



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

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

Investigation of the dominant flow system in the Nekarood karst basin

Narges Nabizadeh Chamazcoti¹, Gholam Hossein Karami^{2*}, Azizollah Taheri³, Ramazan Ramazani Omali

1. Department of Hydrogeology and Environmental Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

2. Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Karaj, Iran.

3. Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

4. Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

Article info

Article history

Received: 13 November 2024

Accepted: 15 December 2024

Keywords:

Karst spring, dominant flow system, Nekarood.



Abstract

The Nekarood basin is located in the north of Iran and has an area of 2275 km². In the Nekarood Basin, the majority of limestones include thick bedded and massive limestones of Lar Formation and Cretaceous limestones, and there is also a lesser amount of limestones of the Elika, Dalichai and Ruteh Formations. Various features such as the amount of outcrop, thickness and lithological characteristics of karst rocks and their relationship to other lithologies on a regional scale are the geological controls on karst development. Among these factors, the thickness and lithology of the existing formations in the studied area are of great importance, in such a way that if the outcropping limestone is thick bedded and massive, the karstification process is very high. In order to investigate and analyze parameters such as the hydrograph and recession curve of the basin's springs, discharge coefficient, type of flow system (conduit and diffuse), determination of the source of recharge, and water quality of the springs, physical and chemical characteristics of the springs (discharge, electrical conductivity, temperature, etc.) were analyzed. In the Nekarood basin, four karst springs, Jezi, Espeo, Kao Cheshmeh, and Senbi have relatively high discharge rates and were selected for detailed study. The analysis of temporal variations in discharge indicates that the spring discharge is significantly dependent on regional precipitation. When precipitation exceeds 15 mm, which is sufficient to recharge the aquifer, the spring water flow increases after a relatively short time delay. Furthermore, the analysis of temporal variations in electrical conductivity of the karst springs shows that electrical conductivity decreases as discharge increases. This indicates that as the karst aquifer is recharged and the proportion of recharged water increases, the dilution process reduces the dissolved salts in the aquifer water, leading to a decrease in electrical conductivity. Analysis of the recession curves of the springs revealed that the recession curve for all selected springs is multi-slope, and the discharge coefficients range from 10⁻³ to 10⁻². Considering that the coefficient of discharge variation and the recession coefficients are relatively high in all four karst springs, it can be concluded that the dominant flow system in this karst aquifer is of the conduit-diffuse type.

Introduction

Karst is defined as an area with a specific morphology and a significant subsurface drainage system formed by the dissolution of soluble rocks in natural waters (Karami, 2002). Karst aquifers are widely distributed throughout the world and provide water resources for about a quarter of the world's population (Ford and Williams, 2007). Springs are one of the most important

hydrogeological features of the hydrological cycle that can provide valuable information about the groundwater flow system in karst environments (Fiorillo et al., 2015; Malik and Vojtkov, 2012). The process of karstification creates a complex network of fractures and dissolution channels in the limestone. These fracture networks and dissolution channels allow water to drain into karst springs (Fiorillo and Malik, 2019). White (1998) divides

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.2.107741>*Corresponding author: Gholam Hossein Karami; E-mail: g.karami@khu.ac.ir

How to cite this article: Nabizadeh Chamazcoti, N., Karami, G.H., Taheri, A. A., Ramazani Omali, R., 2024. Investigation of the dominant flow system in the Nekarood karst basin. Kharazmi Journal of Earth Sciences 10(2), 538- 556. <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.2.107741>



BY NC

karst flows into two types: conduit and diffuse, based on the behavior of springs.

Rouhi and Kalantari (2019) used multi-year hydrographs to compare the hydrogeological regime of karst springs in the Kuh Sefid anticline in Khuzestan Province. The results of this study show that karst reservoirs formed in the Kuh Sefid anticline exhibit different hydraulic behaviors. Shamsi et al. (2019) analyzed the Recession curve of karst springs in the Lasem region and determined the type of flow system and karst development in the region. In the Nekarood karst basin, there are extensive limestone outcrops in which a karst aquifer has formed. This karst includes a number of large and small springs that have not been studied to investigate the type of flow system in them. Therefore, the aim of this research is to investigate the hydrogeological and hydrogeochemical characteristics of the springs in the Nekarood karst basin and also to determine the dominant flow system of the springs. These springs are investigated for the first time in this research.

Materials and Methods

In order to investigate the dominant flow system in the Nekarood Karst basin, spring hydrographs and recession curves, discharge coefficients, the type of flow system (conduit vs. diffuse), recharge sources, and spring water quality, the physical and chemical characteristics of the springs (discharge, electrical conductivity (EC), temperature, etc.) were analyzed. To construct hydrographs, spring discharge was measured from July 2022 to October 2023. Discharge variations in the karst springs are influenced by factors such as precipitation amount and intensity, the extent and lithology of the karst formations, the degree of karstification, and the contributing area of the spring's catchment. The shape of the spring hydrograph reflects the aquifer's response to recharge. In particular, the shape of the recession curve provides significant insights into the storage and structural characteristics of the spring's source aquifer, as well as the drainage behavior of the karst system. Ultimately, by plotting spring recession curves and

determining discharge coefficients (α), along with analyzing the chemical data of the springs, the dominant flow regime within the studied karst aquifers, the evaluation of the karst spring catchments, the dominant water type, and the predominant aquifer lithology were characterized.

Results and Discussion

Spring discharge data, coupled with precipitation records, were utilized to analyze temporal variations in spring discharge and their correlation with precipitation. Spring water chemistry data were employed to determine water type and chemical facies. Electrical conductivity (EC) in the springs generally increased during the dry season compared to the wet season. discharge in the selected springs increased during late winter and spring, exhibiting a distinct peak. This hydrograph pattern is indicative of rapid and significant groundwater depletion through solution conduits, attributable to the influence of well-developed karst systems within the Lar and Cretaceous limestones. Hydrograph analysis of the karst springs is a practical method for determining whether the flow regime is predominantly conduit or diffuse, facilitating the calculation of recession coefficients (α). The catchments of the studied karst springs are primarily located at high altitudes and typically receive precipitation from early May to mid-November. Discharge variations in these springs are highly significant, with most exhibiting a dual-recession curve behavior. In the southern Caspian highlands, recession curves differ substantially from those observed in other global karst systems (e.g., those in Yugoslavia), often showing more than 10 peaks and troughs, lacking a uniform decline. This characteristic indicates a highly developed karst system in the region. Consequently, for recession coefficient calculations, discharge data between successive precipitation events were utilized. The spring recession curves exhibit two distinct slopes. The slope of each linear segment was interpreted as a recession coefficient (α). The steeper initial slope represents the dominant flow regime and the degree of karst development, reflecting rapid drainage through

larger conduits, while the gentler second slope indicates a slower release from smaller fractures and fissures. Based on the calculations, recession curve analysis revealed multi-segmented curves for all selected springs, with recession coefficients (α) ranging from 10^{-3} to 10^{-2} . The initial slope reflects the dominance of conduit flow and karst development, whereas the subsequent slope reflects drainage from smaller fractures and fissures.

Conclusions

Analysis of the relationship between spring discharge and electrical conductivity in the region has revealed that there is an inverse relationship between these two parameters; specifically, as discharge increases, electrical conductivity decreases. Additionally, the dominant electrical conductivity of the springs has increased in the dry season compared to the wet season. Hydrochemical investigations have shown that the predominant water type in the studied springs is bicarbonate-calcium. To determine the type of flow in karst aquifers, changes in the physical and chemical properties of the water exiting the springs are utilized. The temporal variations in physical (discharge) and chemical (electrical conductivity) properties of the water from the springs in the Nekarood basin, following precipitation events, have been considerably high. The coefficient of variation of all parameters indicates the predominance of a conduit-dominated flow system in the karst aquifer of these springs. Furthermore, the recession curves of the studied springs exhibit recharge coefficients ranging from 10^{-3} to 10^{-2} , which also signifies the predominance of a conduit-dominated flow system within the karst aquifer. This is consistent with the geomorphological characteristics of the study area, indicating karst development in the Nekarood spring basin. Moreover, these water-rich springs in the region are of a fault-controlled type and have formed as a result of fractures and faults. Considering the above findings, the characteristics of geomorphology, hydrogeology, hydrogeochemistry, and hydrogeological balance mutually corroborate each other.

References

- Fiorillo, F., Malik, P., 2019. Hydraulic behavior of Karst aquifers. *Water* 11 (1563), 1-6.
- Fiorillo, F., Vakanjac, R. V., Jemcov, I., Milanović, S., Stevanović, Z., 2015. Karst groundwater availability and sustainable development. *Karst Aquifers Characterization and Engineering* 421-530.
- Ford, D., Williams, P. D., 2007. *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons. The Atrium, Southern Gate, Chichester. 562 p.
- Karami, Gh.H., 2002, Ph.D. Thesis, Assessment of heterogeneity and flow systems in karstic aquifers using pumping test data, Civil engineering and geosciences, University of Newcastle, pp180.
- Rouhi, H., Kalantari, N., 2019. Using multi-year hydrograph to comparison the hydrogeological regimes of Karstic springs in Kuhe-safid anticline, Khuzestan, Iran. *Hydrogeology* 4(1), 14-25.
- Shamsi, A., Karami, G. H., Taheri, A., 2019. Recession curve analysis of major karstic springs at the Lasem area (north of Iran). *Carbonates and Evaporites* 34, 845-856.
- White, W.B., 1998. Groundwater Flow in Karstic Aquifers. In Delleur, J. W. (Ed.), *The Handbook of Groundwater Engineering*. CRC Press, Boca Raton, FL 21, 1-47.

