University of Tabriz

Hydrogeology

Homepage: https://hydro.tabrizu.ac.ir/
Hydrogeology, Volume 10, No. 2, 2026

Assessing the Role of Return Flows in Mitigating Groundwater Deficit and Sustainability of Sarab and Asbforoushan Aquifers

Abolfazl Majnooni-Heris [*1], Mohammad Khaledi-Alamdari [2], Ahmad Fakheri Fard [3], Asghar Asghari Moghaddam [4]

1- Professor, Department of Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
2- PhD in irrigation and drainage, East Azarbaijan Regional Water, Energy Ministry, Tabriz, Iran.
3- Professor, Department of Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
4- Professor, Department of Geology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz. Iran.
*Corresponding author: majnooni@tabrizu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Submit Date:
2026/08/10
Accept Date:
2026/09/28

Keywords:
Discharge, Drainage, Groundwater Balance, Return flow, Recharge.

ABSTRACT

The study examined the groundwater balance and the contribution of return flows to the recharge of the Sarab and Asbforoushan aquifers in the Sarab Eastern Azerbaijan of Iran. The main objectives were to quantify the major input and output component and to assess the extent to which return flows could compensate for groundwater storage deficits and improve aquifer sustainability. The groundwater balance equation was thus applied taking into account recharge from precipitation, lateral boundary flows, infiltration from riverbeds and return flows from agricultural, household and industrial water use, as well as groundwater abstraction from Wells, Qantas and Springs and discharge into rivers. The results indicated that groundwater levels have been steadily declining in both aquifers over recent decades, with groundwater levels being more strongly affected by water consumption and anthropogenic activity than by precipitation. The final groundwater balance in the Sarab aquifer was estimated to be slightly positive at +2.8 million m³, while in the Asbforoushan aquifer the balance was estimated to be slightly negative at -1.08 million m³. However, direct precipitation recharge in each aquifer was limited to around 3 million m³, with the bulk of the total recharge coming from lateral boundary flows, riverbed infiltration and return flows. Agricultural runoff, which accounted for 85 and 46 percent of total groundwater withdrawals from the Sarab and Asbforoushan aquifers respectively, was the dominant component of the outflow and put the greatest pressure on the groundwater systems. These findings suggest that the long-term sustainability of the aquifers studied requires integrated demand management, improved irrigation efficiency, effective control of illegal groundwater withdrawal and increased indirect recharge through controlled use of return flows and site-specific intervention.

Cite this article: Majnooni-Heris, Abolfazl., Khaledi-Alamdari, Mohammad., Fakheri Fard, Ahmad., Asghari Moghaddam, Asghar. (2022). Assessing the Role of Return Flows in Mitigating Groundwater Deficit and Sustainability of Sarab and Asbforoushan Aquifers. *Hydrogeology*, 10 (2), 132-152. DOI: http//doi.org/ 10.22034/hydro.2026.74066.1349

© The Author(s).
Publisher: University of Tabriz.
DOI: http//doi.org/ 10.22034/hydro.2026.74066.1349

Expanded Abstract

Introduction

Groundwater is one of the most important sources of water supply in arid and semi-arid areas of the world. In many parts of Iran, groundwater supplies a significant share of the water needed for domestic, agricultural and industrial activities. In recent decades, population growth, agricultural development, the expansion of irrigated land and the increasing abstraction of groundwater from the ground have upset the balance between recharge and discharge of many aquifers. The consequences of this imbalance include a continued decline in groundwater levels, depletion of aquifers, reduced yields from wells and springs, increased pumping costs and, in some cases, land subsidence and deterioration of groundwater quality. The Sarab and Asbforoushan aquifers in the Sarab district of the eastern part of the province of East Azerbaijan are one of the groundwater systems affected by both climate change and human activity. Although a decrease in rainfall and changes in the timing of rainfall may reduce natural recharge, the variations in groundwater levels in these aquifers cannot be explained by direct precipitation alone. The trends observed are also strongly linked to groundwater abstraction and water use patterns, especially in agriculture. It is therefore necessary to identify and quantify the main components of recharge and discharge in order to assess the current status of these aquifers and to propose appropriate management strategies. Return flows are an important but often underestimated part of the recharge of groundwater. A fraction of water used for irrigation, household consumption and industrial processes can be returned to groundwater systems by percolation, leakage from transmission and distribution networks or infiltration from surface runoff. Return flows can therefore compensate for part of the shortfall in groundwater. However, their contribution should not be taken for granted as proof of the sustainability of water management. Excessive runoff can be associated with low water efficiency and can transfer salts, fertilisers, waste components and other pollutants to the groundwater table. Consequently, the quantitative and qualitative aspects of the return flows need to be considered at the same time. The aim of the study was to assess the groundwater balance of the Sarab and Asb-Foroushan aquifers and to assess the role of return flows in remedying the groundwater storage shortfall and in promoting the sustainability of the aquifers. The analysis took into account precipitation recharge, boundary flow, river recharge, agricultural return flow, household return flow, industrial return flow, groundwater abstraction from wells, dams and springs, and groundwater discharges into rivers.

Materials and Methods

The study area includes the Sarab and Asbforoushan aquifers in the district of Sarab in the province of East Azerbaijan in Iran. The Sarab Aquifer covers an area of approximately 184 km^2, situated between the Sabalan Highlands in the north and the Miocene Marl formations in the south. The northern boundary is related to defined groundwater flows and hydraulic interactions with river basins, while the southern, western and eastern boundaries are mainly considered to be impermeable or impassable. The alluvial thickness reaches about 200 m in the southern part of the aquifer and is reduced to less than 50 m in the south-west. The rivers Aqmion-Chay and Tajyar-Chay, together with the local intermittent canals, contribute to the recharge of the alluvial plain. The Asb-Foroushan aquifer covers an area of about 170 km2. It is situated in a valley between the Bozghoush Mountains and the Aq-Daqlar crags. The aquifer is composed primarily of granitic alluvial deposits, interspersed with mud and clay layers. Confined or semi-confined groundwater conditions are found in the central part of the area, while unconfined groundwater conditions are found in the foothills of the Bozghoush Mountains. The southern boundary is the defined inflow boundary, while the other boundaries are generally considered as the permeability boundaries. The thickness of the alluvial deposits in the sea bed varies from about 40 m in the south to about 10 m in the north. The Vanagh-Chay River and its tributaries contribute to the recharge of the aquifer. Groundwater balances have been assessed by applying the general equation of water balance:

$$\Delta S=\sum I -\sum O$$

Where $\sum I$ is the total water inflow into the aquifer and $\sum O$ is the total outflow, and ΔS is the change in the aquifer's storage. Direct precipitation recharge, spill-over inflow, river recharge, and return flows from household, industrial, and agricultural water use were the input components.

Abstraction from springs, Qantas, and wells as well as discharges into groundwater were examples of outflow components. The Thiessen polygonal method has been used to estimate spatially averaged precipitation for each aquifer. Representative areas were allocated based on the corresponding Thiessen polygons, using rain gauge stations with available precipitation records. The same approach was used to determine the piezometric area. For each piezometer, a weighting factor was calculated on the basis of the ratio between its area of influence and the total area of the aquifer. This process has enabled the available groundwater level observations to be integrated into an integrated assessment of the groundwater conditions. Aquifer hydrographs have been analyzed for the water year periods 1366 to 1367 and 1393 to 1394. Annual and monthly variations in groundwater levels were examined in order to detect long-term trends and seasonal variations. Although the hydrograph alone cannot fully describe the hydrological behavior of an aquifer, it provides a general indication of changes in groundwater storage and the predominant direction of variations in groundwater levels. The groundwater contour maps have been combined with flow lines to determine the main groundwater flow directions and the boundaries between the inflow and outflow of groundwater. Annual average flows have been used in the balancing calculations to reduce the impact of short-term fluctuations and seasonal variations. The groundwater abstraction was estimated for the water year 1393 to 1394, including both leased wells and unlicensed illegal wells identified until 1394. Wells, Qantas and springs were considered to be the main effluent sources in the aquifer system.

Results and Discussion

Hydrographic analysis showed a general downward trend in groundwater levels in both the Sarab and Asb-Foroushan aquifers over the period of the investigation. This trend indicates that total groundwater discharges have exceeded both natural and anthropogenic recharge rates for at least part of the study period. A comparison of precipitation records and groundwater level variations also showed that water use and human activity had a greater influence on groundwater variations than direct rainfall alone.

Direct precipitation recharges of each aquifer was estimated to be around 3 million cubic metres. This contribution was relatively limited compared to the total rechargeable. This result shows that direct precipitation alone cannot compensate for the depletion of groundwater due to intensive pumping. Boundary flows, river recharge and return flows were the more important components of the total input of groundwater. The recharge of the river was estimated to be around 7 million cubic metres for the Sarab and 4 million cubic metres for the Asb-Foroushan. The discharge of groundwater into rivers was estimated to be around 0.5 million cubic metres in the Sarab and 0.4 million cubic metres in the Asb-Foroushan.

The discharge analysis showed that the predominant pressure on the groundwater system was from agricultural runoff. In the Sarab aquifer, agricultural use accounts for about 85 per cent of total groundwater withdrawals. This high share reflects the strong dependence of local agricultural activity on groundwater and shows the significant pressure on groundwater storage. In the Asb-Foroushan aquifer, agricultural abstraction accounted for around 46 per cent of the total. The difference between the two can be linked to variations in cropping patterns, irrigation development, the geometry of the aquifers, the availability of groundwater and the relative contribution of household and other uses.

The final water balance of the Sarab aquifer was estimated to be slightly positive, at about +2.8 million cubic metres. While the positive balance indicates that the total inflows exceeded the total outflows during the period considered, the relatively small size of the surplus should not be interpreted as a sign of assured long-term sustainability. The small positive balance can easily be reversed by a decrease in groundwater recharge, an increase in agricultural runoff, a prolonged drought or further expansion of groundwater-dependent activities. Thus, despite its positive balance for the water year studied, the Sarab aquifer remains vulnerable.

Conversely, the Asb-Foroushan aquifer had a deficit of approximately -1.08 million cubic metres. A negative balance means that total groundwater outflows exceed total inflows and that part of the shortfall is due to the depletion of aquifers. If this trend continues, further groundwater depletion, a decrease in well and spring runoff, increased pumping requirements and deterioration of groundwater conditions may occur. The results also show that return flows are an important part of both groundwater recharge and can contribute to reducing the groundwater

deficit. However, return flows should be seen as a complement to, and not a substitute for, demand management. An increase in the return flow due to excessive water use may increase the amount of recharge, but it may also indicate poor irrigation efficiency and water consumption.

In addition, agricultural return streams may contain dissolved salts, fertilisers and residues of agrochemicals. Domestic and industrial flows of return can also carry organic and inorganic contaminants if not treated properly. The sustainability value of return flows therefore depends not only on the volume of flows but also on their quality, journey times, spatial distribution and the way they interact with the aquifer.

The findings suggest that groundwater management based solely on increasing recharge is not sufficient. In particular, artificial recharge or deliberate infiltration of return flows cannot compensate for the uncontrolled removal of agricultural land indefinitely. A sustainable strategy requires a simultaneous reduction in the demand for groundwater, an increase in the efficiency of irrigation, changes in cropping practices, control of illegal groundwater pumping and continuous monitoring of groundwater levels and quality. Return flows may be integrated into the integrated management framework following a quantitative estimation and qualitative evaluation. Priority should be given to treated and controlled return flows and to recharge zones with an adequate natural mitigation capability.

Conclusions

This study assessed the groundwater balances and the role of return flows in the basins of Sarab and Asbforoushan. Both aquifers have seen a general decrease in their groundwater levels in the last few decades. Although precipitation contributes to recharge, its role is limited and the main pressure is exerted by abstraction and human water use. Border inflows, river recharge and return flows are the main components of recharge, while the main discharge mechanisms are wells, aquifers, springs and agricultural abstraction. The Sarab aquifer showed a slightly positive balance of approximately +2.8 million m^3, while the Asbforoushan showed a negative balance of approximately -1.081- million m^3. The predominant discharge was agricultural by-product, accounting for around 85 percent in Sarab and 46 percent in Asb-Foroushan. Return flows can partially compensate for groundwater depletion and promote indirect recharge, but without effective control of abstraction they cannot guarantee sustainability. Their use also requires strict management of water quality, as uncontrolled re-injection can introduce salts, nutrients and contaminants into the water. Sustainable management should therefore include demand reduction, improved irrigation efficiency, crop optimisation, control of illegal wells, monitoring of groundwater and carefully planned recharge projects based on hydrological feasibility and water quality assessments.

