

## Assessing the Age of Karstic Groundwater in South West of Lorestan Province Using Tritium Isotopes and Hydrogeochemical Methods: Inconsistencies Between the Two Approaches

S. Gholizadeh Khasevani<sup>1</sup>, F. Alijani<sup>2\*</sup>, and Y. Nikpeyman<sup>3</sup>

### Abstract

Karst groundwater resources in Lorestan Province (west Iran) are one of the most critical drinking water sources in the region. However, no comprehensive study has yet been conducted to assess their age and quality. To address this gap, the present research employs tritium isotopes (<sup>3</sup>H) and hydrogeochemical indices to analyze the relative age and quality of these resources. Twelve groundwater samples, including seven sulfurous, three non-sulfurous, and two saline samples, were collected in 2023 and analyzed for their ionic and isotopic compositions. Tritium data and chemical indicators (SO<sub>4</sub>/Cl, Na/Cl, Mg/Ca ratios, EC, and major ion concentrations) were analyzed to determine relative age, origin, and mixing patterns. Piper diagrams, ion scatter plots, and saturation indices of calcite, dolomite, and gypsum were used to interpret geochemical processes and water-rock interactions. Results indicated that most groundwater samples are of modern age (tritium: 1.31–3.07 TU), with a few showing mixed modern–submodern characteristics. The dominant bicarbonate type reflects carbonate origin and recent precipitation recharge, while chloride-sodium (samples S6, S7) and sulfate-chloride-calcium types (samples W2, S2) suggest influence from the Gachsaran Formation or contamination. Notably, samples S6 and S7 exhibited high tritium and salinity, indicating rapid infiltration of recent rainfall into the Gachsaran Formation and localized salt dissolution. Furthermore, the characteristics of samples W2 and P1, including high SO<sub>4</sub>/Cl ratios and elevated tritium concentrations, indicated potential contamination and the introduction of pollutants into the groundwater system. Samples W1, P2, and S3, characterized by simple ionic compositions and high tritium levels, represented young waters, whereas samples S1, S2, and S4, with more evolved ionic compositions and lower tritium concentrations, indicated mixed sources and intermediate behavior in terms of age and hydrochemical composition. Other samples, such as P3 and S5, with moderate SO<sub>4</sub>/Cl ratios and tritium levels, lie at the boundary between young waters and mixed sources, likely influenced by mixing, surface recharge, anthropogenic contamination, or water inflow through faults.

**Keywords:** Hydrogeochemical Processes, Relative Age, Tritium Isotope, Saline Spring, Lorestan.

Received: May 18, 2025

Accepted: August 17, 2025

## ارزیابی سن آب‌های زیرزمینی کارستی جنوب غرب لرستان با استفاده از ایزوتوپ تریتم و روش‌های هیدروژئوشیمی: ناهماهنگی بین دو روش

شراره قلی زاده خاصوانی<sup>۱</sup>، فرشاد علیجانی<sup>۲\*</sup> و یاسر نیک پیمان<sup>۳</sup>

### چکیده

منابع آب زیرزمینی کارستی لرستان (غرب ایران)، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب شرب، از اهمیت بالایی برخوردارند؛ با این حال، بررسی جامعی در خصوص سن و کیفیت این منابع تاکنون انجام نشده است. در این راستا، پژوهش حاضر با به‌کارگیری ایزوتوپ تریتم (<sup>3</sup>H) و شاخص‌های هیدروژئوشیمی به تحلیل سن نسبی و کیفیت منابع آب کارستی لرستان پرداخته است. پس از انجام مطالعات میدانی، دوازده نمونه آب زیرزمینی شامل هفت نمونه گوگردی، سه نمونه غیر گوگردی و دو نمونه شور در سال ۱۴۰۲ برداشت شده و از نظر ترکیب یونی و ایزوتوپی مورد سنجش قرار گرفته است. داده‌های تریتم و شاخص‌های شیمیایی شامل نسبت‌های SO<sub>4</sub>/Cl, Na/Cl, Mg/Ca، هدایت الکتریکی (EC) و غلظت یون‌های اصلی برای تعیین سن نسبی، منشأ و الگوهای اختلاط منابع آبی تحلیل شدند. برای درک بهتر فرآیندهای زمین‌شیمیایی و تعامل آب-سنگ، از نمودار پایپر، پراکندگی یون‌ها و شاخص‌های اشباع کلسیت، دولومیت و ژپس استفاده شد. نتایج نشان داد که بیشتر منابع آب زیرزمینی منطقه دارای سن مدرن هستند و تنها برخی نمونه‌ها ویژگی آب‌های ترکیبی (مدرن-ساب‌مدرن) را نشان می‌دهند. غلظت تریتم در این نمونه‌ها بین ۱/۳۱ تا ۳/۰۷ TU متغیر است. تیپ غالب بی‌کربنات نشان‌دهنده منشأ کربنات و تغذیه از بارش‌های اخیر بود، درحالی‌که تیپ‌های کلروره سدیک (در نمونه‌های S6 و S7) و سولفات (کلروره) - کلسیک (در نمونه‌های W2 و S2) تحت تأثیر سازند تخیری گچساران یا فرآیندهای آلودگی تغییر یافته‌اند. یکی از یافته‌های مهم این پژوهش، ثبت غلظت بالای تریتم همراه با شوری بسیار بالا در نمونه‌های S6 و S7 است. این ترکیب بیانگر نفوذ سریع آب‌های حاصل از بارش‌های اخیر به درون سازند تخیری گچساران و انحلال موضعی نمک‌ها است. همچنین، ویژگی‌های نمونه‌های W2 و P1، از جمله نسبت بالای SO<sub>4</sub>/Cl و غلظت بالای تریتم، بیانگر احتمال آلودگی و ورود ترکیبات آلاینده به سیستم آب زیرزمینی است. نمونه‌های S1، S2 و S3 با ترکیب یونی ساده و غلظت بالای تریتم معرف آب‌های جوان و نمونه‌هایی S1، S2 و S4 با ترکیب یونی غنی‌تر و غلظت پایین تریتم، نمایانگر منابع با منشأ ترکیبی و رفتار بینابینی از نظر سن و ترکیب شیمیایی هستند. سایر نمونه‌ها همانند P3 و S5 با مقادیر متوسط SO<sub>4</sub>/Cl و تریتم، در مرز میان آب‌های جوان و منابع با منشأ ترکیبی قرار دارند؛ وضعیتی که احتمالاً تحت تأثیر اختلاط، تغذیه سطحی، آلودگی‌های انسانی و ورود آب از طریق گسل‌ها قرار گرفته‌اند.

**کلمات کلیدی:** فرآیند هیدروژئوشیمی، سن نسبی، ایزوتوپ تریتم، چشمه نمکی، لرستان.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۲/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۵/۲۶

1- Ph.D. Student in Hydrogeology, Department of Minerals and Groundwater Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: [gholizadeh.sharareh@yahoo.com](mailto:gholizadeh.sharareh@yahoo.com)

2- Assistant Professor, Department of Minerals and Groundwater Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: [f\\_alijani@sbu.ac.ir](mailto:f_alijani@sbu.ac.ir)

3- Assistant Professor, Department of Minerals and Groundwater Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: [y.nikpeyman@sbu.ac.ir](mailto:y.nikpeyman@sbu.ac.ir)

\*- Corresponding Author

Doi: [10.22034/iwrr.2025.518787.2885](https://doi.org/10.22034/iwrr.2025.518787.2885)

۱- دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- استادیار گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳- استادیار گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پاییز ۱۴۰۴ امکان‌پذیر است.

پیشامدرن می‌تواند گمراه‌کننده باشد، زیرا مقدار تریتم در جو و بارندگی، متأثر از شرایط زمانی، اقلیمی و مکانی است و با گذر زمان کاهش می‌یابد (Michel et al., 2018). در چنین مواردی، استفاده از طبقه‌بندی‌های کیفی منطقه‌محور که شرایط جغرافیایی و تاریخ نمونه‌برداری را در نظر می‌گیرند، توصیه می‌شود (Karimi Rad et al., 2017).

مطالعات پیشین نشان می‌دهند که غلظت تریتم در بارش و آب‌های زیرزمینی تحت تأثیر عواملی مانند ارتفاع، دما، موقعیت جغرافیایی، فعالیت‌های انسانی و باقی‌مانده‌های ناشی از آزمایش‌های هسته‌ای است (Rozanski et al., 1993; Golubev et al., 2002; Clark and Fritz, 2013; Ram et al., 2024). به‌طور کلی، مقادیر بالاتری از تریتم در نیمکره شمالی و نواحی کوهستانی گزارش شده است (Rozanski et al., 1993; Clark and Fritz, 2013). در مقابل، در نواحی خشک و نیمه‌خشک مانند بخش‌هایی از ایران، عراق و عربستان، مطالعات منطقه‌ای غلظت‌های پایین‌تری را ثبت کرده‌اند؛ برای نمونه، در استان کرمانشاه، میانگین غلظت تریتم در آب‌های زیرزمینی حدود میانگین ۳ TU گزارش شده که نشان‌دهنده ترکیبی از آب‌های مدرن و ساب مدرن است (Mohammadzadeh and Soleimani Valikandi, 2018). همچنین، در منطقه نجف عراق، تریتم قابل‌شناسایی نبوده (Al-Enezy et al., 2023) و در منطقه حفر الباطن عربستان<sup>۲</sup>، مقادیری بین ۰/۳ تا ۳/۵ TU گزارش شده است (Mamun, 2023).

علی‌رغم محدودیت‌ها، استفاده از ایزوتوپ تریتم به‌عنوان شاخصی برای تعیین سن نسبی آب‌های زیرزمینی، به‌ویژه در آبخوان‌های کارستی و تبخیری، همچنان از اثربخشی بالایی برخوردار است. به‌عنوان نمونه، Rahn et al. (2017) در بررسی تغییرات تریتم در آبخوان‌های بلک‌هیلز، نقش آن را در تحلیل سن و فرآیندهای اختلاط آب‌های زیرزمینی برجسته کرده‌اند. با وجود اثربخشی بالایی تریتم در سن‌سنجی آب‌های زیرزمینی، اتکای کامل به آن با محدودیت‌هایی همراه است. عواملی نظیر اختلاط آب از منشأهای مختلف، تعامل آب با سنگ، تکامل ژئوشیمیایی، شوری و حضور آلاینده‌ها می‌توانند بر دقت و صحت نتایج حاصل از سن‌یابی ایزوتوپی تأثیر بگذارند (Clark and Fritz, 2013; Casillas-Trasvina et al., 2022; Desens et al., 2023; Gourdol et al., 2024). بنابراین، بهره‌گیری از داده‌های تکمیلی شیمیایی، نظیر آنالیز یون‌ها و شاخص‌های هیدروژئوشیمیایی، می‌تواند دقت تفسیر نتایج را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد (Casillas-Trasvina et al., 2022; Telloli et al., 2022; Atencio et al., 2024). با توجه به این شرایط، پژوهش حاضر تلاش دارد از تلفیق داده‌های

در مطالعات منابع آب زیرزمینی، ایزوتوپ‌های رادیواکتیو به‌ویژه تریتم ( $^3\text{H}$ ) ابزاری کلیدی برای سن‌سنجی آب‌های کارستی محسوب می‌شوند. آبخوان‌های کارستی به دلیل ساختار پیچیده، نفوذپذیری بالا و تبادل سریع با آب‌های سطحی، رفتار هیدرولوژیکی ویژه‌ای دارند (Ford and Williams, 2007; Wu et al., 2018; Ren et al., 2019). این ویژگی‌ها ضرورت تحلیل سن منابع آب‌های زیرزمینی را برای بررسی زمان‌ماند، نرخ تجدیدپذیری و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی دو چندان می‌کند. همچنین، تعیین سن آب‌های زیرزمینی در شناسایی منشأ، اختلاط و دینامیک جریان‌های زیرزمینی نقش مهمی ایفا می‌کند (Molina et al., 2024; Tobin et al., 2024).

تریتم، با نیمه‌عمر ۱۲/۳ سال، ابزاری مؤثر برای سن‌سنجی آب‌های زیرزمینی در بازه‌ای کمتر از ۱۰۰ سال است. این ایزوتوپ، به صورت طبیعی، در اثر برخورد پرتوهای کیهانی با نیتروژن جو ایجاد شده و از طریق بارش وارد چرخه آب می‌شود (Fetter, 2001; Clark and Fritz, 2013). علاوه بر منشأ طبیعی، در دهه‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۸۰، تریتم به‌طور مصنوعی و در مقیاسی گسترده بر اثر آزمایش‌های انفجار هسته‌ای در جو تولید شد. این افزایش ناگهانی، موجب رشد چشمگیر غلظت آن در جو گردید و استفاده از آن را به‌عنوان ردیابی مؤثر برای تخمین سن آب‌های زیرزمینی ممکن ساخت (UNSCEAR, 2000; Clark and Fritz, 2013). پیش از این دوره، غلظت آن در جو معمولاً بین ۲ تا ۸ واحد تریتم ( $\text{TU}^1$ ) بود، اما در اوج دوران آزمایش‌های هسته‌ای، در نیمکره شمالی به حدود ۱۰,۰۰۰ واحد (TU) و در نیمکره جنوبی به حدود ۱۰۰۰ واحد (TU) رسید (Happell et al., 2004; Momoshima, 2007). این تفاوت بارز میان دو نیمکره، یکی از عوامل مهم در تحلیل داده‌های ایزوتوپی برای سن‌یابی منابع آب زیرزمینی محسوب می‌شود. اگرچه امروزه تریتم همچنان به‌صورت مصنوعی در راکتورهای هسته‌ای برای اهداف صنعتی و پژوهشی تولید می‌شود، اما این تولید محدود بوده و تأثیر قابل‌توجهی بر چرخه طبیعی آب ندارد (Clark and Fritz, 2013; IAEA, 2013; Michel et al., 2018).

در طبقه‌بندی آب‌های زیرزمینی بر اساس سن ایزوتوپی، تریتم یکی از پرکاربردترین ردیاب‌ها به شمار می‌رود. در بسیاری از مطالعات، غلظت‌هایی بیش از ۰/۸ واحد تریتم (TU) به‌عنوان نشانه‌ای از آب‌های مدرن تلقی می‌شود (Happell et al., 2004; Clark and Fritz, 2013). با این حال، بررسی‌های جدید نشان داده‌اند که به‌کارگیری یک آستانه ثابت برای تفکیک آب مدرن از

تریتیم و شاخص‌های شیمیایی برای تحلیل سن نسبی و کیفیت منابع آب زیرزمینی کارستی در منطقه لرستان استفاده کند. محدوده مورد مطالعه در این پژوهش، بر اساس تقسیم‌بندی واحدهای ساختمانی-رسوبی ایران، در زون زاگرس چین‌خورده قرار دارد. این پژوهش با هدف تحلیل ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی و برآورد سن نسبی منابع آب زیرزمینی گوگردی، غیرگوگردی و شور در استان لرستان انجام گرفته است. این منطقه به دلیل گسترش سازندهای آهکی، دارای تعداد زیادی چشمه کارستی است که برخی از آن‌ها، تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی و ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه، با آلودگی‌های هیدروکربنی، ترکیبات گوگردی یا شوری بالا مواجه هستند.

