

**EXTENDED ABSTRACT**

## Evaluation of Interaction between Aquifer and river Using Integrated SWAT-MODFLOW-NWT Model (Case study: Mahabad plain)

O. Raja<sup>1</sup>, M. Parsinejad<sup>2\*</sup> and M. Tajrishy<sup>3</sup>

1- Ph.D. candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2<sup>\*</sup>- Corresponding Author, Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, ([parsinejad@ut.ac.ir](mailto:parsinejad@ut.ac.ir))

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

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 1 March 2022

Revised: 3 July 2022

Accepted: 6 July 2022

#### Keywords:

Recharge, Water table, Interactions, Evaporation, Sustainability, Lake Urmia.

### TO CITE THIS ARTICLE:

Raja, O., Parsinejad, M., Tajrishy, M. (2023). 'Evaluation of Interaction between Aquifer and river Using Integrated SWAT-MODFLOW-NWT Model (Case study: Mahabad plain)', *Irrigation Sciences and Engineering*, 45(4), pp. 49-72. doi: 10.22055/jise.2022.40163.2018.

### Introduction

Surface and groundwater dynamically interact at different spatial or temporal scales within a plain. Accurate estimation of water balance components is an important simulation of such interactions. Despite the rapid expansion of numerical models over the past two decades, there is still room for improvement for comprehensive and integrated assessment as well as management of surface and groundwater resources. In particular, the use of coupled surface and groundwater models is important to connect both surface and groundwater, and for proper representation of the water balance in the unsaturated root zone. The results of various studies suggest that the combination of SWAT and MODFLOW models can satisfactorily simulate the interaction between surface and groundwater at different spatial and temporal dimensions (Sophocleous and Perkins, 2000; Sun and Cornish, 2005; Bejranonda et al., 2007). Indeed, if both models are used simultaneously, not only the limitations of the two individual models can be improved, but also the temporal-spatial properties of the target area can be adequately reflected (Kim et al., 2008; Park and Bailey, 2017; Wei et al., 2018). Specifically in the Urmia Lake Basin, which has been severely affected by indiscriminate exploitation of water resources, these models can be used to maximize the supply of Urmia Lake based on the pattern of supplying irrigation needs from integrated water sources. This requires the interaction of surface and groundwater resources in different locations of plains and aquifers to be simulated and predicted based on different shares of agricultural water supply from integrated water sources.

The main purpose of this study was to evaluate the interaction between ground and surface water in Mahabad plain using the coupled SWAT-MODFLOW-NWT model as a comprehensive and integrated model. The main challenge in this study is the interaction and monitoring of water table adjacent to the surface water bodies.

## Methodology

In this study, DEM SRTM map in 30 m scale was used to prepare groundwater maps and geometry of Mahabad aquifer such as aquifer boundary, groundwater level, bed rock, etc. Monthly groundwater levels measured data from 22 piezometer wells were used in the modeling during the simulation period. The recharge values obtained from the SWAT model were introduced to the MODFLOW-NWT model for simulating the water table level and groundwater balance components.

The active region of the MODFLOW-NWT model covers an area of about 253 Km<sup>2</sup>. Discretization of MODFLOW-NWT model of Mahabad plain was done by creating a regular mesh of finite differences of 3348 cells with cell size of 500 m by 500 m with 1013 active cells. WEL package in MODFLOW-NWT model was used to simulate groundwater pumping. ETS and RCH packages were used to simulate evaporation from groundwater and groundwater recharge in the MODFLOW-NWT model, respectively. The RIV package was employed to investigate the interaction between surface and groundwater resources. In the MODFLOW-NWT model, the in- and outflow boundaries using variable hydraulic load (General Hydraulic Boundary) were considered along with the boundaries without flow using specific hydraulic load (Specific Head Boundary). To simulate the steady state, the measured water table of piezometer wells in October 2009 was used. Finally, the coupled model was run for transient state for a period of ten hydrological years (from the hydrological year of 2009-2010 to 2018-19).

Since the depth of the water table is monitored on a monthly basis, the modeling time step was also considered as monthly. Calibration and validation of groundwater model were also done via trial and error and using automatic PEST methods for six hydrological years from 2009-2010 to 2014-2015, plus four hydrological years from 2015-2016 to 2018-2019, respectively. Hydraulic conductivity (K), transmissivity (T), and specific yield (S<sub>y</sub>) are the most important hydrodynamic coefficients controlling groundwater flow. After the initial run of the model, the hydraulic conductivity (K) values were calibrated. In the next step, the model was calibrated based on specific yield (S<sub>y</sub>) using time-varying data including operation wells, recharge, and observation wells for the transient state. The interactions between ground and surface water for dry (2016-17), normal (2017-2018), and wet (2018-2019) years were evaluated. Also, areas with potential for groundwater evaporation were identified.

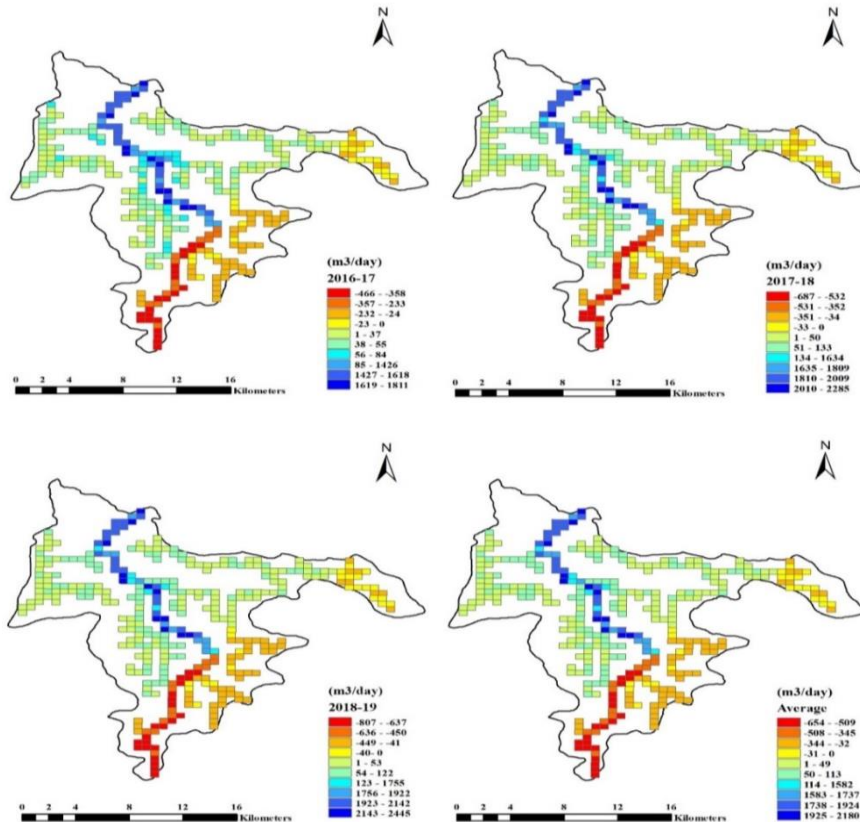
## Results and Discussion

In the previous study (Raja *et al.*, 2022), the results showed that the coupled model could well simulate water table. The results of the model evaluation were satisfactory in calibration of the model for simulating groundwater level and groundwater balance components.

Examination of groundwater level in the simulation time step (monthly) revealed that the error rate has increased in some months such as October, April, May, June, and September. The reason for this observation can be attributed to the sudden increase of water table in some observed locations along the Mahabad river from the upstream floods, and subsequent local release of a large volume of water in the river, leading to fluctuations in groundwater due to water leakage from the river to the aquifer. Also, increased groundwater extraction has resulted in drop in groundwater level at some observed locations. Thus, releasing a significant volume of water in a short period of time in the river or increasing the extraction in a specific area would result in sudden changes in groundwater level in some modeling areas. This elevation of the groundwater level causes increased error in simulation of piezometers records. Moreover, it is not possible to accurately estimate and monitor in and outflow groundwater in boundaries. As such, the errors in piezometers near the inlet and outlet boundaries of the aquifer have also increased.

Specifically, in this study, the interaction between surface and groundwater sources showed that the interaction between the aquifer and the river was significant and varied in different hydrological years. Streams connected to the main river of Mahabad, which mainly flow seasonally, contribute to the effect of these flows on groundwater fluctuations in different locations of the plain. The interaction between surface and groundwater sources mainly results in drainage from the aquifer by the river in dry, normal, and wet years at the rate of about 30.25, 37.50, and 40.15 million cubic meters per year in the central and northern areas of plain (Fig.1). These areas have an almost flat topography with a shallow depth of groundwater level of 1 to 5 meters. This makes the rivers to act as drainage and lead to the discharge of groundwater;

however, in the southern and Eastern parts of the plain, where the groundwater level is lower than other areas, groundwater is recharged by the river. The values of recharge by the river in these areas in dry, normal, and wet years were estimated at about 5.35, 7.95, and 9.60 million cubic meters per year, respectively (Fig. 1).



**Fig. 1- Recharge and drainage rate between river and aquifer for three water years 2016-17 (dry year), 2017-18 (normal year) and 2018-19 (wet year)**

On average, during the three hydrological years, the daily rate of evaporation from groundwater varies from 0.01 to 0.51 mm/day. Examination of the distribution pattern of evaporation from groundwater indicates that the evaporation from groundwater occurred mainly in the central and northern areas of the plain and along the main Mahabad river. The evaporation rate from groundwater level diminishes in the Eastern and southern parts of the plain. This pattern is largely consistent with the level and depth of groundwater. Also, the results revealed that the area and rate of evaporation from the groundwater level in wet year have been greater than in normal year and, in normal year have been higher than in dry year.

## Conclusions

In recent decades, the water supply from groundwater resources has led to the development and simultaneous use of both surface and groundwater resources. It is therefore important to study interactions between surface and groundwater resources on temporal and spatial scales. The results of this study revealed that the coupled SWAT-MODFLOW-NWT model could properly simulate the interaction between surface and groundwater resources in different areas based on the different share of agricultural water supply from both water sources. The results of this study can be used as a guide in the optimal and sustainable use of surface and groundwater resources. So, the results demonstrate the extraction capacity of the aquifer in the central and northern regions of the aquifer for irrigation. Indeed, it would also reduce the share of evaporation loss. By maintaining proper groundwater level (in sustainable conditions), soil

quality is also improved and as a result, the machinery operation is improved; however, there is a limit to further extraction of groundwater around rivers. This is because in this area, there is possibility of development of a reverse hydraulic gradient between surface and groundwater, and as a result, negative effect of leakage from the river can take place. Indeed, adopting a proper pattern of both water resource supplement in different years can ensure the stability of groundwater and improved release of surface water flow to the lake.

### Acknowledgments

This article has been prepared from the results of the first author's Ph.D. Thesis with the supervisor and advisor of the second and third author's research with the support of Urmia Lake Restoration (ULRP). The authors express their gratitude to the Urmia Lake Restoration headquarters who provided access to the data required for the preparation of this manuscript.

### References

- 1- 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, pp. 17–21.
- 2- 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), pp. 1-16.
- 3- 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.
- 4- Raja, O., Parsinejad, M., and Tajrishi, 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), pp. 32-52. (In Persian).
- 5- 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), pp. 185–201.
- 6- Sun, H., and Cornish, P.S. 2005. Estimating shallow groundwater recharge in the headwaters of the Liverpool plains using SWAT. *Hydrological Processes*, 19(3), pp. 795–807.
- 7- 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, pp. 1-10.





## ارزیابی اندرکنش آبخوان و رودخانه با استفاده از مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW-NWT (مطالعه موردی: دشت مهاباد)

امید رجا<sup>۱</sup>، مسعود پارسی نژاد<sup>۲\*</sup> و مسعود تجریشی<sup>۳</sup>

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

۲- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، parsinejad@ut.ac.ir

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

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۵

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۰

### چکیده

هدف اصلی از انجام این مطالعه بررسی مکان‌یابی مناطق نشت و زهکشی بین آبخوان و رودخانه در دشت مهاباد واقع در حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از مدل ترکیبی SWAT-MODFLOW-NWT بود. مدل برای دوره ده ساله اجرا شد. بررسی‌های اندرکنش بین منابع آب سطحی و زیرزمینی نشان داد در نواحی مرکزی و شمالی دشت عمدتاً منجر به زهکشی آب از آبخوان به رودخانه به میزان ۳۰/۲۵ تا ۴۰/۱۵ میلیون مترمکعب به ترتیب در سال‌های خشک و تر نسبت به تغذیه آب زیرزمینی توسط رودخانه‌ها می‌شود؛ اما به دلیل شرایط هیدرولیکی متفاوت در نواحی جنوبی و غربی، نشت از رودخانه‌ها منجر به تغذیه آبخوان به میزان ۵/۳۵ تا ۹/۷۰ میلیون متر مکعب در سال می‌گردد. نتایج نشان داد به‌طور متوسط در طول سه سال آبی موردنظر میزان تبخیر روزانه از آب زیرزمینی بین ۰/۰۱ تا ۰/۵۱ میلی‌متر در روز متغیر بود. بررسی‌ها نشان می‌دهد گستره تبخیر از آب زیرزمینی عمدتاً در نواحی مرکزی و شمالی دشت و در امتداد رودخانه اصلی مهاباد چای متمرکز شده و در نواحی شرقی و جنوبی دشت کاهش می‌یابد. این الگو تا حدود زیادی با وضعیت تراز و عمق سطح آب زیرزمینی نیز مطابقت دارد. به‌طور کلی بررسی‌های نشان می‌دهد مدل به‌خوبی توانست الگوی زمانی و مکانی اندرکنش بین آبخوان و رودخانه و نیز تبخیر از سطح آب زیرزمینی در منطقه را شبیه‌سازی کند.

**کلیدواژه‌ها:** تغذیه، تراز آب زیرزمینی، فعل و انفعالات، تبخیر، پایداری، دریاچه ارومیه.

### مقدمه

تأمین آب موردنیاز در بخش کشاورزی در بسیاری از مواقع به‌صورت تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی تأمین می‌شود. با توجه به جانمایی رودخانه‌ها و موقعیت چاه‌های بهره‌برداری، تبادلات تغذیه و برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی به‌صورت توأمان و با برهم‌کنشی پویا صورت می‌گیرد (Saberimehr et al., 2017). برآورد دقیق مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی و سطحی و پتانسیل منابع آب زیرزمینی برای دستیابی به بهره‌برداری پایدار از منابع آب در مناطق دارای آبخوان و رودخانه با توجه به پیچیدگی ارتباط بین آبخوان و رودخانه‌ها حائز اهمیت است (Wei and Baiely, 2019). درعین حال تبیین تغییرات زمانی و مکانی ارتباط و اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی حائز اهمیت است (Mojtahedi et al., 2018; Nassery, 2019).

