

EXTENDED ABSTRACT

A Survey of Water Resources Sustainability in Zayandehrood Basin Using Sustainability Indices and GMS Model (Case Study: Najaf Abad Aquifer in Zayandehrood Basin)

A. Makvandi^{1*}, H. Mohamadi², P. Kardavani², S. Javadi³ and M. Farajzade Asl⁴

- 1- PhD Candidate of Water and Meteorology, Department of Physical Geography, Faculty of Humanities, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
- 2* - Corresponding Author, Professor of Water and Meteorology, Department of Physical Geography, Faculty of Humanities, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. (*hmmohammadi@ut.ac.ir*).
- 3- Assistant Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Abouraihan, University of Tehran, Iran.
- 4- Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Received: 11 March 2019

Revised: 29 June 2019

Accepted: 3 July 2019

Keywords: Groundwater modeling, water stress, inventory of resources and demands, MODFLOW, aquifer balance.

DOI: 10.22055/jise.2019.28652.1833.

Introduction

Over the past years, population growth, the development of industry and agriculture have led to an increase in surface water and groundwater resources. Excessive withdrawal and severe drop in water levels as well as land degradation in some parts of the country have been to the extent that the resources are at risk, the situation is critical and this has made sustainable use efforts a must. For this reason, a comprehensive management plan is needed to improve feedback and to make accurate management decisions to maintain the balance and sustainability of water resources. Adopting sound management decisions requires proper, accurate, and scientific knowledge of the conditions of the water resources of the region. In discussing the management of groundwater resources and maintaining the balance and stability of aquifers, understanding the performance of the table in normal conditions, as well as simulating the effects of drainage or nutrition is necessary. Over the past years, many indicators have been developed for a quantitative assessment of water resource vulnerability. Therefore, selecting a criterion to demonstrate the correctness of the water situation can bring policy decisions closer to scientific decisions (Kang and Lee, 2011). The WSI index was successfully used to assess the sustainability of water resources in the Geum Basin in South Korea (Rachmad et al 2014). In the assessment of the sustainability of the area in the Batang Merao region of Indonesia in 2006-2011, four indexes of hydrology, environment, life and politics were measured. The purpose of this study was to provide an integrated watershed management framework and to help sustain the area. This study was conducted to investigate the stability of groundwater and surface water of Najaf Abad area. In order to control the crisis and sustainable management of the aquifer in the studied area, review Najaf Abad aquifer management and control solutions and prevent further crises resulting from unwanted harvesting, an analysis of water resources sustainability indexes has been done. Also, to investigate the sustainability of water resources in this area, three indicators of water consumption to renewable water (C / RW), available water (WAI) and water

stress (WSI) have been used. The results of indicators showed the inconstancy of water resources in the region. In the next step, aquifer modeling was done using the MODFLOW code in Gms software. The purpose of this model was to validate the findings of sustainability indicators. The results of modelling and survey sustainability were matched by indexes.

Methodology

It is essential to maintain aquifers at a high pressure level. In this research, with the aim of investigating the stability of Najaf Abad water resources, three indicators of water consumption to renewable water (C / RW), available water (WAI) and water stress (WSI) have been used. The ratio of water (C) to renewable water (RW) is as an indicator for assessing the sustainability of water resources (C / RW). The available water index compares surface and underground water resources and the total water demand for domestic, industrial and agricultural uses. Jingwei and Zhifeng (2017) showed that WSI, also called the Water Crisis Index, is derived from dividing the amount of water into the water inventory. In the next step, using the determination of the changes in the reservoir volume, the accuracy of the calculations of the plain was investigated and the MODFLOW model was implemented in GMS software with the purpose of verifying the results of the sustainability indexes. MODFLOW code is a three-dimensional finite difference groundwater flow model that simulates groundwater flow in this model using finite difference method. For this purpose, basic statistics and information about the status of the aquifer, including weather information (rainfall, temperature, relative humidity, evaporation and climate of the region), hydrologic information (discharge), and information and geological characteristics were obtained. After data preparation, modelling using MODFLOW's mathematical model in four steps (conceptual modelling, design and construction of the model including gridding, boundary conditions determination, initial conditions, aquifer hydraulic parameters and hydrologic stresses, calibration and verification) was done. The model for the steady state in September 2011-2012 and in the transient state during the period of 2011-2015, at 48 time steps was calibrated. Also, for the verification of indicators, the groundwater model was implemented for a year later and in 60 time steps.

Results and discussion

The results of the survey of indicators in the region are shown in Table 1. According to Table 1, the results of all indexes indicate that the water resources of the study area are in an unfavorable situation. Additionally, the results of the modelling showed that the variation in the volume of reservoir in the plain is negative and the fraction of the reservoir is -178 MCM. The descent of the hydrograph in two steps of 48 and 60 months, showed a decrease in water level and water crisis, hence indicating the coherence of the results of modeling and sustainability indexes. The results also specify that current development in the Najaf Abad area has caused an imbalance of water resources in this area, which will result in the aquifer's instability in the future. On the other hand, due to the existence of both surface and underground water sources in this area, the need for integrated planning and management in exploiting this area as an unavoidable issue is emphasized more than before.

Table 1- Results of Stability Indicators

Parameter	value
C/RW	0.8
WAI	-0.3
WSI	1.27

Conclusion

The results indicate that current development in the Najaf Abad area has caused an imbalance of water resources in this area, which will result in the aquifer's instability in the future. On the other hand, due to the existence of both surface and underground water sources in this area, the need for

integrated planning and management in exploiting this area as an unavoidable issue is emphasized more than before.

Acknowledgement

This paper is derived from the thesis of the doctoral and meteorological doctoral period defended at the Tehran University of Sciences and Research. It is necessary for me to express my sincere thanks to the guidance professors, the counselor and the jury of the thesis that helped me to improve the quality of this research.

References

- 1- Jingwei, L. and Zhifeng, L., 2017. A comprehensive index for stream depletion in coupled human-water. *Journal of Hydro-environment Research Systems Science of the Total Environment*, 16, pp.58-70.
- 2- Kang, M. and Lee, G., 2011. Multicriteria evaluation of water resources sustainability in the context of watershed management. *Journal of the american water resources association*. 47(4), PP. 813-827.
- 3- Rachmad, F., Nobukazu, N. and Aswandi, I. 2014. Sustainability assessment of humid tropical watershed: A case study of Batang Merao watershed, Indonesia, *Procedia Environmental Sciences*, 20, pp. 722-731.



© 2020 by the authors. Licensee SCU, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

بررسی پایداری منابع آب در حوضه زاینده‌رود با استفاده از شاخص‌های پایداری و مدل GMS

(مطالعه موردی: آب‌خوان نجف‌آباد در حوضه زاینده‌رود)

اشرف مکوندی^۱، حسین محمدی^{۲*}، پرویز کردوانی^۳، سامان جوادی^۴ و منوچهر فرج زاده اصل^۵

۱- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران دانشگاه آزاد اسلامی.

۲- نویسنده مسئول، استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی. hmmohammadi@ut.ac.ir

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

۴- دانشیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

۵- استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۱۲

بازنگری: ۱۳۹۸/۴/۸

دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۰

چکیده

امروزه استفاده بی‌رویه از منابع آب سطحی و زیرزمینی این منابع را در معرض خطر قرار داده و از این رو وجود یک برنامه جامع مدیریتی در جهت بهبود بازخوردها و حفظ تعادل و پایداری منابع آب ضروری است. در این مطالعه برای بررسی پایداری منابع آب در این منطقه از سه شاخص نسبت آب مصرفی به آب تجدیدپذیر (C/RW)، آب در دسترس (WAI) و تنش آبی (WSI) استفاده شده است. نتایج سه شاخص نشان‌دهنده عدم تعادل در عرضه و تقاضا بوده و در نهایت گویای تنش آبی شدید در محدوده مذکور می‌باشد. بر این اساس مقدار شاخص نسبت آب مصرفی به آب تجدیدپذیر (C/RW) $+0/8$ ، آب در دسترس (WAI) $-0/3$ و شاخص تنش آبی (WSI) محدوده نجف‌آباد $1/27$ برآورد گردید. در گام بعدی با استفاده از تعیین تغییرات حجم ذخیره، صحت محاسبات بیان دشت بررسی و با تهیه اطلاعات اولیه، مدل عددی مادفلو در نرم افزار GMS با هدف صحت‌سنجی نتایج شاخص‌های پایداری اجرا شد. مدل تهیه‌شده در حالت ماندگار و در دوره زمانی $93-1389$ برای حالت غیر ماندگار واسنجی و صحت‌سنجی گردید. نتایج مدل‌سازی نیز نشان داد که بیان درازمدت دشت منفی و کسری مخزن به میزان 178 میلیون مترمکعب در طی سال‌های $93-1389$ است، که نشان‌دهنده هم سو بودن نتایج مدل‌سازی و شاخص‌های پایداری می‌باشد. همچنین این نتایج نشان می‌دهد، توسعه فعلی در محدوده نجف‌آباد باعث بروز عدم تعادل منابع آب در این محدوده شده که به تبع آن ناپایداری آبخوان در شرایط آبی را به دنبال خواهد داشت.