CRediT authorship contribution statement

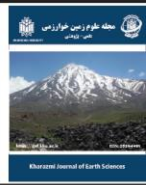
 Narges Nabizadeh Chamazcoti	Investigation, Writing - Original Draft, Formal analysis
 Gholam Hossein Karami	Conceptualization, Methodology, Project administration, Writing - Review & Editing
 Azizollah Taheri	Writing - Review & Editing
 Ramazan Ramazani Omali	Writing - Review & Editing



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

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

بررسی سیستم غالب جریان در حوضه کارستی نکارود

نرگس نبی‌زاده چمازکتی^۱، غلامحسین کرمی^{۲*}، عزیزالله طاهری^۳، رمضان رمضانی اومالی^۴

۱. گروه آبشناسی و زمین‌شناسی زیست‌محیطی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

۲. گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران.

۳. گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

۴. گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۵

واژه‌های کلیدی

چشمه کارستی، سیستم غالب جریان، نکارود.



حوضه نکارود با وسعت ۲۲۷۵ کیلومترمربع در شمال ایران قرار دارد. در حوضه نکارود بخش عمده آهک‌ها شامل سنگ‌آهک‌های ضخیم لایه و توده‌ای سازند لار و آهک‌های کرتاسه بوده و به مقدار کمتری سنگ‌آهک سازندهای الیکا، دلیچای و آهک‌های روته نیز وجود دارد. خصوصیات مختلفی از قبیل میزان رخنمون، ضخامت و خصوصیات لیتولوژیکی سنگ‌های کارستی و ارتباط با لیتولوژی‌های دیگر در مقیاس ناحیه‌ای، کنترل کننده‌های زمین‌شناسی توسعه‌ی کارست را تشکیل می‌دهند. از میان این عوامل ضخامت و لیتولوژی سازندهای موجود در منطقه مورد مطالعه از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد، به گونه‌ای که اگر سنگ آهک رخنمون یافته ضخیم لایه و توده‌ای باشد معمولاً پدیده کارستی شدن با سرعت و شدت بیشتری انجام می‌شود. در راستای بررسی و تجزیه و تحلیل پارامترهایی همچون هیدروگراف و منحنی فرود چشمه‌های حوضه، ضریب بده، نوع سیستم جریان (مجاری و افشان)، تعیین منشأ تغذیه و کیفیت آب چشمه‌ها، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌ها (دبی، هدایت الکتریکی، دما و ...) مورد تجزیه و آنالیز قرار گرفت. در حوضه نکارود، چهار چشمه کارستی جزئی، اسپه او، کعوشمه و سن بی آبدی نسبتاً بالایی دارند که به عنوان چشمه‌های منتخب مورد بررسی قرار گرفتند. بررسی تغییرات زمانی آبدی بیانگر این است که آبدی چشمه به طور قابل توجهی به بارش‌های منطقه وابسته است. به این ترتیب که با رخداد بارش‌های بیش از ۱۵ میلی‌مترمیلی متر (که موجب تغذیه آبخوان می‌شوند) آبدی چشمه‌ها با تاخیر زمانی نسبتاً کوتاهی افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این، بررسی تغییرات زمانی هدایت الکتریکی چشمه‌های کارستی نشان می‌دهد که با افزایش دبی، هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد. این مسئله بیانگر این است که با تغذیه آبخوان کارستی و افزایش سهم آب‌های تغذیه شده، فرایند رقیق‌سازی موجب کاهش املاح محلول در آب آبخوان شده و در نتیجه هدایت الکتریکی کاهش پیدا می‌کند. بررسی منحنی فرود نشان داد که منحنی فرود برای تمام چشمه‌های منتخب چندشبهی بوده و مقدار ضریب‌های بده در محدوده 10^{-3} تا 10^{-2} قرار می‌گیرد. با توجه به این که ضریب تغییرات دبی و هم‌چنین ضریب بده در هر چهار چشمه کارستی نسبتاً بالا می‌باشد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سیستم جریان غالب در این آبخوان کارستی از نوع مجاری - افشان است.

مقدمه

(Karami, 2002). آبخوان‌های کارستی به طور گسترده در سرتاسر جهان پراکنده شده‌اند و منابع آب را برای حدود یک چهارم جمعیت جهان فراهم می‌کنند (Ford and Williams, 2007). در ایران حدود ۱۱ درصد از سطح کشور از سازندهای

کارست به گستره‌ای گفته می‌شود که دارای مورفولوژی خاص و سیستم زهکشی زیرسطحی قابل توجهی بوده، که در اثر انحلال سنگ‌هایی با قابلیت انحلال در آب‌های طبیعی ایجاد می‌شود

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.2.107741>

*نویسنده مسئول: غلامحسین کرمی g.karami@khu.ac.ir

استناد به این مقاله: نبی‌زاده چمازکتی، ن.، کرمی، غ.، ح.، طاهری، ع. ا.، رمضانی اومالی، ر. (۱۴۰۳). بررسی سیستم غالب جریان در حوضه کارستی نکارود. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۱۰، شماره ۲، صفحه ۵۳۸ تا ۵۵۶. <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.2.107741>



کارستی تشکیل شده و از مهم‌ترین منابع آب شیرین در کشور می‌باشند (Raeisi and Kowsar, 1997). آبخوان‌های کارستی از منابع مهم آب در سراسر دنیا به شمار رفته و کشور ایران نیز با توجه به موقعیت آب و هوایی آن و کمبود بارش‌ها در سال‌های اخیر و توزیع مکانی و زمانی نامناسب، باعث شده که منابع کارستی اهمیت ویژه‌ای پیدا کنند. همچنین این منابع آبی دارای کیفیت بسیار مطلوبی بوده و از بهترین و سالم‌ترین منابع آب شرب به شمار می‌روند. چشمه‌ها از مهم‌ترین عوارض هیدروژئولوژیکی چرخه هیدرولوژیکی هستند که می‌توانند اطلاعات ارزشمندی در مورد سیستم جریان آب زیرزمینی در محیط‌های کارستی ارائه دهند (Fiorillo et al., 2015; Malik and Vojtkov, 2012) به دلیل ناهمگن بودن و توسعه‌ی مجاری انحلالی، تعیین منشأ در آبخوان‌های کارستی نسبت به آبخوان‌های آبرفتی پیچیده‌تر است (Ford and Williams, 2007). وجود چشمه‌ها یکی از ویژگی‌های مناطق کارستی است که بخش عمده‌ای از ذخیره‌ی دینامیکی آبخوان‌ها را تخلیه می‌کنند (Kresic and Bonacci, 2010).

کارستی شدن سنگ‌های قابل انحلال را می‌توان به عنوان مهم‌ترین پدیده زمین‌شناختی که رفتار هیدرولیکی آبخوان‌های کارستی را تحت تأثیر قرار می‌دهد در نظر گرفت (Torresan et al., 2020). فرآیند کارستیفیکاسیون باعث ایجاد شبکه پیچیده‌ای از درز و شکاف‌ها و مجاری انحلالی در سنگ‌های آهکی خواهد شد. این شبکه‌های شکستگی و مجاری انحلالی، باعث زهکشی آب به سمت چشمه‌های کارستی می‌شوند (Fiorillo and Malik, 2019).

مجراهای انحلالی در سفره‌های کارستی به شدت بر جریان آب زیرزمینی و دینامیک انتقال املاح تأثیر می‌گذارد. در بسیاری

از سیستم‌های کارست، مجراها به شبکه‌های پیچیده تبدیل می‌شوند که اغلب چندین کیلومتر در طول یک ماتریکس سنگ‌آهک را در بر می‌گیرند. در سنگ‌های آهکی دوران پالئوزوئیک که دارای ویژگی‌های کارست هستند، ماتریکس به دلیل کاهش تخلخل پس از تدفین، عموماً نفوذپذیری پایینی دارد. در سفره‌های کارستی جوان‌تر، نفوذپذیری درون ماتریکس سنگ آهک می‌تواند نسبتاً بالا باشد، که اجازه می‌دهد مقادیر زیادی از جریان عبوری ماتریکس وجود داشته باشد (Palmer, 2002; Florea and Vacher, 2006). شکل ۱ سیستم‌های جریان در یک سفره کارستی را نشان می‌دهد.