مدلی که بتواند کلیه فعل و انفعالات در سامانه‌های سطحی و زیرسطحی و اثربخشی الگوهای بهره‌برداری تلفیقی را بر مؤلفه‌های بیلان آب (ازجمله جریان‌ات سطحی) را مد نظر قرار دهد می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کارآمد برای مدیریت و حل تناقضات بین عرضه

و تقاضای منابع آب استفاده شود (Kardan Moghaddam et al., 2018). مدل MODFLOW، مدلی فیزیکی محور و کاملاً توزیعی است که جریان‌های آب زیرزمینی در محیط متخلخل را به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی می‌کند (McDonald and Harbaugh, 1988, McDonald and Harbaugh, 2003). این مدل به‌عنوان یک مدل استاندارد در حالت‌های پایدار و ناپایدار پذیرفته شده است (Palma and Bentley, 2007; Bedekar et al., 2012). بررسی‌ها نشان داده است مقادیر تغذیه ناشی از بارندگی و جریان‌های برگشتی آب آبیاری یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های ورودی به مدل‌های آب‌های زیرزمینی در مناطق نیمه‌خشک و خشک است (Sophocleous, 2005; Sun and Cornish, 2005; Scanlon et al., 2006). به‌طوری‌که عدم قطعیت در تعیین این پارامتر، به میزان قابل‌توجهی در نتایج شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و در ارزیابی رفتار طولانی‌مدت یک آبخوان تحت تأثیرات سناریوهای مختلف مدیریتی برداشت از آب‌های زیرزمینی تأثیر به‌سزایی خواهد داشت (Wheater, 2010). درعین حال، مدل SWAT به‌عنوان یک مدل جامع

بیش از عوامل اقلیمی است. ارتباط هیدرولیکی آبخوان دشت لور اندیمشک و رودخانه دز با استفاده از مدل MODFLOW ارزیابی و سپس این ارتباط در سناریوهای مختلف مدیریتی شامل کمترین دبی در رودخانه و پیش‌بینی تبادل‌های آبخوان و رودخانه در دوره‌های خشکسالی و ترسالی بررسی شد (Nozarpour et al., 2015). به‌طور کلی نتایج نشان داد رودخانه دز در بیشتر مسیر خود تغذیه کننده آبخوان است. همچنین، نتایج سناریو کاهش تغذیه بر اثر خشکسالی نشان دهنده کاهش میزان تغذیه سطحی و در نتیجه افت سطح ایستابی و افزایش شیب هیدرولیکی به‌طرف آبخوان و در نهایت تغذیه بیشتر آبخوان توسط رودخانه می‌شود. سناریو افزایش تغذیه آبخوان بر اثر ترسالی نیز باعث افزایش سطح ایستابی و تغذیه سطحی آبخوان می‌شود. این امر باعث کاهش اختلاف سطح ایستابی و تراز آب رودخانه شده که در نتیجه آن شیب هیدرولیکی از رودخانه به طرف آبخوان کاهش می‌یابد.

نتایج تحقیق‌های مختلف نشان داده است مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW قادر است مقادیر تغذیه حاصل از بارش و نشت از رودخانه‌ها، کانال‌های آبیاری و انبار سنتی بر اساس الگوی متفاوت تشکیل رواناب و برداشت از منابع سطحی و زیرزمینی و همچنین، تغذیه ناشی از مدیریت‌های آبیاری در پهنه‌های مختلف دشت را برآورد کند (Bailey et al., 2016; Dowlatabadi and Zomorodian, 2016; Chunn et al., 2019). مزیت مهم دیگر مدل تلفیقی امکان بررسی مؤلفه‌های بیلان و اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی تحت تأثیر شیب هیدرولیکی در مقیاس‌های زمانی و مکانی است. در نتیجه با توجه به تغییرات شیب هیدرولیکی سطح ایستابی تحت الگوهای مختلف برداشت می‌توان الگوی برداشت از چاه‌ها تحت سناریوهای مختلف را مدیریت کرد (Bedekar et al., 2012; Izady et al., 2012).

بیش از دو دهه از روند سریع خشک شدن دریاچه ارومیه می‌گذرد. وضعیت کنونی دریاچه ارومیه حاصل عملکرد مجموعه‌ای از عوامل انسانی و طبیعی طی دهه‌های گذشته است و احیای دریاچه ارومیه همچنان در صدر مطالبات محیط‌زیست کشور قرار دارد. کاهش جریان رودخانه‌ها سهم عمده‌ای را در افت میزان ورودی به دریاچه داشته است. به‌طور مشخص، اندازه‌گیری‌های میدانی در ایستگاه آب‌سنجی گردیعقوب در انتهای رودخانه مهاباد واقع در حوضه مهاباد چای نشان‌دهنده کاهش شدید سهم جریانات سطحی ورودی به دریاچه ارومیه است. همچنین از دیگر موارد سوء مدیریت در محدوده دشت مهاباد، می‌توان به مشکل بالاب آمدگی سطح آب زیرزمینی اشاره کرد، به‌طوری‌که قابلیت کشاورزی در بخشی از اراضی (حدود ۶۰۰۰ هکتار اراضی پایین‌دست شبکه و منتهی به دریاچه) را محدود کرده است (Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2014).

الگوی تأمین آب موردنیاز و بهره‌برداری توأمان از منابع آب سطحی و زیرزمینی ضرورت استفاده از مدل‌های جامع برای ارزیابی و مدیریت یکپارچه منابع آب سطحی و زیرزمینی را نشان می‌دهد.

شبیه‌سازی آب‌های سطحی برای برآورد تغذیه و تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس حوضه آبریز و واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (Hydrologic Response Units) پذیرفته‌شده است؛ اما مدل SWAT در شبیه‌سازی آب زیرزمینی به دلیل ساده‌سازی‌های ماژول آب زیرزمینی آن و تفکیک آبخوان به دو بخش آبخوان کم‌عمق و عمیق دارای محدودیت است. نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد تلفیق مدل‌های SWAT و MODFLOW به‌خوبی قادر به شبیه‌سازی تبادلات بین جریان آب‌های سطحی و زیرزمینی با ابعاد مختلف مکانی و زمانی است (Sophocleous and Perkins, 2000; Bejranonda et al., 2007; Chu et al., 2010). در واقع استفاده از مدل تلفیقی، نه‌تنها محدودیت‌های دو مدل را بهبود بخشیده؛ بلکه خصوصیات زمانی-مکانی محدوده موردنظر را به‌طور مناسبی منظور می‌کند (Kim et al., 2008; Wei et al., 2017 & Park and Bailey, 2017).

پایش تبادل‌های سطح ایستابی و جریان‌های سطحی در دامنه حریم جریان‌های طبیعی حائز اهمیت است. در مطالعه‌ای اندرکنش بین آبخوان و رودخانه در دشت بجنورد به‌وسیله مدل MODFLOW بررسی شد. نتایج حاصل از بیلان نشان داد تبادل‌های بین آبخوان و رودخانه در این منطقه قابل توجه است به‌طوری‌که رودخانه در یک قسمت از مسیر خود حدود ۲/۴ میلیون متر مکعب در سال آبخوان را تغذیه می‌کند و در قسمتی دیگر زهکش کننده آبخوان می‌باشد (Sarvari et al., 2019). همچنین، Heydari et al. (2019) وضعیت آبخوان و ارتباط آب‌های سطحی و زیرزمینی دشت صحنه-بیستون با رودخانه گاماسیاب واقع در استان کرمانشاه را با استفاده از مدل MODFLOW شبیه‌سازی و ارزیابی کردند. نتایج به‌دست آمده از مدل نشان داد رودخانه عمده‌ترین عامل تغذیه کننده آبخوان به میزان ۲۴/۸۸ میلیون مترمکعب در سال و مهم‌ترین عامل تخلیه کننده آبخوان، پمپاژ از چاه‌های بهره‌برداری به‌میزان ۳۶/۰۴ میلیون مترمکعب در سال است. به‌طوری‌که رودخانه گاماسیاب آبخوان را در دو ناحیه تغذیه می‌کند و در سایر نواحی آبخوان را به میزان ۱۵/۳۵ میلیون مترمکعب در سال زهکشی می‌کند. در مطالعه دیگر، Movahedian و Chitsazan (2016) اثر متقابل آبخوان و رودخانه کارون در دشت گتوند-عقیلی را با استفاده از مدل MODFLOW بررسی کردند. سپس ارتباط رودخانه کارون با آبخوان در سناریوهای مختلف مدیریتی شامل افزایش و کاهش سطح آب رودخانه در اثر بهره‌برداری از دو سد گتوند (علیا و تنظیمی) و پیش‌بینی روابط متقابل آبخوان و رودخانه در دوره‌های خشکسالی و ترسالی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که رودخانه کارون در نواحی شمالی و به‌خصوص مرکزی دشت زهکش آبخوان است. در حالی که در نواحی جنوبی و بخش‌های جنوب شرقی دشت باعث تغذیه آبخوان می‌گردد. به‌طور کلی نتایج نشان داد تأثیر سازه‌های آبی مختلف همچون سدهای گتوند بر تبادل جریان میان آبخوان دشت گتوند-عقیلی و رودخانه کارون

به طوری که تبادل های منابع آب سطحی و زیرزمینی با توجه به شیب هیدرولیکی آب زیرزمینی و جریان رودخانه برآورد گردید.

## مواد و روش ها

### منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی حوضه مهباد چای با وسعت ۱۵۱۶ کیلومترمربع 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 (۱) نشان داده شده است. آبخوان مهباد با مساحت حدود ۲۵۳ کیلومترمربع در این محدوده واقع شده است. اقلیم منطقه دارای آب و هوای نیمه خشک است. متوسط بارندگی سالانه، ۴۰۲ میلی متر در طول دوره آماری سال آبی ۶۹-۱۳۶۸ تا ۹۸-۱۳۹۷ ثبت شده است. روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در طول ۲۳ سال (۹۸-۱۳۷۵) نشان می دهد سطح آب زیرزمینی به میزان ۱/۵ متر افت داشته است که متوسط سالانه آن برابر با شش سانتی متر در سال است. تغییر در سطح آب زیرزمینی عمدتاً به دلیل برداشت آب برای تأمین آب آبیاری و تخریب از آب زیرزمینی به دلیل بالا بودن سطح آب زیرزمینی در مناطق شمالی دشت است. به طور کلی روند اصلی تراز سطح آب در دشت مهباد در سال های اخیر متعادل بوده و افت مشاهده شده ناچیز است.

علاوه بر لزوم تلفیق مدل های آب سطحی و زیرزمینی، امکان استفاده از نتایج مدل های آب سطحی، به عنوان ورودی های سامانه آب زیرزمینی و همچنین لحاظ کردن تأثیر سامانه آب زیرزمینی در منطقه غیراشباع به خصوص منطقه توسعه ریشه در ارائه تصویر جامعی از تبادل های منابع آب سطحی و زیرزمینی ضروری است. به طور مشخص در حوضه دریاچه ارومیه که به شدت تحت تأثیر بهره برداری ناپایدار از منابع آب قرار گرفته، از این نوع مدل ها می توان برای حداکثرسازی تأمین حقابه دریاچه ارومیه از طریق الگوی تأمین نیاز آبیاری اراضی کشاورزی از منابع تلفیقی استفاده کرد. این گونه مدل ها قادرند اندرکنش منابع آب سطحی و زیرزمینی در پهنه های مختلف دشت و آبخوان متناسب با تفاوت های سهم تأمین آب کشاورزی از منابع آب تلفیقی را شبیه سازی کند. بنابراین هدف عمده این مطالعه، بررسی اندرکنش منابع آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از یک مدل تلفیقی آب سطحی و آب زیرزمینی در تأمین آب کشاورزی در دشت مهباد در حوضه آبریز دریاچه ارومیه است. در این دشت علاوه بر عبور رودخانه مهباد چای به طول ۲۶ کیلومتر از مرکز حوضه، وجود شبکه گسترده ای از انهار طبیعی به طول بیش از ۱۸۰ کیلومتر تبادل های آب های سطحی و زیرزمینی قابل توجهی در پهنه های مختلف دشت ایجاد نموده است. از این رو در مطالعه حاضر برهمکنش بررسی سطح ایستابی و جریان های سطحی در دامنه حریم جریان های طبیعی با یک مدل تلفیقی انجام گردید.

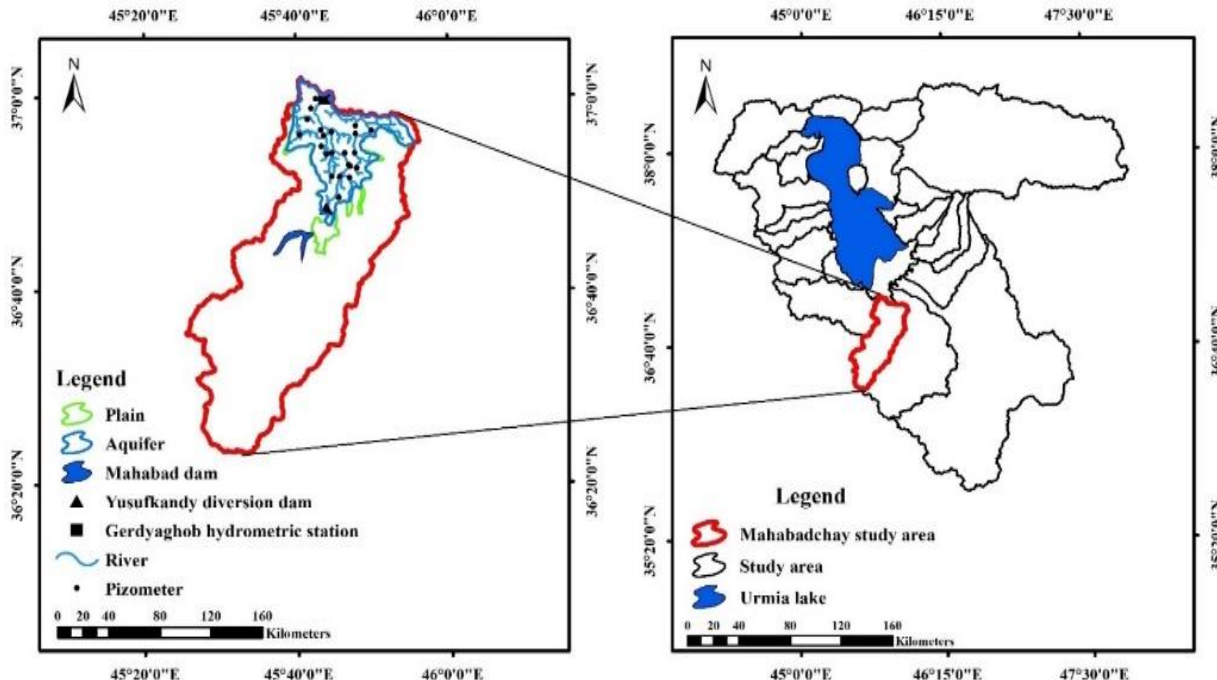


Fig. 1- Location of Mahabad study area, plain and aquifer in Urmia Lake Basin

شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی، دشت و آبخوان مهباد در حوضه آبریز ارومیه

### مدل MODFLOW

مدل MODFLOW اولین بار در سازمان زمین‌شناسی آمریکا تهیه و از آن زمان تاکنون نسخه‌های فراوانی از آن منتشر شده است (McDonald and Harbaugh, 2003). این مدل با توجه به قابلیت‌های زیاد و داشتن بسته‌های مختلف که با قابلیت شبیه‌سازی مؤلفه‌های مختلف سامانه آبی یک مدل جامع 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 شبیه‌سازی می‌کند (McDonald and Harbaugh, 1988). برنامه‌ی مذکور به دلیل قابلیت و اعتبارسنجی گسترده به‌عنوان یک مدل استاندارد جریان آب زیرزمینی پذیرفته شده و در شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل حالت‌های پایدار و ناپایدار استفاده می‌شود (Palma and Bentley, 2007; Bedekar et al., 2012).