با توجه به کمبود مطالعات پیشین در زمینه بررسی تلفیقی تریتیم و شاخص‌های هیدروژئوشیمیایی در استان لرستان، این پژوهش باهدف تحلیل اولیه‌ی سن نسبی و کیفیت منابع آب زیرزمینی در سامانه‌های کارستی منطقه مورد مطالعه طراحی شده است. نتایج این مطالعه، باوجود محدودیت‌های مکانی و آماری، می‌تواند زمینه‌ساز درک بهتری از رفتار زمانی و کیفی منابع آب زیرزمینی در چنین ساختارهای زمین‌شناسی باشد و مسیر مطالعات آتی در خصوص اختلاط آب‌ها و تأثیر آلودگی‌های انسانی بر سامانه‌های کارستی را هموار کند.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

استان لرستان، واقع در غرب ایران، با وسعتی حدود ۲۸/۶۰۰ کیلومترمربع، به دلیل ساختارهای گسترده و پیچیده کارستی، از نظر منابع آب زیرزمینی دارای اهمیت ویژه‌ای است. محدوده مورد بررسی در این پژوهش، نواحی غربی و جنوبی استان را شامل می‌شود؛ به‌ویژه شهرستان‌های خرم‌آباد، پلدختر و کوه‌دشت که در بازه جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۲ دقیقه عرض شمالی و ۴۶ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳ دقیقه طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). میانگین بارندگی سالانه منطقه بین ۴۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه حدود ۱۵ درجه سانتی‌گراد است. توزیع نامنظم بارش‌ها و نوسانات فصلی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تغذیه آبخوان‌ها و تغییرات کیفی و کمی منابع آب زیرزمینی محسوب می‌شوند (Lorestan Meteorological Organization, 2024). شکل ۱ موقعیت چشمه‌های مورد مطالعه شامل سه گروه از نمونه‌های گوگردی (سراب حمام ۱ و ۲، گراب، پاعلم، رباط، چنارخشکه، معمولان)، نمونه‌های غیرگوگردی (تنگ فنی، گراب زردآب، معمولان) و نمونه‌های شور (رباط، نمکان) را نشان می‌دهد.

## ۲-۲- زمین‌شناسی

منطقه مورد مطالعه در بخش چین‌خورده زاگرس واقع شده است. این ناحیه از نظر زمین‌ساختی با چین‌خوردگی‌های گسترده، ناودیس‌های پرشده از رسوبات نرم و گسل‌های متعدد شناخته می‌شود؛ عواملی که ساختار پیچیده‌ای را در منطقه پدید آورده‌اند (Alavi, 2004).

واحدهای سنگی منطقه شامل ترکیبی از سنگ‌های کربناته، مارنی، شیل، ماسه‌سنگ، کنگلومرا و لایه‌های تبخیری هستند که در بازه زمانی کرتاسه تا کواترنری نهشته شده‌اند. این اطلاعات بر پایه نقشه زمین‌شناسی منطقه (شکل ۱) استخراج شده است (James and Wind, 1965).

در کرتاسه میانی، رسوبات دریایی به‌صورت پراکنده اما مداوم ته‌نشین شده‌اند و این روند در کرتاسه بالایی با نهشته شدن آهک‌های کم‌عمق سازند ایلام و شیل‌های ژرف دریایی سازند گورپی ادامه یافته است. در بخش زیرین این توالی، سازند سورگاه و در شمال شرق منطقه، سازند امیران قرار دارند که به‌عنوان سنگ میزبان بیتومین‌ها شناخته می‌شوند (Motiei, 1993; Alavi, 2004). در بخشی از زاگرس چین‌خورده، ازجمله محدوده مورد مطالعه، سازندهای آهکی ایلام و سروک با سن کرتاسه بالایی، به دلیل شباهت‌های سنگ‌شناسی و نبود مرز مشخص در رخنمون‌ها، معمولاً به‌صورت یک واحد ترکیبی در نظر گرفته می‌شوند. با این حال، از دیدگاه هیدروژئولوژیکی، سازند سروک به‌واسطه توسعه کارست و تخلخل بالا، نقش مؤثرتری در تغذیه و انتقال آب‌های زیرزمینی ایفا می‌کند (Ashjari and Raeesi, 2006).

سازند آسماری به‌عنوان اصلی‌ترین آبخوان منطقه، به دلیل تخلخل مؤثر، شکستگی‌های گسترده و گسترش پدیده کارست، ظرفیت بالایی برای ذخیره و جریان آب زیرزمینی فراهم می‌کند (Clark and Fritz, 2013). در مقابل، سازند گچساران با ترکیب تبخیری و نفوذناپذیری بالا، نقش سنگ پوش را ایفا کرده و مانعی مؤثر در برابر مهاجرت سیالات به شمار می‌رود. این دو سازند، در کنار یکدیگر، سامانه‌های هیدروکربنی فعالی را در منطقه شکل داده‌اند (Alavi, 2004).

## ۲-۳- جمع‌آوری داده‌ها

در این مطالعه، به‌منظور بررسی ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی منابع آب زیرزمینی کارستی، تعداد ۱۲ نمونه آب زیرزمینی در بهمن‌ماه ۱۴۰۲ برداشت شد (شکل ۱). تحقیق حاضر شامل پایش پارامترهای فیزیکی، تحلیل هیدروشیمیایی و بررسی ایزوتوپی نمونه‌های مورد مطالعه است. نمونه‌ها به‌صورت هدفمند و با توجه به تنوع مکانی، شرایط زمین‌شناسی، ویژگی‌های کیفی ظاهری

(نظیر بوی گوگرد، شوری محسوس، یا شفافیت بالا) و نوع خروجی آب انتخاب شده‌اند تا بازتابی از گستره تنوع هیدروشیمیایی منطقه باشند. بر اساس ویژگی‌های مشاهده‌شده در محل و شرایط نمونه‌برداری، نمونه‌ها به سه گروه تقسیم شدند: گروه A (نمونه‌های گوگردی)، گروه B (نمونه‌های غیرگوگردی) و گروه C (چشمه‌های شور). موقعیت مکانی و ویژگی‌های اولیه نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس گزارش‌های محلی، در هنگام حفاری یک چاه کشاورزی در منطقه سراب حمام پل دختر (نقطه نمونه‌برداری W2)، فوران گاز سولفید هیدروژن ( $H_2S$ ) رخ داده که به آتش‌سوزی نیز منجر شده است (IRNA, 2017). همچنین، در بازدید میدانی و نمونه‌برداری از این محل، بوی مشخص این گاز نیز احساس شد. حضور  $H_2S$  در عمق چاه نشانه‌ای از پتانسیل آلودگی گازی زیرسطحی در منطقه بوده و می‌تواند در ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی و فرآیندهای احیایی-اکسایشی مؤثر باشد. همچنین، نمونه PI از چشمه‌ای در نزدیکی تلمبه‌خانه نفتی تنگ فنی برداشت شد؛ موقعیتی که احتمال تأثیر ترکیبات هیدروکربنی یا آلاننده‌های نفتی بر ترکیب شیمیایی آب را مطرح می‌کند. اندازه‌گیری‌های

میدانی شامل ثبت دما، هدایت الکتریکی<sup>۳</sup> (EC) و pH با استفاده از دستگاه‌های پرتابل، هم‌زمان با نمونه‌برداری در محل انجام شد (جدول ۱). برای نمونه‌برداری ایزوتوپی (تریتیم)، از بطری‌های پلی‌اتیلن با ظرفیت ۱۰۰۰ میلی‌لیتر استفاده شد. این بطری‌ها پیش از نمونه‌گیری سه مرتبه با آب دیونیزه شسته شدند تا دقت و صحت نمونه‌ها تضمین شود. نمونه‌های موردنیاز برای تحلیل کاتیون‌ها در بطری‌های پلاستیکی پلی‌اتیلن با چگالی بالا ( $HDPE^4$ ) جمع‌آوری شده و با استفاده از فیلتر غشائی با اندازه منافذ ۰/۴۵ میکرومتر تصفیه شدند. سپس، نمونه‌ها با افزودن اسید نیتریک غلیظ ( $HNO_3$ ) تا رسیدن به pH کمتر از ۲ اسیدی شدند.

برای تعیین غلظت عناصر اصلی، ۱۰۰ میلی‌لیتر از آب هر نمونه در بطری‌های پلی‌اتیلن ذخیره شد. تمامی نمونه‌ها بلافاصله پس از جمع‌آوری، در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد در یخچال نگهداری و به آزمایشگاه منتقل شدند. نمونه‌های جمع‌آوری‌شده برای تحلیل ایزوتوپی (تریتیم) و تعیین غلظت عناصر اصلی به آزمایشگاه دانشگاه چارلز در جمهوری چک ارسال شدند.

**Table 1- Characteristics of the sampled groundwater resources in the study area**

**جدول ۱- مشخصات منابع آب زیرزمینی نمونه‌برداری شده در منطقه مورد مطالعه**

Samples		Coordinates		CBE%	Type	Formation	Maximum discharge (L/sec)	Water type
Group	Name	ID	(Zone, UTM X, UTM Y)					
A (Sulfuric Sample)	Sarab hamam1	W1	38S 750267 3668222	0.4	Well	Alluvium	Well (Depth=100)	Ca-HCO <sub>3</sub>
	Sarab hamam2	W2	38S 750267 3668212	4.74	Well	Alluvium	Well (Depth=100)	Ca-SO <sub>4</sub> (Cl)
	Grab	S1	38S 709597 3706888	3.44	Spring	Ilam-sarvak	-	Ca-HCO <sub>3</sub>
	Pa alam	S2	39S 757996 3657711	2.67	Spring	Gachsaran	100	Ca-SO <sub>4</sub> (Cl)
	Robat	S3	39S 249623 3726784	0.08	Spring	Ilam-surgah	-	Ca-HCO <sub>3</sub>
B (non-Sulfuric sample)	Chenar khoshkeh	S4	39S 268990 3693302	0.65	Spring	Amiran	-	Ca-HCO <sub>3</sub>
	Mamulan	S5	38S 774227 3695920	2.39	Spring	Alluvium	7	Ca-HCO <sub>3</sub>
	Tang fani	P1	38S 757996 3657711	0.51	Spring	Asmari-shahbazan	3	Ca-HCO <sub>3</sub>
C (Saline Sample)	Grab zardab	P2	39S 274842 3708427	1.91	Spring	Ilam-sarvak	-	Ca-HCO <sub>3</sub>
	Mamulan	P3	38S 774211 3695940	0.4	Spring	Alluvium	20	Ca-HCO <sub>3</sub>
C (Saline Sample)	Robat	S6	39S 250821 3723204	0.57	Spring	Gachsaran	-	Na-Cl
	Namakan	S7	39S 268836 3715565	1.33	Spring	Gachsaran	-	Na-Cl

گازهای نجیب مدل Helix SFT<sup>TM</sup> (نوع split flight tube) اندازه‌گیری شد. دقت و انحراف معیار این روش برابر با  $\pm 0.2\%$  بکرل بر لیتر (Bq/L) گزارش شده است. هدایت الکتریکی (EC) با دستگاه پرتابل کالیبره شده با دقت حدود  $\pm 1\%$  درصد و مقدار pH با

آنالیز کاتیون‌ها با استفاده از روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی ( $ICP-MS^5$ ) و تعیین آنیون‌های تمامی نمونه‌های آب با روش کروماتوگرافی یونی<sup>۶</sup> انجام شد. ایزوتوپ رادیواکتیو تریتیم ( $^3H$ ) با استفاده از روش ingrowth و طیف‌سنج جرمی

کمتر از ۵ درصد محاسبه شد که نشان‌دهنده صحت داده‌های اندازه‌گیری شده و دقت نتایج تحلیلی در این پژوهش است. میزان تریتم در بارش‌های مناطق مختلف جهان توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA<sup>8</sup>) از طریق شبکه جهانی ایزوتوپ باران (GNIP<sup>9</sup>) پایش می‌شود. این شبکه شامل مجموعه‌ای از ایستگاه‌های نمونه‌برداری در نقاط مختلف جهان است که به صورت منظم، داده‌های ایزوتوپی بارش‌ها را ثبت می‌کنند (IAEA and WMO, 2006). در ایران، تنها ایستگاه فعال در این شبکه، ایستگاه تهران است که غلظت سالانه تریتم در بارندگی‌های آن اندازه‌گیری و گزارش می‌شود. این وضعیت در شکل ۲ نمایش داده شده است.

دقت تقریبی  $\pm 0.5\%$  واحد قرائت شد. این مقادیر خطا در تحلیل نتایج و طبقه‌بندی کیفی نمونه‌ها لحاظ شده‌اند.

دقت تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی از طریق درصد خطای تعادل بار<sup>۲</sup> (CBE%) با رابطه ۱ بررسی شد.

$$CBE\% = \frac{(\sum_i^m ce_i^+ - \sum_i^m ce_i^-)}{(\sum_i^m ce_i^+ + \sum_i^m ce_i^-)} \quad (1)$$

$Ce_i^+$  و  $Ce_i^-$  نشان‌دهنده غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر است.

خطای تعادل بار بین  $-0.8\%$  تا  $5\%$  درصد در نمونه‌های مورد مطالعه متغیر بود (جدول ۱). مقادیر مطلق این خطا برای تمامی نمونه‌ها

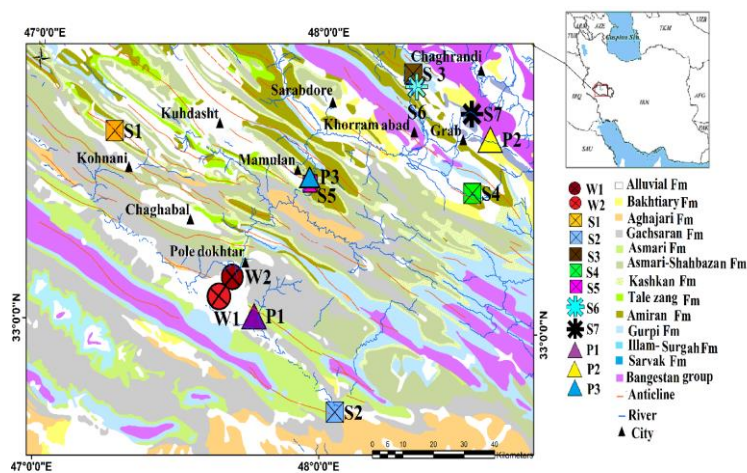


Fig. 1- Location of groundwater sampling points in the study area  
 شکل ۱- موقعیت نقاط نمونه‌برداری از منابع آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه

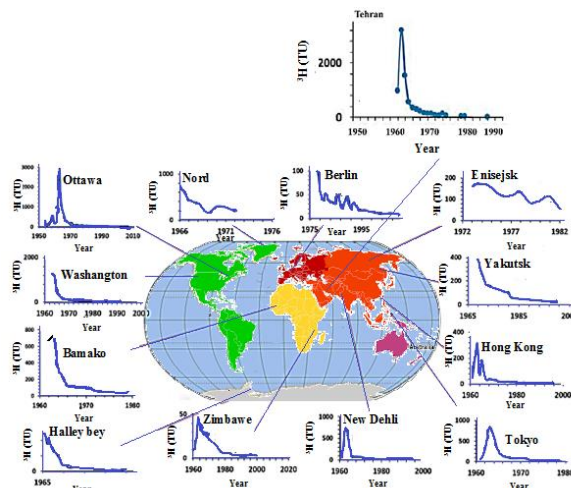


Fig. 2- Locations of Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) stations and temporal variations of tritium in precipitation at the Tehran station (IAEA and WMO, 2006)

شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های شبکه جهانی ایزوتوپ باران (GNIP) و تغییرات زمانی تریتم در بارندگی‌های ایستگاه تهران (IAEA and WMO, 2006)

## ۴-۲- روش‌شناسی

در این پژوهش، برای تعیین سن نسبی و تحلیل منشأ آب‌های زیرزمینی کارستی در استان لرستان، از ترکیب روش‌های ایزوتوپی (تریتیم) و هیدروژئوشیمیایی استفاده شد. این ترکیب، روشی کارآمد

برای بررسی هم‌زمان سن آب، کیفیت شیمیایی و فرآیندهای غالب در سیستم‌های آب‌های زیرزمینی فراهم ساخت. مراحل کلی روش‌شناسی این پژوهش در قالب فلوجارت در شکل ۳ نمایش داده شده است. جزئیات هر مرحله نیز به‌صورت گام‌به‌گام در بخش‌های مربوطه تشریح شده است.