هیدروژئولوژی

Homepage: https://hydro.tabrizu.ac.ir/

هیدروژئولوژی، سال دهم، شماره ۲، زمستان ۱۴۰۴

ارزیابی نقش آب‌های برگشتی در جبران کسری مخزن و پایداری آبخوان‌های سراب و اسب‌فروشان

ابوالفضل مجنونی هریس[۱*]، محمد خالدی علمداری[۲]، احمد فاخری فرد[۳]، اصغر اصغری مقدم[۴]

۱- استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲- دکترای آبیاری و زهکشی، شرکت آب منطقه ای آذربایجان شرقی، وزارت نیرو، تبریز، ایران.

۳- استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۴- استاد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

*نویسنده مسئول: majnooni@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۰۶

کلیدواژه‌ها:
برداشت از آبخوان، بیلان آب زیرزمینی، تخلیه، تغذیه، زهکشی.

چکیده

در این مطالعه به بررسی بیلان هیدرولوژیکی و نقش جریان‌های برگشتی در تغذیه دو آبخوان شهرستان سراب شامل آبخوان سراب و اسب‌فروشان، واقع در شرق استان آذربایجان شرقی پرداخته شده است. هدف اصلی پژوهش حاضر، شناسایی سهم مؤلفه‌های ورودی و خروجی آبخوان‌ها و ارزیابی نقش آب برگشتی در جبران کسری مخزن و پایداری منابع آب زیرزمینی آبخوان‌های منطقه می‌باشد. برای این منظور، معادله بیلان آب زیرزمینی با درنظرگرفتن تغذیه از بارش، جریان‌های مرزی، تغذیه رودخانه‌ای، آب برگشتی کشاورزی، شرب و صنعت، و نیز برداشت از چاه‌ها، قنوات، چشمه‌ها و زهکشی رودخانه‌ای به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد که در هر دو آبخوان روند نزولی سطح آب زیرزمینی در دهه‌های اخیر تداوم داشته و نوسانات آن‌ها بیش از آنکه تابع بارش مستقیم باشد، تحت تأثیر مصرف آب و فعالیت‌های انسانی قرار دارد. برخلاف روند نزولی هر دو آبخوان در بلند مدت، در آبخوان سراب، بیلان نهایی اندکی مثبت معادل ۲/۸+ و در آبخوان اسب‌فروشان کسری کمتری معادل ۱/۰۸- میلیون مترمکعب تعیین گردید؛ با این حال، در هر دو آبخوان سهم بارش مستقیم حدود ۳ میلیون مترمکعب در تغذیه آبخوانها، ناچیز بوده و بخش قابل‌توجهی از ورودی‌ها از جریان‌های مرزی، تغذیه رودخانه‌ای و آب برگشتی تأمین می‌شود. برداشت کشاورزی بترتیب شامل ۸۵ و ۴۶ درصد از کل برداشت‌های آبخوان سراب و اسبفروشان، مهم‌ترین مؤلفه خروجی در هر دو بوده و فشار اصلی را بر آبخوان‌ها وارد می کند. نتایج این مطالعه نشان داد که پایداری آبخوان‌های مورد مطالعه مستلزم مدیریت تقاضا، افزایش بهره‌وری آبیاری، کنترل برداشت‌های غیرمجاز و تقویت تغذیه غیرمستقیم از طریق آب برگشتی و تغذیه مصنوعی هدفمند می‌باشد.

استناد: مجنونی‌هریس، ابوالفضل.، خالدی‌علمداری، محمد.، فاخری‌فرد، احد.، اصغری‌مقدم، اصغر. (۱۴۰۵). ارزیابی نقش آب‌های برگشتی در جبران کسری مخزن و پایداری آبخوان‌های سراب و اسب‌فروشان. هیدروژئولوژی، ۱۰(۲)، ۱۵۲-۱۳۲. DOI: http//doi.org/10.22034/hydro.2026.74066.1349

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه تبریز.

DOI: http//doi.org/10.22034/hydro.2026.74066.1349

مقدمه

منابع آب زیرزمینی از بنیادی‌ترین ارکان تأمین آب در مقیاس جهانی به شمار می‌روند؛ به طوری که با گسترش شهرنشینی و فزونی تقاضا، نرخ استخراج از این منابع روندی صعودی به خود گرفته است (آبایی و همکاران، ۱۳۹۰). از طرف دیگر هم تغییرات زمانی و مکانی در جریان رودخانه‌ها و شبکه‌های آبیاری، الگوی تغذیه آبخوان‌ها به‌شدت تحت‌تأثیر قرار گرفته است، به طوری‌که افزایش کارایی مصرف آب در بخش کشاورزی، در کنار منافع کوتاه‌مدت، گاه با کاهش جریان‌های برگشتی و در نتیجه تشدید بحران کسری مخازن زیرزمینی همراه بوده است(Maghrebi et al., 2023). با وجود چالش های فوق حدود ۵۰ درصد از جمعیت جهان جهت تأمین آب شرب خود به این ذخایر و مخازن در حال آسیب وابسته‌اند که این میزان وابستگی در ایران، به دلیل حاکمیت شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک، حدود ۶۰ درصد اعلام شده است (Shamsai, 2002). بر اساس گزارش مرکز آمار ایران (SCI, 2023)، در کل کشور بیش از ۸۸۵ هزار حلقه چاه فعال در سفره‌های آب زیرزمینی آبرفتی و سازندهای سخت وجود دارد. این تعداد چاه، نقش استراتژیک آب زیرزمینی را در بخش‌های کشاورزی، شرب، بهداشت و صنعت نشان می‌دهد. با این حال، در سال‌های اخیر دو پدیده مهم رخ داده است: کاهش نزولات جوی و بهره‌برداری بی‌رویه. تلاقی این دو عامل، پیامدهای ناگواری به دنبال داشته است. از جمله این پیامدها می‌توان به افت مستمر تراز سطح ایستابی، فرونشست زمین و تنزل کیفی آبخوان‌ها اشاره کرد. خشکسالی و نوسانات بارش، که در مطالعات متعدد به عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی کشاورزی بررسی شده‌اند، ضرورت ارزیابی و شبیه‌سازی منابع آب را دو چندان کرده است. تعادل پایدار آب زیرزمینی تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی و پارامترهای هیدروژئولوژیکی قرار دارد و مدل‌سازی ریاضی و عددی از قرن نوزدهم تاکنون به عنوان ابزار اصلی مدیریت منابع آب توسعه یافته است (Ahlfeld et al., 2005). آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شوند و نقش حیاتی در کشاورزی، شرب و توسعه پایدار دارند. در ایران، به دلیل کاهش بارش، رشد جمعیت و توسعه کشاورزی، فشار بر آبخوان‌ها به شدت افزایش یافته است. شهرستان سراب در استان آذربایجان شرقی به عنوان یکی از دشت‌های حاصلخیز کشور، طی دهه‌های اخیر با کاهش سطح آب زیرزمینی، افت کیفیت و مشکلات ناشی از برداشت بی‌رویه در منابع آب زیرزمینی خود مواجه بوده است (Esfandiari et al., 2018). یکی از فرآیندهای مهم در پایداری آبخوان‌ها، نفوذ آب برگشتی ناشی از آبیاری و پساب‌های کشاورزی است که می‌تواند بخشی از کسری مخزن آب زیرزمینی را جبران کند (Sedghi et al., 2020). با توجه به اینکه حدود ۶۰ درصد آب شرب ایران از منابع زیرزمینی تأمین می‌شود (Shamsai, 2002)، بررسی نقش آب برگشتی در تغذیه آبخوان‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که مدیریت نامناسب منابع آب و تغییرات اقلیمی موجب کاهش میانگین سالانه تغذیه آبخوان‌ها در ایران به میزان حدود ۳/۸ میلی‌متر در سال شده است(Noori et al., 2023). این کاهش بیانگر ضرورت توجه به منابع تغذیه مصنوعی و طبیعی، از جمله نفوذ آب برگشتی، در مدیریت پایدار آبخوان‌ها است. مطالعات متعددی در ایران و جهان به بررسی نقش آب برگشتی در تغذیه آبخوان‌ها پرداخته‌اند. این مطالعات تایید کردند که تعادل میان برداشت‌های انسانی و منابع تجدیدپذیر آب زیرزمینی، شاخصی کلیدی برای پایداری یا ناپایداری منابع آب است (Gleeson et al., 2012). خالدی‌علمداری و همکاران (Khaledi-Alamdari et al., 2022) برای آبخوان شبستر نشان دادند که مدیریت برداشت، به‌ویژه کاهش برداشت از چاه‌های مجاز و بستن چاه‌های غیرمجاز، می‌تواند روند افت تراز آب زیرزمینی را متوقف کرده و به پایداری آبخوان کمک کند. در رابطه با مطالعات محلی در دشت سراب، پژوهش‌های انجام‌شده در این دشت نشان داده‌اند که تغییرات بارش و الگوی مصرف آب کشاورزی تأثیر مستقیم بر عمق سطح ایستابی آبخوان‌ها دارد. مدل‌سازی با استفاده از متغیرهای بارش و مصرف آب نشان داده است که افت سطح آب به شدت با افزایش برداشت و کاهش تغذیه طبیعی مرتبط است(Khosravi et al., 2024). همچنین در رابطه با برآورد تغذیه ناشی از آبیاری در مناطق خشک خاورمیانه، استفاده از مدل‌های معکوس و داده‌های سنجش از دور برای برآورد تغذیه

ناشی از بارش و آبیاری نشان داده است که سهم آب برگشتی کشاورزی در برخی مناطق تا ۳۰ درصد کل تغذیه آبخوان‌ها می‌رسد (Ebrahimi et al., 2016). همچنین، مطالعات صورت‌گرفته در آبخوان یزد–اردکان نشان می‌دهد که بهره‌گیری از پساب تصفیه‌شده جهت تغذیه مصنوعی آبخوان، علاوه بر اینکه راهکاری اقتصادی و عملیاتی برای جبران کسری بیلان آب زیرزمینی محسوب می‌شود، می‌تواند به عنوان یک استراتژی پایدار برای مقابله با افت تراز ایستابی و پیشگیری از عوارض ناشی از آن، نظیر فرونشست زمین، در مناطق خشک و نیمه‌خشک لحاظ گردد (Bana Bafroe and Alimohammadi, 2022). این مطالعات نشان می‌دهند که نفوذ آب برگشتی نه تنها یک فرآیند طبیعی مهم در پایداری آبخوان‌هاست، بلکه می‌تواند با مدیریت صحیح به عنوان یک ابزار مؤثر در کاهش بحران آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. بطور کلی شناخت فرایندهای تغذیه آبخوان و چالش‌های مرتبط با برآورد آن، زیربنای مدیریت منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک نظیر حوضه دریاچه ارومیه محسوب می‌شود(De Vries Simmers, 2002).

