bedekar et al., 2012). در این مدل مقادیر تغذیه ناشی از بارندگی و جریانات برگشتی آب آبیاری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های ورودی مدل‌های آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌عنوان درصدی از بارندگی و کل آب آبیاری تعریف می‌شود (Sophocleous, Scanlon et al., 2006; 2005). ارزیابی‌ها نشان داده است که عدم قطعیت در تعیین این پارامتر، به میزان قابل‌توجهی در نتایج شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی تأثیر خواهد داشت.

تغییرات زمانی و مکانی منابع آب، رابطه مستقیمی با الگوی رفتاری مؤلفه‌های مختلف در چرخه هیدرولوژیک در یک منطقه دارد (Chu et al., 2010). در اغلب مواقع، منابع آب برای کشاورزی به‌صورت تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی تأمین می‌شود. تبادلات تغذیه و برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی با توجه به جانمایی رودخانه‌ها و موقعیت چاه‌های بهره‌برداری و مداخله انسان در مدیریت تأمین آب آبیاری در مناطق مختلف یک چالش منحصربه‌فرد در این زمینه است (Wei and Bailey, 2019). آب‌های سطحی و زیرزمینی در سامانه هیدرولوژی اجزای جدا از هم نیستند و در مقیاس‌های مختلف مکانی یا زمانی دارای برهم‌کنشی پویا می‌باشند (Saberimehr et al., Rezaei Moghaddam et al., 2016). لذا برای دستیابی به بهره‌برداری بهینه و پایدار از منابع آب، مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی و سطحی (تغذیه و تخلیه) و پتانسیل منابع آب زیرزمینی باید با دقت نسبی برآورد گردد (Arumí et al., 2017; Nasser et al., 2014; Mojtahedi et al., 2016 2009).

برنامه‌ریزی و مدیریت استفاده پایدار منابع آب به‌ویژه در شرایط کم‌آبی، مستلزم شناخت کامل و جامع از وضعیت مبهم و پیچیده‌ی آن است. بدیهی است لازمه‌ی این شناخت، در اختیار داشتن ابزاری است



شکل ۱- شمایی از کلیه فرآیندهای سطحی و زیرزمینی

Figure 1- Schematic of all surface and underground processes

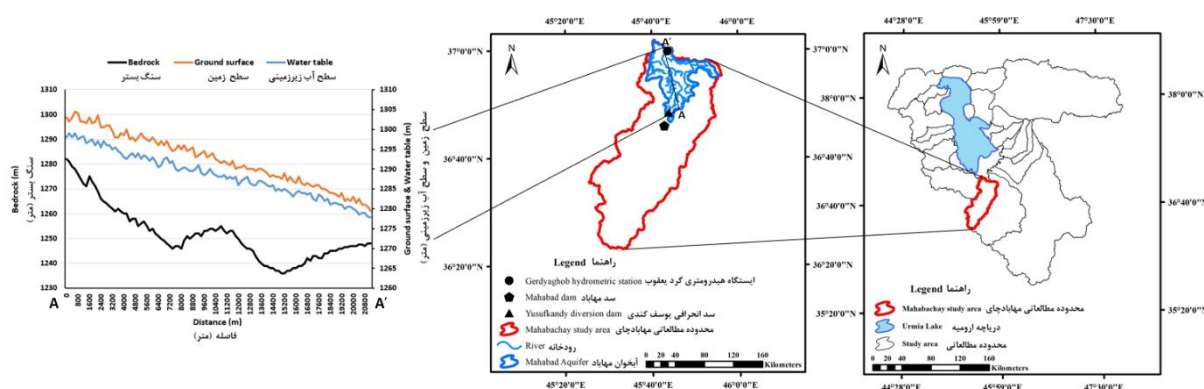
حاصل از مدل SWAT به‌عنوان ورودی مدل آب زیرزمینی MODFLOW مورد استفاده قرار می‌گیرد. مزیت مهم دیگر مدل تلفیقی، بررسی مؤلفه‌های بیلان و اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی در مقیاس‌های زمانی و مکانی مؤلفه‌های بیلان است. در عین حال می‌توان تغییرات سطح ایستابی و شیب هیدرولیکی آب زیرزمینی تحت الگوهای مختلف برداشت و مدیریت بهره‌برداری، میزان نرخ برداشت از چاه‌های بهره‌برداری از آبخوان تحت سناریوهای مختلف را مدیریت کرد (Izady et al., Bedekar et al., 2012; Nasseri, 2019).

از یک سو سیر گستره نوع فعالیت‌های بهره‌برداری از منابع آب و عدم توجه کافی به برنامه‌ریزی و مدیریت تلفیقی منابع آب و از طرف دیگر عدم توازن مکانی و زمانی توزیع منابع آب و محدودیت‌های استفاده از آب‌های سطحی، ضرورت تحقیق در خصوص بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی را ایجاد می‌نماید (Wei and Bailey, 2019; Mojtabedi et al., 2018). با توجه به گسترش مدل‌های عددی طی دو دهه گذشته، هنوز هم کمبود استفاده از مدل‌های جامع برای ارزیابی و مدیریت همه‌جانبه و یکپارچه منابع آب سطحی و زیرزمینی وجود دارد (Kardan Rezaei Moghaddam et al., Moghaddam et al., 2018; 2016). به‌ویژه اتصال مدل‌های آب سطحی و زیرزمینی به‌طوری که نه تنها نتایج مدل‌های آب سطحی را به‌عنوان ورودی سامانه آب زیرزمینی، بلکه تأثیر سامانه آب زیرزمینی در منطقه غیراشباع و به‌ویژه منطقه توسعه ریشه را نیز مدنظر قرار دهد (Bailey et al., 2018; Chunn et al., 2019; Wei and Bailey, 2019; Wei et al., 2016). از طرفی در دهه‌های اخیر تأمین آب موردنیاز از منابع زیرزمینی منجر به توسعه استراتژی‌های مدیریتی توانمند بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی شده است. به‌طور مشخص در حوضه دریاچه ارومیه که به‌شدت تحت تأثیر بهره‌برداری غیرمعارف از منابع آب قرار گرفته، این مدل‌ها می‌تواند برای حداکثر سازی تأمین حبابه دریاچه ارومیه با توجه به الگوی تأمین نیاز آبیاری اراضی کشاورزی از منابع تلفیقی مورد استفاده قرار گیرد. این مطالعه تلاش دارد به بررسی تأثیر مقادیر تغذیه ناشی از نفوذ عمقی حاصل از تأمین توانمند آب آبیاری از منابع آب سطحی و زیرزمینی و نیز نفوذ ناشی از بارندگی حاصل از مدل SWAT در شبیه‌سازی آب زیرزمینی با استفاده از مدل MDOFLOW-NWT به‌عنوان یکی از پارامترهای بسیار مهم و تأثیرگذار در تعیین مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی در دشت مهاباد بپردازد. مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی در سال‌های آبی متفاوت به‌شدت تحت تأثیر تغذیه و تخلیه قرار می‌گیرد لذا مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه در سه سال آبی خشک، نرمال و مرطوب نیز تجزیه و تحلیل خواهد شد.

در نتیجه تا زمانی که نرخ دقیق تغذیه به‌عنوان ورودی مدل جریان آب زیرزمینی برآورد نشود نمی‌توان با اطمینان رفتار طولانی‌مدت یک آبخوان و تأثیرات برداشت از آب‌های زیرزمینی را تحت سناریوهای مختلف مدیریتی تخمین زد (Wheater, 2010).

روش‌ها و مدل‌های متنوعی برای تعیین میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی موجود است. بررسی‌ها نشان داده است که مدل SWAT به‌عنوان یک مدل جامع شبیه‌سازی آب‌های سطحی قادر به برآورد تبخیر و تفرق واقعی و تغذیه ناشی از بارندگی و آبیاری در مقیاس حوضه آبریز و واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی^۱ در سطح حوضه است (Sophocleous, 2005; Bejranonda et al., 2007). از طرفی مدل SWAT در شبیه‌سازی جریان‌های زیرسطحی دارای محدودیت است به‌طوری‌که مازول آب زیرزمینی آن پارامترهای توزیعی هیدروژئولوژی آب‌های زیرزمینی همچون ضریب هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه را در نظر نمی‌گیرد (Kim et al., 2019; al., 2008). به‌عبارت‌دیگر فرآیندهای آب زیرزمینی را بیش‌ازحد ساده می‌کند و عملکرد ضعیفی دارد. علاوه بر این، نمی‌توان تأثیر برداشت و پمپاژ آب از چاه‌ها را بر شیب هیدرولیکی سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی کرد (Chunn et al., 2019; Chu et al., 2010).

ارزیابی‌ها نشان می‌دهد تلفیق مدل‌های SWAT و MODFLOW می‌تواند با توجه به شرایط هیدرولوژیکی در ابعاد مختلف مکانی یک منطقه، امکان شبیه‌سازی دقیق‌تر تبادلات جریان‌های آب‌های سطحی رودخانه‌ها و انهار طبیعی و زیرزمینی را فراهم آورد (Sophocleous, 2005; Bejranonda et al., 2007; Sun and Cornish, 2005; Sophocleous and Perkins, 2000). با استفاده هم‌زمان از دو مدل، برآورد نفوذ حاصل از رواناب سطحی و جریان جانبی در خاک به شبکه‌ی جریان و امکان بررسی بیلان آب زیرزمینی و برآورد نوسانات سطح ایستابی فراهم می‌گردد (Bailey et al., 2016; Dowlatabadi and Nair et al., 2011; Zomorodian, 2016; Chunn et al., 2019). همچنین، در صورت استفاده هم‌زمان نه تنها محدودیت‌های دو مدل (برآورد تغذیه در مدل MODFLOW و جریان‌های زیرسطحی در SWAT) را می‌توان پوشش داد بلکه خصوصیات زمانی و مکانی منطقه مورد نظر را به‌طور مناسبی منعکس کرد (Park and Bailey, Kim et al., 2008; Wei et al., 2018; 2017). به‌عبارت‌دیگر تغذیه حاصل از مدیریت‌های مختلف آبیاری شامل تلفات نفوذ عمقی ناشی از تأمین مقادیر متفاوت آب آبیاری و مقادیر تغذیه ناشی از نفوذ بارش و نشست از رودخانه‌ها در سال‌های مختلف آبی و در پهنه‌های مختلف دشت



شکل ۲- موقعیت شبکه آبراهه، سد مه‌آباد، سد انحرافی یوسف کندی، ایستگاه هیدرومتری گرد یعقوب، آبخوان مه‌آباد در حوضه آبریز ارومیه و وضعیت تراز سطح ایستابی در آبخوان مه‌آباد در طول دوره آماری ۹۸-۱۳۷۵

Figure 2- Location of streams network, Mahabad dam, Yousef Kennedy diversion dam, Gerdyaghoub hydrometric station, Mahabad aquifer in Urmia Basin, and water level in Mahabad aquifer during 1996-2019

زیرزمینی از ۱/۵ متر در نواحی شمالی تا ۶/۵ متر در نواحی جنوبی آبخوان متغیر است. به‌طور کلی روند اصلی تراز سطح آب دشت در سال‌های اخیر متعادل بوده و افت سالانه مشاهده‌شده در مقایسه با بسیاری از دشت‌های کشور ناچیز است. نوسانات سطح آب در دوره بیان از یک منحنی سینوسی پیروی کرده و به‌صورت شاخه‌های صعودی و نزولی تقسیم می‌گردد. از شروع سال آبی در مهر تا اردیبهشت ماه شاخه صعودی بوده که به عنوان دوره مرطوب قلمداد می‌گردد. از اردیبهشت تا شهریور ماه منحنی نزولی ادامه می‌یابد که به‌عنوان دوره خشک هیدروگراف قلمداد می‌گردد. به همین دلیل هیدروگراف ارائه شده دارای فراز و فرودهای فصلی ناشی از تغذیه در طول دوره مرطوب و پمپاژ از آب زیرزمینی در فصل‌های گرم و عدم تغذیه آن از طریق بارش در دوره خشک می‌باشد.

