Original Article

Journal of Aquifer and Qanat

Spring And Summer 2024, Vol. 5, No. 1, pp 169-182

10.22077/jaaq.2025.7821.1073

Predicting the effect of dam construction on the quantity and quality of the aquifer downstream of the dam (case study: Ardak Dam in Mashhad Plain catchment, Iran)

Farshad Sanagar Darbani[1] | Alireza Moghaddam[2]✉ | Hamid Omranian Khorasani[3] | Amir Hossein Hosseini[4] | Seyed Javad Seyed Alhosseini[5]

1. Msc graduated in Civil Engineering, Khayyam University of Mashhad, Mashhad, Iran.
2. Assistant professor, Department of Agricultural and Natural Resources Engineering, University of Gonabad, Gonabad, Iran.
3. Msc graduated in Water Resource Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
4. Msc graduated in Civil Engineering and Water Resources Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
5. Msc graduated in Water Science and Engineering, Irrigation and Drainage, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

✉Corresponding Author: Alireza.moghaddam@yahoo.com

Received:
29 October 2024

Accepted:
04 December 2024

Published:
20 December 2024

Keywords:

Groundwater, Khorramabad, Support Vector Regression, Metaheuristic.

Extended abstract

Introduction

Water resource development, including dam construction, is one of the most significant measures for optimal water management worldwide. These structures are built to store and regulate water resources, supply drinking and agricultural water, control floods, and generate hydroelectric power. However, despite the numerous benefits provided by dams, their adverse environmental and hydrogeological impacts on groundwater resources have always been a concern for researchers. One such impact is the reduction of groundwater recharge in downstream aquifers, which can lead to groundwater level decline, water quality degradation, and, in some cases, land subsidence.

Cite this article: Sanagar Darbani, F., Moghaddam, A.R., Omraniyan Khorasani, H., Hosseini, A.H., & Seyed Alhosseini, S.J. (2024). Predicting the effect of dam construction on the quantity and quality of the aquifer downstream of the dam (case study: Ardak dam in Mashhad plain catchment, Iran), *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 5 (1), 169-182. DOI: http//doi.org/10.22077/jaaq.2025.7821.1073

Copyright: © 2024 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

In Iran, where surface water resources are scarce and demand increases, dam construction is crucial in water resource management. Ardak Dam, located in the Mashhad Plain watershed, is one of the projects whose impact on the region's aquifer needs thorough investigation. This study aims to examine the effects of Ardak Dam construction on the quantity and quality of the Mashhad Plain aquifer using dynamic modeling in VENSIM software.
Understanding these effects can contribute to better comprehending the interaction between surface and groundwater resources and provide appropriate management strategies.

Materials and Methods

Study Area

Ardak Dam is located 55 km north of Mashhad along the Mashhad–Quchan road. It is built on the Ardak River, which serves as a water source for the Mashhad Plain. The primary objective of constructing this dam was to regulate water flow for various purposes, including drinking water supply and agriculture. The annual average discharge of the Ardak River is estimated at 25.13 million cubic meters, while the annual regulated capacity of the dam is approximately 3.30 million cubic meters.

Research Methodology

To assess the impact of Ardak Dam on the downstream aquifer, hydrological, hydrogeological, and piezometric data from the region were utilized. The groundwater level variations in two observation wells, Shirhesar and Kalateh-Sheikha, were examined. Shirhesar well is located downstream of the dam, where the water enters the aquifer, whereas Kalateh-Sheikha well is upstream and was used as a control well.
For data analysis, dynamic modeling in VENSIM software was employed. Key variables included dam reservoir inflow, evaporation rates, aquifer discharge, and agricultural demands. The model was run for a 14-year period (2012-2026) to analyze changes in groundwater levels and water quality downstream of the dam.

Results and Discussion

Impact of the Dam on the Aquifer Level

The results indicated that the groundwater level in Shirhesar observation well decreased by approximately 4 meters after the construction of Ardak Dam. Additionally, the analysis of the unit hydrograph of the Mashhad Plain showed that, in general, the groundwater level across the entire plain declined by about 5 meters. A comparison of groundwater level decline in upstream and downstream wells demonstrated that the reduction in recharge was more significant in wells closer to the dam, indicating the direct impact of dam construction.
During the reservoir filling period (2007-2013), the rate of groundwater level decline in the Shirhesar observation well increased, confirming that changes in aquifer recharge were influenced by dam construction. However, in the Kalateh-Sheikha well, located upstream of the dam, similar variations were not observed, indicating the limited impact of the dam on upstream areas.

Impact of the Dam on Aquifer Water Quality

A crucial aspect of assessing the effects of dam construction is the examination of groundwater quality changes. The findings revealed that parameters such as electrical conductivity (EC) in the Shirhesar well increased after dam construction. However, similar trends in water quality deterioration were also observed before the dam was built, suggesting that the dam was not the sole factor contributing to these changes. The analysis indicated that cumulative factors, including over-extraction of groundwater for agriculture and changes in aquifer balance, played a more significant role in water quality degradation.

Modeling and Future Predictions

Simulating groundwater level changes under different scenarios revealed that:

- In 66% of cases, the irrigation water demand was not fully met by the dam, resulting in increased groundwater extraction and, consequently, a decline in

aquifer levels.

- In a scenario where water demand was reduced, and the dam's influence was removed, the groundwater level showed an improvement.
- In a scenario of increased groundwater withdrawal, the groundwater level continued to decline until 2026.

Conclusion

This study demonstrated that the construction of Ardak Dam has directly impacted the reduction of groundwater recharge in the downstream aquifer, leading to a decline of approximately 4 meters in observation wells near the dam and 5 meters across the entire Mashhad Plain. Additionally, the analysis of groundwater quality indicated an increase in salinity (EC) in downstream wells, although this change was not solely attributed to the dam but rather to a combination of factors, including excessive groundwater extraction.

Modeling results revealed that in 66% of cases, the irrigation water demand was not entirely met by the dam, leading to an increased reliance on groundwater sources and further depletion of the aquifer. Thus, optimizing groundwater withdrawal, improving agricultural water use efficiency, and implementing sustainable water resource management policies can mitigate the negative impacts of dam construction on the aquifer.

مقاله پژوهشی

مجله
آبخوان و قنات

دوره پنجم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۳، صفحات ۱۸۲-۱۶۹

10.22077/jaaq.2025.7821.1073

پیش‌بینی اثر سدسازی بر کمیت و کیفیت آبخوان پایین دست سد (مطالعه موردی: سد ارداک در حوضه آبریز دشت مشهد، ایران)

فرشاد ثناگر دربانی [۱] | علیرضا مقدم✉[۲] |حمید عمرانیان خراسانی [۳] | امیر حسین حسینی [۴]| سید جواد سیدالحسینی [۵]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه خیام مشهد، مشهد، ایران.
۲. استادیار، گروه مهندسی کشاورزی و منابع طبیعی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران.
۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مدیریت منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس تهران، تهران، ایران.
۴. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، مهندسی منابع آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
۵. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، علوم و مهندسی آب، آبیاری و زهکشی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