کلید واژه‌ها: مدل‌سازی آب زیرزمینی، تنش آبی، بیان منابع و مصارف، Modflow، تعادل بخشی آبخوان.

مقدمه

در سال‌های اخیر نه تنها برداشت از منابع آب زیرزمینی کاسته نشده بلکه به‌صورت روزافزون نیاز به منابع آب تجدیدشونده و به تبع آن برداشت از این منابع نیز افزایش یافته است. اگرچه مقدار آب تجدیدشونده در هر حوضه آبریز، معین و ثابت است لیکن توزیع زمانی و مکانی مقدار آب تجدیدشونده کاملاً متغیر بوده و متناسب با توزیع جمعیت و نیازهای آبی جوامع بشری نمی‌باشد. این در حالی است که برداشت و مصرف از این منابع محدود و تقریباً ثابت به علت رشد جمعیت، پیوسته در حال افزایش می‌باشد (Birkenesse, 2012). کمبود آب شیرین نسبت به تقاضا کمبود آب فیزیکی نامیده شده است و نشان می‌دهد که علت کمبود آب، روند نامطلوب عرضه، تقاضای آب یا منشا مختلفی مانند تغییر و تنوع آب و هوا، استخراج آب زیرزمینی، ساخت‌وساز و افزایش جمعیت می‌باشد. نتایج همه تحلیل‌های مربوط به کم‌آبی آب در جهان نشان می‌دهد که بخش وسیعی از جمعیت جهان تحت تأثیر کم‌آبی در چند دهه آینده قرار خواهند

گرفت (Rijsberman, 2006). شناسایی عوامل تأثیرگذار در فرایندهای هیدرولوژیکی نقش مهمی را در مدیریت منابع آب ایفا می‌کند. در پژوهشی با به‌کارگیری تبدیل موجک متقابل و ارتباط بین سری‌های زمانی بارش، دما و دبی خروجی میزان تأثیر تغییرات هر یک از این پارامترها بر روی نوسانات تراز آب زیرزمینی دشت سیلاخور اولویت‌بندی گردید. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش بیان‌گر آن است که سری زمانی دبی که نماینده تأثیرات انسانی است (با میانگین ضریب ارتباط موجکی $0/83$) از سری‌های زمانی بارش و دما که نماینده تغییرات اقلیم هستند (با میانگین ضریب ارتباط موجکی به ترتیب $0/52$ و $0/58$) تأثیر بیشتری را بر کاهش تراز سطح آب‌خوان دشت سیلاخور دارد. بنابراین عوامل انسانی از عوامل اقلیمی در کاهش تراز آب زیرزمینی این دشت تأثیرگذارتر است (Komasi and Sharghi, 2017).

هرچه به سال‌ها و دهه‌های اخیر نزدیک می‌شویم، مقدار سرانه مصرف آب به شدت افزایش یافته است. دلیل این امر

فاکتورهای دخیل در بهبود منابع آب، مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاخص، همچنین می‌تواند برای حمایت از تصمیم‌گیرندگان، اولویت‌بندی موضوعات و برنامه‌های مربوط به بهبود منابع آب مورد استفاده قرار گیرد. در مجموع این فاکتورها برای ارتباط شرایط موجود منابع آب برای جوامع بزرگتر مفید است. Chaves Hafezparast and Fatemi, ; and Alipaz, (2007) (2017). در تحقیقی که در حوضه آبریز گاماسیاب صورت گرفته است، به محاسبه شاخص پایداری آب و پایداری حوضه در راستای حفظ توسعه پایدار براساس شاخص‌های پایداری منابع آب و حوضه آبریز به صورت ترکیبی با استفاده از خروجی مدل شبیه سازی WEAP در محیط اکسل پرداخته شده است که در شاخص‌های پایداری منابع آب، مقادیر و میزان دسترسی منابع آب سطحی و زیرزمینی بررسی گردید. در همین راستا حوضه آبریز گاماسیاب توسط دو سناریو یکی شامل تنها سد جامیشان و دیگری سدهای جامیشان، قشلاق و آناهیتا، راه‌کارهای مدیریتی برای حفظ و پایداری در آن شبیه‌سازی شد و شاخص‌های پایداری آن محاسبه گردید که در نهایت بهترین راه‌کار اجرایی در این حوضه با تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) و روش برنامه ریزی سازشی در دو سناریو محاسبه شد. در سناریو تنها سد جامیشان بهترین راهکار سازه‌ای برای بهتر شدن وضعیت پایداری حوضه، تلفیق کاهش تلفات و افزایش راندمان و در سناریو هر سه سد، بهترین راهکار کاهش تلفات معرفی گردید در تحقیقی برای نخستین بار، پایداری سیستم آب زیرزمینی را با استفاده از ترکیب سه شاخص اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و مطلوبیت و با در نظر گرفتن اثر سناریوی تغذیه‌ی مصنوعی ارزیابی نمودند. به این منظور با استفاده از مدل MODFLOW و شبیه‌سازی و پیش‌بینی نه ساله، اثر تغذیه‌ی مصنوعی شورآب سیوجان بر وضعیت آب خوان بیرجند تا افق ۱۴۰۴ در شرایط نرمال اقلیمی در سه سناریوی برداشت آب انجام گرفت. بررسی شاخص‌ها در منطقه تحت تأثیر تغذیه‌ی مصنوعی در آبخوان نشان داد اجرای طرح تغذیه‌ی مصنوعی توانسته بین ۲۱ تا ۲۵ درصد با توجه به سناریوی کاهش، ثابت بودن برداشت و افزایش برداشت، مقدار شاخص پایداری سیستم را بهبود دهد. (Kardan et al. 2017). بنابراین کاهش شدید منابع آب ناشی از بهره‌برداری‌های غیر مجاز و بی‌رویه از یک سو و رشد شدید تقاضا در بخش‌های مختلف مصرف از سوی دیگر، باعث تنش آبی شدید و عدم تعادل بخشی مصرف‌کنندگان گردیده است. لذا به منظور حفظ و بقای آبخوان‌ها ارزیابی پایداری آن‌ها براساس شاخص‌های پایداری منابع آب در برابر وقایع و رخدادهای آینده، امری ضروری تلقی می‌گردد. در این تحقیق با استفاده از سه شاخص کمی نسبت آب مصرفی به آب تجدیدپذیر، شاخص آب در دسترس و شاخص تنش آبی که مبتنی بر میزان آب تجدیدپذیر است، میزان آب قابل دسترس سالانه و مجموع مصارف و تقاضاها در کل محدوده مطالعاتی نجف‌آباد محاسبه شده و آسیب‌پذیری منابع آب این

افزایش سطح رفاه و به تبع آن تنوع نیازهای آبی می‌باشد (Samani et al., 2003). Nowzar pour et al (2014) به منظور مدیریت آبخوان دشت لور و ارزیابی پروژه پخش سیلاب جارم واقع در شمال اندیمشک، شبیه‌سازی آبخوان دشت لور با استفاده از کد MODFLOW در نرم‌افزار GMS را انجام داد. پس از واسنجی، صحت‌سنجی و اطمینان از توانایی مدل در شبیه‌سازی شرایط واقعی آبخوان، از آن به عنوان ابزار مدیریتی استفاده شد. نتایج برای سناریوهای مختلف مدیریتی نظیر ارتباط آبخوان دشت لور و رودخانه دز، پیش‌بینی وضعیت آبخوان در شرایط خشک‌سالی و ترسالی، افزایش ۱۰ درصد دبی پمپاژ، کاهش ۲۵ درصد دبی پمپاژ و ارزیابی تغذیه مصنوعی جارم، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج مدل آب‌های زیرزمینی دشت لور نشان داد که تغذیه مصنوعی علاوه بر افزایش تراز سطح ایستابی، توانسته است بیلان منفی را کاهش دهد و از این طریق به بهبود بیلان آبخوان کمک نماید.

همچنین در راستای مدیریت منابع آب به منظور حفظ پایداری، تعادل و بقای آبخوان‌ها مطالعاتی در سطح دنیا برای حل چالش‌ها با استفاده از شاخص‌های پایداری منابع آب و همچنین بررسی وضعیت مناطق مختلف صورت گرفته است. (Jingwei Li and Zhifeng, 2017) کاربرد شاخص تنش آبی WSI را جهت افزایش نگرانی‌های قانونی در رابطه با تأثیر کمبود آب بر توسعه پایدار اراضی دیم نواحی شمالی کشور چین بررسی کردند. در این تحقیق این شاخص برای سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۱۴ محاسبه و سپس تفاوت این شاخص برای سال‌های فوق الذکر با دیدگاه دینامیک مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت دینامیک تنش آبی در سه سطح حوضه آبریز، نقاط شهری و کل محدوده مورد مطالعه، بررسی گردید. نتایج نشان داد نواحی که دارای مقادیر تنش آبی بیشتری هستند باید در اولویت اقدامات موثر قرار گیرند.

