



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

Investigation of the performance of grout curtain at the Rudbal Dam site (Fars Province)

Morteza Mozafari^{1*}

1. School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

Article info

Article history

Received: 30 October 2025

Accepted: 23 December 2025

Keywords:

Rudbal Dam, Karst, Grout curtain, Water leakage, Hydrochemistry.



Abstract

The Rudbal Dam, with a reservoir capacity of 82 million cubic meters, is located in the Rudbal Valley near Darab City. The dam and reservoir are in contact with Sarvak limestone and radiolarite on the right and left abutments, respectively. The possible water leakage route includes an inlet window, transfer route, and outlet window. The inlet window comprises Sarvak limestone and river alluvium, in part of which the grout curtain has been constructed. Since the reservoir was filled in 2016, persistent water leakage has occurred. The purpose of this study is to investigate the physicochemical characteristics of the water sources around the dam to determine the path of water leakage through or around the grout curtain. For this purpose, the physicochemical characteristics of 83 water sources were measured. Water sampling was also carried out at 30 points, and the concentrations of its main elements were determined. By evaluating the results of the analyses, the relationship of the samples with the reservoir water was determined. Examination of characteristics such as water type, electrical conductivity, and temperature showed that the inlet window at the dam site had not been completely sealed by the grout curtain, allowing some water to leak. By considering that the exact path of water leakage cannot be determined based on the results of a single sampling step, it is recommended to conduct a complementary isotopic and hydrochemical study.

Introduction

Designing and construction of some water structures, such as dams, substantial time and financial investment. In water resources management, the volume of each dam's reservoir is determined in a way that meets the projected water demand of its intended use. Failure to fill the tank will fail to achieve the designed goals. The reservoir water rising will change the groundwater flow pattern in the foundation and abutments. Water stored in the dam reservoir may leak from the dam structure, foundation, or abutments to downstream areas. In this case, new springs may appear that did not exist in the natural state before the dam construction. In order to prevent erosion and destruction of the dam foundation and structure, water leakage from the dam must be controlled by grouting operations. Grouting is a process

that minimizes the amount of leakage in these areas by decreasing the permeability in the foundation and abutments. Karst is a topography formed from the dissolution of soluble carbonate rocks such as limestone and dolomite (Alimoradi et al., 2024; Nabizadeh et al., 2024; Kalantari et al., 2025). Due to the complex hydrogeology, the construction of a grout curtain in karst regions is usually more difficult and expensive than in other geological settings, and the risk of leakage is greater (Bruce et al., 2005; Donnelly et al., 2009).

The Rudbal earth-fill dam, with a height of 71 meters, a crest length of 485 meters and a reservoir volume of 82 million cubic meters, was built in 2015 to supply part of the drinking and agricultural water of Darab city. By reservoir filling, water leakage was observed through the karst formation at its right

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.108261>

*Corresponding author: Morteza Mozafari; E-mail: mmozafari@ut.ac.ir

How to cite this article: Mozafari, M., 2025. Investigation of the performance of grout curtain at the Rudbal Dam site (Fars Province). Kharazmi Journal of Earth Sciences 11(2), 395- 410. <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.108261>



BY NC

abutment, making it difficult to achieve the dam's construction goals. The water leakage rate was reported to be about 2.5 to 3 cubic meters per second (Mozafari et al., 2024). In this research, an attempt has been made to determine the most likely path of water leakage from the Rudbal reservoir using hydrochemical studies.

Materials and Methods

The study area is located in the Kal-Mehran watershed, in the central section of the Persian Gulf basin. From a geological point of view, the study area is situated in the Zagros Simply Folded structural zone. The Bordano and Pahan anticlines, as well as the Korsia Salt Dome, are the most important geological structures in the area. The Rudbal valley, with an approximately northwest-southeast orientation, is located on the northern limb of the Bordano anticline. The dam and reservoir are constructed inside the Rudbal valley. In terms of stratigraphy, the Hormuz Formation, radiolarite units and Sarvak limestone, Tarbur limestone, Asmari-Jahrom limestone, and Quaternary deposits are exposed in the study area.

To carry out this research, in the first stage, a geological map of the area and a geological profile were prepared along the dam axis (Fig. 1). In September 2019, during a field visit, physicochemical characteristics (temperature, electrical conductivity, and pH) were measured at 83 points of different water sources. Also, 30 water samples were collected from different sources and sent to the laboratory of the National Forest and Rangeland Research Institute for analysis. The hydrochemical similarity of the samples was then compared. Also, by analyzing the results of the analyses, the relationship of the samples with the reservoir water was determined. Based on characteristics such as water type, electrical conductivity, and temperature, the downstream water flow path was determined.

Results and Discussion

The changes in reservoir water temperature with depth are shown in Figure 2. The reservoir water

temperature at depths of 5, 30, 55 and 70 meters was 24.6, 22.7, 19.7 and 11.9 °C, respectively. Therefore, the water temperature decreases with increasing reservoir depth. The water temperature study shows that water moves from the deeper parts of the reservoir towards the boreholes in the R2 gallery and seepages in the AG1 access gallery. Water moves from the shallower depths of the reservoir towards the downstream boreholes. The electrical conductivity at depths of 5, 35, 55 and 70 meters of the reservoir was measured at 423, 332, 327 and 292 $\mu\text{s}/\text{cm}$, respectively, which indicates a decrease in electrical conductivity with increasing water depth. Usually, the electrical conductivity should increase with increasing water depth. The reason for the decrease in electrical conductivity of water with increasing depth in the Rudbal Dam reservoir could be its dependence on water temperature, given that the temperature of the reservoir water decreased from 24 °C at the surface to 13 °C at greater depths. The electrical conductivity values of most sampling points in the galleries were similar, making it difficult to determine the leakage path. However, electrical conductivity also confirms the specific results of temperature. The type of most samples (river, springs, and boreholes in the dam reservoir area and agricultural wells downstream of the reservoir) is bicarbonate-sodic. These results indicate the hydraulic connection of the reservoir with the surrounding and downstream water sources. Considering the placement of the samples in the lower and right corners of the square of the Douro diagram, simple dissolution and mixing of waters can be considered as the most important hydrochemical processes affecting the collected samples.

Conclusions

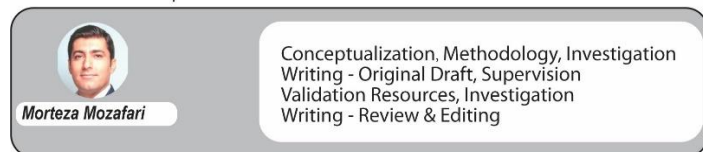
The possible water leakage route includes the entry window, the transfer path, and the water exit window. The water entry window comprises that part of the permeable geological formation that is in direct contact with the reservoir water. At the Rudbal Dam site, the entry window of the possible water leakage route is

limited to the Sarvak Formation and the alluvium of the river bed. The hydrochemical results show that the water entry window at the dam site is not completely sealed by the grouting curtain. The similarity of temperature, electrical conductivity, and water type of the reservoir with the points downstream of the grout curtain indicates that water passes from different depths of the reservoir to the downstream of the grout curtain. Based on the results of a single water sampling, the exact water leakage route cannot be determined. Therefore, it is recommended that isotopic and hydrochemical studies be conducted in short and long-term intervals at this site. Also, the discharge of the Gulab Spring and its hydrochemical changes should be continuously monitored.