تئوری مدل MODFLOW

مدل MODFLOW اولین بار در سازمان زمین‌شناسی آمریکا^۱ (USGS) در سال ۱۹۸۳ تهیه و از آن زمان تاکنون نسخه‌های فراوانی از آن منتشر شده است (McKee et al., 1995). این کد نرم‌افزاری با توجه به قابلیت‌های بالا و داشتن پکیج‌های مختلف که قابلیت شبیه‌سازی اجزاء مختلف تأثیرگذار بر سامانه آبی را دارند، یک مدل کامل در مدل‌سازی عددی یک سامانه اشباع و تشکیلات آبرفتی است. مدل MODFLOW یک مدل سه‌بعدی جریان اشباع، تفاضل محدود و Block-centered است که جریان آب زیرزمینی در محیط متخلخل را به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی می‌کند (McKee et al., 1995). برنامه‌ی مذکور به دلیل قابلیت و اعتبارسنجی گسترده

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی حوضه مه‌آباد چای با وسعت ۱۵۱۶ کیلومترمربع، هشتمین زیرحوضه از حوضه آبریز دریاچه ارومیه است که در شمال غربی ایران و جنوب غربی حوضه آبریز دریاچه ارومیه واقع شده است. موقعیت این محدوده در کشور و حوضه آبریز دریاچه ارومیه در شکل ۲ نشان داده شده است. در این محدوده می‌توان به سد مه‌آباد اشاره کرد که از سازه‌های مهم در منطقه است و شبکه آبیاری و زهکشی مه‌آباد در پایین دست آن قرار دارد. در این محدوده، وسعت آبخوان مه‌آباد حدود ۲۵۳ کیلومترمربع است. به لحاظ اقلیمی مطابق با روش‌های دمارتن و امبرژه دارای آب‌وهوای نیمه‌خشک و متوسط بارندگی بر اساس آمار بارندگی ایستگاه سینوپتیک مه‌آباد در طول دوره آماری ۱۳۶۹-۱۳۶۸ تا ۱۳۹۸-۱۳۹۷، سالانه ۴۰۲ میلی‌متر گزارش شده است. در طول دوره آماری ذکر شده، متوسط تبخیر سالانه از تشت بر اساس آمار و اطلاعات جمع‌آوری شده ایستگاه سینوپتیک مه‌آباد برابر با ۱۸۶۰ میلی‌متر است. متوسط حداکثر و حداقل ماهانه دما با میزان ۳۳/۷ و ۲/۲- درجه سانتی‌گراد به ترتیب در ماه‌های مرداد و بهمن اتفاق افتاده است. روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در طول ۲۳ سال (۹۸-۱۳۷۵) نشان می‌دهد سطح آب زیرزمینی به میزان ۱/۵ متر افت داشته است که متوسط سالانه آن برابر با حدود ۶ سانتی‌متر در سال است. افت سطح آب زیرزمینی عمدتاً به دلیل برداشت آب برای تأمین آب آبیاری و تبخیر از آب زیرزمینی به دلیل بالا بودن سطح آب زیرزمینی در مناطق شمالی و مرکزی دشت است (شکل ۲). بررسی‌ها براساس مقطع طولی از سطح آبخوان و با توجه به تراز سطح زمین، آب زیرزمینی و سنگ‌بستر نشان می‌دهد ضخامت سنگ‌بستر از جنوب غربی به شمال شرقی بین ۲۱ تا ۵۳ متر و تراز آب

1- United States Geological Survey

تبخیر و تعرق یک مدل استاندارد جریان آب زیرزمینی در سراسر جهان پذیرفته شده و در شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل‌های حالت پایدار و ناپایدار جریان آب در سامانه‌های مختلف استفاده می‌شود (Sibanda Barazzuoli et al., 2008; Palma and Bentley, et al., 2009; Bedekar et al., 2012). مدل MODFLOW، مدلی فیزیکی محور و کاملاً توزیعی است که معادله داری را با بیلان جرم برای جریان زیرسطحی ترکیب و از معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی برای شبیه‌سازی جریان استفاده می‌کند (Kim et al., 2008). معادله دیفرانسیل جزئی ذیل که از ترکیب شکل سه‌بعدی معادله داری و معادله پیوستگی حاصل می‌شود، معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی در محیط اشباع است:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} \pm w \quad (1)$$

که در آن K_{xx} ، K_{yy} و K_{zz} به ترتیب مقادیر هدایت هیدرولیکی در جهت‌های x ، y و z ، S_s ضریب ذخیره ویژه (I/L)، h بار آبی، t زمان است؛ و W فلاکس جریان حجمی در واحد حجم (L/T) است که برای تخلیه منفی و برای تغذیه مثبت است. این معادله با توجه به شرایط آبخوان مورد مطالعه مبنی بر همگن یا غیر همگن بودن، همروند یا غیرهمروند بودن و ماندگار یا غیر ماندگار بودن قابل ساده‌سازی است.

این مدل برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی شامل برنامه اصلی و تعداد زیادی برنامه‌های فرعی بوده که این برنامه‌های فرعی در تعدادی نرم‌افزار مستقل دسته‌بندی شده‌اند. هر بسته نرم‌افزار برای شبیه‌سازی یکی از سامانه‌های هیدرولوژیکی نظیر تغذیه از رودخانه، تخلیه توسط زهکش، برداشت آب توسط چاه برای حل معادلات خطی جریان با یک روش خاص به کار می‌رود. به طوری که هر کدام از بخش‌های محاسباتی و هیدرولوژیکی به گونه‌ای ایجاد شده‌اند که مستقل از یکدیگر عمل می‌کنند و به دلیل وجود این ساختار بخش‌ها و گزینه‌های جدیدی را می‌توان به مدل افزود بدون آنکه نیاز به تغییر در بخش‌های موجود باشد. بسته رودخانه^۱ با ساده‌سازی نحوه‌ی ارتباط بین آبخوان و رودخانه و میزان جریان مبادله شده بین آن دو را معطوف به دو عامل اختلاف هد و ضریب هدایت بستر رودخانه می‌نماید (Chitsazan et al., 2016). بسته‌های شبیه‌ساز تبخیر و تعرق در MODFLOW از روش تقریب خطی برای محاسبه میزان تبخیر و تعرق استفاده می‌کنند. در این روش نرخ تبخیر و تعرق روی سطح زمین و حداکثر ارتفاعی که در آن تبخیر و تعرق از آب زیرزمینی رخ می‌دهد توسط کاربر مشخص می‌گردد و بسته شبیه‌ساز

یکی از نسخه‌های جدید مدل MODFLOW، نسخه MODFLOW-NWT است که در این تحقیق از آن برای ساخت مدل آب زیرزمینی دشت مهاباد استفاده شد. در مدل MODFLOW-NWT از فرمول نیوتن برای حل مشکلات مربوط به خشک شدن سلول‌ها و دوباره خیس شدن غیرخطی در معادله زیرزمینی جریان محصور نشده استفاده می‌کند. این قابلیت در نسخه‌های قبلی مدل MODFLOW وجود نداشت و جز نقاط ضعف آن‌ها بود. این مدل باید با بسته Upstream-Weighting (UPW) استفاده شود. این بسته برای محاسبه قابلیت هدایت داخل سلولی از روشی متفاوت از روش Block-Centered Flow (BCF) استفاده می‌کند. به طور خلاصه جنبه‌های عملی مهم مدل MODFLOW-NWT که متفاوت از مدل MODFLOW-2005 است شامل موارد زیر است: (۱) از Upstream-Weighting برای محاسبه هدایت افقی آبخوان-های غیر محصور استفاده می‌کند، (۲) تمام سلول‌های بار متغیر فعال در شروع شبیه‌سازی، در سرتاسر شبیه‌سازی فعال باقی می‌مانند، (۳) هدایت افقی برای شرایط غیر محصور و ناپایدار در طول سلول‌های تر و خشک تصحیح شده است، (۴) فرمول‌بندی ذخیره برای تغییرات ذخیره در طول سلول‌های خشک و تر و در طی شرایط بین محصور و غیر محصور تصحیح شده است و (۵) فرمول‌بندی ذخیره برای شرایط غیر محصور تصحیح شده است، به طوری که تغییری در ذخیره به علت تغییرات بار در زیر کف سلول اتفاق نمی‌افتد (Niswonger et al., 2011).

مدل مفهومی منطقه مورد مطالعه

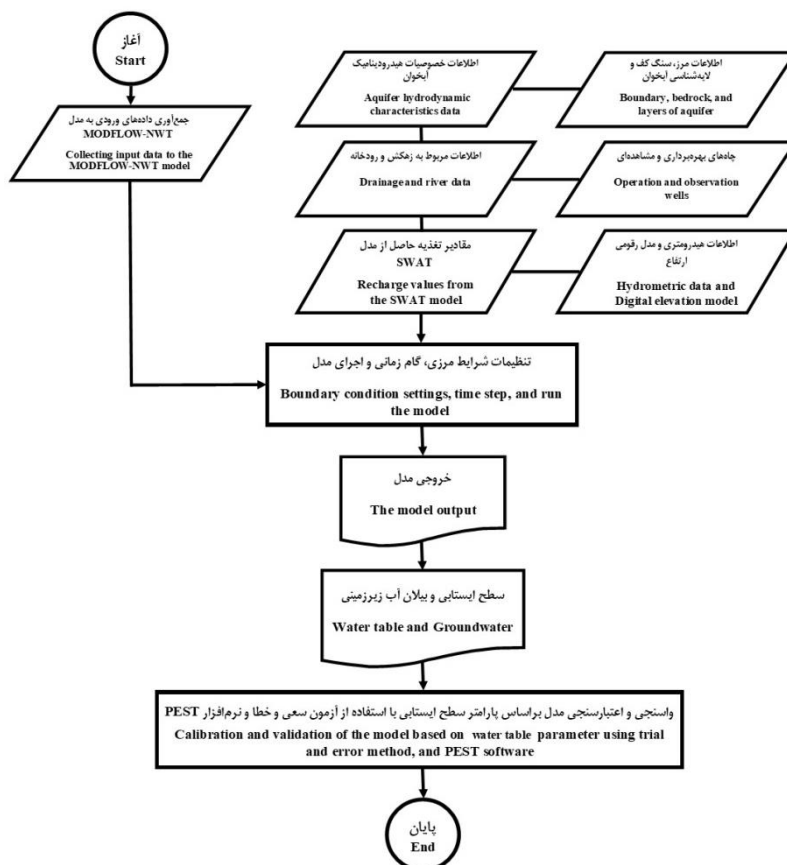
تهیه مدل مفهومی ساده‌ترین راه برای شناسایی و تبیین وضعیت آبخوان است. یک روش گام‌به‌گام مرحله‌ای را برای تهیه مدل مفهومی MODFLOW-NWT در شکل ۳ نشان داده شده است. برای تهیه مدل کمی و شبیه‌سازی جریان آبخوان مهاباد در مدل MODFLOW-NWT نیاز به ورود یک سری اطلاعات هواشناسی، هیدرولوژی، ژئوفیزیک، زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی از منطقه است. به طور مشخص در مدل‌سازی آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW-NWT در نرم‌افزار GMS پوشش‌های^۲ مختلفی شامل رقوم سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای، دبی چاه‌های بهره‌برداری، اطلاعات هیدرومتری، نوع مرزهای محدوده آبخوان،

مهاباد به صورت تک لایه در نظر گرفته شد. چاه‌های پیژومتری نیز به مدل معرفی شد. شبکه چاه‌های پیژومتری به منظور اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی از سال ۱۳۶۹ در دشت مهاباد آغاز شده است. تعداد چاه‌های مشاهده‌ای دشت مهاباد در سال ۱۳۸۰، ۲۰ حلقه بوده و در سال‌های بعد به تدریج بر تعداد آن‌ها به منظور تکمیل شبکه چاه‌های مشاهده‌ای افزوده شده است. به طوری که در سال ۱۳۹۰ تعداد ۲ حلقه و در نهایت در سال ۱۳۹۷ نیز تعداد ۵ حلقه چاه حفره شده است. طبق بررسی‌های انجام شده، از آمار و اطلاعات ۲۲ حلقه چاه پیژومتر که سطح آب زیرزمینی به صورت ماهانه در آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود و دارای شرایط آماری مناسب در طول دوره شبیه‌سازی بود در مدل‌سازی استفاده شد (شکل ۴b). لازم به ذکر است داده‌های ارتفاع آب در پیژومترها در فرآیند مدل‌سازی تأثیر ندارند، اما به عنوان داده‌ی مشاهده‌ای در ارزیابی نتایج و واسنجی مدل از آن‌ها استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی دقیق اثر رودخانه‌ها در مدل، اطلاعات مربوط به مکان رودخانه، سطح آب، شکل بستر و روابط دبی-اشل رودخانه‌ها در محل ایستگاه هیدرومتری واقع در دشت (ایستگاه گردی‌قوب) از سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی اخذ گردید.

ورودی و خروجی‌های آب‌های سطحی و زیرزمینی، سنگ کف، لایه شناسی آبخوان، خصوصیات هیدرولوژیکی و هیدرودینامیکی آبخوان (داده‌های هدایت هیدرولیکی، قابلیت انتقال، ضریب ذخیره، آبدهی ویژه) و جانمایی چاه‌های بهره‌برداری و مشاهده‌ای برای هر سلول وارد شد.