مدل MODFLOW، مدلی فیزیکی محور و کاملاً توزیعی است که معادله داری با بیلان جرم در جریان آب زیرزمینی استفاده می‌کند (Harbaugh, 2005; Kim et al., 2008). مدل MODFLOW از معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی برای شبیه‌سازی جریان استفاده می‌کند. معادله دیفرانسیل جزئی ذیل که از ترکیب سه بعدی 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  $S_s$  ضریب ذخیره ویژه ( $I/L$ )،  $h$  بار آبی،  $t$  زمان،  $K_{xx}$ ،  $K_{yy}$  و  $K_{zz}$  به ترتیب مقادیر هدایت هیدرولیکی در جهت‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  است.  $W$  شار جریان حجمی در واحد حجم ( $L/T$ ) که برای تخلیه منفی و برای تغذیه مثبت منظور می‌شود. این معادله با توجه به شرایط آبخوان مورد مطالعه مبنی بر همگن یا غیر همگن بودن، همروند یا غیرهمروند بودن و ماندگار یا ناماندگار بودن قابل ساده‌سازی است.

این مدل برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی شامل یک برنامه اصلی و تعداد زیادی برنامه‌های فرعی بوده که این برنامه‌های فرعی در تعدادی بسته‌های مستقل دسته‌بندی شده‌اند. هر بسته برای شبیه‌سازی یکی از مؤلفه‌های هیدرولوژیکی نظیر تغذیه از رودخانه، تخلیه توسط زهکش، برداشت آب توسط چاه برای حل معادله‌های خطی جریان با یک روش خاص به کار می‌رود. به‌طوری‌که هرکدام از بخش‌های محاسباتی و هیدرولوژیکی به‌گونه‌ای 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 شبیه‌سازی جریان رودخانه (River package) با ساده‌سازی نحوه‌ی ارتباط بین آبخوان و رودخانه و تبادل جریان را معطوف به دو عامل اختلاف هد و ضریب هدایت بستر رودخانه می‌نماید (Chitsazan et al., 2016). بسته به اینکه ارتفاع آب زیرزمینی بالاتر از ارتفاع آب در رودخانه و یا پایین‌تر از آن باشد منجر به تغذیه یا زهکشی آب زیرزمینی می‌شود. فرض بر این است که افت بار بین رودخانه و آبخوان محدود به خود لایه بستر است؛ یعنی، افت بار قابل توجهی بین کف لایه بستر و گره زیرین رخ نمی‌دهد. به‌علاوه، فرض می‌شود که سلول تحتانی مدل، اشباع باقی می‌ماند؛ یعنی، سطح آب هیچ‌گاه پایین‌تر از کف لایه بستر نمی‌آید. با این فرضیات جریان آب رودخانه و سامانه آب زیرزمینی از رابطه (۲) به‌دست می‌آید:

$$Q_{RIV} = C_{RIV}(H_{RIV} - h_{i,j,k}) \quad (2)$$

که در معادله بالا مقدار هدایت‌پذیری کف رودخانه ( $C_{RIV}$ ) از معادله (۳) برآورد می‌شود:

$$C_{RIV} = \frac{KLW}{M} \quad (3)$$

در معادله‌های بالا  $Q_{RIV}$  میزان آب مبادله شده بین سلول‌های مرزی و رودخانه ( $L/T$ )،  $H_{RIV}$  بار جریان در رودخانه ( $L$ )، هدایت‌پذیری کف رودخانه و  $h$  بار آب و یا در حالتی که سطح آب پایین‌تر از کف رودخانه باشد، ارتفاع بستر رودخانه ( $L$ ) است.  $Q_{RIV}$  جریان بین رودخانه و آبخوان است که در جهت ورود به آبخوان مثبت در نظر گرفته می‌شود.  $H_{RIV}$  بار هیدرولیکی در رودخانه،  $C_{RIV}$  "رسانایی" هیدرولیکی لایه ارتباطی رودخانه - آبخوان ( $\frac{KLW}{M}$ ) و  $h_{i,j,k}$  بار هیدرولیکی در گره سلول زیرین این بازه از رودخانه می‌باشد. اگر فرض شود که لایه بستر رودخانه اشباع از آب باقی بماند، بار هیدرولیکی در قاعده آن به‌طور ساده برابر ارتفاع آن نقطه خواهد بود که با RBOT نشان داده می‌شود و در نتیجه جریان از درون لایه بستر به‌صورت رابطه (۴) خواهد بود:

$$Q_{RIV} = C_{RIV}(H_{RIV} - RBOT) \quad (4)$$

واضح است که افت بیشتر بار هیدرولیکی به سطحی پایین‌تر از RBOT، باعث افزایش جریان از لایه بستر نخواهد شد، بلکه تا زمانی که بار هیدرولیکی پایین‌تر از RBOT باقی بماند، مقدار جریان با مقدار ثابت داده شده در فرمول فوق برابر خواهد بود. از این



**ساختار مدل سازی SWAT-MODFLOW-NWT**

داده‌های مورد استفاده در ساختار مدل سازی تلفیقی SWAT-MODFLOW-NWT در شکل (۲) نشان داده شده است. برای تهیه مدل کمی و شبیه سازی جریان آبخوان مهاباد در مدل SWAT-MODFLOW-NWT در نرم افزار GIS پوشش‌های (Coverages) مختلفی شامل رقوم سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای، دبی چاه‌های بهره‌برداری، نوع مرزهای محدوده آبخوان، ورودی و خروجی‌های آب‌های سطحی و زیرزمینی، رقوم سنگ کف، لایه شناسی آبخوان، خصوصیات هیدرولوژیکی و هیدرونیامیکی آبخوان (داده‌های هدایت هیدرولیکی، قابلیت انتقال، ضریب ذخیره، آبدی ویژه)، موقعیت چاه‌های بهره‌برداری و مشاهده‌ای در سطح سلول‌های واقع در محدوده مدل سازی و مقادیر تعدیه حاصل از مدل SWAT به مدل MODFLOW-NWT تعریف شد (Raja et al., 2021).

در این مطالعه از نقشه DEM, 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 ۳a). با توجه به اطلاعات موجود، آبخوان مهاباد به صورت تک لایه در نظر گرفته شد. شبکه چاه‌های پیژومتری به منظور اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی این آبخوان آبرفتی از سال ۱۳۶۹ در دشت مهاباد آغاز 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 در طول دوره شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۳b).

علاوه بر رودخانه مهاباد چای به طول ۲۶ کیلومتر، شبکه انهار طبیعی به طول ۱۸۳/۵ کیلومتر در دشت وجود دارد. سطح آب زیرزمینی در دشت بسیار بالا است و اندرکنش بین آبخوان و رودخانه در سرتاسر دشت وجود دارد. برای شبیه‌سازی دقیق اثر رودخانه‌ها و آبراهه‌ها در مدل، اطلاعات مربوطه به موقعیت مکانی رودخانه، سطح آب، شکل بستر و روابط دبی-اشل رودخانه‌ها از سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی اخذ گردید. برای تقویت اطلاعات ورودی در فرآیند مدل سازی از سایر اطلاعات گزارش شده همچون اطلاعات خروجی برآورد شده از مدل SWAT شامل خصوصیات شیب، پهنا و عمق رودخانه اصلی مهاباد و کلیه رودخانه‌های فرعی و نیز تصاویر ماهواره‌ای (Google Earth) استفاده شد (Nayyeri, 2015, Raja et al., 2021). شبکه رودخانه استفاده شده در فرآیند مدل سازی در شکل (۳b) نشان داده شده است. جبهه‌های ورودی و خروجی آبخوان به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل مهم تعدیه آبخوان با استفاده از نقشه تراز سطح ایستایی، خطوط هم‌تراز آب زیرزمینی و جهت جریان آب زیرزمینی مشخص و به عنوان شرایط مرزی به مدل معرفی شد. بررسی خطوط هم‌تراز آب زیرزمینی نشان داد آبخوان مهاباد دارای سه مقطع ورودی، یک مقطع خروجی و دو جبهه نفوذناپذیر است (شکل ۳c).

فرضیات برای شبیه‌سازی ارتباط رودخانه و آبخوان در استفاده می‌شود، یعنی، جریان بین یک رودخانه و گره  $i, j, k$  بر اساس معادله (۵) نوشته می‌شود:

$$\begin{cases} QRIV = CRIV(HRIV - h_{i,j,k}) & \text{if } h_{i,j,k} > RBOT \\ QRIV = CRIV(HRIV - RBOT) & \text{if } h_{i,j,k} \leq RBOT \end{cases} \quad (5)$$

زمانی که  $h_{i,j,k}$  برابر یا هم سطح آب رودخانه HRIV گردد، مقدار این جریان برابر صفر خواهد بود و برای مقادیر بزرگتر  $h_{i,j,k}$  مقدار جریان منفی، یعنی جریان به سمت رودخانه است. برای مقادیر کمتر  $h_{i,j,k}$  جریان مثبت، یعنی جریان به سمت آبخوان صورت می‌گیرد. این جریان مثبت با کاهش  $h_{i,j,k}$  به طور خطی افزایش می‌یابد تا زمانی که  $h_{i,j,k}$  به حد RBOT تنزل یابد، پس از آن جریان ثابت باقی می‌ماند (Chitsazan and Kashkuli, 2002).

بسته‌های شبیه‌ساز تبخیر و ترقق شامل EVT یا ETS در مدل MODFLOW از روش تقریب خطی برای برآورد تبخیر از سطح آب زیرزمینی استفاده می‌کنند. هرچه فاصله سطح ایستایی آب زیرزمینی از سطح زمین کمتر باشد، مقدار تبخیر از آب زیرزمینی بیشتر خواهد بود. در این روش نرخ تبخیر روی سطح زمین و حداکثر ارتفاعی که در آن تبخیر از آب زیرزمینی رخ می‌دهد توسط کاربر مشخص می‌گردد و بسته شبیه‌ساز تبخیر با استفاده از داده‌های دریافتی از کاربر یک تقریب خطی ساده (در بسته EVT) و یا یک تقریب دوخطی (در بسته ETS) از پروفیل نرخ تبخیر در عمق زمین ایجاد نموده و میزان آب خارج شده از آبخوان را برآورد می‌نماید. به طور کلی، بسته تبخیر برای شبیه‌سازی تبخیر مستقیم و خروج آب از منطقه اشباع آب زیرزمینی به کار می‌رود و بر سه اصل زیر مبتنی است. اگر سطح ایستایی بالاتر یا هم سطح با سطح مشخصی تحت عنوان سطح تبخیر (The evapotranspiration surface elevation) باشد، تلفات ناشی از تبخیر از آبخوان با شدت بیشینه (Maximum ET rate) انجام می‌گیرد. اگر عمق سطح ایستایی از سطح معینی تحت عنوان عمق توقف یا قطع (The extinction depth) باشد، تبخیر متوقف می‌شود. در نهایت بین این دو حد، میزان تبخیر از سطح ایستایی نسبت به ارتفاع سطح ایستایی به صورت خطی تغییر می‌کند (Chitsazan and Kashkuli, 2002).

یکی از نسخه‌های جدید مدل MODFLOW، نسخه MODFLOW-NWT است که در این تحقیق از آن برای شبیه‌سازی تبادل‌های 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 غیر محصور استفاده می‌کند (Niswonger et al, 2011). این قابلیت در نسخه‌های قبلی مدل MODFLOW وجود نداشت و از نقاط ضعف مدل محسوب می‌شد. 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.

می‌باشد که همواره نحوه‌ی تشخیص آن در طی فرایند مدل‌سازی، با دشواری زیادی با توجه به محدودیت داده‌های موجود همراه است. در منابع مختلف روش‌های مختلفی از جمله اندازه‌گیری‌های مستقیم میدانی در چند نقطه از بستر رودخانه (که نیازمند تجهیزات خاصی می‌باشد)، تخمین آن براساس ضریب هدایت هیدرولیکی دشت در محل بستر رودخانه و یا تخمین آن براساس مواد بستر رودخانه معرفی شده است. بررسی کامل این روش‌ها منجر به آن شد تا در مدل آب زیرزمینی دشت مهاباد مسیل رودخانه مهاباد به سه قسمت ورودی به دشت، میانی و پایاب تقسیم شده و برای هر یک از آن‌ها میزان حداقل و حداکثر ضریب هدایت کف رودخانه و آبراهه‌ها با توجه به مقادیر مطرح شده در گزارشات و مقالات علمی (Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2014; Nayyeri, 2015) و مقادیر پهنه‌بندی شده قابلیت انتقال و هدایت هیدرولیکی در سطح دشت تعیین شود؛ لذا برای تعیین مقدار دقیق ضریب هدایت هیدرولیکی کف رودخانه نیز محدوده تغییرات ضریب هدایت کف رودخانه‌ها برای سه بازه ورودی، میانی و پایاب دشت بین سه تا ۱۵ متر در روز فرض شد. برای تقویت اطلاعات ورودی از سایر داده‌ها همچون نتایج خروجی برآورد شده مربوط به آبراهه‌های فرعی از مدل SWAT شامل خصوصیات شیب، پهنای و عمق رودخانه اصلی مهاباد و کلیه آبراهه‌ها، اطلاعات گزارش شده در مقالات علمی Nayyeri (2015) و نیز اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای (Google Earth) استفاده شد. پس از بررسی کلیه اطلاعات جمع‌آوری شده، اطلاعات مقطع رودخانه بر اساس عمق و پهنای تهیه و به مدل معرفی شد.