References

- Alimoradi, S., Nassery, H. R., Alijani, F., Karimi, H., 2024. Comparison of physical, chemical and hydrogeological characteristics of karst springs in the western and eastern regions of Ilam province, Iran. *Journal of Earth Sciences* 8(1), 1-27.
- Bruce, D., Heenan, D., Wilson, D., 2005. Quality and Quantification in Rock Drilling and Grouting. In *Innovations in Grouting and Soil Improvement* 1-10.
- Donnelly, C.R., Hinchberger, S., Mohammadian, E., 2009. The Design of Foundation Treatment Measures for Dams on Karst Foundations. *Canadian dam association bulletin* 20(4), 20-27.
- Kalantari, N., Pourakbari, S., Moradieghad, T., 2025. Identifying the recharge sources of import ant karst springs in Kohgiluyeh and BoyerAhmad provinces using stable isotopes of oxygen 18 and deuterium. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 11(1), 131-151.
- Mozafari, M., Van Brahana, J., Eskandari, R., Pazoki, M., 2024. Karst leakage analysis of Roudbal Dam, southwestern Iran, using geological, hydrogeological, hydrochemical and stable-isotopic approaches. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 83(11), 466.
- Nabizadeh, C. N., Karami, G. H., Taheri A., Ramazani, R., (2024). Investigation of the dominant flow system in the Nekarood karst basin. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 10 (2), 538-556.

CRedit authorship contribution statement





مقاله پژوهشی

دسترسی آزاد

مجله علوم زمین خوارزمی

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

بررسی عملکرد پرده تزریق در ساختگاه کارستی سد رودبال (استان فارس)

مرتضی مظفری*

۱. دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۸ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲	<p>سد رودبال با حجم مخزن ۸۲ میلیون متر مکعب، در ۲۰ کیلومتری شمال‌غربی شهر داراب ساخته شده است. این سد در دره رودبال قرار دارد و آب مخزن آن در تکیه‌گاه راست با آهک کارستی سروک و در تکیه‌گاه چپ با سنگ‌های رادیولاریتی در تماس است. با شروع آبیگری سد در سال ۱۳۹۵، مخزن آن با مشکل فرار آب مواجه شده است. مسیر محتمل فرار آب شامل پنجره ورود، مسیر انتقال و پنجره خروج آب می‌باشد. پنجره ورود آب در این ساختگاه شامل آهک کارستی سروک و آبرفت رودخانه‌ای می‌باشد که پرده تزریق در بخشی از آن اجرا شده است. هدف از این پژوهش بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی منابع آب پیرامون این سد با هدف تعیین مسیر گذر آب از پرده تزریق و یا پیرامون آن است. برای این منظور ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی ۸۳ منبع آب در صحرا اندازه‌گیری شد. همچنین از ۳۰ نقطه نمونه‌برداری آب صورت گرفت و غلظت عناصر اصلی آن مشخص شد. با استفاده از تجزیه و تحلیل نتایج آنالیزها و ترسیم نمودارهای مربوطه، چگونگی ارتباط نمونه‌ها با آب مخزن مشخص شد. بررسی ویژگی‌هایی مانند تیپ، هدایت الکتریکی و دمای آب نشان می‌داد که پنجره ورود آب در ساختگاه سد بصورت کامل توسط پرده تزریق اجرا شده، آب‌بند نشده است و بخشی از فرار آب از درون پرده رخ می‌دهد. بررسی تراز آب زیرزمینی نیز نشانگر عبور آب از بخش‌هایی از پرده تزریق ایجاد شده در تکیه‌گاه راست و پیرامون آن می‌باشد. با توجه به اینکه بر اساس نتایج یک مرحله نمونه‌برداری نمی‌توان مسیر دقیق فرار آب را تشخیص داد، انجام مطالعه ایزوتوپی و هیدروشیمی تکمیلی پیشنهاد می‌شود.</p>



مقدمه

وجود نداشته‌اند. همچنین افزایش تراز سطح آب مخزن می‌تواند بر چشمه‌های طبیعی تأثیر بگذارد و آبدهی آن‌ها را افزایش دهد، از این جهت همواره باید رفتار هیدرولیکی چشمه‌های اطراف سدها کنترل شود. به‌منظور جلوگیری از فرسایش و تخریب پی و بدنه سد، نشت آب باید با عملیات آب‌بندی کنترل شود. عملیات آب‌بندی فرآیندی است که در آن با ایجاد مانع بر سر جریان آب در پی و تکیه‌گاه‌ها، مقدار نشت در این بخش‌ها را به حداقل می‌رسانند. کارست در اثر انحلال سنگ‌های کربناته مانند آهک و دولومیت و دیگر سنگ‌های انحلال‌پذیر مانند سنگ‌های سولفات و کلروره شکل می‌گیرد (Alimoradi et al., 2024; Nabizadeh et al., 2024; Kalantari et al., 2025). به دلیل هیدروژئولوژی پیچیده کارست،

طراحی و ساخت برخی از سازه‌های آبی نظیر سدها نیازمند صرف هزینه و وقت فراوان است. در مدیریت منابع آب حجم مخزن هر سد به گونه‌ای تعیین می‌شود که پاسخگوی نیازهای آبی طرح باشد. عدم آبیگری کامل مخزن در اثر پدیده فرار آب سبب دست نیافتن به اهداف طرح و هدر رفت بخشی از سرمایه می‌شود. با شروع آبیگری سد، بالا آمدن آب در مخزن سبب افزایش بار آبی و تغییر الگوی جریان آب زیرزمینی در پی و تکیه‌گاه‌ها می‌شود. آب ذخیره شده در مخزن ممکن است از بدنه سد، پی و یا تکیه‌گاه‌ها به مناطق پایین‌دست تراوش نماید. در این حالت ممکن است چشمه‌های جدیدی ظهور پیدا کنند که در حالت طبیعی و قبل از احداث سد

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.108261>*نویسنده مسئول: مرتضی مظفری mmozafari@ut.ac.irاستناد به این مقاله: آسمانی، م. (۱۴۰۴). بررسی عملکرد پرده تزریق در ساختگاه کارستی سد رودبال (استان فارس). مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۱۱، شماره ۲، صفحه ۳۹۵ تا ۴۱۰. <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.108261>

(2007)، مطالعات هیدروشیمی (Huang et al., 2018)، بررسی‌های ژئوفیزیکی، حفاری گمانه و گالری‌های اکتشافی و همچنین مطالعات زیرسطحی گسترده (Milanović, 2015) اشاره کرد.

سد رودبال خاکی سنگریزه‌ای، با ارتفاع ۷۱ متر، طول تاج ۴۸۵ متر و حجم مخزن ۸۲ میلیون متر مکعب طی سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۴ به منظور تأمین قسمتی از آب شرب و کشاورزی شهرستان داراب در استان فارس ساخته شد. با شروع آبیگری، پدیده فرار آب از طریق سازند کارستی تکیه‌گاه راست مخزن مشاهده گردید، به طوری که دستیابی به اهداف اولیه طرح را با مشکل روبرو نمود. بر اساس گزارش‌های موجود میزان فرار آب از مخزن رودبال در حدود ۲/۵ تا ۳ متر مکعب بر ثانیه گزارش شده است. در این پژوهش تلاش شده تا با استفاده از مطالعات هیدروشیمی محتمل‌ترین مسیر فرار آب از مخزن سد رودبال تعیین گردد.