Lee and Kang (2011) شاخص WSI را با موفقیت برای ارزیابی پایداری منابع آب در حوضه Geum در کره جنوبی به کار بردند. Rachmad et al. (2014) در ارزیابی پایداری حوضه در منطقه مرطوب و گرمسیری Batang Merao در اندونزی در سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۱، چهار شاخص هیدرولوژی، محیط‌زیست، زندگی و سیاست را اندازه‌گیری نمودند. طبق نتایج امتیاز WSI حوضه برابر ۰/۵۹ به دست آمد که پایداری حوضه را در سطح متوسط نشان می‌دهد. Cortés et al., (2012) در ارزیابی حوضه Elqui با مساحت ۹۷۰۰ کیلومتر مربع در کشور شیلی با استفاده از WSI در یک دوره پنج ساله ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۵، مقدار پایداری این حوضه را ۰/۶۱ برآورد کردند که این امتیاز حاکی از متوسط بودن پایداری سطح حوضه دارد. مؤسسه تحقیقاتی سیاست‌گذاری، برای رسیدن به پایداری، تشخیص تمام فاکتورهای شرکت‌کننده در پایداری منابع آب سطحی و زیرزمینی را امری بسیار ضروری می‌داند. شاخص پایداری آب به عنوان ابزاری برای تعیین تمام

در دشت ۱۵۳/۷ میلی‌متر می‌باشد. میزان تبخیر سالانه در دشت و ارتفاعات محدوده به ترتیب ۲۲۶۲/۲ و ۲۱۹۹/۲ میلی‌متر است. در حال حاضر از نظر وضعیت بهره‌برداری از آب زیرزمینی این محدوده به دو بخش تقسیم شده است. بخش اول در حاشیه رودخانه زاینده‌رود قرار دارد و به‌عنوان منطقه آزاد در نظر گرفته شده و بخش دیگر سایر قسمت‌های دشت است که ممنوعه می‌باشد. برای دو بخش مذکور حریم جغرافیایی مشخصی وجود ندارد و براساس نظر کارشناسی در مورد حفر چاه در آن‌ها تصمیم‌گیری می‌شود. شکل شماره (۱) موقعیت محدوده مطالعاتی نجف‌آباد در حوضه آبریز گاوخونی و آبخوان آن را در سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS نشان می‌دهد.

بیان منابع آب

براساس مطالعات بیان آبخوان نجف‌آباد، از میزان ۱۶۵/۳۰ میلیون مترمکعب حجم آب حاصل از بارش در دشت حدود ۸۴ درصد صرف تبخیر شده و ۱۶ درصد آن بارندگی مفید است. بیان هیدروکلیماتولوژی محدوده مطالعاتی نشان داده است که نزولات جوی تنها پتانسیل تأمین ۲۷ میلیون مترمکعب آب سالیانه دشت نجف‌آباد و ۴۳/۴ میلیون مترمکعب آب زیرزمینی ارتفاعات را دارا است. مطالعات بیان آب زیرزمینی آبخوان نجف‌آباد نشان داده است که نرخ متوسط کاهش حجم ذخیره ثابت آبخوان آبرفتی معادل ۱۳۸/۳۰ میلیون مترمکعب در سال است و رودخانه زاینده رود در سالیان اخیر در تمامی مسیر محدوده مطالعاتی تغذیه‌کننده آبخوان بوده و میزان نشت آب رودخانه به آبخوان حدود ۱۸۹/۲ میلیون مترمکعب است (Anonymous, 2015).

محدوده از نظر وجود و یا عدم وجود تعادل میان عرضه و تقاضا و تعیین وضعیت پایداری منابع آب محدوده به لحاظ تعادل بیان و درجه بحرانی بودن آن مطالعه و بررسی گردید. همچنین از نرم افزار GMS که یک رابطه گرافیکی برای کد MODFLOW می‌باشد، برای شبیه‌سازی تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان نجف‌آباد استفاده شد. مدل ریاضی تهیه شده در سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ برای حالت پایدار و در سال‌های آبی ۱۳۹۳-۱۳۸۹ برای حالت ناپایدار مورد واسنجی قرار گرفت. طی فرایند واسنجی، مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی (k) و ضریب ذخیره ویژه آبخوان (SY) اصلاح شد. در این تحقیق افزایش بهره‌برداری از چاه‌ها در بررسی‌ها اعمال شده که در این صورت شرایط شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی در دوره آبی به شرایط واقعی نزدیک‌تر شده است. همچنین نتایج بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد، در ارزیابی‌های انجام شده در تحقیقات گذشته، صحت‌سنجی شاخص‌ها صورت نگرفته است. از این رو در این تحقیق برای نخستین بار از نتایج مدل‌سازی به کمک نرم‌افزار GMS در جهت صحت‌سنجی شاخص‌های مورد بررسی استفاده شد. به عبارت دیگر آیا نتایج مدل‌سازی نتیجه شاخص‌ها را تأیید می‌کند یا خیر.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی نجف‌آباد یکی از محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز گاوخونی با وسعت ۱۷۵۴/۹ کیلومتر مربع می‌باشد و آبخوان آبرفتی نجف‌آباد در مساحتی به وسعت ۹۴۱ کیلومتر مربع در مرکز این حوضه آبریز گسترده شده است. میزان متوسط دمای سالانه در ارتفاعات محدوده ۱۳/۸ و در دشت ۱۵/۴ درجه سانتی-گراد برآورد گردیده است. متوسط بارش سالانه در ارتفاعات ۱۹۵ و

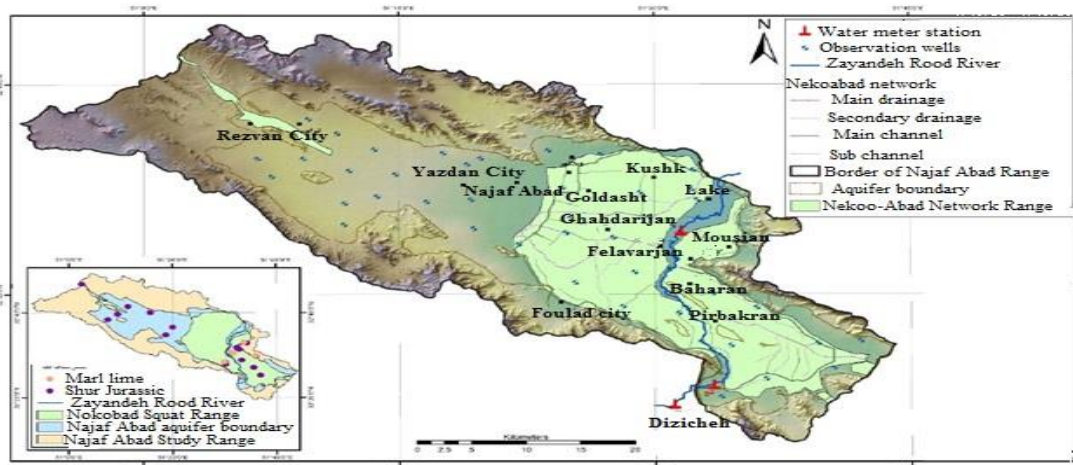


Fig. 1- Location of study area, Najaf Abad aquifer, Neko Abad network area, observational wells network with map of rock ground of aquifer based on explorational borehole data

شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی نجف‌آباد، آبخوان نجف‌آباد، محدوده شبکه نکوآباد، موقعیت شبکه چاه‌های مشاهده-ای به همراه نقشه جنس سنگ کف آبخوان براساس اطلاعات گمانه‌های اکتشافی

مترمکعب می‌باشد که از این مقدار تنها ۸۰/۲ میلیون مترمکعب بر سال تبدیل به بارش مفید می‌شود و مابقی توسط تبخیر از دسترس خارج می‌گردد. در این راستا مطابق جدول (۱) میزان نفوذ مستقیم از بارندگی بر سطح دشت در حدود ۲۹/۴ میلی‌متر بوده که معادل ۲۶ میلیون مترمکعب نفوذ از بارش در آبخوان برآورد گردیده است. جریان سطحی ورودی به محدوده مطالعاتی نجف-آباد نیز، از طریق رودخانه زاینده‌رود و مجموع جریان سطحی خروجی از سه محدوده لنجانان، مهبیار شمالی و کرون به میزان ۵۵۷/۴ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. همچنین میزان ۳۹۰/۶ میلیون مترمکعب در سال توسط شبکه آبیاری نکوآباد و مهبیار به محدوده مذکور انتقال می‌یابد. جریان زیرزمینی ورودی به آبخوان ۴۹/۴ میلیون مترمکعب برآورد شده که از سمت ارتفاعات و دشت وارد آبخوان می‌شود. میزان نفوذ از جریان‌های سطحی ۱۸۹/۵ میلیون مترمکعب و میزان نفوذ آب برگشتی از آبیاری و آب شرب و صنعت به ترتیب در حدود ۴۲۴/۸ و ۵۸/۹ میلیون مترمکعب می‌باشد. مطابق جدول (۲) میزان جریان سطحی خروجی از محدوده مذکور برابر ۳۸۰/۵ میلیون مترمکعب و به دلیل برداشت زیاد از منابع آب زیرزمینی و ایجاد مخروط افت در منطقه جریان آب زیرزمینی خروجی از آبخوان وجود ندارد. همچنین در حدود ۱۴/۷ میلیون مترمکعب آب زیرزمینی نیز از محدوده لنجانان و کرون به محدوده نجف‌آباد وارد می‌شود.