در این مطالعه، از مقادیر تغذیه حاصل از مدل SWAT در مدل‌سازی آب زیرزمینی MODFLOW-NWT 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. بر اساس فرضیات مدل SWAT هنگامی که ذخیره رطوبتی خاک در هر لایه بیش از ظرفیت زراعی باشد، نفوذ عمقی به لایه بعدی رخ می‌دهد. پارامتر GW\_RCHG در پرونده‌های خروجی مدل در قسمت Output.hru بیانگر تغذیه به آبخوان است. میزان تغذیه سالانه واردشده به مدل به‌طور متوسط از ۱۷ تا ۳۶۳ میلی‌متر متغیر بود (شکل ۳h).

چاه‌های بهره‌برداری یکی از مهم‌ترین روش‌های تأمین آب در دشت مهاباد است. موقعیت چاه‌های بهره‌برداری در محدوده آبخوان مهاباد در شکل (۳d) نشان داده شده است که آمار و اطلاعات آن‌ها در طی فرایند مدل‌سازی به مدل تعریف شد. بررسی‌ها نشان داد در طی دو دهه اخیر به تدریج با افزایش تعداد چاه‌ها، میزان بهره‌برداری از چاه‌ها افزایش یافته است. به‌طوری‌که بر اساس آمار موجود، میزان برداشت از آب زیرزمینی در سطح دشت از ۱۲/۹۰ میلیون مترمکعب در سال آبی ۱۳۸۹-۹۰ به ۵۵/۲۰ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۹۷ افزایش یافته است. اطلاعات لازم در مراحل مدل‌سازی بر اساس گام‌های زمانی ماهانه به مدل معرفی شد.

پس از بررسی‌های لازم از اطلاعات جمع‌آوری شده از نقشه‌های زمین‌شناسی، لوگ چاه‌های پیرومتری، اکتشافی و بهره‌برداری ۹۴ حلقه چاه جهت رسم رقوم سنگ‌بستر نسبت به تراز سطح زمین در نرم‌افزار Arc GIS استفاده شد. به‌طور کلی رقوم سنگ کف آبخوان از تراز ۱۲۳۲ تا ۱۲۸۴ متر متغیر است. ضخامت سنگ‌بستر نیز حدود ۶۰-۱۶ متر زیر سطح زمین است (شکل ۳e).

ضرایب هیدرودینامیک از جمله ضرایب هدایت هیدرولیکی (K)، قابلیت انتقال (T) و آبدهی ویژه (Sy) از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده جریان آب زیرزمینی می‌باشند. در این مطالعه برای تعیین ضرایب هیدرودینامیک از منابع اطلاعاتی مختلف از قبیل آزمایش پمپاژ در چاه‌ها و بر اساس دانه‌بندی نمونه خاک استفاده شد (Davis and De Wiest, 1996). بررسی‌ها نشان داد مقادیر هدایت هیدرولیکی از ۲/۵ تا ۱۳ متر در روز در سطح آبخوان متغیر است (شکل ۳f). به‌طور کلی نواحی شمالی و شمال غربی آبخوان به دلیل وجود رسوبات دانه‌ریز کم‌ترین مقدار و نواحی جنوبی و جنوب غربی بیش‌ترین مقدار هدایت هیدرولیکی را نشان می‌دهند (Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2014). همچنین، میزان آبدهی ویژه در سطح منطقه از ۰/۴ تا ۳/۶ درصد متغیر است (شکل ۳g). بررسی مطالعات پیشین به‌منظور تعیین آبدهی ویژه نیز نشان می‌دهد مقدار آن بین ۰/۳ الی ۳/۱ درصد است (Valizadegan and Yazdanpanah, 2018; Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2014).

تعیین میزان ضریب هدایت کف رودخانه‌ها نیز یکی دیگر از چالش‌های مدل کردن رودخانه‌ها در مدل‌سازی آب زیرزمینی

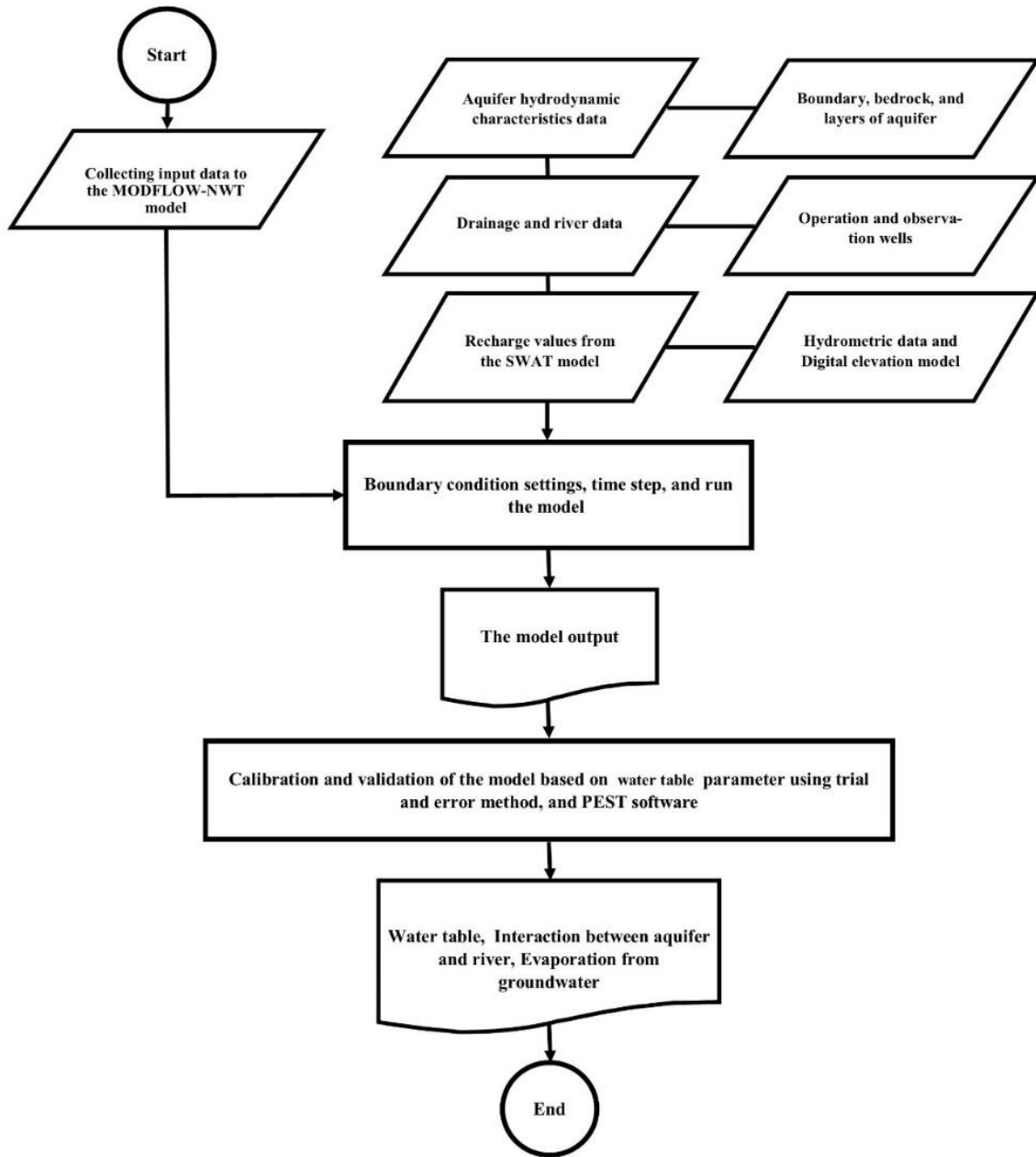
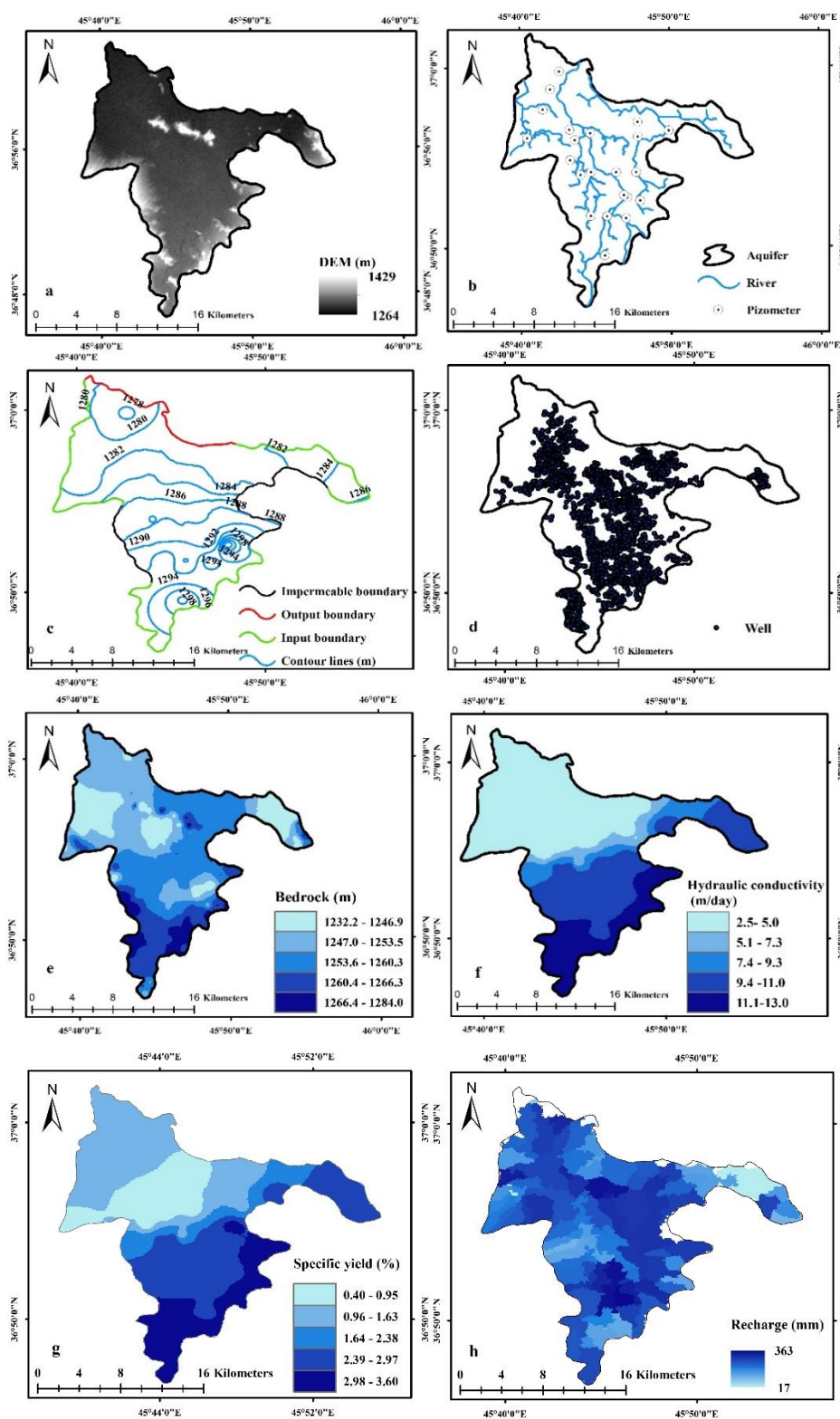


Fig. 2 – Data used in coupled SWAT-MODFLOW-NWT modeling structure  
 شکل ۲- داده‌های مورد استفاده در ساختار مدل‌سازی تلفیقی SWAT-MODFLOW-NWT



3- a) Digital elevation model (DEM) with a scale of 30 meters, b) Location of piezometric wells, .Fig c) Inlet, outlet, impermeable boundaries, and groundwater contour lines, d) Location of wells, e) Values Aquifer bedrock, f) Hydraulic conductivity values, g) Specific yield values and, h) Recharge values.

شکل ۳- 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) مقادیر آبدهی ویژه و (h) تغذیه سالانه آب زیرزمینی

### اجرای مدل

ناحیه‌ی فعال شبکه‌بندی مدل MODFLOW-NWT مساحتی حدود ۲۵۳ کیلومتر مربع را دربر می‌گیرد. گسسته سازی و پیکسل‌بندی مدل MODFLOW-NWT دشت مهاباد با ایجاد یک شبکه‌ی منظم تقاضات محدود به تعداد ۳۳۴۸ با ابعاد ۵۰۰ متر در ۵۰۰ متر و ۱۰۱۳ سلول فعال طراحی شد. در مدل MODFLOW-NWT مرزهای با جریان ورودی و خروجی به صورت بار هیدرولیکی عمومی (General Head Boundary)، مرزهای بدون جریان به صورت بار هیدرولیکی مشخص (Specific Head Boundary) در نظر گرفته شد.

مقادیر تغذیه حاصل از مدل SWAT به عنوان داده ورودی به مدل MODFLOW-NWT اضافه شد (Raja et al., 2021). مقادیر تغذیه ماهانه در زیرحوضه‌های مدل SWAT به عنوان مرز بالا به مدل MODFLOW-NWT معرفی گردیدند. اطلاعات کامل در خصوص فرآیند اتصال دو مدل MODFLOW-NWT و SWAT در مطالعه Bailey et al. (2016) تشریح شده است. مقادیر اولیه برآورد هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه برای منطقه به مدل معرفی گردید. آمار میدانی مقادیر برداشت هر یک از چاه‌های بهره‌برداری در طول دوره‌ی شبیه‌سازی وارد مدل شد. برای شبیه‌سازی جریان ماندگار، از سطح آب اندازه‌گیری شده چاه‌های مشاهداتی در مهر سال ۱۳۸۸ به عنوان سطح آب زیرزمینی اولیه استفاده شد.

همچنین، برای شبیه‌سازی فرآیندهای پمپاژ از آب‌های زیرزمینی از بسته WEL در مدل MODFLOW-NWT استفاده شد. بسته‌های ETS و RCH به ترتیب برای شبیه‌سازی تبخیر از سطح آب زیرزمینی و تغذیه آب زیرزمینی در مدل اصلی MODFLOW-NWT در نظر گرفته شد. برای بررسی اندرکنش بین منابع آب سطحی و زیرزمینی نیز از بسته RIV استفاده شد. به طور کلی برای مدل‌سازی غیر ماندگار آبخوان مهاباد، دوره‌ی ده‌ساله (از سال آبی ۸۹-۱۳۸۸ تا ۹۸-۱۳۹۷) در نظر گرفته شد. از آنجا که اندازه‌گیری عمق سطح ایستابی به صورت ماهانه انجام می‌شود، گام زمانی ماهانه و واحد زمان روزانه در نظر گرفته شد.