داده‌های مورد استفاده در مدل

یکی از مهم‌ترین پارامتر ورودی نقشه DEM مناسب است. آگاهی از دقت نقشه‌های توپوگرافی در مدل‌سازی آب زیرزمینی دارای اهمیت بسیار زیادی است. در این مطالعه از نقشه SRTM در مقیاس ۳۰ متر در تهیه تمامی نقشه‌های آب زیرزمینی و هندسه آبخوان مهاباد مانند مرز آبخوان، تراز آب زیرزمینی، سنگ کف و غیره استفاده شد (شکل ۴a). به طور کلی، شیب عمومی دشت از جنوب غربی به شمال شرقی و متوسط شیب دشت تقریباً برابر هفت در هزار است. با توجه داده‌های در دسترس، بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه، نقشه هم‌تراز آب زیرزمینی، موقعیت گسل‌ها در منطقه و نیز وضعیت پراکندگی چاه‌های حفر شده در منطقه، آبخوان



شکل ۳- داده‌های مورد استفاده در ساختار مدل‌سازی SWAT-MODFLOW-NWT
Figure 3- Data used in SWAT-MODFLOW-NWT modeling structure

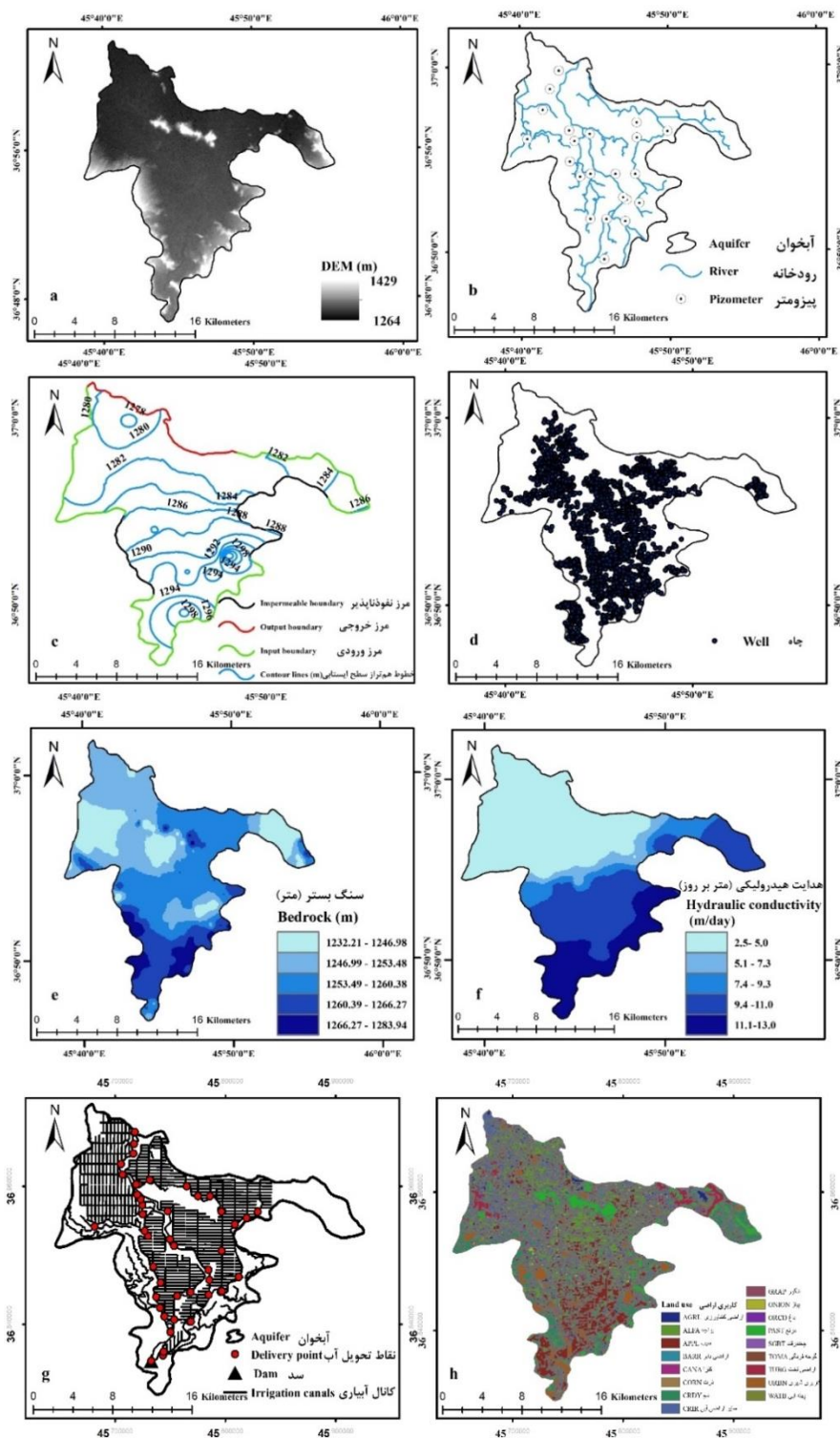
ژئوفیزیک، نقشه‌های زمین‌شناسی، لوگ چاه‌های پیرومتری و داده‌های لوگ حفاری چاه‌های اکتشافی و بهره‌برداری از سازمان‌های مربوطه مورد نیاز است. پس از بررسی‌های لازم از اطلاعات ۹۴ حلقه چاه جهت رسم رقوم سنگ‌بستر نسبت به تراز سطح زمین در نرم‌افزار Arc GIS استفاده شد (شکل ۴e). به‌طور کلی رقوم سنگ کف آبخوان از ۱۲۳۲ تا ۱۲۸۴ متر متغیر است. آبرفت سیلاب‌دشت شامل رسوبات نسبتاً نفوذپذیر از شن و رس است (Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2014). ضخامت سنگ‌بستر، متشکل از سنگ‌آهک کرتاسه و حدود ۶۰-۱۶ متر زیر سطح زمین نسبتاً نفوذناپذیر است.

ضرایب هیدرودینامیک مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده حرکت سیال در محیط متخلخل می‌باشند. ضرایب هدایت هیدرولیکی (K)، قابلیت انتقال (T) و آبدهی ویژه (S_v) از دسته پارامترهایی می‌باشند که به میزان سیال و تغییرات آن مرتبط است. در این مطالعه پس از بررسی‌های لازم از منابع اطلاعاتی متفاوت از قبیل آزمایش پمپاژ در چاه‌های اکتشافی، پیرومتری، بهره‌برداری و بر اساس دانه‌بندی نمونه خاک (Davis and De Wiest, 1996) برداشت‌شده در چاه‌های بهره‌برداری برای تعیین ضرایب هیدرودینامیک استفاده شد. پهنه‌بندی نقشه قابلیت انتقال نشان داد با توجه به ضخامت کم آبرفت و کوهستانی بودن منطقه ضریب قابلیت انتقال این دشت دارای ارقام پائینی بوده و از ۲۵۰ تا ۹۳۰ مترمربع در روز متغیر است. به‌طوری‌که با عبور اراضی جنوب و جنوب غربی به سمت مرکز دشت میزان آن کاهش یافته و در مرکز دشت به کمتر از ۵۰۰ مترمربع در روز می‌رسد. در نواحی شمالی دشت میزان قابلیت انتقال بین ۲۵۰ تا ۴۰۰ متر مربع در روز متغیر است. نتایج مطالعات مهندسی مشاور آب و توسعه پایدار (Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2014) و ولیزادگان و یزدانپناه (and Yazdanpanah, 2018) نیز نشان داده است میزان قابلیت انتقال بین ۲۵۰ تا ۹۵۰ مترمربع در روز متغیر است.

البته به دلیل کم بودن تعداد ایستگاه‌های هیدرومتری که این اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه مذکور انجام شده، از دقت در مدل‌سازی کاسته می‌شود. برای تقویت اطلاعات ورودی از سایر اطلاعات همچون اطلاعات خروجی برآورد شده از مدل SWAT شامل خصوصیات شیب، پهنا و عمق رودخانه اصلی مهاباد و کلیه آبراهه‌ها و اطلاعات گزارش شده در مقالات علمی (Nayyeri, 2015) استفاده شد. شبکه رودخانه مورد استفاده در فرآیند مدل‌سازی در شکل ۴b نشان داده شده است.

جریان آب زیرزمینی ورودی یکی از مهم‌ترین عوامل مهم تغذیه آبخوان است. لذا جبهه‌های ورودی و خروجی آبخوان مهاباد به‌عنوان شرایط مرزی با استفاده از نقشه تراز سطح ایستابی، خطوط هم‌تراز آب زیرزمینی و جهت جریان آب زیرزمینی مشخص شد. پس از بررسی خطوط هم‌تراز آب زیرزمینی مشخص شد آبخوان مهاباد دارای سه مقطع ورودی، یک مقطع خروجی و دو جبهه نفوذناپذیر است (شکل ۴c). یکی از مهم‌ترین منبع آب موجود در دشت مهاباد، چاه‌های بهره‌برداری جهت مصارف شرب، صنعت، کشاورزی و سایر مصارف است. میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی در سال‌های ۱۳۷۵، ۱۳۸۷، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۷ آماربرداری شده است. بررسی‌ها نشان داد به‌طور مشخص در طی دو دهه اخیر به‌تدریج تعداد چاه‌های حفر شده افزایش یافته و میزان بهره‌برداری از چاه‌ها در کل دوره آماری افزایش چشمگیر داشته است. با توجه به بانک اطلاعاتی آمار مطالعات پایه منابع آب، میزان برداشت از آب زیرزمینی در سطح دشت از ۱۲/۹۰ میلیون مترمکعب در سال آبی ۹۰-۱۳۸۹ به ۵۵/۲۰ میلیون مترمکعب در سال ۹۸-۱۳۹۷ (بیش از چهار برابر) از طریق افزایش تعداد چاه‌های پمپاژ از ۲۳۱۳ به ۳۴۲۶ افزایش یافته است. موقعیت چاه‌های بهره‌برداری در آبخوان مهاباد در شکل ۴d نشان داده شده است که داده‌های برداشت از آن‌ها در طی فرآیند مدل‌سازی به مدل تعریف شد.

جهت برآورد رقوم سنگ کف، اطلاعات برداشتی مطالعات



شکل ۴- (a) مدل رقومی ارتفاع (DEM) با مقیاس ۳۰ متر، (b) موقعیت چاه‌های پیزومتری و شبکه رودخانه، (c) مرزهای ورودی، خروجی، نفوذناپذیر و خطوط هم‌تراز آب زیرزمینی، (d) موقعیت چاه‌ها، (e) مقادیر سنگ‌بستر آبخوان، (f) مقادیر هدایت هیدرولیکی، (g) موقعیت کانال آبیاری، سد و نقاط تحویل آب در سطح شبکه و (h) نقشه کاربری اراضی

Figure 4- a) Digital elevation model (DEM) with a scale of 30 meters, b) Location of piezometric wells, c) Inlet, outlet, impermeable boundaries, and groundwater contour lines, d) Location of wells, e) Values Aquifer bedrock and f) Hydraulic conductivity values, g) Location of irrigation canal, dam and water delivery points at the network, and h) Land use map

شدت، مدت زمان و میزان آن مشخص کرد. از بین این سه بعد، شدت خشکسالی عامل اصلی می‌باشد که می‌تواند برای تجزیه و تحلیل خشکسالی استفاده شود. استانداردها برای بیان خشکسالی مبتنی بر اقلیم‌شناسی منطقه است. به طور معمول، اندازه‌گیری‌های هواشناسی اولین شاخص‌های خشکسالی می‌باشند. خشکسالی هواشناسی را می‌توان در نتیجه کاهش و یا عدم بارش مشاهده کرد و آن را در یک منطقه برای یک دوره زمانی تعریف کرد. این شرایط معمولاً برای هر منطقه متفاوت است؛ زیرا شرایط جوی در مناطق مختلف از نظر مکان و زمان بسیار متغیر می‌باشد. خشکسالی هواشناسی با توجه به شاخص‌های تعریف آن بر اساس داده‌های آب و هوا به نوعی مقدم بر شروع اثرات خاص، یعنی دیگر انواع دیگر خشکسالی است. شاخص‌های مختلفی برای نظارت و ارزیابی میزان خشکسالی‌های هواشناسی وجود دارد. به طور کلی در این مطالعه، از شاخص‌های خشکسالی استاندارد شده بارش SPI^1 (McKee et al., 1995)، باران - تبخیر و تعرق استاندارد شده (Vicente-Serrano et al., 2011) $SPEI^2$ و جریان استاندارد (Nalbantis and Tsakiris, 2009) SDI^3 برای پایش و تعیین سال‌های ترسالی، نرمال و خشکسالی استفاده شد. در این مطالعه از بسته نرم افزاری $DrinC^4$ تهیه شده در مرکز ارزیابی خطرات طبیعی و برنامه‌ریزی اقدامات پیشگیرانه و موسسه احیا و مدیریت منابع آب دانشگاه فنی ملی آتن برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی مورد استفاده قرار گرفت (Tigkas et al., 2015). نرم‌افزار $DrinC$ ابزاری کاربر پسند است که برای محاسبه چندین شاخص خشکسالی ارائه شده است. هدف اصلی در طراحی آن قابلیت آن در برآورد انواع مختلف خشکسالی (هواشناسی، هیدرولوژی، کشاورزی) است.

اجرای مدل

کل محدوده‌ی شبکه‌بندی مدل MODFLOW-NWT مساحتی حدود ۸۳۷ کیلومترمربع و ناحیه‌ی فعال آن مساحتی حدود ۲۵۳ کیلومترمربع را در برمی‌گیرد. به‌طور کلی انتخاب مقیاس سلول‌های شبکه به اطلاعات در دسترس، دقت مورد انتظار و همگرایی و واگرایی نتایج مدل بستگی دارد. براساس مروری بر ادبیات داخلی و خارجی و نیز داده‌های موجود در منطقه، مقیاس ۵۰۰ در ۵۰۰ متر برای مدل‌سازی انتخاب شد. بنابراین گسسته‌سازی و پیکسل بندی مدل MODFLOW-NWT دشت مهاباد با ایجاد یک شبکه‌ی منظم

در این مطالعه از اطلاعات آزمایش پمپاژ چاه‌های اکتشافی و بهره‌برداری برای تعیین هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه استفاده شد. داده‌های حاصل از آزمایش پمپاژ نشان داد میزان هدایت هیدرولیکی از ۲/۵ تا ۱۳ متر در روز متغیر است (شکل ۴f). به‌طورکلی نواحی شمالی و شمال غربی آبخوان کم‌ترین مقدار و نواحی جنوبی و جنوب غربی بیش‌ترین مقدار را نشان می‌دهند. نزدیک خروجی آبخوان، میزان هدایت هیدرولیکی به دلیل وجود رسوبات دانهریز کاهش می‌یابد. همچنین، میزان آبدهی ویژه در سطح منطقه از ۰/۴ تا ۳/۶ مترمربع در روز متغیر است. بررسی مطالعات پیشین به‌منظور تعیین آبدهی ویژه نیز نشان می‌دهد مقدار آن بین ۰/۳ الی ۳/۱ درصد است (Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2014).