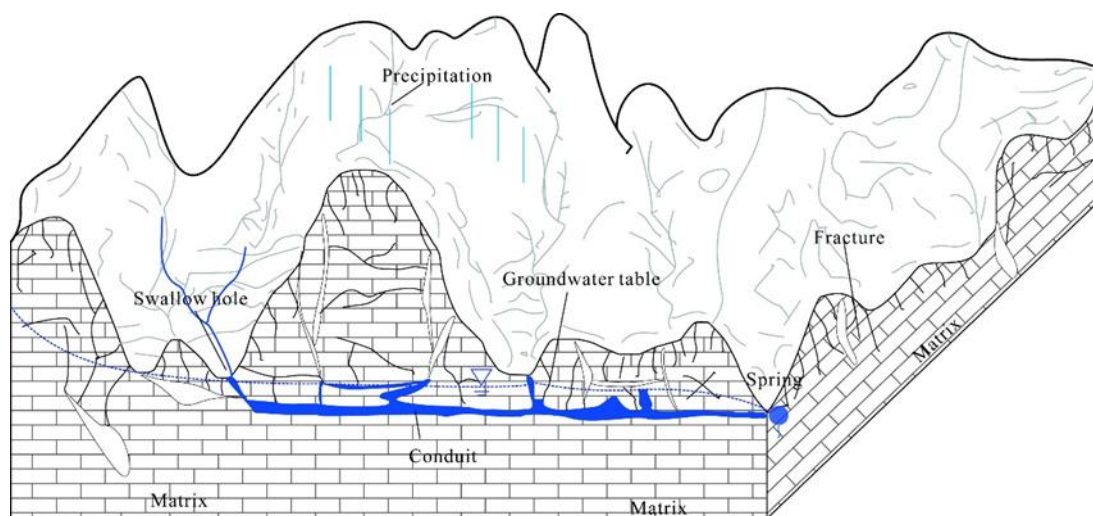
از این رو، رایج‌ترین و کم هزینه‌ترین مطالعه سفره‌های کارستی در سال‌های اخیر بررسی تغییرات زمانی خواص فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی است (Raeisi et al., 2007). در این زمینه با بهره‌گیری از نمودار هیدروگراف چشمه‌ها، داده‌های جالب توجهی درباره شبکه زهکشی محیط‌های درز و شکاف‌دار و مجرای به دست می‌آید (Chang et al., 2015).

زولت (Zölt, 1960) و گامز (Gams, 1966) اولین افرادی بودند که تغییرات شیمیایی چشمه‌ها را به نوع جریان آب زیرزمینی مرتبط دانسته‌اند. وایت (White, 1998) بر اساس رفتار چشمه‌ها، جریان‌های کارستی را به دو نوع مجرای و افشان تقسیم نموده است. لانگمویر و جاکوبسون (Jacobson and Longmuir, 1974) بر اساس تغییرات هدایت الکتریکی و دبی چشمه‌ها، سیستم‌های کارستی را به ۴ دسته مجرای، مجرای-افشان، افشان و افشان نوع گیتزبورگ تقسیم‌بندی نموده‌اند. براساس مطالعات آن‌ها، ضریب تغییرات چشمه‌های با سامانه مجرای، بزرگتر از ۱۵۰ درصد، چشمه‌های مجرای-افشان، بزرگتر از ۴۰

نتایج این تحقیق نشان داد که تبادل آب بین سیستم درز و شکاف سنگ‌های آهکی و مجاری انحلالی در طول بارندگی‌های مهم رخ می‌دهد. این مطالعه نقش درز و شکستگی‌ها در دبی کلی چشمه را مشخص کرد.

درصد، چشمه‌های افشان، کمتر از ۱۰ درصد و افشان نوع گیتزبورگ با تغییرات کم برآورد شده است.

سیول و همکاران (Sivelle et al., 2019) تبادل جریان آب بین سیستم درز و شکاف و مجراهای انحلالی در دو حوضه کارستی در فرانسه را با استفاده از مدل KarstMod بررسی کردند.



شکل ۱- مدل مفهومی آبخوان کارستی (Zhao et al., 2022)

Fig. 1. Conceptual model of a karst aquifer (Zhao et al., 2022)

چشمه شده‌اند، اما در مورد چشمه پوتو به دلیل جریان کانالی و تخلیه سریع، دوره‌های ترسالی اثر زیادی در افزایش ذخیره مخزن نداشته‌اند. شمسی و همکاران (Shamsi et al., 2019) با تجزیه و تحلیل منحنی فرود چشمه‌های کارستی منطقه لاسم به نوع سیستم جریان و توسعه کارست در منطقه پی بردند. آنان با توجه به نتایج اندازه‌گیری دبی چشمه‌ها و تجزیه و تحلیل منحنی فرود آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تمام چشمه‌های بخش جنوبی دارای سیستم جریان مجرای و چشمه‌های بخش شمالی دارای سیستم جریان افشان است. کراچی و همکاران (Kerachi et al.,

روحی و کلانتری (Rouhi and Kalantari, 2019) از هیدروگراف چندساله به منظور مقایسه رژیم هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی تاقدیس کوه سفید در استان خوزستان استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مخازن کارستی تشکیل شده در تاقدیس کوه سفید رفتارهای هیدرولیکی متفاوتی را نشان می‌دهند. همچنین بررسی هیدروگراف چشمه‌ها نشان داد که دوره‌های چند ساله بارندگی و خشکسالی بر افزایش و کاهش حجم ذخیره آبخوان چشمه برم جمال به‌طور قابل ملاحظه‌ای موثر بوده‌اند و سبب نوسانات قابل ملاحظه دبی پایه

(2024) به تعیین رژیم جریان در آبخوان‌های کارستی در تاقدیس‌های سالدوران، زرآب و کوه سوخته در جنوب غرب ایران پرداختند. نتایج هیدروژئوشیمیایی در این منطقه نشان داد که زمان اقامت آب در آبخوان‌های چشمه‌های انتخابی در محدوده مطالعاتی سالدوران - زرآب نسبتاً کوتاه بوده و این امر نشان از حاکم بودن جریان مختلط (مجاری - افشان یا افشان - مجاری) در آبخوان کارستی این چشمه‌ها دارد. توکلی و کرمی (Tavakkoli and Karami, 2021) به بررسی سیستم غالب جریان و سازوکار تخلیه چشمه‌های کارستی غرب مجن پرداختند. از خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های موجود در منطقه (از جمله دبی، هدایت الکتریکی و دما) برای تعیین سیستم غالب جریان استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که منحنی فرود چشمه‌های مورد مطالعه دارای یک ضریب بده با شیب ۰/۰۰۹ بوده و ضریب تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی برای تمام چشمه‌ها اندک است که بیانگر غالب بودن سیستم جریان افشان در آبخوان کارستی مورد نظر است. آبخوان‌های کارستی توسعه یافته دارای مجاری بزرگ بوده و به علت ذخیره‌سازی کم این مجاری به تغییرات اعمال شده بر آبخوان پاسخ سریع می‌دهند (Panagopoulos and Lambrakis, 2006) ارزیابی شکل هیدروگراف چشمه‌های کارستی، به عنوان نحوه پاسخ سیستم به بارش، از جمله اقدامات ضروری بوده که به درک ساختار درونی کارست و بررسی توسعه آن کمک می‌کند (White, 2002; Bonacci, 1993). در حوضه کارستی نکارود رخنمون‌های گسترده‌ای از آهک وجود داشته که سفره کارستی در آن تشکیل شده است و این کارست شامل تعدادی چشمه بزرگ و کوچک بوده که مطالعه‌ای تا کنون به لحاظ بررسی نوع سیستم جریان در آن‌ها انجام نشده است. با توجه به شرایط

اقلیمی (بارش‌های فراوان و برف) و چینه‌شناسی در این منطقه، تا کنون برآوردی از مقدار تغذیه در این حوضه صورت نگرفته است. جهت تعیین میزان تغذیه نیز نیازمند دانستن خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی در منطقه می‌باشد. بنابراین هدف اساسی از انجام این پژوهش بررسی سیستم غالب جریان کارستی در حوضه نکارود می‌باشد. به این ترتیب که نوع جریان در محدوده جریان‌های افشان تا مجاری مورد بررسی قرار گیرد.