مواد و روش‌ها

گستره پژوهش

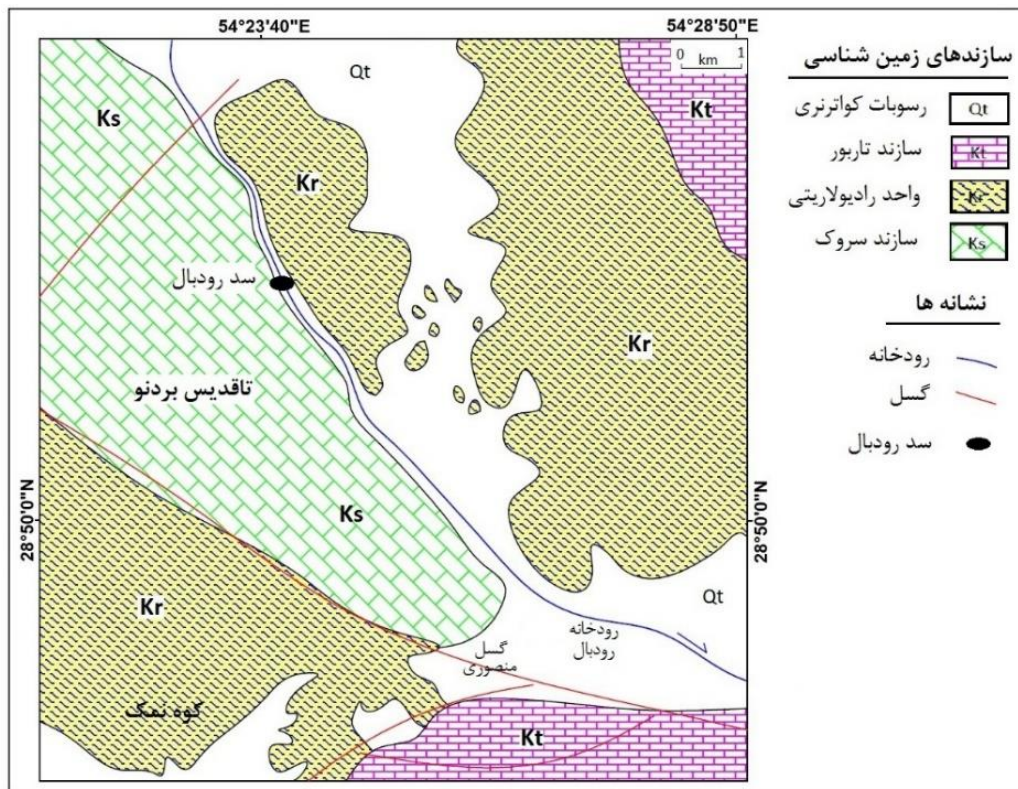
منطقه مورد مطالعه در حوضه آبریز کل-مهران، واقع در نواحی مرکزی حوضه اصلی خلیج فارس، قرار گرفته است. از دیدگاه زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه در زیرپهنه ساختاری زاگرس چین‌خورده قرار دارد. نقشه و نیمرخ زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه در شکل ۱ آورده شده است. تاقدیس‌های بردنو و پهن و همچنین گنبد نمکی کرسیا مهم‌ترین ساختارهای زمین‌شناسی منطقه می‌باشند. دره رودبال با راستایی تقریباً شمال‌غربی-جنوب‌شرقی بر روی یال شمالی تاقدیس بردنو قرار دارد و رودخانه رودبال درون آن جاری است. بدنه سد و مخزن رودبال بر روی یال شمالی تاقدیس بردنو و در دره رودبال قرار دارد. از نظر چینه‌شناسی، سازندهای هرمز، واحدهای رادیولاریتی و آهک سروک، آهک تارپور، آهک آسماری-چهرم و نهشته‌های کواترنری در منطقه مورد مطالعه رخنمون دارند.

آب‌بندی سدهای ساخته شده در این نواحی معمولاً سخت‌تر، طولانی‌تر و گران‌تر از دیگر ساختگاه‌های زمین‌شناسی بوده و احتمال فرار آب از آن‌ها بیشتر است (Laksiri, 2007; Gürocak and Alemdag, 2012; Mozafari et al., 2018). از روش‌های مختلفی برای آب‌بندی پی و تکیه‌گاه‌های سد استفاده می‌شود که مهم‌ترین آن عبارتند از ایجاد پرده تزریق، ترانشه آب‌بند، دیوار آب‌بند و پوشش سطحی. پرده تزریق با هدف آب‌بندی مناطق با نفوذپذیری زیاد، جلوگیری از تمرکز نشت در یک نقطه، تثبیت پایداری سد و کاهش نفوذپذیری متوسط سنگ ایجاد می‌گردد (Nonveiller, 1988).

مسائل مربوط به فرار آب از مخزن سدهای کارستی برای نخستین بار در سد هیلز بار در امریکا گزارش شد (Donnelly et al., 2009). پس از احداث این سد در سال ۱۹۱۳ میلادی، فرار آب از پی کارستی آن رخ داد. به دلیل حجم زیاد فرار آب و شکست عملیات آب‌بندی ترمیمی، یک سد جدید در ۱۰ کیلومتری پایین دست آن احداث گردید (Bruce et al., 2005). روش‌های آب‌بندی مخازن کارستی (مانند ایجاد دیواره آب‌بند و پرده تزریق) از تجربه پروژه‌های سدسازی در امریکا در نیمه نخست قرن بیستم حاصل شد (Milanović, 2004). با افزایش تجربه و پیشرفت تکنولوژی، دانش آب‌بندی مخزن‌های کارستی توسعه یافت و سدهای زیادی در نواحی کارستی کشورهایمانند ایران، آمریکا، چین، اسپانیا، ترکیه، یوگوسلاوی، کرواسی، یونان و اسلونی ساخته شد؛ که در برخی مناطق هنوز نیز ادامه دارد. اگرچه تعداد زیادی از این پروژه‌ها موفق بوده، اما مشکلات ناشی در برخی موارد، کارست را به عنوان یک محیط پر خطر برای ساخت سد معرفی کرده است (Mozafari et al., 2018). چگونگی و دلایل فرار آب از مخزن بسیاری از سدهای ساخته شده در نقاط مختلف دنیا توسط بسیاری از محققین بررسی شده است. از جمله این مطالعات می‌توان به تجزیه و تحلیل ساختارهای زمین‌شناسی (Gutiérrez et al., 2015; Milanović, 2004)، آزمایش ردیابی (Lee et al., 2007)، تجزیه و تحلیل نوسانات سطح آب و همچنین هیدروگراف چشمه‌ها (Turkmen et al., 2002; Unal et al.,

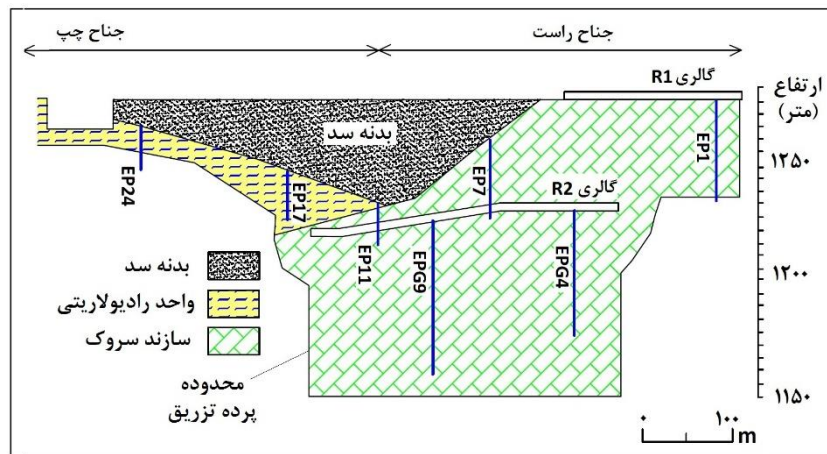
در سد رودبال پرده تزریق به طول کل ۱۰۸۱ متر و در سه ردیف اجرا شده است. گمانه‌های ردیف اول در سرتاسر محدوده پپی و هر دو تکیه‌گاه حفاری و تزریق شده‌اند اما ردیف‌های دوم و سوم تنها در بخش‌هایی از جناح راست سد اجرا شده است. در اعماق، پرده تزریق در جناح راست با استفاده از گالری‌های R1 و R2 و در تکیه‌گاه چپ به کمک گالری R21 ساخته شد (شکل ۲).

سازند هرمز در گنبد نمکی کرسیا رخنمون دارد. سازند آهکی سروک سازنده اصلی ساختار تاقدیس بردنو می‌باشد و در بخش وسیعی از آن، به‌ویژه در دیواره دره‌ها و صخره‌ها رخنمون دارد. واحد رادیولاریتی در سراسر جناح چپ دره رودخانه رودبال برونزد دارد و تا کوه آدامو، به طور پراکنده، دیده می‌شود. سازند تارپور بر روی واحد رادیولاریتی قرار گرفته است. روی سازند تارپور در کوه مروارید در شمال دشت داراب، سازندهای ساچون و جهرم قرار گرفته‌اند.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی گستره پژوهش (Pazoki et al., 2022)

Fig. 1. Geological map of study area (Pazoki et al., 2022).