محدوده تغییرات ضریب هدایت کف رودخانه‌ها برای سه بازه ورودی به دشت، میانی و پایاب برای رودخانه مهاباد بین ۳ تا ۱۵ متر در روز متغیر بود که در مرحله واسنجی مدل جهت تخمین اولیه و در نهایت تعیین مقدار دقیق ضریب هدایت کف رودخانه استفاده شد (Water Consulting Engineers and Nayyeri, 2015)؛ درک فرآیندهای تغذیه آب زیرزمینی برای توسعه منابع آب در مناطق نیمه‌خشک و خشک مهم است. در این مطالعه، در مدل‌سازی آب زیرزمینی از مقادیر تغذیه حاصل از مدل SWAT استفاده شد (Raja et al., 2021). میزان تغذیه (نفوذ عمقی) ناشی از تلفات آب آبیاری و نفوذ از بارندگی از پروفیل غیراشباع خاک حاصل می‌شود. مدل SWAT فرض می‌کند که آب آبیاری از بالاترین لایه به پایین‌ترین لایه خاک تا ظرفیت زراعی پر می‌شود و هنگامی که ذخیره رطوبتی خاک در یک لایه بیش از ظرفیت زراعی باشد، نفوذ عمقی رخ می‌دهد. در پرونده‌های خروجی مدل در قسمت output.hru پارامتر GW_RCHG که بیانگر تغذیه به آبخوان است، استخراج و به مدل معرفی شد. به‌طورکلی میزان تغذیه سالانه واردشده به مدل از ۱۷ تا ۳۶۳ میلی‌متر متغیر است. اگرچه به‌طور قاطع نمی‌توان الگوی مکانی مشخصی را برای تغذیه در سطح همه کاربری اراضی و در کل سطح دشت اذعان داشت، اما نتایج شبیه‌سازی حاصل از مدل SWAT نشان داد که مقدار قابل توجهی تغذیه در سطح اراضی زراعی و باغی و در مرکز و خروجی دشت (واقع در شمال غربی) و نیز در مناطق واقع در امتداد کانال اصلی رودخانه وجود دارد. موقعیت کانال‌های آبیاری به همراه نقاط تحویل آب و موقعیت سد انحرافی یوسف کندی در شکل ۴g و نقشه کاربری اراضی استفاده شده در مدل SWAT در شکل ۴h نشان داده شده است. اطلاعات تکمیلی در خصوص نتایج مدل SWAT در مطالعه رجا و همکاران (Raja et al., 2021) منتشر شده است.

خشکسالی پدیده‌ای پیچیده است که می‌توان آن را عمدتاً با

- 1- Standardised Precipitation Index
- 2- Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
- 3- Streamflow Drought Index
- 4- Drought indices Calculator

شبیه‌سازی شده حداقل اختلاف وجود داشته باشد. در این مطالعه در ابتدا مدل با انتخاب روش ریاضی حل سامانه معادلات جبری شامل تعداد تکرار و معیار خطای قابل قبول برای خاتمه فرآیند تکرار اجرا شد. پارامترهای مدل که برای واسنجی می‌توانند تغییر یابند شامل خصوصیات هیدرولیکی آبخوان و تغذیه آب زیرزمینی است. در این مطالعه واسنجی مدل MODFLOW-NWT با تغییر مقادیر مجموعه‌ی پارامترها شامل مقادیر هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه، تغذیه و هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه باهدف تطابق مقادیر تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای انجام شد. در ابتدا به‌منظور درک واکنش مدل به تغییر پارامترها، واسنجی به روش سعی و خطا انجام شد. سپس، از الگوریتم PEST^۳ به‌عنوان یک برآوردگر غیرخطی به‌منظور دستیابی به واسنجی بهینه استفاده شد (Doherty et al., 1994). به این صورت که بعد از اجرای اولیه مدل، در مرحله اول مقادیر هدایت هیدرولیکی که از نتایج آزمون‌های پمپاژ و اطلاعات تهیه‌شده از آب منطقه‌ای به مدل معرفی شده بود در حالت ماندگار^۴ واسنجی و سپس شرایط اولیه برای اجرای بعدی مدل مهیا شد. در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی آنالیز حساسیت هرکدام از این پارامترها موردبررسی قرار گرفت. چراکه در مرحله واسنجی تغییرات پارامترهای حساس بسیار مهم می‌باشند. به‌طور کلی هرکدام از این پارامترها حساس می‌باشند؛ اما درجه حساسیت هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه و تغذیه نسبت به سایر پارامترها بیشتر بود؛ بنابراین، تعیین و اعمال مقادیر هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه و تغذیه عامل مهم دیگری برای دستیابی به یک واسنجی موفق بود. البته از آنجاکه این مقادیر باید بر اساس خصوصیات منطقه تغییر کنند؛ بنابراین مهم بود مقادیر مطلوب در محدوده واقع‌بینانه (۲/۵ تا ۱۳ متر در روز برای هدایت هیدرولیکی و ۰/۴ تا ۳/۶ درصد برای آبدهی ویژه) تعیین شوند که توسط مطالعات پیشین در منطقه انجام‌شده بود (Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2014).

در گام بعدی، پس از تخمین مقادیر اولیه ضرایب هیدرودینامیکی برای کاهش اختلاف تراز آب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای، مدل برای حالت غیر ماندگار با استفاده از داده‌های متغیر بازمان، نظیر آبدهی چاه‌های بهره‌بردار، تغذیه و تراز سطح ایستابی چاه‌های مشاهده‌ای اجرا و مقادیر آبدهی ویژه (S_y)، ضریب هدایت هیدرولیکی (K)، هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه و شاخه‌های جریان و تغذیه آب زیرزمینی به‌صورت خودکار و به کمک روش PEST در نرم‌افزار GMS واسنجی شد. در نهایت مدل MODFLOW-NWT بر اساس مقادیر سطح آب زیرزمینی ارزیابی و واسنجی گردید. معیار خطا به نوع

تفاضلات محدود به تعداد ۳۳۴۸ سلول با اندازه‌ی سلول ۵۰۰ متر در ۵۰۰ متر متشکل از ۶۲ ردیف شرقی-غربی و ۵۴ ستون در جهت شمال-جنوب با ۱۰۱۳ سلول فعال طراحی شد. با توجه‌ی مدل MODFLOW-NWT مرزهای با جریان ورودی و خروجی به‌صورت بار هیدرولیکی متغیر (بار هیدرولیکی عمومی^۱)، مرزهایی از محدوده آبخوان که همسو و منطبق با جهت کلی جریان آب زیرزمینی (مرز بدون جریان) که از نقشه خطوط هم‌تراز سطح آب زیرزمینی استخراج شد به‌صورت بار هیدرولیکی مشخص^۲ در نظر گرفته شد. پس از اجرای اولیه، مقادیر تغذیه حاصل از مدل SWAT به‌عنوان داده ورودی به مدل MODFLOW-NWT اضافه شد (Raja et al., 2021). داده‌های تغذیه ماهانه در زیرحوضه‌های مدل SWAT در سطح سلول‌های مدل MODFLOW-NWT تقسیم می‌شوند و سپس به‌عنوان مرز بالا به مدل MODFLOW-NWT معرفی می‌شوند. مقادیر هدایت هیدرولیکی بر اساس لایه شناسی و سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه به مدل معرفی و به‌طور مشابه، مقادیر آبدهی ویژه محاسبه و مقادیر اولیه‌ی آن‌ها به مدل تعریف شد. مقادیر برداشت هر یک از چاه‌های بهره‌بردار بر اساس آماربردارها و مقادیر تغذیه برآورد شده توسط مدل SWAT در سطح زیرحوضه‌ها به‌صورت ماهانه به مدل معرفی شد. مدل MODFLOW-NWT در ابتدای شبیه‌سازی به سطح آب زیرزمینی اولیه نیاز دارد؛ بنابراین، برای شبیه‌سازی جریان ماندگار (گام زمانی یک ماه)، از سطح آب اندازه‌گیری شده چاه‌های مشاهداتی در مهر سال ۱۳۸۹-۱۳۸۸ به‌عنوان شرط اولیه به مدل معرفی شد. بسته WEL مدل MODFLOW-NWT فرآیندهای پمپاژ از آب‌های زیرزمینی را شبیه‌سازی می‌کند. در مدل اصلی MODFLOW-NWT از بسته‌های ETS و RCH به ترتیب برای شبیه‌سازی تبخیر و تعرق از سطح آب زیرزمینی و تغذیه آب زیرزمینی استفاده و همچنین، جهت بررسی اندرکنش بین منابع آب سطحی و زیرزمینی از بسته RIV استفاده شد. برای شبیه‌سازی جریان حالت غیر ماندگار، بار آبی اندازه‌گیری شده چاه‌های مشاهداتی در مهر ۱۳۸۹-۱۳۸۸ به‌عنوان بار آبی اولیه در ماه بعدی (آبان ۱۳۸۸) در نظر گرفته شدند.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل

واسنجی مدل آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین و مشکل‌ترین مراحل استفاده از یک مدل شبیه‌سازی عددی آب زیرزمینی است. واسنجی مدل فرآیندی است که در آن پارامترهای نامشخص و با عدم قطعیت برای دستیابی به مقادیر بهینه تغییر می‌یابند تا بین نتایج خروجی مدل از قبیل سطح آب زیرزمینی اندازه‌گیری و

3- Parameter estimation

4- Steady State

1- General Head Boundary

2- Specific Head Boundary

می‌باشند که لازم است میزان حساسیت هریک از این پارامترها در مدل بررسی شود. اگر حساسیت مدل به تغییر مقادیر پارامترهای بر آبخوان زیاد باشد، نیاز مقادیر دقیق‌تر آن پارامتر وجود دارد (Karimpour and Rakhshandehroo, 2011). تجزیه و تحلیل حساسیت در خصوص پارامترهای اصلی آب زیرزمینی نشان داد هدایت هیدرولیکی حساس‌ترین پارامتر مربوط به شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی بود (شکل ۵). میزان هدایت هیدرولیکی بر تمامی محدوده مدل تأثیرگذار است. همچنین، جهت و میزان جریان به این پارامتر وابستگی زیادی دارد. از طرف دیگر افزایش میزان هدایت هیدرولیکی موجب تغییر در توزیع مکانی اثر ورود و خروج آب از طریق منابع و مصارف مختلف در تمامی سلول‌های مدل می‌گردد. طاهری تیزرو و کمالی (Taheri Tizro and Kamali, 2019) و سادات همراز و همکاران (Sadat Hamraz et al., 2016) نیز نشان دادند مدل نسبت به تغییرات هدایت هیدرولیکی دارای حساسیت بالا بوده و با آبدی ویژه رفتار مشابهی داشته است. کوهستانی و همکاران (Koohestani et al., 2013) نیز نشان دادند اگر مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه در مراحل تهیه مدل مفهومی به اندازه قابل قبولی از گزارش‌ها و کارشناسان سازمان آب تهیه و معرفی شوند میزان خطای ایجاد شده در برآورد سطح آب زیرزمینی در اثر تغییرات این پارامترها بسیار پایین خواهد بود. پارامتر تغذیه نیز یکی از عوامل مؤثر در نوسانات سطح ایستابی است (شکل ۵). به طوری که حساسیت نسبتاً بالایی را همانند هدایت هیدرولیکی داشت. عابدی کوهپایی و گلابچیان (Abedi Koupai and Golabchian, 2015) نیز حساسیت مدل را نسبت به پارامتر تغذیه بسیار بالا و در حد پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه گزارش کردند. پارامترهای که تاکنون مورد بررسی قرار گرفت کل مدل را تحت تأثیر قرار می‌دهند و موجب تغییر سطح آب در تمامی پیژومترها در مدل می‌شوند؛ اما برخلاف سایر پارامترها، ضریب هدایت کف رودخانه بر تعداد محدودی پیژومتر (پیژومترهای نزدیک به رودخانه) تأثیر می‌گذارد. این امر باعث شد میزان حساسیت مدل نسبت به تغییرات این پارامتر در مقایسه با سایر پارامترها کمتر باشد.

واسنجی هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه

در مدل MODFLOW-NWT، پارامترهای اولیه واسنجی هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره آبخوان بودند. اولین مرحله از انجام عملیات واسنجی مربوط به هدایت هیدرولیکی بود. دقت در تعیین این پارامتر تأثیر زیادی در دقت سایر عوامل دارد. نتایج حاصل از واسنجی ضریب هدایت هیدرولیکی در شکل ۶a نشان داده شده است.