منابع آب تجدیدپذیر

پتانسیل یا توانایی منابع آب در یک محدوده مطالعاتی و حوضه آبریز با برقراری بیلان برای یک سال در حالت متوسط و براساس اطلاعات طولانی مدت میسر می‌شود (Anonymous, 2015). در مطالعه حاضر از بیلان آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی جدول (۱) و همچنین بیلان عمومی آب جدول (۲) مختوم به سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ در محدوده مطالعاتی نجف‌آباد استفاده شده است. آبخوان آبرفتی نجف‌آباد در ۸۷ درصد از مساحت دشت محدوده فوق‌الذکر گسترده شده است و در حال حاضر با ۱۵۶۷۳ حلقه چاه بهره‌برداری و با تخلیه و برداشت به میزان ۸۸۱/۱ میلیون مترمکعب آب زیرزمینی توسط چاه‌های مذکور، رتبه اول برداشت آب را در بین سایر محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز گاوخونی دارا می‌باشد. جدول (۳) وضعیت تخلیه و برداشت از آب زیرزمینی در سطح آبخوان آبرفتی محدوده مطالعاتی نجف‌آباد را نشان می‌دهد. معمولاً در آبخوان‌های آبرفتی چاه‌های بهره‌برداری در مقایسه با چشمه‌ها و قنوت‌ها حجم قابل توجهی از میزان تخلیه آبخوان را به خود اختصاص می‌دهند. همین شرایط در آبخوان نجف‌آباد نیز حاکم است و میزان تخلیه از چشمه‌ها و قنوت‌ها حجم بسیار ناچیزی (در حدود ۴/۶ میلیون متر مکعب) از میزان کل تخلیه و برداشت در سطح آبخوان را به خود اختصاص داده است. حجم کل بارش در محدوده نجف‌آباد برابر با ۲۹۷/۷ میلیون

جدول ۱- بیلان آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی محدوده مطالعاتی نجف‌آباد (میلیون مترمکعب)

Table 1- Groundwater budget of alluvial aquifer in Najaf Abad (MCM)

	Inland underground flow	4.49		
	Influence of rain	26		
Nutrition	Penetration of superficial flows	189.5	Total	
	Influence of agricultural water	424.8	748.6	
	Influence of drinking water and industry	58.9		Changes in storage volume
	Drain from wells, springs and aqueducts	885.7		-138
	Drainage	0		
	Evaporation from the aquifer	0.9		
	Underground flow outlet	0		

جدول ۲- بیلان عمومی محدوده مطالعاتی نجف‌آباد (میلیون مترمکعب)

Table 2- General budget of the Najaf Abad study area (MCM)

Entry	Rain	Plain	132.4	
		Altitudes	165.3	
	Incoming surface flow		557.4	Total
	Inland underground flow		14.7	1260.5
	Transitional waters to the limits		390.6	
		From rain	217.6	Storage deficit -138
		Free water	2	
		From the table	0.9	
		Pure consumption	732	
	Surface flow output	Surface flow output	380.5	
	Underground flow outlet	Underground flow outlet	0	
	Transitional water to the outside	Transitional water to the outside	65.2	

جدول ۳- وضعیت مصارف از منابع آب زیرزمینی و سطحی در آبخوان آبرفتی محدوده مطالعاتی نجف آباد (میلیون مترمکعب)

Table 3- Status of consumption of groundwater and surface water in alluvial aquifer in Najaf Abad study area (MCM)

Source	Alluvial aquifer		
	Drinking	Agriculture	Industry
Groundwater (wells and Qanats)	5.7	860.2	17.2
Surface flow, wastewater and springs	52.2	275.7	3
Total	57.9	1135.9	20.2

جدول ۴- طبقه‌بندی وضعیت نسبت آب مصرفی به آب تجدیدپذیر

Table 4- Classification of the ratio of water consumption to renewable water

position	Renewable Water Use Ratio (C/RW)
well	Less than 0.4
Critical	0.4-0.7
Crisis is intense	0.7-1
Disbalance Billboard	More Than 1

آب در حوضه می‌باشد. با توجه به معادله بالا، بیلان منابع آب زیرزمینی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I + Ir + Gi - Ug - Go = \Delta V \quad (2)$$

$$I = P - ET - R$$

در این روابط I و R به ترتیب معرف حجم آب نفوذ یافته و روان آب سطحی ناشی از باران و Ug برداشت از منابع آب زیرزمینی، Ir معرف آب برگشتی از برداشت سطحی و زیرزمینی و ΔV تغییرات حجم آبخوان می‌باشد. در این تحقیق پس از برقراری بیلان آبی در محدوده مطالعاتی نجف‌آباد، حجم آب تجدیدپذیر (RW) با توجه به معادله (۳) محاسبه شده است.

$$RW = R + Ri + I - Ro + Gi - G \quad (3)$$

با توجه به این که مقداری از آب برداشت شده سطحی Ur و زیرزمینی Ug به مخازن آب زیرزمینی باز می‌گردد، مصرف (C) از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$C = (U r + U g) - I \quad (4)$$

شاخص نسبت آب مصرفی به آب تجدیدپذیر (C/RW) (Asano et al 2006) نسبت آب مصرفی (C) به آب تجدید-پذیر (RW) را به عنوان شاخصی برای بررسی پایداری منابع آب معرفی می‌کنند. مطابق استاندارد بین‌المللی (جدول (۴)) میزان آب مصرفی معادل ۰/۷ آب تجدیدپذیر به عنوان مرز شرایط بحرانی در نظر گرفته می‌شود. با رعایت این حد تنها پایداری کمی و کیفی

مصارف آب

در محدوده نجف‌آباد بخشی از نیاز مصارف مختلف، از آب‌های سطحی، چشمه‌ها و پساب (که مجموعاً آب سطحی معرفی می‌شوند) و بخش دیگر توسط آب‌های زیرزمینی (چاه و قنات) تأمین می‌شود. در جدول (۳) وضعیت مصرف از منابع آب زیرزمینی و سطحی در آبخوان محدوده مطالعاتی نجف‌آباد ارایه شده است. میزان مصرف از چاه‌ها معادل تخلیه آن‌ها می‌باشد ولی میزان مصرف از چشمه‌ها و قنات، به دلیل عدم مصرف از آب آن‌ها در ماه‌های سرد با میزان تخلیه آن‌ها متفاوت در نظر گرفته شده است. مطابق جدول (۳)، ۱۲۱۴ میلیون مترمکعب در سال آب در محدوده مطالعاتی نجف‌آباد به مصرف می‌رسد. از کل میزان مصرف حجمی بالغ بر ۸۸۶ میلیون مترمکعب مربوط به چاه و قنات و ۳۳۱/۲ میلیون متر مکعب مربوط به آب سطحی، پساب و چشمه است که از این مقدار ۴/۵ میلیون مترمکعب مربوط به پساب و مابقی مربوط به آب سطحی و چشمه‌ها می‌باشد.

شاخص‌های پایداری منابع آب

معادله بیلان منابع آب در حوضه به صورت معادله (۱) است: (Talebi and Shahedi 2014).

$$P - ET + Ri - Ro + Gi - Go - Cg - Cr = \Delta S \quad (1)$$

در این رابطه P حجم باران، ET تبخیر و تعرق، Ri و Ro - ترتیب روان‌آب‌های ورودی و خروجی، Gi و Go به ترتیب جریان‌های زیرزمینی ورودی و خروجی و Cg و Cr به ترتیب مصرف آب‌های زیرزمینی و سطحی و ΔS معرف تغییرات ذخیره

شاخص تنش آبی (WSI)

(2017) Zhifeng و Jingwei در تحقیقی نشان داد شاخص (WSI) که شاخص بحران آب نیز نامیده می‌شود از حاصل تقسیم مقادیر برداشت آب به موجودی آب طبق رابطه (۶) به دست می‌آید. در این شاخص می‌توان مناطقی که دارای مصرف آب بیش از حد مجاز بوده و به اکوسیستم آسیب می‌رساند را شناسایی کرد.

$$WSI = TW / Ba \quad (6)$$

در این رابطه TW معرف میزان کل برداشت از منابع آب که شامل کل مصرف آب کشاورزی، شرب و صنعت می‌باشد و Ba معرف میزان آب قابل دسترس سالانه که شامل جریان سطحی ورودی به محدوده نجف‌آباد، مقدار جریان ورودی توسط شبکه آبیاری نکوآباد، چهار خط لوله فولادی انتقال آب شرب نجف‌آباد و مقدار روان‌آب سطحی ناشی از بارش در محدوده مطالعاتی می‌باشد. برداشت‌ها از منابع آب شامل مصارف کشاورزی، شرب و صنعت در محدوده مطالعاتی بوده و میزان آب قابل دسترس نیز از مجموع میزان روان‌آب سطحی و آب انتقالی از محدوده‌های مجاور به دست می‌آید. مقادیر به دست آمده از شاخص WSI در سه گروه مطابق جدول (۵) طبقه‌بندی می‌گردد. مقادیر بزرگ WSI به معنی افزایش تنش در منطقه می‌باشد هم‌چنین اگر مقدار شاخص WSI کمتر از ۰/۴ باشد، بدین معنی است که هیچ تنش آبی و یا حداقل تنش آبی در منطقه وجود دارد.