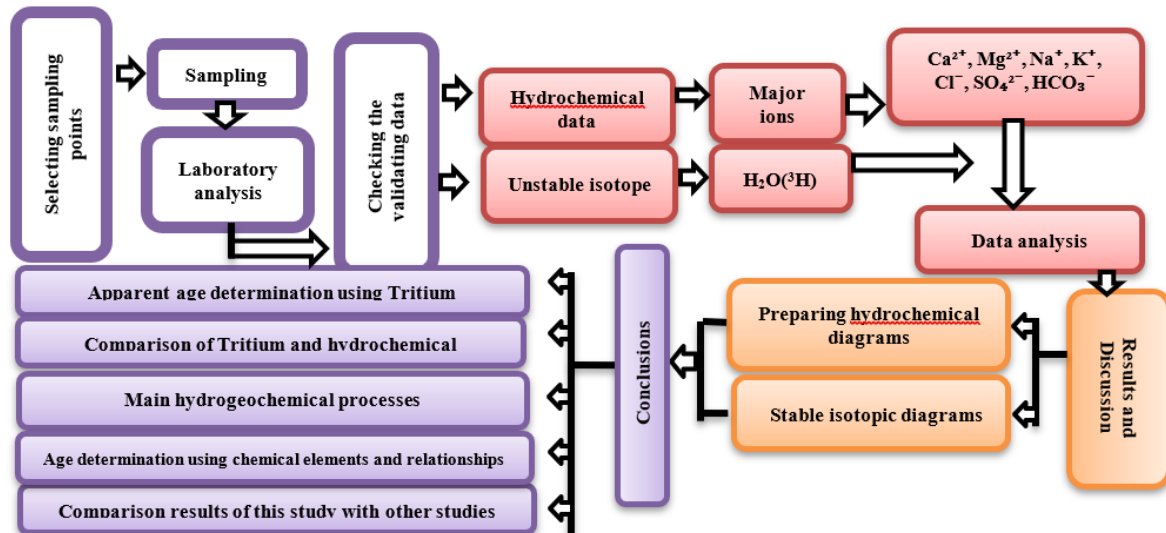


Fig. 3- Flowchart of the methodology applied in this study for the analysis of the relative age and origin of karstic groundwater in the study area

شکل ۳- نمودار روش‌شناسی پژوهش حاضر برای تحلیل سن نسبی و منشأ آب‌های زیرزمینی کارستی در منطقه مورد مطالعه

پایه شباهت‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی با منطقه مورد مطالعه صورت گرفته است. میانگین بارندگی سالانه در هر دو منطقه حدود ۵۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه بین ۱۴ تا ۱۶ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. مسیر حرکت جبهه‌های بارشی غرب کشور که عمدتاً از غرب و شمال‌غرب وارد می‌شوند، الگوی بارش مشابهی را در استان‌های کرمانشاه و لرستان ایجاد می‌کند (Alimoradi et al., 2020). علاوه بر این، مطالعات پیشین نیز بر همخوانی زمانی و مکانی ریزش‌های جوی در این دو استان تأکید داشته‌اند (Ghafarian et al., 2016). بر این اساس، داده‌های ایستگاه کرمانشاه به‌عنوان نماینده‌ای معتبر برای مقدار اولیه تریتیم در منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد. سپس غلظت تریتیم اندازه‌گیری شده در نمونه‌های آب زیرزمینی استان لرستان به‌عنوان غلظت تریتیم در زمان نمونه‌برداری ( $T_t$ ) در نظر گرفته شد. سن نسبی منابع آبی با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد. همچنین با استفاده از مقدار تریتیم اولیه در آب باران ( $T_0$ ) و مقدار تریتیم اندازه‌گیری شده در نمونه‌های آب زیرزمینی ( $T_t$ ) درصد تریتیم باقی‌مانده ( $\%T$ ) بر اساس رابطه ۳ محاسبه شد و با تطبیق آن بر

ایزوتوپ تریتیم ( $^3H$ ) به‌عنوان شاخصی کلیدی در تعیین سن نسبی آب‌های زیرزمینی به کار می‌رود. این ایزوتوپ پرتوزا با نیمه‌عمر حدود ۱۲/۳ سال، به‌مرور زمان واپاشی می‌شود و حضور آن تنها در آب‌هایی که طی چند دهه اخیر تغذیه شده‌اند، قابل‌رديابی است (Laonamsai et al., 2024; Gourdol et al., 2024). غلظت بالای تریتیم نشان‌دهنده ورود آب‌های جدید یا اختلاط با منابع سطحی و غلظت‌های پایین‌تر بیانگر اقامت طولانی یا اختلاط با آب‌های قدیمی‌تر است. این شاخص در تحلیل منشأ، مسیر جریان و شناسایی آلودگی‌های انسانی بالقوه در سامانه‌های کارستی نقش بسزایی دارد. در این مطالعه مشخصات نمونه‌ها، دسته‌بندی گروه‌ها، مقادیر تریتیم و پارامترهای فیزیکی و شیمیایی مربوطه در جدول‌های ۱ و ۳ و ۴ ارائه شده‌اند و مبنای تحلیل‌های عددی این مطالعه قرار گرفتند. برای تعیین سن نسبی با استفاده از تریتیم در ابتدا به دلیل نبود داده‌های محلی از غلظت تریتیم در بارش‌های استان لرستان، از داده‌های منتشرشده مربوط به ایستگاه کرمانشاه به‌عنوان مقدار اولیه تریتیم ( $T_0$ ) استفاده شد (Mohammadzadeh and Soleimani Valikandi, 2018). انتخاب این ایستگاه، افزون بر فاصله جغرافیایی نسبتاً نزدیک، بر

روی منحنی واپاشی تریتم (شکل ۴)، سن نسبی نمونه‌ها برآورد شد (Mazor, 2004).

برای محاسبه سن نسبی منابع آب زیرزمینی، از رابطه واپاشی پرتوزا (رابطه ۲) استفاده شد. همچنین، درصد تریتم باقی‌مانده بر اساس رابطه (۳) محاسبه شد:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left( \frac{T_0}{T_t} \right) \quad (2)$$

$$\%T = T_t \times 100 / T_0 \quad (3)$$

که  $t$  سن آب زیرزمینی برحسب سال،  $\lambda$  ثابت واپاشی تریتم با مقدار تقریبی  $(0.0563 \text{ yr}^{-1})$  که بیانگر سرعت کاهش غلظت این ایزوتوپ در طول زمان و وابسته به نیمه‌عمر آن است،  $T_0$  غلظت اولیه تریتم (TU) در زمان نفوذ آب به سفره زیرزمینی که بر اساس داده‌های ایزوتوپی بارش‌های گذشته برآورد می‌شود و  $T_t$  غلظت فعلی تریتم (TU) در زمان نمونه‌برداری است.

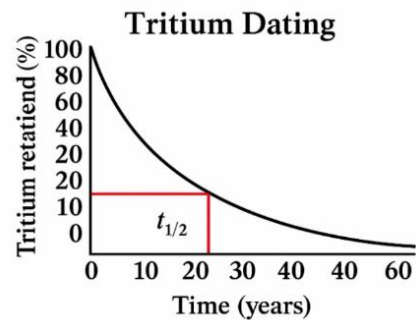


Fig. 4- Tritium decay curve used for estimating the age of groundwater (Mazor, 2004)

شکل ۴- منحنی واپاشی تریتم برای برآورد سن آب‌های زیرزمینی (Mazor, 2004)

برای ارزیابی سن نسبی و کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، نمودارهای پراکنش تریتم در برابر پارامترهای هیدروژئوشیمیایی شامل هدایت الکتریکی (EC)، غلظت یون سدیم (Na) و نسبت یون‌های  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  و  $\text{Mg}/\text{Ca}$  رسم شد (شکل‌های 7a تا 7d). این نمودارها امکان تحلیل هم‌زمان داده‌های ایزوتوپی و ژئوشیمیایی را فراهم کرده و ابزاری مؤثر برای شناسایی ناهنجاری‌ها، تغذیه موضعی یا تأثیر منابع آلاینده محسوب می‌شوند (Rahn et al., 2017; Telloli et al., 2022; Raheja et al., 2022). برای شناسایی انواع ترکیب شیمیایی آب، منشأ آن و فرآیندهای تبادل یونی در آبخوان‌های کارستی استان لرستان، از روش‌های هیدروژئوشیمیایی بهره‌گیری شد (Appelo and

Postma, 2005). نمودار پایپر (Piper, 1944) برای تعیین تیپ شیمیایی و روند تکامل آب‌ها و نمودارهای ترکیبی برای تحلیل فرآیندهای غالب از جمله انحلال، تبادل یونی و شوری به کار رفتند (Hem, 1985; Fetter, 2001) همچنین، مکانیزم‌های کنترل‌کننده شوری با استفاده از نمودار Na در برابر Cl تحلیل شدند (Drever, 1997; Langmuir, 1997). شاخص‌های اشباع کلسیت، دولومیت و ژپس محاسبه شد. نمودارهای پراکنش برای ارزیابی ارتباط بین یون‌های مختلف ترسیم شد. الگوهای پراکنش پارامترهای شیمیایی شامل غلظت یون‌های اصلی مانند بی‌کربنات، کلرید، سدیم و سولفات، به همراه نسبت‌های یونی نظیر Na/Cl، جهت تحلیل منشأ سن نسبی و تکامل شیمیایی آب‌های زیرزمینی بررسی شد (Parkhurst and Appelo, 2013). این تحلیل‌ها نقش کلیدی در شناسایی فرآیندهای غالب ژئوشیمیایی، منشأ و سن نسبی منابع آب داشته و درک جامع‌تری از رفتار سامانه‌های کارستی منطقه فراهم می‌سازند.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تعیین سن ظاهری با استفاده از تریتم

بررسی غلظت تریتم در منابع آب زیرزمینی منطقه، امکان برآورد سن نسبی آن‌ها را فراهم می‌سازد. در این مطالعه، از جدول طبقه‌بندی سن کیفی آب زیرزمینی مبتنی بر غلظت تریتم، برگرفته از دستورالعمل وزارت نیرو و بازنگری شده توسط Karimi Rad et al. (2017) استفاده شده است (جدول ۲). با توجه به ماهیت پرتوزای تریتم، تفسیر داده‌ها بر اساس مقدار تریتم اندازه‌گیری شده در بارش سال ۱۳۹۷ برابر با  $5/8 \text{ TU}$  (Mohammadzadeh and Soleimani Valikandi, 2018) و لحاظ کاهش آن تا زمان نمونه‌برداری در سال ۱۴۰۲ به مقدار  $4/38 \text{ TU}$  انجام شده است. با این حال، به منظور حفظ قابلیت مقایسه و استناد، بازه‌های اصلی جدول بر اساس طبقه‌بندی Karimi Rad et al. (2017) بدون تغییر حفظ شده‌اند.

بر اساس تقسیم‌بندی سن آب‌ها بر مبنای غلظت تریتم (جدول ۲) نمونه‌های مورد مطالعه در گروه‌های سنی مختلف طبقه‌بندی شده‌اند که این تقسیم‌بندی در شکل ۵ نمایش داده شده است. سن نسبی منابع آبی با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد و درصد تریتم باقی‌مانده نیز بر اساس رابطه (۳) تعیین شد. سپس با استفاده از منحنی واپاشی تریتم (شکل ۴)، سن تقریبی هر نمونه استخراج شد. مقایسه نتایج حاصل از این روش‌ها نشان داد که مقادیر محاسبه‌شده با مقادیر به‌دست‌آمده از منحنی واپاشی همخوانی دارد. نتایج عددی مربوط به غلظت تریتم، درصد باقی‌مانده و سن نسبی

منطقه ارائه می‌دهد که می‌تواند مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در حوزه منابع آبی باشد.

نمونه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. این تحلیل‌ها اطلاعات ارزشمندی درباره سن، تجدیدپذیری و منشأ آب‌های زیرزمینی

**Table 2- Classification of Water Age Based on Tritium Concentration (Karimi Rad et al., 2017)**  
جدول ۲- تقسیم‌بندی سن آب‌ها بر اساس غلظت تریتم (Karimi Rad et al., 2017)

Concentration of tritium (TU)	Age description
<0.33	Submodern–recharged prior to 1952
0.33-2	Mixture between submodern and recent recharge
2-6.1	(Modern)=less than 5 to 10 years old
6.1-12.25	A small amount of tritium exists from nuclear bomb tests (1950–1963)
12.25-20.4	A significant portion of the water is recharged in the 1960s or 1970s
>20.4	Water primarily recharged in the 1960s

**Table 3- Results of tritium ( $^3\text{H}$ ) concentration measurements in groundwater samples (2023), tritium level in precipitation (Mohammadzadeh and Soleimani Valikandi, 2018), and estimated relative ages in the study area**

جدول ۳- نتایج اندازه‌گیری غلظت تریتم ( $^3\text{H}$ ) در نمونه‌های آب زیرزمینی (۱۴۰۲)، غلظت در آب باران (Mohammadzadeh and Soleimani Valikandi, 2018) و سن نسبی محاسبه‌شده در منطقه مورد مطالعه

Group	ID	$^3\text{H}\%$	$^3\text{H}$ (TU)	Age	EC ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )
	Rain	-	5.5	-	-
A	W1	43.09	2.37	14.86	499
	W2	40	2.2	16.23	15900
	S1	25.64	1.41	24.22	989
	S2	29.09	1.6	21.9	1490
	S3	41.27	2.27	15.67	773
	S4	23.82	1.31	25.65	860
B	S5	36.55	2.01	17.77	892
	P1	49.09	2.7	12.63	595
	P2	48.18	2.65	12.8	507
C	P3	30.91	1.7	20.84	499
	S6	52.91	2.91	11	224000
	S7	55.82	3.07	10.36	235000

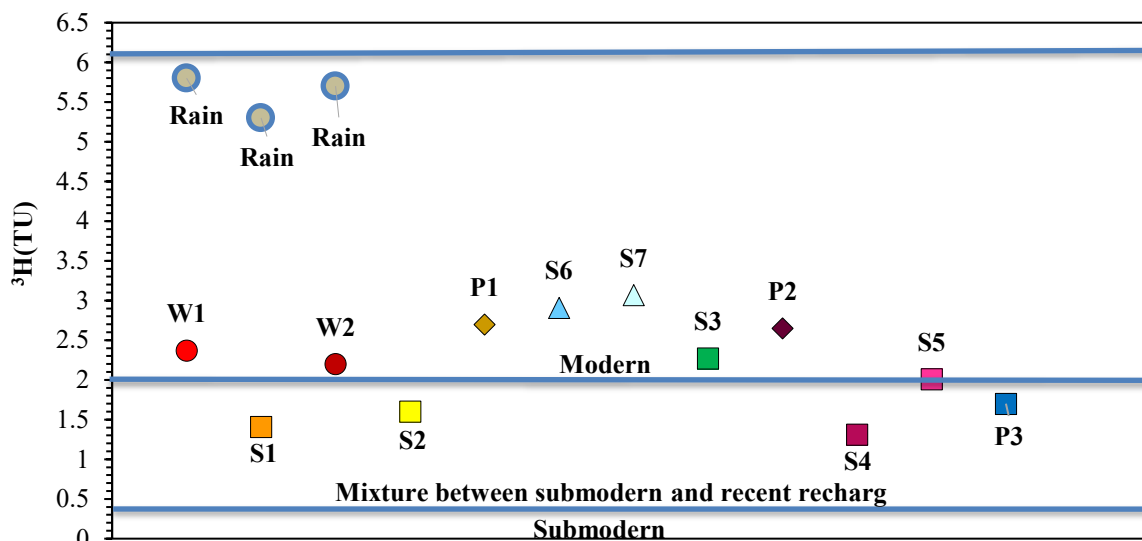


Fig. 5- Classification of rainwater and groundwater samples based on tritium ( $^3\text{H}$ ) concentration in the study area

شکل ۵- طبقه‌بندی سنی نمونه‌های آب باران و آب زیرزمینی بر اساس غلظت تریتم ( $^3\text{H}$ ) در منطقه مورد مطالعه

نشان‌دهنده منشأ سطحی و تغذیه سریع از بارندگی‌های اخیر تلقی می‌شوند.