موقعیت جغرافیایی

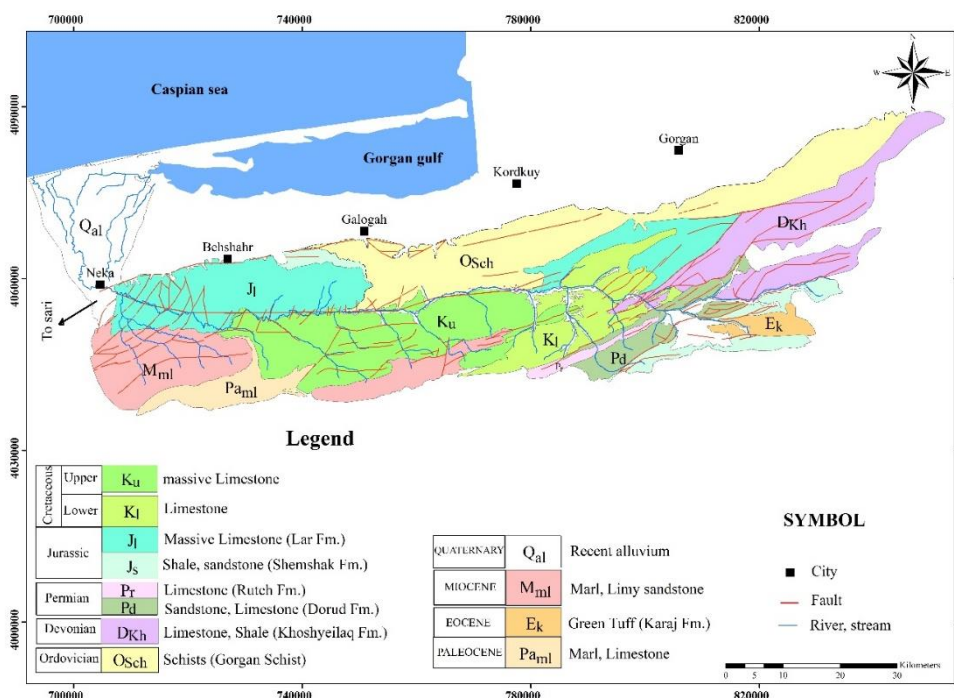
حوضه نکارود با وسعت ۲۲۷۵ کیلومتر مربع در شمال ایران قرار دارد. شهر ساری واقع در ۳۰ کیلومتری و شهر بهشهر واقع در ۲۸ کیلومتری شهر نکا مهم‌ترین مرکز جمعیتی محدوده مطالعاتی بوده که به ترتیب در بخش غربی و شرقی آن قرار گرفته‌اند. از نظر مختصات جغرافیایی این محدوده در عرض جغرافیایی ۳۰° ۳۶' تا ۱۵° ۳۷' و طول جغرافیایی ۵۳° ۰۰' تا ۴۵° ۴۵' واقع شده است (شکل ۲). حداکثر و حداقل ارتفاع این حوضه ۳۸۳۶ و ۵۲- متر از سطح دریا است. متوسط بارش سالانه در این حوضه ۴۳۰ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۱۴ درجه سانتی‌گراد است. این ناحیه بر اساس روش دمارتن از نظر اقلیمی در اقلیم مدیترانه‌ای قرار می‌گیرد.

زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی

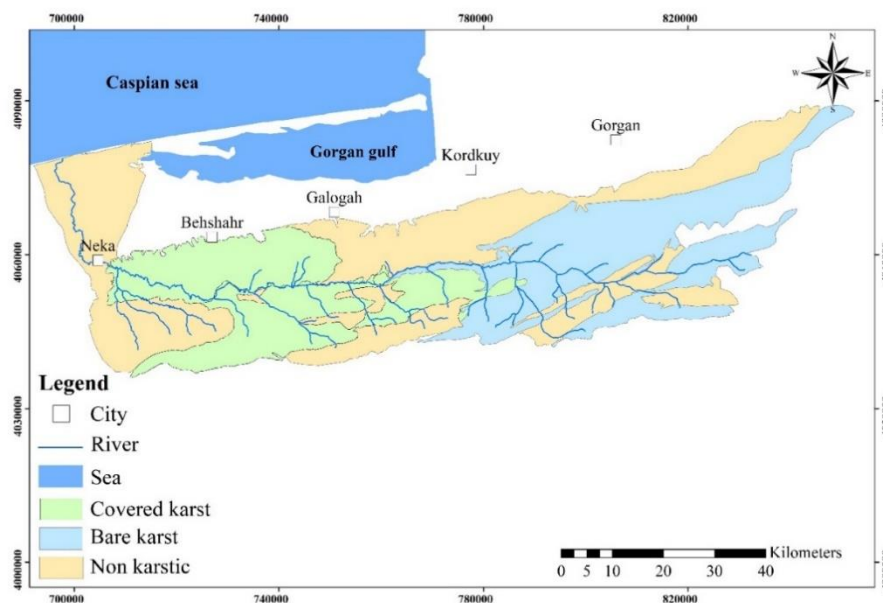
این محدوده از نظر جایگاه زمین‌شناسی جزئی از زون البرز است. از نگاه زمین‌ریخت‌شناسی مرز شمالی البرز منطبق بر تپه ماهورهای متشکل از نهشته‌های نئوژن و دشت ساحلی خزر است. در این منطقه نهشته‌های پالئوژئیک تا عهد حاضر متشکل از سازندهای غالب منطقه از جمله؛ الیکا، لار و آهک‌های کرتاسه رخنمون دارند. به لحاظ ساختاری نیز در شمال این حوضه گسل

مطالعاتی حوضه نکارود را نشان می‌دهد (شکل ۲). نقشه هیدروژئولوژی محدوده مورد مطالعه در شکل ۳ آمده است.

خزر و در مرز جنوبی گسل شمال البرز از نوع معکوس قرار دارد، همچنین گسل نکارود در مرکز این حوضه قرار دارد که رودخانه نکارود واقع بر این گسل جریان دارد. نقشه زمین‌شناسی محدوده



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ ساری و گرگان، سازمان زمین‌شناسی کشور (Geological Survey of Iran, 1980))
Fig.2. Geological map of the study area (Map 1:250,000 of Sari and Gorgan, Geological Survey of Iran, 1980)



شکل ۳- نقشه هیدروژئولوژیکی منطقه مورد مطالعه (تهیه شده در تحقیق حاضر)

Fig.3. Hydrogeological map of the studied area (this study)

شده است. غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها با روش یون کروماتوگرافی و بیکربنات نیز به روش تیتراسیون پتانسیومتری در آزمایشگاه شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران تعیین گردیده است.

جهت نمایش کیفی نمونه‌های آب در منطقه مورد مطالعه و تعیین رخساره‌های هیدروشیمیایی از نمودارهای هیدروشیمی استفاده می‌شود. این نمودارها توسط نرم‌افزار AQQA ترسیم می‌شود. در این مطالعه نیز از نمودارهای پایپر و شولر به جهت تعیین رخساره و بررسی منشأ استفاده می‌شود. یکی از کاربردی‌ترین نمودارهایی که جهت بررسی تیپ آب مورد استفاده قرار می‌گیرد نمودار پایپر است. شباهت‌ها و تفاوت‌های نمونه‌ها از طریق نمودار پایپر به خوبی مشخص می‌شود زیرا نمونه‌هایی که دارای خصوصیات مشابه هستند به صورت گروهی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. همچنین نمودار پایپر عمدتاً جهت تعیین تیپ آب،

مواد و روش‌ها

بخش کیفی

منطقه مورد مطالعه در شرق استان مازندران قرار دارد و تعداد ۴ چشمه با آبدهی بالا از جمله چشمه جزی، اسپه او، کعوچشمه و سن بی در این حوضه قرار دارند. در راستای بررسی سیستم غالب جریان در حوضه کارستی نکارود، هیدروگراف و منحنی فرود ۴ چشمه منتخب حوضه ضریب بده، نوع سیستم جریان (مجرایبی و افشان)، تعیین منشأ تغذیه و کیفیت آب چشمه‌ها، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌ها (دبی، هدایت الکتریکی، دما و ...) مورد تجزیه و آنالیز قرار گرفت.

در هر مرحله نمونه‌برداری (در بازه زمانی تیر ماه ۱۴۰۱ تا تیر ماه ۱۴۰۲) پارامترهای pH، دما و هدایت الکتریکی آب در محل چشمه اندازه‌گیری و ثبت گردیده است. نمونه‌برداری آب چشمه‌ها دقیقاً در مظهر خروجی چشمه‌ها تحت فشار طبیعی اتمسفر انجام

انحلال یا رسوبگذاری، اختلاط نمونه‌های آب و تبادل یونی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

بخش کمی

به منظور ترسیم هیدروگراف، دبی چشمه‌ها از تیر ماه ۱۴۰۱ تا مهر ماه ۱۴۰۲ به صورت ماهانه اندازه‌گیری شده است. تغییرات آبدی چشمه‌های کارستی تحت تأثیر عواملی از قبیل میزان بارش و شدت آن، وسعت و نوع سازند کارستی، درجه کارستیفیکاسیون و مساحت حوضه آبگیر آن می‌باشد. شکل هیدروگراف چشمه‌ها بازتاب پاسخ آبخوان در برابر تغذیه است. به ویژه شکل منحنی فرود اطلاعات مهم و بامعنی از ذخیره و خصوصیات ساختاری سیستم تأمین کننده آب چشمه و عملکرد زهکش‌های سیستم کارستی را فراهم می‌کند (Kresic and Bonacci, 2010). آنالیزهای کیفی منحنی فرود چشمه‌های کارستی توسط مایلت (Maillet, 1905) آغاز گردیده است که با استفاده از تابع نمایی ساده بیان نموده است (معادله ۱).

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (1)$$

در این معادله، Q آبدی چشمه‌ها در زمان T بر حسب مترمکعب بر ثانیه، Q_0 آبدی چشمه در زمان شروع فروکش، e پایه لگاریتم طبیعی، α ضریب بده و t مدت زمان بین دبی اولیه و ثانویه است. هنگامی که منحنی فرود دارای شیب کم باشد، تخلیه ذخیره دینامیکی آبخوان به کندی انجام می‌شود و چشمه‌های این نوع آبخوان اکثر دائمی هستند. برعکس وقتی که ضریب فروکش (α) زیاد باشد، منحنی فرود دارای شیب تند و ذخایر دینامیکی در این حالت موقتی است و خیلی سریع تخلیه می‌شود. به طور کلی هنگامی که ضریب فروکش (α) در (مرتبه

10^{-2}) قرار داشته باشد، نشان‌دهنده زهکشی سریع از شکستگی‌ها و مجاری کارستی می‌باشد و هنگامی که این ضریب کوچکتر باشد (مرتبه 10^{-3}) نشان‌دهنده تخلیه از حفره‌ها و درزه و شکستگی‌های کوچک است (Milanovic, 1981).

