

Investigation of (Alluvial and Karstic) Groundwater Residence Time in Pol-e-Zahab Study Area Using Spatiotemporal Variations of Isotopic Composition ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$)

H. Mohammadzadeh^{1*} and V. Amiri²

Abstract

Based on this research, the range of average isotopic values in Polezahab precipitations have been obtained between -2.9‰ and -6.6‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and between -14.4‰ and -31.6‰ for $\delta^2\text{H}$. The isotopic meteoric water line obtained for the study area ($\delta^2\text{H} = 6.6 * \delta^{18}\text{O} + 12.1$) represented high deuterium excess (d-excess = 12.1‰) and the high values of rainwater d-excess for Sarpolezahab, Qasr-e Shirin and Kerend (8.7‰ to 20.9‰) weather stations confirming the impact of Mediterranean vapor mass. The average isotopic compositions for groundwater (alluvial and karst) ranged between -5.3‰ and -6.8‰ and between -29.2‰ and -36.6‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$, respectively. The isotopic composition of karst water in Sarpolezahab with little seasonal variations indicated sufficient time for mixing of infiltrated water with water in phreatic zone and long groundwater residence time within formation. The least seasonal variations in the isotopic composition can be seen in the largest karstic springs of the region, including Srabgarm, Ghaleshahin, Gharebolagh and Ryjab springs. Therefore, the water from these springs has the greatest residence time within formation and in turn has high relative age. Marab spring has less residence time and low relative age of water due to more karstic development and fast movement of water.

Keywords: Oxygen-18, Deuterium, Isotopic Meteoric Water Line, Karst, Residence Time, Sarpolezahab.

Received: September 19, 2016

Accepted: January 3, 2019

بررسی زمان ماندگاری آب‌های زیرزمینی (آبرفتی و کارستی) محدوده پل ذهاب با توجه به تغییرات زمانی و مکانی ترکیب ایزوتوپی ($\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$)

حسین محمدزاده^{۱*} و حمیده امیری^۲

چکیده

در این تحقیق، دامنه تغییرات میانگین مقادیر ایزوتوپی آب‌های جوی محدوده پل ذهاب برای $\delta^{18}\text{O}$ بین ۲/۹- و ۶/۶- و برای $\delta^2\text{H}$ بین ۱۴/۴- و ۳۱/۶- به دست آمده است. خط ایزوتوپی آب جوی به دست آمده برای منطقه ($\delta^2\text{H} = 6.6 * \delta^{18}\text{O} + 12.1$) نشان‌دهنده دوتریوم مازاد^۱ بالا (۱۲/۱‰) بوده و مقادیر بالای دوتریوم مازاد آب باران در ایستگاه‌های هواشناسی سرپل ذهاب، قصر شیرین و کرند (بین ۸/۷‰ و ۲۰/۹‰) تاییدی بر تاثیر بخار آب اتمسفر با منشأ مدیترانه‌ای باشد. مقادیر میانگین ترکیب ایزوتوپی منابع آب زیرزمینی (آبرفتی و کارستی) برای $\delta^{18}\text{O}$ در گستره بین ۵/۳- و ۶/۸- و برای $\delta^2\text{H}$ در محدوده بین ۲۹/۲- و ۳۶/۶- قرار می‌گیرد. ترکیب ایزوتوپی ($\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$) آب‌های کارستی در محدوده سرپل ذهاب تغییرات فصلی اندکی دارد و نشان‌دهنده وجود زمان کافی برای اختلاط آب‌های نفوذی با آب‌های بخش اشباع و زمان ماندگاری بالای آب در سازند می‌باشد. کمترین تغییرات فصلی ترکیب ایزوتوپی در بزرگترین چشمه‌های کارستی منطقه از جمله سرابگرم، سراب قلعه‌شاهین، چشمه ریجاب و سراب قره‌بلاغ دیده می‌شود. به همین سبب آب این چشمه‌ها دارای بیشترین زمان ماندگاری در سازند بوده و در نتیجه سن نسبی آب این چشمه‌ها بیشتر است. سراب ماراب دلیل توسعه مجاری کارستی بیشتر و سرعت حرکت آب بیشتر دارای زمان ماندگاری و سن نسبی آب کمتر می‌باشد.

کلمات کلیدی: اکسیژن ۱۸، دوتریوم، خط آب جوی، کارست، زمان ماندگاری، سرپل ذهاب.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۶/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۱۰/۱۳

1- Associate Professor, Groundwater and Geothermal Research Center (GRC), Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, P. O. Box:91775-1436. Email: mohammadzadeh@um.ac.ir

2- M.Sc. in Hydrogeology, Department of Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

*- Corresponding Author

۱- دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم، مرکز تحقیقات آب‌های زیرزمینی و ژئوترمال (متاب)، مشهد، ایران. کد و ص پستی: ۹۱۷۷۵-۱۴۳۶.

۲- کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم، مشهد، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

زمان‌های ماندگاری آب زیرزمینی بوده و می‌تواند به‌طور نسبی توسط داده‌های ایزوتوپی پایدار تعیین شود.

مطالعات و تحقیقات متعددی در جهان (Plummer et al., 1998; Blasch and Bryson, 2007; Pavlovskiy and Selle, 2014; Rezaeei et al., 2012; Yuce, 2005) و ایران (Mohammadzadeh and Aravena, 2015; Karimi, 2007; Osati et al., 2014; Mohammadzadeh and Amiri, 2016) در رابطه با فهم بهتر آبخوان‌های کارستی با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار انجام گرفته است. کریمی و همکاران (Karimi et al., 2004)، با استفاده از روش‌های هیدروژنوشیمیایی و ایزوتوپی به تعیین ویژگی‌های آبخوان‌های کارستی در حوضه الوند پرداخته و با استفاده از داده‌های ایزوتوپی $\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$ ارتفاع محل تغذیه برخی از چشمه‌های کارستی را تعیین نموده‌اند.

هدف از این مقاله بررسی تغییرات مکانی و زمانی ترکیب ایزوتوپی ($\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$) نزولات جوی و منابع آب‌های زیرزمینی محدوده پل‌ذهاب و استفاده از داده‌های ایزوتوپ‌های پایدار آب‌های جوی، سطحی و زیرزمینی جهت شناسایی محل‌های تغذیه و بررسی زمان ماندگاری نسبی آب در برخی از چشمه‌های کارستی مهم منطقه می‌باشد.

۲- موقعیت جغرافیایی، زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی سرپل‌ذهاب و نقاط نمونه‌برداری

محدوده مطالعاتی پل‌ذهاب در حوضه آبریز رودخانه الوند در غرب استان کرمانشاه قرار دارد (شکل ۱). از لحاظ موقعیت جغرافیایی این محدوده در حد فاصل طول‌های جغرافیایی ۴۵ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۹ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۳۶ دقیقه شمالی می‌باشد. مساحت کل محدوده ۶۲۰/۳ کیلومترمربع بوده که از این مقدار ۱۲۰/۵ کیلومترمربع را دشت‌ها و ۴۹۹/۸ کیلومترمربع را ارتفاعات تشکیل می‌دهند. این محدوده از لحاظ موقعیت زمین‌شناسی در ناحیه کمربند چین‌خورده ساده زاگرس واقع شده است. ژئومورفولوژی منطقه شامل تاقدیس‌ها و ناودیس‌های متوالی است که تاقدیس‌ها بر ارتفاعات و ناودیس‌ها بر نواحی پست و دشت‌ها منطبق گشته‌اند. امتداد سطح محوری این چین‌ها در جهت شمال غرب-جنوب شرق است و از ساختار کلی چین‌های زاگرس تبعیت می‌کند. به دلیل فرارگیری در چنین شرایطی در حدفاصل بین تاقدیس‌ها، دشت‌های باریک و طولیل ایجاد شده‌است. از مهم‌ترین ساختمان‌های تاقدیسی منطقه می‌توان به تاقدیس‌های پاتاق، دانه‌خشک و ریجاب اشاره نمود (Mortazavi, 2011). به دلیل ازدیاد