منابع آب حفظ می‌شود لیکن برای حفظ پایداری توسعه متکی به منابع آب، رعایت حد ۰/۴ مصرف از آب تجدیدپذیر به عنوان استاندارد مطرح شده و بیان‌گر شرایطی است که این نوع توسعه در خشک‌سالی‌های طولانی هم پایداری خود را حفظ نماید.

شاخص آب در دسترس (WAI)

Meigh et al (1999) در مدل جهانی ارزیابی و در دسترس بودن آب، تغییرپذیری زمانی در دسترس بودن منابع آب را به حساب آورده‌اند. این شاخص، شامل منابع آب سطحی و زیرزمینی و کل مقدار تقاضای آب برای مصارف خانگی، صنعت و کشاورزی را مقایسه می‌کند. این شاخص در محدوده -۱ تا ۱ نرمال می‌شود (رابطه ۵). زمانی که مقدار شاخص برابر صفر باشد یعنی تقاضا و در دسترس بودن آب برابر است. شاخص موجودی آب طبق رابطه در دسترس بودن منابع آب سطحی به صورت ۹۰ درصد روان‌آب قابل اعتماد محاسبه می‌گردد. در دسترس بودن آب زیرزمینی، یا به عنوان پتانسیل تغذیه‌ای که از بیلان ماهانه آب سطحی محاسبه می‌شود و یا به صورت پتانسیل عرضه آب‌خوان برآورد می‌گردد و مقدار کمتر در محاسبات در نظر گرفته می‌شود. اگر مقدار این شاخص مثبت و نزدیک به ۱ شود نشان‌دهنده وضعیت خوب و مقدار عرضه بیش از تقاضا می‌باشد و برای مقدار شاخص منفی وضعیت برعکس و نشان‌دهنده این است که مقدار تقاضا بیشتر از منابع آب است.

$$WAI = (R + G - D) / (R + G + D) \quad (5)$$

در این رابطه، R روان‌آب سطحی، G منابع آب زیرزمینی و D تقاضا در همه بخش‌ها است.

جدول ۵- طبقه‌بندی شاخص WSI

Table 5- Index classification WSI

Group	Value of the attribute
1	$0.4 \leq WSI < 0.8$
2	$0.8 \leq WSI < 1.2$
3	$WSI \geq 1.2$

مدل مفهومی آبخوان نجف آباد

بعد از تعیین بیلان دستی آب زیرزمینی و شناخت کامل ورودی‌ها و خروجی‌های دشت، به ایجاد ساختار مدل مفهومی آبخوان دشت نجف‌آباد بر اساس اطلاعات موجود اقدام شد. در این راستا از مدل ریاضی Modflow در نرم‌افزار GMS استفاده شد. مدل Modflow، یک مدل جریان آب زیرزمینی تفاضل محدود سه بعدی می‌باشد، به طوری که حرکت سه بعدی آب زیرزمینی با چگالی ثابت به وسیله معادله دیفرانسیل جزئی با استفاده از روش تفاضل محدود و براساس معادله پیوستگی حل می‌شود. حل تحلیلی این معادله، عملاً در موارد بسیار محدود و ساده امکان‌پذیر نبوده و لذا به جهت آن که در طبیعت، شرایط واقعی سیستم‌های آب زیرزمینی اکثراً غیریکنواخت و دارای خواص و شکل هندسی نامنظم و شرایط مرزی و تغذیه و تخلیه متغیر در زمان و مکان می‌باشد، از روش‌های مختلف عددی مانند روش تفاضل‌های محدود، اجزای محدود، المان‌های مرزی و غیره جهت حل آن استفاده می‌شود. روش عددی به کار گرفته شده در مدل Modflow، روش تفاضل‌های محدود است.

ساختار مدل مفهومی آبخوان شامل سه دسته کلی داده‌های ورودی که عبارتند از خصوصیات حوضه (مرز آبخوان، توپوگرافی سطح و کف و ضخامت آبخوان)، ضرایب هیدرودینامیک دشت (ضریب ذخیره و هدایت هیدرولیکی) و اطلاعات هیدرواقیومی و هیدروژئولوژیکی (تغذیه، ورودی و خروجی جریان زیر قشری از دشت، برداشت از چاه‌های بهره‌برداری و تراز سطح ایستابی) و میزان تغذیه از سطح به آبخوان و شرایط مرزی آبخوان است. مدل مفهومی آبخوان نجف‌آباد در شبکه‌ای در ابعاد ۵۰۰ در ۵۰۰ متر و در یک لایه طراحی شد. در شکل (۲) موقعیت چاه مشاهداتی محدوده مطالعاتی و همچنین موقعیت مرزهای ورودی آب زیرزمینی در محیط GIS نشان داده شده است.

در مدل‌سازی آب زیرزمینی، پس از ساخت مدل مفهومی مدل برای یک بازه‌ی زمانی در حالت ماندگار واسنجی و از نتایج آن به‌عنوان شرایط اولیه برای شبیه‌سازی در حالت غیرماندگار استفاده می‌شود. در حالت ماندگار تراز سطح آب در یک بازه‌ی زمانی در کل محدوده‌ی آبخوان ثابت می‌ماند و در حالت غیرماندگار تراز سطح آب در بازه‌های زمانی مختلف تغییر می‌کند. شبیه‌سازی در حالت غیر ماندگار به‌آنچه در طبیعت اتفاق می‌افتد، نزدیک‌تر است. بدین منظور در حالت ماندگار، متوسط تراز سطح آب در مهر ماه سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ با استفاده از آمار روزانه‌ی ۴۸ چاه مشاهداتی در محدوده‌ی مد نظر به‌دست آمد و از آن برای وارد کردن شرایط اولیه و مقادیر تراز مرزهای ورودی و خروجی به مدل استفاده شد. همچنین کلیه‌ی مقادیر تغذیه به آبخوان، شامل بارندگی و مقادیر تخلیه از آبخوان شامل چاه‌های بهره‌برداری در سال یادشده برای اجرا در حالت ماندگار وارد مدل شد. بعد از اجرای مدل در حالت ماندگار، با تغییر مقادیر هدایت هیدرولیکی به

وسیله‌ی ترکیبی از دو روش خودکار PEST و سعی و خطا، اختلاف مقادیر مشاهداتی و محاسباتی تراز سطح آب به حداقل مقدار ممکن رسید و واسنجی مدل در سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ انجام شد. به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر نتایج واسنجی مدل، از سه معیار ضریب همبستگی (R)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین قدرمطلق خطا (MAE) استفاده شد که به-صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$R = \frac{\frac{1}{n} \sum_{s=1}^n (X_s - \mu_s)(X_s - x_o)}{\sigma_s * \sigma_o} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^n (X_s - x_o)^2}{n}} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{\sum_{m=1}^n |X_s - x_o|}{n} \quad (9)$$

در این روابط x_o داده‌های شبیه‌سازی شده، X_s داده‌های مشاهداتی، μ میانگین داده‌های مشاهداتی، σ_o انحراف معیار داده‌های مشاهداتی، σ_s انحراف معیار داده‌های شبیه‌سازی شده و n برابر تعداد داده‌ها است. مقدار R بیانگر ارتباط خطی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی است که مقدار آن بین صفر و یک است. در حالت غیرماندگار تمام پارامترهای یادشده در حالت ماندگار، در ۴۸ گام زمانی از مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۳ برای مدل در نظر گرفته شد با این تفاوت که در حالت غیرماندگار به جای هدایت هیدرولیکی، مقادیر اولیه‌ی آبدی و ویژه وارد مدل و با تغییر مقادیر اولیه‌ی تغذیه و آبدی ویژه، واسنجی انجام شد. البته از این ۴۸ گام زمانی حالت غیرماندگار، داده‌های مشاهداتی پیرومتری سه سال اول این دوره زمانی برای واسنجی و سال چهارم برای صحت‌سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. ماحصل نتایج حالت غیرماندگار، تراز سطح آب شبیه‌سازی شده در ۴۸ گام زمانی فوق و نقشه‌ای دقیق‌تر از مقادیر اولیه آبدی ویژه آبخوان پس از واسنجی مدل را شامل شد. ضمناً کالیبره کردن نقشه آبدی ویژه به‌صورت دستی و با روش سعی و خطا انجام شد.

بررسی نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل آب زیرزمینی GMS

مقادیر (RMSE) و (MAE) بعد از واسنجی در حالت ماندگار به‌ترتیب برابر با ۰/۸ متر و ۰/۵۹ متر است که نشان‌دهنده‌ی دقت قابل قبول مدل‌سازی در حالت ماندگار است. در شکل (۳) مقادیر سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی را در دوره زمانی مدل‌سازی در حالت ماندگار نشان می‌دهد. در حالت غیرماندگار نیز مانند حالت ماندگار باید مقادیر سطح آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده انطباق مناسبی داشته باشد که در شکل (۴) مقادیر سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده را در مقابل مقادیر مشاهده‌ای برای پیرومترها طی دوره زمانی ۱۳۹۳-۱۳۸۹ نشان می‌دهد.