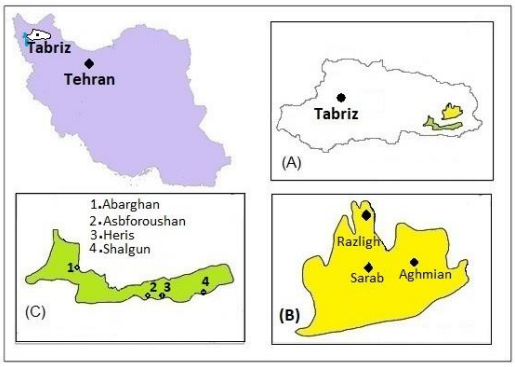
نوری و همکاران (Noori et al., 2023) نشان دادند که تغذیه آبخوان‌ها در ایران توسط بارش مستقیم تأمین نمی‌شود، بلکه توسط مدیریت آب‌های سطحی و جریان‌های مرتبط با فعالیت‌های کشاورزی (آبیاری) تقویت می‌شود. در شهرستان سراب، با توجه به وابستگی قابل‌توجه بخش کشاورزی به منابع آب زیرزمینی و تداوم روند نزولی سطح ایستابی، شناخت دقیق مؤلفه‌های مؤثر بر بیلان آبخوان‌ها و میزان مشارکت هر یک از آن‌ها در تأمین یا تخلیه منابع آب زیرزمینی، برای برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع آب ضروری است. بر این اساس، پژوهش حاضر با تمرکز بر دو آبخوان سراب و اسبفروشان، به بررسی کمی اجزای بیلان هیدرولوژیکی و شناسایی منابع اصلی تغذیه و تخلیه آبخوان‌ها می‌پردازد. در این راستا، ضمن تعیین سهم تغذیه ناشی از بارش، جریان‌های مرزی و رودخانه‌ای، نقش جریان‌های برگشتی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی، شرب و صنعت نیز به‌صورت کمی ارزیابی می‌شود. هدف اصلی پژوهش، تعیین میزان مشارکت هر یک از مؤلفه‌های ورودی و خروجی در وضعیت بیلان آبخوان‌های مورد مطالعه و به‌طور ویژه، سنجش ظرفیت آب‌های برگشتی در جبران بخشی از کسری مخزن و کاهش عدم تعادل میان تغذیه و برداشت است. همچنین، با مقایسه وضعیت بیلان دو آبخوان، تلاش می‌شود مشخص شود که آیا جریان‌های برگشتی می‌توانند در شرایط کنونی به‌عنوان یک مؤلفه مؤثر در حفظ ذخایر آب زیرزمینی عمل کنند یا خیر. در نهایت، نتایج این بررسی با هدف فراهم‌کردن مبنایی برای ارزیابی وضعیت پایداری آبخوان‌ها و ارائه راهکارهای مدیریتی، از جمله مدیریت برداشت، افزایش بهره‌وری مصرف آب و تقویت تغذیه غیرمستقیم آبخوان‌ها، مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی

دشت سراب به عنوان یک فرونشست زمین‌ساختی میان ارتفاعات سبلان (شمال) و سازندهای مارنی میوسن (جنوب) محصور شده است. مرزهای شمالی و جنوبی این دشت عمدتاً تحت کنترل گسل‌های اصلی منطقه قرار دارند. فرسایش واحدهای آذرین سبلان و انتقال رسوبات توسط رودخانه‌های آغمیون‌چای، تاجیارچای و سایر مسیل‌ها، اصلی‌ترین منبع تغذیه آبرفتی آبخوان را تشکیل می‌دهد. از منظر هیدرولوژیکی، آبخوان سراب با مساحت ۱۸۴ کیلومتر مربع، دارای مرز شمالی با جریان معین (تغذیه از بسترهای رودخانه‌ای) و مرزهای جنوبی، غربی و شرقی با ماهیت ناتراوا (سازندهای مارنی) است که آن را به یک سیستم آبخوان بسته تبدیل کرده است. مطالعات ضخامت‌سنجی نشان می‌دهد بیشینه ضخامت آبرفت در بخش جنوبی (محدوده گسل آغداغلار) به ۲۰۰ متر می‌رسد، در حالی که این مقدار در بخش‌های جنوب‌غربی تا کمتر از ۵۰ متر کاهش می‌یابد.دشت اسب‌فروشان (ارشان بزبان محلی) با مساحتی حدود ۱۷۰ کیلومتر مربع، در گستره‌ای فرونشسته میان ارتفاعات بزقوش و بیرون‌زدگی‌های آغداغلار قرار دارد. الگوی لایه‌بندی آبرفتی در این دشت متشکل از نهشته‌های درشت‌دانه محصور در میان لایه‌های ریزدانه مانند سیلت و رس است که منجر به تشکیل یک سیستم آبخوان تحت‌فشار در بخش‌های میانی شده که در دامنه بزقوش به سفره آزاد می‌پیوندد. مرز جنوبی دشت (حد فاصل حسنجان تا سردها) به عنوان مرز ورودی جریان معین

شناخته می‌شود و سایر جهات آن به واسطه سازندهای ناتراوا محدود شده‌اند. ضخامت آبرفت سطحی در این آبخوان تابع تغییرات مکانی بوده و از بیشینه ۴۰ متر در جنوب، به تدریج به سمت شمال کاهش می‌یابد و در شمال روستای مهین تا حدود ۱۰ متر می‌رسد. شبکه زهکشی اصلی منطقه شامل رودخانه وانق‌چای و شاخه‌های آن است که نقشی اساسی در تغذیه سیستم دارند. در شکل ۱ موقعیت و شکل آبخوان سراب و اسبفروشان نمایش داده شده است.



شکل ۱- موقعیت و شکل حوضه رودخانه آجی چای (A)، آبخوان سراب (B) و اسبفروشان (C).

Figure 1- Location and map of the study area: the river basin of Ajichay (A), Sarab (B) and Asbforoushan (C) aquifers.

معادله بیلان آب زیرزمینی و پارامترهای آن

بیلان آب زیرزمینی آبخوان‌های مورد استفاده به‌صورت معادله ۱ در نظر گرفته شدند:

$$[Q_{UI} + Q_P + Q_{WI} + Q_{SWI} + Q_D] - [Q_{UO} + Q_{WO} + Q_{Ud} + Q_{SWO} + Q_{EV}] = \pm\Delta V \quad (۱)$$

که در آن Q_{UI} حجم جریان زیرزمینی ورودی به محدوده بیلان از سازندهای مجاور، Q_P حجم جریان آب نفوذی از ریزش‌های جوی در گستره آبخوان، Q_{WI} حجم آب برگشتی کشاورزی (چاه‌ها، قنوات و چشمه‌ها و کانال‌ها و رودخانه)، Q_{SWI} حجم آب برگشتی از فاضلاب‌ها شهری و صنعتی، Q_D حجم آب‌زیرزمینی تغذیه شده به وسیله رودخانه‌ها، Q_{UO} حجم جریان آب زیرزمینی خروجی از محدوده بیلان، Q_{Ud} حجم آب برداشتی توسط چاه‌های کشاورزی، Q_{UD} حجم آب‌زیرزمینی تخلیه شده به وسیله رودخانه‌ها، Q_{SWO} حجم آب برداشتی توسط چاه‌های شرب، صنعتی و قنوات، Q_{EV} حجم آب‌زیرزمینی خارج شده از سطح آبخوان بخاطر تبخیر -تعرق و $\pm\Delta v$ تغییرات حجم آب زیرزمینی می‌باشد.

در برآورد حجم جریان آب زیرزمینی مقاطع ورودی به عنوان نقاط تغذیه و مقاطع خروجی به عنوان نقاط تخلیه آبخوان در نظر گرفته می‌شود. حجم جریان آب زیرزمینی در مقاطع مختلف با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است.

$$Q = T.I.W \quad (۲)$$

در این رابطه Q، حجم جریان، T قابلیت انتقال، I شیب هیدرولیکی و W عرض ورودی آب زیرزمینی می‌باشد. قابلیت انتقال یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های هیدرولیکی آبخوان است که قابلیت عبور آب را در تمام ضخامت لایه آبدار نشان می‌دهد و به دلیل تغییر دانه‌بندی و ضخامت لایه آبدار در نقاط مختلف آبخوان متغیر است (Khaledi et al., 2019).

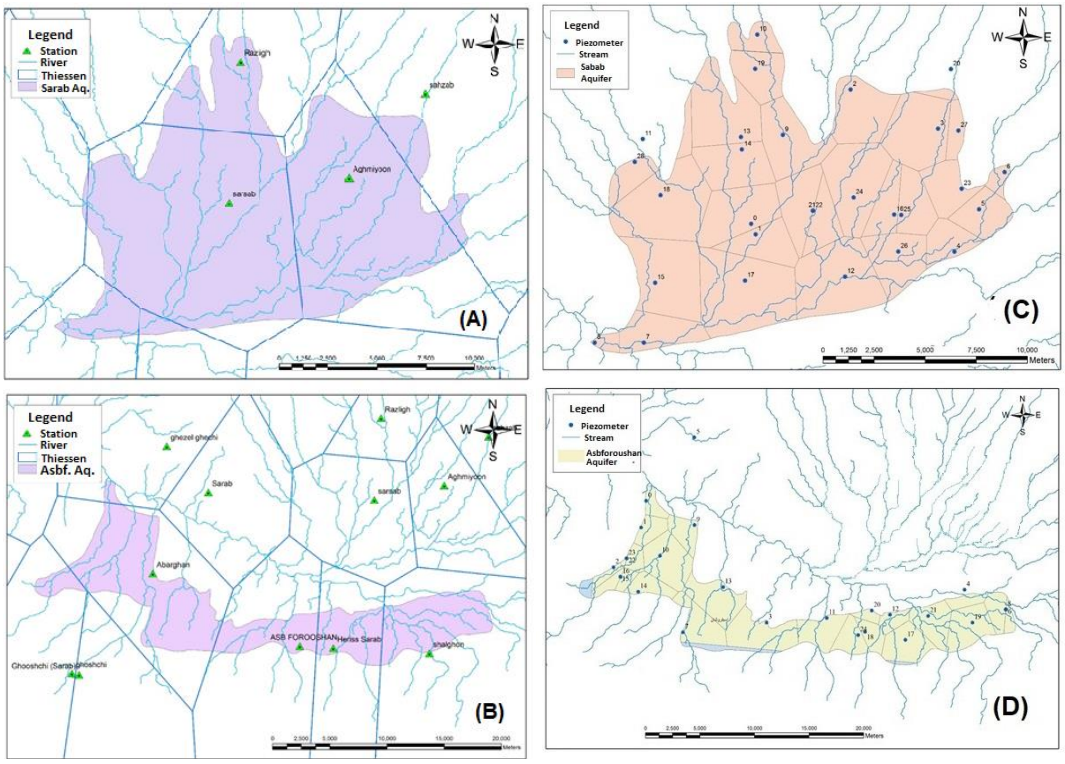
یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر بیلان آبخوان، تغذیه از بارندگی و میزان نفوذ آن می‌باشد. در حالت کلی ارائه معیاری دقیق برای نفوذ بارندگی به آبخوان بسیار دشوار بوده و به طور عام، مراجع معتبر روش‌هایی را بدین منظور ارائه داده‌اند. جهت محاسبه نفوذ از بارش در سطح از رابطه زیر استفاده گردید (FAO, 1973).

$$F = 0.8 \times \sqrt{P - ClogE} \quad (۳)$$

که در آن F میزان نفوذ ماهیانه بر حسب میلی‌متر، P بارش ماهیانه بر حسب میلی‌متر، E تبخیر- تعرق پتانسیل ماهانه بر حسب میلی‌متر و C ضریب ثابتی است که اندیس نفوذ یا اندیس حرارتی نفوذ نامیده می‌شود و به درجه حرارت (T) بستگی دارد و از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$C = 0.9145 \times T^{0.2902} \quad (۴)$$

برای به‌دست آوردن میزان بارش بر روی هر آبخوان، ایستگاه‌هایی که اطلاعات بارندگی در آنها موجود بود با روش تیسن پلیگون‌بندی شده ارائه گردید. همچنین برای بررسی تأثیر هر پیزومتر بر پیکره آبخوان ها نیز از روش پلیگون بندی تیسن و وزن‌دهی به پیزومترها براساس مساحت تحت تأثیر هر پیزومتر استفاده شد. در شکل ۲ علاوه بر محدوده مؤثر ایستگاه‌های بارن‌سنجی، محدوده تحت تأثیر هر پیزومتر نیز مشخص و ضریب تأثیر بر اساس نسبت مساحت محدوده پیزومتر بر مساحت کل آبخوان‌ها محاسبه شده است.



شکل ۲- نقشه‌های موقعیت شبکه‌های پایش: پلیگون‌های تیسن ایستگاه‌های باران‌سنجی دشت سراب (A) و اسبفروشان (B) و شبکه پیزومتری آبخوان‌های سراب (C) و اسبفروشان (D).

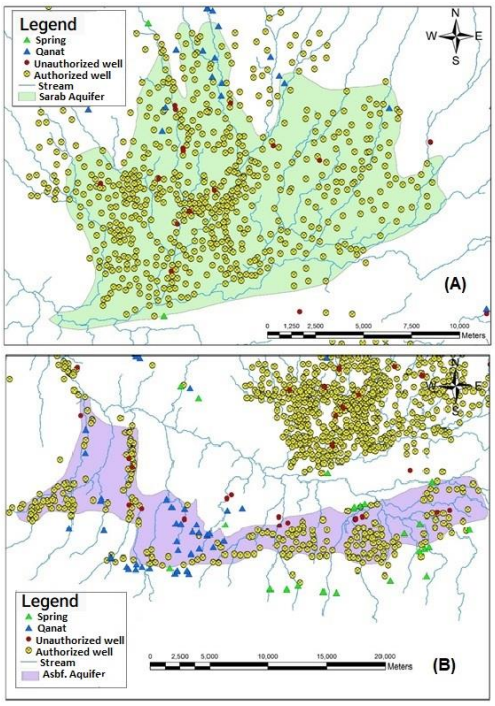
Figure 2- Location maps of monitoring networks: Thiessen polygons of precipitation stations for the Sarab (A) and Asbforoushan (B) plains, and the piezometric networks for the Sarab (C) and Asbforoushan (D) aquifers.