✉نویسنده مسئول: Alireza.moghaddam@yahoo.com

چکیده

منابع آب قابل استفاده به دلیل توزیع نامتقارن و عدم قطعیت‌های ناشی از تغییرات اقلیمی با محدودیت‌هایی مواجه شده است. برای مقابله با این چالش‌ها، انسان به تدابیر مختلفی متوسل شده است. یکی از این تدابیر، کاهش عدم قطعیت در دسترسی به آب از طریق ساخت سدهای مخزنی و ایجاد مکان‌های ذخیره آب است. گرچه ساخت سد یکی از مهم‌ترین دستاوردهای بشر محسوب می‌شود و مزایای بسیاری به همراه داشته است، اما تأثیرات منفی نیز بر وضعیت هیدروژئولوژی مناطق داشته است. یکی از این تأثیرات منفی، کاهش تغذیه آبخوان‌ها است. مطالعات محدودی در خصوص تأثیر سدها بر آبخوان‌ها وجود دارد؛ اما در این پژوهش تلاش شده است تا تأثیر ساخت سد ارداک بر کمیت و کیفیت آبخوان دشت مشهد بررسی شود. به همین منظور میزان آب ورودی به رودخانه ارداک قبل از احداث سد بررسی و تحلیل شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار VENSIM میزان افت آبخوان مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن شعاع تأثیر سد ارداک تا محل چاه مشاهده‌ای شیرحصار، میزان افت ناشی از احداث سد قابل مشاهده است. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که سطح آب زیرزمینی پس از احداث سد ارداک و در چاه‌های مشاهده‌ای پایین‌دست آن حدوداً ۴ متر کاهش یافته است. هیدروگراف واحد دشت مشهد نیز حدود ۵ متر افت را نشان می‌دهد. بررسی‌های انجام شده در سال‌های آبگیری سد ارداک نشان داد که سرعت افت ۰/۵ متر بوده است. همچنین شبیه‌سازی اثرات سد بر اساس برداشت اضافی در بخش کشاورزی نشان می‌دهد که این امر می‌تواند موجب افزایش سرعت افت سطح آب زیرزمینی تا سال ۱۴۰۵ شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۴
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

کلیدواژه‌ها:
آبخوان دشت مشهد،
سد ارداک،
نرم‌افزار VENSIM

مقدمه

مهندسان و مدیران در طراحی و ساخت سدها معمولاً تمرکز اصلی خود را بر مسائل سازه‌ای مانند پایداری، مقاومت سد و جنبه‌های فنی معطوف می‌کنند. با این حال، مسائل دیگری مانند مسائل انسانی (از جمله موضوعات اجتماعی و اقتصادی منطقه) و تأثیرات هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی (مانند تأثیر سد بر آبخوان‌ها و کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی) اغلب کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند. این مسائل معمولاً در مرحله بهره‌برداری از سد خود را نشان می‌دهند، در حالی که در مرحله طراحی کمتر به آنها پرداخته می‌شود. این غفلت می‌تواند به عواقب جدی‌تری مانند افت سطح آبخوان‌ها و در نهایت نشست زمین منجر شود. البته در برخی موارد، با توجه به شرایط خاص مورفولوژیکی و زمین‌شناسی یک منطقه، ممکن است ساخت سد تأثیر چندانی بر وضعیت آبخوان‌ها نداشته باشد. با این وجود، بررسی و توجه بیشتر به تأثیر سدها بر آبخوان‌ها و محیط‌زیست منطقه امری ضروری است تا از بروز مشکلات بلندمدت جلوگیری شود (Ghazavi & Ebrahimi, 2018). طرح‌های توسعه منابع آب، همچون احداث سدها در ورودی آبخوان‌ها یا ساخت آب‌بندها، همواره تأثیراتی بر آب‌های سطحی و زیرزمینی مناطق پایین‌دست به همراه دارند. فعالیت‌های انسانی، مانند تغییر وضعیت طبیعی رودخانه‌ها، موجب دگرگونی‌های گسترده‌ای در جریان طبیعی رودخانه‌ها، میزان انتقال آب در آبخوان‌ها و جریانات ورودی و خروجی سفره‌های زیرزمینی شده‌اند (Walter, 2010; Daolei et al., 2019). پیش‌بینی تأثیرات زهکشی بر کمیت و کیفیت سفره‌های آب زیرزمینی در پایین‌دست سدها برای مدیریت مؤثر منابع آب از اهمیت بالایی برخوردار است. مطالعات نشان می‌دهند که تخلیه مخازن سدها می‌تواند منجر به فرسایش قابل توجه، آزادسازی رسوبات و تغییرات در غلظت مواد مغذی در پایین‌دست شود (Bowen, 2004; Kumar et al., 2014).

علاوه بر این، استفاده از تکنیک‌های پیشرفته مانند دینامیک سیستم‌ها و شبکه‌های عصبی مصنوعی برای شبیه‌سازی سیستم‌های زهکشی، می‌تواند به پیش‌بینی متغیرهای مهمی مانند نوسانات سطح آب، میزان تخلیه زهکشی و سطح شوری کمک کند و نقش مؤثری در مدیریت پساب زهکشی ایفا نماید (Nozari & Liaghat; 2014; Woong et al., 2002; Hong et al., 2021). روش‌های دیگری مانند رگرسیون بردار پشتیبان فازی نیز برای برآورد میزان زهکشی از سدها به کار گرفته شده‌اند که نشان‌دهنده اهمیت مدل‌های پیش‌بینی دقیق در مدیریت بهینه سدها است (Wiriyarattanakun, 2011; Jahangiri et al., 2019).

در محدوده مطالعاتی مشهد، چندین سد خارج از محدوده آبخوان احداث شده است. این پژوهش به طور خاص به بررسی سد ارداک و تأثیرات آن بر آبخوان محدوده مطالعاتی مشهد پرداخته است. لازم به ذکر است که سد ارداک علاوه بر تأثیر بر آب‌های زیرزمینی، یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب شرب شهر مشهد نیز محسوب می‌شود. بنابراین، توجه به اثرات کمی و کیفی این سد بر وضعیت آبخوان دشت مشهد از اهمیت بالایی برخوردار است. اهداف اصلی این مطالعه شامل تحلیل تغییرات سطح آب زیرزمینی در پایین‌دست سد ارداک قبل و بعد از احداث سد، و همچنین بررسی تغییرات هیدروگراف واحد در پایین‌دست این سد است. این بررسی‌ها می‌توانند به درک بهتر تأثیرات سد بر منابع آب زیرزمینی و ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب کمک کنند.