مقدار واسنجی بستگی دارد. اگر واسنجی بار هیدرولیکی باشد، میزان خطا متناسب با اهداف مطالعه منظور می‌شود. همچنین اگر مقدار واسنجی، جریان هیدرولیکی یا بیلان آب باشد، خطا جزئی قابل قبول خواهد بود. همچنین، مدل خطای بیلان جرمی را توسط درصد اختلاف^۱ نشان می‌دهند و هر چه این مقدار به صفر نزدیک‌تر باشد، بیلان ارائه شده توسط مدل قابل قبول‌تر است. در این مطالعه برای مدل‌سازی غیر ماندگار آبخوان مه‌باد یک دوره‌ی ده‌ساله (از سال آبی ۸۹-۱۳۸۸ تا ۹۸-۱۳۹۷) در نظر گرفته شد. واسنجی و اعتبارسنجی مدل به ترتیب برای دوره‌های مهر سال ۱۳۸۸ تا شهریور سال ۱۳۹۴ و از مهر سال ۱۳۹۴ تا شهریور سال ۱۳۹۸ انجام و دوره‌ی تنش و گام زمانی ماهانه و واحد زمان روزانه انتخاب گردید. از آنجاکه اندازه‌گیری تراز سطح ایستابی در چاه‌های مشاهده‌ای به صورت ماهانه انجام می‌شود، گام زمانی ماهانه در نظر گرفته شد.

معیارهای ارزیابی مدل

برای ارزیابی کارایی مدل واسنجی شده، می‌توان میزان اختلاف موجود در بیلان آب^۲ برآورده شده در فایل خروجی را مشاهده کرد. این مقدار اختلاف باید تا حد امکان بسیار کوچک (کمتر از یک درصد) باشد. همچنین، از معیارهای مختلفی شامل ضریب تبیین (R^2) و ضریب نش-ساتکیف (NSE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و PBIAS برای ارزیابی اثربخشی مدل و قابلیت آن در پیش‌بینی‌های دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی استفاده گردید:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \times \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \quad (5)$$

در این روابط، مقدار n تعداد مشاهدات، O_i و P_i به ترتیب مقادیر تراز سطح ایستابی اندازه‌گیری شده و برآورد شده (متر) و \bar{O} و \bar{P} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده تراز سطح ایستابی (متر) است.

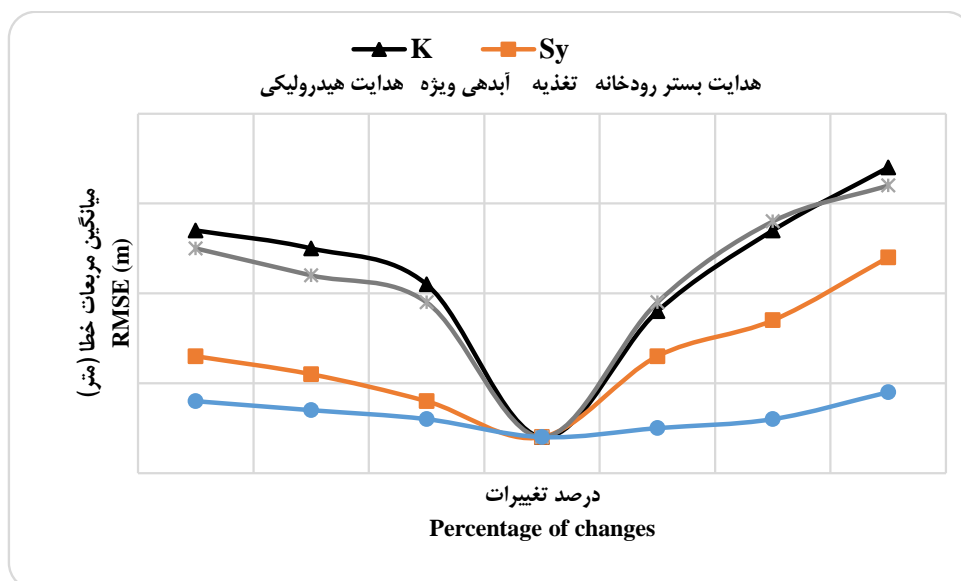
نتایج و بحث

تحلیل حساسیت پارامترهای مدل MODFLOW-NWT

پارامترهای متعددی در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی دخیل

1- Percent Discrepancy

2- The discrepancy in water budget

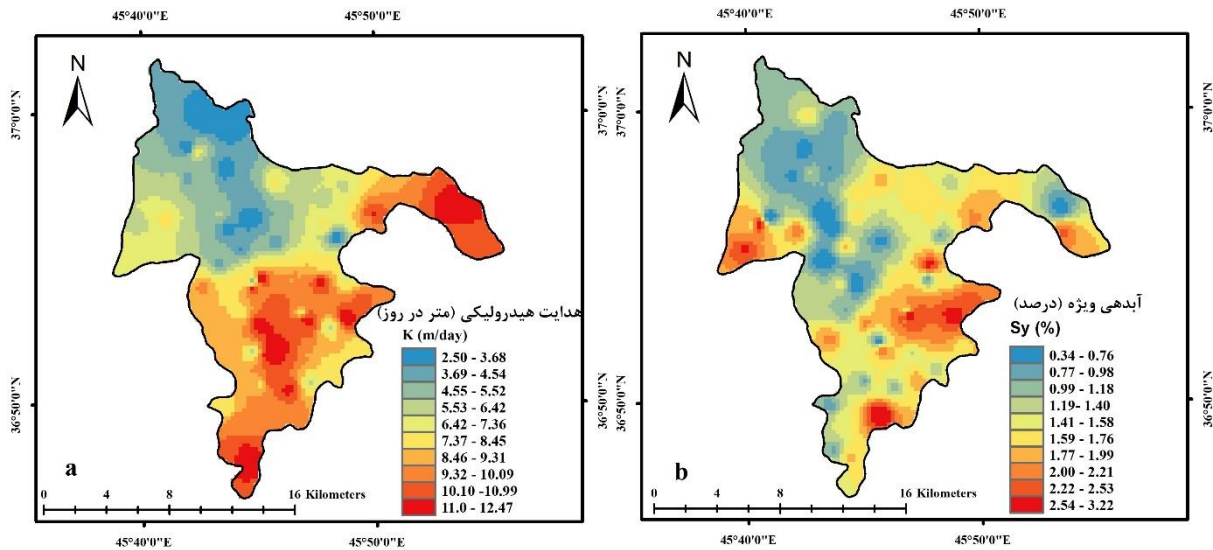


شکل ۵- نتایج آنالیز حساسیت و میزان خطا نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی مدل در سه سطح ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد

Figure 5- Results of sensitivity analysis and error rate to changes of model input parameters at three levels of 10, 20 and 30%

در این مطالعه از مقادیر تغذیه حاصل از مدل SWAT در مدل سازی آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW-NWT استفاده شد. برآورد میزان تغذیه به آب زیرزمینی به هر روشی با عدم قطعیت روبه‌رو بوده و لزوماً این مقادیر همانند سایر روش‌ها ممکن است از دقت بالایی برای منطقه مورد مطالعه برخوردار نباشد و به‌منظور تعیین دقیق‌تر آن‌ها نیازمند واسنجی مدل است. مقادیر تغذیه با توزیع زمانی و مکانی مناسب در سطح دشت به مدل معرفی شد به‌طوری‌که بررسی نتایج حاصل از مدل SWAT نشان داد مقادیر تغذیه به آب زیرزمینی در فصول پاییز و زمستان حداقل بوده اما در فصول بهار و تابستان با افزایش فعالیت‌های کشاورزی میزان تغذیه به آب زیرزمینی افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که نتایج حاصل از واسنجی نشان داد به‌طور متوسط ۱۱/۲٪، ۱۸/۹٪، ۲۴/۷٪ و ۴۵/۲٪ تغذیه به آبخوان ناشی از نفوذ از بارندگی و جریانات برگشتی آب کشاورزی به ترتیب در فصل‌های پاییز، زمستان، بهار و تابستان اتفاق افتاده است. در این مطالعه نتایج نشان داد به‌طور متوسط حدود ۹ درصد از آب بارندگی و ۳۶ درصد از مصارف آب در بخش کشاورزی به آبخوان نفوذ می‌کند که با مقادیر ارائه‌شده در استانداردهای مربوطه و همچنین گزارش‌های بیلان منابع و مصارف مطابقت خوبی دارد (Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2014).

نتایج واسنجی نشان داد بیش‌ترین میزان هدایت هیدرولیکی در نواحی جنوبی به سمت نواحی مرکزی دشت و نیز در نواحی شمال شرقی (۱۱/۰-۱۲/۵) است و در حاشیه شمالی و در نزدیکی خروجی دشت به کمترین میزان خود (۲/۵۰-۳/۶۸) متر در روز می‌رسد. دلایل متعددی می‌تواند در تغییرات موجود این پارامتر در کل منطقه نقش داشته باشد. با توجه به این‌که در نواحی شمالی دشت بافت خاک غالباً سنگین بوده (درصد رس بالا) لذا پیشروی از قسمت جنوب به سمت شمال آبخوان از مقادیر هدایت هیدرولیکی کاسته می‌شود (Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2014). دومین پارامتر واسنجی شده، آبدهی ویژه در شرایط غیر ماندگار بود. مقادیر واسنجی شده آبدهی ویژه در سطح آبخوان در شکل ۶b نشان داده شده است. نتایج نشان داد بالاترین میزان ضریب ذخیره در نقاط جنوبی دشت و پایین‌ترین میزان آبدهی ویژه در نقاط خروجی و شمالی دشت برآورد شده است که با مقادیر بیان‌شده در گزارش بیلان منابع و مصارف مطابقت دارد (Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2014). قسمت‌های جنوبی آبخوان به دلیل وجود تشکیلات دانه‌درشت بیشتر، آبدهی ویژه بیشتری نسبت به دیگر مناطق دارند. چنین وضعیتی در قسمت ورودی جریان از سمت شمال غربی دشت دیده می‌شود. در نواحی مرکزی و شمالی آبخوان که لایه‌های ضخیم‌تری از رس و تشکیلات دانه‌ریز وجود دارد، مقدار ضریب ذخیره کمتری (۰/۴-۱/۰۴ درصد) تعیین شد.



شکل ۶- (a) مقادیر هدایت هیدرولیکی و (b) آبدهی ویژه پس از واسنجی

Figure 6- (a) hydraulic conductivity, and (b) specific yield values after calibration

نوسانات سطح آب زیرزمینی در اکثر پیزومترها بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده وجود ندارد. البته در برخی از هیدروگراف‌ها، سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده بالا یا پایین‌تر از سطح آب‌های زیرزمینی اندازه‌گیری شده اتفاق می‌افتد. اختلافات و تناقضات موجود به دلایل مختلفی بستگی دارد. دلایل اصلی این اختلافات را می‌توان به خطا در ثبت تخلیه چاه‌ها همراه با چاه‌های غیرمجاز، تغییرات ناگهانی سطح آب زیر زمینی، خطای انسانی در ثبت تراز آب زیر زمینی چاه‌های مشاهده‌ای در پیزومترها و خطای اجتناب‌ناپذیر در تخمین ضرایب هیدرودینامیک مانند هدایت هیدرولیکی نسبت داد.

بررسی پیزومترها نشان داد که نوسانات سطح آب زیرزمینی بیشتری در پیزومترهای اراضی قره‌خان، اراضی قزل گپی، اراضی گردگروی، قزل گپی-قره‌قشلاق، گبازله و لچ واقع در مرکز و شمال شرقی آبخوان نسبت به سایر پیزومترها اتفاق می‌افتد که ممکن است به دلیل تغذیه فصلی ناشی از آبیاری بی‌رویه کشاورزان و نفوذ عمقی حاصل از آن باشد. به طوری که بررسی‌ها براساس نقشه کاربری اراضی نشان داد عمده محصولات تحت کشت در این مناطق شامل کشت‌های پرمصرف پیاز و یونجه است. همچنین، تغییرات ناگهانی سطح آب در برخی پیزومترهای نزدیک به رودخانه مهاباد (پیزومترهای اراضی قزل گپی، اراضی اگریقاش، گردگروی و لچ) در برخی از ماه‌های سال اتفاق افتاده است. دلیل این مطلب را می‌توان به وقوع سیلاب‌های فصلی و رهاسازی حجم آب زیادی در شبکه مهاباد طی یک بازه زمانی کوتاه‌مدت به خصوص در سال‌های اخیر بر اساس داده‌های رهاسازی شده از سد مهاباد در رودخانه مهاباد و نیز داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه هیدرومتری گردیعقوب در نقطه

واسنجی سطح آب زیرزمینی

نتایج شبیه‌سازی جریان ماندگار برای ماه مهر سال آبی ۸۹-۱۳۸۸ مؤثر واقع شد. در حقیقت، تراز آب زیرزمینی در شرایط ماندگار به دلیل حداقل بهره‌برداری از آبخوان دارای افت قابل توجهی نبود. در چنین شرایطی، فرض ماندگاری جریان آب زیرزمینی خطای قابل‌ملاحظه‌ای را تولید نمی‌کند. افزایش پمپاژ نه‌تنها در مقیاس فصلی بلکه در یک دوره طولانی‌مدت سبب افت تراز آب زیرزمینی در ماه‌های فروردین تا شهریورماه می‌شود. از این رو، مدل‌سازی در شرایط غیر ماندگار به دلیل در نظر گرفتن پویایی سامانه آب زیرزمینی از قبیل تغییرات فصلی و اثرات خشک‌سالی/ترسالی نسبت به شرایط ماندگار مناسب‌تر است. به همین دلیل برای در نظر گرفتن تغییرات تراز آب زیرزمینی، یک دوره شش و چهارساله به ترتیب برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از نوسانات سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در ۲۲ پیزومتر در شکل ۷ نشان داده شده است.