هیدروگراف آبخوان

به‌منظور معرفی کلی وضعیت تراز آب زیرزمینی در آبخوان‌ها معمولاً از هیدروگراف و یا آبنمود آبخوان استفاده می‌شود. هر چند این نمودار قادر به نمایش وضعیت کاملاً دقیقی از آبخوان نبوده ولی می‌توان به عنوان نمایشگری از وضعیت کلی و ارائه نگرشی جامع نسبت به آبخوان مورد استفاده قرار گیرد. هیدروگراف معرف آبخوان‌ها از سال آبی ۶۶-۶۷ تا ۹۳-۹۴ (سال شروع طرح‌های احیای دریاچه ارومیه) و هیدروگراف معرف برای سال آبی ۹۳-۹۴ ترسیم و روند تغییرات سالانه منتهی به وضعیت خشکی دریاچه ارومیه و ماهانه مورد بررسی قرار گرفت.

موقعیت چاه‌ها، چشمه‌ها و قنوات موجود

عظیم‌ترین خروجی از آبخوان‌ها، عناصر بهره‌برداری از این پیکره‌ها هستند. که چاه‌ها به طور پراکنده و متراکم در حال تخلیه آبخوان می‌باشند. در شکل ۳ موقعیت و پراکنش چاه‌ها، چشمه‌ها و قنوات موجود در آبخوان سراب و اسبفروشان نشان داده‌شده است. چاه‌های بهره‌برداری که شامل چاه‌های مجاز و غیرمجاز می‌باشند به منظور دقت در عملیات محاسبه بیلان، میزان تخلیه آن‌ها در سال آبی ۹۳-۹۴ مد نظر قرارگرفته و همچنین چاه‌های غیرمجازی که تا سال ۱۳۹۴ مسدود نشده‌اند اعمال گردید.



شکل ۳- موقعیت چاه‌ها، چشمه‌ها و قنوات آبخوان سراب (A) و اسبفروشان (B).

Figure 3- Locations of wells, springs, and Qantas in the Sarab aquifer (A) and the Asbforoushan aquifer (B).

موقعیت رودخانه‌ها، زهکش‌ها، تغذیه و تخلیه آن‌ها

به‌طور کلی آبخوان سراب و اسبفروشان دارای رودخانه دائمی نبوده و ازآنجاکه عمده ورودی از جبهه‌های آب زیرزمینی لحاظ شده‌اند. با توجه به توپوگرافی منطقه و جنس سازندهای مسیر رودخانه‌ها و با در نظر گرفتن دبی فصلی رودخانه‌ها، آبخوان سراب به میزان ۷ و اسبفروشان بمیزان ۴ میلیون مترمکعب از طریق رودخانه‌ها تغذیه و بترتیب برابر ۰/۵ و ۰/۴ میلیون مترمکعب زهکشی می‌گردد (Fakheri-Fard et al., 2018) همچنین در این مطالعه به علت پایین بودن سطح آب تبخیر از آبخوان‌های مورد مطالعه در نظر گرفته نشده است.

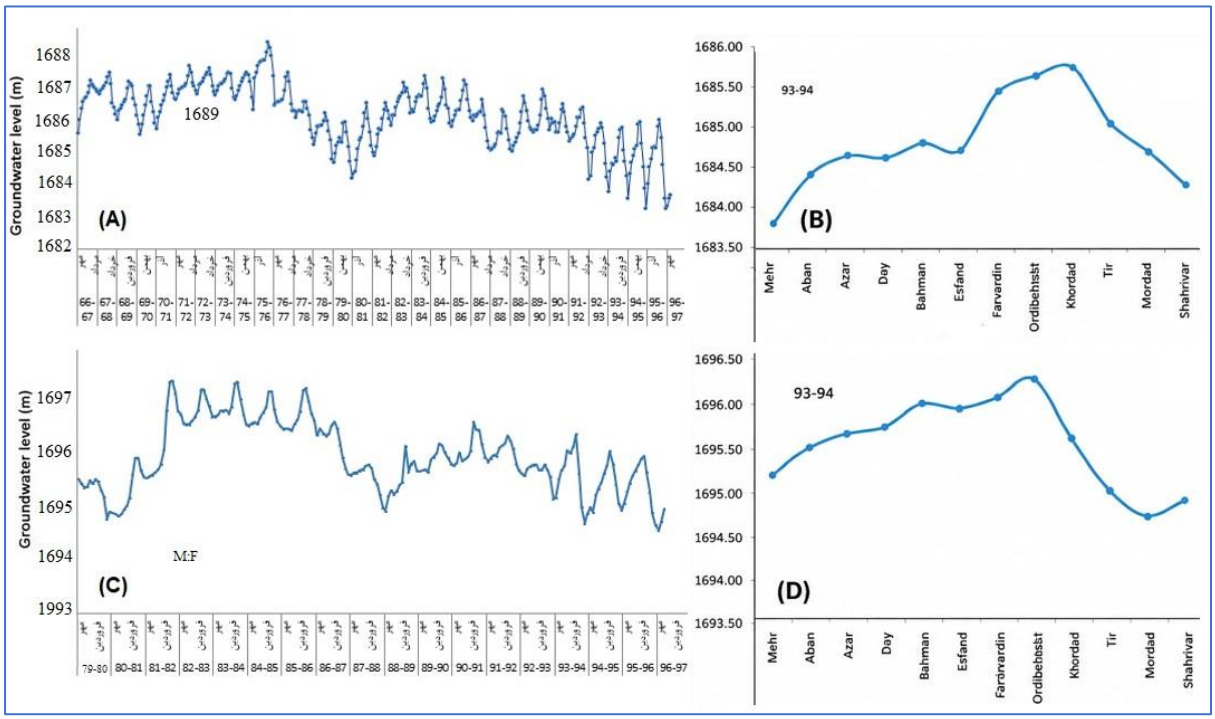
برآورد جریان‌های ورودی و خروجی در آبخوان‌های سراب و اسبفروشان

جهت تعیین دقیق مقاطع ورودی و خروجی جریان آب زیرزمینی، از تلفیق نقشه‌های تراز سطح آب و خطوط جریان استفاده گردید. با توجه به ماهیت دایمی جریان آب در این آبخوان‌ها و نوسانات فصلی سطح ایستابی، جهت ارتقای دقت محاسبات و کاهش خطای ناشی از تغییرات کوتاه‌مدت، از داده‌های میانگین‌گیری شده کل سال استفاده شد. این رویکرد به ویژه در تعریف جبهه‌های هیدرولیکی که در طول سال دارای تغییرات دینامیکی هستند، به عنوان یک روش استاندارد و قابل اعتماد برای شناسایی ورودی‌های اصلی و خروجی‌ها در مدل‌های مفهومی هیدروژئولوژیک لحاظ گردید.

نتایج و بحث

تحلیل و تفسیر هیدروگراف‌های آبخوان‌های سراب و اسبفروشان

در شکل ۴ وضعیت تراز آب زیرزمینی دو آبخوان سراب و اسبفروشان از طریق ترسیم و تحلیل هیدروگراف‌های بلندمدت و هیدروگراف‌های معرف سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ مورد بررسی قرار گرفت. هیدروگراف آبخوان سراب (نمودار A) که تغییرات سطح ایستابی را از سال ۶۷ تا ۹۷ نمایش می‌دهد، بیانگر یک نوسان فصلی منظم در کنار یک روند کلی نزولی در میان‌مدت است. افت تراز آب در سال‌های میانی دوره (حدود سال‌های ۷۵ تا ۸۰) با شدت بیشتری مشهود است که می‌تواند ناشی از برداشت‌های بی‌رویه یا دوره‌های خشکسالی منطقه‌ای باشد. با این حال، در سال‌های اخیر این روند نزولی با شیب ملایم‌تری ادامه یافته است. هیدروگراف آبخوان اسبفروشان (نمودار C) از سال ۷۹ تا ۹۷، الگویی مشابه اما با دامنه نوسانات متفاوت را نشان می‌دهد. در حالی که این آبخوان نیز در مجموع روند نزولی را تجربه کرده است، بررسی دقیق‌تر سال‌های انتهایی (۹۴ تا ۹۷) نشان می‌دهد که شدت افت سطح آب نسبت به دهه‌های پیشین کاهش یافته است که ممکن است بازتابی از تغییر در مدیریت منابع آب یا کاهش نرخ بهره‌برداری در این منطقه باشد. همچنین هیدروگراف‌های معرف آبخوان سراب و اسبفروشان را برای سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ به‌منظور واکاوی دقیق‌تر نوسانات درون‌سالی در شکل ۴ ارائه شده‌اند.



شکل ۴- هیدروگراف‌های آبخوان‌های مورد مطالعه: (A) هیدروگراف بلندمدت آبخوان سراب، (B) هیدروگراف معرف (فصلی) آبخوان سراب، (C) هیدروگراف بلندمدت آبخوان اسبفروشان و (D) هیدروگراف معرف (فصلی) آبخوان اسبفروشان.

Figure 4- Groundwater hydrographs of the studied aquifers: (A) long-term hydrograph of the Sarab aquifer, (B) representative (seasonal) hydrograph of the Sarab aquifer, (C) long-term hydrograph of the Asbforoushan aquifer, and (D) representative (seasonal) hydrograph of the Asbforoushan aquifer.

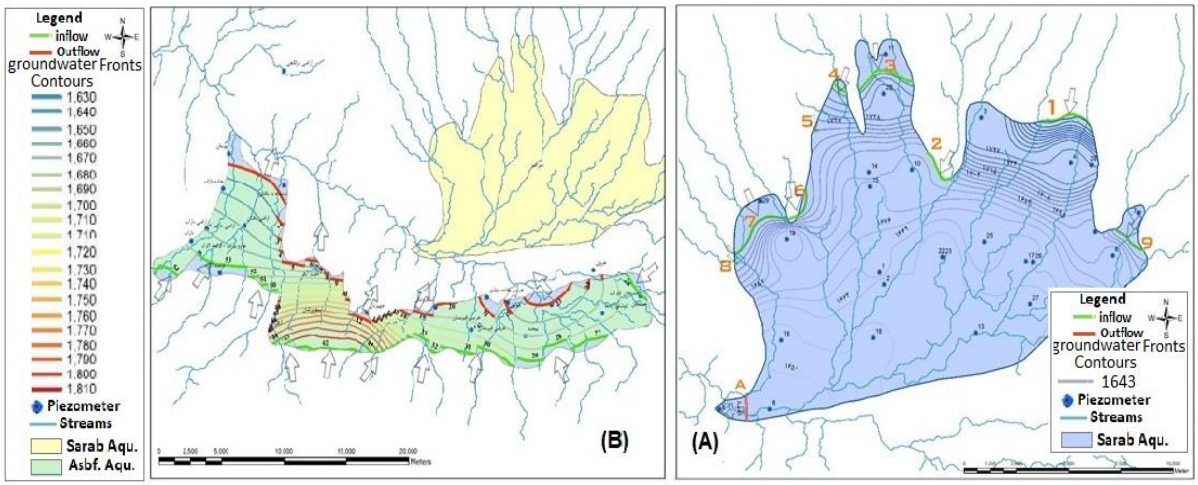
هیدروگراف معرف سراب (B) نشان‌دهنده یک الگوی تغذیه و تخلیه کلاسیک است. تراز آب زیرزمینی با شروع سال آبی روندی صعودی را تجربه کرده و در اواخر بهار (خرداد ماه) به حداکثر مقدار خود می‌رسد که نشان‌دهنده زمان تأخیر نفوذ نزولات جوی و تغذیه آبخوان است. پس از این دوره، روند تخلیه به دلیل آغاز فصل آبیاری و کاهش بارندگی آغاز شده و افت تراز را تا پایان شهریور ماه به دنبال دارد. مطابق روند آبخوان معرف اسب‌فروشان (D) تغییرات سطح ایستابی در طول سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ محدودتر بوده و پایداری نسبی را نشان می‌دهد. با این حال، تراز نهایی آبخوان در انتهای سال آبی نسبت به ابتدای آن با حدود ۰/۳ متر افت مواجه شده است. این کاهش جزئی، اگرچه در مقیاس سالانه ناچیز به نظر می‌رسد، اما نشان‌دهنده پیشی گرفتن میزان تخلیه (مصارف کشاورزی و پمپاژ) از نرخ تغذیه طبیعی در این بازه زمانی است که تداوم آن در بلندمدت می‌تواند به‌عنوان یک هشدار برای مدیریت منابع آب تلقی شود. به‌طور کلی، هر دو آبخوان تحت تأثیر نوسانات فصلی و برداشت‌های انسانی قرار دارند. هیدروگراف‌های معرف بیانگر آن هستند که اگرچه در مقیاس فصلی، آبخوان‌ها نسبت به تغذیه واکنش نشان می‌دهند، اما بیلان منفی در مقیاس سالانه منجر به کاهش تدریجی تراز سطح ایستابی در هر دو منطقه شده است. ضرورت اتخاذ راهکارهای مدیریت تقاضا و کنترل برداشت‌ها جهت تعادل‌بخشی به سفره‌های آب زیرزمینی در این مناطق اجتناب‌ناپذیر است.