شکل ۲- موقعیت پرده تزریق و گالری‌ها در برش عرضی (Pazoki et al., 2022)

Fig. 2. Grout curtain and grouting galleries (Pazoki et al., 2022).

پیزومترها در پاسخ به تغییرات تراز آب مخزن در گذر زمان ابزار مناسبی جهت تعیین ارتباط هیدرولیکی مخزن و ناحیه پایین-دست می‌باشد. در این پژوهش از داده‌های مربوط به اندازه‌گیری تراز آب زیرزمینی پیرامون مخزن و نواحی پایین دست نیز استفاده شد تا ارتباط هیدرولیکی مخزن با این مناطق بررسی و مشخص شود.

بحث

دمای آب

دمای آب در عمق‌های ۵، ۳۰، ۵۵ و ۷۰ متری مخزن به ترتیب ۲۴/۶، ۲۲/۷، ۱۹/۷ و ۱۱/۹ درجه سانتی‌گراد بوده است. بنابراین با افزایش عمق مخزن از مقدار درجه حرارت آب کاسته می‌شود. در منطقه مورد مطالعه، گرم‌ترین و سردترین نمونه آب متعلق به عمق ۵ و ۷۰ متری مخزن بوده است. دمای آب اندازه‌گیری شده در محل‌های نمونه‌برداری نزدیک به مخزن در شکل ۳ نشان داده شده است. دمای آب نشستی از همه درزه‌های دیواره گالری R2 (گالری تزریق در تکیه‌گاه راست)، گمانه‌های EPGN4، EPGN5، EPGN6 و EPGN9، MN2، MN4، MN5، MN6، MN8، P4، P5 و MN8 و MN2 واقع در گالری R1 (گالری تزریق در پی سد) و همچنین نشستی‌های گالری دسترسی AG1 (در تکیه‌گاه راست) کمتر از ۱۵/۵ درجه سانتی‌گراد بود که نشان‌دهنده حرکت آب از قسمت-

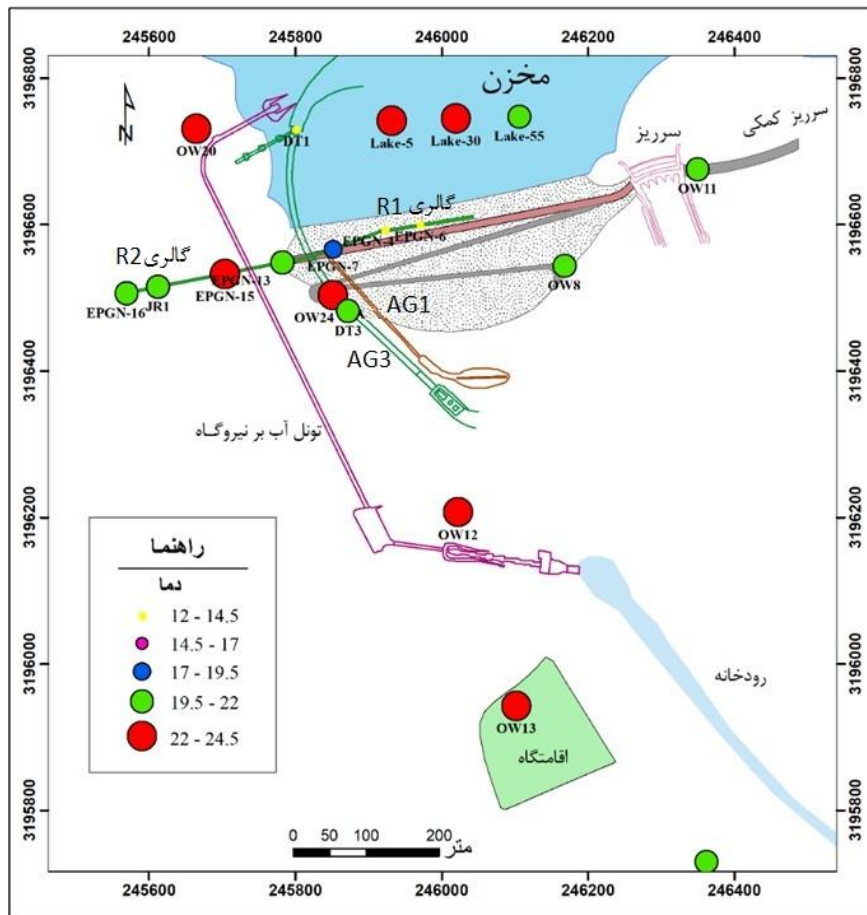
روش پژوهش

در شهریورماه ۱۳۹۸ در بازدید میدانی، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی قابل سنجش در صحرا (درجه حرارت، هدایت الکتریکی و pH) در ۸۳ نقطه از منابع آب مختلف ساختگاه سد رودبال اندازه‌گیری شد. در این بازدید، تعداد ۳۰ نمونه آب نیز از بین منابع مختلف برداشت شد و برای آنالیز به آزمایشگاه موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور فرستاده شد. در آزمایشگاه غلظت یون‌های کلسیم، منیزیم، کربنات، بی‌کربنات و کلر به کمک روش تیتراسیون، غلظت یون‌های سدیم و پتاسیم به کمک روش نورسنجی شعله‌ای و سولفات به کمک روش طیف‌سنج نوری بدست آمد. محاسبه میزان خطای آزمایش برای همه نمونه‌ها مقادیر کمتر از ۵ درصد را نشان می‌داد که در حد قابل قبول بود. در ادامه میزان تشابه هیدروشیمیایی نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه گردید. همچنین با استفاده از تجزیه و تحلیل نتایج آنالیزها و ترسیم نمودارهای مربوطه، چگونگی ارتباط نمونه‌ها با آب مخزن مشخص شد. بر اساس ویژگی‌هایی مانند تیپ آب، هدایت الکتریکی و دما، مسیر جریان آب به سوی پایین‌دست مشخص شد.

افزایش تراز سطح آب زیرزمینی که در هنگام نخستین آبیاری مخزن و عملکرد آن مشاهده می‌شود و مطالعه تغییرات تراز آب

EPGN14 و EPGN16 بین ۲۱ تا ۲۲ درجه سانتی‌گراد بود که نشانگر ارتباط با عمق کمتر از ۴۰ متری مخزن است. در سایر گمانه‌ها درجه حرارت بین ۲۲ تا ۲۳/۴ درجه سانتی‌گراد بود که نشانگر این است که احتمالاً آب از عمق‌های ۵ تا ۴۰ متری مخزن منشأ می‌گیرد. دمای آب چشمه گلایی ۲۳/۵ و چاه‌های منطقه گوزان بین ۲۰ تا ۲۳/۳ درجه سانتی‌گراد است. با توجه به فاصله زیاد از مخزن نمی‌توان در مورد چگونگی ارتباط دمایی آن‌ها با آب مخزن قضاوت کرد.