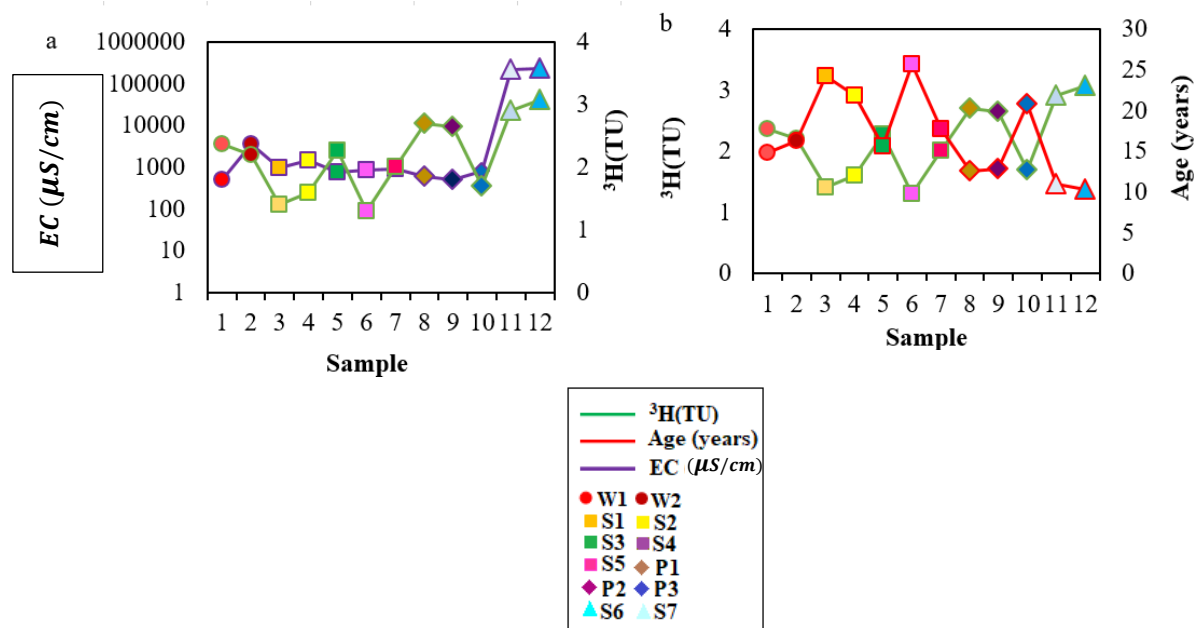
### ۳-۲- مقایسه تریتم و پارامترهای شیمیایی

تحلیل روابط بین تریتم و پارامترهای هیدروژئوشیمیایی در نمونه‌های برداشت‌شده، شواهدی از تفاوت سن، منشأ و مسیرهای تغذیه آب‌های زیرزمینی منطقه ارائه می‌دهد. در نمودار تریتم در برابر هدایت الکتریکی (شکل ۷- a) رابطه‌ای معکوس میان این دو پارامتر مشاهده می‌شود. نمونه‌های W1، P1، S3 و P2 با غلظت بالای تریتم و مقادیر پایین هدایت الکتریکی (EC)، نشان‌دهنده آب‌های جوان با تغذیه سریع از بارش‌های اخیر هستند. این نمونه‌ها در مناطقی با آبرفت‌ها و سازندهای نفوذپذیر واقع شده‌اند که امکان نفوذ مؤثر بارش‌ها و تغذیه سریع را فراهم می‌سازد. در مقابل، نمونه‌های S1، S2 و S4 با غلظت پایین تریتم و EC نسبتاً بالا، به‌طور معمول معرف مسیرهای جریان طولانی‌تر، اقامت بیشتر و تکامل هیدرووشیمیایی بالاتر هستند. این الگو با روندهای شناخته‌شده در مطالعات کلاسیک تکامل آب زیرزمینی سازگاری دارد (Chebotarev, 1955). نمونه‌های S5 و P3 دارای غلظت‌های میانی تریتم و هدایت الکتریکی بوده و در محدوده‌ای بینابینی قرار می‌گیرند. این وضعیت می‌تواند ناشی از اختلاط آب‌های جوان و قدیمی یا تغذیه موضعی باشد. در این موارد، ساختارهای زمین‌ساختی مانند گسل‌ها یا شکستگی‌ها می‌توانند مسیرهای ویژه‌ای برای انتقال یا اختلاط ایجاد کنند. بررسی دقیق‌تر این

بر اساس محاسبات انجام‌شده در بخش روش‌شناسی و با استفاده از معادله واپاشی پرتوزا (رابطه ۲)، سن نسبی آب‌های زیرزمینی منطقه با توجه به غلظت تریتم اندازه‌گیری‌شده، بین حدود ۱۰ تا ۲۵ سال برآورد شد. مقادیر تریتم در نمونه‌ها بین ۱/۳۱ تا ۳/۰۷ واحد تریتم (TU) متغیر بود که نشان‌دهنده دامنه‌ای از منابع آب با سن جوان تا بینابینی است. بر اساس مقادیر تریتم، بیشتر نمونه‌های مورد بررسی در محدوده‌ی آب‌های جدید<sup>۱</sup> با سن کمتر از ۱۰ سال قرار دارند. تنها تعداد اندکی از نمونه‌ها در بازه‌ی بینابینی قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده اختلاط جزئی بین تغذیه جدید و قدیمی‌تر است. بالاترین غلظت تریتم و در نتیجه جوان‌ترین سن آب در گروه C (چشمه‌های شور) مشاهده شد که نشان‌دهنده تغذیه سریع از بارش‌های اخیر است. در مقابل، نمونه‌هایی نظیر S1 و S4 با تریتم کمتر، بیانگر تغذیه آهسته‌تر و ماندگاری بیشتر در سفره‌های عمیق‌تر بودند.

بررسی رابطه بین غلظت تریتم و هدایت الکتریکی نمونه‌های برداشت‌شده که در شکل ۶ نشان داده شده است، بیانگر وجود یک روند معکوس میان این دو پارامتر است؛ به‌گونه‌ای که در بیشتر نمونه‌ها، افزایش هدایت الکتریکی با کاهش غلظت تریتم و در نتیجه افزایش سن نسبی آب همراه بوده است. این الگو می‌تواند نشان‌دهنده تکامل بیشتر ترکیب شیمیایی، افزایش زمان ماندگاری و تماس طولانی‌تر آب با سنگ بستر باشد و در برخی موارد نیز از فرآیندهایی نظیر تبخیر یا ورود آلاینده‌های انسانی تأثیر پذیرفته باشد. در مقابل، مقادیر پایین هدایت الکتریکی همراه با تریتم بالا،

عوامل نیازمند داده‌های تکمیلی است (Freeze and Cherry, 1979; Fetter, 2001).



**Fig. 6- (a) Variations in electrical conductivity (EC) and Tritium concentration (TU); (b) The relationship between tritium concentration (TU) and water age (years) in the groundwater resources of the study area**  
 شکل ۶- (a) تغییرات هدایت الکتریکی (EC) و غلظت تریتم (TU)؛ (b) رابطه بین غلظت تریتم (TU) و سن آب (سال) در منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

شور شدگی ناشی از سازند تبخیری گچساران است (Freeze and Cherry, 1979; Clark and Fritz, 2013).

در نمودار تریتم در برابر  $Mg/Ca$  (شکل ۷- c) نسبت‌های پایین  $Mg/Ca$  همراه با مقادیر بالاتر تریتم معمولاً نشان‌دهنده آب‌های جوان با تغذیه تازه و غلبه کلسیم هستند، درحالی‌که نسبت‌های بالاتر  $Mg/Ca$  همراه با تریتم پایین، می‌تواند بازتابی از تماس طولانی‌تر آب با سنگ‌های منیزیم‌دار در طی مسیر جریان باشد (Goldscheider and Drew, 2020; Clark and Fritz, 1997). این نمودار بیشتر هم‌زمانی تغییرات ترکیب شیمیایی و سن آب را نشان می‌دهد و تفسیر دقیق‌تر آن نیازمند شواهد تکمیلی است. نمونه‌های S1، S2 و S4 با نسبت بالاتر  $Mg/Ca$  و تریتم پایین، آب‌هایی با زمان اقامت بیشتر و تماس گسترده‌تر با سنگ‌های منیزیم‌دار را نشان می‌دهند. در مقابل، نمونه‌های S6 و S7 با نسبت پایین  $Mg/Ca$  و تریتم بالا، ترکیب کلسیم غالب و منشأ جوان را نشان می‌دهند. در این نمونه‌ها، انحلال کلسیم از سازند گچساران نیز می‌تواند موجب کاهش نسبت  $Mg/Ca$  شده باشد. سایر نمونه‌ها نیز دارای الگوهای بینابینی یا رفتاری ناهماهنگ هستند که احتمالاً حاصل اختلاط یا مسیرهای جریان پیچیده است.

برخی نمونه‌ها رفتار متفاوتی نسبت به روند کلی نمودار نشان می‌دهند. نمونه‌های S6 و S7 که در سازند تبخیری گچساران قرار دارند، دارای مقادیر بالای هر دو پارامتر هستند. منشأ تریتم بالا در این نمونه‌ها، تغذیه مستقیم از بارش‌های اخیر است؛ اما عبور این آب‌ها از لایه‌های شور و تبخیری گچساران، منجر به انحلال شدید املاح و افزایش EC شده است (Freeze and Cherry, 1979). در مقابل، نمونه W2 گرچه در رسوبات آبرفتی قرار دارد، اما به دلیل غلظت بالای هم‌زمان تریتم و هدایت الکتریکی، احتمالاً تحت تأثیر اختلاط موضعی با منابع شور یا فرآیندهای تبخیری سطحی قرار گرفته است.

در نمودار تریتم در برابر سدیم (شکل ۷- b) اغلب نمونه‌ها در محدوده میانی پراکنده شده‌اند. نمونه P1 با بالاترین مقدار تریتم و کمترین مقدار سدیم، نشان‌دهنده منشأ تغذیه‌ای تازه و فاقد تماس طولانی با سنگ‌های سدیم‌دار است، درحالی‌که نمونه W2 با تریتم و سدیم بالا، رفتاری متمایز نسبت به سایر نمونه‌ها دارد که احتمالاً تحت تأثیر منابع آلاینده سطحی قرار گرفته است. نمونه‌های S6 و S7 با مقادیر بسیار بالای هر دو پارامتر، نمایانگر الگویی متمایز از سایر نمونه‌ها هستند که احتمالاً ناشی از ترکیب تغذیه‌ی جدید و

کارستی سازند آسماری-شهبازان و نمونه W2 از آبرفت‌های نفوذپذیر برداشت شده است؛ محیط هر دو نمونه، مستعد انتقال سریع آلاینده‌ها و تغذیه مستقیم آب زیرزمینی است. در نمونه‌های S6 و S7، ترکیب ترتیم بالا با نسبت بالای  $SO_4/Cl$  نیز دیده می‌شود که می‌تواند نتیجه انحلال گسترده ژپس و نمک در سازند گچساران باشد. این فرایندها سبب می‌شوند که آب‌های تازه در عبور از محیط شور، ترکیب یونی کاملاً متفاوتی پیدا کنند.

در مجموع، تحلیل‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که در بسیاری از نمونه‌ها، همخوانی کامل بین سن ایزوتوپی (ترتیم) و شاخص‌های شیمیایی مشاهده نمی‌شود. این ناهماهنگی‌ها، اهمیت استفاده تلفیقی از داده‌های ایزوتوپی و ژئوشیمیایی را در تحلیل جامع‌تر رفتار آب‌های زیرزمینی کارستی لرستان برجسته می‌سازد.

در نمودار ترتیم در برابر  $SO_4/Cl$  (شکل ۷-d) پراکندگی نمونه‌ها نمایانگر تأثیر هم‌زمان چندین فرآیند هیدروژئوشیمیایی است. نمونه‌های S1، S2 و S4 با نسبت‌های بالای  $SO_4/Cl$  و غلظت پایین ترتیم، به آب‌های قدیمی‌تر با منشأ تبخیری یا تماس طولانی با سنگ بستر نسبت داده می‌شوند. در مقابل، نمونه‌های W1 و W2 با مقادیر بالای  $SO_4/Cl$  و هم‌زمان غلظت بالای ترتیم، رفتاری ناهنجار دارند که می‌تواند ناشی از ورود آلاینده‌های نفتی باشد. فعالیت‌هایی نظیر استخراج نفت، نشت مخازن یا دفن غیراصولی زهاب‌های نفتی می‌تواند باعث افزایش غلظت ترکیبات گوگرددار شوند که در شرایط اکسیداسیون، به یون سولفات تبدیل می‌شوند و نسبت  $SO_4/Cl$  را افزایش می‌دهند. هم‌زمان، ورود آب‌های سطحی تازه می‌تواند سطح ترتیم را نیز بالا ببرد. نمونه P1 از رخنمون

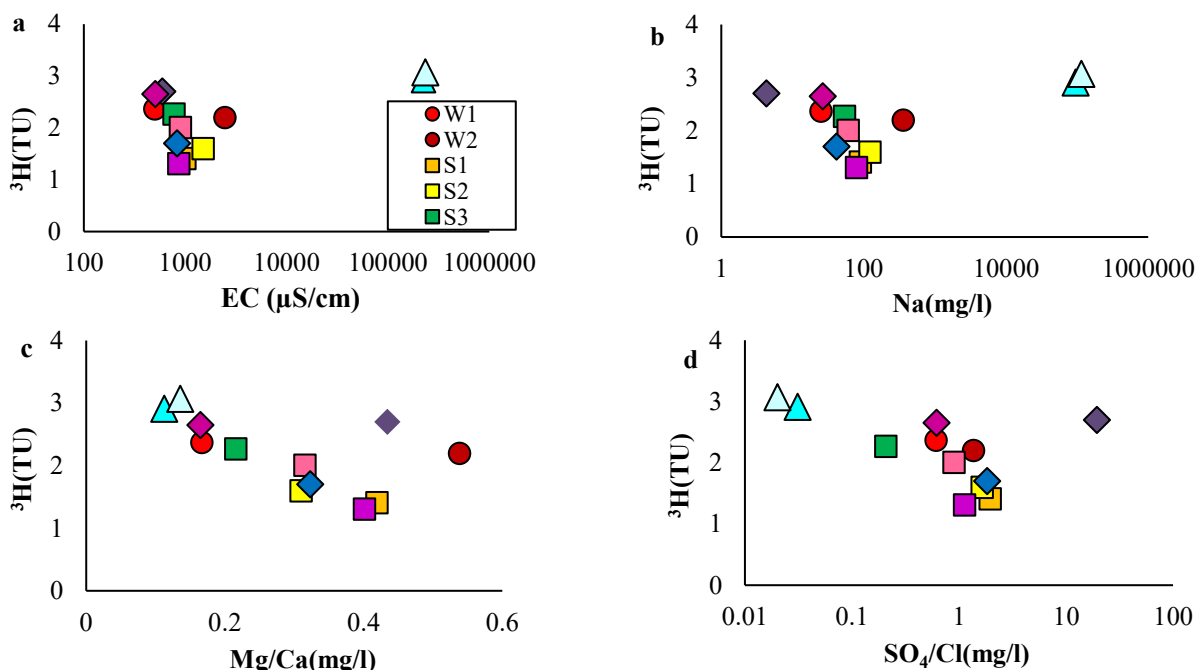


Fig. 7- Relationship between Tritium Concentration and Water Quality Parameters in Karst Groundwater

شکل ۷- ارتباط بین غلظت ترتیم و پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی کارستی

۱۲ نمونه از آب‌های زیرزمینی کارستی منطقه، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها در سه گروه A، B و C مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۴). مقادیر pH در محدوده ۶/۹۳ تا ۸/۱ با میانگین ۷/۳۰ ثبت شد. میانگین غلظت یون‌های  $Ca$ ،  $Mg$ ،  $Na$ ،  $K$ ،  $Cl$ ،  $SO_4$  و  $HCO_3$  به ترتیب برابر ۱۰۲، ۳۵، ۹۴، ۲/۵۱، ۱۴۹ و ۳۳۹ میلی‌گرم بر لیتر بود.