(RMSE) بعد از واسنجی و صحت‌سنجی در حالت غیرماندگار به- ترتیب برابر با ۰/۸۸ متر و ۱/۲ متر می‌باشد که نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل‌سازی در حالت غیرماندگار است.

انطباق خوب بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی و بالا بودن مقدار R^2 در شکل‌های (۳) و (۴) به دلیل بزرگی مقیاس و اعداد تراز سطح آب زیرزمینی می‌باشد که در مقایسه با مقیاس‌های کوچک تغییرات R^2 به صورت نامحسوس است. مقادیر

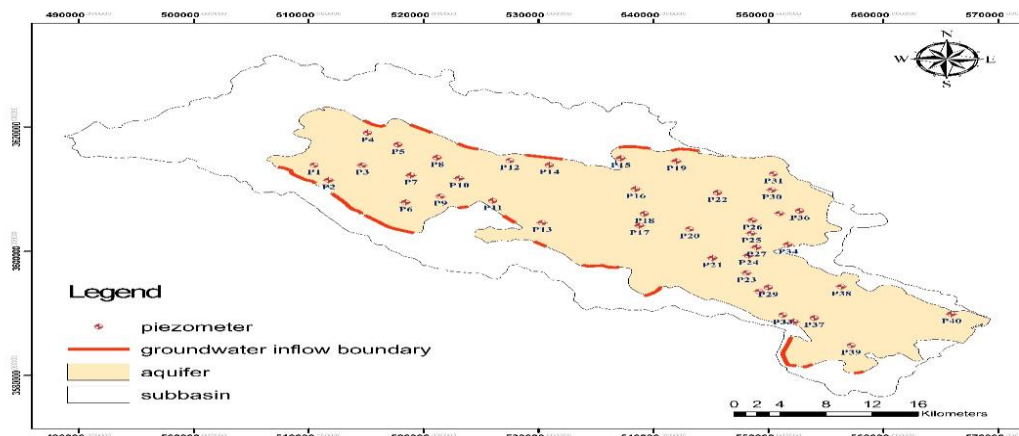


Fig. 2- Location of piezometers and groundwater inflow boundary in Najaf Abad study area
شکل ۲: موقعیت جبهه‌های ورودی و چاه‌های مشاهداتی محدوده مطالعاتی نجف‌آباد

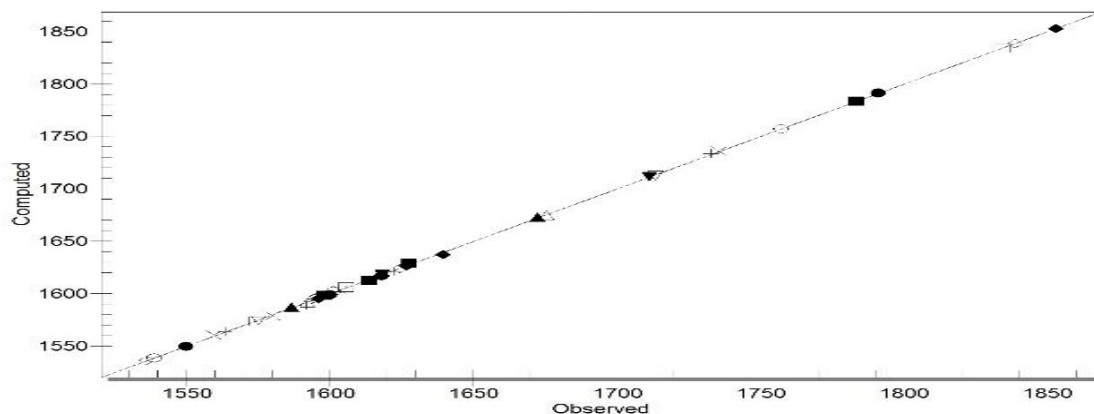


Fig. 3- Distribution of observed and simulated ground water level data after calibration in steady state(2011-2012)

شکل ۳- پراکنش داده‌های تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده بعد از واسنجی در حالت ماندگار (۹۰-۱۳۸۹)

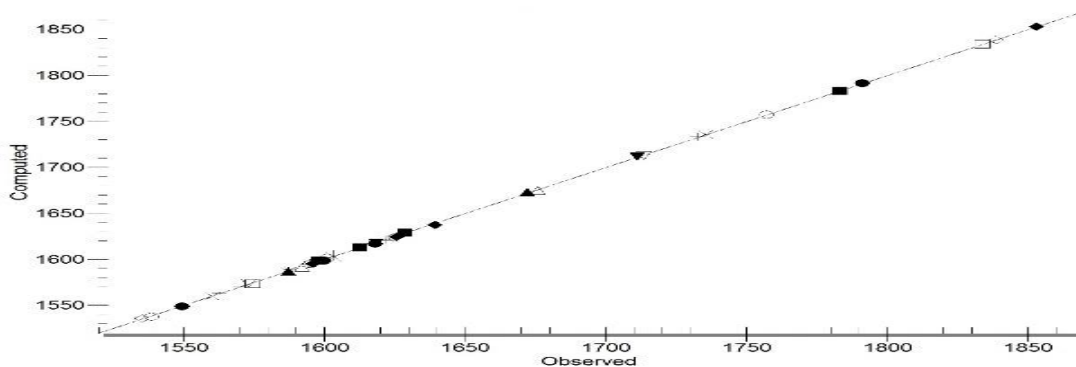


Fig. 4- Distribution of observed and simulated ground water level data after calibration in transient state(2011-2015)

شکل ۴- پراکنش داده‌های تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده بعد از واسنجی در حالت غیر ماندگار (۹۳-۱۳۸۹)

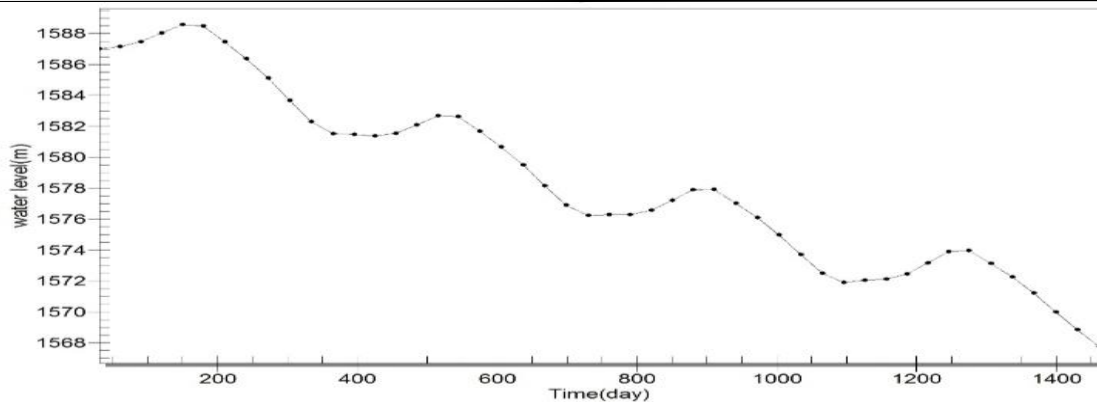


Fig.5- Simulated water levels(2011-2015) (Piezometer 1)

شکل ۵- تراز آب شبیه سازی شده (۱۳۸۹-۱۳۹۳) (پیزومتر ۱)

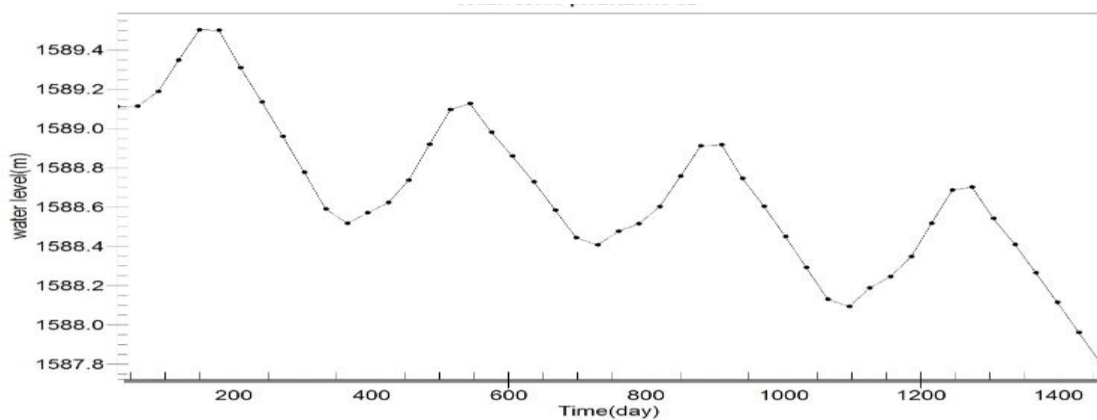


Fig.6- Simulated water levels(2011-2015) (Piezometer 12)