های عمیق مخزن (عمق بیش از ۶۰ متر) به سوی آن‌ها است. دمای آب گمانه‌های EPGN11، EPGN7، MN1 و OW7 و نشستی سقف گالری دسترسی AG3 بین ۱۵/۵ تا ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد بود که نشانگر ارتباط با عمق ۵۵ تا ۶۰ متری مخزن است. دمای آب گمانه-های P13 و OW8 به ترتیب ۲۰/۳ و ۲۰/۶ درجه سانتی‌گراد بود که نشانه ارتباط با عمق ۵۰ تا ۵۵ متری مخزن است. دمای آب گمانه-های P11، P12، P14، P15، P16، OW1، OW11، OW24،



شکل ۳- دمای آب در منابع نزدیک به مخزن

Fig. 3. Water temperature in sampling points located near the reservoir

نشانگر کاهش هدایت الکتریکی با افزایش عمق آب مخزن است. معمولاً با افزایش عمق آب باید بر مقدار هدایت الکتریکی افزوده شود. دلیل کاهش هدایت الکتریکی آب با افزایش عمق در مخزن سد رودبال می‌تواند وابستگی آن به دمای آب باشد چرا که دمای آب

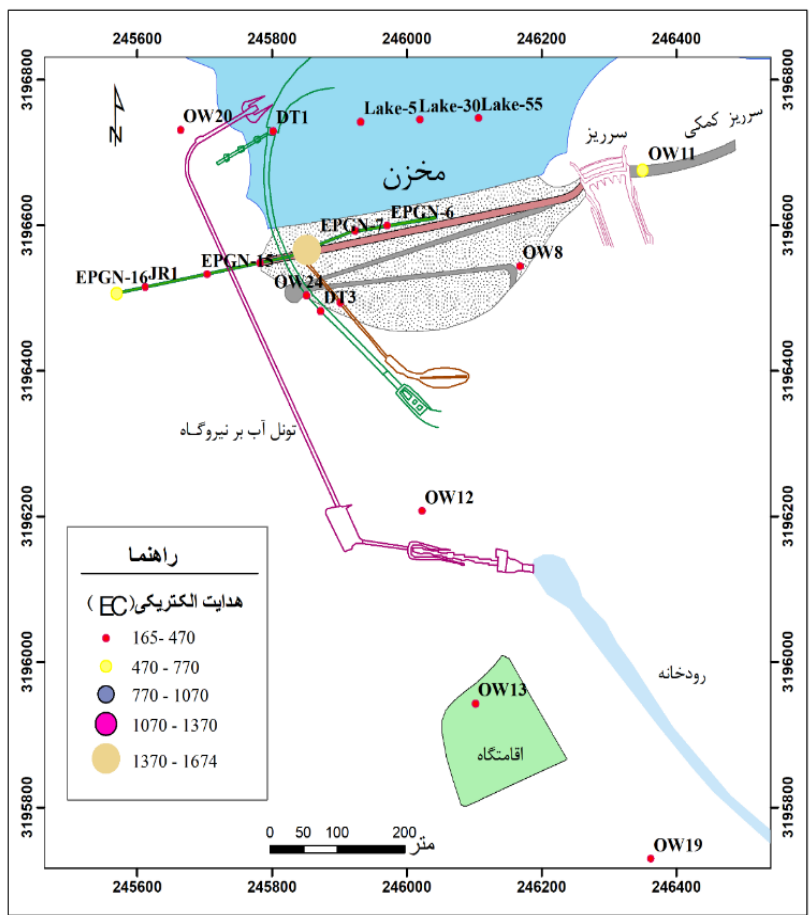
هدایت الکتریکی آب

هدایت الکتریکی در چهار عمق ۵، ۳۵، ۵۵ و ۷۰ متری مخزن به ترتیب ۴۲۳، ۳۳۲، ۳۲۷ و ۲۹۲ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بود که

مخزن از ۲۴ درجه سانتی‌گراد در سطح به ۱۱/۹ درجه سانتی‌گراد در بستر می‌رسید. در شکل ۴ مقادیر هدایت الکتریکی نقاط نمونه‌برداری نزدیک مخزن آورده شده است. تغییرات هدایت الکتریکی در نقاط واقع در گالری R1 روند مشخصی نشان نمی‌داد و مقادیر این پارامتر بین ۲۶۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر در چاه مشاهده‌ای EPGN8 تا ۱۶۷۴ میکروزیمنس در چاه مشاهده‌ای EPGN7 متغیر بود. در گالری R2 در دو نقطه نقطه هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شد، یکی گمانه EPGN16 در انتهای گالری با مقدار هدایت الکتریکی برابر با ۵۳۵ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و دیگری درزه JR1 (واقع در بخش‌های میانی و سقف گالری) با هدایت الکتریکی ۳۰۳ میکروزیمنس بر سانتی‌متر. آب گمانه EPGN16 از مخزن منشأ گرفته اما آب درزه ارتباطی با مخزن ندارد. گمانه‌های مشاهده‌ای عمیق در گالری R2 دارای هدایت الکتریکی ۲۶۰ تا ۱۶۷۴ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بوده‌اند. گمانه‌های پیرومتری و مانومترهای گالری R2 تغییرات هدایت الکتریکی کمتری نسبت به گمانه‌های EPGN داشته‌اند و بازه تغییرات آن بین ۲۰۵ تا ۳۶۸ میکروزیمنس بوده است که نشان دهنده ارتباط مستقیم آب این گمانه‌ها و مخزن می‌باشد. در تکیه‌گاه چپ، هدایت الکتریکی بین ۲۷۸ تا ۳۳۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر در گمانه‌های پایین‌دست پرده تزریق و ۶۶۳ میکروزیمنس بر سانتی‌متر در گمانه OW11 در بالادست پرده می‌باشد. با توجه به نمودارهای سری زمانی این گمانه‌ها در قبل از آگیری کامل مخزن، مشخص شد که گمانه‌های OW9، OW10 و OW11 دارای آبخوان‌های معلق هستند و در زمان قبل از آگیری ناگهانی مخزن، تراز بالتر از تراز آب مخزن داشته‌اند. بر اساس نتایج هدایت الکتریکی گمانه OW11 نیز (که مقداری بیش از هدایت الکتریکی مخزن داشته است) می‌توان نتیجه گرفت که ارتباط

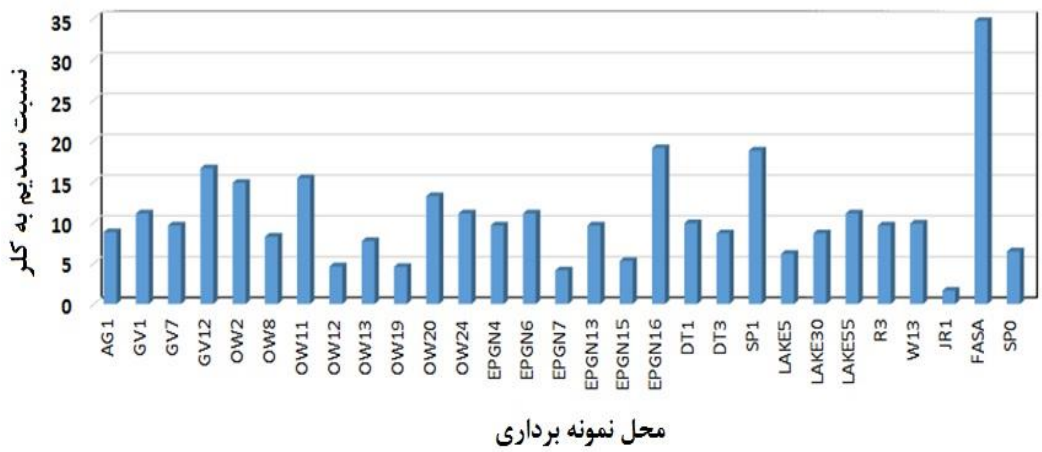
تیپ آب

تیپ آب دریاچه، چشمه گلابی و رودخانه از نوع بی‌کربنات سدیک است. در گمانه‌های نزدیک به پرده تزریق تیپ سولفات سدیک و یا منیزیک نیز مشاهده می‌شود. دلیل تیپ بی‌کربناته می‌تواند ناشی از انحلال کانی‌های کلسیت و دولومیت سازندهای سروک و تارپور باشد. در ارتباط با رخساره سدیک، انحلال هالیت منشأ آن نیست چرا که نسبت سدیم به کلر بجز در نمونه رودخانه (با نسبت ۱/۶) در تمام نمونه‌ها بیش از ۴ بوده و حتی در برخی به ۳۴ نیز می‌رسد (شکل ۵). با توجه به گسترش زیاد واحدهای رادیولاریتی در منطقه، منشأ سدیم و پتاسیم موجود در آب می‌تواند از انحلال کانی‌های حاصل از هوازدگی این سنگ‌ها باشد. اکثر گمانه‌ها دارای تیپ آب بی‌کربنات سدیک می‌باشند. در این میان گمانه OW11 در بالادست و گمانه OW8 در پایین‌دست پرده تزریق در تکیه‌گاه چپ دارای تیپ و رخساره سولفات سدیک می‌باشند. با توجه به مقدار هدایت الکتریکی متفاوت در گمانه‌های ذکر شده و موقعیت قرارگیری آن‌ها می‌توان عدم ارتباط هیدرولیکی این نواحی (واحد رادیولاریتی) با مخزن را تأیید کرد. نوع تیپ سولفات سدیک می‌تواند به علت انحلال رگه‌های تبخیری و زمان ماندگاری بالای آب در آبخوان باشد.