آب‌های کارستی منطقه‌ی مورد مطالعه با غلظت بالای کاتیون‌های  $Ca$  و  $Na$  و آنیون  $HCO_3$  مشخص می‌شوند. گروه C و همچنین

ترکیب شیمیایی آب‌های کارستی تحت تأثیر شرایط زمین‌شناسی، هیدرودینامیکی و فعالیت‌های انسانی شکل می‌گیرد و اطلاعات ارزشمندی درباره منشأ، تاریخچه و کیفیت آب‌های زیرزمینی ارائه می‌دهد. در این راستا، روش‌های هیدروژئوشیمیایی به‌عنوان ابزارهایی کارآمد، در تحلیل سیستم‌های پیچیده کارستی، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر، ارزیابی کیفیت منابع و برآورد سن نسبی آب‌ها کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند (Gao et al., 2023; Molina et al., 2024; Shan et al., 2024). بر اساس آنالیزهای انجام‌شده بر روی

نمونه‌ها چشمه P3 بالاترین مقدار pH (۸/۱) و چشمه S5 دارای بالاترین دمای اندازه‌گیری شده (۲۸/۵) درجه سانتی‌گراد بودند.

نمونه‌های S2 و W2 بیشترین مقادیر  $SO_4$ ، Na، Cl، Mg و TDS را نشان می‌دهند. این وضعیت می‌تواند ناشی از فرآیند تبادل یونی، تأثیر سنگ‌های تبخیری، یا فعالیت‌های انسانی باشد. در میان

**Table 4- Measured hydrochemical and isotopic parameters in karst groundwater samples**  
جدول ۴- پارامترهای کیفی و ایزوتوپی اندازه‌گیری شده در نمونه‌های آب زیرزمینی کارستی

Group	Sample ID	EC ( $\mu$ S)	T/ $^{\circ}$ C	PH	Major Elements (mg·L <sup>-1</sup> )							
					Ca	Mg	Na+K	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO	Na/Cl	
A	W1	499	20.4	7.6	63.6	10.6	25.5	29.4	17.8	261	0.85	
	W2	2450	20.4	7.6	205.3	110.4	362	515.8	700	394	0.58	
	S1	989	23.8	7.3	74.7	31.3	93.8	49.0	95.6	442	1.82	
	S2	1490	23.3	7.1	132.9	41.1	123.7	195	318	255	1.63	
	S3	773	14.5	6.3	70.4	15.1	56.2	94.2	19.4	290	0.57	
	S4	860	21.1	6.9	64.1	25.7	79.7	47.4	53.3	447	1.62	
	S5	892	28.2	6.2	88.9	28	63.7	70.4	63.2	409	0.85	
B	P1	595	22.6	7.2	71.2	30.9	5.7	5.3	103	288	0.81	
	P2	507	18.1	7.1	63.6	10.5	27.1	31.4	19.4	247	0.84	
	P3	828	19.6	8.1	94.5	30.5	43.9	53.5	98.1	354	0.77	
C	S6	224000	25.5	6.8	1694	191	94644	138939	4307	88.5	0.68	
	S7	235000	26.2	7.1	1246	169	114829	173348	3494	162	0.66	

### ۳-۳- شاخص اشباع کانی‌ها

برای تحلیل فرآیندهای ژئوشیمیایی و درک بهتر کیفیت آب‌های زیرزمینی، اندیس اشباع سه کانی اصلی کلسیت، دولومیت و ژپس با استفاده از نرم‌افزار PHREEQC محاسبه شد (Parkhurst and Appelo, 2013). نتایج (شکل ۹) نشان داد که اغلب نمونه‌ها نسبت به کلسیت (SIc) و دولومیت (SI<sub>d</sub>) در وضعیت اشباع یا نزدیک به اشباع قرار دارند، در حالی که نسبت به ژپس (SI<sub>g</sub>) اغلب نمونه‌ها غیراشباع هستند.

در نمونه‌های S6 و S7 که دارای هدایت الکتریکی بسیار بالا و ترکیب یونی تبخیری هستند، شرایط اشباع نسبت به کلسیت و غیراشباع بودن نسبت به ژپس هم‌زمان با غلظت بالای تریتم مشاهده شده است. با توجه به موقعیت زمین‌شناسی منطقه و گسترش سطحی سازند گچساران، این وضعیت می‌تواند ناشی از انحلال فعال کانی‌های تبخیری مانند ژپس در مسیر جریان آب باشد.

از آنجا که اندیس اشباع تحت تأثیر پارامترهایی مانند pH، دما، TDS، آلکالینیتی و ترکیب یونی است، نمی‌توان آن را به‌تنهایی به‌عنوان شاخصی برای تعیین سن آب‌های زیرزمینی در نظر گرفت. در این پژوهش نیز، مقادیر SI تنها به‌عنوان شاخص‌هایی از تعادل

نتایج تحلیل هیدروشیمیایی و نمودار پایپر (شکل ۸) نشان می‌دهد که تیپ غالب آب‌های زیرزمینی منطقه، کلسیم-بی‌کربنات (Ca-HCO<sub>3</sub>) است که در اغلب نمونه‌ها مشاهده می‌شود. این تیپ معرف منشأ کربناته، انحلال سنگ‌های آهکی و تغذیه از بارندگی‌های اخیر بوده و معمولاً با مقادیر بالای تریتم و ویژگی‌های آب‌های جوان همراه است (Clark and Fritz, 1997; Hem, 1985). نمونه‌هایی مانند S1، S5، P1 و P3 در این گروه قرار دارند. با وجود شباهت در تیپ شیمیایی، بررسی پارامترهای کیفی این نمونه‌ها نشان می‌دهد که از نظر غلظت یون‌های سولفات، کلراید و هدایت الکتریکی تفاوت‌هایی دارند (جدول ۴)؛ به‌ویژه در نمونه‌های P1 و P3 که دارای مقادیر نسبتاً بالاتر سولفات هستند.

برخی نمونه‌ها مانند W2 و S2 دارای تیپ شیمیایی مخلوط-Ca-SO<sub>4</sub>(Cl) هستند که نشان‌دهنده غلبه یون‌های سولفات و کلراید در آب است. این ترکیب می‌تواند از انحلال نهشته‌های تبخیری یا تأثیر آلاینده‌های موضعی ناشی شود (Appelo and Postma, 2005). تیپ شیمیایی Na-Cl نیز در چشمه‌های S6 و S7 مشاهده شد که معمولاً با انحلال هالیت در محیط‌های تبخیری مرتبط است (Freeze and Cherry, 1979).

و مسیر حرکت آب کمک کنند، اما استنباط سن آب، صرفاً بر اساس داده‌های ایزوتوپی مانند تریتم صورت گرفته است.

شیمیایی آب با سنگ و فرآیندهای انحلال-رسوب‌گذاری در مسیر جریان تفسیر شده‌اند. این شاخص‌ها می‌توانند به درک بهتر از منشأ

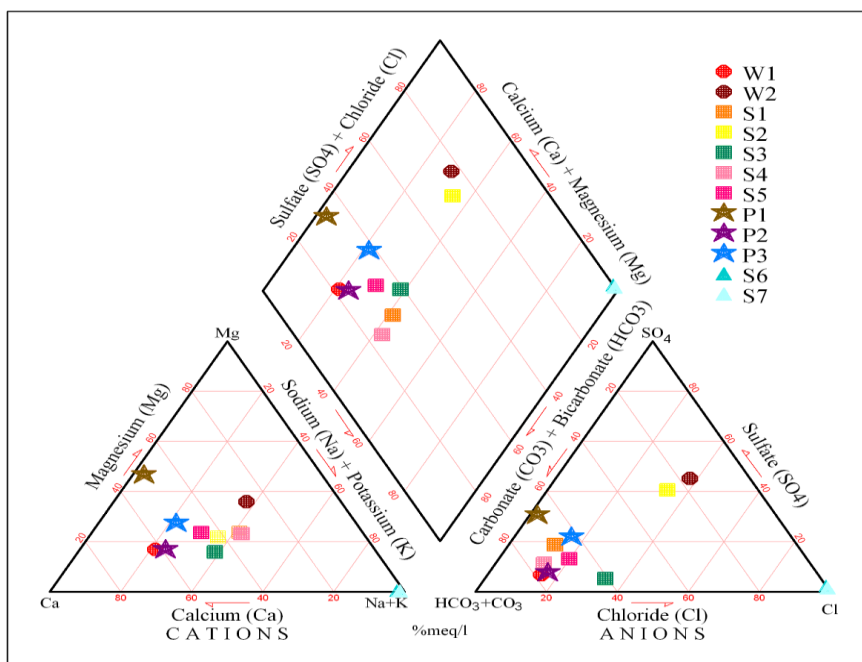


Fig. 8- Piper Diagram of Groundwater Samples in the Study Area  
 شکل ۸- نمودار پایپر نمونه‌های آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه

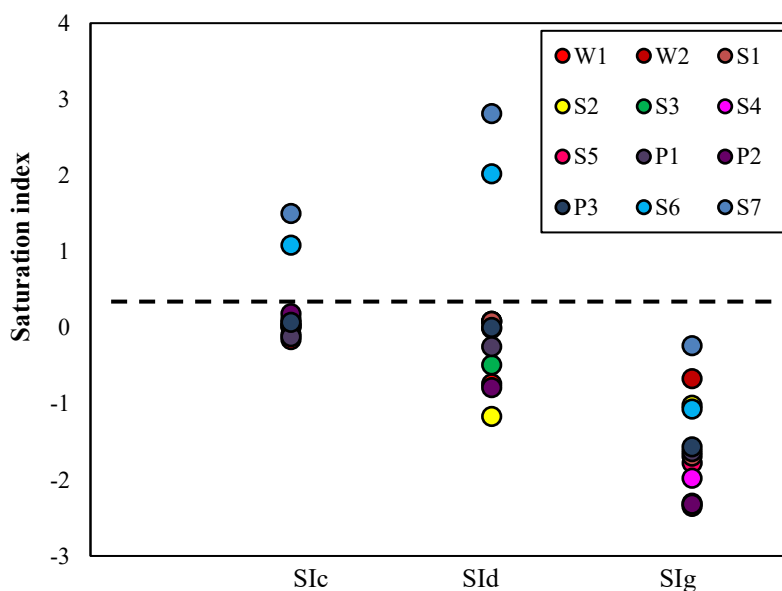


Fig. 9- Saturation indices of calcite (SIc), dolomite (SIId), and gypsum (SIg) for all water samples in the study area

شکل ۹- شاخص‌های اشباع کلسیت (SIc)، گچ (SIg) و دولومیت (SIId) برای تمام نمونه‌های آب منطقه مورد مطالعه

### ۳-۴- تحلیل همبستگی یون‌های اصلی در آب‌های

#### زیرزمینی

تحلیل همبستگی میان یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم و بی‌کربنات، بینش ارزشمندی در خصوص منشأ زمین‌شیمیایی و فرایندهای مؤثر بر ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی فراهم می‌سازد (Zhou et al., 2000). مطابق نتایج (شکل 10a)، رابطه آماری قوی بین کلسیم و منیزیم ( $r^2=0.88$ ) نشان‌دهنده منشأ مشترک این دو یون است که احتمالاً ناشی از انحلال سنگ‌های کربناته مانند آهک و دولومیت است. نبود همبستگی مشخص بین کلسیم و بی‌کربنات (شکل 10b) احتمالاً بیانگر شرایط اشباع‌شدگی آب نسبت به کلسیت و دولومیت و وقوع رسوب‌گذاری این کانی‌ها در برخی مناطق است؛ این موضوع با مقادیر مثبت شاخص اشباع (SI) نیز مطابقت دارد. در مقابل، همبستگی مثبت بین کلسیم و سولفات (شکل 10d) حاکی از مشارکت ژئیس به‌عنوان یکی از منابع تأمین کلسیم، به‌ویژه در مناطق مرتبط با سازند گچساران است.

همبستگی بالای بین غلظت منیزیم و سولفات ( $r^2=0.95$ ) می‌تواند بیانگر نقش انحلال کانی‌های سولفات حاوی منیزیم در ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی باشد. این فرآیند، همراه با هوازدگی و تماس طولانی‌مدت آب با سازندهای تبخیری، موجب افزایش غلظت این یون‌ها در آب شده است.

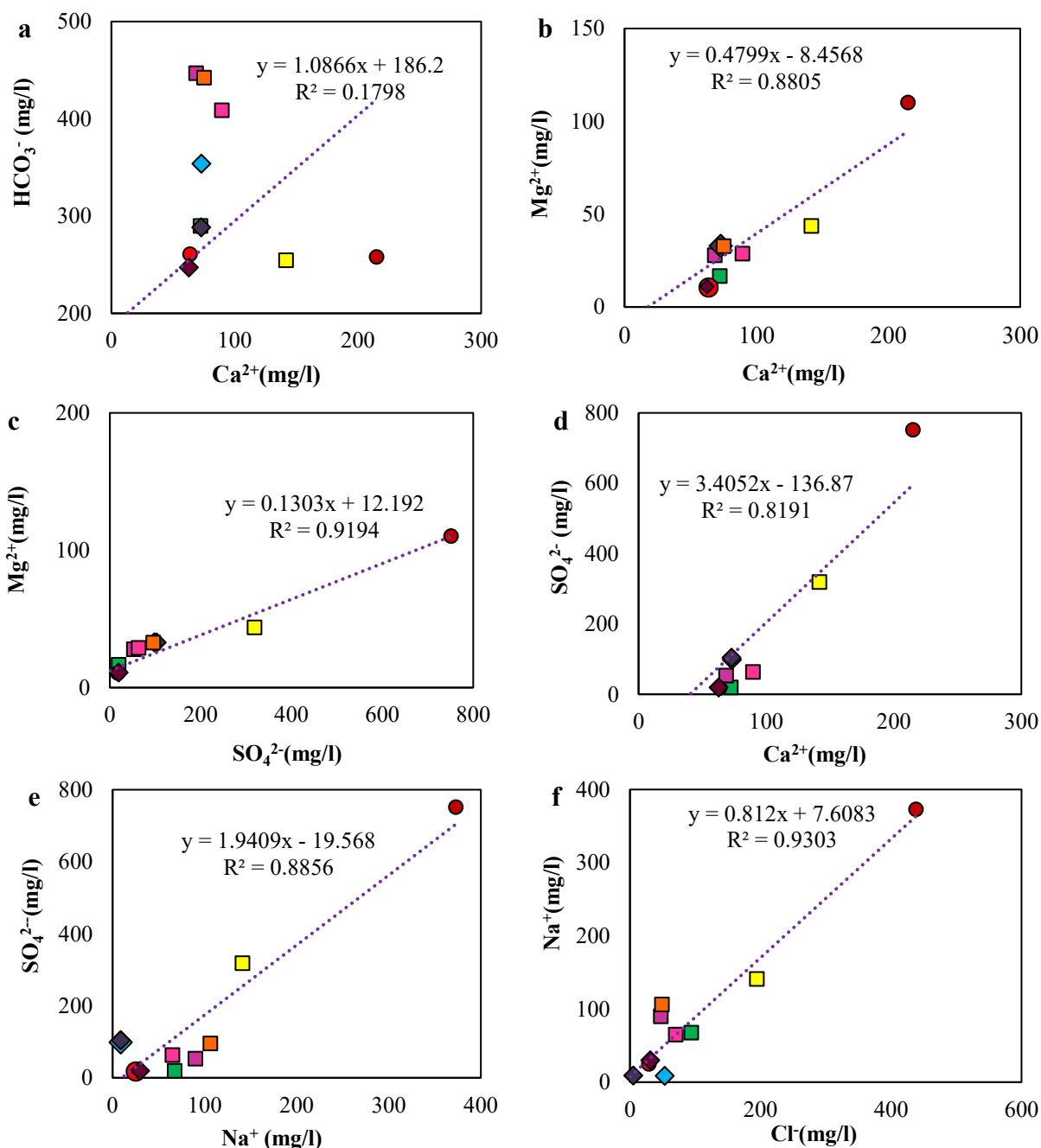
علاوه بر این، بررسی رابطه بین سدیم و کلر (شکل 10e) نشان داد که همبستگی بسیار بالا ( $r^2=0.95$ ) میان این دو یون وجود دارد؛ موضوعی که مؤید انحلال هالیت به‌عنوان منشأ اصلی آن‌هاست. در برخی نمونه‌ها، مقادیر بالای سدیم، همراه با غلظت زیاد کلر و سولفات (شکل 10e-10f)، ممکن است ناشی از تأثیر فعالیت‌های انسانی، نظیر آلودگی نفتی یا ورود شورابه‌های سطحی باشد. به‌ویژه در نمونه‌های واقع در محدوده گچساران، این ترکیب می‌تواند نشان‌دهنده ناهنجاری شیمیایی ناشی از منشأهای غیرطبیعی باشد که با سن ایزوتوپی جوان نیز همراه است.