شکل ۶- تراز آب شبیه سازی شده (۱۳۸۹-۱۳۹۳) (پیزومتر ۱۲)

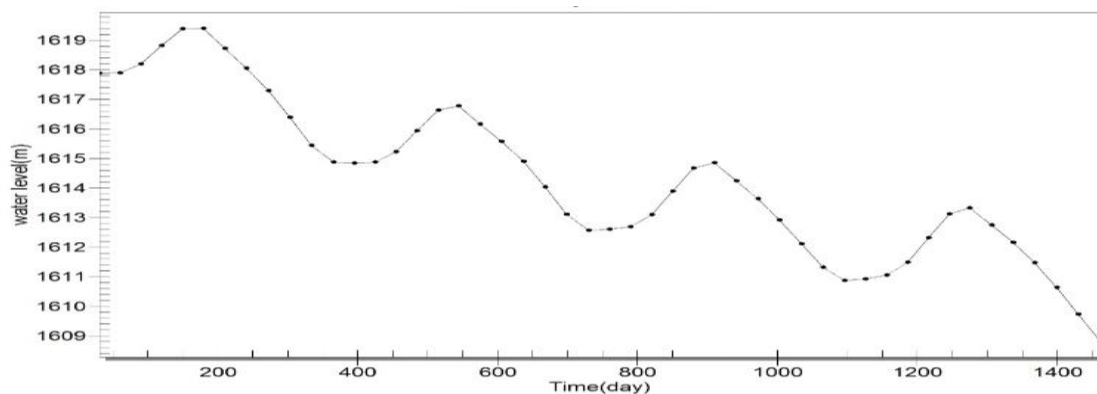


Fig. 7- Simulated water levels (2011-2015) (Piezometer 16)

شکل ۷- تراز آب شبیه سازی شده (۱۳۸۹-۱۳۹۳) (پیزومتر ۱۶)

۰/۱ تا ۰/۲ است. بیشترین افت سطح آب مربوط به نواحی مرکزی آبخوان می باشد. جهت غالب جریان آب زیرزمینی با توجه به نقشه های هم عمق آبخوان از شمال و جنوب به سمت مرکز آبخوان می باشد. تهیه بیلان آب زیرزمینی دشت نجف آباد توسط مدل در حالت غیرماندگار یکی از کاربردهای مهم جهت صحت سنجی مدل سازی آب های زیرزمینی و همچنین شاخص های پایداری در این تحقیق بوده است که از نتایج آن می توان در

در شکل های (۵)، (۶) و (۷) به عنوان نمونه مقادیر تراز آب زیرزمینی شبیه سازی شده در دوره صحت سنجی در سه چاه مشاهداتی انتخابی نشان داده شده است. در این شکل ها محور عمودی تراز سطح آب زیرزمینی بر حسب متر و محور افقی دوره زمانی مدل سازی بر حسب روز است. همچنین نتایج مدل سازی نشان می دهد، توزیع مقادیر هدایت هیدرولیکی بین اعداد ۰/۵ تا ۵ متر در روز متغیر می باشد و دامنه تغییرات مقدار آبدهی ویژه بین

بقیه عوامل بیلان هم چون تبخیر از آبخوان و جریان خروجی زیرزمینی با توجه به شرایط آبخوان دشت نجفآباد، صفر می-باشد. با توجه به ارقام جدول شماره ۶ به خصوص سطر آخر جدول که بیلان کل سالانه آبخوان را نشان می‌دهد، آبخوان دشت نجفآباد سالانه حدود ۱۷۸ میلیون مترمکعب کسری مخزن دارد. از سویی دیگر به منظور صحت‌سنجی شاخص‌های محاسبه شده در این تحقیق مدل آب زیرزمینی در یک دوره زمانی ۶۰ ماهه اجرا گردید. نتایج شبیه‌سازی پیرومترهای منتخب در دوره زمانی ۶۰ ماهه در شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰) نشان داده شده است.

بررسی و اتخاذ رویکردهای صحیح مدیریت و کنترل سفره آب زیرزمینی بهره جست. در جدول (۶) نتایج بیلان آب زیرزمینی آبخوان نجفآباد بعد از بررسی در مدل آب زیرزمینی نشان داده شده است. شایان ذکر است که در جدول (۶) فقط عوامل اثرگذار کنونی درج شده است. به عبارت دیگر عواملی که در حال حاضر باعث تخلیه و تغذیه آبخوان می‌شود شامل چاه‌های برداشت، بارش و جریان‌های سطحی (جریان‌های رودخانه‌ای در این منطقه فصلی بوده و آورد آن قابل توجه نیست) و جریان ورودی از جبهه-های مرزی آبخوان با توجه به گزارش بیلان منطقه می‌باشد و

جدول ۶- بیلان آب زیرزمینی خروجی مدل GMS
Table 6- Groundwater budget by GMS model

Budget Factors in Najaf Abad Aquifer	volume (MCM/year)
infiltration from the rain	+154
groundwater inflow	+140
groundwater outflow	-52
Recharge	+407
Evapotranspiration	-0.9
Drain from wells	-827
Total Bill Factors	-178

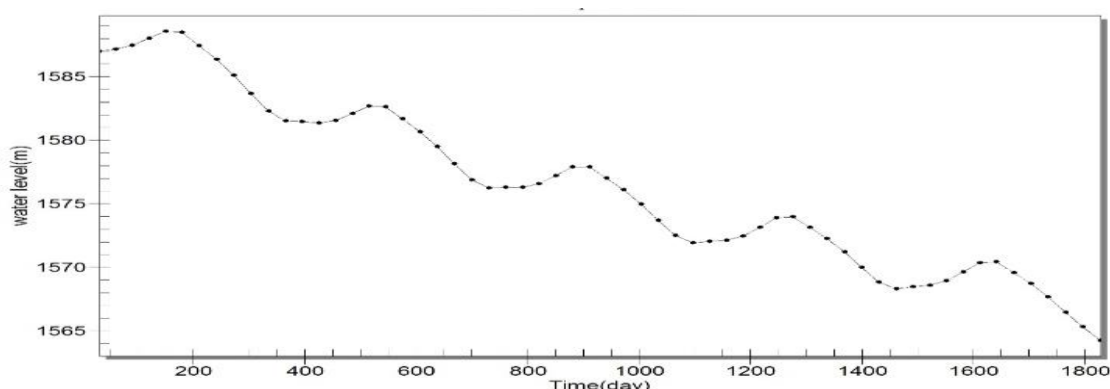


Fig. 8- Simulated water levels(2011-2016) (Piezometer 1)
شکل ۸- تراز آب شبیه‌سازی شده (۱۳۸۹-۱۳۹۴) (پیزومتر ۱)

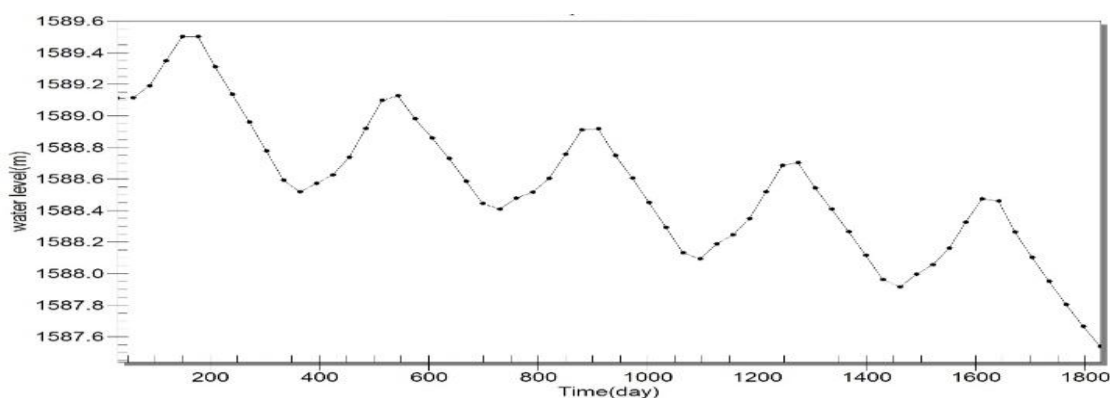


Fig. 9- Simulated water levels(2011-2016) (Piezometer 12)
شکل ۹- تراز آب شبیه‌سازی شده (۱۳۸۹-۱۳۹۴) (پیزومتر ۱۲)

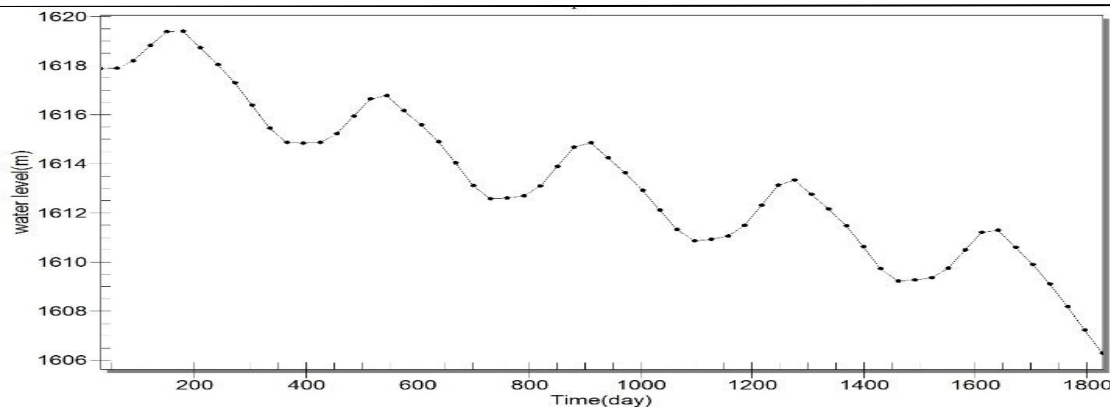


Fig. 10- Simulated water levels(2011-2016) (Piezometer 16)