شکل ۴- تغییرات هدایت الکتریکی در منابع آب نزدیک مخزن

Fig. 4. Changes in electrical conductivity in water sources near the reservoir

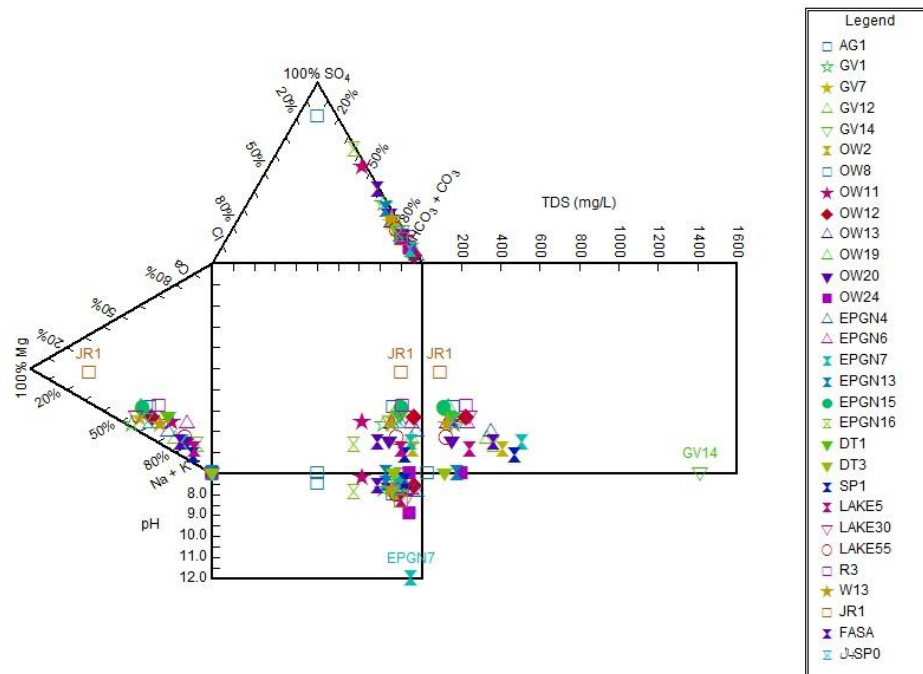


شکل ۵- نمودار نسبت غلظت سدیم به کلر (بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر)

Fig. 5. Sodium to chlorine concentration ratio (in meq/l)

پایین دست می‌باشد. با توجه به قرارگیری نمونه‌ها در گوشه پایین و راست مربع نمودار دورو (شکل ۶) می‌توان انحلال ساده و اختلاط آب‌ها را از مهم‌ترین فرایندهای هیدروشیمیایی تأثیرگذار در نمونه‌های ساختگاه سد رودبال دانست.

همان‌طور که گفته شد تیپ اکثر نمونه‌ها (نمونه‌های رودخانه، چشمه‌ها و گمانه‌های محدوده مخزن سد و چاه‌های کشاورزی پایین دست مخزن سد) از نوع بی‌کربنات سدیک هستند. این نتایج نشان‌دهنده ارتباط هیدرولیکی مخزن با منابع آب اطراف و



شکل ۶- نمودار دورو نمونه‌های برداشت شده

Fig. 6. Durov diagram for collected samples

سطح آب مخزن و سطح آب گمانه‌های مشاهده‌ای پایین دست پرده در تکیه‌گاه راست مشخص شد که احتمالاً مسیرهای جریان آب مخزن به سوی این گمانه‌ها در ترازهای بالاتر از حدود ۱۳۲۰ متر وجود دارد و با فاصله گرفتن از مخزن سد میزان افت سطح آب در این گمانه‌ها بیشتر می‌شود. اختلاف تراز آب بین پیژومترهای بالا و پایین دست پرده بین ۲ تا ۶۷ متر متغیر است. بدیهی است که بیشتر بودن این اختلاف نشانگر عملکرد بهتر پرده تزریق و یا کم تراوا بودن واحدهای سنگی در آن بخش است. نتایج نشان می‌دهد که جریان عمومی آب در هر دو جناح به سوی بستر رودخانه است. فشردگی خطوط تراز آب زیرزمینی و در نتیجه افت قابل توجه بار هیدرولیکی