### واسنجی و اعتبارسنجی مدل

در این مطالعه در ابتدا مدل با انتخاب روش ریاضی حل سامانه معادله‌های جبری که شامل تعداد تکرار و معیار خطای قابل قبول برای خاتمه فرآیند تکرار اجرا شد. اجرای اولیه مدل MODFLOW-NWT در حالت ماندگار انجام شد تا شرایط اولیه برای اجرای بعدی مدل مهیا شود. به طوری که از داده‌های سطح آب زیرزمینی به دست آمده در حالت ماندگار برای اجرای مدل در حالت ناماندگار استفاده شد. آنالیز حساسیت هر کدام از پارامترهای ضریب هدایت هیدرولیکی، آبدی ویژه و ضریب هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه و تغذیه در مرحله واسنجی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد تعیین و اعمال میزان تغییرات مقادیر هدایت هیدرولیکی، آبدی ویژه و تغذیه عامل مهمی برای دستیابی به یک واسنجی موفق بود.

به طور کلی حساسیت ضریب هدایت هیدرولیکی بیشتر از سایر پارامترها بود؛ بنابراین در ابتدا به منظور درک واکنش مدل به تغییر پارامترها، واسنجی به روش سعی و خطا انجام شد. سپس، از الگوریتم PEST (Parameter estimation) به عنوان یک برآوردگر غیرخطی به منظور دستیابی به واسنجی بهینه استفاده شد (Doherty et al., 1994).

واسنجی مدل در شرایط ماندگار بر اساس مقدار اولیه ضریب هدایت هیدرولیکی به صورت دستی و آزمون خطا با استفاده از نتایج آزمون‌های پمپاژ و اطلاعات تهیه شده از آب منطقه‌ای آذربایجان غربی انجام شد. این مقادیر باید بر اساس خصوصیات منطقه تغییر می‌کردند. به طوری که تعیین مقادیر مطلوب باید در محدوده واقع بینانه متناسب با شرایط منطقه (مقادیر بیان شده در بخش ورود داده‌ها به مدل) به دست می‌آمد. در گام بعدی، پس از تخمین مقادیر اولیه ضرایب هیدرودینامیکی برای کاهش اختلاف تراز آب محاسباتی و مشاهده‌ای در چاه‌های مشاهده‌ای، مدل برای شرایط غیر ماندگار با استفاده از داده‌های متغیر با زمان، نظیر آبدی چاه‌های بهره‌برداری، تغذیه و تراز آب اندازه‌گیری شده در چاه‌های مشاهده‌ای اجرا شد. در شرایط ناماندگار، مدل بر اساس مقادیر ضریب هدایت هیدرولیکی (K)، ضریب آبدی ویژه (Sy)، هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه و انهار طبیعی و تغذیه آب زیرزمینی به صورت خودکار و به کمک روش PEST در نرم‌افزار GMS با هدف تطابق مقادیر تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در چاه‌های مشاهده‌ای واسنجی شد. به طوری که در مدل هدایت هیدرولیکی (K) و آبدی ویژه (Sy) به عنوان پارامترهای مجهول در نظر گرفته شدند و با مدل‌سازی معکوس با استفاده از روش PEST تعیین می‌شوند. روش پهنه‌بندی (ZM) و روش پیلوت منظم (RPP) به ترتیب برای پارامترهای Sy و K استفاده شدند (Doherty, 2003؛ Moor and Doherty, 2006). در روش ZM، دامنه مدل به چندین زیر دامنه با مقدار ثابت Sy تقسیم شد زیرا مجهول‌ها در یک فرآیند واسنجی تنظیم می‌شوند. در روش RPP، ابتدا مجموعه‌ای از نقاط با پراکندگی دوعیدی در سرتاسر دامنه مدل توزیع می‌شود که مقادیر معقول و منطقی K از آن اختصاص داده می‌شود.

سپس این مقادیر از طریق واسنجی تخمین زده می‌شوند. پس از آن، مقادیر «واقعی و واسنجی شده» برای سلول‌های دیگر مدل با استفاده از یک روش درون‌یابی فضایی مانند Kriging محاسبه می‌شود. واسنجی داده‌های تغذیه نیز در ابتدا برای یک ماه در حالت ماندگار آغاز شد، پس از آن واسنجی بر اساس داده‌های تغذیه ماهانه متغیر در طول دوره شبیه‌سازی در شرایط ناماندگار استفاده شد. در نهایت مدل MODFLOW-NWT بر اساس مقادیر تراز سطح آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده در چاه‌های مشاهده‌ای ارزیابی و واسنجی شد. از مهر سال ۱۳۸۸ تا شهریور سال ۱۳۹۴ دوره‌ی واسنجی و از مهر سال ۱۳۹۴ تا شهریور سال ۱۳۹۸ دوره‌ی اعتبارسنجی در نظر گرفته شد.

## نتایج و بحث

### واسنجی پارامترهای مدل

هدایت هیدرولیکی از پارامترهای اولیه واسنجی در مدل MODFLOW-NWT بود. تعیین مقدار هدایت هیدرولیکی تأثیر زیادی بر نتایج مدل دارد. لذا در ابتدا ضریب هدایت هیدرولیکی به روش آزمون خطا و سپس به روش خودکار با استفاده از مدل PEST در شرایط ناماندگار بر اساس ضریب هدایت هیدرولیکی به دست آمده از طریق آزمایش‌های همپاژ واسنجی شد. نتایج واسنجی نشان داد بیش‌ترین میزان هدایت هیدرولیکی در نواحی جنوبی و مرکزی دشت و نیز در نواحی شمال شرقی به میزان ۱۲/۵ متر در روز و کمترین مقدار نیز در حاشیه شمالی و در نزدیکی خروجی دشت به میزان ۲/۵ متر در روز به دست آمد. برآوردهای به دست آمده از مقادیر ضرایب هدایت هیدرولیکی با مشاهدات میدانی مطابقت دارد. با توجه به این که در نواحی شمالی دشت بافت خاک غالباً سنگین است (درصد رس زیاد)، با پیشروی از مناطق جنوب به سمت شمال آبخوان از مقادیر هدایت هیدرولیکی کاسته می‌شود (Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2014). واسنجی ضریب آبدی ویژه نیز یکی دیگر از گام‌های مؤثر در دستیابی به نتایج قابل قبول و رضایت‌بخش در شرایط ناماندگار بود. نتایج واسنجی مدل نشان داد میزان آبدی ویژه در سطح منطقه از ۰/۴ تا ۳/۶ درصد متغیر است. نتایج نشان داد بیشترین میزان آبدی ویژه در نقاط جنوبی دشت و کمترین میزان آبدی ویژه در نقاط خروجی و شمالی دشت برآورد شده است که با گزارش‌های بیلان منابع و مصارف پیشین (بین ۰/۳ تا ۳/۱ درصد) مطابقت دارد (Valizadegan and Yazdanpanah, 2018; Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2014).

در این مطالعه از مقادیر تغذیه حاصل از مدل SWAT به عنوان یکی از پارامترهای ورودی مهم در مدل MODFLOW-NWT استفاده شد. با توجه به این که برآورد میزان تغذیه به آب زیرزمینی به هر روشی با عدم قطعیت روبه‌رو است. لذا این مقادیر به منظور تعیین دقیق‌تر آن‌ها در فرآیند واسنجی مدل در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از واسنجی نشان داد به‌طور متوسط حدود نه درصد از بارندگی و ۳۶ درصد از مصارف آب در بخش کشاورزی به آبخوان نفوذ می‌کند که با مقادیر ارائه شده در گزارش‌های بیلان منابع و مصارف (۱۰/۷ درصد از بارندگی و ۲۷/۲ درصد از مصارف کشاورزی) تقریباً مطابقت دارد (Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2014). برآورد دقیق ضریب هدایت کف رودخانه در طول مسیر تقریباً غیرممکن بوده و تنها راه تخمین آن استفاده از اندازه‌گیری‌های

نقطه‌ای و توسعه نتایج حاصل از این اندازه‌گیری‌ها برای کل مسیر رودخانه است. با توجه به این که امکان اندازه‌گیری میدانی ضریب هدایت کف رودخانه میسر نبود، از نتایج حاصل از مدل SWAT شامل مکان رودخانه، ابعاد بستر رودخانه و سطح آب در آنها، طبیعی و اطلاعات جمع‌آوری شده از سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی شامل ضریب هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه، سطح آب، شکل بستر و روابط دبی اشل رودخانه در محل ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در دشت استفاده شد. باین حال پس از فرآیند واسنجی مدل مقادیر دقیق‌تر این پارامتر در بازه‌های مکانی مختلف در رودخانه مهاباد که عمده جریانات سطحی در آن اتفاق می‌افتد محاسبه شدند. نتایج واسنجی مدل نشان داد میزان هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه در ورودی، حدفاصل ورودی و خروجی و نیز خروجی رودخانه به ترتیب ۱۱/۳، ۷/۶ و ۲/۷ متر بر روز برآورد شد.

### خطای شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در گام زمانی

در مطالعه قبلی (Raja et al., 2022)، مقادیر آماره‌های عملکرد مدل شامل ضریب تبیین ( $R^2$ ) و نش-ساتکلیف (NSE) بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی تراز سطح ایستابی در شرایط ناماندگار در بررسی تراز سطح ایستابی برای دوره‌های مختلف واسنجی و اعتبارسنجی نشان داد مطابقت خوبی بین تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در هر دو دوره وجود دارد. به طوری که مقادیر آماره‌ها نشان داد که این دو مقدار از همبستگی بسیار زیادی برخوردارند. همچنین، نتایج معیار RMSE نیز نشان داد مقدار خطای ۰/۳۵ و ۰/۳۴ متر به ترتیب برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی به دست آمد که نشانگر نتیجه رضایت‌بخش و مناسبی برای منطقه است. تعیین بهینه پارامترهای هدایت هیدرولیکی، آبدی ویژه و مقادیر تغذیه به آبخوان مهم‌ترین عامل دستیابی به نتایج مطلوب بود. به‌طور کلی مقادیر تغذیه یکی از اصلی‌ترین و مهم‌ترین مؤلفه‌های ورودی در مدل‌سازی آب زیرزمینی در مناطق نیمه‌خشک و خشک است. در این مطالعه از مقادیر تغذیه حاصل از مدل SWAT در فرآیند واسنجی مدل MODFLOW-NWT استفاده شد. به‌طور مشخص از این روش و الگو استفاده نمی‌شود. نتایج حاکی از قابل‌اعتماد بودن روش در نظر گرفته شده در تعیین میزان تغذیه آبخوان و بهبود برآورد دیگر مؤلفه‌های بیلان آب از جمله نوسانات تراز سطح ایستابی است (Semiroimi and Koch, 2019; Molina-Navarro et al., 2019; Saadatpour et al., 2019; Dowlatabadi and Zomorodian, 2016; Kouchakzadeh and Nasiri, 2015; Bailey et al., 2016).

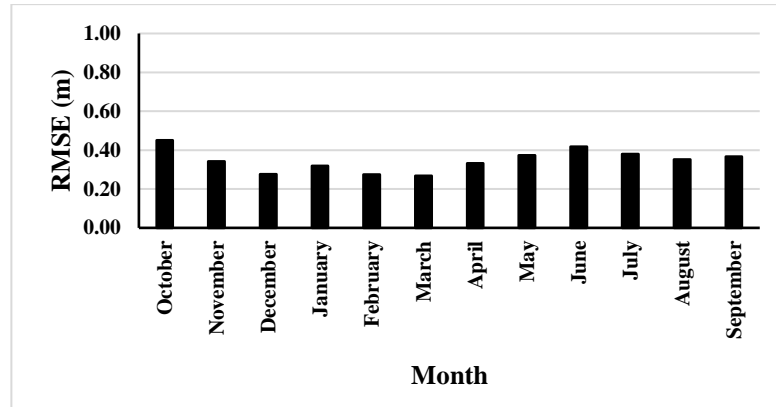


Fig. 4- Calculated error of water table level in piezometers in monthly time step

#### شکل ۴- خطای محاسبه شده تراز سطح ایستابی در پیزومترها در گام زمانی ماهانه

نواحی نسبت به سایر مناطق بود. بدیهی است وجود چنین خطاهای متفاوت نسبت به سایر نقاط دشت باعث پیچیده تر شدن شبیه سازی تراز آب زیرزمینی در این قسمت از منطقه مدل سازی شده است. بررسی موقعیت مکانی چاه های پیزومتری نشان می دهد میزان خطا در برخی مناطق دیگر به خصوص در پیزومترهای گردگروی و اگریقاش نزدیک به مرزهای ورودی و خروجی آبخوان نیز افزایش یافته است. عملاً امکان برآورد دقیق آب ورودی و خروجی در قسمت مرزهای ورودی و خروجی وجود ندارد. پیزومترهای واقع در نزدیک مرز آبخوان تحت تأثیر جریان ورودی و خروجی آبخوان می باشند. از طرفی توزیع مناسبی از پیزومترها در سرتاسر مرز آبخوان برای پایش تراز آب زیرزمینی وجود ندارد. لذا این امر موجب افزایش خطا در پیزومترهای نزدیک به این مرزها شده است. سایر محققین نیز به این مسئله اشاره داشته اند که قرار گرفتن پیزومترها در نزدیکی مرزهای آبخوان و تعریف نوع شرایط مرزی تأثیر بسیار زیادی بر شبیه سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی دارد. به طوری که پیزومترهای واقع در مرکز آبخوان کمتر تحت تأثیر مقادیر ورودی و خروجی آبخوان و بالتبع تأثیر آن بر نوسانات سطح آب زیرزمینی قرار می گیرند (Hamzehkhani, 2015; Semiroimi and Koch, 2019).