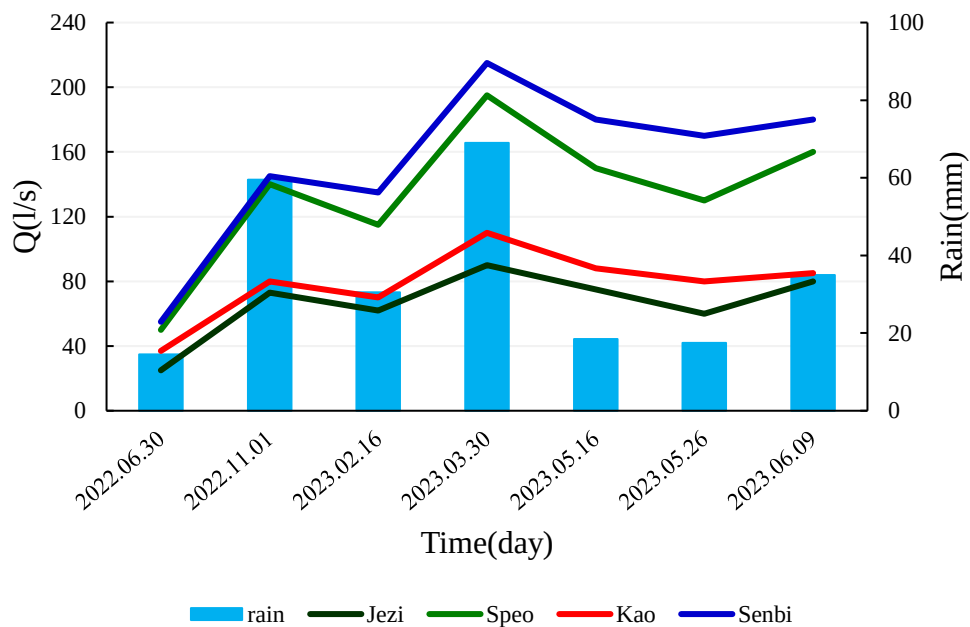
ضریب فروکش بیانگر نحوه تخلیه آبخوان می‌باشد و به صورت معادله ۲ محاسبه می‌شود.

$$\alpha = \frac{\log Q_2 - \log Q_1}{0.4343(t_2 - t_1)} \quad (2)$$

نسبت دبی ماکزیمم به دبی مینیمم و ضریب تغییرات دبی برای ارزیابی توسعه کارست در حوضه آبگیر چشمه‌ها استفاده شده است. بنابراین با ترسیم منحنی فرود چشمه‌ها، مقدار ضریب فروکش (α) و بررسی نتایج آنالیز شیمیایی چشمه‌ها، به نوع سیستم غالب جریان در آبخوان‌های کارستی مورد مطالعه، ارزیابی حوضه چشمه‌های کارستی، تیپ غالب آب و جنس غالب آبخوان پرداخته شده است.

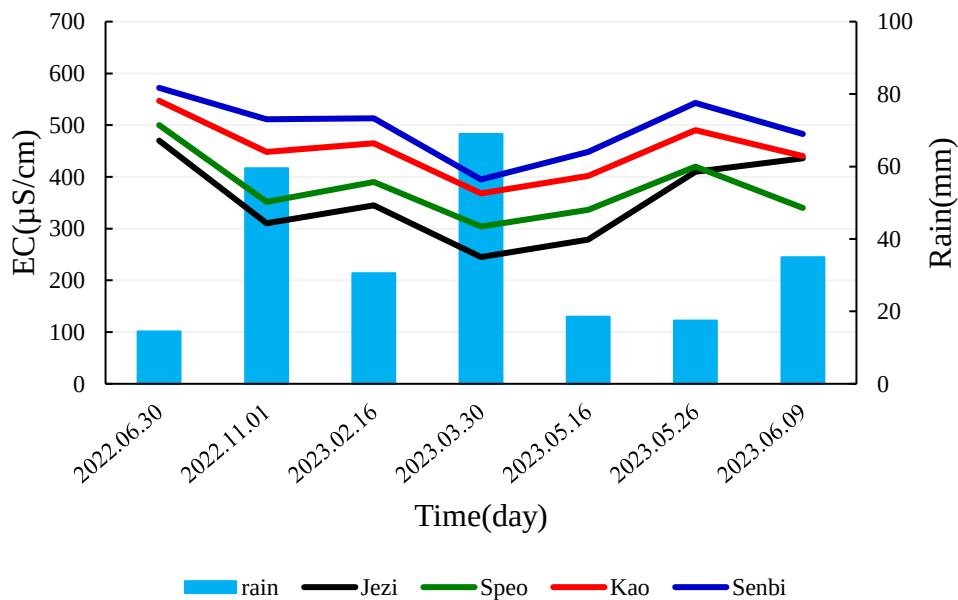
بحث

جهت ارزیابی تغییرات زمانی دبی چشمه‌ها، هیدروگراف چشمه‌های ذکر شده از تیر ماه ۱۴۰۱ تا خرداد ماه ۱۴۰۲ ترسیم شده است (شکل ۴ و ۵). طبق هیدروگراف ترسیمی مشاهده می‌شود که مقدار دبی این چشمه‌ها از ۲۵ تا ۲۱۵ لیتر بر ثانیه و هدایت الکتریکی نیز از ۲۴۵ تا ۵۷۲ میکروموس بر سانتی‌متر متغیر می‌باشد. داده‌های کیفی آب چشمه‌ها نیز برای تعیین تیپ و رخساره شیمیایی آب استفاده شده است. هدایت الکتریکی غالب چشمه‌ها در فصل خشک نسبت به فصل تر افزایش یافته است.



شکل ۴- هیدروگراف چشمه‌های حوضه نکارود با بارش

Fig. 4. Hydrograph of the springs of the Nekarood basin with precipitation

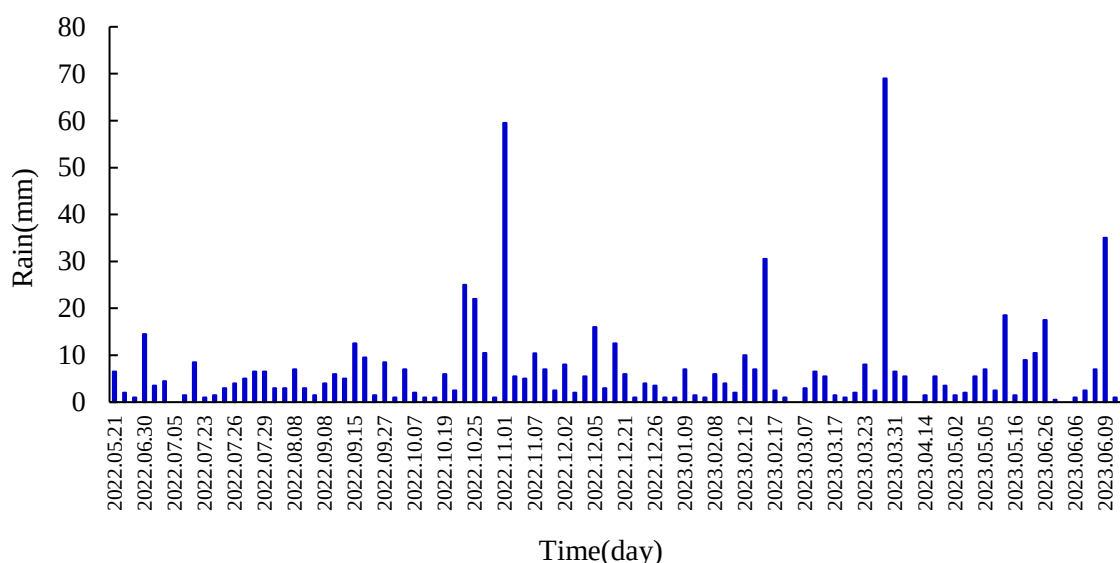


شکل ۵- رابطه بین بارش و هدایت الکتریکی در چشمه‌های حوضه

Fig. 5. The relationship between precipitation and electrical conductivity in the springs of the basin

است. چنین هیدروگرافی نشانگر تخلیه سریع و زیاد آب زیرزمینی بوسیله مجاری انحلالی می‌باشد که این تخلیه ناگهانی به نقش کارست‌های توسعه یافته در سنگ‌آهک‌های سازند لار و کرتاسه مربوط می‌باشد. در جدول ۱ میزان دبی و هدایت الکتریکی آن در زمان‌های مختلف نمایش داده شده است. نمودار بارش حوضه کارستی نکارود در شکل ۶ ارائه شده است.