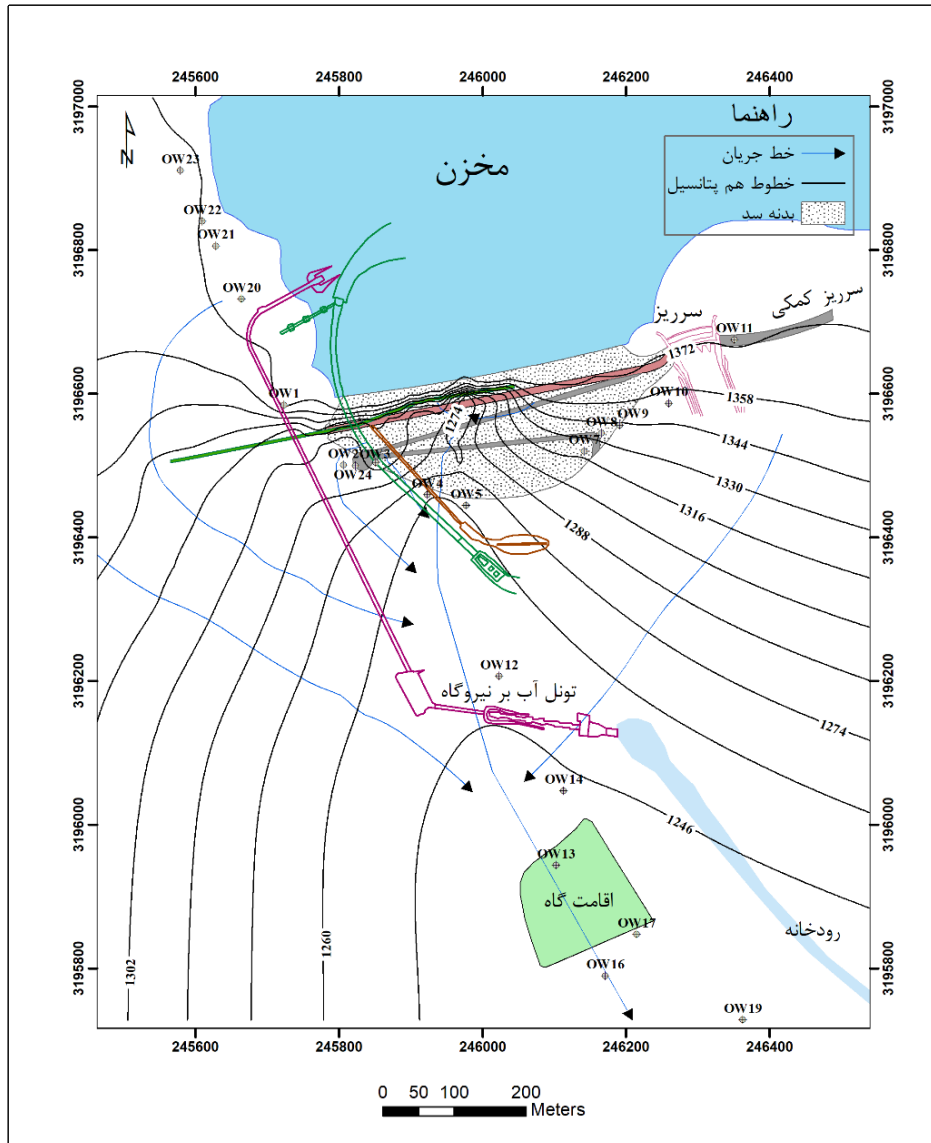
تغییرات تراز آب

بر اساس داده‌های سطح آب زیرزمینی در پیژومترهای بالا و پایین دست پرده آب‌بند و چاه‌های مشاهده‌ای، نقشه هم‌پتانسیل محدوده در هنگام تراز نرمال مخزن تهیه و در شکل ۷ نشان داده شده است. به طور کلی تراز آب گمانه‌های پایین دست پرده تزریق در جناح چپ حداقل ۲۰ متر از تراز نرمال مخزن کمتر است و با فاصله گرفتن از مخزن بر مقدار این اختلاف بار هیدرولیکی افزوده می‌شود. با توجه به تراوایی کم رادیولاریت در این ناحیه امکان فرار آب قابل توجهی وجود ندارد. در جناح راست با توجه به وجود سازند کارستی سروک احتمال فرار آب بیشتر است. بر اساس بررسی نوسان

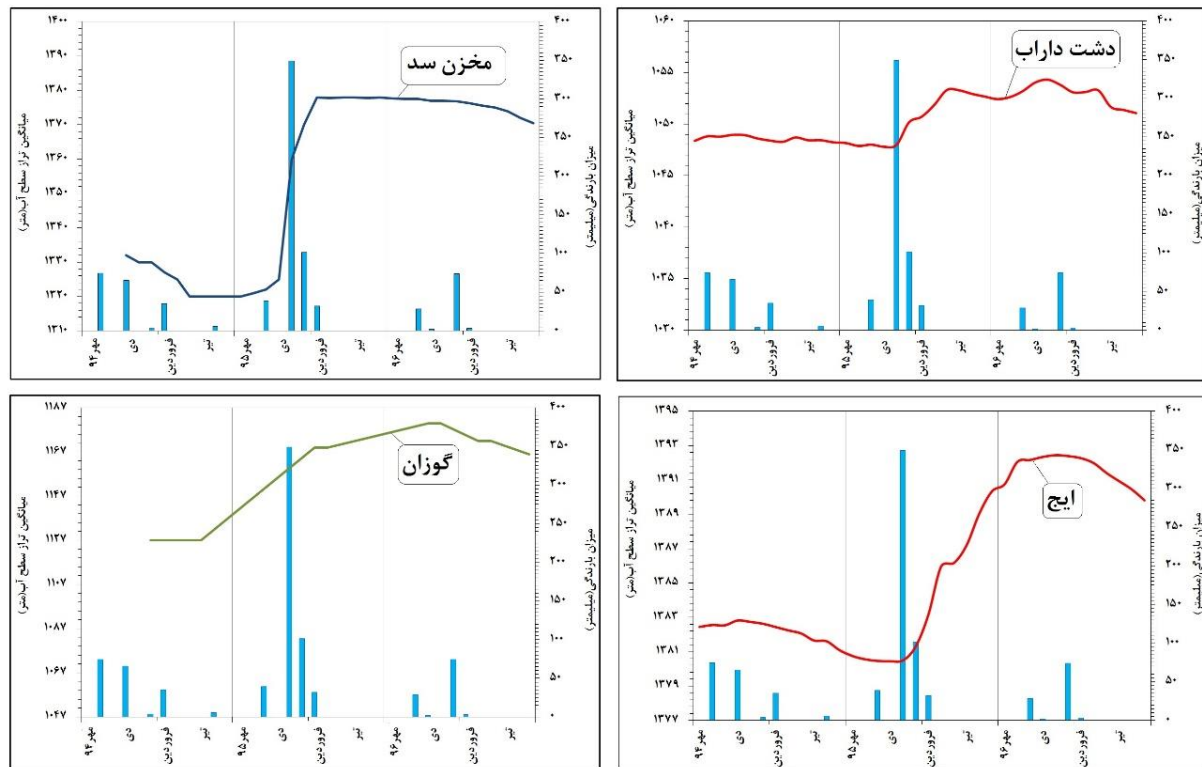
ناحیه گوزان است. اگرچه از افزایش تراز آب مخزن به عنوان عامل افزایش تراز آب زیرزمینی در ناحیه گوزان یاد می‌شود، اما باید توجه داشت که هیدروگراف واحد دشت داراب (۲۰ کیلومتری جنوب شرق مخزن) و دشت ایچ (۲۰ کیلومتری شمال شرق مخزن سد) نیز از افزایش چشمگیر تراز آب زیرزمینی در زمان مشابه حکایت دارد. بارش بی‌سابقه در بهمن‌ماه سال ۱۳۹۵ می‌تواند دلیل افزایش چشمگیر تراز آب زیرزمینی در دشت‌های پیرامون سد رودبال باشد. در ناحیه چشمه گلابی، افزایش دبی چشمه از ۵۰ لیتر بر ثانیه قبل از آبیگری مخزن به بیش از ۲۵۰۰ لیتر بر ثانیه پس از آن مشاهده شده است. سطح زمین در محل روستای چشمه گلابی در حدود ۱۱۲ متر از سطح زمین در روستای گوزان پایین‌تر است. بنابراین در شرایط یکسان، آب تمایل بیشتری به حرکت به سوی چشمه گلابی دارد.

در مجاورت پرده تزریق، نشانگر عملکرد مناسب آن است. با این وجود، مقداری آب از درون پرده تکیه‌گاه راست و پیرامون آن به سوی پایین‌دست جریان می‌یابد. به نظر می‌رسد که در محدوده چاه مشاهده‌ای OW24 و پیژومتر P8 (در بخش میانی محور سد) یک ناحیه آب‌بر وجود دارد که جهت جریان آب زیرزمینی را به سمت این ناحیه‌ها متمایل می‌کند.

بنا بر برخی نظریه‌ها، فرار آب از مخزن سبب افزایش تراز آب زیرزمینی در نواحی روستاهای گوزان (در ۹/۶ کیلومتری پایین‌دست بدنه سد و در بخش انتهایی دره رودبال) و گلابی (در دامنه غربی کوه بردنو و در فاصله ۹/۴ کیلومتری از بدنه سد) شده است. موقعیت این روستاها در شکل ۱ قابل مشاهده است. هیدروگراف آب زیرزمینی در سال ۹۵-۹۶ نشانگر حدود ۳۰ متر افزایش تراز آب زیرزمینی در



شکل ۷- نقشه ایزوپتانسیل و جریان آب زیرزمینی در محدوده ساختگاه سد رودبال
Fig. 7. Iso-potential map and groundwater flow direction at the dam site



شکل ۸- تغییرات تراز آب مخزن، مقدار بارش و سطح آب زیرزمینی در دشتهای داراب، ایچ و گوزان

Fig. 8. Time series of rainfall, reservoir water table and groundwater in Darab, Ich and Gavazan aquifers

انتقال آب را دارد. در ساختگاه سد رودبال پنجره ورود مسیر محتمل فرار آب به سازند سروک و آبرفت بستر رودخانه محدود می‌شود. این پنجره در جناح راست و بستر مخزن، از محدوده محور سد تا چهار کیلومتر بالادست آن گسترش یافته است. عمق این پنجره از تراز نرمال مخزن تا بستر آن را شامل می‌شود. با توجه به ضخامت کم آبرفت و قرارگیری آن بر روی سازند سروک، آبخوان کارستی می‌تواند به‌عنوان زهکش و دریافت‌کننده نهایی آب آبرفت نیز عمل کند. با توجه به تراوایی زیاد سازند سروک، آب پس از ورود به آن می‌تواند در آبخوان کارستی جریان یافته و به سمت نقاط خروجی مستعد حرکت کند. محل خروج آب می‌تواند تمامی نواحی پیرامون مخزن متشکل از آهک‌های سروک و تارپور و همچنین آبخوان‌های آبرفتی مجاور باشد که در تراز کمی‌تر از تراز نرمال مخزن، از بدنه سد تا روستای گوزان و در نواحی غربی کوه بردنو رخنمون دارند. بر اساس دستاوردهای این پژوهش، دو مسیر احتمالی برای فرار آب مخزن ارائه گردیده است. در