مدت زمان سپری‌شده از هنگامی که آب به درون آبخوان نفوذ می‌کند تا زمانی که آب به منطقه تخلیه آبخوان می‌رسد ("زمان ماندگاری" یا "زمان تأخیر")^۳ دارای اهمیت خاصی در مطالعات هیدروژئولوژی می‌باشد. "میانگین زمان ماندگاری"^۴ آب زیرزمینی عامل مهمی برای تعیین منشأ تغذیه، برهم‌کنش آب و سنگ در آبخوان و زمان ماندگاری کوتاه نشان‌دهنده حساس بودن آبخوان به آلودگی است (Kabeya et al., 2007; Delbart et al., 2014; McCallum et al., 2014; Han et al., 2007). تغییرات فصلی ترکیب ایزوتوپی ($\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$) آب‌های زیرزمینی، که ممکن است دارای دامنه نوسانات بسیار اندک (معمولاً در آبخوان‌های کارستی) و یا زیاد (معمولاً در آبخوان‌های آبرفتی) باشد، منعکس‌کننده اطلاعات مهمی راجع به زمان ماندگاری آب (سن نسبی آب) و خصوصیات آبخوان‌ها است (Frisbee et al., 2013; Katz et al., 2004). هر چه زمان ماندگاری آب کوتاه‌تر باشد تغییرات ایزوتوپی کمتر تعدیل شده و در نتیجه سن نسبی آب کمتر است. به عبارت دیگر در شرایطی تعدیل کامل ایزوتوپی صورت می‌گیرد که زمان ماندگاری بسیار طولانی باشد. همچنین زمان انتقال^۵ آب زیرزمینی از منشأ (محل تغذیه) تا یک چاه و یا چشمه (سن آب زیرزمینی) به علت خصلت پراکندگی^۶ آبخوان مخصوصاً در سیستم‌های کارستی، اغلب طیفی از سن‌های متفاوت است (Long and Putnam, 2009). تغییرات فصلی در مقدار ترکیب ایزوتوپی $\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$ آب‌های جوی در جریان نفوذ، حرکت و ذخیره شدن در زمین تا حد زیادی تعدیل می‌شود و میزان تعدیل به عمق، ویژگی‌های زمین‌شناسی سطحی و سنگ بستر و زمان ماندگاری آب (سن نسبی آب) وابسته است. اما به طور کلی آب‌های زیرزمینی عمیق، تغییرات فصلی ایزوتوپی نشان نمی‌دهند و ترکیب ایزوتوپی آن‌ها به میانگین ترکیب ایزوتوپی بارش سالانه نزدیک است (Hoefs, 2004).

سیستم هیدروژئولوژیکی و هیدروژئومورفولوژیکی آبخوان‌های کارستی معمولاً دارای شبکه‌ای از شکستگی‌ها و مجراها بوده که توسط چشمه‌های نسبتاً بزرگ تخلیه می‌شوند. به‌علت پیچیدگی این شبکه زیرزمینی تعیین خصوصیات این آبخوان‌ها با دشواری روبروست. تعیین مقادیر ترکیب ایزوتوپی نزولات جوی و آب چشمه‌های کارستی اطلاعات مهمی راجع به چگونگی عملکرد آبخوان‌های کارستی، تعیین سن نسبی آب زیرزمینی و نیز برآورد خطر آلودگی به‌دست می‌دهد، که در تعیین سیاست‌های مدیریتی منابع آب زیرزمینی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (Criss et al., 2001). تعیین میانگین نسبی زمان ماندگاری آب زیرزمینی، به عنوان یک شناساگر از طیف وسیعی از

در نواحی غربی (تاق‌دیس دانه خشک) کاهش می‌یابد. در نواحی میانی منطقه مقدار متوسط بارش سالانه ۵۰۰ میلی‌متر است. اسامی و نوع ایستگاه‌ها و نیز طول دوره داده‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

محدوده مطالعاتی پل‌ذهاب، به دلیل قرارگیری در بین تاق‌دیس‌های آهکی واقع در شمال غربی زاگرس از منابع آبی کارستی مهمی برخوردار است. وجود ساختمان‌های تاق‌دیس و ناودیس این محدوده را به دو دشت مجزا تفکیک می‌کند. این دشت‌ها شامل دشت بشیوه در شرق محدوده و دشت قلعه‌شاهین در سمت غربی محدوده در حدفاصل تاق‌دیس‌های پاتاق و دانه‌خشک می‌باشد. در هر یک از این دشت‌ها آبخوان آبرفتی در بالا و آبخوان کارستی در زیر تشکیل سفره‌های آب زیرزمینی مهمی داده‌اند. سازند آسماری آبخوان کارستی دشت قلعه شاهین و سازند آهکی ایلام آبخوان کارستی دشت بشیوه را تشکیل می‌دهند. سازند کربناته آسماری پوشش ساختمان تاق‌دیس‌های منطقه را تشکیل داده‌است. این سازند از سنگ‌آهک توده‌ای تقریباً خالص و به شدت تکتونیزه تشکیل شده و به سبب داشتن درزه و شکستگی فراوان، پدیده کارست در آن توسعه یافته‌است. تخلیه آب این سازند از طریق چشمه‌های متعددی صورت می‌گیرد که در یال‌های مختلف تاق‌دیس‌ها واقع شده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که به احتمال قوی سیستم جریان در اکثر چشمه‌های این منطقه از نوع افشان است (در پایین بحث شده است).

نیروهای فشارشی که از برخورد ورقه عربستان به صفحه ایران مرکزی ناشی می‌شود، در یال جنوب‌غربی اکثر چین‌های منطقه، گسل‌های معکوس ایجاد شده است که حاصل عملکرد آن‌ها رانده شدن طبقات قدیمی بر روی طبقات جوان‌تر است (Karimi et al., 2004). از مهمترین این گسل‌ها، گسل کرد-ریجاب در یال جنوب‌غربی تاق‌دیس ریجاب و گسل معکوس تیله یا پاتاق در یال جنوب‌غربی تاق‌دیس پاتاق را می‌توان نام برد، که موجب رانده شدن سازند آهکی آسماری بر روی طبقات گچی سازند گچساران شده است. از نظر رخنمون واحدهای سنگی سازند آهکی آسماری و رسوبات آبرفتی کواترنری بیشترین رخنمون را در محدوده مورد مطالعه دارند. نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی پل‌ذهاب با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰۰۰ قصر شیرین، شرکت ملی نفت ایران (National Iranian Oil Company, 2011)، رومی و تهیه شده است (شکل ۱).

از نظر هواشناسی اقلیم منطقه از نوع مدیترانه‌ای نیمه‌مرطوب تا نیمه‌خشک میانه است. متوسط دمای سالیانه از نواحی شرقی به سمت نواحی غربی افزایش می‌یابد؛ به طوری که از ۱۲/۵ درجه سانتیگراد در ناحیه ریجاب که در ارتفاعات شمال شرقی محدوده واقع است به ۱۷/۵ درجه سانتیگراد در نواحی پست غربی می‌رسد. به سبب کاهش ارتفاع از نواحی شمال شرقی به سمت غرب، مقدار متوسط بارش سالانه از ۶۰۰ میلی‌متر در ارتفاعات شمال شرقی (ناحیه ریجاب) به ۴۰۰ میلی‌متر

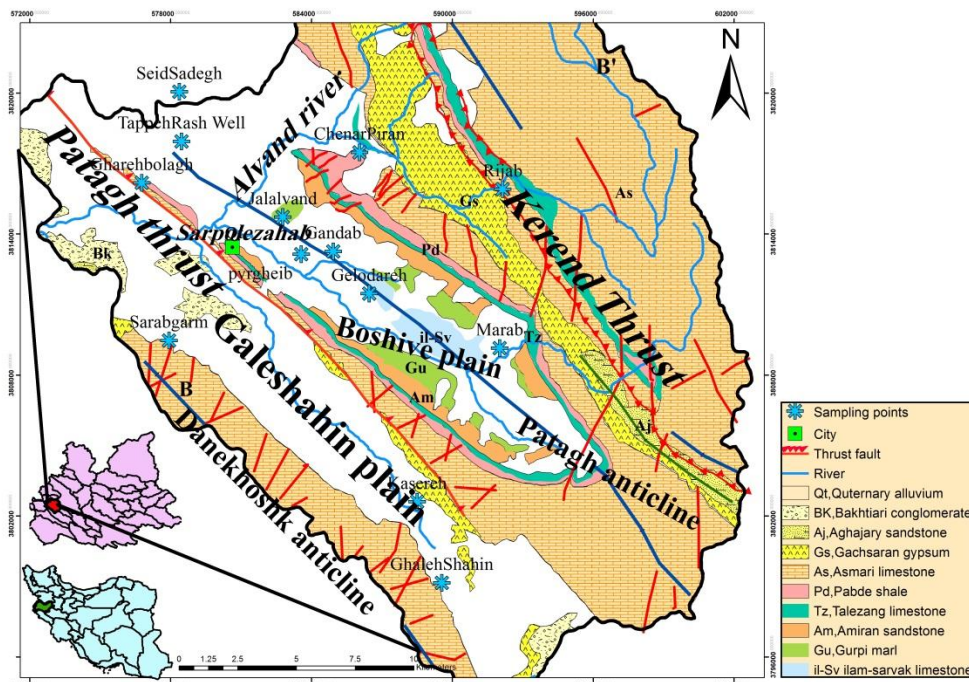


Fig. 1- Geological map of Sarpolzahab area and the sampling points
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی پل‌ذهاب و نقاط نمونه‌برداری

Table 1- Mean precipitation (R) and temperature (T) values in weather stations of the study area
جدول ۱- میانگین مقادیر بارندگی و دما در ایستگاه‌های