تحلیل هیدرودینامیکی و برآورد جریان‌های ورودی و خروجی

بررسی قسمت (A) شکل ۵ و داده‌های جدول ۱ نشان داد که آبخوان سراب تحت تأثیر ۹ جبهه ورودی اصلی قرار دارد که عمدتاً در بخش شمالی آبخوان متمرکز شده‌اند. محاسبات بیلان نشان داد که مجموع جریان ورودی به این آبخوان بالغ بر ۴۶ میلیون مترمکعب در سال است. در مقابل، خروجی‌های سیستم که در بخش جنوب‌غربی قابل مشاهده هستند (مقطع A)، سهم بسیار ناچیزی از بیلان کلی یعنی کمی بیش از ۱۷۲ هزار متر مکعب در سال را بخود اختصاص داده‌اند. این عدم تقارن شدید میان ورودی و خروجی سطحی، نشان‌دهنده پتانسیل بالای آبخوان در ذخیره‌سازی آب و یا وجود تخلیه‌های زیرزمینی (نظیر برداشت‌های پمپاژ یا خروج

به حوضه‌های مجاور) است که در این بیلان مرزی لحاظ نشده‌اند. این ویژگی بیانگر یک آبخوان با بیلان مثبت و نرخ تجدیدپذیری بالاست که عمدتاً از تغذیه ارتفاعات شمالی شهرستان سیراب می‌شود. بررسی هیدرودینامیکی آبخوان اسب‌فروشان (شکل B و جدول ۲) نیز نشان‌دهنده یک سیستم هیدرولیکی پیچیده‌تر در مقایسه با آبخوان سراب است. در این آبخوان، الگوی توزیع جریان‌ها بر اساس تغییرات تراز آب زیرزمینی، جبهه‌های ورودی را عمدتاً در سمت شرق و خروجی‌ها را در سمت غرب متمرکز کرده است. مطابق داده‌های جدول ۲، مجموع ورودی به این آبخوان چیزی حدود ۴۶ میلیون مترمکعب در سال برآورد شده است، در حالی که مجموع خروجی‌ها بالغ بر ۲۹/۵ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. تفاوت فاحش نرخ خروجی در این آبخوان نسبت به آبخوان سراب، حاکی از یک جریان زیرزمینی فعال‌تر و احتمالا متأثر از بهره‌برداری‌های گسترده‌تر در طول مسیر جریان است. بیلان نهایی در این آبخوان (حدود ۱۸ میلیون مترمکعب در سال) مثبت ارزیابی می‌شود که نشان‌دهنده توانمندی سیستم در مدیریت آب‌های زیرزمینی علیرغم خروجی‌های قابل توجه است. مطالعات مقایسه‌ای انجام شده بر روی هر دو آبخوان سراب و اسب‌فروشان با استفاده از روش تحلیل جبهه‌های جریان، اثربخشیِ استفاده از نقشه‌های میانگین‌گیری شده را برای مدیریت منابع آب زیرزمینی تایید می‌کند. نتایج نشان داد در حالی که هر دو آبخوان دارای ورودی‌های سالانه مشابهی (در حدود ۴۶ میلیون مترمکعب) هستند، رفتار هیدرودینامیکی آن‌ها در بخش خروجی تفاوت‌های چشمگیری دارد. آبخوان سراب با تکیه بر تغذیه شمالی و خروجی بسیار ناچیز، سیستمی با ذخیره‌سازی بالا محسوب می‌شود، در حالی که آبخوان اسب‌فروشان با خروجی‌های متناوب و قابل‌توجه، یک سیستم هیدرولیکی پویاست که نیازمند مدیریت دقیق‌ترِ بهره‌برداری‌های مجاز در طول محور شرقی-غربی خود می‌باشد.

قابلیت انتقال به‌کار رفته در این محاسبات از نتایج حاصل از آزمون پمپاژ و همچنین خروجی مدل سازی عددی صورت گرفته روی این آبخوان استخراج و مورد استفاده قرار گرفته است (Vadiati, 2016). با بررسی صورت گرفته جبهه‌های اصلی ورودی به طور کلی در شمال و جبهه خروجی اصلی در جنوب غربی آبخوان سراب تشخیص داده شده است که این خروجی در مقیاس خود بسیار ناچیز به حساب می‌آید.



شکل ۵- موقعیت مقاطع ورودی و خروجی آب زیرزمینی در آبخوان سراب (A) و آبخوان اسبفروشان (B).

Figure 5- Locations of groundwater inflow and outflow cross-sections in the Sarab aquifer (A) and the Asbforoushan aquifer (B).

جدول ۱- مشخصات و میزان جریان ورودی و خروجی از مقاطع آبخوان سراب.

Table 1- Characteristics and groundwater inflow and outflow rates through the boundaries of the Sarab aquifer.

Boundary Name	Type	Length (m)	Transmissivity (m^2/day)	Gradient (per 1000)	Discharge (m^3/year)
1	Inflow	2500	300	30	8212500
2	Inflow	1940	320	5	1132960
3	Inflow	3036	350	30	11635470
4	Inflow	770	350	15	1475513
5	Inflow	301	220	12	290044

Boundary Name	Type	Length (m)	Transmissivity (m²/day)	Gradient (per 1000)	Discharge (m³/year)
6	Inflow	1801	300	18	3549771
7	Inflow	3254	400	27	12827268
8	Inflow	218	420	18	601549
9	Inflow	1754	350	30	6722205
A	Outflow	1049	150	3	172298
Total Inflow					46447279
Total Outflow					172298
Net Total					46274981

جدول ۲- مشخصات و میزان جریان ورودی و خروجی از مقاطع آبخوان اسبفروشان.

Characteristics and groundwater inflow and outflow rates through the boundaries of the Asbforoushan aquifer. –Table 2

Boundary ID	Type	Length (m)	Transmissivity (m²/day)	Gradient (‰)	Discharge (m³/year)	Boundary ID	Type	Length (m)	Transmissivity (m²/day)	Gradient (‰)	Discharge (m³/year)
1	Outflow	5726	250	11	5747473	28	Inflow	1935	250	14	1977570
2	Outflow	864	250	12	946080	29	Inflow	2263	250	13	2684484
3	Outflow	387	220	15	466142	30	Inflow	3344	250	20	6102800
4	Outflow	368	200	15	402960	31	Inflow	2928	250	15	4007700
5	Outflow	1891	50	25	862769	32	Inflow	778	250	18	1277865
6	Outflow	1051	200	22	1687906	33	Inflow	1398	250	21	2678918
7	Outflow	358	180	33	776180	34	Inflow	374	200	22	600644
8	Outflow	477	150	31	809588	35	Inflow	184	200	22	295504
9	Outflow	1092	120	26	1243570	36	Inflow	195	200	20	284700
10	Outflow	195	100	31	220643	37	Inflow	176	250	22	353320
11	Outflow	384	50	31	217248	38	Inflow	120	250	23	251850
12	Outflow	1992	150	28	3053736	39	Inflow	210	250	23	440738
13	Outflow	253	120	29	321361	40	Inflow	336	200	27	662256
14	Outflow	125	150	33	225844	41	Inflow	802	200	24	1405104
15	Outflow	183	150	25	250481	42	Inflow	5211	250	16	7608060
16	Outflow	229	150	25	313444	43	Inflow	732	200	23	1229028
17	Outflow	380	150	29	603345	44	Outflow	806	200	23	1353274
18	Outflow	885	150	22	1065983	45	Outflow	483	50	22	193925
19	Outflow	1692	150	16	1482192	46	Outflow	427	50	23	179233
20	Outflow	1986	200	10	1449780	47	Outflow	317	50	23	133061
21	Outflow	1898	200	8	1108432	48	Outflow	197	50	20	71905
22	Outflow	1123	200	8	655832	49	Inflow	235	50	25	107219
23	Outflow	4590	200	10	3350700	50	Inflow	828	250	17	1130303
24	Outflow	760	200	8	443840	51	Inflow	574	250	18	754336
25	Inflow	372	200	10	203670	52	Inflow	885	250	15	969075
26	Inflow	2521	250	7	1288231	53	Inflow	4173	250	14	6397209
27	Inflow	3240	250	14	3311280						
Net Total (Inflow − Outflow)			18441042								

نتایج تغذیه مستقیم از بارندگی در آبخوان‌های سراب و اسب‌فروشان

بر اساس محاسبات انجام‌شده به روش فائو، مقادیر ماهانه پارامترهای هیدروکلیماتولوژی و حجم نفوذ حاصل از بارش بر روی سطح دشت‌های سراب و اسب‌فروشان برای سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ محاسبه گردید. جزئیات این محاسبات گام‌به‌گام به تفکیک ماه‌های مختلف سال در جدول۳ برای سراب و در جدول ۴ برای اسبفروشان ارائه شده است. بر اساس نتایج گزارش شده در جدول ۳، فرآیند نفوذ آب ناشی از بارندگی در دشت سراب تحت تأثیر مستقیم نوسانات فصلی بارش و نرخ تبخیر- تعرق پتانسیل قرار دارد. تحلیل داده‌های ماهانه نشان می‌دهد که بیشترین میزان نفوذ ماهانه در ماه ۷ (مهر) با ۳/۸۶ میلی‌متر رخ داده است که با وقوع بیشترین میزان بارش در این بازه (۹۶/۶۴ میلی‌متر) همبستگی مستقیم دارد. در مقابل،