نتیجه‌گیری

مسیر محتمل فرار آب شامل پنجره ورود، مسیر انتقال و پنجره خروج آب می‌باشد. پنجره ورود آب شامل آن بخش از تشکیلات تراوای زمین‌شناسی است که در تماس مستقیم با آب دریاچه هستند و آب دریاچه توانایی ورود به آن را دارد. مسیر انتقال درون تشکیلات تراوا به سمت نقاط خروجی گسترش می‌یابد. بدیهی است که منطقه خروج نیز از تشکیلات تراوایی تشکیل شده است که در ارتفاعی پایین‌تر از تراز آب مخزن قرار دارند. آب مخزن با سازند سروک و واحد رادیولاریتی در تماس است. واحد رادیولاریتی در جناح چپ مخزن رخنمون دارد و با توجه به تراوایی کم آن می‌توان جناح چپ را تا حد زیادی آب‌بند دانست. سازندهای سروک و تارپور مهم‌ترین آبخوان‌های کارستی منطقه را ایجاد می‌کنند و توانایی ذخیره و انتقال آب را دارند. آبرفت بستر رودخانه نیز تراوا بوده و قابلیت ذخیره و

تفسیر ارتباط عمق مخزن با نقاط نشتی تنها از روی دمای آب قابل اتکا نیست چرا که انتقال حرارت در سنگ، نرخ جریان، و زمان ماند می‌تواند موجب خطا شود، اما داده‌های مربوط به دمای آب، هدایت الکتریکی، غلظت یون‌های اصلی و تراز آب زیرزمینی تا حدی توانست وجود نشتی از بخش‌هایی از پرده تزریق را مشخص نماید.

نتایج این پژوهش نشان داد که بر اساس نتایج یک مرحله نمونه‌برداری و یا اندازه‌گیری سطح آب نمی‌توان به طور دقیق مسیر فرار آب از مخزن سد را تشخیص داد. برای تعیین دقیق مسیرهای فرار آب، پیشنهاد می‌شود: ۱- مطالعه ایزوتوپی و هیدروشیمی در بازه‌های زمانی کوتاه مدت و بلند مدت انجام شود. ۲- آزمایش ردیابی و مطالعات ژئوفیزیک در جناح راست سد صورت پذیرد. ۳- تغییرات تراز آب زیرزمینی و دبی چشمه‌ها بصورت مستمر و منظم اندازه‌گیری شود.

مسیر نخست، جریان آب هم راستا با یال شرقی تاقدیس بردنو به سوی روستای گوزان است. در مسیر دوم، آب مخزن از طریق مجاری کارستی توسعه یافته در امتداد درز و شکستگی‌های عمود بر محور تاقدیس بردنو جریان یافته، از چشمه گلابی خارج می‌گردد. هرچند که پرده تزریق اجرا شده بخش زیادی از مسیر نخست را بند آورده، اما آب مخزن با دور زدن پرده تا حدی در این مسیر جریان می‌یابد. به دلیل نبود پرده تزریق در مسیر دوم، آب مخزن بدون مانع در این مسیر به سوی چشمه گلابی جریان دارد.

بررسی نتایج هیدروشیمی و تراز آب زیرزمینی نشان می‌دهد که پنجره ورود آب در ساختگاه سد بصورت کامل توسط پرده تزریق اجرا شده آب‌بند نشده است. تشابه دما، هدایت الکتریکی و تیپ آب مخزن با نقاط پایین‌دست پرده و نقشه خطوط جریان نشانگر عبور آب از عمق‌های مختلف مخزن به سمت پایین‌دست پرده تزریق است. اگرچه

References

- Alimoradi, S., Nassery, H. R., Alijani, F., Karimi, H., 2024. Comparison of physical, chemical and hydrogeological characteristics of karst springs in the western and eastern regions of Ilam province, Iran. *Journal of Earth Sciences* 8(1), 1-27.
- Bruce, D., Heenan, D., Wilson, D., 2005. Quality and Quantification in Rock Drilling and Grouting. In *Innovations in Grouting and Soil Improvement* 1-10.
- Donnelly, C.R., Hinchberger, S., Mohammadian, E., 2009. The Design of Foundation Treatment Measures for Dams on Karst Foundations. *Canadian dam association bulletin* 20(4), 20-27.
- Gutiérrez, F., Mozafari, M., Carbonel, D., Gomez, R. R. Raesi, E., 2015. Leakage problems in dams built on evaporites. The case of La Loteta Dam (NE Spain), a reservoir in a large karstic depression generated by interstratal salt dissolution. *Engineering Geology* 185, 139-154.
- Gürocak, Z., Alemdag, S., 2012. Assessment of permeability and injection depth at the Atasu Dam site (Turkey) based on experimental and numerical analyses. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 71, 221-229.
- Huang, Y., Hou, X., Fu, Z., Wang, J., 2018. Detection of leakage paths at the Wanyao dam body in Southwest China by hydrochemical analysis and tracer testing. *Environmental Earth Sciences* 77(23), 791.
- Kalantari, N., Pourakbari, S., Moradieghad, T., 2025. Identifying the recharge sources of import ant karst springs in Kohgiluyeh and BoyerAhmad provinces using stable isotopes of oxygen 18 and deuterium. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 11(1), 131-151.
- Laksiri, L.B.K., 2007. Investigation of water leakage mechanism in the karstic dam site. Dissertation. Saga University, Samanlawewa, Srilanka.
- Lee, J. Y., Kim, H. S., Choi, Y. K., Kim, J. W., Cheon, J. Y., Yi, M. J., 2007. Sequential tracer tests for determining water seepage paths in a large rockfill dam, Nakdong River basin, Korea. *Engineering Geology* 89(3-4), 300-315.
- Pazoki, M., Mozafari, M., Fijani, E., Sohrabi, B.A., 2022. Relation between the grout take, rock quality and permeability of radiolarite and limestone at the Roudbal Dam Site (SW Iran). *Hydrogeology* 81-90.
- Milanović, P., 2004. *Water resources engineering in karst*. CRC press.
- Milanović, P., 2015. Karst of eastern Herzegovina, the Dubrovnik littoral and western Montenegro. *Environmental Earth Sciences* 74(1), 15-35.

- Mozafari, M., Raeisi, E., Guerrero, J., 2018. Contribution of spectral coherency analysis and tracer test to study leakage at the Doosti Dam reservoir, Iran and Turkmenistan. *Environmental Earth Sciences* 77(4), 139.
- Mozafari, M., Van Brahana, J., Eskandari, R., Pazoki, M., 2024. Karst leakage analysis of Roudbal Dam, southwestern Iran, using geological, hydrogeological, hydrochemical and stable-isotopic approaches. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 83(11), 466.
- Nabizadeh, C. N., Karami, G. H., Taheri A., Ramazani, R., (2024). Investigation of the dominant flow system in the Nekarood karst basin. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 10 (2), 538-556.
- Nonveiller, E., 1988. *Developing in Geotechnical Engineering*. Elsevier, ISBN 964-91095-8-7, 250.
- Turkmen, S., Özgüler, E., Taga, H., Karaogullarindan, T., 2002. Seepage problems in the karstic limestone foundation of the Kalecik Dam (south Turkey). *Engineering Geology* 63(3-4), 247-257.
- Unal, B., Eren, M., Yalcin, M. G., 2007. Investigation of leakage at Ataturk dam and hydroelectric power plant by means of hydrometric measurements. *Engineering Geology* 93(1-2), 45-63.