هواشناسی منطقه مورد مطالعه			
Station	H (m)	R (mm) (45 years)	T (°C) (priode)
Synoptic Stations			
Sarpolzahab	545	453.31	20 (25)
Qasreshirin	375	434.71	21.9 (14)
Kerend	1380	459.6	13.0 (12)
Evanqarb	1170		17.1 (12)
Rain Stations			
Bavisi	330	533.59	20.6 (17)
Piran	689	523.42	
Polshah	695	363.89	
Shahrak dire	720	350.82	
Goorsefid	650	350.63	
Patagh	920	553.68	
Zarde	1120	659.09	
Evaporate Stations			
Jaberi	528	522.46	19.6 (24)
Doab nosood	750		20.5 (17)
Evan	1049		16.2 (18)
Doab marg	1310		14.1 (36)
Ravansar	1388		13.7 (30)
Sarmil	1549		13.4 (10)
Tootshami	1553		12 (33)
Dartoot	907		17.6 (21)
Firoozabad	1375		13 (12)

گرفت. نمونه‌های باران ماهیانه ترکیبی از تمامی وقایع بارندگی برای یک ماه خاص می‌باشد. علاوه بر آن از چندین واقعه بارش به صورت باران و برف، نمونه‌برداری شده‌است. در طول دوره مطالعاتی بارش برف اندک بوده و تنها دو نمونه برف به صورت وقوعی از قله مرتفع کوهستانی در ایستگاه کردند برداشت شده است. در مجموع تعداد ۱۸ نمونه آب باران به صورت بارش ماهیانه از سه ایستگاه هواشناسی کردند (خودکار)، سرپل ذهاب (سینوپتیک) و قصر شیرین (تکمیلی) واقع در به ترتیب جنوب شرقی، مرکزی و غرب محدوده مطالعاتی نمونه‌برداری صورت گرفت. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی کردند (۳۴°۲۲′ و ۴۶°۲۲′ و ۳۴°۱۰′)، سرپل ذهاب (۴۵°۵۲′ و ۳۴°۲۷′) و قصر شیرین (۴۵°۳۶′ و ۳۴°۳۲′) نمونه‌برداری شده خارج از محدوده نقشه می‌باشد. علاوه بر آن، نمونه‌برداری از آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی پل ذهاب در طی دو دوره، دی ماه سال ۱۳۹۳ به عنوان فصل تر و مهر ماه سال ۱۳۹۴ به عنوان فصل خشک انجام گردید. مجموعاً تعداد ۲۸ نمونه آب از چشمه‌های اصلی واقع در آبخوان‌های کارستی و آبرفتی منطقه شامل چشمه قره‌بلاغ، سراپگرم، سراپ قلعه شاهین، سراپ ماراب، چشمه ریجاب، چشمه گلودره، چشمه چنارپیران و چشمه‌های آبرفتی پیرغیب، جلالوند و گنداب و نیز دو نمونه آب چاه آبرفتی و آهکی جهت تعیین محتوای ایزوتوپی جمع‌آوری شد (شکل ۱-ب). کلیه نمونه‌ها با استفاده از فیلترهای ۰/۴۵ میکرون فیلتر شده و در ظروف پلاستیکی ۲۵ میلی‌لیتری جمع‌آوری گردید.

این محدوده دارای ۱۶ منبع انتخابی مشتمل بر ۱۶ دهنه چشمه بوده که از سال ۱۳۶۱ به طور ماهیانه مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است. از نظر آب‌های سطحی رودخانه الوند رود اصلی منطقه است (شکل ۱-الف). این رودخانه از نواحی مرتفع شرق و شمال شرقی سرچشمه می‌گیرد و پس از زهکشی دشت‌ها در محل شهرستان سرپل ذهاب شاخه‌های آن به هم پیوسته و از سمت غرب منطقه خارج شده و به سمت قصرشیرین جریان می‌یابد. موقعیت منابع آبهای سطحی و زیرزمینی (کارستی و آبرفتی) نمونه‌برداری شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

۴- نتایج و بحث

نتایج آنالیز ترکیب ایزوتوپی ($\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$) نمونه‌های آب باران و مقادیر پارامترهای هواشناسی (بارندگی، دما) اندازه‌گیری شده همزمان در هر یک از سه ایستگاه هواشناسی کردند، سرپل ذهاب و قصر شیرین در جدول ۲ و مقادیر ترکیب ایزوتوپی منابع آب زیرزمینی (آبرفتی و کارستی) در جدول ۳ ارائه شده است.

۳- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به منظور تعیین منشأ آب‌ها و عوامل اصلی اثرگذار روی ترکیب ایزوتوپی آن و همچنین برآورد ارتفاع محل تغذیه چشمه‌ها، اقدام به اندازه‌گیری محتوای ایزوتوپی آب باران و آب زیرزمینی و تغییرات آن‌ها در طول دوره مطالعاتی یک ساله (۱۳۹۳-۱۳۹۴) شده است.

نمونه‌برداری از آب باران به صورت ماهیانه در ماه‌های بهمن و اسفند سال ۱۳۹۳ و فروردین، اردیبهشت، آبان و آذرماه سال ۱۳۹۴ صورت

Table 2- Monthly precipitation and temperature with isotopic values in rain samples

جدول ۲- مقادیر ماهیانه بارش و دما و مقادیر ایزوتوپی (‰) نمونه‌های آب باران

Date of sampling	Saroplezahab (545 masl)					Qasreshirin (356 masl)					Kerend (1380 masl)				
	Rain mm	T °C	δ ¹⁸ O ‰	δ ² H ‰	d ‰	Rain mm	T °C	δ ¹⁸ O ‰	δ ² H ‰	d ‰	Rain mm	T °C	δ ¹⁸ O ‰	δ ² H ‰	d ‰
Bahman93	17.7	10.4	0.02	6.9	6.7	13.6	13.3	-2.4	-0.8	18.6	27.3	6.8	-3.5	-6.2	21.7
Esfand93	53.8	12.0	-2.4	-5.2	14.3	43.1	14.0	-6.1	-26.4	22.2	68.5	6.6	-9.2	-48.2	25.7
Farvardin94	27.1	16.5	-2.7	-5.7	16.0	15	18.7	0.00	10.4	10.4	67.0	10.6	-2.7	-0.9	21.0
Ordibehesht	3.7	23.4	-5.3	-22.4	20.3	3.4	25.7	4.3	46.6	12.2	7.6	16.7	-1.0	7.6	15.6
Aban94	255.6	15.3	-4.7	-20.7	16.9	204.8	17.6	-2.7	-17.3	4.1	347.2	10.7	-6.5	-34.4	17.7
Azar94	51.7	10.0	-4.4	-16.2	18.6	40.5	12.6	-2.4	-5.9	13.7	79.5	5.0	-9.2	-43.2	30.6
Total	409.6					320.4					597.1				

Table 3- Isotopic composition of surface and groundwater samples in the study area (all data in ‰)

جدول ۳- ترکیب ایزوتوپی نمونه‌های آب سطحی و زیرزمینی در محدوده مطالعاتی پل‌ذهاب (کلیه داده‌ها بر حسب ‰)

Name	January 2015			October 2015			Arithmetic Mean		
	δ ¹⁸ O ‰	δ ² H ‰	d ‰	δ ¹⁸ O ‰	δ ² H ‰	d ‰	δ ¹⁸ O ‰	δ ² H ‰	d ‰
Qarebolagh	-6.3	-32.0	18.3	-6.2	-32.2	17.1	-6.2	-32.1	17.7
Seydsadegh	-6.2	-32.0	17.9						
Sarabgarm	-6.0	-31.4	16.5	-6.0	-31.2	16.5	-6.0	-31.3	16.5
Qaleshahin	-6.6	-35.3	17.6	-6.6	-35.0	17.6	-6.6	-35.1	17.6
Kasere	-5.9	-31.1	15.7						
Jalalvand	-5.4	-28.9	14.2	-6.1	-30.5	18.6	-5.8	-29.7	16.4
Pirqeyb	-5.8	-31.0	15.8	-4.7	-27.4	10.0	-5.3	-29.2	12.9
Gandab	-6.3	-34.4	15.8	-6.3	-34.5	16.2	-6.3	-34.5	16.0
Rijab	-6.8	-36.2	18.3	-6.8	-36.7	17.5	-6.8	-36.4	17.9
Chenarpiran	-6.7	-35.9	17.6						
Gelodare	-6.2	-33.8	15.6						
Marab	-6.3	-36.2	14.4	-7.1	-37.0	20.1	-6.7	-34.1	17.2
Alvand Riv	-6.3	-34.3	15.8						
Alvand	-6.2	-34.6	15.0	-6.8	-33.5	21.2	-6.5		18.1
Alvand	-6.2	-34.0	15.9						
Taprash W	-5.7	-30.9	14.8						
Panjsotoon				-5.6	-30.4	14.7			

است. در نواحی نیمه‌خشک مانند محدوده مطالعاتی پل‌ذهاب، که تبخیر به میزان قابل توجهی رخ می‌دهد، آب‌های دارای منشأ جوی می‌توانند ترکیب ایزوتوپی کاملاً غیرعادی داشته باشند.