از داده‌های دبی چشمه‌ها به همراه داده‌های بارندگی برای بررسی تغییرات زمانی دبی چشمه‌ها و ارتباط آن با بارندگی استفاده شده است. همان‌طور که از شکل ۶ مشخص است آبدهی چشمه‌های انتخابی در اواخر زمستان و در طول بهار افزایش یافته و یک اوج را نمایش می‌دهند. به طوری که بیشترین دبی در فرودین ماه در چشمه سنی به مقدار ۲۱۵ لیتر بر ثانیه بوده



شکل ۶- نمودار بارش حوضه نکارود

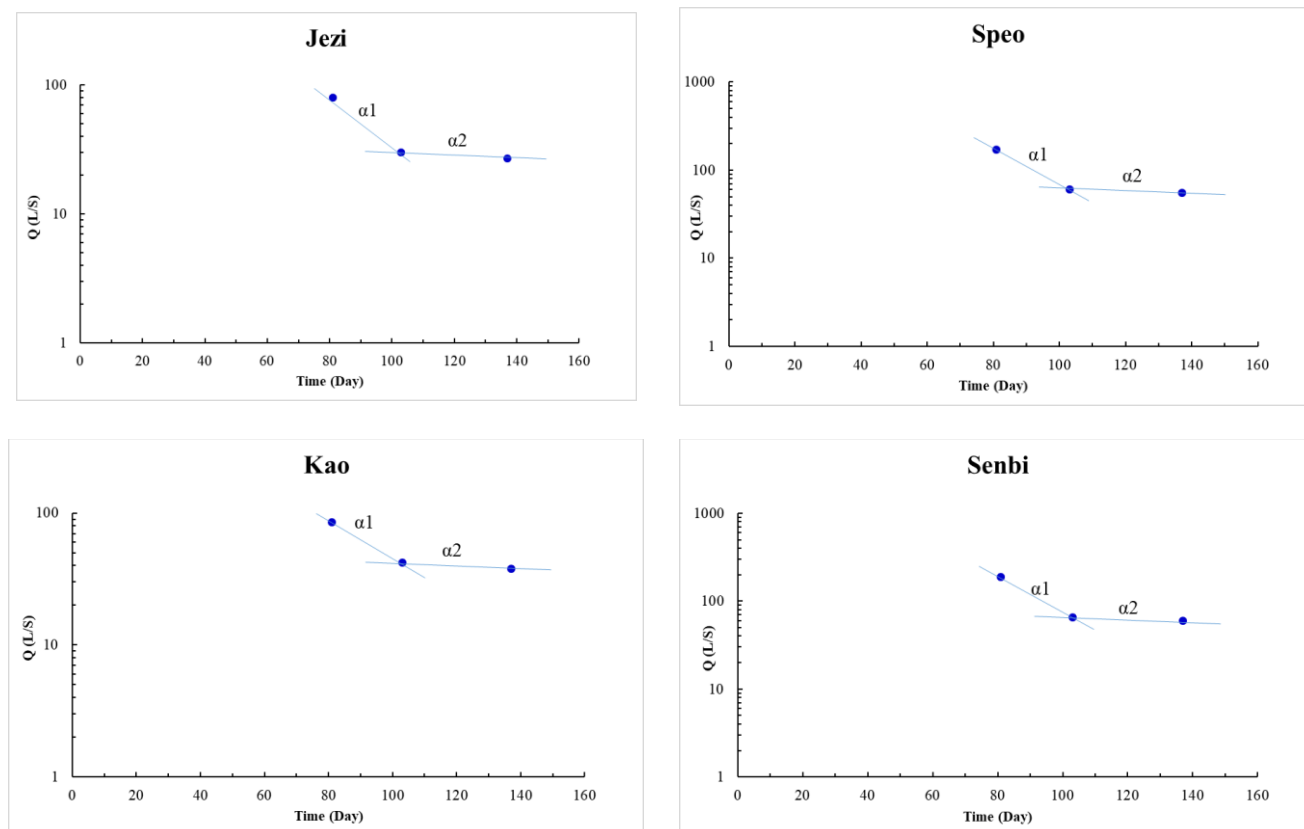
Fig. 6. The Nekarood basin precipitation chart

زمان اوج دبی تا افزایش مجدد دبی در شروع دوره تر بعدی است. حوضه آبگیر چشمه‌های کارستی در محدوده مورد مطالعه غالباً در نواحی مرتفع واقع شده و به طور معمول از ابتدای اردیبهشت تا اواسط آبان، بارش را به صورت باران داریم. با توجه به شکل ۴ (نقشه بارش حوضه کارستی نکارود)، در این حوضه بارش در بازه‌های زمانی مختلف، متفاوت بوده و به شدت بر منحنی فروکش چشمه‌ها مؤثر می‌باشد. به همین علت جهت ترسیم هیدروگراف

تجزیه و تحلیل هیدروگراف چشمه‌های کارستی، از روش‌های عملی برای تعیین رژیم جریان افشان یا مجرای است و به کمک آن می‌توان ضرایب بده را محاسبه کرد. ضریب فروکش (α) بیانگر توانایی آبخوان در ذخیره‌سازی آب زیرزمینی است. این ضریب تابعی از تخلخل مؤثر و قابلیت انتقال آبخوان می‌باشد. برآورد ضرایب دبی چشمه از طریق منحنی فرود حاصل شده و منحنی فرود هر چشمه از ترسیم نیمه لگاریتمی دبی در برابر زمان، از

چشمه در این حوضه از دبی چشمه در بازه زمانی بین دو بارندگی استفاده شده است.

جهت تعیین ضریب بده (α)، منحنی فرود چشمه‌ها (curve Recession) ترسیم شده است. شکل ۷ منحنی فرود چشمه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۷- منحنی فرود چشمه‌های منتخب حوضه

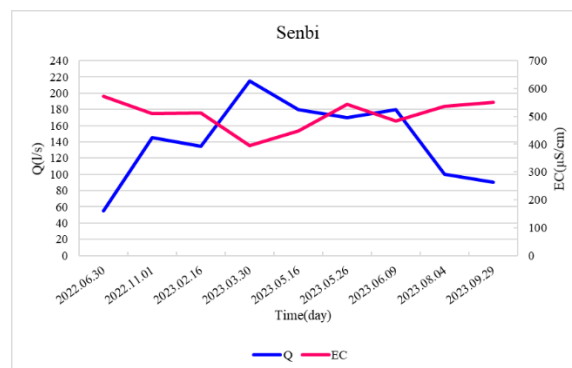
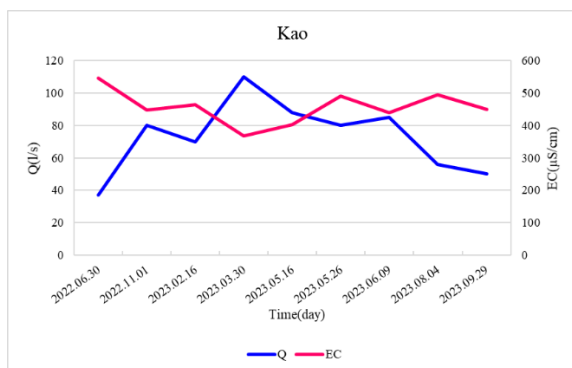
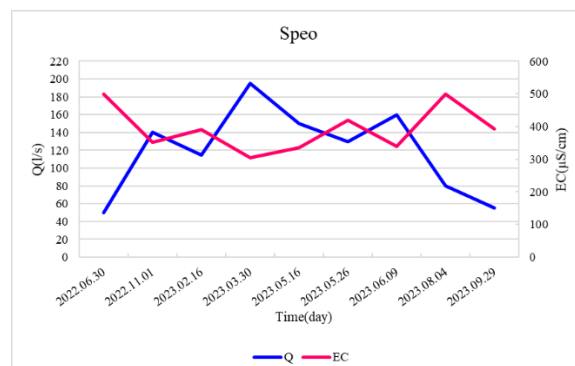
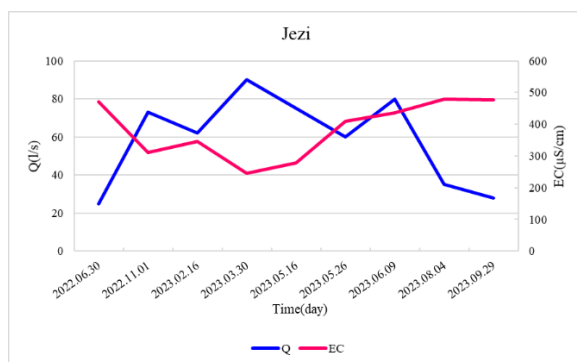
Fig. 7. Recession curve of the Nekarood basin

کارستی توسعه یافته در این منطقه می‌باشد. بنابراین به دلیل تفاوت مقدار بارش در ارتفاعات جنوب کاسپین جهت محاسبه ضریب فرود در این چشمه از دبی بین دو بارش استفاده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود منحنی فرود چشمه‌ها دارای دو شیب می‌باشد. شیب خط ایجاد شده به عنوان ضریب بده (α) در نظر گرفته می‌شود. در رژیم اول تخلیه از مجاری بزرگ‌تر صورت گرفته و حجم زیادی از آب ذخیره شده در آبخوان از طریق آن مجاری با سرعت زیاد تخلیه شده و تشکیل جریان متلاطم را