در ماه‌های گرم سال (به‌ویژه ماه‌های ۴ و ۵)، با وجود تداوم بارش‌های اندک، نرخ بالای تبخیر- تعرق پتانسیل (بالای ۱۶۰ میلی‌متر) منجر به صفر شدن میزان نفوذ مؤثر به آبخوان شده است. در مجموع، از کل ۲۶۹/۱۲ میلی‌متر بارندگی سالانه، تنها ۱۷/۱۳ میلی‌متر آن به صورت نفوذ عمقی به آبخوان راه یافته است؛ به عبارت دیگر، سهم تغذیه طبیعی از بارندگی مستقیم در این منطقه تنها حدود ۶/۳ درصد از کل بارش سالانه برآورد می‌شود که با در نظر گرفتن مساحت روی آبخوان که ۱۸۳/۵ کیلومترمربع می‌باشد حجم آبی که از طریق بارندگی در سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ به آبخوان نفوذ می‌کند ۳/۱ میلیون مترمکعب می‌باشد. تحلیل این یافته‌ها در تقابل با شرایط بحرانی دشت سراب، نتایج راهبردی مهمی را در پی دارد. نرخ بسیار ناچیز تغذیه طبیعی نشان می‌دهد که تکیه بر بارش‌های جوی برای جبران کسری مخزن و مقابله با افت تراز سطح ایستابی، راهکاری ناکارآمد است. این موضوع اهمیت استراتژیک «آب برگشتی حاصل از آبیاری» را به عنوان یک منبع تغذیه غیرطبیعی و مکمل برجسته می‌سازد. یافته‌های این پژوهش با گزارش نوری و همکاران (Noori et al. 2023) مطابقت دارد. آنها نشان دادند که در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، نفوذ جریان‌های سطحی و آب‌های حاصل از فعالیت‌های انسانی (مانند آبیاری) سهمی بسیار فراتر از بارندگی مستقیم در تغذیه آب‌های زیرزمینی دارند. در کل یافته‌های جدول ۳ مؤید آن است که در بیلان هیدرولوژیکی دشت سراب، جریان‌های برگشتی ناشی از مصارف کشاورزی و پساب‌ها نه تنها یک مؤلفه جانبی، بلکه یکی از ارکان اصلی در تعدیل کسری مخزن و حفظ پایداری آبخوان محسوب می‌شوند؛ عاملی که در مدیریت منابع آب منطقه باید به عنوان محور اصلی تحلیل‌های آتی مورد توجه قرار گیرد. با توجه به جدول ۴، مجموع بارندگی سالانه در آبخوان اسب‌فروشان برابر ۲۷۹/۰۲ میلی‌متر و مجموع تبخیر - تعرق پتانسیل سالانه برابر ۲ میلی‌متر برآورد شده است. همچنین مجموع نفوذ حاصل از بارندگی در این آبخوان ۱۷/۷۸ میلی‌متر محاسبه گردید که نشان می‌دهد تنها بخش محدودی از بارش سالانه توانسته است به تغذیه مستقیم آبخوان اختصاص یابد. بررسی مقادیر ماهانه نشان می‌دهد که بیشترین مقدار نفوذ مربوط به برج ۷ با ۳/۹۳ میلی‌متر بوده و پس از آن ماه‌های ۹ و ۱ به‌ترتیب با ۲/۰۵ و ۲ میلی‌متر در مراتب بعدی قرار دارند. کمترین مقدار نفوذ نیز در ماه ۵ برابر صفر و در ماه ۳ برابر ۰/۱۱ میلی‌متر محاسبه شده است. این تغییرات بیانگر آن است که توزیع زمانی نفوذ در آبخوان اسب‌فروشان یکنواخت نبوده و بیشترین تغذیه مستقیم در ماه‌هایی رخ داده که هم‌زمانی مناسب‌تری میان بارش و شرایط حرارتی برقرار بوده است؛ در مقابل، در ماه‌هایی که تبخیر- تعرق پتانسیل بالا و بارش ناچیز بوده، نفوذ مؤثر به حداقل رسیده است. نتایج حاصل از محاسبات نشان داد که در سال آبی ۹۴-۱۳۹۳، نرخ نفوذ از بارندگی به آبخوان در حدود ۶ درصد از بارش کل سالانه برآورد شده است. با لحاظ نمودن مساحت ۱۷۰ کیلومترمربعی سطح آبخوان، حجم آبی که از طریق نفوذ مستقیم حاصل از بارش به مخزن زیرزمینی تزریق می‌شود، معادل ۳/۰۲ میلیون مترمکعب در سال برآورد می‌گردد. این مقدار اندک نشان می‌دهد که تغذیه مستقیم بارش به‌تنهایی نمی‌تواند کسری مخزن را جبران کند؛ بنابراین شناسایی مناطق مستعد تغذیه مصنوعی ضروری است.

جدول ۳- مقادیر نفوذ ماهانه محاسبه شده با روش پیشنهادی فائو برای سراب.

Table 3– Calculated monthly groundwater recharges using the FAO recommended method for the Sarab plain.

Month	Precipitation (mm/month)	Potential Evapotranspiration (mm/month)	Temperature (°C)	Coefficient C (-)	Infiltration Rate F (mm/month)
7	96.64	64.8	11.54	1.86	3.86
8	17.72	13.84	11.31	1.85	1.55
9	27.76	18.3	11.04	1.84	2.02
10	3.39	20.68	10.73	1.82	0.4
11	18.48	32.93	10.50	1.81	1.56
12	18.65	45.85	10.26	1.80	1.58
1	30.19	79.8	9.95	1.78	2.07
2	33.78	124.89	9.51	1.76	2.19
3	5.67	150.18	9.09	1.74	0.55
4	2.45	164.13	8.93	1.73	0

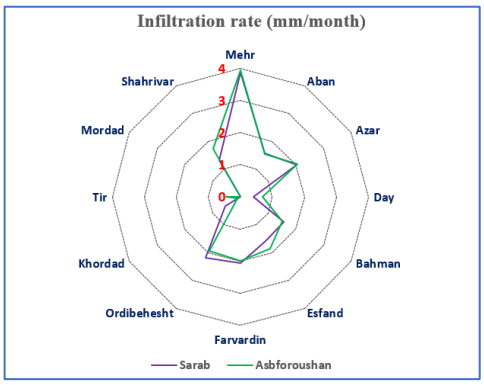
Month	Precipitation (mm/month)	Potential Evapotranspiration (mm/month)	Temperature (°C)	Coefficient C (-)	Infiltration Rate F (mm/month)
5	0	160.01	8.66	1.71	0
6	14.39	111.88	8.73	1.71	1.32
Total	269.12	1005.28	120.23	—	17.13

جدول ۴- محاسبه نفوذ از بارندگی با روش فائو برای اسبفروشان.

Table 4- Calculated monthly groundwater recharges using the FAO recommended method for the Asbforoushan plain.

Month	Precipitation (mm/month)	Potential Evapotranspiration (mm/month)	Temperature (°C)	Coefficient C (-)	Infiltration Rate F (mm/month)
7	99.73	64.8	11.54	1.86	3.93
8	17.43	31.84	11.31	1.85	1.53
9	28.59	18.3	11.04	1.84	2.05
10	5.45	20.68	10.73	1.82	0.7
11	17.02	32.92	10.50	1.81	1.51
12	24.39	45.85	10.26	1.80	1.85
1	28.28	79.8	9.95	1.78	2
2	27.05	124.89	9.51	1.76	1.93
3	3.85	150.18	9.09	1.74	0.11
4	5.11	164.13	8.93	1.73	0.45
5	0.03	160.01	8.66	1.71	0
6	22.1	111.88	8.73	1.71	1.72
Total	290.02	1005.28	120.23	—	17.78

جهت مقایسه دو آبخوان به تغییرات فصلی اقلیم، روند تغییرات ماهانه حجم نفوذ بارندگی در شکل ۶ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، توزیع زمانی نفوذ بارندگی در هر دو دشت از الگوی فصلی کاملاً مشابهی پیروی می‌کند که به طور مستقیم تحت تأثیر تقابل بارندگی و تبخیر- تعرق پتانسیل قرار دارد. انطباق نمودارها نشان می‌دهد که دشت سراب در فصول مرطوب حجم نفوذ بالاتری را نسبت به دشت اسبفروشان ثبت می‌کند. این اختلاف ناشی از تفاوت‌های فیزیوگرافی، مساحت حوضه و توزیع مکانی بارندگی در پلیگون‌های تیسن مربوط به هر دشت است که شرایط نفوذپذیری مساعدتری را در دشت سراب رقم زده است.



شکل ۶- نمودار مقایسه ماهانه حجم نفوذ بارندگی در آبخوان سراب و اسبفروشان .

Figure 6- Monthly comparison of rainfall infiltration volumes in the Sarab and Asbforoushan aquifers.

تحلیل بیلان خروجی و مصارف آبخوان‌های مورد مطالعه

توزیع و ترکیب منابع برداشت در دو آبخوان سراب و اسبفروشان نشان می‌دهد که الگوی تخلیه، عمدتاً تحت تاثیر برداشت از چاه‌های مجاز است و منابع سنتی (قنات و چشمه)

سهمی بسیار محدود در بیلان خروجی دارند. مطابق جدول ۵، در آبخوان سراب بار اصلی تأمین نیاز آبی بر عهده ۵۴۹ حلقه چاه مجاز با تخلیه سالانه حدود ۶۵/۵ میلیون مترمکعب است؛ در حالی‌که سهم چاه‌های غیرمجاز ۰/۰۴۸ و قنوات ۰/۲۱۷ میلیون مترمکعب در مقایسه با برداشت چاه‌های مجاز ناچیز بوده و بیانگر گذار سیستم از اتکای تاریخی به منابع پایدارتر (قنوات) به سمت بهره‌برداری فشرده با پمپاژ است. در آبخوان اسب‌فروشان نیز همین الگو تکرار می‌شود؛ به‌طوری که ۲۱۹ حلقه چاه مجاز با تخلیه سالانه حدود ۲۷ میلیون مترمکعب مؤلفه غالب خروجی را تشکیل می‌دهد و در مقابل، مجموع تخلیه قنوات ۰/۱۲۳ و چشمه‌ها ۰/۰۰۹ سهمی بسیار اندک از کل برداشت دارد.

تفکیک مصارف چاه‌های مجاز (جدول ۶) نشان می‌دهد که در هر دو آبخوان، کشاورزی مهم‌ترین عامل فشار بر منابع آب زیرزمینی است، با این تفاوت که شدت این غلبه در سراب بیشتر است. در آبخوان سراب، برداشت کشاورزی با مقدار ۵۷/۹۸ میلیون مترمکعب حدود ۸۷٪ از برداشت چاه‌های مجاز را شامل می‌شود و بخش‌های شرب ۶/۵۱ و صنعت ۰/۰۳۳ میلیون مترمکعب نقش ثانویه دارند. در آبخوان اسب‌فروشان نیز اگرچه کشاورزی همچنان در رتبه نخست با برداشت ۲۵/۹۶ میلیون مترمکعب (حدود ۷۰٪ از برداشت چاه‌های مجاز)، قرار دارد، در جمع‌بندی مدیریتی، ترکیب «برداشت بالای چاه‌های مجاز + سهم ناچیز منابع سنتی» به‌همراه غالب بودن مصارف کشاورزی (به‌ویژه در سراب) نشان می‌دهد که پایداری هر دو آبخوان بیش از هر چیز به کنترل برداشت و بهبود بهره‌وری آبیاری وابسته است. همچنین با توجه به نتایج بخش تغذیه (نفوذ مستقیم بارندگی حدود ۶٪)، اتکای صرف به تغذیه طبیعی برای جبران برداشت‌ها واقع‌بینانه نیست؛ بنابراین، راهبردهای کاهش فشار بر آبخوان به‌ویژه مدیریت «آب برگشتی آبیاری»، اصلاح الگوی کشت، و ارتقای راندمان انتقال و توزیع باید به‌عنوان محور اصلی برنامه‌ریزی احیا و تعادل‌بخشی در هر دو دشت (با تأکید بیشتر بر سراب به دلیل سهم بسیار بالای کشاورزی) مورد توجه قرار گیرد.

جدول ۵- میزان تخلیه سالانه بر اساس پروانه در سال آبی ۱۳۹۳-۹۴ .

Table 5- Annual discharge based on water permits for the 2014–2015 hydrological year.

Aquifer	Authorized Wells		Unauthorized Wells		Qanats		Springs	
	Count	Annual Discharge (m³/year)	Count	Annual Discharge (m³/year)	Count	Annual Discharge (m³/year)	Count	Annual Discharge (m³/year)
Sarab	549	65444835	14	48432	9	2169676	0	0
Asbforoushan	219	27237283	13	101992	21	1233057	2	9460

جدول ۶- وضعیت تخلیه چاه‌های مجاز.

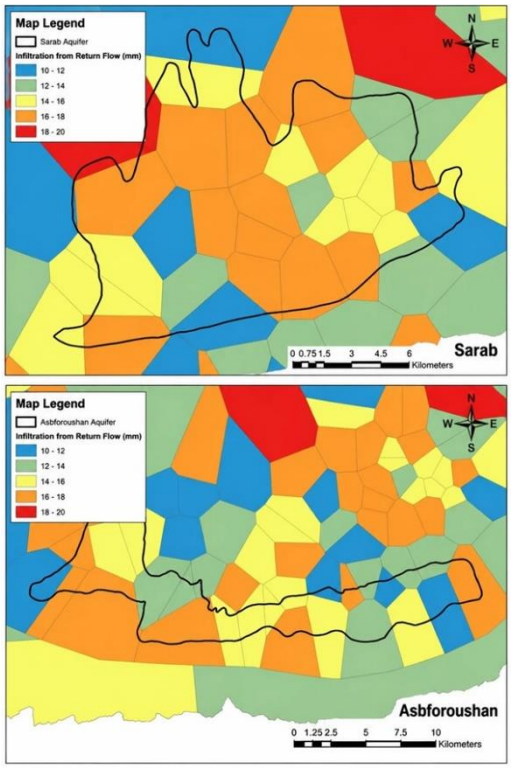
Table 6- Annual discharge of authorized wells.