تغییرات دوتریوم مازاد محاسبه شده ($d_{\text{excess}} = \delta^2\text{H} - 8 * \delta^{18}\text{O}$) در سه ایستگاه هواشناسی سرپل‌ذهاب، قصر شیرین و کرد، بین ۸/۷‰ و ۲۰/۹‰ متغیر بوده و اکثریت مقادیر بالای ۱۰‰ می‌باشد (جدول ۲ و شکل ۳). که می‌تواند ناشی از تأثیر رطوبت بازیابی شده از توده آب‌های سطحی بزرگی مانند دریای خزر در شمال و خلیج فارس و دریای عمان در جنوب منطقه، و اختلاط آن با بخار آب اتمسفر با منشأ مدیترانه‌ای باشد. تأثیر اختلاط رطوبت بازیابی شده از این توده‌های آب سطحی بزرگ با بخار آب اتمسفری که منتج به مقادیر بالای دوتریوم مازاد باران‌های نواحی شرقی دریای مدیترانه، دریای خزر، دریای آرال و نیز در اطراف دریاچه‌های بزرگ می‌گردد، قبلاً گزارش شده است (Cui and Li, 2015).

۱-۴- محتوای ایزوتوپی باران

محدوده تغییرات میانگین مقادیر δ¹⁸O بین ۲/۹‰- و ۶/۶‰- و برای δ²H بین ۱۴/۴‰- و ۳۱/۶‰- می‌باشد. گستره مقادیر میانگین دوتریوم مازاد بین ۸/۸‰ و ۲۰/۹‰ می‌باشد (جدول ۲). موقعیت داده‌های ایزوتوپی بر روی نمودار پراکنش δ²H در مقابل δ¹⁸O (شکل ۲)، نشان می‌دهد که بیشتر نمونه‌های باران بین خط آب جوی جهانی ($\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10\text{‰}$; Craig, 1961) و خط آب جوی شرق مدیترانه ($\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 22\text{‰}$; Gat and Carmi, 1970) و نزدیک‌تر به خط آب جوی مدیترانه قرار می‌گیرند، که تأثیر بیشتر آب‌وهوای شرق مدیترانه را در نمونه‌های باران نشان می‌دهد.

داده‌های موجود یک خط آب جوی محلی ($\delta^2\text{H} = \text{LMWL} - 6.6 * \delta^{18}\text{O} + 12.1$)، را توصیف می‌کند که شیب آن اندکی کمتر از خط آب جوی جهانی است. زیرا حرکت توده ابر به سمت محل بارش، بارانی را به وجود می‌آورد که در بخش‌های پایینی ابر دچار تبخیر شده

است، بعبارت دیگر نمونه‌های باران ایستگاه سرپل‌ذهاب روند معکوسی نشان می‌دهد (شکل ۳). به طوری که نمونه‌های باران ماه‌های بهمن، اسفند و فروردین غنی‌شده‌تر بوده و در سمت فوقانی خط آب جوی قرار می‌گیرند. در حالی که باران اردیبهشت ماه تهی‌شده‌ترین نمونه در میان سایر نمونه‌ها است. با توجه به مقادیر بارش ماهیانه ملاحظه می‌شود که میانگین مقدار باران در ماه اسفند برابر ۵۳/۸ میلی‌متر است که نسبت به مقدار میانگین بارش بهمن ماه (۱۷/۷ میلی‌متر) افزایش نسبتاً زیادی داشته است. در اثر افزایش مقدار باران مقادیر ایزوتوپی باران در اسفند ماه نسبت به بهمن ماه تهی‌شده‌تر می‌باشد. در حالی که میانگین دمای هوا در بهمن ماه ۱۰/۴ درجه سانتیگراد و در اسفند ماه ۱۲ درجه سانتیگراد بوده است. به این ترتیب علی‌رغم افزایش دما در اسفند ماه، افزایش مقدار باران پدیده غالب بوده و به جای غنی‌شدگی ایزوتوپی شاهد مقادیر ایزوتوپی تهی‌شده‌تر در اسفند ماه ۹۳ هستیم. مقادیر ایزوتوپی ماه‌های آبان و آذر سال ۹۴ نسبت به نمونه‌های باران بهمن و اسفند ماه ۹۳ و نیز فروردین ماه ۹۴ مقادیر به‌نسبت تهی‌شده‌تری را نشان می‌دهد. افزایش چشمگیر مقدار باران در آبان و آذر ماه سال ۱۳۹۴ (به ترتیب ۲۵۵/۶ و ۵۱/۷ میلی‌متر) و کاهش دمای هوا عوامل اصلی این تهی‌شدگی می‌باشند. اثر افزایش مقدار باران در ایجاد باران‌های سبک (از نظر ایزوتوپی) به شدت مشهود است. به طوری که در آبان ماه ۹۴ بارش به مقدار ۲۵۵/۶ میلی‌متر است، در حالی که میانگین دمای هوا در این ماه ۱۵/۳ درجه سانتیگراد می‌باشد. بنابراین تهی‌شدگی ایزوتوپی در مقادیر باران این ماه تأثیر مستقیم افزایش مقدار باران می‌باشد. در آذر ماه ۹۴ مقدار بارش ۵۱/۷ میلی‌متر بوده اما میانگین درجه حرارت ماهیانه در این ماه به ۱۰/۰ درجه سانتیگراد کاهش یافته است. بنابراین در این مورد می‌توان کاهش مقادیر ایزوتوپ سنگین را بیشتر به کاهش دما و در نتیجه کاهش تبخیر نسبت داد. تنها مورد سؤال در این ماه بارش مربوط به اردیبهشت ماه است که تهی‌شده‌ترین مقادیر را در بین سایر نمونه‌ها نشان می‌دهد. این در حالی است که بارش میانگین این ماه کمترین مقدار (۳/۷ میلی‌متر) را داشته و میانگین دمای هوا بیشترین مقدار (۲۳/۴ درجه سانتیگراد) بوده است. با توجه به مقدار اندک بارش این ماه و دمای بالا عاملی که موجب تهی‌شدگی ایزوتوپی در نمونه بارش اردیبهشت ماه می‌باشد که احتمالاً خطای اندازه‌گیری بوده است.

۴-۲- ترکیب ایزوتوپی منابع آب زیرزمینی آبرفتی و کارستی

مقادیر میانگین ترکیب ایزوتوپی منابع آب زیرزمینی (آبرفتی و کارستی) در طول دوره مطالعاتی برای $\delta^{18}\text{O}$ در گستره بین $-۵/۳\%$ و $-۶/۸\%$ و برای $\delta^2\text{H}$ در محدوده بین $-۲۹/۲\%$ و $-۳۶/۶\%$ قرار می‌گیرد (جدول ۳).

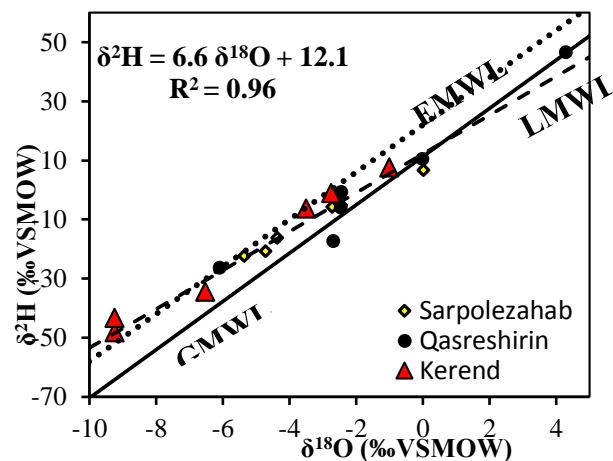


Fig. 2- Plotted rain water samples on $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ diagram and local meteoric water line
شکل ۲- موقعیت نمونه‌های آب باران بر روی نمودار پراکنش $\delta^2\text{H}$ در مقابل $\delta^{18}\text{O}$ و خط آب جوی محلی

با توجه به داده‌های جدول ۲، به‌طور کلی نمونه‌های باران جمع‌آوری شده در قسمت‌های جنوب‌شرقی و مرکزی محدوده مورد مطالعه (به ترتیب ایستگاه کَرند و سرپل‌ذهاب)، غالباً در مقایسه با نمونه‌های بخش غربی (قصرشیرین)، از نظر ایزوتوپی تهی‌شده‌ترند و مقادیر میانگین دوتریوم مازاد سالیانه بارش از سمت جنوب‌شرقی (کَرند- با مقدار $۲۰/۹\%$) به سمت غرب محدوده مطالعاتی (قصرشیرین- با مقدار $۸/۷\%$) کاهش می‌یابد. مقادیر میانگین دوتریوم مازاد سالیانه بارش ایستگاه سرپل‌ذهاب ($۱۶/۳\%$) حدواسط دو ایستگاه دیگر است (شکل ۳). هردوی این پدیده‌ها به سبب وجود باران‌های بیشتری است که در نواحی جنوب‌شرقی با ارتفاع بیشتر و میانگین درجه حرارت سالیانه کمتر ($۱۲/۵$ درجه سانتیگراد)، نسبت به نواحی پست غربی (میانگین درجه حرارت سالیانه $۱۷/۵$ درجه سانتیگراد) محدوده مطالعاتی مشاهده می‌شود.