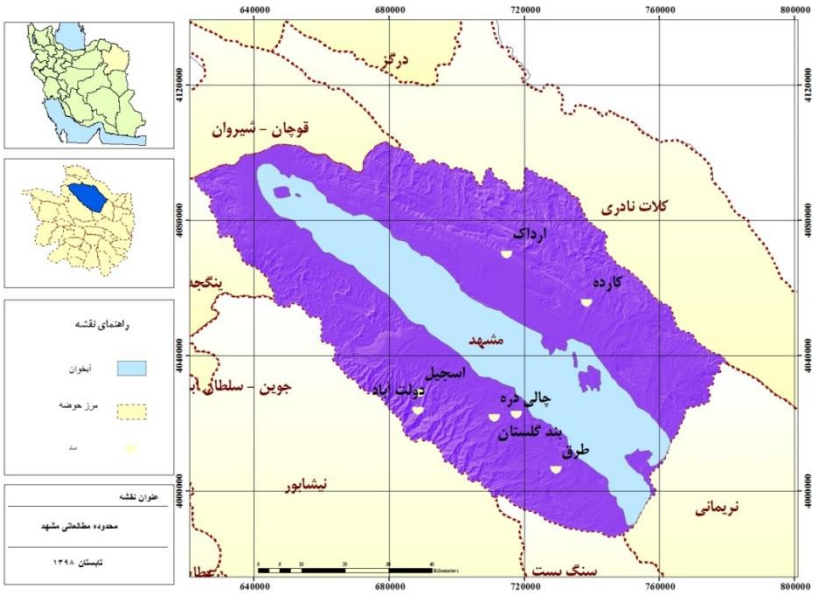
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

سد ارداک در فاصله ۵۵ کیلومتری شهر مشهد و در مسیر جاده مشهد-قوچان احداث شده است (شرکت آب منطقه‌ای، ۱۳۹۵) (شکل ۱). ساخت این سد در سال ۱۳۸۱ آغاز شد و در سال ۱۳۸۶ مرحله آبگیری آن شروع گردید. نهایتاً در سال ۱۳۹۲، این سد به بهره‌برداری رسید. هدف اصلی از احداث سد ارداک، مهار و ذخیره رواناب رودخانه، تنظیم جریان آب برای تأمین نیازهای شرب، صنعت و حقابه اراضی کشاورزی پایین‌دست است.

بر اساس آمار دوره ۱۱ ساله، متوسط آبدهی سالانه این رودخانه ۲۵/۱۳ میلیون مترمکعب برآورد شده است. در سال آبی ۶۵-۱۳۶۴، این مقدار به حدود ۲۸/۲ میلیون مترمکعب رسید. این رودخانه در مواقع بارندگی‌های شدید، حالت طغیانی به خود می‌گیرد و دبی لحظه‌ای آن در روستای ارداک به ۶۰ مترمکعب در ثانیه می‌رسد.

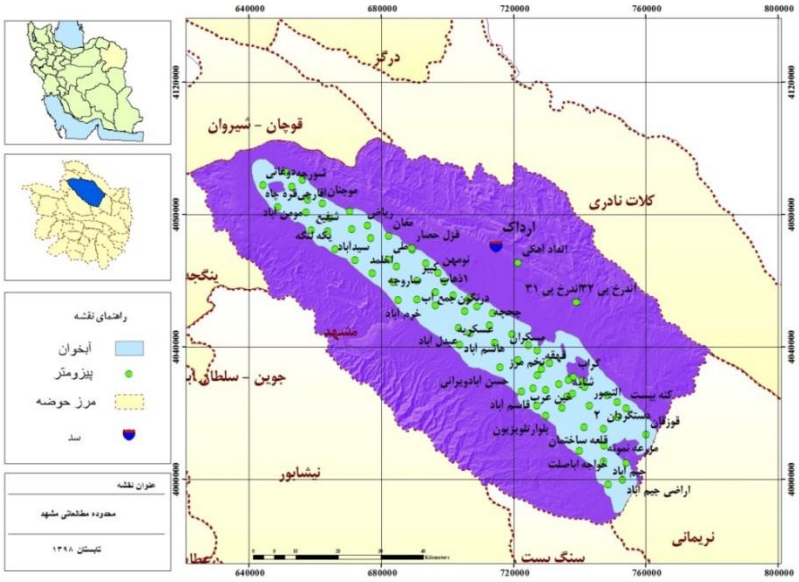
همچنین، حجم آب قابل تنظیم سالانه توسط این سد، ۳/۳۰ میلیون مترمکعب است.



شکل ۱. سدهای موجود در محدوده مطالعاتی مشهد.

Fig 1. Existing dams in the Mashhad study area

در شکل (۲)، موقعیت سد ارداک و چاه‌های مشاهده‌ای موجود در محدوده مطالعاتی نمایش داده شده است. برای بررسی تأثیر سد ارداک بر سطح ایستابی منطقه، از دو چاه مشاهده‌ای شیرحصار و کلاته‌شیخ‌ها به‌عنوان ایستگاه‌های شاهد استفاده شده است. چاه مشاهده‌ای شیرحصار در پایین‌دست محل تقاطع حوضه آبریز سد ارداک و آبخوان دشت مشهد قرار دارد، در حالی که چاه مشاهده‌ای کلاته‌شیخ‌ها در بالادست این تقاطع واقع شده است. این انتخاب امکان مقایسه تغییرات سطح ایستابی در دو موقعیت متفاوت نسبت به سد را فراهم می‌کند.



شکل ۲. موقعیت سد ارداک و چاه‌های پیزومتری.

Fig 2. Location of the Ardak Dam and piezometric wells.

روش انجام پژوهش

رواناب تشکیل‌شده در رودخانه‌ها دارای ویژگی‌های متعددی است که برخی از آنها با استفاده از روش‌های

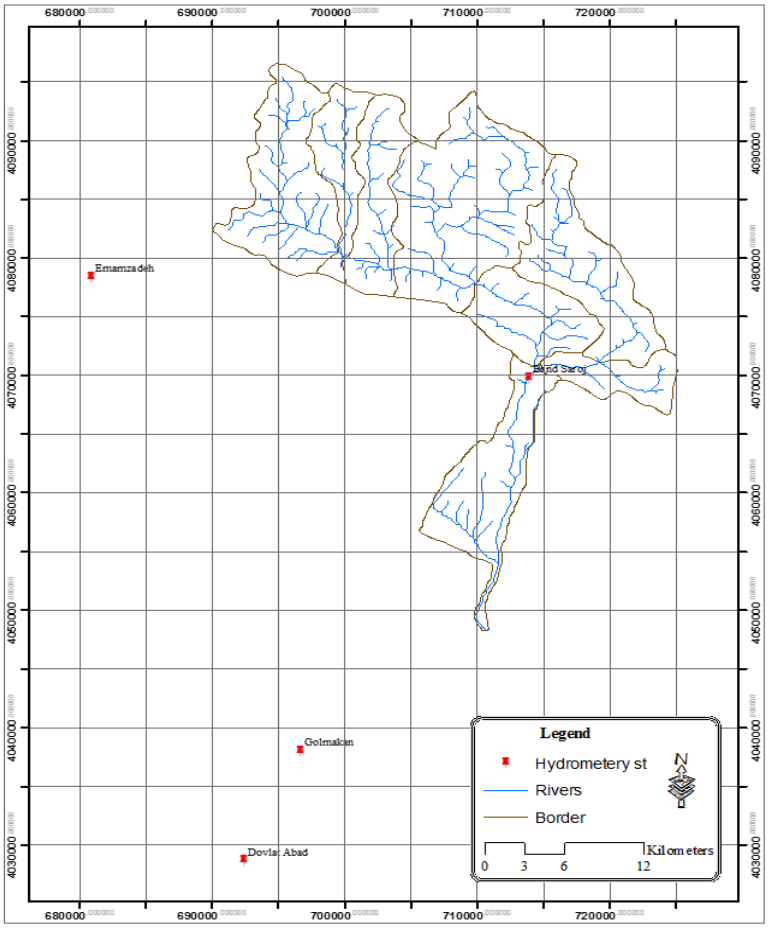
محاسباتی قابل تعیین هستند. دو ویژگی اصلی که در این روش‌ها مورد توجه قرار می‌گیرند، عبارتند از: الف) دبی اوج سیلاب؛ و ب) تغییرات زمانی دبی سیلاب یا هیدروگراف. علاوه بر این، ویژگی‌های دیگری مانند زمان رسیدن به دبی اوج سیلاب، زمان تأخیر و حجم سیلاب نیز مطرح هستند که عمدتاً در روش‌های محاسبه هیدروگراف مورد استفاده قرار می‌گیرند. این پارامترها به درک بهتر رفتار سیلاب و مدیریت منابع آب کمک می‌کنند.