### ۳-۵- تحلیل سن با استفاده از عناصر و روابط شیمیایی

تحلیل شاخص‌های ژئوشیمیایی مانند هدایت الکتریکی (EC)، غلظت یون‌های بی‌کربنات و سولفات و نسبت Na/Cl در نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه، به‌عنوان مکملی برای داده‌های ایزوتوپی، امکان تفسیر دقیق‌تر فرایندهای هیدروژئوشیمیایی و هیدرولوژیکی حاکم بر سامانه کارستی را فراهم می‌کند (Clark and Fritz, 1997). بررسی الگوهای پراکنش این پارامترها مطابق (شکل ۱۱)، نمودارهای (d تا a) نشان می‌دهد که آب‌های نسبتاً جوان‌تر، معمولاً

دارای EC پایین، نسبت Na/Cl نزدیک به یک و غلظت پایین‌تر یون‌های محلول هستند؛ این شاخص‌ها معرف تغذیه اخیر، مسیر جریان کوتاه و تماس محدود با سنگ بستر است. در مقابل، آب‌های بالغ‌تر که در شرایط هیدرولوژیکی با زمان ماند طولانی‌تر قرار گرفته‌اند، معمولاً دارای EC بالا، نسبت‌های یونی پیچیده‌تر و غلظت‌های بالاتر سولفات و بی‌کربنات هستند که بیانگر انحلال گسترده کانی‌ها، تبادل یونی و تماس طولانی با واحدهای سنگی به‌ویژه تبخیری مانند گچساران است (Zhang et al., 2020). حضور این الگوها، رابطه مستقیمی با ساختار زمین‌شناسی منطقه، از جمله وجود سازندهای تبخیری نفوذپذیر و گسل‌های فعال دارد که مسیرهای جریان و زمان ماند آب را کنترل می‌کنند.

نمونه‌های W1، P1 و P2 به دلیل هدایت الکتریکی پایین (کمتر از  $600 \mu\text{S/cm}$ ) و نسبت Na/Cl نزدیک به یک، معرف آب‌های نسبتاً جوان با تغذیه اخیر هستند. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده مسیرهای جریان کوتاه، تماس محدود با سنگ بستر و اقامت زمانی کوتاه در آبخوان هستند؛ عواملی که با ویژگی‌های سازندهای کربناته مانند آسماری، ایلام-سروک و آبرفت‌های نفوذپذیر منطقه تطابق دارند. در این شرایط، انحلال کربنات‌ها (به‌ویژه کلسیت و دولومیت) عامل اصلی تشکیل تیپ  $\text{Ca-HCO}_3$  در این نمونه‌ها است. همچنین، این شرایط هیدرولوژیکی معمولاً به واسطه تغذیه مستقیم از بارش‌های اخیر و نبود تبخیر یا آلودگی قابل‌ملاحظه شکل گرفته‌اند که با تریتم نسبتاً بالا نیز همخوانی دارد. با این حال نمونه P1 علی‌رغم هدایت الکتریکی پایین و کلراید اندک ( $3/5 \text{ mg/L}$ )، دارای غلظت نسبتاً بالای سولفات ( $100 \sim \text{mg/L}$ ) است که ترکیبی غیرمعمول به شمار می‌رود. این نمونه از سازند آسماری-شهبازان برداشت شده است که عمدتاً از سنگ‌های آهکی و مارنی تشکیل شده و در حالت عادی انتظار نمی‌رود منشأ قابل‌توجهی برای سولفات داشته باشد. با توجه به قرارگیری این نمونه در نزدیکی تلمبه‌خانه نفتی تنگ فنی، این احتمال وجود دارد که غلظت نسبتاً بالای سولفات ناشی از نفوذ آلاینده‌های سطحی مرتبط با فعالیت‌های نفتی باشد. با این حال، به دلیل نبود داده‌های مستقیم در خصوص منشأ آلودگی، این فرض نیازمند بررسی‌های تکمیلی در مطالعات آتی است. در مقابل، نمونه‌های W1 و P2 دارای ترکیب یونی ساده‌تر و تریتم بالا هستند و با ویژگی‌های آب‌های جوان و تازه تغذیه‌شده همخوانی بیشتری دارند.



**Fig. 10- Relationship between Different Ions in the Karst Water Samples for the Study Area**  
 شکل ۱۰- ارتباط بین یون‌های مختلف در نمونه‌های آب کارستی مورد مطالعه

مسیرهای جریان سریع در شکستگی‌ها یا مجاری انحلالی می‌توانند باعث ورود سریع آب‌های تازه و کم‌تعامل شوند؛ موضوعی که با ترکیب شیمیایی مشاهده شده هم‌خوانی دارد. احتمالاً عبور بخشی از مسیر جریان این آب از مجاورت سازندهای شور اطراف مانند گچساران، موجب افزایش جزئی هدایت الکتریکی آن شده است (Clark and Fritz, 1997). در نمونه P3 با وجود متوسط،

نمونه‌های S3، S5 و P3 دارای مقادیر میان‌ی هدایت الکتریکی (EC) در محدوده ۷۳۳ تا ۸۹۲  $\mu S/cm$  هستند. در نمونه S3، غلظت پایین سولفات و کلراید همراه با نوع آب  $Ca-HCO_3$ ، نشان‌دهنده کیفیت نسبتاً خوب و احتمال تغذیه از منابع جوان با ترکیب شیمیایی کم تغییر یافته است. این نمونه از سازند ایلام-سورگه برداشت شده که یک واحد کربناته با پتانسیل توسعه کارست محسوب می‌شود و

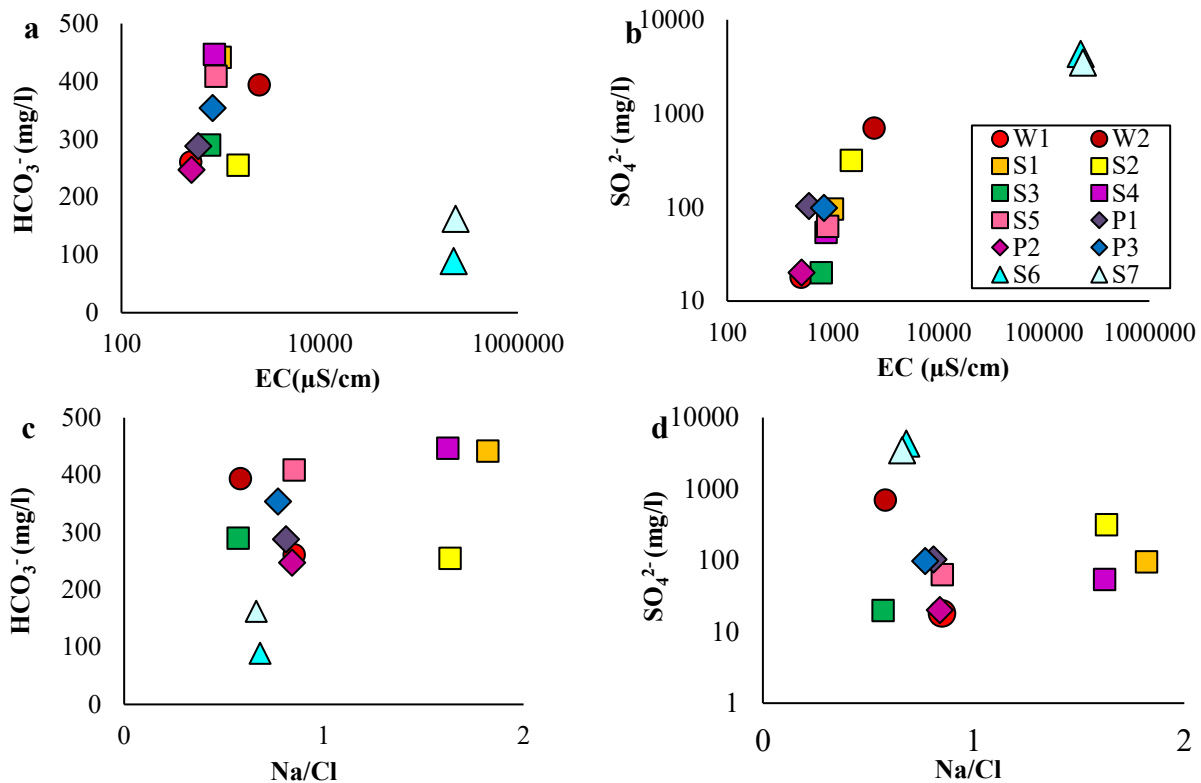
غلظت سولفات (98 mg/L) نسبت به سایر نمونه‌های با EC مشابه، بالاتر است. این وضعیت ممکن است ناشی از نفوذ موضعی آلاینده‌های نفتی یا آلی باشد که منشأ گوگردی دارند (Appelo and Postma, 2005; EPA, 2016; Pazoki et al., 2018). نمونه S5 نیز که همانند P3 در آبرفت‌های منطقه معمولان واقع شده، با وجود EC متوسط، نسبت بالای Na/Cl و غلظت قابل توجه Ca و Mg را نشان می‌دهد. این ترکیب می‌تواند حاصل از فرآیند تبادل یونی بین یون‌های سدیم و کلسیم/ منیزیم در محیط‌های رسی، اختلاط آب‌های کارستی با آب سطحی، یا حتی تأثیر منابع آلوده موضعی باشد (Mazor, 2004). عبور گسل امیران از منطقه معمولان نیز می‌تواند با ایجاد مسیرهای ترجیحی جریان، زمینه ورود آب با منشأ و سن متفاوت از سازندهای مجاور را فراهم کند و نقش کلیدی در تنوع ترکیب شیمیایی این دو نمونه ایفا نماید (Pazoki et al., 2018).

دو نمونه S1 و S4 دارای هدایت الکتریکی نسبتاً بالا (بیش از  $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) و نسبت Na/Cl بیش از  $1/6$  هستند که این ویژگی‌ها نشان‌دهنده تماس طولانی‌مدت این آب‌ها با سنگ بستر کربناته و تأثیر فرآیندهای زمین‌شیمیایی، به‌ویژه تبادل یونی است. در این فرآیند، یون‌های Ca و Mg در سنگ‌های کربناته با Na محلول تبادل می‌شوند که منجر به افزایش غلظت سدیم و بالا رفتن نسبت Na/Cl در آب می‌شود؛ پدیده‌ای که در محیط‌های رسی یا در شرایط اقامت طولانی آب تشدید می‌شود (Mazor, 1997; Clark and Fritz, 2004). این دو نمونه به ترتیب از سازندهای ایلام-سروک و امیران برداشت شده‌اند که هر دو شامل واحدهای آهکی تا مارنی با قابلیت شکستگی و زمینه تبادل یونی‌اند. همچنین، مقادیر پایین تریتیم در این نمونه‌ها (کمتر از  $\text{TU}_2$ ) نشان می‌دهد که آب آن‌ها از سن بالاتر برخوردار است و مدت زمان زیادی را در سیستم زیرزمینی سپری کرده‌اند؛ وضعیتی که با ترکیب یونی مشاهده‌شده کاملاً هماهنگ است. چنین ویژگی‌هایی معمولاً در آب‌های زیرزمینی عمیق یا در مناطق با سرعت جریان پایین دیده می‌شود که در تماس طولانی با سنگ بستر قرار دارند (Nisi et al., 2014).

نمونه‌های W2 و S2 با هدایت الکتریکی بالا و غلظت‌های قابل توجه یون‌های سولفات و کلراید، بیانگر تأثیر سازندهای تبخیری به‌ویژه گچساران و آلودگی‌های موضعی بر ترکیب شیمیایی

آن‌ها هستند؛ شرایطی که معمولاً با سن بالاتر آب‌ها در ارتباط است. در نمونه W2، نسبت پایین Na/Cl ( $0/58$ ) که احتمال وقوع تبادل یونی مستقیم سدیم-کلسیم را تقویت می‌کند، در کنار تریتیم نسبتاً بالا نشان‌دهنده یک ناهمخوانی آشکار بین سن شیمیایی و سن ایزوتوپی است. این الگو می‌تواند حاصل از ورود آب‌های جوان‌تر به یک محیط شور یا اختلاط موضعی با منابع سطحی یا آلوده باشد. در مقابل، نمونه S2 که در سازند گچساران قرار دارد، با نسبت Na/Cl بالاتر ( $1/63$ ) و تریتیم پایین‌تر تطابق بیشتری بین شیمی و ایزوتوپ نشان می‌دهد و به‌عنوان آب نسبتاً بالغ یا ترکیبی از آب‌های قدیمی و تغذیه محدود جدید قابل تفسیر است. عدم بروز ناهنجاری شدید در این نمونه حاکی از نبود اختلاط گسترده با آب‌های سطحی یا جوان است. منعکس‌کننده تأثیر بیشتر سازند گچساران و تبادل یونی معکوس باشد.

چشمه‌های S6 و S7 که در سازند تبخیری گچساران واقع شده‌اند، دارای هدایت الکتریکی بسیار بالا و غلظت‌های زیاد یون‌های Na، Cl و  $\text{SO}_4$  هستند. نسبت Na/Cl کمتر از  $0/7$  و تیپ شیمیایی Na-Cl در این نمونه‌ها نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی آن‌ها تحت تأثیر مستقیم انحلال نهشته‌های نمکی و گچی قرار گرفته است. هرچند در بسیاری از مدل‌های کلاسیک هیدروژئوشیمی مانند مدل (Chebotarev, 1955)، افزایش هدایت الکتریکی به‌عنوان شاخصی از اقامت طولانی‌تر آب در سفره تلقی می‌شود، اما در مناطق دارای سازندهای تبخیری، این تفسیر می‌تواند معتبر نباشد (Freeze and Cherry, 1979). در چنین شرایطی، EC بالا الزاماً نشانه سن بیشتر آب نیست، بلکه اغلب ناشی از تماس مستقیم آب با لایه‌های بسیار محلول تبخیری است. این موضوع در نتایج این مطالعه نیز مشاهده می‌شود؛ زیرا علی‌رغم EC بسیار بالا، مقادیر بالای تریتیم در این نمونه‌ها، به‌ویژه در S7 (بیش از  $3 \text{ TU}$ )، نشان می‌دهد که آب نسبتاً جوان است و احتمالاً در اثر نفوذ مستقیم یا تغذیه سطحی وارد سامانه شور شده و با آب شور قدیمی‌تر مخلوط شده است (Telloli et al., 2022; Gourdol et al., 2024).