در مناطق آب‌وهوایی معتدله تغییرات ایزوتوپی پایدار آب‌های جوی توسط نوسانات فصلی دمای هوا "اثر دما"^{۱۴} به خوبی تشریح شده است (Murillo et al., 2016). ترکیب ایزوتوپی نمونه‌های باران جمع‌آوری شده انطباق خوبی با روند تغییرات دمای هوای سطحی در ایستگاه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد (شکل ۳). ترکیب ایزوتوپی غنی‌شده‌تر باران در فصل گرم (بارش‌های فروردین و اردیبهشت) و تهی‌شده‌تر در فصل سرد (بارش‌های پائیز و زمستان) نشان‌دهنده این است که اثر دما کنترل‌کننده مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$ در باران‌های منطقه می‌باشد.

در ایستگاه سرپل‌ذهاب با افزایش دما مقدار دوتریوم کاهش یافته

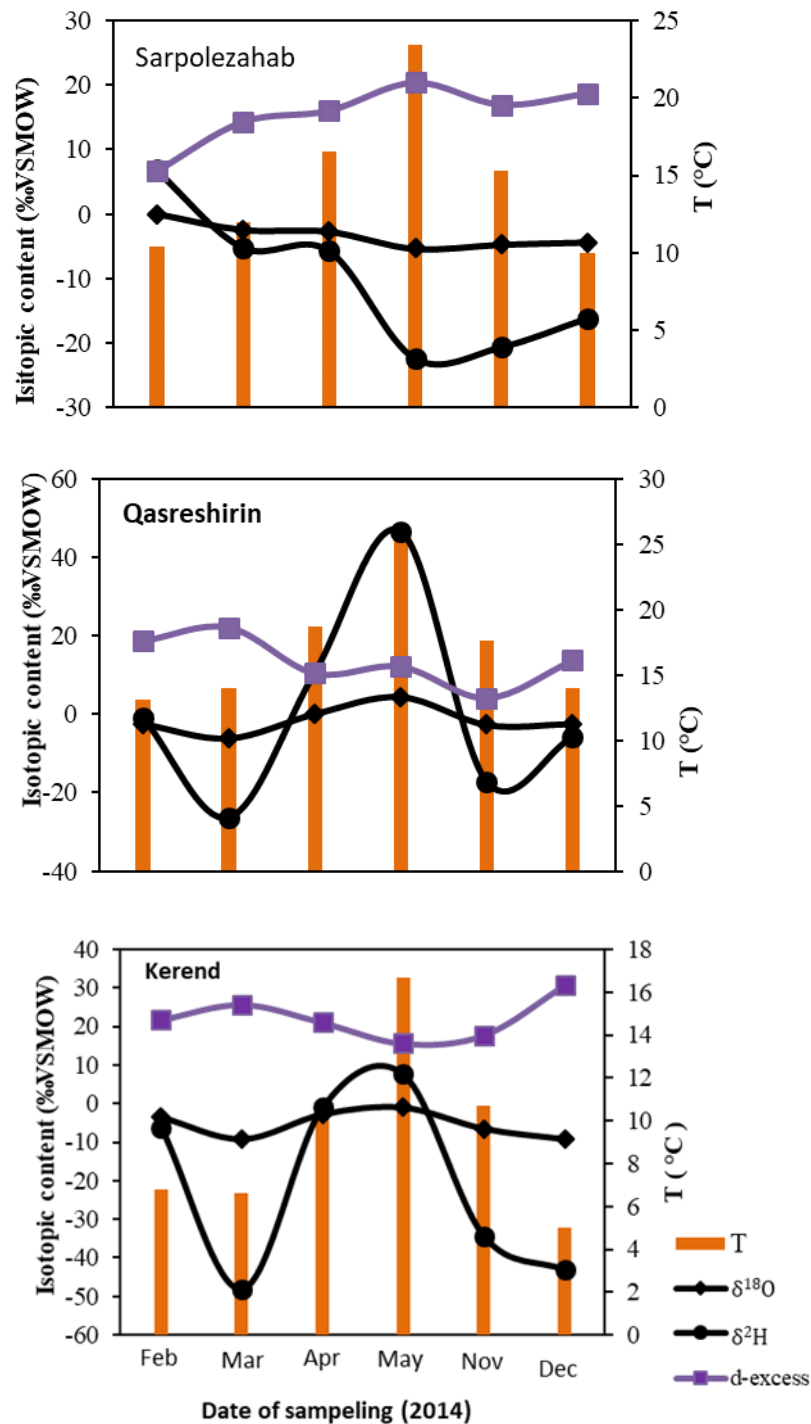


Fig. 3- Comparison between variations of isotopic composition with monthly mean temperature in synoptic stations

شکل ۳- مقایسه تغییرات ترکیب ایزوتوپی ($\delta^{18}\text{O}$ ، $\delta^2\text{H}$ و dex) آب باران با میانگین درجه حرارت ماهیانه در ایستگاه‌های سینوپتیک

تغذیه آبخوان‌های کارستی و آبرفتی محدوده مطالعاتی پل‌ذهاب مشخص می‌کند.

ترکیب ایزوتوپی منابع آب زیرزمینی نسبت به نمونه‌های آب باران، تهی‌شده‌تر و دامنه تغییرات کمتری دارند. این مطلب اهمیت بارش‌های زمستانی که مقدار بیشتر و ترکیب ایزوتوپی تهی‌شده‌تری دارند را در

همه نمونه‌های کارستی در این منطقه از چشمه‌های موجود در سازند آسماری بوده است (به جز چشمه گلدره که از سازند ایلام تخلیه می‌شود). از آنجا که سازند آسماری در این منطقه از سنگ آهک توده‌ای با درز و شکستگی فراوان تشکیل شده است و دبی چشمه‌ها در این منطقه از آبدی نسبتاً خوبی برخوردار است نشان‌دهنده توسعه نسبی کارست در این سازند می‌باشد. اما با توجه به شکل کلی هیدروگراف چشمه‌ها که فاقد قله و پیک‌های تند و ناگهانی است نشان می‌دهد که احتمال قوی سیستم اصلی کارست دیفوز است که به طور بخشی در برخی نواحی دارای کانال‌ها و سیستم جریان مجرای است مانند سراب ماراب. ضمناً آب این چشمه‌ها در فصل تر به هیچ عنوان گل‌آلود نشده و در عین آبدی بالا کاملاً زلال می‌باشد که دلیل دیگری بر این است که سیستم اصلی کارست در منطقه افشان می‌باشد.

جابجایی ترکیب ایزوتوپی $\delta^{18}\text{O}$ نسبت به خط آب جوی در رابطه با واکنش آب و سنگ را می‌توان به این جهت دانست که مقدار اکسیژن سنگ بیشتر از ۴۰ درصد بوده در حالی که مقدار هیدروژن خیلی ناچیز (کمتر از یک درصد) است (Skelton et al., 2014). از طرفی دانشمندان مقدار $\delta^{18}\text{O}$ کربنات‌های دریایی را در فاصله زمانی الیگو-میوسن در حدود ۱/۵‰ تا ۳/۵‰ تعیین نموده‌اند (Sharp, 2007). بنابراین با توجه به مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ در سنگ‌های آهکی سازند آسماری با سن الیگو-میوسن، که تشکیل‌دهنده آبخوان‌های کارستی منطقه است، واکنش آب و سنگ فقط جابجایی $\delta^{18}\text{O}$ را به سمت مقادیر غنی‌شده‌تر نسبت به خط آب جوی توضیح می‌دهد.