شکل ۱۰- تراز آب شبیه‌سازی شده (۱۳۹۴-۱۳۸۹) (پیزومتر ۱۶)

زیرزمینی منطقه به کمک مدل MODFLOW نیز نشان‌دهنده روند افزایش کسری مخزن در طی دوره مدل‌سازی بوده است. نتایج بیان مدل‌سازی آب زیرزمینی نیز نشان داد که تغییرات ذخیره ناشی از بیلان آبی دشت منفی است و سیر نزولی هیدروگراف دشت، در دو گام زمانی ۴۸ و ۶۰ ماهه نیز کاهش سطح ایستابی و بحران آب را نشان داد. همچنین بررسی مدل آب زیرزمینی در دوره زمانی ۶۰ ماهه که به‌منظور صحت‌سنجی شاخص‌های پایداری به‌دست آمده، صورت گرفت هم‌سو بودن نتایج مدل‌سازی و شاخص‌های پایداری را به خوبی نشان داد. در مجموع هیدروگراف چاه‌های پیزومتری دشت نجف‌آباد نشان داد که سطح ایستابی دشت رو به کاهش است. بنابراین با توجه به شرایط اقلیمی منطقه و نیز خشک‌سالی‌های اخیر و افزایش روزافزون زمین‌های کشاورزی داخل دشت و اطراف آن که به افت سطح آب زیرزمینی دشت منجر شده است، ادامه این روند و این میزان کسری مخزن می‌تواند منجر به بروز بحران‌های جبران‌ناپذیر در سال‌های آتی شود. چه بسا که تأثیر تغییر اقلیم نیز به‌طور مستقیم و غیر مستقیم بر کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی این منطقه قابل چشم‌پوشی نبوده و امکان تشدید این بحران در اثر وقوع تغییر اقلیم نیز محتمل خواهد بود.

سیاسگزاری

این مقاله از پایان‌نامه دوره دکترای آب و هواشناسی مصوب و دفاع شده در دانشگاه علوم و تحقیقات تهران استخراج شده است. نویسنده بر خود لازم می‌داند مراتب تشکر صمیمانه خود را از استادان راهنما، مشاور و هیئت داوران پایان‌نامه که من را در انجام و ارتقاء کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام نمایم.

نتیجه‌گیری

به استناد آمار و اطلاعات ارائه شده در گزارش مطالعات بیلان آبی حوضه آبریز نجف‌آباد حجم آب تجدیدپذیر (RW) برابر ۸۳۵/۱ میلیون مترمکعب و میزان آب مصرفی در حدود ۷۳۲/۹ میلیون مترمکعب محاسبه گردید که بر این اساس شاخص (C/RW) در حدود ۰/۸ برآورد شد که مطابق جدول شماره ۴، گویای وضعیت بحرانی شدید محدوده مطالعاتی نجف‌آباد به لحاظ افزایش بی‌رویه مصارف از منابع آب تجدیدپذیر می‌باشد. به عبارت دیگر سرانه آب تجدیدپذیر به‌هیچ‌وجه پاسخگوی نیاز محدوده نمی‌باشد و در نتیجه برای کمک به کمبودهای نیاز آبی، در این محدوده از بهره‌برداری ذخایر ثابت آب زیرزمینی و سطحی استفاده می‌گردد و این ذخایر در محدوده با کاهش حجم مواجه شده است. شاخص آب در دسترس (WAI) در این محدوده نیز با توجه به میزان روان‌آب سطحی، میزان منابع آب زیرزمینی و کل مصارف آب‌خوان نجف‌آباد در حدود ۰/۳- برآورد گردید که با توجه به دامنه تعریف شاخص، نشان‌دهنده عدم تعادل پایدار محدوده به لحاظ نابرابری میان عرضه و تقاضا و فزونی قابل توجه میزان تقاضا از عرضه منابع آب می‌باشد. همچنین برای محاسبه شاخص تنش آبی (WSI) در محدوده نجف‌آباد، نسبت کل برداشت از منابع آب به میزان آب قابل در دسترس (شامل مجموع میزان روان‌آب سطحی و آب انتقالی از محدوده‌های مجاور) محاسبه و به میزان ۱/۲۷ برآورد گردید. عدد محاسبه‌شده با توجه به طبقه‌بندی شاخص جدول (۵) در گروه ۳ قرار دارد که نشان‌دهنده وضعیت تنش آبی شدید در محدوده مطالعاتی نجف‌آباد است. بنابراین در این تحقیق نتایج هر سه شاخص دلالت بر عدم تعادل بیلان و شرایط حاد و بحرانی محدوده مطالعاتی نجف‌آباد به لحاظ منابع آب و مصارف آن دارد. از سوی دیگر بررسی وضعیت منابع آب

References

- 1- Anonymous, 2015. Validation of the water resources inventory of the Gavkhood watershed basin, which ended in the year 2009-2010. Volume 5: Assessment of Water Resources, Appendix 6: Report on the Water Resources Scale of Najafabad Study Area. (Code 4206). (In Persian).

- 2- Asano, T., Burton, F., Leverenz, H., Tsuchihashi, R. and Tchobanoglous, G., 2006. *Water reuse: issues, technologies, and applications*. Metcalf & Eddy
- 3- Chaves, H. and Alipaz, S., 2007. An integrated indicator based on basin hydrology, environment, life, and policy: The watershed sustainability index. *Journal of Water Resources Management*, 21(5), pp.883-895.
- 4- Chenini, L. and Ben mamou, A., 2010. Groundwater recharge study in arid region, an approach using GIS techniques and numerical modelling. *Computers and Geosciences*, 36, pp.801-817.
- 5- Cortés A.E. Oyarzún R. Kretschmer N. Chaves H. Soto G. Soto M. Amézaga J. Oyarzún J. Rötting T. Señoret M. and Maturana H. 2012. Application of the Watershed Sustainability Index to the Elqui river basin, North-Central Chile *Obras Proyectos*, 12, pp.57-69
- 6- Hafezparest, M. and Fatemi, A., 2017. Calculation of catchment stability indices in order to maintain sustainable development. *Journal of Geography and Environmental Sustainability Research*, 18, pp.33-21. (In Persian).
- 7- Jingwei, L. and Zhifeng, L., 2017. A comprehensive index for stream depletion in coupled human-water. *Journal of Hydro-environment Research Systems Science of the Total Environment*, 16, pp.58-70.
- 8- Kang, M. and Lee, G., 2011. Multicriteria evaluation of water resources sustainability in the context of watershed management. *Journal of the American Water Resources Association*. 47(4), PP. 813-827.
- 9- Komasi, M. and Sharghi, S., 2017. Outing and classification of effective factors in the groundwater level decline using cross and coherence wavelet transforms: Case study silakhor plain aquifer, *Irrigation and Water Engineering*, 7(4), pp. 138-151. (In Persian).
- 10- Kardan Moghaddam, H., Banihabib, M. and Javadi, S., 2017. Assessment of artificial recharge on aquifer restoring using sustainability index. *Journal of Echo hydrology*, 4(4), pp.1241-1253. (In Persian).
- 11- Meigh, J.R., McKenzie, A. and Sene, k., 1999. A gride-based approach to water scarcity, estimates foreastern and southern Africa. *Water Resources Management*, 13, pp.85-115.
- 12- Nowzar poor, L., Chit sazan, M., Nadri, A. and Farhadi manesh, M., 2014. Evaluation of the hydraulic connection between Laur Andimeshk and Dez River aquifers using the MODFLOW model. *Journal of Advanced Applied Geology*, 17(5), pp.23-36. (In Persian).
- 13- Rachmad, F., Nobukazu, N. and Aswandi, I. 2014. Sustainability assessment of humid tropical watershed: A case study of Batang Merao watershed, Indonesia, *Procedia Environmental Sciences*, 20, pp. 722-731.
- 14- Rijsberman, F.R., 2006. Water scarcity: Fact or fiction?, *Journal of Agricultural Water Management*, 80, pp.5-22.
- 15- Samani, J., Tahmasbi, A., and Tahmasbei Sarvestani, Z. 2003. *Water Resources Management and Sustainable Development*. Vol. 22. Serial Number 7374. (in Persian).
- 16- Talebi Hossein Abad, F., Shahedi, M., Vellayati, s. and Davari, K., 2014. An estimation of renewable water using water budget model in the absence of adequate data. *Journal of Geography and Regional Development*, 12(22), pp.129-150. (In Persian).