**Fig. 11- Scatter plots of chemical parameters in the groundwater samples of the study area: (a)  $\text{HCO}_3^-$  vs.  $\text{Na/Cl}$  ratio vs. EC, (c)  $\text{HCO}_3^-$  vs.  $\text{Na/Cl}$  ratio, and (d)  $\text{SO}_4$  electrical conductivity (EC), (b)  $\text{SO}_4$  electrical conductivity (EC), (c)  $\text{HCO}_3^-$  vs.  $\text{Na/Cl}$  ratio, and (d)  $\text{SO}_4$  vs.  $\text{Na/Cl}$  ratio.**

آبخوان‌های کارستی منطقه را برجسته می‌سازد. این دسته‌بندی تطبیقی، در کنار بررسی ویژگی‌های شیمیایی، دیدگاه دقیق‌تری نسبت به رفتار دینامیکی سامانه‌های کارستی لرستان ارائه می‌دهد. چنین تنوعی از نظر سن، ترکیب شیمیایی و منشأ آب، بیانگر تأثیر فرآیندهایی چون انحلال سنگ‌های کربناته، تبخیر، تبادل یونی، اختلاط و در برخی موارد آلودگی موضعی است. این نتایج با یافته‌های مطالعات پیشین نیز هم‌راستا هستند. به‌عنوان نمونه، در مطالعه Díaz-Puga et al. (2016) بر روی آبخوان کارستی Sierra de Gador در جنوب اسپانیا، منابع آب بر اساس غلظت تریتم به سه دسته آب‌های جوان، قدیمی و مخلوط طبقه‌بندی شدند و نقش فرآیندهایی مانند اختلاط و مسیرهای پیچیده‌ی جریان در ایجاد ناهمگنی ترکیب شیمیایی آب به‌خوبی مشخص شد. همچنین، در مطالعه Iqbal et al. (2024) در حوضه پنجاب پاکستان، مشخص شد که آب‌های زیرزمینی با سن متوسط (در بازه ۵ تا ۵۰ سال) تحت تأثیر تغذیه سطحی و تجدیدپذیری متغیر قرار دارند؛ الگویی که در بخشی از نمونه‌های منطقه‌ی مورد مطالعه در لرستان نیز مشاهده می‌شود. در همین راستا، مطالعه‌ی Telloli et

### ۳-۶- بحث

یافته‌های این پژوهش نشان‌دهنده رفتار پیچیده و ناهمگن در سامانه آب زیرزمینی کارست جنوب غرب لرستان است. تحلیل توأمان داده‌های ایزوتوپی ( $^3\text{H}$ ) و شاخص‌های هیدروژئوشیمیایی، اطلاعات ارزشمندی در خصوص منشأ، کیفیت و سن نسبی منابع آبی منطقه فراهم کرده است.

بر اساس طبقه‌بندی کیفی غلظت تریتم (جدول ۲)، اغلب نمونه‌ها در دو گروه آب‌های با تغذیه جدید (۲ تا  $\text{TU}6/1$ ) و مخلوطی از تغذیه جدید و قدیم ( $3/3$  تا ۲  $\text{TU}$ ) قرار می‌گیرند (Karimi Rad et al., 2017). نمونه‌هایی مانند W1، W2، S3، S6، S7، P1 و P2 در محدوده تغذیه جدید قرار دارند که بیانگر سن نسبتاً پایین و نقش مؤثر تغذیه‌های اخیر در آن‌ها است. در مقابل، نمونه‌هایی نظیر S1، S2، S4، P3 و تا حدی S5 در محدوده بینابینی قرار گرفته‌اند که می‌تواند بازتاب‌دهنده اختلاط منابع با سن متفاوت یا مسیرهای جریان طولانی‌تر باشد.

طبقه‌بندی به‌دست‌آمده از غلظت تریتم با نتایج محاسبه‌شده سن و روند واپاشی پرتوزا نیز همخوانی دارد و نقش تغذیه جدید در پویایی

al. (2022). در دشت Treviso در ایتالیا نیز نشان داد که استفاده از تریتم، ابزاری کارآمد برای شناسایی تغذیه‌های اخیر در آبخوان‌ها و ارزیابی آسیب‌پذیری سامانه‌های چندلایه در برابر تغییرات اقلیمی است. در این پژوهش، دست‌بندی نمونه‌ها بر اساس غلظت تریتم به تفکیک منابع آب با سن‌های متفاوت و شناسایی شواهدی از تجدید یا اختلاط سطحی منجر شد، روندی که در بسیاری از نمونه‌های کارستی لرستان نیز مشاهده شده است.

نمونه‌های W1 و P2 با شاخص‌های کیفی ساده و غلظت پایین املاح، مشخصه‌های منابع با منشأ کربناته و اقامت کوتاه‌مدت در سفره را دارند. مقادیر بالای تریتم در این نمونه‌ها، بیانگر تغذیه سریع از بارش‌های اخیر و ماهیت جوان آن‌هاست. چنین ویژگی‌هایی در مطالعه‌ای بر روی آبخوان کم‌عمق در منطقه West Coast آفریقای جنوبی نیز مشاهده شده است که در آن، داده‌های تریتم و کربن-14، تغذیه فعال، نفوذ سریع و اقامت کوتاه‌مدت آب در سفره‌های کم‌عمق را تأیید کرده‌اند (Andries et al., 2021).

در نمونه W2، واقع در منطقه سراب حمام، حضور هم‌زمان تریتم بالا و ترکیب شیمیایی گوگردی (Ca-SO<sub>4</sub>-Cl) نوعی ناهنجاری ایزوتوپی-شیمیایی ایجاد کرده است. این وضعیت می‌تواند ناشی از اختلاط آب‌های تازه با منابع دارای منشأ گازی یا شور باشد. شواهد میدانی و گزارش‌های پیشین از فوران گاز H<sub>2</sub>S در این ناحیه، احتمال ورود گازهای احیایی با منشأ آلی به سیستم آب زیرزمینی را تقویت می‌کند. حضور این گازها می‌تواند موجب تغییر در شرایط اکسایش-کاهش و افزایش یون‌های سولفات و کلر در ترکیب آب شود. در چنین شرایطی، ترکیب آب ممکن است تحت تأثیر اختلاط آب‌های تازه با منابع حاوی ترکیبات گوگردی و کلروره تغییر یابد، بدون آن که کاهش قابل‌توجهی در مقدار تریتم مشاهده شود؛ پدیده‌ای که بیانگر ورود سریع آب جدید به بخشی از سیستم با سابقه شیمیایی متفاوت است. چنین رفتارهایی پیش‌تر در آبخوان‌های تبخیری مناطق خشک شمال‌شرق عربستان گزارش شده است؛ در آن مطالعه، حتی با تریتم اولیه پایین، تغلیظ آزمایشگاهی و شمارش دقیق نشان داد برخی چاه‌ها دارای سطوح نسبتاً بالای تریتم بوده‌اند که گویای حضور آب جوان در میان آب‌های قدیمی است (Mamun, 2024). همچنین، مطالعات در لوکزامبورگ و مکزیک نشان داده‌اند که ورود آب‌های جوان به سامانه‌های کارستی با ترکیب‌های شیمیایی از Ca-HCO<sub>3</sub> تا Ca-SO<sub>4</sub> فرآیندهایی مانند انحلال مواد تبخیری و تبخیر همراه است (Gourdol et al., 2024; Molina et al., 2024). این یافته‌ها نشان‌دهنده تعامل پیچیده میان منابع آب جوان و قدیمی و تأثیر فرآیندهای زمین‌شیمیایی در سامانه‌های کارستی است.

در نمونه‌های S1 و S4، ترکیب یونی پیچیده‌تر، غلظت بالاتر بی‌کربنات و ویژگی‌های شیمیایی متناسب با اقامت طولانی‌تر آب قابل مشاهده است. کاهش تریتم نیز در این نمونه‌ها قابل توجه است و با تکامل هیدروژئوشیمیایی آن‌ها همخوانی دارد. نمونه S2، واقع در سازند گچساران، دارای ترکیب یونی غنی شده و هدایت الکتریکی نسبتاً بالا است، اما در عین حال نسبت Na/Cl بالاتری نسبت به مقدار معمول آب‌های شور نشان می‌دهد. این وضعیت با تیپ کلاسیک آب‌های تبخیری که معمولاً  $Na/Cl \approx 1$  دارند همخوانی ندارد و می‌تواند ناشی از فرآیند تبادل یونی معکوس، ویژگی‌های سنگ‌بستر یا ورود جزئی آب‌های با منشأ متفاوت باشد. یافته‌های این مطالعه با نتایج گزارش‌شده توسط Soleimani and Bahadori (2015) هم‌راستا است؛ آن‌ها نیز نشان دادند که ویژگی‌های کانی‌شناسی سازند گچساران و تبادل یونی نقش مؤثری در تغییر ترکیب یونی آب زیرزمینی دارد. از نظر ایزوتوپی، مقدار تریتم در نمونه S2، در بازه میانه قرار دارد که نشان‌دهنده ترکیب آب با منشأ مختلط است؛ به طوری که ترکیب شیمیایی و ایزوتوپی آن، نشان‌دهنده ترکیبی از تغذیه‌های جدید و حضور مؤثر آب‌های با زمان ماند طولانی‌تر است (Clark and Fritz, 1997). این تطابق ایزوتوپی-ژئوشیمیایی تأکید می‌کند که رفتار این نمونه حاصل فرآیندهای ترکیبی در یک محیط با ویژگی‌های سنگ‌شناسی خاص و دینامیک جریان پیچیده است.

در نمونه‌های S3، S5 و P3 ترکیب‌های شیمیایی مشاهده می‌شود که بیانگر ویژگی‌های بینابینی یا تلفیقی از نظر ژئوشیمیایی هستند. نمونه S3 دارای ترکیب یونی ساده‌تر، غلظت پایین کلراید و سولفات و مقدار تریتم نسبتاً بالا (2/27 TU) است که آن را در گروه آب‌های تازه تغذیه‌شده قرار می‌دهد. با این حال، نسبت پایین Na/Cl ممکن است نشان‌دهنده اختلاط موضعی با منشأ شور یا عبور از مسیرهای آلوده باشد. در مجموع، ترکیب شیمیایی و ایزوتوپی آن بیشتر به منابع جوان با تغذیه جدید شباهت دارد، هرچند نشانه‌هایی از اثرات موضعی نیز دیده می‌شود.

نمونه‌های P3 و S5، هر دو در محدوده منطقه معمولان واقع شده‌اند و دارای ترکیب یونی نسبتاً بالغ و دارای تریتم در محدوده مرزی یا میانه (1/7 و 2/01 TU) هستند. در P3، وجود سولفات و کلراید بالا همراه با نسبت Na/Cl کمتر از یک می‌تواند بیانگر اختلاط با منابع شور یا آلودگی سطحی و نفتی موضعی باشد. S5 نیز با غلظت بالاتر یون‌های Mg و Cl، دمای بالاتر نسبت به سایر نمونه‌ها و قرارگیری در مسیر گسل امیران، می‌تواند تحت تأثیر نفوذ عمقی، ساختار زمین‌شناسی و تماس احتمالی با ترکیبات هیدروکربنی قرار گرفته باشد.

بر اساس مطالعات ژئوشیمیایی منطقه معمولان، تماس آب‌های زیرزمینی با ترکیبات هیدروکربنی در عمق و امتداد گسل‌های فعال در برخی نقاط تأیید شده است (Pazoki et al., 2018). هرچند در این مطالعه داده مستقیمی از آلودگی نفتی ثبت نشده، اما رفتار شیمیایی و ایزوتوپی نمونه‌های P3 و S5 با این شرایط هم‌راستا به نظر می‌رسد. در مجموع، رفتار این نمونه‌ها نشان‌دهنده تغذیه ترکیبی و تأثیر احتمالی فرآیندهای زمین‌ساختی، اختلاط و نفوذ آلاینده‌ها در سامانه جریان منطقه است (Mazor, 2004; Nisi et al., 2014).

در نمونه P1، مقدار بالای تریتیوم ( $TU\ 2/7$ ) هم‌زمان با غلظت بالای سولفات و کلراید پایین، ترکیبی غیرمعمول و بیانگر نوعی ناهنجاری ایزوتوپی-ژئوشیمیایی است. چنین حالتی می‌تواند ناشی از تغذیه اخیر در منطقه‌ای با تأثیر آلاینده‌های نفتی یا اختلاط موضعی با منابع شورتر باشد. این ویژگی‌ها، P1 را در زمره منابع با منشأ ترکیبی قرار می‌دهد و تأکید می‌کند که ترکیب شیمیایی به‌تنهایی معیار کافی برای ارزیابی منشأ یا کیفیت آب نیست. چشمه‌های نمکی S6 و S7 با هدایت الکتریکی بسیار بالا و مقادیر بالای تریتیوم، الگویی متفاوت از سایر نمونه‌ها نشان می‌دهند. در نگاه نخست، ترکیب EC بالا همراه با تریتیوم بالا ممکن است به‌عنوان نوعی ناهنجاری ایزوتوپی-ژئوشیمیایی در نظر گرفته شود. با این حال، در مناطقی با حضور گسترده سنگ‌های تبخیری نظیر سازند گچساران، چنین ترکیبی می‌تواند ناشی از ورود سریع آب‌های تازه به محیط‌های حاوی نمک و گچ باشد. در این شرایط، افزایش ناگهانی شوری الزاماً به معنای سن بالای آب نیست، بلکه حاصل انحلال سریع کانی‌های تبخیری در مسیرهای کوتاه جریان است (Freeze and Cherry, 1979). مشاهده این الگو در چشمه‌های شور منطقه لرستان نیز مؤید نقش سنگ‌های تبخیری در تغییر سریع ترکیب شیمیایی آب‌های جوان در مراحل ابتدایی جریان است.

رخساره‌های شیمیایی نمونه‌های بررسی‌شده در این مطالعه، نیز ارتباط مستقیم با سن نسبی آب‌ها و شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئوشیمیایی منطقه دارند. رخساره‌ی غالب در اغلب نمونه‌ها، بی‌کربناته-کلسیک ( $Ca-HCO_3$ ) است که معرف آب‌های نسبتاً جوان با منشأ سنگ‌های کربناته، تغذیه سطحی مستقیم و مسیرهای جریان کوتاه است. این تیپ عمدتاً در نمونه‌هایی با هدایت الکتریکی پایین و مقادیر تریتیوم بالا مشاهده شد که بازتاب‌دهنده‌ی تازه بودن تغذیه و تماس محدود با بستر زمین است. اگرچه رخساره- $Ca-HCO_3$  معمولاً با ترکیب شیمیایی ساده و تغذیه اخیر همراه است، وجود غلظت‌های نسبتاً بالاتر سولفات در نمونه‌هایی نظیر P1 و P3 می‌تواند ناشی از اختلاط محدود با منابع آلوده یا تغییرات موضعی در ترکیب شیمیایی باشد.

علی‌رغم وجود رخساره یونی مشابه در S2 و W2، اختلاف در سن ایزوتوپی و موقعیت زمین‌شناسی آن‌ها، به منشأهای متفاوت این ترکیب اشاره دارد. رخساره  $Ca-SO_4-Cl$  در S2 با مقدار میانه تریتیوم و حضور رخمون گچساران، با الگوی کلاسیک انحلال تبخیری مطابقت دارد؛ در حالی‌که در W2، همین رخساره در کنار تریتیوم بالا و نبود منشأ تبخیری، نشان‌دهنده تأثیر ترکیبات آلاینده گازی در یک مسیر جریان کوتاه و متفاوت است. همچنین، حضور رخساره‌ی کلروره-سدیک ( $Na-Cl$ ) در نمونه‌های S6 و S7 که با تریتیوم بالا همراه شده، احتمال انحلال سریع حالت توسط آب‌های تازه را تقویت می‌کند؛ فرآیندی که در نواحی تبخیری با تغذیه فعال رایج است (Freeze and Cherry, 1979). به‌طور کلی، تحلیل رخساره‌ها در کنار داده‌های ایزوتوپی نشان می‌دهد که ترکیب یونی آب‌های زیرزمینی در منطقه نه‌تنها تابع لیتولوژی، بلکه تابعی از سن آب، مسیر جریان، موقعیت ساختاری و میزان اختلاط با منابع آلاینده یا شور است. این تنوع رخساره‌ای با نتایج پژوهش‌های پیشین در زمینه ارتباط میان ترکیب یونی، منشأ زمین‌شناسی و سن نسبی آب‌های زیرزمینی همخوانی دارد (Richter and Kreitler, 1993; Bradbury, 1991; Casillas-Trasvina et al., 2022). بررسی شاخص‌های اشباع نیز به درک بهتر سن نسبی آب‌های زیرزمینی کمک می‌کند. بیشتر نمونه‌ها نسبت به کلسیت و دولومیت در حالت اشباع یا نزدیک به اشباع هستند که نشان‌دهنده زمان ماندگاری متوسط تا نسبتاً طولانی آب در سفره است. در مقابل، همه نمونه‌ها نسبت به ژپس غیراشباع‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که فرآیند انحلال ژپس هنوز ادامه دارد و شرایط لازم برای رسوب‌گذاری مجدد آن فراهم نیست. همچنین، تحلیل نسبت‌های یونی نیز یافته‌های شیمیایی و ایزوتوپی را تکمیل کرده و اطلاعاتی درباره منشأ آب، تبادل یونی و احتمال وجود آلودگی ارائه داده‌اند. این تفاوت‌ها بر اهمیت استفاده از رویکردی تلفیقی در تحلیل داده‌های شیمیایی و ایزوتوپی برای تفسیر دقیق‌تر سن آب‌های زیرزمینی کارستی تأکید می‌کنند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف تعیین سن نسبی و ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی کارستی در جنوب غرب استان لرستان، با استفاده هم‌زمان از داده‌های ایزوتوپی (تریتیوم) و شاخص‌های هیدروژئوشیمیایی انجام شد. بر اساس غلظت تریتیوم و منحنی واپاشی پرتوزا، سن نسبی منابع در محدوده ۱۰ تا ۲۵ سال برآورد شد و غالب نمونه‌ها در دسته‌ی آب‌های با تغذیه جدید یا ترکیبی قرار گرفتند.