منابع آبی در دو گروه آبرفتی و کارستی بر روی نمودار پراکنش $\delta^2\text{H}$ در مقابل $\delta^{18}\text{O}$ (شکل ۴)، اکثراً در فاصله بین خط آب جوی جهانی و خط آب جوی شرق مدیترانه واقع می‌شوند، که نشان‌دهنده تغذیه از باران‌های ناشی از توده‌های جوی باران‌زا است که، دارای منشأ مدیترانه‌ای و اقیانوسی می‌باشند. نمونه‌های آب زیرزمینی مربوط به چشمه‌های آبرفتی و چاه‌های (واقع در دشت بشیوه در شرق محدوده مطالعاتی که در آبرفت حفر شده‌اند) از لحاظ مقادیر $\delta^2\text{H}$ و $\delta^{18}\text{O}$ ، غنی‌شده‌ترین نمونه‌ها بوده و در قسمت فوقانی و سمت راست نمودار قرار می‌گیرند. در حالی که نمونه‌های آب چشمه‌های کارستی، پایین و سمت چپ نمودار قرار گرفته (شکل ۴) و مقادیر ایزوتوپی تهی‌شده‌تری را نسبت به آب‌های آبرفتی نشان می‌دهند. خطوط برازش داده شده به داده‌های ایزوتوپی نمونه‌های آب زیرزمینی آبرفتی (AGWL) و کارستی (KGWL)، دارای شیب‌های متفاوتی بر روی نمودار می‌باشند. خط ایزوتوپی آب زیرزمینی کارستی (KGWL)، دارای شیب مشابه با شیب خط آب جوی محلی است که نشان می‌دهد این آب‌ها کمتر در معرض تبخیر و سایر عوامل محیطی قرار داشته‌اند. برخلاف آن، خط ایزوتوپی آب زیرزمینی آبرفتی (AGWL)، انحراف زیادی از خط آب جوی محلی نشان می‌دهد. شیب کمتر خط آب زیرزمینی آبرفتی نسبت به شیب خطوط آب جوی محلی (LMWL) و جهانی (GMWL)، نشان‌دهنده تأثیر زیاد عواملی مانند تبخیر بر آب‌های زیرزمینی آبرفتی می‌باشد.

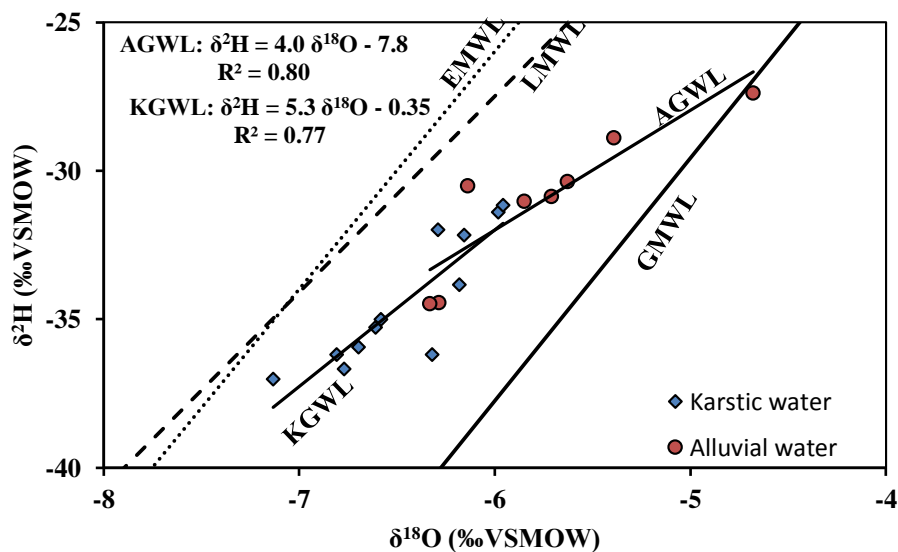


Fig. 4- Plotted groundwater samples of the two alluvial and karstic groups on $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ diagram and their isotopic lines

شکل ۴- موقعیت نمونه‌های آب زیرزمینی دو گروه آبرفتی و کارستی بر روی نمودار پراکنش $\delta^2\text{H}$ در مقابل $\delta^{18}\text{O}$ و خطوط ایزوتوپی آنها

غنی‌شده‌ترین ترکیب ایزوتوپی می‌باشد. دوتریوم مازاد چشمه‌های کارستی نواحی جنوب شرقی به سبب مقادیر تهی‌شده‌تر ترکیب ایزوتوپی مقادیر بیشتری نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه داده‌های ایزوتوپی آب‌های کارستی منطقه نسبتاً از خط آب جوی محلی فاصله دارند این احتمال وجود دارد که این آب‌ها از اعماق زیاد و فواصل دور به آبخوان‌های کارستی وارد می‌شوند.

۴-۲-۱- تغییرات مکانی ترکیب ایزوتوپی آب‌های آبرفتی و کارستی

مقادیر ایزوتوپی مربوط به نمونه‌های آب چاه‌ها و چشمه‌های آبرفتی که با علائم توخالی در شکل ۵ مشخص شده‌اند، ترکیب ایزوتوپی غنی‌شده‌تری نسبت به نمونه‌های آب چشمه‌های کارستی نشان می‌دهند. یکی از دلایل مربوط به این غنی‌شدگی تبخیر از سطح ایستابی (عمق سطح ایستابی در یک پیژومتر در آبرفت به ۲/۵ متر نیز می‌رسد) و یا آب‌های جاری قبل از نفوذ به آبخوان می‌باشد. چشمه‌های آبرفتی به علت قرارگیری در آبرفت در معرض تبخیر شدیدتری بوده و به همین جهت دارای ترکیب ایزوتوپی غنی‌شده‌تری هستند. مقدار ترکیب ایزوتوپی آب چشمه گنداب در محدوده مقادیر ایزوتوپی مربوط به نمونه‌های آب کارستی و بسیار نزدیک به ترکیب ایزوتوپی چشمه گلودره قرار دارد.

پارامتر دوتریوم مازاد (d) با غنی‌تر شدن ترکیب ایزوتوپی کاهش و با تهی‌تر شدن ترکیب ایزوتوپی افزایش می‌یابد. در محدوده مطالعاتی پل‌ذهاب، دامنه تغییرات مقادیر میانگین دوتریوم مازاد بین ۱۲/۹% تا ۱۷/۹% بوده و به تبعیت از آب باران از نواحی پرباران جنوب شرقی (ماراب، ریجاب و قلعه شاهین) به سمت نواحی کم‌باران غربی (سرابگرم، قره‌بلاغ) کاهش نشان می‌دهد. پارامتر دوتریوم مازاد چشمه‌های آبرفتی به سبب داشتن ترکیب ایزوتوپی غنی‌شده‌تر نسبت به چشمه‌های کارستی دارای مقادیر کمتری است (جدول جدول ۳). دوتریوم مازاد چشمه‌های گنداب و گلودره (به ترتیب ۱۵/۸% و ۱۵/۶% در دی‌ماه ۹۳)، بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و مقدار بیشتر مربوط به چشمه گنداب به علت غنی‌شدگی ایزوتوپی اندک نسبت به گلودره می‌باشد. در میان چشمه‌های کارستی کمترین مقدار دوتریوم مازاد مربوط به سرابگرم (چشمه کارستی با آبدی بالا در نواحی کم ارتفاع شمال غربی منطقه واقع و نسبت به سایر چشمه‌های کارستی دارای کمترین ارتفاع حدود ۵۷۱ متر می‌باشد) است که دارای

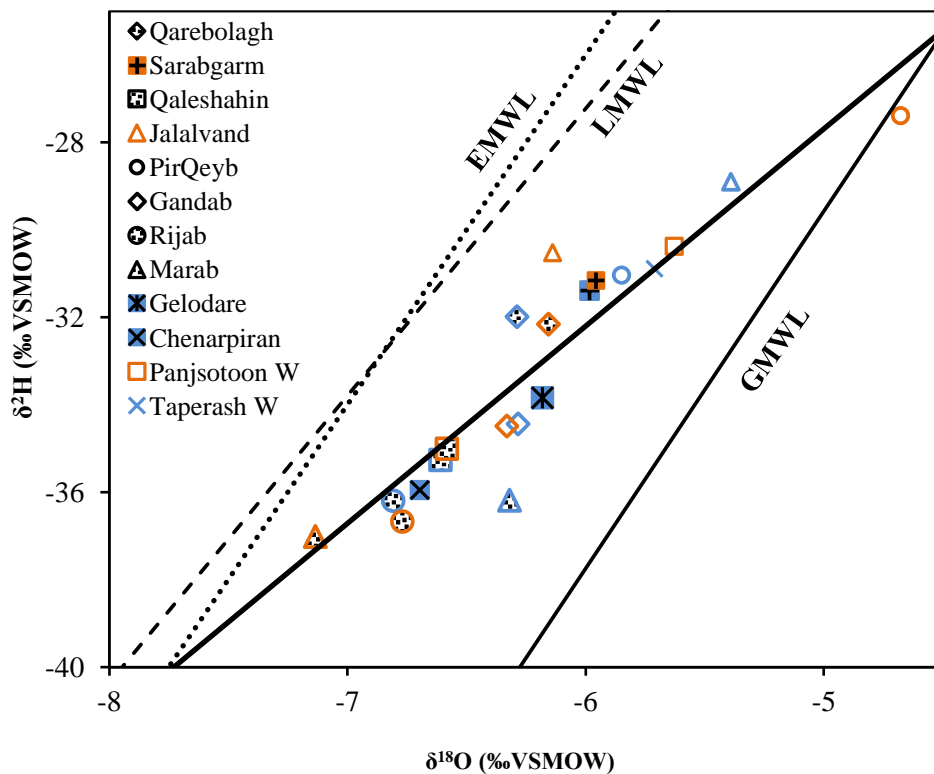


Fig. 5- All alluvial and karstic groundwater samples plotted on $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ diagram
 شکل ۵- موقعیت همه نمونه‌های آب زیرزمینی آبرفتی و کارستی بر روی نمودار پراکنش $\delta^2\text{H}$ در مقابل $\delta^{18}\text{O}$

این تأییدی بر مطالعات انجام شده قبلی است که منشأ چشمه گلدره را سازند آهکی با پتانسیل کارستی شدن ایلام دانسته است (Karimi and Ashjari, 2010). چشمه گلدره از سنگ آهک ایلام، واقع در دشت بشیوه خارج می‌شود. دایمی و از نوع درز و شکافی بوده و متوسط دبی آن در سال آبی ۹۲-۹۱، ۱۵۳ لیتر در ثانیه گزارش شده است. سازند آهکی ایلام در منطقه رخنمون اندکی دارد و تنها در هسته فرسایش یافته تاقدیس پاتاق به صورت تپه‌هایی در مرکز دشت بشیوه پروتوزاد دارد. مساحت سنگ آهک ایلام در این ناحیه ۵/۶ کیلومتر مربع است که سطح آبگیر چشمه گلدره را تشکیل می‌دهد.