از آنجا که مقادیر دبی لحظه‌ای ایستگاه بند ساروج در دوره قبل از احداث سد ارداک بر روی رودخانه ارداک موجود بود، برای تعیین دبی سیلاب متناظر با دوره‌های بازگشت یا احتمالات مختلف، ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Hyfa، توابع توزیع مناسب بر داده‌ها برازش داده شدند. سپس، بر اساس شاخص مجموع مربعات انحرافات نسبی، توزیع مناسب انتخاب گردید. به‌منظور درک بهتر ویژگی‌های هیدرولوژیکی زیرحوضه‌ها و استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی برای برآورد و پهنه‌بندی سیلاب، حوضه آبریز به واحدهای هیدرولوژیکی کوچک‌تر تقسیم‌بندی شد.

در حوضه آبریز رودخانه ارداک، ایستگاه هیدرومتری «بند ساروج» به‌عنوان ایستگاهی فعال و معتبر وجود دارد (شکل ۳). ایستگاه هیدرومتری بند ساروج بر روی رودخانه ارداک و در داخل حوضه آبریز مطالعاتی قرار داشته و از طول دوره آماری مناسبی نیز برخوردار است، از این رو این ایستگاه بهترین گزینه جهت بررسی وضعیت آبی حوضه مطالعاتی است. لذا، به‌منظور بررسی تناوب دوره‌های خشک و مرطوب حوضه آبریز مطالعاتی از روش‌های میانگین متحرک با دوره‌های ۳، ۵ و ۷ ساله و آزمون دنباله‌ها و ایستگاه بند ساروج به‌عنوان مبنا استفاده شد. لازم به ذکر است، آمار این ایستگاه به‌تنهایی می‌تواند نیازهای پژوهش حاضر را برآورده کند و بهترین ایستگاه برای این منظور محسوب می‌شود، اما برای ارائه دید جامع‌تر از وضعیت منابع آب سطحی در منطقه مطالعاتی، ایستگاه‌های هیدرومتری مجاور محدوده طرح نیز شناسایی و آمار آنها جمع‌آوری شد. این ایستگاه‌ها از شرایط مشابه با منطقه طرح برخوردار بوده و دارای دوره‌های آماری مناسبی هستند.

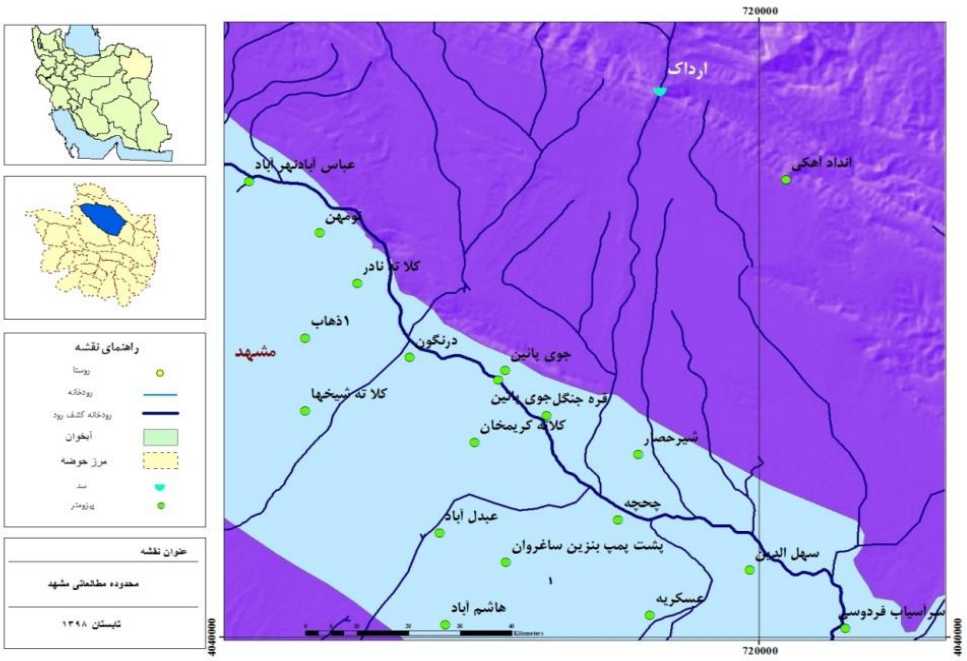
برای ارزیابی تأثیر سد بر آبخوان، بررسی تغییرات سطح آب پیزومترها ضروری است. به همین منظور، ابتدا کلیه داده‌ها و اطلاعات مرتبط از دفتر مطالعات آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی جمع‌آوری شد. در مرحله بعد، داده‌های کنترلی شامل سطح آب پیزومترها، اطلاعات هیدرومتری و دبی چاه‌های بهره‌برداری تهیه گردید. همچنین، برای بررسی افت متوسط سالانه، هیدروگراف مرکب درازمدت تهیه شد. مشخصات چاه‌های مشاهداتی نزدیک به سد ارداک در شکل (۴) نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که نزدیک‌ترین پیزومترها به محل تقاطع رودخانه ارداک و آبخوان دشت مشهد، چاه‌های مشاهده‌ای شیرحصار و چهچه هستند (شکل‌های ۵ و ۶). در ادامه تأثیر سد بر آبخوان پایین‌دست با استفاده از مدل VENSIMمورد تحلیل قرار گرفته است.

برای پیش‌بینی تغذیه آینده آبخوان، لازم است پارامترهای مؤثر بر مدل‌سازی آبخوان ناشی از تغییرات آب سطحی به مدل وارد شوند. از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر تغییرات آبخوان، تغییرات رواناب ورودی به آبخوان و همچنین تغییرات تقاضای آب هستند. در این مطالعه، فرض شده است که تغییرات ورودی آب به آبخوان محدوده سد ارداک تقریباً ثابت است. همچنین، میزان تخلیه از چاه‌های کشاورزی به‌عنوان یک پارامتر ثابت در نظر گرفته شده است. اگرچه در گذشته تغییرات تخلیه نوسانات زیادی داشته است، اما در سال‌های اخیر روندی نسبتاً ثابت را نشان می‌دهد که احتمالاً ناشی از محدودیت‌های اعمال‌شده بر برداشت آب از طریق نصب کنتورهای حجمی است. بر اساس مدل مفهومی طراحی‌شده، اطلاعات ورودی به مدل شامل موارد زیر است: سری بلندمدت آبدهی ماهانه ورودی به مخزن سد (میلیون مترمکعب)، توزیع ماهانه تبخیر از سطح مخزن (میلی‌متر)، جدول سطح-حجم-ارتفاع مخزن سد (به‌ترتیب کیلومتر مربع، میلیون مترمکعب و متر)، حجم حداکثر مخزن (میلیون مترمکعب)، حجم حداقل مخزن (میلیون مترمکعب)، توزیع ماهانه نیاز کشاورزی (میلیون مترمکعب)، نشت به آبخوان و بارندگی. دوره آماری انتخاب‌شده برای شبیه‌سازی سد ارداک، یک دوره ۱۴ ساله شامل سال‌های آبی ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۵ (۱۶۸ ماه) است.