Aquifer	Agricultural (m³/year)	Industrial (m³/year)	Drinking (m³/year)	Other (m³/year)
Sarab	57975798	334377	6517386	617275
Asbforoushan	25985881	0	1011843	239559

تحلیل مکانی و هیدروژئولوژیکی درصد آب برگشتی در آبخوان‌های سراب و اسبفروشان

بخشی از آب استحصال‌شده از منابع آب زیرزمینی یا سطحی (کشاورزی، شرب و صنعت) پس از مصارف مختلف، مجدداً به صورت نفوذ عمقی به سفره‌های آب زیرزمینی بازمی‌گردد. مقدار آب برگشتی کشاورزی تابع مستقیم بافت خاک، رژیم آبیاری، راندمان کاربرد آب و شرایط هیدرودینامیکی منطقه است. با توجه به تغییرات در نوع بافت خاک مناطق مختلف درصد آب برگشتی کشاورزی برای هر منطقه مقادیر متفاوتی خواهد داشت. این مقدار با استفاده از نقشه بافت خاک برای هر آبخوان قابل استخراج است که در این مطالعه هم صورت گرفته است. بررسی الگوی مکانی آب برگشتی در آبخوان سراب (شکل ۷ قسمت سراب) نشان‌دهنده‌ی یک ناهمگنی ساختاری در توزیع تغذیه ناشی از بهره‌برداری و یا تغییر خصوصیات بافت خاک است. بوقیچی و همکاران (Bughici et al., 2022) نشان دادند بافت خاک یکی از کنترل‌کننده‌های اصلی نفوذ عمقی و بازگشت آب در اراضی کشاورزی است؛ به‌طوری‌که در خاک‌های با نفوذپذیری بالاتر،

سهم آب برگشتی افزایش می‌یابد.بر اساس نتایج بدست امده میانگین نرخ آب برگشتی در سطح این آبخوان حدود ۱۵درصد برآورد شده است. تمرکز مقادیر فراتر از این میانگین (۱۶ تا ۲۰) در بخش‌های مرکزی تا شمال‌شرقی، حاکی از وجود کانون‌های تجمع بهره‌برداری یا بازگشت موضعی آب است. در مقابل، کاهش مقادیر به سمت حاشیه‌های جنوبی و جنوب‌شرقی (کمتراز ۱۵)، بیانگر اثر محدودکننده‌ی شرایط هیدروژئولوژیک و کاهش شدت فعالیت‌های کشاورزی در این نواحی است. این گرادیان مکانی نسبت به مقدار متوسط، لزوم اتخاذ استراتژی‌های مدیریت پهنه‌بندی‌شده را برجسته می‌سازد. مطابق قسمت پایین شکل ۷ برای آبخوان اسبفروشان میانگین نرخ آب برگشتی برابر با ۱۴/۹۷ درصد می‌باشد. بر خلاف آب کشاورزی مقدار آب برگشتی برای شرب و صنعت وابستگی شدیدی به بافت خاک نداشته و با توجه به شبکه‌های انتقال فاضلاب برای هر دشت تعیین گردیده که می‌توان برای دشت سراب و اسبفروشان میزان ۷۰ درصد را در نظر گرفت.



شکل ۷- نقشه درصد نفوذ آب برگشتی کشاورزی به آبخوان.
Figure 7- Map of the percentage of agricultural return flow recharging the aquifer.

موقعیت رودخانه‌ها و زهکش‌ها و تغذیه و تخلیه آن‌ها

رفتار هیدرولوژیکی جریان‌های سطحی ورودی به دشت سراب بر اساس هیدروگراف‌های متوسط ۵ ساله در ایستگاه‌های هیدرومتری «سهزاب» و «مرکید» ارزیابی گردید. براساس نتایج، رژیم جریان در این ایستگاه‌ها فصلی بوده و دبی اوج آن‌ها در ماه‌های فروردین و اردیبهشت به ترتیب به مقادیر ۰/۸۸و ۰/۸۹ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد، در حالی که کمینه جریان در شهریورماه (حدود ۰/۲ مترمکعب بر ثانیه) رخ می‌دهد. با توجه به تخصیص عمده جریان این رودخانه‌ها به مصارف کشاورزی در فصول کشت، بیلان آب عبوری نشان می‌دهد که پس از کسر دبی‌های بهره‌برداری‌شده، به طور میانگین حدود ۲۰ درصد از حجم جریان کل رودخانه‌ها به دلیل ماهیت نفوذپذیری بالای بستر و ویژگی‌های هیدرولیکی رسوبات کواترنری، به درون آبخوان نفوذ عمقی می‌یابد و مابقی (۸۰ درصد) به صورت جریان سطحی از حوضه خارج می‌شود. با در نظر گرفتن رژیم دبی فصلی، جنس سازندهای مسیر رودخانه و شرایط توپوگرافی منطقه، حجم کل تغذیه آبخوان از طریق نفوذ از بستر رودخانه‌ها برابر با ۷ میلیون مترمکعب در سال برآورد شد. در مقابل، نرخ تخلیه آبخوان از طریق زهکشی رودخانه‌ای معادل ۰/۵ میلیون مترمکعب بر سال محاسبه گردیده است. شایان ذکر است به دلیل عمق بالای سطح ایستابی در بخش عمده دشت و قرارگیری آن فراتر از عمق بحرانی صعودکاپیلاری، فرآیند تبخیر مستقیم از سفره آب زیرزمینی ناچیز تلقی شده و در محاسبات بیلان منظور نگردید.

در خصوص آبخوان اسبفروشان می توان گفت به طور کلی این آبخوان دارای رودخانه دائمی نبوده و ازآنجاکه عمده ورودی از جبهه‌های آب زیرزمینی لحاظ شده‌اند. با توجه به توپوگرافی منطقه و جنس سازندهای مسیر رودخانه‌ها و با در نظر گرفتن دبی فصلی رودخانه‌ها، آبخوان اسبفروشان میزان ۴ میلیون مترمکعب از طریق رودخانه‌ها تغذیه و ۰/۴ میلیون مترمکعب زهکشی می‌گردد. این حجم ناچیز زهکشی حاکی از آن است که پدیده تخلیه سفره به بستر آبراهه‌ها صرفاً به‌صورت موضعی در نواحی پایاب دشت رخ داده و آبخوان در غالب وسعت خود ماهیت تغذیه‌پذیر دارد

آبدهی ویژه

در خصوص آبدهی ویژه با اطلاعات حاصل از بررسی‌های شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی با توجه به اطلاعات پمپاژ و سایر مطالعات، آبدهی ویژه برای آبخوان سراب در حدود ۳ و اسبفروشان ۲ درصد در نظر گرفته شده است که با توجه به نوسانات هیدروگراف معرف آبخوان در سال بیلان و همچنین مساحت کلی آبخوان ها، ۲/۸ میلیون مترمکعب بر حجم آبخوان سراب افزوده‌شده و ۱/۰۲ میلیون مترمکعب از حجم آبخوان اسبفروشان کاسته شده که این مقادیر از بیلان آبخوان ها نیز مستخرج شده‌اند.

وضعیت بیلان آبخوان‌های دشت سراب و اسبفروشان

مطابق جدول ۷ بیلان آبخوان‌های دشت سراب و اسبفروشان نشان می‌دهد که مجموع ورودی‌های آبخوان سراب برابر با ۷۱/۱۲ و برای اسبفروشان ۵۵/۴۹ میلیون مترمکعب است؛ در حالی که مجموع خروجی‌ها برای سراب برابر با ۶۸/۳۲ و برای اسبفروشان ۵۶/۵۱ میلیون مترمکعب برآورد شده است. این تراز به اختلافی معادل ۲/۸+ در سراب و ۱/۰۲- میلیون مترمکعب در اسبفروشان منجر شده است. در نگاه نخست، این مازاد در سراب به‌منزله تعادل نسبی و کسری اندک در اسبفروشان بیانگر تخلیه از ذخیره است؛ اما ترکیب ورودی‌ها در هر دو دشت، نکته مهمی را آشکار می‌کند: در هر دو آبخوان، سهم بارندگی مستقیم به‌نسبت سایر مؤلفه‌ها محدود است و بخش قابل‌توجهی از تغذیه از جریان‌های مرزی، تغذیه رودخانه‌ای و به‌ویژه آب برگشتی شرب و صنعت تأمین می‌شود. این الگوی وابستگی به تغذیه غیرمستقیم، با یافته‌های مطالعات محلی همخوانی دارد؛ به‌طوری که مدل‌سازی عمق پیزومتری نشان می‌دهد نوسانات سطح آب زیرزمینی در هر دو دشت، بیش از آن‌که به بارش وابسته باشد، تحت تأثیر مصرف آب و متغیرهای انسانی است که ضرورت مدیریت تقاضا را برجسته می‌کند (Khosravi et al., 2024). در مقیاس ملی، شواهد کاهش شار تغذیه آبخوان‌ها تأیید می‌کند که اتکای صرف به بارش در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران کفایت ندارد و تقویت مؤلفه‌های تغذیه غیرمستقیم و مدیریت‌پذیر، برای پایداری ضروری است.

در خروجی‌ها، برداشت بخش کشاورزی در آبخوان سراب ۵۷/۹۷ و اسبفروشان ۲۵/۹۸ میلیون مترمکعب را دارد که بیشترین فشار را بر آبخوان وارد می‌کنند و همراه با برداشت شرب، عمده‌ی تخلیه را شکل می‌دهند؛ در حالی‌که مصارف صنعتی و سایر مصارف در هر دو منطقه سهم ناچیزی دارند. این الگو با گزارشات منتشر شده برای بیشتر مناطق کشور مطابقت دارد. مطالعات برآورد تغذیه ناشی از آبیاری نشان می‌دهند که سهم آب برگشتی می‌تواند قابل‌توجه باشد، اما پایداری آن به‌شدت به کارایی سامانه‌های آبیاری وابسته است؛ به‌علاوه، مدل‌سازی ناحیه‌ی ناپایدار خاک برای سناریوهای مختلف آبیاری نشان می‌دهد که تغییرات زمان‌مند برنامه‌های آبیاری و نوع کشت، شار تغذیه را به‌طور معنی‌داری تغییر می‌دهد (Ebrahimi et al., 2016).

در نتیجه، اگرچه بیلان سراب اندکی مثبت و بیلان اسبفروشان با کسری مواجه است، اتکای شدید هر دو آبخوان به بازگشت جریان‌ها و فشار برداشت کشاورزی، آن‌ها را در برابر تغییرات اقلیمی و مدیریتی آسیب پذیر می‌کند. راهبردهای توصیه‌شده برای هر دو دشت شامل افزایش بهره‌وری آبیاری (کاهش نفوذ ناکارآمد و تبخیر بی‌فایده با حفظ تغذیه مؤثر)، کنترل برداشت‌های غیرمجاز و توسعه تغذیه مصنوعی با استفاده از رواناب‌ها و پساب تصفیه‌شده است. شواهد اقتصادی و هیدروژئولوژیک اخیر در ایران نشان می‌دهد که تغذیه مصنوعی با پساب تصفیه‌شده گزینه‌ای واقع‌بینانه برای جبران کسری است و با طراحی مناسب، مخاطرات کیفی قابل کنترل‌اند؛ همچنین استفاده از چارچوب‌های اولویت‌بندی راهبردی (مانند AHP فازی) برای انتخاب مکان‌های تغذیه مصنوعی در مقیاس حوضه، تصمیم‌گیری را در این مناطق نظام‌مند و سازگار با محدودیت‌ها می‌سازد (Farzi et al., 2024).

جدول ۷- بیلان آب زیرزمینی آبخوان سراب و اسبفروشان و مولفه‌های آن‌ها.

Table 7- Groundwater balance and its components for the Sarab and Asbforoushan aquifers.