نتایج نشان داد میزان خطا در پیزومترهای اراضی قزل گبی، گاپیس، دارلک و لیج افزایش یافته است. این پیزومترها در نزدیک رودخانه اصلی منطقه (مهاباد چای) قرار دارند. لذا تغییرات ناگهانی سطح آب در اثر وقوع سیلاب های فصلی و رهاسازی حجم آب زیاد در این رودخانه و یا برعکس کاهش جریان آب در رودخانه در یک بازه زمانی کوتاه مدت منجر به عدم شبیه سازی دقیق تراز آب زیرزمینی در این مناطق شده است. در مطالعه Hamzehkhani (2015) نیز به تأثیر رهاسازی جریان های سیلابی در رودخانه های سیمینه و زرینه رود واقع دشت میاندوآب بر نوسانات سطح آب زیرزمینی اشاره شده است. بررسی ها نشان داد است خطاهای منطقه ای ممکن است در اثر تغییرات ناگهانی سطح آب زیرزمینی در برخی مناطق مدل سازی ایجاد شود به طوری که مدل نتواند تراز

از آماره RMSE برای بیان خطای مدل در برآورد تراز سطح ایستابی در هر گام زمانی استفاده شد. میزان خطای مدل در شبیه سازی تراز سطح ایستابی در هر گام زمانی (ماهانه) در کل دوره شبیه سازی در شکل (۴) نشان داده شده است. میزان خطای شبیه سازی توسط مدل در برخی از ماه ها مانند مهر، فروردین، اردیبهشت، خرداد و شهریور نسبت به سایر گام های زمانی افزایش یافته است. مقادیر بارندگی اندازه گیری شده در ایستگاه سینوپتیک مهاباد و جریانات سطحی رهاسازی شده از سد مهاباد و جریان اندازه گیری شده در ایستگاه آب سنجی گردیعقوب نشان می دهد سیلاب ها عمدتاً در ماه های مهر، فروردین و اردیبهشت اتفاق افتاده است. لذا افزایش خطا در گام های زمانی مهر، فروردین و خرداد به دلیل نوسانات ناگهانی سطح آب در پیزومترهای واقع در حاشیه رودخانه مهاباد چای است. از طرفی برداشت از آب زیرزمینی برای تأمین آبیاری محصولات عمدتاً در ماه های خرداد تا شهریور انجام می شود؛ بنابراین افزایش خطا در گام های زمانی خرداد و شهریور ممکن است به دلیل افزایش برداشت از آب زیرزمینی و در نتیجه افت موضعی سطح آب زیرزمینی در این ماه ها باشد. در سایر گام های زمانی خطای محاسبه شده در مدل مناسب است.

#### خطای شبیه سازی تراز آب زیرزمینی در پیزومترها

برای بیان خطا مدل بین مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده در پیزومترها از آماره RMSE استفاده شد که مقادیر آن در جدول (۱) برای دوره های واسنجی، اعتبارسنجی ارائه شده است. تقریباً میزان خطا برای اکثر پیزومترها قابل قبول است. همچنین، توزیع مکانی خطا در محدوده مدل سازی تقریباً یکنواخت بوده و در کل محدوده پراکنده است. بیشترین خطای مدل حداقل پیزومترهای اراضی اگریقاش و گرگ تپه (خطای ۰/۷۴ متر) و نیز گاپیس (خطای ۰/۴۵ متر) و گیازله (خطای ۰/۴۹ متر) است. یکی از دلایلی که می توان به وجود خطای زیاد در این نواحی اشاره کرد افت موضعی سطح آب زیرزمینی در پیزومترهای موجود در این

(آبراهه‌های متصل به رودخانه اصلی مهاباد) شامل موقعیت مکانی، بار آبی و هدایت بستر آن‌ها در مدل‌سازی در نظر گرفته شدند. رودخانه‌های فرعی عمدتاً به صورت فصلی دارای جریان می‌باشند. شبکه رودخانه‌های فرعی بسیار گسترده و مترکم بوده و تقریباً کل آبخوان را در برمی‌گیرد. در نظر گرفتن رودخانه‌های فرعی در فرآیند مدل‌سازی منجر به اعمال تأثیر این آبراهه‌ها در نواحی مختلف دشت بر نوسانات سطح آب زیرزمینی می‌شود (Aliyari et al., 2019; Mosase et al., 2019).

بررسی الگوهای مکانی- زمانی نشت آب سطحی از رودخانه به آبخوان یا زهکشی آب زیرزمینی از آبخوان به شبکه رودخانه بسیار مهم است. میزان متوسط سالانه اندرکنش بین جریانات آب سطحی و زیرزمینی شبیه‌سازی شده در نقاط مختلف دشت برای هر یک از ۳۶۲ سلول رودخانه در سال‌های آبی خشک (۹۶-۱۳۹۵)، نرمال (۹۷-۱۳۹۶) و تر (۹۸-۱۳۹۷) در شکل (۵) نشان داده شده است. مقادیر منفی نشان‌دهنده نشت از رودخانه به سفره آب زیرزمینی و مقادیر مثبت نشان‌دهنده زهکشی از آبخوان به شبکه رودخانه است.

سطح ایستایی را به طور دقیق شبیه‌سازی کند (Wei and Baiely, 2019; Abiye et al., 2018). همچنین، واقع‌بینانه است که عملاً وارد کردن تمام جزئیات مؤثر بر جریان آب زیرزمینی در یک سلول شبکه ۵۰۰ متری در شرایط واقعی به مدل امکان‌پذیر نیست. علاوه بر این، عدم ثبت برداشت از چاه‌ها همراه با چاه‌های غیرمجاز، خطای انسانی در ثبت تراز آب زیرزمینی چاه‌های مشاهداتی در پیژومترها و خطا در تخمین ضرایب هیدرودینامیک مانند هدایت هیدرولیکی می‌تواند باعث تغییرات قابل توجهی در شبیه‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی در بازه‌های زمانی شود.

### اندرکنش بین آبخوان و رودخانه

شیب هیدرولیکی بین جریان سطحی رودخانه و تراز سطح آب زیرزمینی در آبخوان منجر به اندرکنش و تعامل بین آبخوان و رودخانه می‌شود. در این مدل علاوه بر رودخانه‌های دائمی دشت (رودخانه مهاباد)، اثر رودخانه‌ها و آبراهه‌های فرعی نیز در فرآیند مدل‌سازی در نظر گرفته شد. اطلاعات مربوط به رودخانه‌های فرعی

جدول ۱- مقادیر خطای محاسبه توسط مدل در محل پیژومترها

Table 1 - Error values calculated by the model at the location of piezometers

Piezometer Number	UTMx	UTMy	Label	RMSE (m)	
				Calibration	Validation
1	4084121	565370	Arazi_Darlak	0.11	0.14
2	4079903	566408	Arazi_Daryaz	0.23	0.18
3	4081827	570032	Arazi_Gharekhan	0.28	0.29
4	4087701	564805	Arazi_Ghezelgapi	0.30	0.34
5	4090810	561637	Arazi_Kosekahriz	0.16	0.19
6	4089570	571027	Arazi_Gerdgeroy	0.26	0.39
7	4075860	567790	Egirghash	0.82	0.67
8	4084402	566404	Darlak	0.32	0.26
9	4084398	570884	Serah_hajikhosh	0.29	0.19
10	4085629	564340	Serah_ghezelgapi	0.15	0.15
11	4079685	569900	Fakhrighah	0.28	0.55
12	4082072	569686	Gharekhan	0.28	0.20
13	4092896	562336	Gharegheshlagh	0.45	0.23
14	4088748	564259	Ghezelgapi_Gharegheshlagh	0.32	0.36
15	4079890	568007	Ghomghaleh_Koreh	0.27	0.40
16	4087884	560088	Koseh_Kahriz	0.16	0.11
17	4094738	563231	Kohneh_De	0.22	0.17
18	4088419	566322	Gapiss	0.46	0.45
19	4088046	571043	Gabazeleh	0.44	0.53
20	4088716	574129	Gerdgroy	0.53	0.28
21	4081507	571301	Gorgtapeh	0.44	0.33
22	4084408	568908	Lej	0.31	0.46



نواحی جنوبی و غربی تغذیه می‌گردد (شکل ۵). به‌طور متوسط میزان کل زهکشی روزانه آب زیرزمینی به رودخانه‌ها برابر با ۸۲۹۰۰، ۱۰۲۹۰۰ و ۱۱۰۰۰۰ مترمکعب در روز به‌ترتیب در سال‌های خشک، نرمال و تر شبیه‌سازی شده است. همچنین، تغذیه آب زیرزمینی توسط رودخانه‌ها نیز ۱۴۶۵۰، ۲۱۷۵۰- و ۲۶۲۵۰ مترمکعب در روز محاسبه شد.

نتایج نشان می‌دهد فعل و انفعالات و اندرکنش بین منابع آب سطحی و زیرزمینی عمدتاً منجر به زهکشی آب از آبخوان به رودخانه (تغذیه رودخانه) در نواحی مرکزی و شمالی دشت می‌شود. از آنجاکه عمق آب زیرزمینی در قسمت شمالی و مرکزی دشت (دو الی پنج متر) کمتر از قسمت جنوبی و غربی آن (پنج الی نه متر) است؛ بنابراین در این نواحی رودخانه‌ها به‌عنوان زهکش عمل کرده و آب زیرزمینی را تخلیه می‌نمایند؛ اما آبخوان توسط رودخانه‌ها در

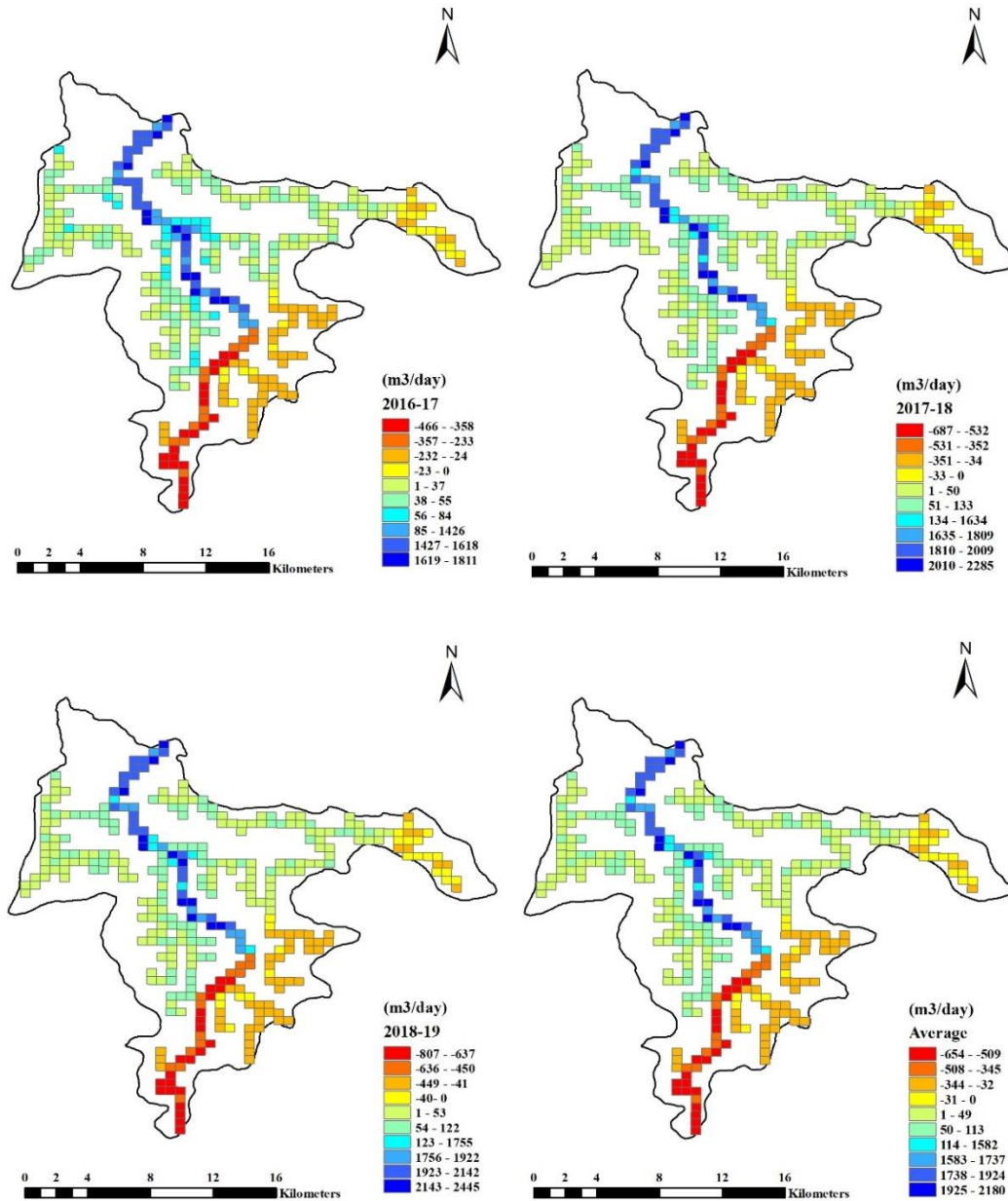


Fig. 5- Recharge and drainage rate between river and aquifer for three water years 2016-17 (dry year), 2017-18 (normal year) and 2018-19 (wet year)

شکل ۵- میزان تغذیه و زهکشی بین رودخانه و آبخوان برای سه سال آبی ۹۶-۱۳۹۵ (سال خشک)، ۹۷-۱۳۹۶ (سال نرمال) و سال ۹۸-۱۳۹۷ (سال تر)

مقایسه با زهکشی بیش از حد آب زیرزمینی توسط رودخانه در نواحی مرکزی و شمالی دشت کم است.

زهکشی آب زیرزمینی به سمت شبکه رودخانه به طور مداوم بدون توجه به افزایش بهره‌برداری از آب زیرزمینی افزایش می‌یابد. به طوری که در طول سال آبی خشک (با میزان بارندگی ۱۸۰ میلی‌متر) میزان زهکشی از آب زیرزمینی به شبکه رودخانه (۳۰/۲۵ میلیون مترمکعب) بود. سپس دو سال پس از آنکه بارش در سال آبی‌تر به اوج خود رسید (۵۰۶ میلی‌متر)، میزان نشت به حداکثر میزان خود (۴۰/۱۵ میلیون مترمکعب) رسیده است. می‌توان خاطر نشان کرد که در شبکه رودخانه محدوده، رودخانه اصلی مهاباد به صورت یک رودخانه دائمی رفتار می‌کند؛ اما رودخانه‌های فرعی (آبراهه‌ها) در طول سال‌ها کم‌وبیش به صورت یک رودخانه فصلی عمل می‌کنند. بررسی توزیع الگوی اندرکنش بین آبخوان و رودخانه در گزارش بیلان آبخوان آبرفتی دشت مهاباد نیز با نتایج فوق مطابقت دارد (Water Consulting Engineers and Sustainable Development, 2014). به طور کلی بررسی‌ها نشان داده است اندرکنش و نشت دوجانبه بین آبخوان و رودخانه به عوامل متعددی همچون میزان بارندگی و تغذیه آب زیرزمینی، وضعیت تراز سطح ایستابی، قابلیت انتقال بستر رودخانه، ضریب ذخیره و قابلیت انتقال آبخوان بستگی دارد. به طوری که علاوه بر سطح آب زیرزمینی، بر مناطق برداشت از آب زیرزمینی نیز تأثیر می‌گذارد (Xu and Beekman, 2003; Le Maitre and Colvin, 2008).