نتایج به‌دست‌آمده از هر دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی نشان داد مطابقت خوبی بین تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای وجود دارد. به طوری که مدل روند تغییرات تراز آب زیرزمینی در دشت را به صورت رضایت‌بخشی شبیه‌سازی کرده و توانسته است تغییرات تراز آب زیرزمینی در ماه‌های مختلف را با توجه به تغییر میزان تغذیه و تخلیه از آبخوان در طی دوره‌ها و مناطق مختلف با در نظر گرفتن کاربری اراضی و الگوی آبیاری به‌طور مناسبی برآورد نماید. به‌طور کلی بررسی هیدروگراف‌های تمام پیزومترها نشان می‌دهد مدل توانسته روند فصلی و بلندمدت سطح آب زیرزمینی را در طول دوره شبیه‌سازی به‌درستی به تصویر بکشد. به طوری که اختلاف قابل توجه

است که دلیل آن را می‌توان به وقوع سیلاب در رودخانه‌ها و یا برعکس کاهش جریان آب در رودخانه در یک بازه زمانی کوتاه‌مدت نسبت داد. در مطالعه حمزه‌خانی (Hamzehkhani, 2015) نیز به تأثیر رهاسازی جریان‌های سیلابی در رودخانه‌های سیمینه و زرینه‌رود واقع در دشت میاندوآب بر نوسانات سطح آب زیرزمینی اشاره شده است.

علاوه‌براین، واقع‌بینانه است که خصوصیات آبخوان در یک سلول شبکه ۵۰۰ متری منحصربه‌فرد است. این امر می‌تواند باعث تغییرات قابل توجهی در شبیه‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی در بازه‌های زمانی خاص در مدل‌سازی شود. همچنین، بررسی‌ها نشان داده است اگر چاه مشاهده‌ای در لبه سلول شبکه‌بندی واقع شود، تراز سطح آب زیرزمینی تخمین زده‌شده در مرکز هر سلول احتمالاً با مقدار مشاهداتی متفاوت خواهد بود (Wei and Bailey, 2019).

نتایج اعتبارسنجی مدل نیز مشابه نتایج واسنجی بود که نشان‌دهنده سازگاری شبیه‌سازی مدل در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی است. به‌طور کلی در نظر گرفتن مقادیر تغذیه حاصل از مدل SWAT به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین و مهم‌ترین پارامترهای آب زیرزمینی است که تعیین آن توسط مدل طی فرآیند واسنجی، نشانگر میزان قابل اعتماد بودن روش در نظر گرفته‌شده برای تعیین میزان تغذیه آبخوان است. این امر اهمیت انتخاب روش مناسب برآورد تغذیه را نشان می‌دهد (Dowlatabadi and Zomorodian, 2016; Kouchakzadeh and Nasiri, 2015; Aliyari et al., 2019; Saadatpour et al., 2019; Semiroimi and Koch, 2019).

خطای مدل‌سازی

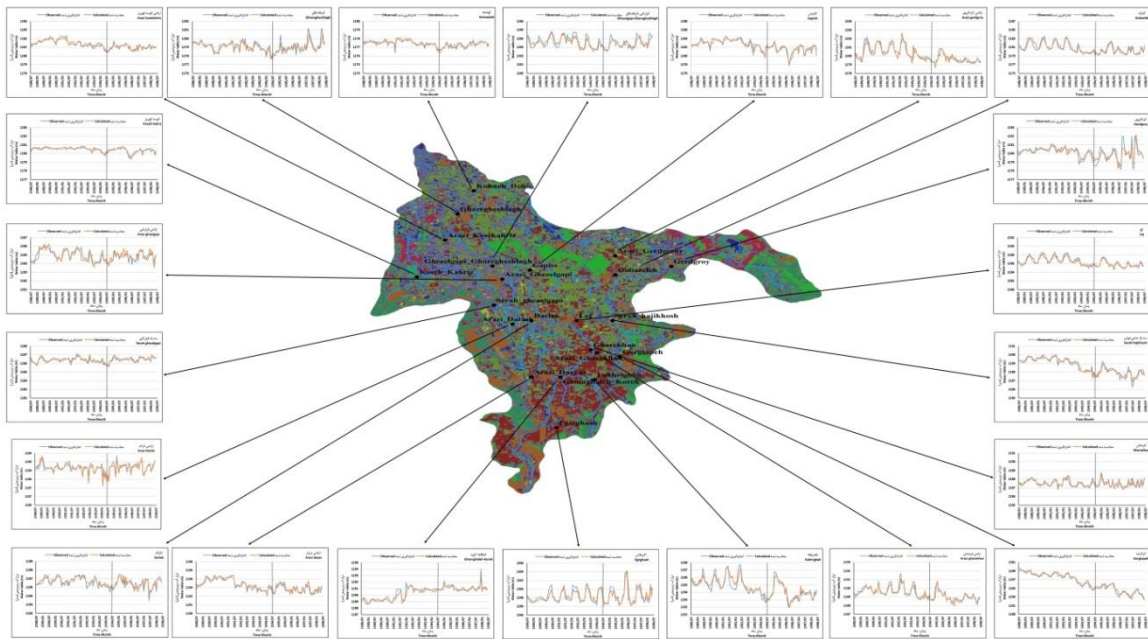
تلاش‌های زیادی در ساخت مدل آب زیرزمینی برای نزدیک کردن آن به شرایط واقعی انجام شد؛ اما عملاً واردکردن تمام جزئیات مؤثر بر جریان آب زیرزمینی در شرایط واقعی به مدل امکان‌پذیر نبوده و ممکن است نتایج حاصله تطابق کاملی با مقادیر مشاهده‌ای در محیط طبیعی برخوردار نباشند. مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده سطح ایستابی به همراه آماره‌های عملکرد مدل برای دوره‌های مختلف واسنجی و اعتبارسنجی در شکل ۸ نشان شده است.

ضریب تبیین (R^2) بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی نشان می‌دهد که این دو مقدار از هم‌بستگی بسیار بالایی برخوردارند. نتایج معیار RMSE با توجه نوسانات سطح آب زیرزمینی هر یک از چاه‌های پیژومتر نشان داد مقدار خطای ۰/۳۵ و ۰/۳۴ متر به ترتیب برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی به‌دست آمد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد مقدار خطا کمتر از یک متر است که نتیجه رضایت‌بخش و مناسبی برای منطقه است. بررسی‌ها نشان داد ۱۶ چاه از ۲۲ چاه مشاهده‌ای دارای خطای RMSE کمتر از ۰/۴ متر بودند که نشان از دقت بالای واسنجی مدل باشد.

خروجی دشت نسبت داد. تغییرات ناگهانی سطح آب زیرزمینی در برخی مناطق می‌تواند منجر به خطاهای منطقه‌ای شود به‌طوری‌که مدل نتواند به‌طور کامل شرایط واقعی را شبیه‌سازی کند. سایر محققین نیز بیان کرده‌اند سطح آب زیرزمینی در اثر تغییرات تغذیه یا برداشت از آبخوان به‌طور پیوسته در نوسان است. به‌طوری‌که نوسانات فصلی سطح آب زیرزمینی در ارتباط با تغییرات فصلی تغذیه آب زیرزمینی ناشی از بارندگی، نفوذ عمقی آب آبیاری (تغذیه)، تبخیر و تعرق و پمپاژ از چاه‌ها است (Xu and Abiye et al., 2018; Beekman, 2003).

بررسی‌ها نشان داد پیژومترهای اراضی دریا، قره‌خان، اراضی کوسهریز، سه‌راه قزل‌گپی، کوسه کهریز نوسان سطح آب زیرزمینی کمی را نشان می‌دهد. بررسی‌ها نشان داد الگوی کشت در این نواحی (شمال و شمال غربی آبخوان) عمده‌تاً کشت آبی گندم و جو و چغندر قند است. بنابراین، علت آن می‌تواند این باشد که تغذیه ناشی از بارندگی و نفوذ عمقی آب آبیاری به‌دست‌آمده توسط مدل SWAT در این نواحی توانسته افت ایجادشده در طول فصل برداشت از آب زیرزمینی را جبران کند. همچنین، بررسی‌ها نشان داد افت سطح آب زیرزمینی مداوم در پیژومترهای فخریقا، گرگ‌تپه و سه‌راه حاجی خوش واقع در مناطق جنوب و جنوب غربی آبخوان اتفاق افتاده است. وضعیت الگوی کشت و تخلیه چاه‌ها در این مناطق نشان می‌دهد به دلیل وجود کشت پرمصرف مانند سیب، سایر باغات و یونجه و نیز تراکم بالای چاه‌های بهره‌برداری و در نتیجه مصرف بیشتر منجر به افت سطح آب زیرزمینی شده است. به‌طور کلی سطح آب زیرزمینی با شیب زیادی به‌یک‌باره در اکثر پیژومترها در سال‌های آبی ۹۴-۱۳۹۳ و ۹۶-۱۳۹۵ کاهش یافته است. دلیل این امر را می‌توان به کاهش شدید بارندگی در سال ۱۳۹۵ و افزایش برداشت از آب زیرزمینی برای تأمین آب آبیاری محصولات نسبت داد.

لازم به ذکر است علاوه بر تعیین بهینه پارامترهای هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره و مقادیر تغذیه به آبخوان، رودخانه‌های فرعی (آبراه‌های متصل به رودخانه اصلی مهاباد) که عمده‌تاً به‌صورت فصلی دارای جریان می‌باشند نیز در مدل‌سازی در نظر گرفته شد. اطلاعات ورودی این آبراه‌ها از مدل SWAT استفاده شد. در نظر گرفتن رودخانه‌های فرعی در فرآیند مدل‌سازی منجر به اعمال تأثیر این آبراه‌ها در نواحی مختلف دشت بر نوسانات سطح آب زیرزمینی می‌شود (Mosase et al., 2019; Aliyari et al., 2019). به‌طوری‌که بررسی‌ها نشان داد خطای تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در پیژومترهای هم‌جوار با آبراه‌های طبیعی مانند کوسه‌کهریز، اراضی کوسه‌کهریز، سه‌راه قزل‌گپی و اراضی دارلک کم (بین ۰/۱ تا ۰/۴ متر) بود. نتایج نشان داد در پیژومترهای نزدیک به حاشیه رودخانه اصلی مهاباد (پیژومترهای اراضی قزل‌گپی، اراضی اگریقاش، گردگروی، گاپیس، دارلک و لچ) نیز میزان خطای کمی افزایش یافته

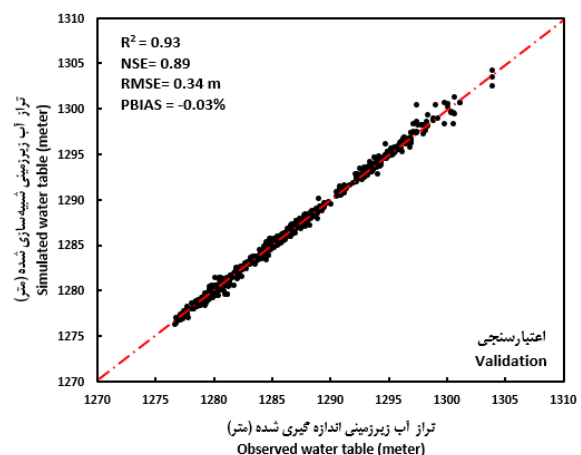
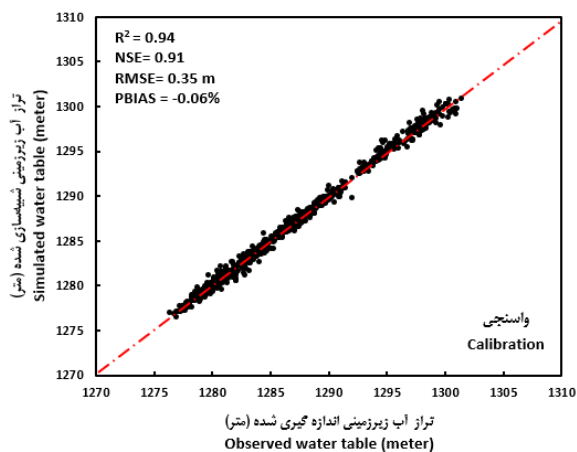


شکل ۷- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده تراز سطح ایستابی در دوره واسنجی (مهر ۱۳۸۸ تا شهریور ۱۳۹۴) و دوره اعتبارسنجی (مهر ۱۳۹۴ تا شهریور ۱۳۹۸) برای پیزومترها در آبخوان مهاباد

Figure 7- Comparison of simulated and observed values of water table level in calibration period (October 2009 to September 2015) and validation period (October 2015 to September 2017) for piezometers in Mahabad aquifer

مهاباد در اکثر مناطق سطح آب زیرزمینی کم‌عمق است. چند پیزومتر در مناطق غربی دشت نوسانات تراز آب زیرزمینی در حد ۳ الی ۴ متر در درازمدت نسبت به سایر پیزومترها بیشتر بود. این امر باعث شد دامنه خطا برای هر پیزومتر در فرآیند واسنجی کمتر در نظر گرفته شود که منجر به فرآیند واسنجی مناسب برای منطقه شد.