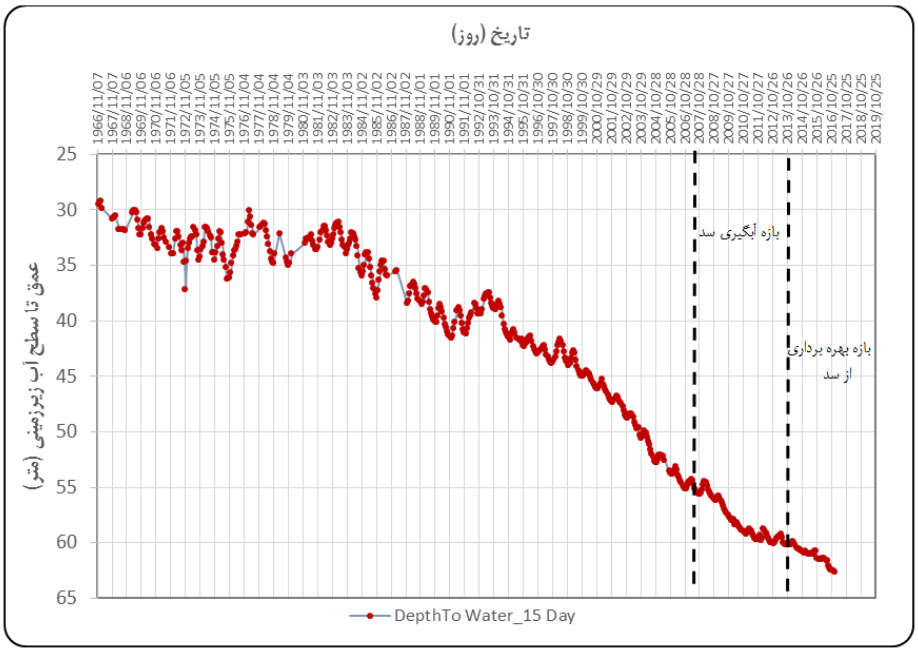
شکل ۳. موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه.

Fig 3. Location of the hydrometric stations under study.



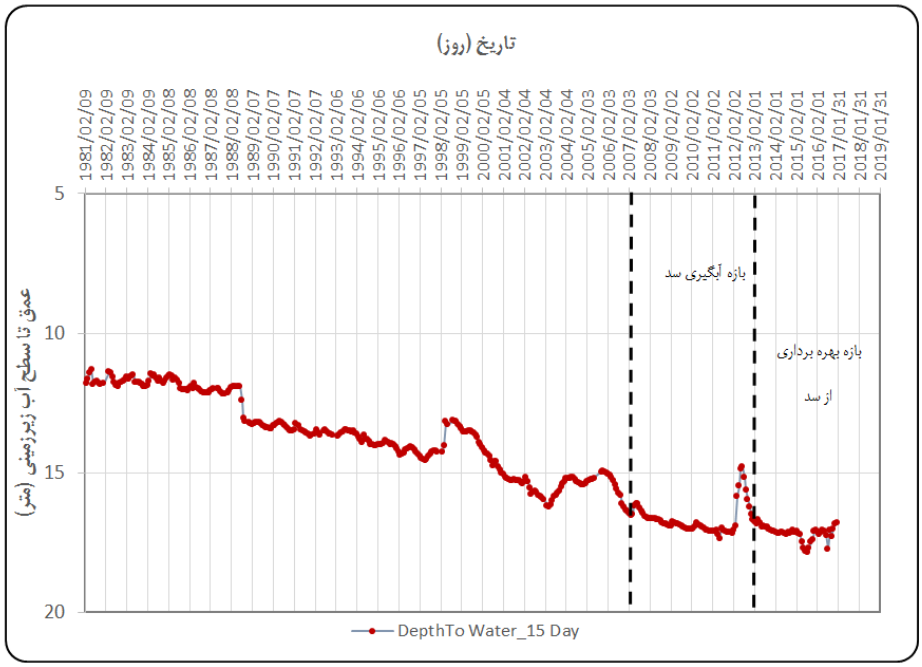
شکل ۴. مشخصات چاه‌های مشاهده‌ای در نزدیکی سد ارداک.

Fig 4. Characteristics of observation wells near the Ardak Dam.



شکل ۵. تغییرات عمق تا سطح آب زیرزمینی در چاه مشاهده‌ای شیر حصار.

Fig 5. Changes in depth to groundwater level in the Shir Hesar observation well.

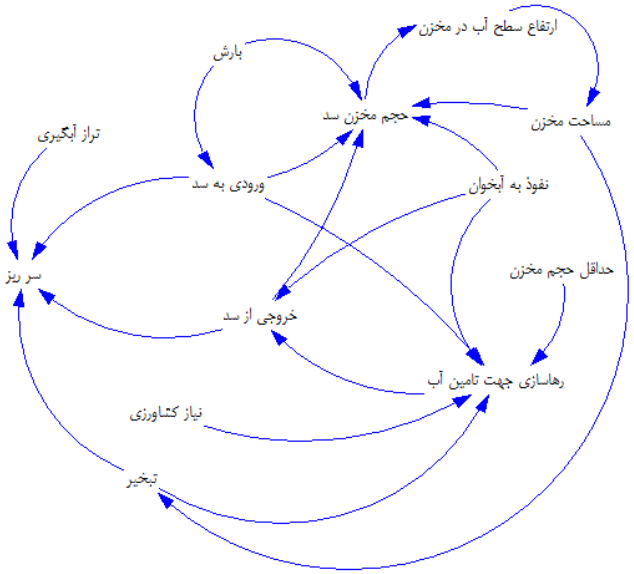


شکل ۶. تغییرات عمق تا سطح آب زیرزمینی در چاه مشاهده‌ای چهچه.

Fig 6. Changes in depth to the groundwater level in the Chahchahe observation well.

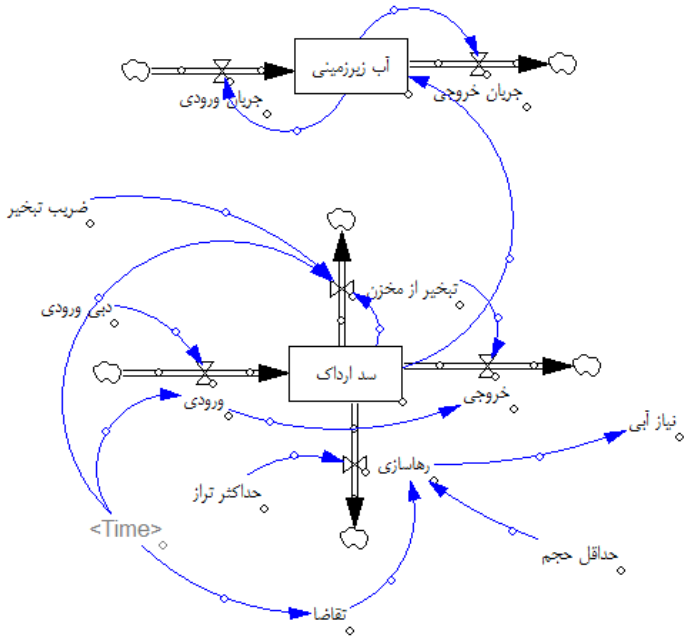
پس از تعریف متغیرها و تعیین نوع روابط بین آن‌ها، نمودار علی‌معلولی (شکل ۷) برای متغیرها در محیط نرم‌افزار VENSIM ترسیم شده است. این نمودار نشان‌دهنده چگونگی تعامل اجزای سیستم است. سپس، با بررسی دقیق‌تر متغیرها، نوع آن‌ها مشخص شد. برخی از متغیرها از نوع انباشتی هستند، مانند آب موجود در مخزن، و برخی دیگر نرخ تغییرات را نشان می‌دهند، مانند دبی خروجی که نرخ تغییر آب مخزن است. پس از تعیین نوع متغیرها، نمودار جریان رسم شد و روابط بین آن‌ها فرموله گردید. مدل آماده‌شده وارد نرم‌افزار شده و