یک چشمه بر اساس میزان توسعه کارست حوضه آبگیر آن چشمه می‌تواند از یک تا چند ضریب متفاوت داشته باشد. تغییرات دبی در این چشمه‌ها بسیار زیاد می‌باشد و غالب چشمه دارای دو ضریب فرود هستند. در منطقه ارتفاعات جنوب کاسپین منحنی فرود متفاوت از سایر نقاط دنیا (مانند کارست‌های یوگسلاوی) می‌باشد. به نحوی که منحنی فرود در این منطقه بیش از ۱۰ اوج و فرود داشته است و روند افت یکنواختی ندارد و نشانگر سیستم

می‌دهد. در رژیم دوم از شکستگی‌های کوچک‌تر و درز و شکاف‌ها آب چشمه تامین شده است. بر اساس محاسبات انجام شده، بررسی منحنی فرود چشمه‌ها نشان داد که منحنی فرود برای تمام چشمه‌های منتخب چندشیبه بوده و مقدار ضریب‌های بده در محدوده 10^{-3} تا 10^{-2} قرار می‌گیرد. شیب اول بیانگر غالب بودن سیستم جریان و توسعه یافتگی کارست بوده و شیب دوم بیانگر تخلیه از درزه و شکاف و شکستگی‌های کوچک می‌باشد. میزان وابستگی آبدهی (دبی) چشمه‌های انتخابی حوضه به بارندگی بسیار زیاد است. پارامترهای آماری تغییرات هدایت

الکتریکی و دبی چشمه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. آبدهی این چشمه‌ها واکنش سریعی به بارندگی نشان می‌دهد. به طوری که در ماه‌های با بارش بیشتر، دبی چشمه‌ها افزایش واضحی را نشان می‌دهد اما با کاهش بارندگی یا میزان ناچیز آن در ماه‌های خشک، دبی چشمه به سرعت کاهش می‌یابد. میزان نوسانات دبی این چشمه در اثر بارندگی بیشتر است. به طور کلی افزایش دبی باعث کاهش میزان هدایت الکتریکی آب می‌شود. در مورد چشمه‌های انتخابی حوضه این روند معکوس به خوبی دیده می‌شود (شکل ۸).



شکل ۸- نمودار تغییرات زمانی دبی و هدایت الکتریکی چشمه‌های کارستی منتخب در حوضه

Fig. 8. Graphs illustrating temporal changes in flow rate and electrical conductivity of springs across the basin

در یک سیستم کامل کارستی، دبی چشمه بعد از یک بارش شدید در یک دوره کوتاه افزایش یافته و پس از رسیدن به اوج، به آرامی شروع به کاهش می‌کند. در این دوره هدایت الکتریکی آب چشمه بعد از بارندگی به دلیل رانده شدن آب‌های قبلی موجود در ناحیه اشباع و مجاری کارستی که زمان ماندگاری زیاد داشته افزایش می‌یابد، سپس هدایت الکتریکی شروع به کاهش نموده و به حداقل می‌رسد که نشانگر مشارکت آب بارش در آبدهی چشمه

است در نهایت به تدریج هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد زیرا آب ورودی بارندگی در سیستم کارستی فرصت کافی برای تعادل رسیدن با سفره را داشته و به شرایط قبل از بارندگی نزدیک می‌گردد (Azani et al., 2016). همانطور که در این هیدروگراف (شکل ۸) ملاحظه می‌شود دبی چشمه بسیار متغیر می‌باشد. برای مثال در چشمه سن‌بی دبی از ۵۵ تا ۲۱۵ لیتر بر ثانیه متغیر می‌باشد.

جدول ۱- پارامترهای آماری هدایت الکتریکی و دبی چشمه‌های منتخب منطقه

Table 1. Statistical parameters of electrical conductivity (EC) and flow rate (Q) of selected springs in the basin

	Jezi	Speo	Kao	Senbi
Standard deviation (EC)	78.19	61.12	53.92	54.99
Coefficient of variation (EC)	21.94	16.19	11.94	11.11
Standard deviation (Q)	19.4	41.61	20.44	47.16
Coefficient of variation (Q)	29.2	30.99	26.01	30.57

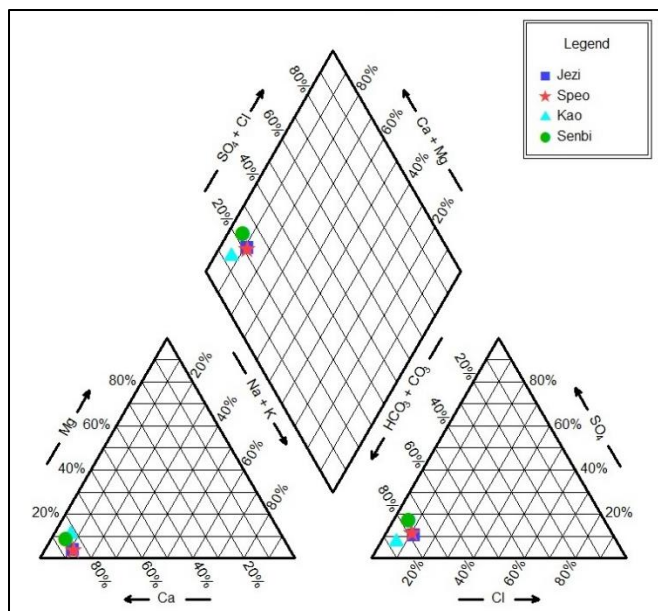
نتایج آنالیز هیدروشیمیایی چشمه‌های اصلی کارستی حوضه نکارود در جدول ۲ خلاصه شده است. شکل ۹ و ۱۰ نمودارهای شولر و پایپر (Piper, 1944) نمونه چشمه‌های کارستی را نشان می‌دهد. به طور کلی چشمه‌های جزی و اسپه‌او دارای کمترین

غلظت یون و چشمه‌های سن بی و کعوچشمه دارای بیشترین غلظت یون هستند. HCO_3^- ، Ca^{2+} و SO_4^{2-} بر ترکیب اصلی املاح این سفره‌ها غالب هستند. چشمه‌های کارست خنثی تا کمی قلیایی هستند و pH آن از ۷/۰۱ تا ۸/۱۳ متغیر است.

جدول ۲- خصوصیات فیزیکوشیمیایی چشمه‌های اصلی کارستی حوضه نکارود

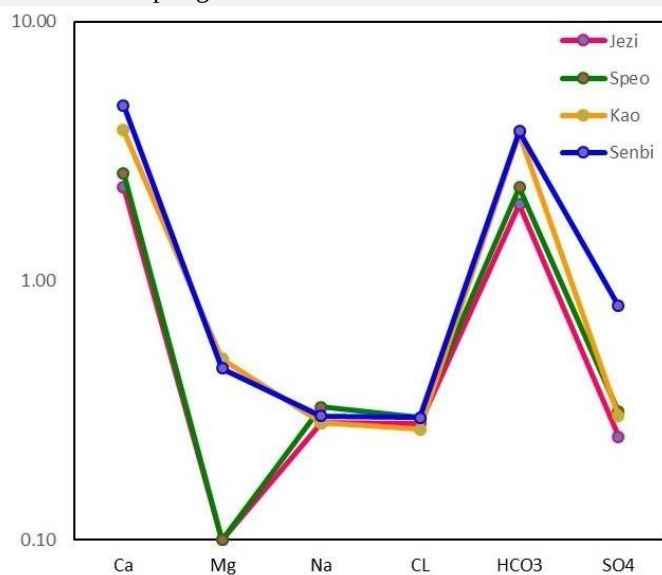
Table 1. Physico-chemical characteristics of the main karst springs in the Nekarood basin

	Jezi	Speo	Kao	Senbi
Q (l/s)	75	150	88	180
pH	7.9	7.9	7.8	7.8
EC ($\mu\text{S}/\text{m}$)	279	336	402	448
TDS (mg/l)	199.78	231.57	347.46	415.25
K (mg/l)	0.78	1.17	1.56	1.9
Na (mg/l)	6.5	7.5	6.5	6.9
Mg (mg/l)	1.2	1.2	6	5.5
Ca (mg/l)	46	52	76	95
So ₄ (mg/l)	12	15	14.4	38.4
Cl (mg/l)	10	10.5	9.5	10.5
Hco ₃ (mg/l)	120	140	225.7	230
NO ₃ (mg/l)	3.3	4.2	7.8	27



شکل ۹- نمودار پایپر چشمه‌های حوضه نکارود

Fig. 9. Piper diagram of the Nekarood basin springs



شکل ۱۰- نمودار شولر چشمه‌های حوضه نکارود

Fig. 10. Schoeller diagram of the Nekarood basin springs

پایپر عمدتاً جهت تعیین تیپ آب، انحلال یا رسوبگذاری، اختلاط نمونه‌های آب و تبادل یونی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر اساس نمودار پایپر تقریباً تمامی چشمه‌ها در یک نقطه قرار می‌گیرند.