از آنجاکه هرچه مقدار NSE به یک نزدیک باشد، مدل کاراتر است، لذا بر اساس این آماره می‌توان گفت مدل به‌خوبی واسنجی شده و ورودی‌های اولیه مدل نسبتاً خوب تخمین زده شده‌اند. به‌طور کلی نتایج مؤید آن است که مدل به‌خوبی واسنجی شده و قادر بوده در دوره زمانی خارج از دوره واسنجی یعنی دوره اعتبارسنجی نیز سطح آب زیرزمینی را به‌خوبی شبیه‌سازی نماید. به‌طور کلی در منطقه دشت



شکل ۸- آماره‌های عملکرد مدل برای مقایسه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده تراز سطح ایستابی در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی

Figure 8- Model performance statistics for comparison of simulated and observed values of water table in the calibration and validation periods

جدول ۱- بیلان آب زیرزمینی آبخوان مه‌آباد (میلیون متر مکعب در سال)

Table 1- Mahabad aquifer groundwater balance (MCM/ year)

مؤلفه بیلان Balance component	سال خشک Dry year (1395-96)		سال نرمال Normal year (1396-97)		سال تر Wet year (1397-98)	
	ورودی Input	خروجی Output	ورودی Input	خروجی Output	ورودی Input	خروجی Output
	جریان آب زیرزمینی از مرزها Groundwater flow from the boundaries	25.32	3.46	29.15	4.85	33.12
تغذیه یا زهکشی از بستر رودخانه و آبراهه‌ها Recharge or drainage of riverbeds and stream	5.34	30.25	7.94	37.56	9.58	40.15
تغذیه ناشی از نفوذ آب بارندگی و جریان‌ات برگشتی کشاورزی Recharge due to infiltration of rainfall and agricultural return flows	53.45	0	61.85	0	76.25	0
برداشت آب از طریق چاه‌های بهره‌برداری Water abstraction through operation wells	0	48.35	0	52.25	0	55.20
تبخیر از آبخوان Evaporation from the aquifer	0	4.68	0	5.74	0	6.36
مجموع Total	84.11	86.74	98.94	100.40	118.95	108.14
میزان تغییرات بین مقادیر ورودی و خروجی The rate of change between input and output values			-1.63	-1.46	10.87	

بیلان آب زیرزمینی

در این مطالعه استخراج نتایج مؤلفه‌های بیلان آب در سه سال آبی خشک، نرمال و مرطوب مدنظر بود. بررسی شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژی از قبیل SDI^3 ، $SPEI^2$ ، SPI^1 نشان داد سه سال آبی ۹۶-۱۳۹۵، ۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷ به ترتیب معرف سال‌های آبی خشک، نرمال و تر در طول دوره شبیه‌سازی می‌باشند. همچنین، بررسی‌ها نشان می‌دهد مقادیر بارندگی برای سه سال آبی مذکور به ترتیب ۱۸۲، ۳۹۰ و ۵۰۶ میلی‌متر است که صحت تعیین سال‌های معرف را تأیید می‌کند. اجزای اصلی بیلان آب زیرزمینی آبخوان مه‌آباد برای سه سال آبی ۹۶-۱۳۹۵ (سال خشک)، ۹۷-۱۳۹۶ (سال نرمال) و ۹۸-۱۳۹۷ (سال تر) در جدول ۱ ارائه شده است. به‌طور کلی همان‌طور که برای هر کدام از سال‌ها مشخص است میزان تغذیه ناشی از نفوذ آب بارندگی و تلفات نفوذ عمقی آب آبیاری در هر سه سال متفاوت و قابل توجه است. برداشت آب از طریق چاه‌های بهره‌برداری، زهکشی رودخانه از آبخوان و تبخیر و تعرق مهم‌ترین مؤلفه خروجی از آبخوان می‌باشند. از طرف دیگر عمده منابع تغذیه آب زیرزمینی ناشی از نفوذ آب بارندگی در ماه‌های سرد سال (دی‌ماه تا اسفند) و بارندگی‌های بهاره (فروردین و اردیبهشت) و نیز جریان‌ات برگشتی آب کشاورزی و جریان‌ات ورودی عمدتاً از

مرزهای جنوب، جنوب شرقی و شرق آبخوان است. بررسی بیلان آب زیرزمینی نشان می‌دهد که فعل‌وانفعالات بین منابع آب سطحی و زیرزمینی بسیار زیاد است. به‌طور کلی نتایج بیلان حاصل از مدل مطابقت خوبی در تعیین مؤلفه‌های اصلی بیلان مطابق با گزارش بیلان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی برای دشت مه‌آباد را دارد (Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2014). به‌طور کلی بر اساس نتایج بیلان، میزان تغییرات ذخیره آبخوان در سال خشک و نرمال در جهت کاهش ذخایر آبخوان، در سال تر در جهت افزایش ذخایر آبخوان را نشان می‌دهد که این نتایج با هیدروگراف واحد آبخوان نیز مطابقت دارد. به‌طوری‌که هیدروگراف واحد آبخوان آب زیرزمینی نشان می‌دهد در سال‌های خشک و نرمال تراز سطح آب زیرزمینی به ترتیب ۰/۱۴ و ۰/۱۱ متر افت پیدا کرده است؛ اما در سال تر تراز آب زیرزمینی به ترتیب ۱/۴۷ متر افزایش یافته است که با میزان تغییرات ذخیره آبخوان نیز برای سال‌های خشک (۱/۶۲- میلیون مترمکعب)، نرمال (۱/۴۶- میلیون مترمکعب) و تر (۱۰/۸۷ میلیون مترمکعب) هم‌خوانی دارد.

نتیجه‌گیری

برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب مستلزم شناخت جامع از وضعیت پیچیده‌ی یک سامانه هیدرولوژیکی است. ابزاری که بتواند بدون نگاه کلی و اجمالی به یک سامانه هیدرولوژیکی بسیار پیچیده، ارتباط بین فرآیندهای مختلف و چگونگی مدیریت و کنترل آن‌ها را در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف مطابق با شرایط سامانه و نیازهای

- 1- Standardised Precipitation Index
- 2- Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
- 3- Streamflow Drought Index

به‌طور کامل شرایط واقعی را شبیه‌سازی کند. علاوه بر این، دلایل مختلفی از جمله خطا در ثبت تخلیه چاه‌ها همراه با چاه‌های غیرمجاز، خطای انسانی در ثبت تراز آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای در پیزومترها و خطای اجتناب‌ناپذیر در تخمین ضرایب هیدرودینامیک مانند هدایت هیدرولیکی می‌تواند در بروز خطا بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده نقش داشته باشد. بررسی نتایج بیلان آب زیرزمینی آبخوان مهاباد نیز نشان داد میزان تغییرات ذخیره آبخوان در سال خشک و نرمال در جهت کاهش ذخایر آبخوان، در سال‌تر در جهت افزایش ذخایر آبخوان بود به‌طوری‌که این نتایج با هیدروگراف واحد آبخوان مطابقت داشت.

نتایج این مطالعه نشان داد استفاده از مقادیر تغذیه برآورد شده مدل SWAT به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین و مهم‌ترین پارامترهای آب زیرزمینی می‌تواند امکان شبیه‌سازی و برآورد دقیق‌تر نوسانات سطح ایستابی و بیلان آب زیرزمینی توسط مدل MODFLOW-NWT را با ابعاد مختلف مکانی فراهم کند. به‌طوری‌که نتایج مدل تلفیقی نشان می‌دهد مقادیر تغذیه برآورد شده با در نظر گرفتن کاربری اراضی و تأمین الگوی آبیاری از منابع آب سطحی و زیرزمینی در مناطق مختلف به‌خوبی توانسته است نوسانات سطح آب زیرزمینی را در موقعیت‌های مختلف آبخوان شبیه‌سازی کند. به‌طور مشخص بررسی‌ها نشان داد افت مداوم سطح آب زیرزمینی ایجاد شده در مناطق جنوب و جنوب غربی آبخوان (پیزومترهای فخریقا، گرگ‌تپه و سه‌راه حاجی‌خوش) به‌دلیل وجود کشت پرمصرف مانند سیب و یونجه و نیز تراکم بالای چاه‌های بهره‌بردار و در نتیجه مصرف بیشتر بوده است. به‌طور کلی از مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW-NWT می‌توان به‌عنوان یک ابزار مدیریتی در بهره‌برداری از منابع آب تلفیقی استفاده کرد. اعمال سناریوهای مدیریتی مناسب و تبیین نتایج آن می‌تواند درک صحیح‌تر و واقع‌بینانه‌تری از شرایط کنونی برای مدیران فراهم کرده و ابزار و رویکردهای مطلوبی را در اختیار آن‌ها قرار دهد تا به پیاده‌سازی راهکارهایی بپردازند که حفظ منابع آب و درعین حال توسعه‌ی پایدار در دشت را در پی داشته باشد.

سپاسگزاری

مؤلفین از مدیریت و کارشناسان ستاد احیای دریاچه ارومیه که امکان دسترسی به اطلاعات موردنیاز تنظیم این مقاله را فراهم آوردند مراتب قدردانی و سپاس خود را اعلام می‌دارند.

آن بررسی کند خواهد توانست زیرساخت‌های لازم را برای حل و مدیریت چالش‌های موجود در مدیریت منابع آب را فراهم کند. مقادیر تغذیه ناشی از نفوذ بارندگی و جریانات برگشتی آب آبیاری یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های ورودی مدل‌های آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. بررسی‌ها نشان داده است که عدم قطعیت در تعیین این پارامتر، به میزان قابل‌توجهی در نتایج شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی تأثیر خواهد داشت. استفاده از مقادیر تغذیه با در نظر گرفتن تفاوت برداشت از آبخوان و آب سطحی برای تأمین آب آبیاری در سطح کاربری اراضی در مناطق مختلف و در نتیجه نفوذ عمقی به‌جای لحاظ تغذیه به‌صورت درصد یکنواختی از بارندگی و کل آب آبیاری در سطح آبخوان برای تبیین و تجزیه و تحلیل شبیه‌سازی روند نوسانات سطح آب زیرزمینی در سطح آبخوان موردتوجه قرار گرفت؛ لذا در این مطالعه در مدل‌سازی آب زیرزمینی آبخوان مهاباد با استفاده از مدل MODFLOW-NWT از مقادیر تغذیه حاصل از مدل SWAT استفاده شد.

نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت در خصوص پارامترهای اصلی آب زیرزمینی نشان داد هدایت هیدرولیکی حساس‌ترین پارامتر مربوط به پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی بود. پارامتر تغذیه نیز یکی از عوامل مؤثر در نوسانات سطح ایستابی است. به‌طوری‌که حساسیت نسبتاً بالایی را همانند ضریب هدایت هیدرولیکی داشت. به‌طور کلی برآورد مقادیر تغذیه آب زیرزمینی به هر روشی با عدم قطعیت روبه‌رو بوده و به‌منظور تبیین دقیق‌تر آن‌ها نیازمند واسنجی مدل است. بررسی نتایج حاصل از مدل SWAT نشان داد مقادیر تغذیه به آب زیرزمینی در فصول پاییز و زمستان حداقل بوده، اما در فصول بهار و تابستان با افزایش فعالیت‌های کشاورزی میزان تغذیه به آب زیرزمینی افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از واسنجی نشان داد به‌طور متوسط $11/2\%$ ، $18/9\%$ ، $24/7\%$ و $45/2\%$ تغذیه به آبخوان ناشی از نفوذ از بارندگی و جریانات برگشتی آب کشاورزی به ترتیب در فصل‌های پاییز، زمستان، بهار و تابستان اتفاق افتاده است.