فرمول‌هایی که تعامل متغیرها را توصیف می‌کنند، نوشته شدند. به این ترتیب، یک مدل شبیه‌سازی آماده اجرا شد. هدف از ساخت این مدل، بهره‌برداری بهینه از مخزن سد و افزایش سطح شناخت از تعامل سد با آبخوان است. نمودارهای ذخیره و جریان ترسیم‌شده در مدل، با استفاده از یک سری معادلات دیفرانسیل مرتبه اول (اغلب غیرخطی) که به‌روش Runge-Kutta حل می‌شوند، ساخته شد. روش مدل‌سازی در VENSIM به این صورت است که پیشرفت از کلیات به جزئیات انجام گرفت؛ به‌طوری که به‌تدریج توابع و اجزای متصل‌شده افزایش می‌یابند تا مدل کامل شده و آماده اجرا گردد. ساختار تهیه‌شده برای شبیه‌سازی سیستم منابع آب سد ارداک، با در نظر گرفتن کلیه پارامترها و متغیرهای مؤثر، در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۷. نمودار علی معلولی سد و آبخوان.

Fig 7. Causal Diagram of the Dam and Aquifer



شکل ۸. مدل تهیه شده شامل مخزن سد، آبخوان و ورودی و خروجی آن‌ها.

Fig 8. The developed model includes the dam reservoir, aquifer, and their inflow and outflow.

نتایج و بحث

بررسی‌های انجام‌شده برای سد ارداک شامل تحلیل مشخصات مخزن سد، تأثیر سد بر چاه‌های مشاهده‌ای پایین‌دست، اثر سد بر تراز آب زیرزمینی دشت، برآورد حجم تبخیر از مخزن و همچنین بررسی تأثیر آورد حوضه بر آب زیرزمینی پایین‌دست سد است. نزدیک‌ترین پیزومترها به سد ارداک در فاصله‌های ۲۰ و ۴۰ کیلومتری از سد قرار دارند که این فاصله نسبتاً زیاد، ناشی از کمبود داده‌های مربوط به چاه‌های دیگر در منطقه است. در بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۲، سد ارداک در حال آبگیری بود. در این دوره، تغییرات ارتفاع سطح ایستابی در چاه مشاهده‌ای شیرحصار مشاهده می‌شود که با شروع آبگیری سد، تغییر شیب در سطح ایستابی این چاه رخ داده است. این تغییرات به‌احتمال زیاد به آبگیری سد مرتبط است، چراکه در چاه‌های دورتر مانند کلاته‌شیخ‌ها (واقع در شمال غربی سد) چنین نوساناتی دیده نمی‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که افت سطح آب در چاه مشاهده‌ای شیرحصار تا حد زیادی به سد ارداک وابسته است. با این حال، میزان افت در این چاه مشاهده‌ای دارای شیب ملایمی است. مقایسه سرعت افت آب زیرزمینی در چاه مشاهده‌ای شیرحصار قبل و بعد از آبگیری سد نشان می‌دهد که بیشترین سرعت افت در دوره آبگیری مخزن سد رخ داده است.

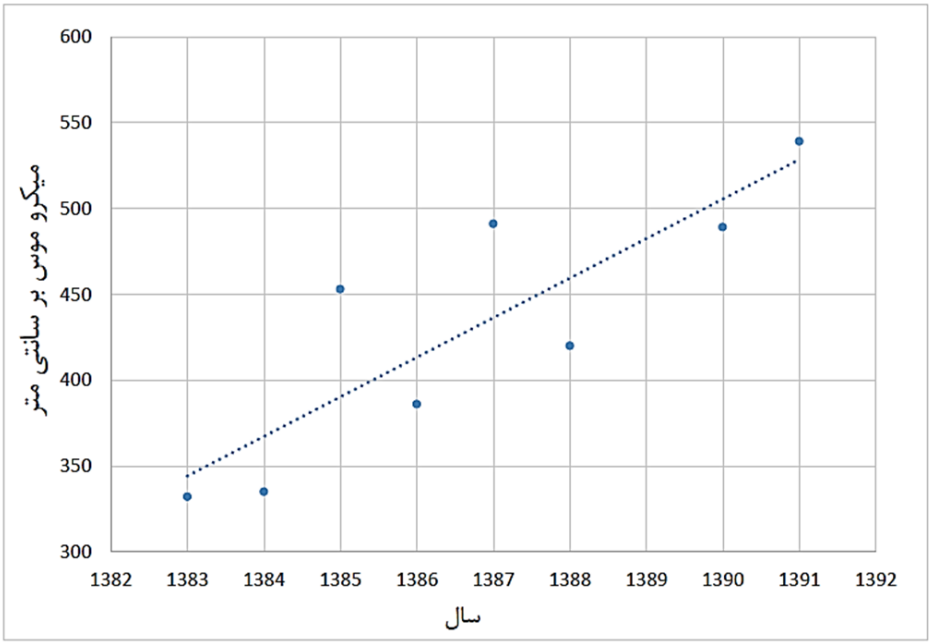
تغییرات در تعداد چاه‌های مشاهده‌ای باعث تغییر در شبکه تیسن و ایجاد شکستگی در منحنی هیدروگراف واحد شده است. به‌طور مشخص، چهار تغییر در شبکه تیسن در سال‌های آبی ۷۱-۱۳۷۰، ۷۴-۱۳۷۳، ۷۸-۱۳۷۷ و ۸۲-۱۳۸۱ در محدوده آبخوان دشت مشهد رخ داده که منجر به شکست منحنی هیدروگراف واحد شده است. با توجه به گستردگی قابل توجه آبخوان، تراکم شبکه چاه‌های مشاهده‌ای در هر ۲۵ کیلومتر مربع، ۰٫۷۸ چاه است. بررسی هیدروگراف ترسیم‌شده نشان می‌دهد که نوسانات سطح آب زیرزمینی در آبخوان تحت تأثیر نزولات جوی و میزان برداشت از آبخوان قرار دارد. این نوسانات به وضوح در دوره‌های مرطوب و خشک هر سال آبی قابل مشاهده است. دوره مرطوب معمولاً از شهریور یا مهر آغاز شده و تا فروردین یا اردیبهشت ادامه می‌یابد، در حالی که دوره خشک یا بهره‌برداری از سفره آب زیرزمینی و کاهش تغذیه آبخوان از اردیبهشت شروع شده و تا شهریور به مدت ۵ ماه ادامه دارد.