چشمه‌های کارستی در مقایسه با آب‌های آبرفتی ترکیب ایزوتوپی تهی‌شده تری داشته و بر روی نمودار پراکنش $\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$ توزیع چند منشأی نشان می‌دهند (شکل ۵). در این شکل علائم توپر نشان‌دهنده آب‌های کارستی و علائم توخالی نشان‌گر آب‌های آبرفتی هستند؛ رنگ آبی مربوط به نمونه‌های فصل تر (دی‌ماه ۹۳) و رنگ نارنجی مربوط به نمونه‌های فصل خشک (مهرماه ۹۴) می‌باشد. به‌طوری‌که مشاهده می‌شود چشمه‌های ماراب، ریجاب، قلعه‌شاهین و چنارپیران ترکیب ایزوتوپی نزدیک به یکدیگر داشته و تهی‌شده‌ترین مقادیر را در میان نمونه‌ها نشان می‌دهند. بنابراین باید دارای منشأهای یکسان و یا مشابهی باشند. مقادیر ایزوتوپی این چشمه‌ها را می‌توان به عنوان نتیجه‌ای از توزیع مکانی بارش (مقدار بارش و یا اثر جرم) تفسیر نمود که خود تحت تأثیر عامل ارتفاع می‌باشد. ترکیب ایزوتوپی تهی‌شده‌تر آب این چشمه‌ها، ارتفاع بیشتر ناحیه تغذیه را منعکس می‌سازد. در محدوده مطالعاتی پل‌ذهاب، نواحی جنوب‌شرقی نواحی مرتفع و پرباران بوده و در نتیجه اثر ارتفاع به همراه اثر مقدار باران موجب ایجاد ترکیب ایزوتوپی سبک‌تر آب باران و به تبع آن آب‌های زیرزمینی در این نواحی می‌شود. چشمه‌های کارستی قره‌بلاغ و سراپگرم در بخش‌های شمال غرب و غرب محدوده قرار دارند. باوجود این که این دو چشمه از یال‌های دو تاقدیس مختلف (چشمه قره‌بلاغ از یال جنوب‌غربی تاقدیس پاتاق و سراپگرم از انتهای یال شمال‌شرقی تاقدیس دانه‌خشک) خارج می‌شوند، از نظر ترکیب ایزوتوپی مقادیر نزدیکی به یکدیگر داشته و غنی‌شده‌ترین مقادیر را در میان نمونه‌های آب کارستی در محدوده نشان می‌دهند. بنابراین بایستی ناحیه تغذیه آن‌ها دارای ویژگی‌های مشابه باشد. در محدوده مطالعاتی پل‌ذهاب به سمت نواحی پست غربی از شدت بارش‌ها کاسته می‌شود. در نتیجه بارش و به تبع آن آب‌های خروجی از چشمه‌ها ترکیب ایزوتوپی غنی‌شده‌تری نشان می‌دهند. بنابراین با وجود این که سراب قلعه‌شاهین و سراپگرم هر دو از یک تاقدیس (دانه‌خشک) تخلیه می‌شوند؛ اما آب سراب قلعه‌شاهین ترکیب ایزوتوپی تهی‌شده‌تری نسبت به سراپگرم دارد. نتایج عملیات ژئوفیزیک انجام شده توسط مهندسین مشاور تهران‌یادیر در سال

۱۳۷۵، وجود یک مجرای گذر آب را در اعماق زیاد در حوالی سراپگرم معلوم کرده است. ظاهراً این گذرگاه دارای ابعادی در حدود ۷۵ تا ۱۰۰ متر بوده و در عمق زیادتر وسعت آن افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از این مطالعات سرچشمه این سراب را در ارتباط با دره‌ای عمیق در جنوب سراپگرم در تاقدیس دانه‌خشک تعیین نموده و گویای آن است که سرچشمه ظهور سراب در این ناحیه از همین دره می‌باشد (Raiesi, 2004). بنابراین آب‌های خروجی از سراپگرم دارای منشأی در اعماق زمین بوده و همین عامل سبب ایجاد دمای بالای آب و غنی‌شده‌ترین ترکیب ایزوتوپی نمونه‌های آب سراپگرم می‌باشد.

۴-۲-۲- بررسی زمان ماندگاری آب‌های زیرزمینی (آبرفتی و کارستی) با توجه به تغییرات زمانی ترکیب ایزوتوپی

همان‌طور که قبلاً بیان شد، نمونه‌های آب باران در محدوده مطالعاتی پل‌ذهاب دارای تغییرات و نوسانات فصلی هستند؛ به‌طوری‌که بارش‌های فروردین و اردیبهشت ماه (بارش‌های بهاری) دارای ترکیب ایزوتوپی غنی‌شده‌تر از بارش‌های بهمن و اسفند (بارش‌های زمستانی) بوده و بارش‌های آبان و آذر ماه (بارش‌های پاییزی) تهی‌شده‌ترین بارش‌ها می‌باشند. با توجه به تهی‌شده‌تر بودن مقادیر ایزوتوپی نمونه‌های آب زیرزمینی نسبت به نمونه‌های باران، نقش بارش‌های زمستانی در تغذیه آبخوان‌ها آشکار می‌گردد. ترکیب ایزوتوپی آب‌های زیرزمینی آبرفتی نسبت به کارستی دامنه نوسانات فصلی بیشتری دارد. به عبارت دیگر ترکیب ایزوتوپی نمونه‌های آب زیرزمینی کارستی تغییرات فصلی بسیار اندکی را نشان می‌دهد (شکل ۵). این تأثیرات فصلی ارائه‌دهنده اطلاعات مهمی راجع به زمان ماندگاری آب و خصوصیات ساختمانی آبخوان‌های کارستی و نیز سن نسبی آب است. چشمه‌های آبرفتی پیرغیب و جلاوند دارای بیشترین تغییرات فصلی در ترکیب ایزوتوپی اکسیژن ۱۸ و دوتریوم می‌باشند. در اکثر چشمه‌های کارستی ترکیب ایزوتوپی نمونه‌های برداشت شده در دی ماه ۹۳ با نمونه‌های برداشت شده در مهرماه ۹۴ تقریباً یکسان است. به طوری که کمترین تغییرات فصلی ترکیب ایزوتوپی در بزرگترین چشمه‌های کارستی منطقه از جمله سراپگرم، سراب قلعه‌شاهین، چشمه ریجاب و سراب قره‌بلاغ دیده می‌شود. به همین سبب آب این چشمه‌ها دارای بیشترین زماندگاری در سازند بوده و در نتیجه سن نسبی آب چشمه بیشتر است. در مورد چشمه گنداب نیز این مطلب صدق می‌کند. بدین معنا که گستره تغییرات فصلی در ترکیب ایزوتوپی آب این چشمه برخلاف چشمه‌های آبرفتی پیرغیب و جلاوند بسیار اندک بوده و همانند چشمه‌های کارستی منطقه می‌باشد. این خود دلیل دیگری بر تأیید منشأ چشمه گنداب از سازند کارستی ایلام است.