اندرکنش بین آبخوان و رودخانه‌ها تقریباً از الگوی بارندگی سالانه و نوسانات جریان رودخانه و انهار طبیعی تبعیت می‌کند. در سه سال آبی مورد بررسی، مجموع میزان تأمین آب آبیاری از منابع آب سطحی تقریباً یکسان است؛ اما میزان بارندگی در سال آبی‌تر نسبت به سال خشک قابل توجه است. این امر سبب شده است اولاً میزان تغذیه آب زیرزمینی بیشتری در سال‌تر نسبت به سال خشک اتفاق بیافتد به طوری که این مسئله منجر به بالا آمدن تراز سطح ایستابی ۱/۴۷ متری (بر اساس داده‌های میدانی تراز آب زیرزمینی در سطح پیژومترها) در سال‌تر نسبت به افت ۰/۱۴ متری تراز آب زیرزمینی در سال خشک شود. از طرف دیگر میزان جریان رهاسازی به رودخانه از بالادست و رواناب تولیدی در سطح دشت در سال‌تر نسبت به سال خشک افزایش یافته است. در نتیجه افزایش تراز سطح ایستابی و افزایش میزان جریان آب در رودخانه در سال‌تر نسبت به سال خشک منجر به تقویت شیب هیدرولیکی بین آبخوان و رودخانه شده است که در نهایت این امر باعث می‌شود اندرکنش بین آبخوان و رودخانه بین سال‌های آبی مختلف متفاوت باشد. بنابراین به نظر می‌رسد الگوی بهره‌برداری در سال‌های آبی مختلف بایستی متفاوت اتخاذ گردد؛ زیرا نمی‌توان به طور مداوم ظرفیت برداشت از آبخوان را افزایش داد و افت سطح آب زیرزمینی را انتظار نداشت. مگر این که میزان تغذیه آب زیرزمینی در سال‌های آبی‌تر بتواند افت ایجادشده در سال‌های دیگر را جبران کند.

نتایج نشان داد الگوی مکانی و زمانی میزان نشت و زهکشی بین آب‌های زیرزمینی و شبکه رودخانه یکنواخت نبوده و تقریباً الگوی بارندگی سالانه و رهاسازی آب از سد مهاباد به دریاچه را دنبال می‌کند. به طوری که به وضوح تنوع زمانی اندرکنش بین آبخوان و رودخانه‌ها در یک سال آبی مشخص قابل مشاهده بود. به طور مشخص فارغ از نوع سال آبی، میزان تبدلات بین آبخوان و رودخانه‌ها در فصل پاییز نسبت به سایر فصول سال بسیار بیشتر بود. بررسی‌ها نشان داد در این فصل علاوه بر رهاسازی قابل توجه آب در رودخانه مهاباد به سمت دریاچه (حدود ۹۵ درصد از کل رهاسازی)، ۳۵ درصد بارندگی سالیانه نیز در این فصل اتفاق افتاده است. بررسی‌های مشابه برای سال‌های آبی نرمال و تر مشاهده شده است. همچنین، شبیه‌سازی‌ها حکایت از تنوع مکانی اندرکنش بین آب‌های زیرزمینی و سطحی در رودخانه‌های واقع در دشت دارد. به طوری که میزان SD (Standard Deviation) برای سه سال خشک، نرمال و تر به ترتیب برابر با ۵۴۷، ۶۸۴ و ۷۳۶ مترمکعب در روز (به طور متوسط برابر با ۶۵۵ مترمکعب در روز) محاسبه شد که نشت و زهکشی بسیار متغیر آب زیرزمینی را بر اساس شرایط مختلف هیدرولوژیکی نشان می‌دهد.

نتایج شبیه‌سازی حکایت از اختلاف قابل توجه نشت دوجانبه بین آب‌های زیرزمینی و جریانات سطحی به خصوص بین سلول‌های واقع بر رودخانه اصلی مهاباد و سلول‌های واقع بر آبراهه‌های فرعی در هر سه سال آبی دارد (شکل ۵). بررسی‌ها نشان می‌دهد که بیشتر انشعابات موجود در منطقه مدل‌سازی شده آبخوان، رودخانه‌هایی می‌باشند که زهکشی آب از آبخوان به رودخانه (مقادیر مثبت) انتقال می‌یابند دقیقاً جایی که آب‌های زیرزمینی توسط بستر رودخانه اصلی مهاباد و آبراهه‌های واقع در نواحی مرکزی، شرقی و شمالی دشت زهکشی می‌شوند. قسمت‌های مرکزی و شمالی و به ویژه در نزدیکی خروجی اصلی دشت از نظر توپوگرافی تقریباً مسطح و سطح آب زیرزمینی بالا و نزدیک به سطح زمین است. این امر باعث می‌شود رودخانه‌های واقع در این نواحی بیشتر به عنوان زهکش آبخوان عمل کنند. به طوری که میزان زهکشی آب از آبخوان به رودخانه به ترتیب در سال‌های آبی خشک، نرمال و تر به میزان حدود ۳۰/۲۵، ۳۷/۵۰ و ۴۰/۱۵ میلیون مترمکعب در سال در نواحی مرکزی و شمالی دشت به دست آمد. همچنین، در این نواحی میزان هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه نیز بعد از فرآیند واسنجی بسیار بیشتر از سایر نواحی به دست آمد که به نوبه خود منجر به زهکشی بیشتر آب زیرزمینی به رودخانه‌ها و شاخه‌های جریان می‌شود؛ اما در نواحی جنوبی و غربی دشت که سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از سایر مناطق است آب زیرزمینی توسط رودخانه تغذیه می‌شود. میزان نشت از رودخانه به آبخوان در این نواحی در سال‌های آبی خشک، نرمال و تر به ترتیب به میزان حدود ۷/۹۵، ۵/۳۵ و ۹/۶۰ میلیون متر مکعب در سال برآورد شده است. با این حال، مقدار کل تغذیه آب زیرزمینی توسط رودخانه مهاباد و آبراهه‌ها در بخش‌های جنوبی و غربی دشت در

به صورت میانگین تبخیر روزانه در طول سه سال آبی خشک، نرمال و تر در شکل (۶) نشان داده شده است. میزان میانگین سالانه تبخیر از آب زیرزمینی که توسط مدل MODFLOW-NWT شبیه سازی شده برای سال های ۱۳۹۵-۹۶، ۱۳۹۶-۹۷ و ۱۳۹۷-۹۸ به ترتیب برابر با ۱۷ (۴/۶۸)، ۲۳ (۵/۷۴) و ۲۵/۵ (۶/۳۶) میلی متر در سال برآورد شده است.

### نوسانات تبخیر از سطح آب زیرزمینی

عمق سطح آب زیرزمینی عامل اصلی تبخیر از آب زیرزمینی است و هر چه سطح آب زیرزمینی به سطح زمین نزدیک تر باشد، تبخیر از آن بیشتر است. در این مطالعه از بسته ETS در مدل MODFLOW-NWT برای برآورد تبخیر از سطح آب زیرزمینی استفاده شد. الگوی توزیع مکانی میزان تبخیر از آب زیرزمینی

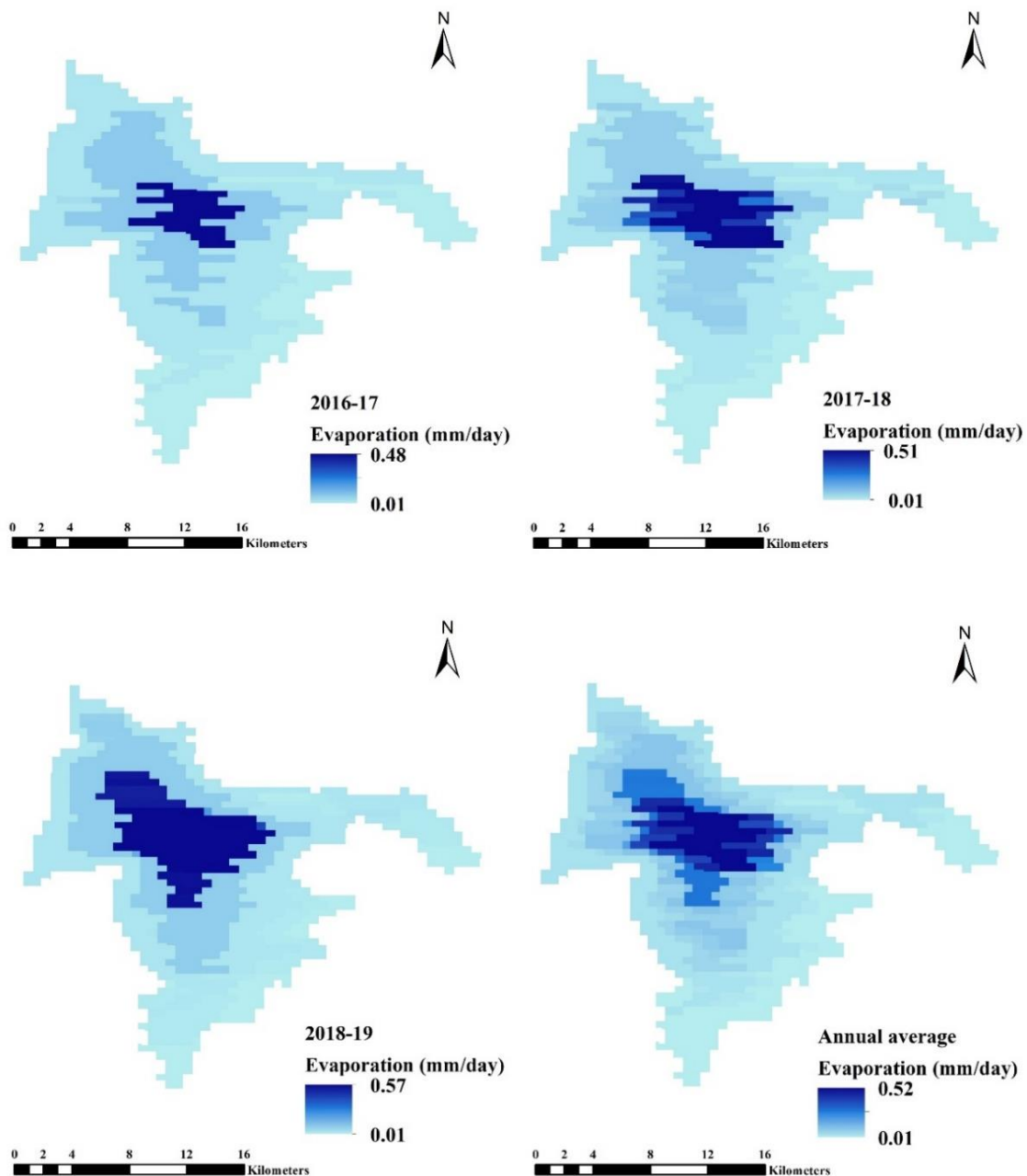


Fig. 6- Evaporation rate from groundwater for the three hydrological years 2016-17 (dry year), 2017-18 (normal year) and, 2018-19 (wet year)

شکل ۶- میزان تبخیر از سطح آب زیرزمینی برای سه سال آبی ۱۳۹۵-۹۶ (سال خشک)، ۱۳۹۶-۹۷ (سال نرمال) و سال ۹۸-۹۷ (سال تر)

بارندگی‌های بهاره، الگوی رهاسازی آب از سد به سمت دریاچه (در ماه‌های اسفند تا اردیبهشت) و نیز نفوذ عمقی ناشی از آب آبیاری افزایش می‌یابد. این عوامل سبب شده است میزان تبخیر از سطح آب زیرزمینی در این فصل بیشتر از سایر فصل‌های سال باشد. لازم به ذکر است نتایج مدل بر اساس مقدار تبخیر از آب زیرزمینی تخمین زده شده توسط شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی بررسی شد. نتایج نشان داد مقادیر تبخیر از آب زیرزمینی برآورد شده توسط مدل منطقی و قابل قبول است. الگوهای زمانی و مکانی ذکر شده در هر سه سال آبی خشک، نرمال و تر مشاهده می‌شود. نتایج سایر محققین نیز نشان داده است در آبخوان‌های کم‌عمق، میزان تبخیر از سطح آب زیرزمینی نه تنها به الگوی عمق آب زیرزمینی در طول سال و در مناطق مختلف بستگی دارد بلکه میزان آن در فصول آبیاری افزایش می‌یابد (Wei and Baiely, 2019).