از سال آبی ۸۳-۱۳۸۲ تا ۹۴-۱۳۹۳، افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان تشدید شده است. با این حال، تغییرات قابل توجهی در روند افت تراز آبخوان قبل و بعد از احداث سد ارداک مشاهده نمی‌شود. افت تجمعی آبخوان در محدوده سد ارداک در بازه زمانی ۸۳-۱۳۸۲ تا ۹۴-۱۳۹۳ به وضوح نشان‌دهنده روند کاهشی سطح آب است. نتایج بررسی‌ها حاکی از آن است که جهت جریان آب‌های زیرزمینی به‌طور کلی از غرب به شرق است. همچنین، در یک نقشه واحد، تراز آب زیرزمینی در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۹ برای مقایسه در بخش غربی آبخوان (محدوده سد ارداک) ارائه شده است. تغییرات محسوسی در افت آب دیده نمی‌شود و افت موجود با توجه به شرایط آبگیری سد قابل انتظار است. بنابراین، نمی‌توان علت اصلی این افت را به سد ارداک نسبت داد. بر اساس مطالعات انجام‌شده و بررسی‌های صورت‌گرفته، می‌توان نتیجه گرفت که ساخت و آبگیری سد ارداک تأثیرات اندکی بر تغییرات سطح آب زیرزمینی منطقه داشته است.

یکی از موارد بسیار مهم در مطالعات مربوط به ساخت یک سد، تخمین شعاع تأثیر سد بر تغییرات آب زیرزمینی می‌باشد. در این تخمین فاصله‌ای از محل احداث سد که در آن تغییر در منحنی‌های هم‌تراز ایجاد می‌شود برآورد می‌گردد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که که منحنی‌های جدیدی با ارتفاع هم‌تراز پایین‌تر در این محدوده مشاهده گردیده است و با توجه به مقیاس نقشه مورد بررسی جهت اندازه‌گیری این تغییرات، حداکثر شعاع که از محل سد منحنی جدیدی تشکیل‌شده، ۱۱ کیلومتر تخمین زده شده است. همچنین برای به‌دست آوردن تغییر حجم آب مخزن زیرزمینی به ضریب ذخیره متوسط سفره آبدار نیاز است، با توجه به مطالعات گذشته آزمایشات پمپاژ[1] مقدار این پارامتر به‌طور متوسط ۱۳ درصد برای کل آبخوان در نظر گرفته شده است. در شکل (۹) اطلاعات حاصل از چاه شیرحصار ارداک نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌گردد که با شروع آبگیری مخزن سد، پارامترهای کیفی آب زیرزمینی کاهش یافته است. اما از

[1] pumping test

آنجایی که این کاهش کیفیت در سال‌های قبل از احداث سد نیز به چشم می‌خورد لذا ساخت سد تنها به دلیل اثرگذاری تجمعی با سایر پارامتر، سبب شدت گرفتن این تغییرات شده است. از این‌رو نمی‌توان تأثیر قابل ملاحظه‌ای را برای آن لحاظ نمود.



شکل ۹. تغییرات EC آبخوان پایین دست ارداک.

Fig 9. Changes in EC of the downstream Ardak aquifer.

به‌منظور بررسی آبخوان قبل از احداث سد حجم مخزن صفر در نظر گرفته شده نتایج (شکل ۱۰) نشان داد که با توجه به آبدهی رودخانه[1] و کاهش میزان تقاضا به صفر در دوره شبیه سازی تراز آبخوان بهبود می‌یابد. با وجود سد در ۶۶ درصد مواقع با توجه به نیاز کشاورزی تعیین شده از جریان‌های سطحی سد برای کشاورزی، حجم آب مورد نیاز، تأمین نشده و اضافه برداشت به آبخوان منتقل می‌شود در نتیجه افت سطح ایستابی قطعی خواهد بود (شکل ۱۱).

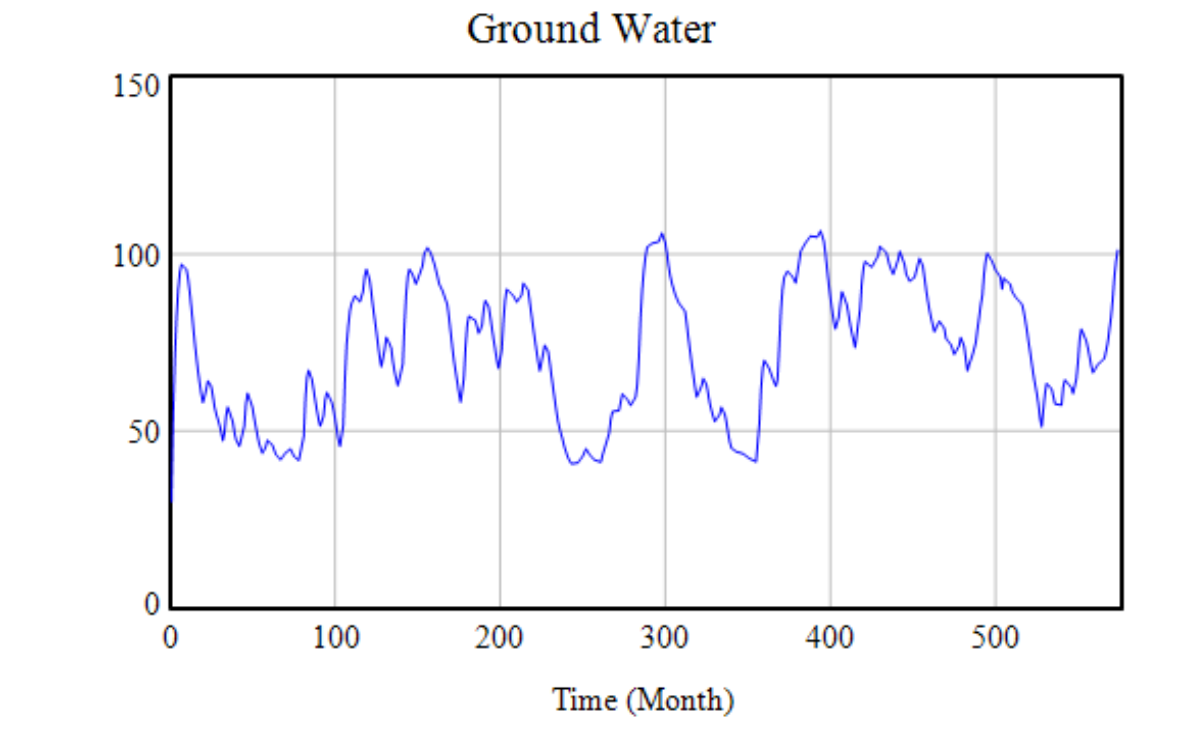
نتیجه‌گیری

بررسی‌ها نشان داد که چاه‌های مشاهده‌ای پایین دست سد ارداک بعد از احداث سد دچار افت سطح آب شده‌اند. این افت در چاه‌های مشاهده‌ای نزدیک به سد ارداک یعنی چاه‌های مشاهده‌ای شیرحصار و چهچه دارای روند نزولی‌تری هستند. لازم به ذکر است میزان افت آب در چاه‌های مشاهده‌ای نزدیک سد ارداک حدود ۴ متر گزارش شده است. هرچند در چاه‌های مشاهده‌ای کل دشت (بر اساس اطلاعات هیدروگراف واحد) میزان افت مشاهده شده در حدود ۵ متر است. اما میزان افت ناشی از کاهش ورودی به آبخوان در چاه‌های مشاهده‌ای نزدیک به سد ارداک مشهود است. ضمناً جهت تایید موضوع از چاه مشاهده‌ای شاهد کلاته شیخ‌ها که بالاتر از محل ورودی سد ارداک به آبخوان دارد، استفاده شده است.