به‌طور کلی بررسی هیدروگراف‌های تمام پیزومترها نشان داد مدل توانسته روند فصلی و بلندمدت سطح آب زیرزمینی را با توجه به تغییر در میزان تغذیه و تخلیه از آبخوان در طی دوره‌های مختلف تنش در شرایط غیر ماندگار را به‌طور مناسبی به تصویر بکشد. به‌طوری‌که اختلاف و خطای قابل‌توجه بین مقادیر سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در اکثر پیزومترها وجود ندارد. بررسی‌ها نشان داد تغییرات ناگهانی سطح آب زیرزمینی در پیزومترهای واقع در نزدیک مرزهای ورودی و خروجی آب زیرزمینی یا نزدیک به رودخانه مهاباد می‌تواند منجر به خطاهای منطقه‌ای شود به‌طوری‌که مدل نتواند

منابع

1. Abedi Koupai J., and Golabchian M. 2015. Estimation of Hydrodynamic Parameters of Groundwater Resources in

- Kouhpayeh- Segzi Watershed Using MODFLOW. *Water and Soil Science* 19(2): 281-293. (In Persian with English abstract) DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.72.24.
2. Abiye T., Masindi K., Mengistu H., and Demlie M. 2018. Understanding the groundwater level fluctuations for better management of groundwater resource: a case in the Johannesburg region. *Groundwater for Sustainable Development* 7: 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.02.004>.
 3. Aliyari F., Bailey R.T., Tasdighi A., Dozier A., Arabi M., and Zeiler K. 2019. Coupled SWAT-MODFLOW model for large-scale mixed agro-urban river basins. *Environmental Modelling and Software* 115: 200-210. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.02.014>.
 4. Arumí J.L., Rivera D., Holzapfel E., Boochs P., Billib M., and Fernald A. 2009. Effect of the irrigation canal network on surface and groundwater interactions in the lower valley of the Cachapoal river, Chile [Efecto de la red de canales de riego en las interacciones de agua superficial y subterránea en la parte baja del valle del Río Cachapoal, Chile]. *Chilean Journal of Agricultural Research* 69(1): 12-20. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392009000100002>.
 5. Bailey R.T., Wible T.C., Arabi M., Records R.M., and Ditty J. 2016. Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater–surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model. *Hydrological Processes* 30: 4420–4433. <https://doi.org/10.1002/hyp.10933>.
 6. Barazzuoli P., Nocchi M., Rigati R., and Salleolini M. 2008. A conceptual and numerical model for groundwater management: a case study on a coastal aquifer in southern Tuscany, Italy. *Hydrogeology Journal* 16: 1557–1576. DOI: 10.1007/s10040-008-0324-z.
 7. Bedekar V., Niswonger R.G., Kipp K., Panday S., and Tonkin M. 2012. Approaches to the simulation of unconfined flow and perched groundwater flow in MODFLOW. *Ground Water* 187–198. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2011.00829.x>.
 8. Bejranonda W., Koontanakulvong S., and Koch M. 2007. Surface and Groundwater Dynamic Interactions in the Upper Great Chao Phraya Plain of Thailand: Semi-Coupling of SWAT and MODFLOW; Groundwater and Ecosystems, IAH Selected Papers on Hydrogeology; International Association of Hydrology: Goring, UK: 17–21.
 9. Chitsazan M., and Kashkuli H.A. 2002. Groundwater modeling and solving hydrogeological problems. translation, Shahid Chamran University Press, Ahvaz. (In Persian)
 10. Chitsazan M., Nozarparvar L., Nedri A., and Farhadimanesh M. 2016. Evaluation of hydraulic relationship between Lore Andimeshk plain aquifer and Dez river using MODFLOW model. *Journal of Advanced Applied Geology* 17: 36-23. (In Persian with English abstract) DOI: 10.22055/AAG.2015.11822
 11. Chu J., Zhang C., and Zhou H. 2010. Study on interface and frame structure of SWAT and MODFLOW models coupling. *Geophysical Research Abstracts*, V12, EGU2010-4559. DOI: 10.11820/dlkxjz.2011.03.012
 12. Chunn D., Faramarzi M., Smerdon B., and Alessi D.S. 2019. Application of an integrated SWAT–MODFLOW Model to evaluate potential impacts of climate change and water withdrawals on groundwater–surface water interactions in West-Central Alberta. *Water* 11(1): 110. <https://doi.org/10.3390/w11010110>.
 13. Davis S.N., and De Wiest R.J.M. 1996. *Hydrogeology*. New York, Wiley.
 14. Doherty J., Brebber L., and Whyte P. 1994. PEST: Model-independent parameter estimation. *Watermark Computing*, Corinda, Australia 122: 336.
 15. Dowlatabadi S., and Zomorodian S.A. 2016. Conjunctive simulation of surface water and groundwater using SWAT and MODFLOW in Firoozabad watershed. *KSCE Journal of Civil Engineering* 20(1): 485-496. DOI: 10.1007/s12205-015-0354-8.
 16. Dowlatabadi S., and Zomorodian S.M.A. 2015. Utilization of recharge values derived from SWAT model in mathematical model of MODFLOW to simulate groundwater flow of Firoozabad plain. *Water and Soil Science* 19(1): 337-348. (In Persian with English abstract). DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.71.337.
 17. Hamzehkhani H. 2015. Groundwater modeling to investigate the effectiveness of aquifer on surface flows by applying different exploitation policies using remote sensing technology (case study: Miandoab plain). M.Sc. Thesis, Sharif University of Technology, 175 p. (In Persian)
 18. Izady A., Davary K., Alizadeh A., Ghahraman B., Sadeghi M., and Moghaddamnia A. 2012. Application of "panel-data" modeling to predict groundwater levels in the Neishaboor plain, Iran. *Hydrogeology Journal* 20(3): 435-447. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0814-2>.
 19. Kardan Moghaddam H., Banihabib M.E., and Javadi S. 2018. Quantitative sustainability analysis of the aquifer system (case study: south Khorasan-birjand aquifer). *Journal of Water and Soil* 31(6): 1587-1601. (In Persian with English abstract) DOI: 10.22067/JSW.V31I6.66959.
 20. Kim N.W., Chung I.M., Won Y.S., and Arnold J.G. 2008. Development and application of the integrated SWAT–MODFLOW model. *Journal of Hydrology* 356(1-2): 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.02.024>.
 21. Koohestani N., Meftah halaghi M., and Dehghani A. 2013. Numerical simulation of groundwater level using MODFLOW software (a case study: Narmab watershed, Golestan province). *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research* 1(8): 858-873.
 22. Kouchakzadeh M.H., and Nasiri F. 2015. Evaluation of the efficiency of using surface water simulation results to

- improve the accuracy of groundwater simulation in Silakhor shallow aquifer located in Lorestan province (Iran). *Modares Civil Engineering Journal* 14(3): 129-138. (In Persian with English abstract). <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-865-en.html>.
23. McDonald M.G., and Harbaugh A.W. 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. *Techniques of Water Resources Investigations*, Book 6. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/twri06A1>.
 24. McKee T.B., Doesken N.J., and Kleist J. 1995. Drought monitoring with Multiple Time scales. In: *Proceeding of the 9th Conference on Applied Climatology*. Dallas, TX: American Meteorological Society 233-236.
 25. Mojtahedi A., Almasi R., and Dadashzadeh M. 2018. The evaluation of the impact of the anthropogenic factors on Lake Urmia crisis using remote sensing and GIS. *Journal of Civil and Environmental Engineering University of Tabriz* 48(2): 59-70. (In Persian with English abstract)
 26. Mosase E., Ahiablame L., Park S., and Bailey R. 2019. Modelling potential groundwater recharge in the Limpopo River basin with SWAT-MODFLOW. *Groundwater for Sustainable Development* 9: 100260. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100260>.
 27. Nair S.S., King K.W., Witter J.D., Sohngen B.L., and Fausey N.R. 2011. Importance of crop yield in calibrating watershed water quality simulation tools. *Journal American Water Resource Associate (JAWRA)* 47(6): 1285–1297. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00570.x>.
 28. Nalbantis I., and Tsakiris G. 2009. Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resource Management* 23: 881-897. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9305-1>.
 29. Nasserri A. 2019. Comparison of fourteen methods of time series to analyze and predict ground water changes in Marand plain (north of Urmia Lake). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 13(1): 58-68. (In Persian with English abstract)
 30. Nasserri H.R., and Adinehvand R., and Salavitar A. 2014. The use of system dynamics in behavioral prediction and safe yield determination of Tabriz plain, *Quarterly Journal of Science Kharazmi University* 13(4): 937. (In Persian) URL: <http://jsc.khu.ac.ir/article-1-1644-fa.html>
 31. Nayyeri H. 2015. Morphological analysis of Mahabad river channeled the impact of dam construction, *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences* 15(37): 155-178. (In Persian with English abstract) DOI: [20.1001.1.22287736.1394.15.37.8.6](https://doi.org/10.22287736.1394.15.37.8.6)
 32. Niswonger R.G., Panday S., and Ibaraki M. 2011. MODFLOW-NWT, A newton formulation for MODFLOW-2005: USGS Survey Techniques and Methods 6–A37. <https://doi.org/10.3133/tm6A37>.
 33. Palma H.C., and Bentley L.R. 2007. A regional-scale groundwater flow model for the Leon-Chinandega aquifer, Nicaragua. *Hydrogeology Journal* 15: 1457–1472. <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0197-6>.
 34. Park S., and Bailey R.T. 2017. SWAT-MODFLOW Tutorial—Documentation for Preparing Model Simulations; Department of Civil and Environmental Engineering, Colorado State University: Fort Collins, CO, USA; 56p. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12502>.
 35. Raja O., Parsinejad M., and Tajrishi M. 2021. Multipurpose calibration of SWAT model in estimating runoff, evapotranspiration, and crop yield (a case study: Mahabad plain). *Iran-Water Resources Research* 17(4): 11-34. (In Persian with English abstract) DOI: [20.1001.1.17352347.1400.17.4.1.8](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.4.1.8).
 36. Karimipour A.R., and Rakhshandehroo G.H.R. 2011. Sensitivity analysis for hydraulic behavior of Shiraz plain aquifer using PMWIN, *Journal of Water and Wastewater* 22(78): 102. (In Persian with English abstract)
 37. Rezaei Moghaddam M.H., Rahimpour T., and Nakhostinrouhi M. 2016. Potential Detection of the Groundwater Resources Using Analytic Network Process in Geographic Information System (Case Study: Basins Leading to Tabriz Plain). *Iranian Journal of Eco Hydrology* 3(3): 379-389. (In Persian with English abstract). DOI: [10.22059/IJE.2016.60026](https://doi.org/10.22059/IJE.2016.60026).
 38. Saadatpour A., Alizadeh A., Ziaei A.N., and Izady A. 2019. Integrated Surface and Groundwater Flow Modeling in Neishaboor Watershed with SWAT-MODFLOW. *Journal of Water and Soil* 33(4): 521-536. (In Persian with English abstract) DOI: [10.22067/JSW.V010.74658](https://doi.org/10.22067/JSW.V010.74658).
 39. Saberimehr S., Asghari Moghaddam A., and Nadiri A. 2017. Modeling Groundwater Flow and Salinity Intrusion at Shabestar Plain Aquifer Using GMS Software Model, *Quaternary Journal of Iran* 3(9): 41-50. (In Persian). <https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2021.331850.669093>.
 40. Sadat Hamraz B., Akbarpour A., and Pourreza Bilondi M. 2016. Assessment of parameter uncertainty of MODFLOW model using GLUE method (Case study: Birjand plain). *Water and Soil Conservation* 22(6): 61-79. (In Persian with English abstract). DOI: [20.1001.1.23222069.1394.22.6.4.6](https://doi.org/10.2222069.1394.22.6.4.6).
 41. Scanlon B.R., Keese K.E., Flint A.L., Flint L.E., Gaye C.B., Edmunds W.M., and Simmers I. 2006. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *An International Journal* 20(15): 3335–3370. <https://doi.org/10.1002/hyp.6335>.
 42. Semiromi M.T., and Koch M. 2019. Analysis of spatio-temporal variability of surface-groundwater interactions in the Gharehsoo river basin, Iran, using a coupled SWAT-MODFLOW model. *Environmental Earth Sciences* 78(6): 201. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8206-3>.

43. Sibanda T., Nonner J.C., and Uhlenbrook S. 2009. Comparison of groundwater recharge estimation methods for the semi-arid Nyamandhlovu area, Zimbabwe. *Hydrogeology Journal* 17: 1427-1441. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0445-z>.
44. Sophocleous M., and Perkins S.P. 2000. Methodology and application of combined watershed and ground water models in Kansas. *Journal of Hydrology* 236(3-4): 185-201. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00293-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00293-6).
45. Sophocleous M.A. 2005. Groundwater recharge and sustainability in the High Plains aquifer in Kansas, USA. *Hydrogeology Journal* 13(2): 351-365. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0385-6>.
46. Sun H., and Cornish P.S. 2005. Estimating shallow groundwater recharge in the headwaters of the Liverpool Plains using SWAT. *Hydrological Processes* 19(3): 795-807. <https://doi.org/10.1002/hyp.5617>.
47. Taheri Tizro A., and 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. (In Persian with English abstract) DOI: 20.1001.1.20086377.1398.12.40.8.4.
48. Tigkas D., Vangelis H., and Tsakiris G. 2015. DrinC: a software for drought analysis based on drought indices. *Earth Science Informatics* 8(3): 697-709. <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0178-y>.
49. Valizadegan E., and Yazdanpanah S. 2018. Quantitative model of optimal conjunctive use of Mahabad plain's surface and underground water resources, *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 50(4): 631-640. (In Persian with English abstract) DOI: 10.22060/CEEJ.2017.12739.5266.
50. Vicente-Serrano S.M., López-Moreno J.I., Drummond A., Gimeno L., Nieto R., Morán-Tejeda E., Lorenzo-Lacruz J., Beguería S., and Zabalza J. 2011. Effects of warming processes on droughts and water resources in the NW Iberian Peninsula (1930-2006). *Climate Research* 48: 203-212. <https://doi.org/10.3354/cr01002>.
51. Water Consulting Engineers and Sustainable Development. 2014. Update studies of water resources balance of study areas of Urmia Lake catchment area, report of water resources balance of Mahabad study area, 81 p. (In Persian)
52. Wei X., and Bailey R.T. 2019. Assessment of system responses in intensively irrigated stream-aquifer systems using SWAT-MODFLOW. *Water* 11(8): 1576. <https://doi.org/10.3390/w11081576>.
53. Wei X., Bailey R.T., Records R.M., Wible T.C., and Arabi M. 2018. Comprehensive simulation of nitrate transport in coupled surface-subsurface hydrologic systems using the linked SWAT-MODFLOW-RT3D model. *Environmental Modelling and Software* 122: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.06.012>.
54. Wheater H.S. 2010. Hydrological processes, groundwater recharge and surface-water/groundwater interactions in arid and semi-arid areas. *Groundwater Modeling in Arid and Semi-Arid Areas*, 1st ed. Howard S. Wheater, Simon A. Mathias and Xin Li. Published by Cambridge University Press, 5-37. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511760280.003>.
55. Xu Y., and Beekman H.E. 2003. Groundwater recharge estimation in southern Africa. UNESCO IHP UNESCO Paris, 92-9220-000-3. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1898-8>.