### نتیجه‌گیری

محدودیت‌های موجود در تأمین آب موردنیاز از منابع آب سطحی، منجر به توسعه راهبردهای مدیریتی توأمان بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی شده است. در این راستا بررسی تبادل‌های منابع آب سطحی و زیرزمینی در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف و اثربخشی الگوهای متفاوت بهره‌برداری از منابع تلفیقی در مدیریت پایدار منابع سطحی و زیرزمینی اهمیت دارد. یکی از مزیت‌های مهم مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW-NWT امکان بررسی مؤلفه‌های بیلان از جمله تبادل‌های بین رودخانه‌ها و آب زیرزمینی تحت تأثیر شیب هیدرولیکی است. در این مطالعه بررسی خطای مدل در گام زمانی شبیه‌سازی (ماهانه) نشان داد میزان خطا در شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در برخی ماه‌ها مانند مهر، فروردین، اردیبهشت، خرداد و شهریور افزایش یافته است. دلیل این امر را می‌توان به افزایش ناگهانی سطح آب در برخی از پیرومترهای واقع در حاشیه رودخانه مه‌آباد در اثر ورود سیلاب بالادست و در نتیجه رهاسازی موضعی حجم قابل توجه آب در رودخانه نسبت داد. به طوری که این امر منجر به نوسانات تراز آب زیرزمینی در این پیرومترها در اثر نشت آب از رودخانه به آبخوان می‌شود. همچنین، افزایش برداشت از آب زیرزمینی و بالتبع افت موضعی سطح آب زیرزمینی در برخی پیرومترهای دیگر اتفاق افتاده است که توسط آن‌ها رصد شده است. بنابراین، رهاسازی حجم قابل توجه آب در یک بازه زمانی کوتاه در رودخانه و یا افزایش برداشت به صورت موضعی در یک ناحیه مشخص منجر به تغییرات ناگهانی سطح آب زیرزمینی در برخی مناطق مدل‌سازی می‌شود. این مسئله باعث می‌شود خطای شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در پیرومترهای واقع در این مناطق نسبت به نواحی دیگر افزایش یابد. نوسانات شدید سطح آب زیرزمینی بر اساس هیدروگراف‌های این پیرومترها مؤید این مسئله بود. علاوه بر این، با توجه به تناوب قرائت پیرومترها،

اعداد داخل پراتنز به میلیون مترمکعب است. به طور متوسط در دوره معینی از سه سال آبی موردنظر میزان تبخیر روزانه از آب زیرزمینی از ۰/۰۱ تا ۰/۵۱ میلی‌متر در روز متغیر است. بررسی الگوی توزیع تبخیر از سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد گستره تبخیر از آب زیرزمینی در نواحی مرکزی و شمالی دشت و امتداد رودخانه اصلی مه‌آباد متمرکز است. به طوری که پهنه و میزان آن در سال‌تر نسبت به سال نرمال و نیز سال نرمال نسبت به سال خشک بیشتر است. هرچقدر از نواحی مرکزی دشت به سمت غرب و جنوب دشت پیش می‌رویم میزان تبخیر از سطح آب زیرزمینی کاسته می‌شود. این الگو تا حدود زیادی با وضعیت تراز و عمق سطح آب زیرزمینی نیز مطابقت دارد. به طوری که از ۲۵۳ کیلومترمربع ناحیه مدل‌سازی، وسعت نواحی تبخیر از آب زیرزمینی حدود ۱۲۲ کیلومترمربع است که حدود ۳۰ و ۹۲ کیلومترمربع آن به ترتیب دارای عمق آب زیرزمینی بین یک تا دو متر و دو تا سه متر عمدتاً واقع در نواحی مرکزی و شمالی دشت بوده و مابقی آبخوان دارای عمق سطح آب زیرزمینی بیش از سه متر عمدتاً در نواحی غربی و جنوبی دشت است. بررسی‌ها نشان داد زیاد بودن میزان تبخیر از سطح آب زیرزمینی در مناطق مرکزی و شمالی نسبت به مناطق غربی و جنوبی با بالا بودن سطح آب زیرزمینی در این مناطق نسبت به سایر مناطق دشت ارتباط زیادی دارد. همچنین، در بخش‌هایی از آبخوان به خصوص جنوب و جنوب غربی آبخوان به دلیل استفاده بیش‌ازحد از آب زیرزمینی، عمق آب نسبت به سایر مناطق دشت پایین افتاده است. در نتیجه تبخیر از سطح آب زیرزمینی نیز کاهش می‌یابد. تبخیر از آب زیرزمینی به عنوان تلفات غیرمولد یا غیرمفید محسوب می‌شود و منبع آب با پتانسیل مناسب برای مصرف محسوب می‌شود. لذا امکان‌سنجی کاهش این نوع از تلفات از طریق برداشت بیشتر از آب زیرزمینی در مناطق با پتانسیل تبخیر بالا برای تأمین مصارف کشاورزی قابل بررسی است. در این راستا میزان رهاسازی به دریاچه در جهت تأمین حقا به آن تقویت می‌شود. با توجه به الگوی آبیاری در منطقه، می‌توان فصل‌های بهار و تابستان را فصل آبیاری تلقی کرد. بررسی الگوی زمانی تبخیر از سطح آب زیرزمینی نیز نشان داد مقدار متوسط تبخیر از آب زیرزمینی در طول دوره شبیه‌سازی تقریباً ثابت بوده و این میزان در فصل آبیاری نسبت به فصل غیر آبیاری بیشتر است. به طوری که در اکثر مناطق میزان تبخیر از سطح آب زیرزمینی در فصل زمستان به حداقل مقدار خود (صفر) و در فصل بهار به حداکثر مقدار خود (بیش از یک میلی‌متر در روز) رسیده و سپس در فصل‌های تابستان و پاییز کاهش می‌یابد. گرچه در فصل زمستان سطح آب زیرزمینی با توجه به عدم برداشت از آب زیرزمینی بالا می‌آید؛ اما با توجه به این که پتانسیل تبخیر در این فصل بسیار پایین است، لذا میزان تبخیر از سطح آب زیرزمینی نیز حداقل خواهد بود. البته بررسی نوسانات فصلی تراز و عمق آب زیرزمینی آبخوان بر اساس هیدروگراف واحد آبخوان و تراز آب ماهانه اندازه‌گیری شده در چاه‌های مشاهده‌ای نشان می‌دهد سطح آب زیرزمینی در فصل بهار به دلیل

نسبت به سال خشک بیشتر است. بررسی‌ها نشان داد این الگو با سطح آب زیرزمینی بالا در این نواحی ارتباط نزدیکی دارد. به‌طور کلی حوضه آبریز دریاچه ارومیه به‌شدت تحت تأثیر بهره‌برداری غیرمتعارف از منابع آب قرار گرفته و مدل‌های جامع برای ارزیابی و مدیریت همه‌جانبه و یکپارچه منابع آب سطحی و زیرزمینی 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 امر مستلزم این است که اندرکنش منابع آب سطحی و زیرزمینی در پهنه‌های مختلف دشت و آبخوان متناسب با تفاوت‌های سهم تأمین آب کشاورزی از منابع آب تلفیقی به‌خوبی قابل شبیه‌سازی و پیش‌بینی باشد. بررسی نشان داد امکان مدیریت و ظرفیت برداشت بیشتر از آبخوان تحت الگوهای مختلف در مناطق مرکزی و شمالی آبخوان البته در خارج از دامنه حریم رودخانه به دلیل سطح آب زیرزمینی بالا (۱/۵ تا سه متر) وجود دارد. در واقع این امر منجر به کاهش سهم تبخیر بعنوان مصرف غیرمفید می‌شود. همچنین، با نگهداری سطح آب زیرزمینی در عمق معین (در شرایط پایدار)، کیفیت خاک بهبود یافته و در نتیجه عملیات کشت و کار ماشین آلات بهتر صورت می‌گیرد؛ اما محدودیت برداشت بیشتر از آبخوان در مناطق حریم رودخانه با توجه به امکان ایجاد شیب هیدرولیکی معکوس بین منابع آب سطحی و زیرزمینی و در نتیجه اثر منفی نشست از رودخانه به آبخوان وجود دارد. در واقع اتخاذ الگوی بهره‌برداری مناسب از منابع آب تلفیقی در سال‌های آبی مختلف در پهنه آبخوان باید به‌گونه‌ای باشد که علاوه بر تضمین پایداری آب زیرزمینی در دراز مدت، جریان آب سطحی خروجی از دشت و ورودی به دریاچه را تقویت کند.

### تشکر و قدردانی

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

امکان برآورد دقیق تغییرات آب ورودی و خروجی و پایش نوسانات سطح آب زیرزمینی در مناطق مرزی وجود ندارد. به همین دلیل میزان خطا در پیژومترهای نزدیک به مرزهای ورودی و خروجی آبخوان نیز افزایش یافته است.

مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW-NWT به‌خوبی قادر بود اندرکنش بین آبخوان و رودخانه در سال‌های آبی متفاوت را شبیه‌سازی کند. در این مطالعه، رودخانه‌های فرعی متصل به رودخانه اصلی مه‌باد که عمدتاً به‌صورت فصلی جریان دارند در مدل‌سازی در نظر گرفته شدند. در نظر گرفتن رودخانه‌های فرعی در فرایند مدل‌سازی منجر به اعمال تأثیر این آبراهه‌ها در نواحی مختلف دشت بر نوسانات سطح آب زیرزمینی می‌شود. نتایج نشان داد اندرکنش بین آبخوان و رودخانه قابل توجه بوده و در سال‌های آبی مختلف متفاوت است. به‌طوری که فعل و انفعالات و اندرکنش بین منابع آب سطحی و زیرزمینی عمدتاً منجر به زهکشی آب از آبخوان به رودخانه به‌ترتیب در سال‌های آبی خشک، نرمال و تر به میزان حدود ۳۰/۲۵، ۳۷/۵۰ و ۴۰/۱۵ میلیون مترمکعب در سال در نواحی مرکزی و شمالی دشت می‌شود. قسمت‌های مرکزی و شمالی و خروجی اصلی دشت از نظر توپوگرافی تقریباً مسطح و سطح آب زیرزمینی در این مناطق بالا است. این امر باعث می‌شود رودخانه‌های واقع در این نواحی بیشتر به‌عنوان زهکش آبخوان عمل کنند؛ اما در نواحی جنوبی و غربی دشت که سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از سایر مناطق است آب زیرزمینی توسط رودخانه تغذیه می‌شود. به‌طوری که میزان تغذیه آبخوان توسط رودخانه در این نواحی در سال‌های آبی خشک، نرمال و تر به‌ترتیب به میزان حدود ۵/۳۵، ۷/۹۵ و ۹/۶۰ میلیون متر مکعب در سال به دست آمد. همچنین بررسی الگوی توزیع تبخیر از سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد بیش‌ترین تبخیر از آب زیرزمینی از نواحی مرکزی و شمالی دشت و امتداد رودخانه اصلی مه‌باد صورت می‌گیرد. به‌طوری که پهنه و میزان آن در سال‌تر نسبت به سال نرمال و نیز سال نرمال

### References

- 1- 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. *Groundw. Sustainable Development*, 7, pp. 1-7.
- 2- 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, pp. 200-210.
- 3- 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, pp. 4420-4433.
- 4- 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. *Groundwater*, 50(2), pp.187-198.

- 5- 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, pp. 17–21.
- 6- Chitsazan, M. and Kashkuli, H.A., 2002. Groundwater Modeling and Solving Hydrogeological Problems. Translation, *Shahid Chamran University Press*, Ahvaz. (In Persian).
- 7- 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, pp. 23-36. (In Persian).
- 8- 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.
- 9- 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), pp. 110.
- 10- Davis, S.N. and De Wiest, R.J.M., 1996. Hydrogeology. New York, Wiley.
- 11- Doherty, J., 2003. Ground water model calibration using Pilot points and Regularization. *Groundwater*, 41(2), pp. 170–177.
- 12- Doherty, J., Brebber, L. and Whyte, P., 1994. PEST: Model-independent parameter estimation. Watermark Computing, Corinda, Australia, 122, pp.336.
- 13- 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), pp.485-496.
- 14- 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*, Iran. pp. 175. (In Persian).
- 15- Harbaugh, A.W., 2005. *MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process* (Vol. 6). Reston, VA, USA: US Department of the Interior, US Geological Survey.
- 16- Heydari, J., Chitsazan, M. and Mirzaei, S.Y., 2019. Modeling the Hydrogeological Relationship of Sahneh-Bistoon Plain Aquifer with Gamasiab River and Aquifer Management. *Hydrogeology*, 4(1), pp. 140-152.
- 17- 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), pp. 435-447.
- 18- 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), pp. 1587-1601.
- 19- 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), pp. 1-16.
- 20- 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), pp. 129-138. (In Persian).

- 21- Le Maitre, D.C. and Colvin, C.A., 2008. Assessment of the contribution of groundwater discharges to rivers using monthly flow statistics and flow seasonality. *Water SA*, 34 (5), 549–564.
- 22- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., 1988. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. Techniques of Water Resources Investigations, Book 6. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.
- 23- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., 2003. The history of MODFLOW. *Ground water*, 41(2), 280.
- 24- 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*, 48(2), pp. 59-70. (In Persian).
- 25- Molina-Navarro, E., Bailey, R.T., Andersen, H.E., Thodsen, H., Nielsen, A., Park, S., Jensen, J.S., Jensen, J.B. and Trolle, D., 2019. Comparison of abstraction scenarios simulated by SWAT and SWAT-MODFLOW. *Hydrological sciences journal*, 64(4), pp.434-454.
- 26- Moor, C. and Doherty, J., 2006. The cost of uniqueness in groundwater model calibration. *Advances in Water Resources*, 29, pp. 605–623.
- 27- 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.
- 28- Movahedian, A. and Chitsazan, M., 2016. Analysis of interactions of groundwater and Karun river in Gotvand-Aghili plain using MODFLOW model. *Watershed Management Research*, 111, pp.9-18. (In Persian)
- 29- Nassery, 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), pp. 58-68. (In Persian)
- 30- Nayyeri, H., 2015. Morphological analysis of Mahabad river channeled the impact of Dam construction, *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 15(37), pp. 155-178. (In Persian).
- 31- Niswonger, R.G., Panday, S. and Ibaraki, M., 2011. MODFLOW-NWT, A Newton formulation for MODFLOW-2005: *USGS Survey Techniques and Methods* 6–A37.
- 32- Nozarpour, L., Chitsazan, M., Nadri, A. and Farhadimanesh, M., 2015. Evaluation of the Lour-Andimeshk aquifer and the Dez-River interaction: using MODFLOW. *Advanced Applied Geology*, 5(3), pp. 23-36. (In Persian)
- 33- Palma, H.C. and Bentley, L.R., 2007. A regional-scale groundwater flow model for the Leon-Chinandega aquifer, Nicaragua. *Hydrogeology Journal*, 15, pp. 1457–1472.
- 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.
- 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).
- 36- Raja, O., Parsinejad, M., and Tajrishi, 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), pp. 32-52. (In Persian).

- 37- 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), pp. 521-536. (In Persian)
- 38- 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).
- 39- Sarvari, S., Ziaei, A.N. and Joodavi, A., 2019. Investigation of river-aquifer interactions in Bojnourd plain using reach measurements and numerical modeling. *Journal of Water and Soil*, 33(5), 671-683. (In Persian)
- 40- 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), pp. 3335-3370.
- 41- 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), pp. 201.
- 42- 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), pp. 185-201.
- 43- Sophocleous, M.A., 2005. Groundwater recharge and sustainability in the high plains aquifer in Kansas, USA. *Hydrogeology Journal*, 13(2), pp. 351-365
- 44- Sun, H., and Cornish, P.S., 2005. Estimating shallow groundwater recharge in the headwaters of the Liverpool plains using SWAT. *Hydrological Processes*, 19(3), pp. 795-807.
- 45- 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), pp. 631-640. (In Persian).
- 46- 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*, pp. 81. (In Persian).
- 47- Wei, X. and Bailey, R.T., 2019. Assessment of system responses in intensively irrigated stream-aquifer systems using SWAT-MODFLOW. *Water*, 11(8), pp. 1576.
- 48- 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, pp. 1-10.
- 49- Wheeler, 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. Wheeler, Simon A. Mathias and Xin Li. Published by Cambridge University Press, pp. 5-37.
- 50- Xu, Y. and Beekman, H.E., 2003. Groundwater recharge estimation in southern Africa. *UNESCO IHP UNESCO Paris*, 92-9220-000-3.