مدل‌سازی VENSIM نشان داد که در ۶۶ درصد مواقع نیاز آبی کشاورزی به‌طور کامل از سد تأمین نشده و بخشی از آن از منابع زیرزمینی برداشت شده که موجب افت سطح آبخوان شده است. همچنین، کاهش کیفیت آب زیرزمینی به عوامل تجمعی مختلف مرتبط بوده و صرفاً نتیجه احداث سد نیست.

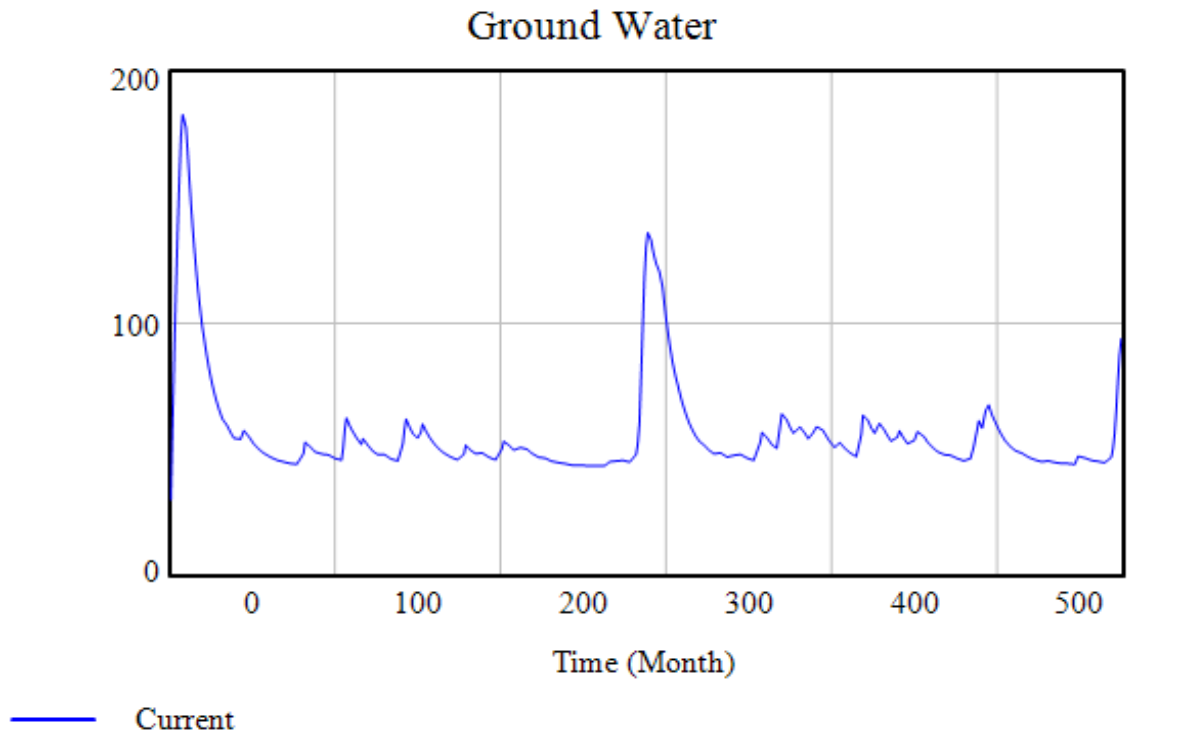
در نهایت، مدیریت بهینه بهره‌برداری از سد و منابع زیرزمینی، کنترل برداشت‌ها و افزایش بازدهی مصرف آب می‌تواند در کاهش اثرات منفی بر آبخوان مؤثر باشد. پیشنهاد می‌شود مطالعات بیشتری برای ارزیابی دقیق‌تر تأثیرات سد انجام شود.

[1] streamflow record



شکل ۱۰. نمودار تغییرات آبخوان با کاهش تقاضا و حذف سد.

Fig 10. Aquifer variation chart with reduced demand and removal of the dam.



شکل ۱۱. نمودار کاهش حجم آبخوان با افزایش تقاضا و وجود سد.

Fig 11. Diagram of aquifer volume reduction with increasing demand and the presence of a dam.

منابع

Chung, S. W., & Kim, J. H. (2002). Development of artificial neural network models supporting reservoir operation for the control of downstream water quality. *Water Engineering Research*, *3*(2), 143-153.

Ghazavi, R., & Ebrahimi, H. (2018). *Hydrological Impacts of Large Reservoir Dam and Land Subsidence on Downstream Groundwater Resources Using Mathematical Modeling*. *1*(1), 43–52. https://doi.org/10.22052/JDEE.2017.63257.

Hamed, Nozari., Abdolmajid, Liaghat. (2014). Simulation of Drainage Water Quantity and Quality Using System Dynamics. Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE, doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000748.

Jiyeong, Hong., Seoro, Lee., Gwanjae, Lee., Dongseok, Yang., Joo, Hyun, Bae., Jonggun, Kim., Ki-Sung, Kim., Kyoung, Jae, Lim. (2021). Comparison of Machine Learning Algorithms for Discharge Prediction of Multipurpose Dam. Water, doi: 10.3390/W13233369.

Krzysztof, Polak., Karolina, Kaznowska-Opala., Katarzyna, Pawlecka., Kazimierz, Różkowski., Jerzy, Klich. (2015). The Assessment of Susceptibility on Drainage in an Aquifer on the Basis of Pumping Tests in a Lignite Mine / Ocena Podatności Ośrodka Wodonośnego Na Odwodnienie Na Podstawie Próbnych Pompowań W Kopalni Węgla Brunatnego. Archives of Mining Sciences, doi: 10.1515/AMSC-2015-0008

Jahangiry Fard, M., Amanipoor, H., Battaleb-Looie, S., & Ghanemi, K. (2019). Evaluation of effect factors on water quality of Karun River in downstream and lake of the Gotvand-e-Olya Dam (SW Iran). *Applied Water Science*, *9*, 1-14.

Mark, W., Bowen. (2004). Consequences of Reservoir Drainage on Downstream Water Chemistry, Suspended Sediment, and Nutrients, Southwest Missouri.

Pradeep, Kumar, Agarwal., Jitendra, Gurjar., Shrikant, Choudhary. (2014). Evaluation of Effect of Drainage Quality on Performance of Low Volume Roads in India.

Ranjbar, M., & Amini, N.. (2014). Assessing The Impact Of Dams On Groundwater Resources: Case Study Salman Farsi Dam-Fars. *Geography*, *12*(40), 187-206. [In Persian].

S., Wiriyarattanakun., A., Ruengsiriwatanakun., S., Noimanee. (2011). Drainage Prediction for Dam using Fuzzy Support Vector Regression. World Academy of Science, Engineering, and Technology, International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control, and Information Engineering.

Walter, W., "Environmental hazards of dams and reservoirs", Vol. 88, pp. 187–197, 2010.

Xie, Daolei., Zhang, Weijie., Wei, Jiuchuan., Yin, Huiyong., Gongyishan, Yu., Han, Chenghao. (2019). Aquifer drainage feasibility analysis method based on hydrological exploration and dewatering test.