شکل ۹ نمودار پایپر مربوط به نمونه آب چشمه‌های مورد مطالعه در اردیبهشت ماه سال ۱۴۰۲ را نشان می‌دهد. نمودار

دامنه تغییرات یون‌ها نسبتاً محدود بوده و یون‌های غالب کلسیم و بیکربنات می‌باشند. براساس این نمودار تمام نمونه‌ها دارای سختی کربناته بیش از ۱۰ درصد هستند و در آن‌ها غلبه با اسیدهای ضعیف و عناصر قلیایی خاکی می‌باشد و تمام نمونه‌ها در محدوده خاص آب‌های کارستی واقع شده‌اند. از نمودار شولر برای بررسی یکسان بودن یا نبودن منشأ نمونه‌ها، بررسی روند مقادیر یون‌های اصلی آب و مقایسه بین نمونه‌ها استفاده شد. با توجه به شکل ۱۰، تمام نمونه‌ها دارای روند یکسانی بوده که بیانگر منشأ یکسان آنهاست. تمام چشمه‌های مورد مطالعه دارای تیپ بی‌کربناته و رخساره کلسیک هستند که با لیتولوژی آهکی منطقه مطابقت داشت.

نتیجه‌گیری

با بررسی ارتباط دبی چشمه‌های منطقه با هدایت الکتریکی مشخص شده است که ارتباط بین دبی و هدایت الکتریکی چشمه‌ها نیز معکوس می‌باشد یعنی با افزایش دبی، هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد. هدایت الکتریکی غالب چشمه‌ها در فصل خشک نسبت به فصل تر نیز افزایش یافته است. بررسی‌های هیدروشیمی نشان داد که تیپ غالب آب در چشمه‌های مورد بررسی بی‌کربناته-کلسیک می‌باشد. نمونه آب چشمه سن‌بی با دبی بالا دارای مواد محلول بالا به ویژه یون‌های کلسیم و بی‌کربنات بالا می‌باشد که نشان دهنده زمان ماندگاری بیشتر (نسبت به سه چشمه دیگر)، حوضه آبرگیر بزرگ و یا جریان عمیق و تعامل زیاد آب و سنگ‌های کربناته در این چشمه است. با کاهش دبی در فصل خشک، مقادیر مواد محلول افزایش می‌یابد. نسبت منیزیم Bonacci, O., 1993. Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers. *Hydrogeological Sciences-journal* 38 (1), 51-62. Fiorillo, F., Malik, P., 2019. Hydraulic behavior of Karst aquifers. *Water* 11 (1563), 1-6.

به کلسیم معیاری از زمان ماندگاری آب در سیستم می‌باشد. این نسبت در چشمه‌های جزی و اسپه‌او کمتر از چشمه‌های سن‌بی و کعو چشمه است که می‌توان به خلوص بیشتر سنگ‌های کربناته لار در آن ناحیه مرتبط دانست. با شروع فصل بارش و تغذیه سیستم کارستی، آب‌های جدید دارای کلسیم بیشتر نسبت به منیزیم، در سیستم کارستی حرکت کرده و از چشمه تخلیه می‌گردند و با قطع بارش و ماندگاری آب در سیستم، مقادیر منیزیم افزایش می‌یابد. به همین دلیل در فصل تر این نسبت کمتر از فصل خشک است. برای تعیین نوع جریان در آبخوان‌های کارستی از تغییرات خواص فیزیکی و شیمیایی آب خروجی از چشمه‌ها استفاده می‌شود. تغییرات زمانی خواص فیزیکی (دبی) و شیمیایی (هدایت الکتریکی) آب خروجی از چشمه‌های حوضه نکارود بعد از بارندگی‌ها به نسبت بالا بوده است؛ به گونه‌ای که ضریب تغییرات تمامی پارامترها بیانگر غالب بودن سیستم جریان مجرای-افشان در آبخوان کارستی این چشمه‌ها است. همچنین منحنی فرود چشمه‌های مورد مطالعه دارای مقدار ضریب‌های بده در محدوده 10^{-3} تا 10^{-2} بوده که این نیز بیانگر غالب بودن سیستم جریان مجرای-افشان در آبخوان کارستی مورد نظر است و با خصوصیات ژئومورفولوژیکی منطقه مورد مطالعه که بیانگر توسعه کارست در حوضه چشمه‌های نکارود می‌باشد، همخوانی دارد. همچنین این چشمه‌های پر آب در منطقه از نوع گسلی بوده و در اثر درز و شکستگی ناشی از گسل بوجود آمدند. با توجه به مطالب بالا، خصوصیات ژئومورفولوژی، هیدروژئولوژی، هیدروژئوشیمی و بیلان هیدروژئولوژیکی یکدیگر را تأیید می‌کنند.

References

- Azani, S., Karami, G.H., Zia, H., 2016. Evaluating the Karst development in Limestone mountains of Ahangaran area, Northeast of Birjand, University of Shahrood. (in Persian).

- Fiorillo, F., Vakanjac, R. V., Jemcov, I., Milanović, S., Stevanović, Z., 2015. Karst groundwater availability and sustainable development. *Karst Aquifers Characterization and Engineering* 421-530.
- Florea, L. J., Vacher, H. L., 2006. Springflow hydrographs: eogenetic vs. telogenetic karst. *Groundwater* 44 (3), 352-361.
- Ford, D., Williams, P. D., 2007. *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons. The Atrium, Southern Gate, Chichester. 562 p.
- Gams, I., 1966. Factor and dynamics of corrosion of the carbonate rocks in the Dinaric and Alpine karst of Slovenia (Yugoslavia). *Geografski Vestnik* 38, 11-68.
- Jacobson, R. L., Longmuir, D., 1974. Controls on the quality variation of some carbonate spring waters. *Journal of Hydrology* 23, 247-265.
- Geological Survey of Iran., 1980. Map 1:250,000 of Sari and Gorgan. (in Persian).
- Karami, G.H., 2002, Assessment of heterogeneity and flow systems in karstic aquifers using pumping test data, *Civil engineering and geosciences*, University of Newcastle, pp180.
- Kerachi, N., Khalili, Kh., Riahipur, M., 2024. Determining the flow regime in karst aquifers using hydrochemistry of springs. Representative springs. Case study: Saldoran, Zarab and Koh Sokhte anticlines in southwestern Iran, *Journal of Environmental Science Studies* 9(3), 9181-9188. (in Persian).
- Kresic, N., Bonacci, O., 2010. *Groundwater hydrology of springs: engineering, theory, management and sustainability*. Butterworth-heinemann.
- Milanovic, P.T., 1981. *Karst hydrogeology*. Water Resources Publications, pp.434.
- Palmer, A. N., 2002. Karst in Paleozoic rocks: How does it differ from Florida. In *Hydrogeology and Biology of Post-Paleozoic Carbonate Aquifers: Proceedings of the Symposium on Karst Frontiers—Florida and Related Environments* (pp. 185-191).
- Panagopoulos, G., Lambrakis, N., 2006. The contribution of time series analysis to the study of the hydrodynamic characteristics of the karst systems: Application on two typical karst aquifers of Greece (Trifilia, Almyros Crete). *Journal of Hydrology* 329(3-4), 368-376.
- Piper, A. M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Trans Am Geophys Union* 6, 914-923.
- Raeisi, E., Groves, C., Meiman, J., 2007. Effects of partial and full pipe flow on hydrochemographs of Logsdon river, Mammoth Cave Kentucky USA. *Journal of Hydrology* 337 (1-2), 1-10.
- Raeisi, E., Kowsar, N., 1997. Development of Shapour Cave, Southern Iran” Cave and karst science 24 (1), 27- 34.
- Rouhi, H., Kalantari, N., 2019. Using multi-year hydrograph to comparison the hydrogeological regimes of Karstic springs in Kuhe-safid anticline, Khuzestan, Iran. *Hydrogeology* 4(1), 14-25.
- Shamsi, A., Karami, G. H., Taheri, A., 2019. Recession curve analysis of major karstic springs at the Lasem area (north of Iran). *Carbonates and Evaporites* 34, 845-856.
- Sivelle, V., Labat, D., Mazzilli, N., Massei, N., Jourde, H., 2019. Dynamics of the flow exchanges between matrix and conduits in karstified watersheds at multiple temporal scales. *Water* 11, 569.
- Tavakkoli, S., Karami, G.H., 2021. Investigation of the dominant flow system and discharge mechanism of karst springs in west of Mojen, Iranian Water Research Journal 15(1), 13-21. (in Persian).
- Torresan, F., Fabbri, P., Piccinini, L., Dalla Libera, N., Pola, M., Zampieri, D., 2020. Defining the hydrogeological behavior of karst springs through an integrated analysis: a case study in the Berici Mountains area (Vicenza, NE Italy). *Hydrogeology Journal* 28, 1229-1247.
- White, W.B., 1998. Groundwater Flow in Karstic Aquifers. In Delleur, J. W. (Ed.), *The Handbook of Groundwater Engineering*. CRC Press, Boca Raton, FL 21, 1-47.
- Zhao, L. J., Yang, Y., Cao, J. W., Wang, Z., Luan, S., Xia, R. Y., 2022. Applying a modified conduit flow process to understand conduit-matrix exchange of a karst aquifer. *China Geology* 5 (1), 26-33.
- Zölt, J., 1960. Die Hydrographic des nordost Alpinen Karsts. *Steirsche Beitrage Hydrogeology* 2, 53- 183.