ابزار مؤثری برای تبیین منشأ، مسیر جریان و تأثیرات زمین‌شناسی پیچیده بر کیفیت و رفتار دینامیکی سامانه‌های آب زیرزمینی در اختیار می‌گذارد. در ادامه، برای تکمیل درک از چرخه تغذیه و ارزیابی آسیب‌پذیری این منابع، استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار ( $^2\text{H}$  و  $^{18}\text{O}$ ) به منظور تعیین منشأ تغذیه، انجام نمونه‌برداری فصلی برای بررسی تغییرات زمانی کیفیت آب و بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی جهت تحلیل جریان و انتقال املاح در مراحل بعدی پژوهش توصیه می‌شود.

#### پی‌نوشت‌ها

- 1- Tritium
- 2- Hafr Al Batin
- 3- Electrical Conductivity
- 4- High Density Polyethylene
- 5- Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry
- 6- Ion Chromatography
- 7- Charge Balance Error Percentage
- 8- International Atomic Energy Agency
- 9- Global Network of Isotopes in Precipitation
- 10- Modern

آب‌های زیرزمینی مورد بررسی سه رخساره یونی عمده را نشان دادند (۱): تیپ بی‌کربناته-کلسیک ( $\text{Ca-HCO}_3$ ) که معرف آب‌های جوان با منشأ کربناته و اقامت کوتاه‌مدت است؛ (۲) تیپ مخلوط ( $\text{Ca-SO}_4\text{-Cl}$ ) که در برخی نمونه‌ها از تماس با سازندهای تبخیری گچساران و در برخی دیگر از تأثیر آلودگی‌های گازی زیرسطحی ناشی می‌شود؛ (۳) تیپ کلروره-سدیک ( $\text{Na-Cl}$ ) که عمدتاً حاصل انحلال سریع هالیت در نواحی تبخیری در پی نفوذ آب‌های تازه است.

در برخی منابع، مشاهده هم‌زمان غلظت بالای ترتیم با ویژگی‌های شیمیایی پیشرفته‌تر یا آلوده، نشان‌دهنده ناهماهنگی میان سن ایزوتوپی و ترکیب یونی است. این وضعیت بیانگر نقش اختلاط موضعی، نفوذ عمقی، یا تأثیر آلاینده‌ها در تغییر کیفیت آب، بدون تأخیر زمانی در سیگنال ایزوتوپی است. چنین الگوهایی، لزوم تفسیر ترکیبی و چند شاخصه را برای ارزیابی صحیح منشأ و سن منابع در سامانه‌های کارستی تقویت می‌کنند.

در مجموع، این پژوهش نشان داد که تحلیل هم‌زمان داده‌های ایزوتوپی و هیدروژئوشیمیایی نه تنها امکان برآورد سن نسبی آب‌های زیرزمینی کارستی را با دقت مناسبی فراهم می‌کند، بلکه

- Alavi M (2004) Regional stratigraphy of the Zagros Fold-Thrust Belt of Iran and its proforeland evolution. *America Journal of Science* 304(1):1–20
- Ashjari J, Raeisi EZ (2006) Influences of anticlinal structure on regional flow, Zagros, Iran. *Journal of Cave and Karst Studies* 68(3):118–129
- Andries CW, Kanyerere T, Israel S, Butler M (2021) The application of environmental isotopes to conceptualize groundwater recharge in a coastal aquifer system: Case study of the West Coast Aquifer System, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth* 124:102995
- Alimoradi S, Nassery HR, Alijani F, Karimi H (2020) Source determination and formation mechanisms of sulfur and thermal springs of Siah-Kuh anticline, south-west of Iran, using hydrogeochemistry and isotope characteristics. *Hydrogeology* 5(2):16–31 (In Persian)
- Al-Enezy A, Al-Owaidi M, Hussein M (2023) Using isotopes for dating and residence time of groundwater in an aquifer, a case study at Al-Najaf, Middle Iraq. *Kuwait Journal of Science* 50(1B):1–15
- Appelo CAJ, Postma D (2005) *Geochemistry, groundwater and pollution*. CRC Press, London, 683p
- Atencio B, Ram R, Burg A, Yokochi R, Yechieli Y, Purtschert R, Adar EM (2024) Investigating the enigma of an irregular groundwater age pattern in a confined, presumed “fossil” complex aquifer through mixing cell flow modeling. *Journal of Hydrology* 630:130631
- Bradbury KR (1991) Tritium as an indicator of ground-water age in Central Wisconsin. *Groundwater* 29(3):398–404
- Casillas-Trasvina A, Rogiers B, Beerten K, Parn J, Wouters L, Walraevens K (2022) Using helium-4, tritium, carbon-14, and other hydrogeochemical evidence to evaluate the groundwater age distribution: The case of the Neogene aquifer, Belgium. *Journal of Hydrology X* 17:100132
- Chebotarev II (1955) Metamorphism of natural waters in the crust of weathering. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 8(1–2):22–48
- Clark ID, Fritz P (2013) *Environmental isotopes in hydrogeology*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 342p
- Desens A, Houben G, Sultenfuss J, Post V, Massmann G (2023) Distribution of tritium-helium groundwater ages in a large Cenozoic sedimentary basin (North German Plain). *Hydrogeology Journal* 31(3):621–640
- Díaz-Puga MA, Vallejos A, Sola F, Daniele L, Molina L, Pulido-Bosch A (2016) Groundwater flow and residence time in a karst aquifer using ion and isotope characterization. *International Journal of Environmental Science and Technology* 13:2579–2596
- Drever JI (1997) Heavy metals and metalloids. In: *The geochemistry of natural waters: Surface and groundwater environments*. Prentice Hall, pp.175–196
- Fetter C (2001) *Applied hydrogeology* (4th ed). Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 598p
- Ford D, Williams P (2007) *Karst hydrogeology and geomorphology*. Wiley, Chichester, U.K., 562p
- Freeze RA, Cherry JA (1979) *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 604p
- Gao S, Li C, Liu Y, Sun B, Zhao Z, Lv M, Gang S (2023) Hydrogeochemical characteristics and evolution processes of karst groundwater affected by multiple influencing factors in a karst spring basin, Eastern China. *Water* 15(22):3899
- Golubev AV, Belovodsky LF, Mavrin SV, Aleinikov AY, Stengach AV, Khabibulin MM, Rumynin VG (2002) Complex model to study long-term environmental tritium behavior. *Fusion Science and Technology* 41(3P2):458–463
- Gourdol L, Stewart MK, Morgenstern U, Pfister L (2024) Short high-accuracy tritium data time series for assessing groundwater mean transit times in the vadose and saturated zones of the Luxembourg Sandstone aquifer. *Hydrology and Earth System Sciences* 28(15):3519–3547
- Ghafari P, Gholami S, Owlad E, Gerivani H (2016) Rainfall–runoff temporal variability in Kermanshah Province, Iran and distinguishing anthropogenic effects from climatic effects. *Journal of Earth System Science* 125:1299–1311
- Han D, Song X, Currell MJ (2016) Identification of anthropogenic and natural inputs of sulfate into a karstic coastal groundwater system in northeast China: Evidence from major ions,  $\delta^{13}\text{C}$  DIC and  $\delta^{34}\text{S}$  SO<sub>4</sub>. *Hydrology and Earth System Sciences* 20(5):1983–1999
- Happell JD, Östlund G, Mason AS (2004) A history of atmospheric tritium gas (HT) 1950–2002. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 56(3):183–193
- Hem JD (1985) Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. U.S. Geological Survey, Report 2254

- Islamic Republic News Agency (2017) A farmer in Poldokhtar struck fire instead of water while drilling a well. Islamic Republic News Agency, August 2017, Available at: <https://www.irna.ir/news/82628778> (In Persian)
- International Atomic Energy Agency and World Meteorological Organization (2006) Global network of isotopes in precipitation: The GNIP database. IAEA, Vienna, Available at: <http://www.iaea.org/water>
- International Atomic Energy Agency (2013) Isotope methods for dating old groundwater. IAEA, Vienna. STI/PUB/1587, Available at: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1587\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1587_web.pdf)
- Iqbal U, Nabi G, Iqbal M, Masood M, Arshed AB, Saifullah M, Shahid M (2024) Groundwater age and origin and its relation with anthropogenic and climatic factors. *Water* 16(2):287
- James GA, Wynd JG (1965) Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area. *AAPG Bulletin* 49(12):2182–2245
- Karimirad I, Hessem M, Bahrami Samani A, Izadpanah A, Maghdesi N (2017) Radioisotope method for groundwater age measurement using tritium enrichment. *Journal of Water and Sustainable Development* 4(1):99–106 (In Persian)
- Langmuir D (1997) *Aqueous environmental geochemistry*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 600p
- Lorestan Meteorological Organization (2022) Annual hydrological and climatological yearbook 2022–2023. Lorestan Meteorological Organization, Khorramabad, Available at: <http://www.lorestanmet.ir/Site> (In Persian)
- Laonamsai J, Kamdee K, Youngprawat M, Polee C, Saengkorakot C, Chanruang P, Julphunthong P (2024) Assessment of groundwater age in the Upper Chao Phraya River Basin using tritium and carbon-14 isotope analysis. *Geosciences* 14(9):231
- Mazor E (2004) *Chemical and isotopic groundwater hydrology* (3rd ed). CRC Press, Boca Raton, 352p
- Mamun A (2024) Groundwater renewal time by environmental tritium isotopes as a tracer for sustainable water resource management. *Discover Water* 4(1):1–12
- Motiei H (1993) *Stratigraphy of Zagros*. Geological Survey of Iran Publication, Tehran, 536 p (In Persian)
- Momoshima N, Yamaguchi T, Toyoshima T, Nagao Y, Takahashi M, Takamura M, Nakamura Y (2007) Tritium in the atmospheric environment. *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences* 8(2):117–120
- Molina CDC, Enriquez OO, Alfaro-De la Torre MC, Agüero JAR, Benavides AC (2025) Temporal hydrogeochemical evolution of surface water and groundwater in a karst system discharging into a continental-type Ramsar site in the Huasteca Potosina, Mexico. *Environmental Science and Pollution Research* 32(7):3912–3950
- Mohammadzadeh H, Soleimani Valikandi T (2018) Investigation of tritium ( $^3\text{H}$ ) in precipitation and determination of the relative contribution of groundwater sources in western Kermanshah. *Water and Soil (Agricultural Sciences and Industries)* 32(5):1029–1041 (In Persian)
- Michel RL, Jurgens BC, Young MB (2018) Tritium deposition in precipitation in the United States, 1953–2012. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2018–5086
- Nisi B, Raco B, Dotsika E (2014) Groundwater contamination studies by environmental isotopes: A review. In: Quevauviller P, Vallejos A, Hinsby P (eds) *Groundwater monitoring*, Vol. 15. Springer, pp 77–99
- Parkhurst DL, Appelo CAJ (2013) Description of input and examples for PHREEQC version 3a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. *US Geological Survey Techniques and Methods* 6(A43):497
- Pazoki A, Ghasemi AR, Mohammadi M, Azizpour A (2018) Geochemical investigation of sulfurous springs in the Mamulan region. In: Proc. of the 1st National Conference on Water Resources and Environmental Engineering, 2018, University of Lorestan, Khorramabad, Iran, 1–6 (In Persian)
- Piper AM (1944) A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 25(6):914–928
- Ram R, Adar EM, Yechieli Y, Yokochi R, Aeschbach W, Armon M, Reznik IJ (2024) Deep desert aquifers as an archive for Mid-to Late Pleistocene hydroclimate: An example from the southeastern Mediterranean. *Science of the Total Environment* 951:175737
- Raheja H, Goel A, Pal M (2022) An evaluation of groundwater quality and its suitability for drinking and irrigation uses under the GIS

- framework. *Water Practice & Technology* 17(11):2259
- Rahn PH, Detwiler AG, Davis AD (2017) Tritium in groundwater in the Black Hills of South Dakota. *Environmental Earth Sciences* 76(1):1–11
- Ren K, Pan X, Zeng J, Yuan D (2019) Contaminant sources and processes affecting spring water quality in a typical karst basin (Hongjiadu Basin, SW China): Insights provided by hydrochemical and isotopic data. *Environmental Science and Pollution Research* 26(30):31354–31367
- Richter B, Kreitler C (1993) *Geochemical techniques for identifying sources of ground-water salinization*. CRC Press, Florida, 194p
- Rozanski K, Araguás-Araguás L, Gonfiantini R (1993) Isotopic patterns in modern global precipitation. In: *Climate change in continental isotopic records*. American Geophysical Union, Washington DC, pp.1–36
- Shan Q, Tian X, Xie H, Gong Z, Lin Y, Dang Z, Zhu T (2024) Hydrogeochemical characteristics, driving factors, and health risk assessment of karst groundwater in Southwest Hubei Province, China. *Water Environment Research* 96(7):e11069
- Soleimani B, Bahadori A (2015) The Miocene Gachsaran formation evaporite cap rock, Zeloi oilfield, SW Iran. *Carbonates and Evaporites* 30:287–306
- Telloli C, Rizzo A, Salvi S, Pozzobon A, Marrocchino E, Vaccaro C (2022) Characterization of groundwater recharge through tritium measurements. *Advances in Geosciences* 57:21–36
- Tobin BW, Miller BV, Niemiller ML, Erhardt AM (2024) Expanding karst groundwater tracing techniques: Incorporating population genetic and isotopic data to enhance flow-path characterization. *Hydrology* 11(2):23
- UNSCEAR (2000) *Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2000 report, volume I: report to the General Assembly, with scientific annexes-sources*. United Nations, New York, 666p
- U.S. Environmental Protection Agency (2016) *Hydraulic fracturing for oil and gas: Impacts from the hydraulic fracturing water cycle on drinking water resources in the United States (Executive summary)*. EPA/600/R-16/236ES, Washington, DC, Available at: <https://www.epa.gov/hfstudy>
- Wu Y, Luo Z, Luo W, Ma T, Wang Y (2018) Multiple isotope geochemistry and hydrochemical monitoring of karst water in a rapidly urbanized region. *Journal of Contaminant Hydrology* 218:44–58
- Wang H, Zhang Q (2019) Research advances in identifying sulfate contamination sources of water environment by using stable isotopes. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16(11):1914
- Zhou X, Stetzenbach KJ, Johannesson KH, Farnham IM (2000) Major ion geochemistry of groundwaters from southern Nevada and eastern California, USA. *Chinese Journal of Geochemistry* 19:1–22
- Zhang Q, Luo Z, Lu W, Harald Z, Zhao Y, Tang J (2020) Using water isotopes and hydrogeochemical evidences to characterize groundwater age and recharge rate in the Zhangjiakou area, North China. *Journal of Geographical Sciences* 30:935–948