Inflow components			Outflow components		
Component	Sarab	Asbforoushan	Component	Sarab	Asbforoushan
Boundaries	46.4	46.02	Boundaries	0.17	29.58
Precipitation	3.1	3.02	Evaporation from water table	0	0
Agricultural return water	9.4	4.08	Discharge by wells — Agricultural	57.97	25.98

(return coefficient — Sarab: 15.44%, Asbforoushan: 14.97%)					
			Discharge by wells — Drinking	6.52	1.01
Drinking and industrial return water, both aquifers (70% return coefficient)	5.22	0.87	Discharge by wells — Industrial	0.33	0
River recharge	7	4	Discharge by wells — Other	0.61	0.24
All values are volumes in millions of cubic metres (MCM)			Discharge by wells — Unauthorized	0.05	0.10
			Discharge by spring — Spring	0	0
			Discharge by spring and qanat — Qanat	2.17	1.2
			River drain	0.5	0.4
Total inflow	71.12	55.49	Total outflow	68.32	56.51
Difference between inflow and outflow — Sarab: +2.8			Difference between inflow and outflow — Asbforoushan: −1.02		

نتیجه‌گیری

منطقه سراب دارای رودخانه‌های متعدد فصلی که از کوهستان¬های سبلان و بزقوش سرچشمه می‌گیرند و دارای دو آبخوان یکی در نیمه شمالی شهرستان تحت عنوان آبخوان سراب و در دیگری در نیمه جنوبی شهرستان آبخوان اسبفروشان که از شرق به غرب کشیده شده است. پژوهش حاضر نشان داد که بیلان هیدرولوژیکی آبخوان‌های سراب و اسب‌فروشان، اگرچه در ظاهر در برخی مؤلفه‌ها متعادل یا نزدیک به تعادل است، اما از نظر پایداری بلندمدت، هر دو سامانه تحت فشار قابل توجه بهره‌برداری قرار دارند. در آبخوان سراب، بیلان نهایی اندکی مثبت و معادل ۲/۸+ میلیون مترمکعب در سال محاسبه شد و این آبخوان از نظر ساختار هیدرولیکی، به‌ویژه به دلیل تغذیه شمالی و خروجی مرزی بسیار ناچیز، رفتاری نسبتاً پایدارتر دارد. در مقابل، آبخوان اسب‌فروشان با کسری بیلان معادل ۱/۰۸- میلیون مترمکعب و کاهش حجم ذخیره، پویایی بیشتری داشته و نسبت به تغییرات برداشت و مدیریت بهره‌برداری حساس‌تر است. در هر دو آبخوان، سهم بارش مستقیم در تغذیه بسیار محدود و در حدود ۳ میلیون مترمکعب تقریباً ۶٪ بوده و تکیه بر آن برای جبران برداشت‌ها واقع‌بینانه نیست. در عوض، جریان‌های مرزی، تغذیه رودخانه‌ای و به‌خصوص آب برگشتی ناشی از آبیاری، نقش مهم‌تری در تراز آب زیرزمینی ایفا می‌کنند؛ به‌طوری‌که میانگین آب برگشتی کشاورزی در سراب ۱۵٪ و در اسب‌فروشان ۹۷/۱۴٪ برآورد شده و آب برگشتی شرب و صنعت نیز حدود ۷۰٪ در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر، الگوی مصرف نشان داد که کشاورزی مهم‌ترین عامل تخلیه آبخوان در هر دو دشت است؛ برداشت کشاورزی در سراب ۹۸/۵۷ میلیون مترمکعب حدود ۸۷٪ برداشت چاه‌های مجاز و در اسب‌فروشان ۹۶/۲۵ میلیون مترمکعب حدود ۷۰٪ را شامل می‌شود. همچنین در سال آبی ۱۳۹۳-۹۴، تراز نهایی آبخوان‌ها نسبت به ابتدای سال حدود ۰/۳ متر افت داشته اس. بررسی نتایج نشان داد که پایداری منابع آب زیرزمینی در منطقه، بیش از هر چیز، به مدیریت تقاضا و اصلاح الگوی مصرف وابسته است. افزایش بهره‌وری آبیاری، کاهش تلفات انتقال و توزیع، کنترل برداشت‌های غیرمجاز، بازنگری در الگوی کشت و استفاده هدفمند از آب برگشتی و پساب تصفیه‌شده می‌تواند به کاهش فشار بر آبخوان‌ها کمک کند. همچنین، توسعه تغذیه مصنوعی در نقاط مناسب حوضه و بر اساس اولویت‌بندی علمی، به‌عنوان راهکاری مکمل و کارآمد برای جبران کسری مخزن و جلوگیری از افت روز افزون تراز آب زیرزمینی، پیشنهاد می‌شود. از منظر کیفی نیز آب برگشتی می‌تواند حامل نیترات، املاح و آلاینده‌های کشاورزی باشد و با توجه به سهم بالای کشاورزی در برداشت آبخوان‌ها، پایش کیفی و مدیریت کود و آفت‌کش برای پایداری بلندمدت ضروری است. همچنین با توجه به تغییرات اقلیمی در حوضه دریاچه ارومیه، بررسی اثر این تغییرات بر بیلان آبخوان‌های سراب و اسب‌فروشان ضروری است. کاهش بارش، افزایش دما و افزایش تبخیر-تعرق می‌تواند سهم تغذیه طبیعی و جریان‌های برگشتی را تغییر دهد. بنابراین پیشنهاد می‌شود مطالعات آتی با استفاده از داده‌های جدیدتر (پس از سال آبی ۹۴-۱۳۹۳) و به‌کارگیری سناریوهای اقلیمی، کسری مخزن این آبخوان‌ها را به‌روزرسانی کنند. ارزیابی حساسیت بیلان آبخوان به تغییر اقلیم می‌تواند به تصمیم‌گیری دقیق‌تر برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در شرایط اقلیمی در حال

تغییر کمک کند. به‌طور کلی، این پژوهش نشان داد که حفظ پایداری آبخوان‌های سراب و اسب‌فروشان نیازمند رویکردی یکپارچه، مبتنی بر مدیریت عرضه و تقاضا، و متکی بر شناخت دقیق رفتار هیدرولوژیکی هر آبخوان است.

منابع

آبایی، ع.، قاهری، ع.، سعیدی، م.، ۱۳۹۰. تهیه الگوریتم بهره‌برداری بهینه از آبخوان به‌منظور تعدیل غلظت آلاینده‌ها. مجله آب و فاضلاب، ۲۲(۴):۱۳۲-۱۳۸.

اسفندیاری، ف.، قراچورلو، م.، عبادی، ا.، ۱۳۹۷. ارزیابی و برآورد تغییرات مکانی سطح آب زیرزمینی در دشت سراب با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی. جغرافیا و توسعه، ۱۶(۵۱):۸۰-۶۵.

بنابفرویی، ح.ر.، علیمحمدی، س.، ۱۴۰۱. مقایسه اقتصادی گزینه‌های تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی با استفاده از پساب تصفیه شده (آبخوان دشت یزد-اردکان). مجله آب و فاضلاب، ۳۳(۵): ۱۴۲-۱۵۰.

خالدی، م.، مجنونی هریس، ا.، و فاخری فرد، ا. ۱۳۹۶. تعیین هدایت هیدرولیکی بر اساس قابلیت انتقال تصحیح‌شده و تأثیر تراکم چاه‌ها و مازاد برداشت آب بر آبخوان دشت شبستر .هیدروژئومورفولوژی، ۳(۲):۱۹-۳۲.

فاخری‌فرد، ا.، مجنونی هریس، ا.، اصغری مقدم، ا.، خالدی، م.، ۱۳۹۷. مطالعه و ارائه راهکارهای اجرایی مصوبه کاهش ۴۰ درصدی مصرف آب کشاورزی در حوضه آبریز آجی‌چای: گزارش مطالعات آب زیرزمینی. دانشگاه تبریز، تهیه‌شده برای ستاد احیای دریاچه ارومیه.

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، ۱۳۹۲. دستورالعمل تعیین محل و نظارت بر حفر چاه‌های آب در آبرفت و سازندهای سخت. نشریه شماره ۵۵۷، ۲۲۶ صفحه.

شمسائی، ا.، ۱۳۸۱. هیدرولیک جریان آب در محیط‌های متخلخل. جلد دوم، چاپ دوم، مرکز نشر دانشگاهی صنعتی امیرکبیر، ۵۵۴ صفحه.

صدقی، ح.، علویانی، ف.، اصغری مقدم، ا.، بابازاده، ح.، ۱۳۹۸. بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب‌های سطحی، زیرزمینی و نامتعارف دشت هشتگرد. هیدروژئولوژی، ۴(۲):۶۲-۴۸.

مرکز آمار ایران، ۱۴۰۲. گزارش آماری: تعداد چاه‌های آب کشور و مقدار تخلیه سالانه آن برحسب عمق – سال آبی ۱۳۹۹-۱۴۰۰. تهران، درگاه ملی مرکز آمار ایران.

ودیعتی، م، ۱۳۹۵. ارزیابی هیدروژئولوژی آبخوان دشت سراب با تأکید بر مدل‌های عددی و هوش مصنوعی. دانشگاه تبریز.

References

Abaei, A., Ghaheri, A., Saeedi, M., 2011. Optimal aquifer pumping policy to reduce contaminant concentration. Journal of Water & Wastewater, 22(4):132–138. [In Persian]

Ahlfeld, D.P., Barlow, P.M., Mulligan, A.E., 2005. GWM—A ground-water management process for the U.S. Geological Survey modular ground-water model (MODFLOW-2000). U.S. Geological Survey Open-File Report, 1072:124 p.

Bana Bafroei, H., Alimohammadi, S., 2022. Economic comparison of groundwater artificial recharge options using treated wastewater (Yazd-Ardakan aquifer). Journal of Water and Wastewater, 33(5):142–150. [In Persian]

Bughici, T., Skaggs, T.H., Corwin, D.L., Scudiero, E., 2022. Ensemble HYDRUS-2D modeling to improve apparent electrical conductivity sensing of soil salinity under drip irrigation. Agricultural Water Management, 272:107813.

De Vries, J.J., Simmers, I., 2002. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. Hydrogeology Journal, 10:5–17.

Ebrahimi, H., Ghazavi, R., Karimi, H., 2016. Estimation of groundwater recharge from rainfall and irrigation in arid environments using inverse modeling. Water Resources Management, 30:1939–1951.

Esfandiari, F., Gharachorloo, M., Ebadi, E., 2018. Evaluation and estimation of spatial variations in groundwater level in Sarab Plain using different interpolation methods. Geography and Development, 16(51):65–80. [In Persian]

Fakheri-Fard, A., Majnooni-Heris, A., Asghari-Moghaddam, A., Khaledi, M., 2018. Study and development of practical solutions for implementing the 40% reduction in agricultural water consumption in the Ajichay Basin: Groundwater studies report. University of Tabriz, prepared for the Urmia Lake Restoration Program, Iran. [In Persian]

FAO, 1973. Groundwater Seminar, Granada, 1973 (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 18). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Farzi, A., Boostani, A., Maghsoodi, R., Nameni, R., 2024. A quantitative strategic planning framework

for artificial groundwater recharge in Iran based on fuzzy AHP. Water Harvesting Research, 7(1):1–16.

Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M.F.P., Van Beek, L.P.H., 2012. Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. Nature, 488:197–200.

Khaledi-Alamdari, M., Majnooni-Heris, A., Fakheri-Fard, A., Asghari Moghaddam, A., 2022. Modeling the impacts of various managerial scenarios on groundwater level raising in a coastal aquifer. Arabian Journal of Geosciences, 15:695.

Khaledi, M., Majnooni-Heris, A., Fakheri-Fard, A., 2019. Determination of hydraulic conductivity based on corrected transmissivity and the effect of well density and excessive groundwater withdrawal on the Shabestar Plain aquifer. Hydrogeology, 3(2):19–32. [In Persian]

Khosravi, S., Fakheri Fard, A., Dinpashoh, Y., 2024. Piezometric depth modeling of groundwater using precipitation and water consumption variables: Case study of Sarab Plain aquifer. Discover Water, 4(1):14.

Maghrebi, M., Noori, R., AghaKouchak, A., 2023. Iran: Renovated irrigation network deepens water crisis. Nature, 618:238.

Management and Planning Organization of Iran, 2013. Guideline for Site Selection and Supervision of Water-Well Drilling in Alluvial Deposits and Hard Formations. Publication No. 557, Tehran, Iran, 226 pp. [In Persian]

Noori, R., Maghrebi, M., Jessen, S., Bateni, S.M., Heggy, E., Javadi, S., Noury, M., Pistre, S., Abolfathi, S., AghaKouchak, A., 2023. Decline in Iran's groundwater recharge. Nature Communications, 14(1):6555.

Sedghi, H., Alaviany, F., Asghari Moghaddam, A., Babazadeh, H., 2020. Optimization of conjunctive use of surface water, groundwater and wastewater resources in Hashtgerd Plain. Hydrogeology, 4(2):48–62. [In Persian]

Shamsai, A., 2002. Hydraulics of Water Flow in Porous Media: Groundwater Engineering, Vol. 2, 2nd ed. Amirkabir University of Technology Press, Tehran, Iran. [In Persian]

Statistical Center of Iran (SCI), 2023. Statistical Report: Number of Water Wells in Iran and Their Annual Withdrawal by Depth – Water Year 2019–2020. Tehran, Iran: National Portal of Statistics. [In Persian]

Vadiati, M., 2016. Hydrogeological Assessment of the Sarab Plain Aquifer with Emphasis on Numerical and Artificial Intelligence Models. PhD Dissertation, University of Tabriz, Tabriz, Iran. [In Persian]