ترکیب ایزوتوپی آب چشمه کارستی ماراب دارای تغییرات زیاد فصلی بوده و همچنین ترکیب ایزوتوپی آن در فصل خشک نسبت به فصل تر تهی شده‌تر است. به جهت این که در فاصله زمانی اردیبهشت ۹۴ تا مهرماه ۹۴ بارانی در منطقه نیاریده است، لذا این چشمه‌ها مستقیماً از آخرین بارش‌های جوی منطقه یعنی اردیبهشت ماه ۹۴ (که دارای تهی‌ترین مقادیر ترکیب ایزوتوپی می‌باشد) تغذیه می‌شوند. این نتیجه‌گیری با یکسان بودن مقدار دوتریوم مازاد در نمونه آب مهرماه ۹۴ سراب ماراب با مقدار این پارامتر در بارش اردیبهشت ماه ۹۴ مورد تأیید است. به طور کلی، آب‌های زیرزمینی عمیق که سرعت حرکت کندی در محیط متخلخل دارند، نوسانات ایزوتوپی فصلی خود را از دست می‌دهند (Hoefs, 2004). برعکس آب‌های کارستی کم‌عمق تغییرات ایزوتوپی بیشتری در طی فصول مختلف نشان می‌دهند. با توجه به تغییرات فصلی زیاد در ترکیب ایزوتوپی آب چشمه ماراب، می‌توان نتیجه گرفت که در حوالی سراب ماراب به علت ارتفاع زیاد و مقادیر بارش بیشتر و همچنین کاهش میانگین دمای هوا و در نتیجه افزایش انحلال مقدار CO₂ در آب‌های فرورو و در نتیجه انحلال بیشتر سنگ آهک، کارست توسعه یافته و کانال‌ها و مجاری بزرگ عبور آب در سازند آسماری ایجاد شده است. از این رو، آب‌های تغذیه شونده فرصت کافی برای ماندن در سازند و برقراری تعادل با آب موجود در آبخوان کارستی را نداشته و از طریق سیستم جریان کانالی به جای افشان از چشمه تخلیه می‌شوند (Karimi et al., 2004; Ashjari and Raeisi, 2006). بنابراین پیرامون سراب ماراب، توسعه مجاری کارستی بیشتر و سرعت حرکت آب بیشتر و در نتیجه زمان ماندگاری و سن نسبی آب کمتر می‌باشد. بنابراین آب‌های خروجی از سراب ماراب دارای سن نسبی آب کمتر و زمان ماندگاری اندکی در سازند بوده و در نتیجه ترکیب ایزوتوپی آب نمونه مهرماه آن نماینده تغذیه از آخرین بارش‌های جوی یعنی اردیبهشت ماه ۹۴ می‌باشد.

فرض دیگر در مورد چشمه ماراب برای توجیه نوسانات فصلی معکوس ترکیب ایزوتوپی آب، می‌تواند تغذیه از آب‌های بسیار قدیمی که در شرایط آب و هوایی سردتر در آبخوان ذخیره شده و دارای ترکیب ایزوتوپی تهی شده‌تر است (Karimi Vardanjani, 2010)، باشد. بدین صورت که در فاصله زمانی اردیبهشت تا مهرماه که بارانی در منطقه نیاریده است و آب چشمه از طریق جریان پایه تأمین می‌شود، دارای ترکیب ایزوتوپی تهی شده‌تری است. درحالی که در طی فصل تر که آبخوان از اختلاط بارش‌های پاییزی با ترکیب ایزوتوپی غنی شده‌تر (نسبت به آب‌های بسیار قدیمی)، با آب سازند تغذیه می‌شود و در نتیجه آب‌های خروجی از چشمه علامت ایزوتوپی غنی شده‌تری را در نمونه‌های دی ماه نسبت به نمونه‌های مهرماه نشان می‌دهند.

در مورد سایر چشمه‌های کارستی در این محدوده، عدم وجود تغییرات فصلی در ترکیب ایزوتوپی آب نشان می‌دهد که آب‌های ورودی به سیستم آب زیرزمینی فرصت کافی برای برقراری تعادل با آب‌های موجود در آبخوان کارستی را دارند. به عنوان یک شاهد تغییرات زمانی (فصلی) $\delta^{18}\text{O}$ چشمه‌ها در مقایسه با تغییرات فصلی $\delta^{18}\text{O}$ باران، خیلی اندک است. این نشان می‌دهد که تغذیه‌ای که در زمان‌های مختلف سال اتفاق می‌افتد به خوبی در زون اشباع و غیراشباع آبخوان با هم مخلوط شده و بیانگر این است که میانگین زمان ماندگاری آب فقط بیش از چند سال است (Ozyurt et al., 2014). از اینجا این نکته دریافت می‌شود که آب‌های ورودی مسیری طولانی از محل تغذیه تا محل خروج از چشمه را طی می‌نمایند. این نکته با توجه به برجستگی‌های بلند توپوگرافی تاقدیس‌های آهکی سازند آسماری قابل تأیید است. علاوه بر آن، حرکت آب از خلال سیستم درز و شکافی موجود در سنگ‌های آهکی سازند، این فرصت را فراهم می‌آورد تا آب‌های ورودی از لحاظ ترکیب ایزوتوپی با آب‌های موجود در آبخوان همگن گردد و بدین ترتیب اثرات فصلی نوسانات ایزوتوپی محو شود. با توجه به مطالب فوق می‌توان به وجود سیستم جریان افشان به جای مجاری در آبخوان‌های کربناته سازند آسماری و همچنین زمان ماندگاری نسبتاً طولانی آب در این سازند پی برد. شکل هیدروگراف ۲۰ ساله اکثر چشمه‌های کارستی مهم منطقه (سرابگرم، قلعه شاهین، قره‌بلاغ، چنارپیران و گلدره به ترتیب با دبی متوسط ۱۳۴۹، ۵۱۵، ۴۴۱، ۲۹۵ و ۱۷۶ لیتر بر ثانیه)، رسم شده براساس داده‌های شهریور ۱۳۹۲ شرکت آب منطقه‌ای استان کرمانشاه، نشان می‌دهد که در تمامی این چشمه‌ها (بجز چشمه ماراب)، هیدروگراف‌ها فاقد پیک‌های بلند و ناگهانی بوده و تقریباً حالت پایدار دارند که نشان‌دهنده جریان افشان در چشمه‌ها می‌باشد. هیدروگراف چشمه ماراب نشان از جریان‌های ناگهانی در زمان‌های پر آبی است و نشان‌دهنده کاندیوت بودن سیستم جریان می‌باشد.

۴-۳- بررسی تغییرات زمانی ترکیب ایزوتوپی آب‌های سطحی

ترکیب ایزوتوپی نمونه‌های آب سطحی که در دی‌ماه ۹۳ برداشته شده‌اند، منطبق بر نمونه‌های آب کارستی بوده و با ترکیب ایزوتوپی آب چشمه‌های گلدره و گنداب که از سازند ایلام تخلیه می‌شوند، بسیار مشابه است (شکل ۶). درحالی که نمونه مهرماه ۹۴ رودخانه الوند در محل شهرستان سرپل‌ذهاب بر روی خط آب جوی قرار گرفته است. با توجه به این که سازند آهکی ایلام به صورت تپه‌هایی در مرکز دشت بشیوه برون‌زد دارد، می‌توان چنین استنباط نمود که در فصل تر همزمان با بالا آمدن سطح آب زیرزمینی آب‌های کارستی تغذیه‌کننده اصلی آبرفت‌های دشت و در نتیجه جریان رودخانه می‌باشد. بدین معنا

ایزوتوپی سبکتر آب چشمه‌ها با ارتفاع زیاد نواحی تغذیه این چشمه‌ها متناسب است. در این نواحی مقدار بارش فراوان تر بوده و گاهی اوقات در طول زمستان به شکل برف می‌باشد. نواحی غربی حوضه آبگیر چشمه‌های قره‌بلاغ و سراپگرم را تشکیل می‌دهد که خروجی اصلی آب‌های کارستی در این نواحی می‌باشند. ترکیب ایزوتوپی غنی‌شده‌تر آب این چشمه‌ها با کاهش مقدار بارش در این نواحی مرتبط است.

به‌طور کلی ترکیب ایزوتوپی $\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$ آب‌های کارستی محدوده پل‌ذهاب تغییرات فصلی اندکی را دارد که نشان‌دهنده زمان کافی برای اختلاط با آب‌های آب‌های نفوذی با آب‌های بخش اشباع و زمان ماندگاری بالای آب در سازند می‌باشد. مقایسه ترکیب ایزوتوپی آب‌های سطحی با خط آب جوی محلی و نیز آب‌های کارستی نشان می‌دهد که در فصل تر بالآمدن سطح آب در سازند ایلام موجب تغذیه آبرفت‌های دشت بشیوه شده و تأمین‌کننده جریان رودخانه می‌باشد. درحالی‌که در فصل خشک جریان رودخانه از ذوب برف و بارش‌های نواحی مرتفع سرچشمه می‌گیرد. در نهایت می‌توان چنین استنباط نمود که توزیع مکانی و زمانی باران عامل اصلی در تغییر ترکیب ایزوتوپی آن و در نتیجه آب‌های زیرزمینی است. بنابراین داده‌های ایزوتوپی می‌توانند به عنوان ردیاب‌های زیست‌محیطی مناسبی در تحقیقات آب‌های زیرزمینی مربوط به آبخوان‌های کارستی نواحی کوهستانی به کار روند. در این محدوده مطالعاتی مسائل مربوط به کوه‌شناسی و مسائل هیدروژئولوژی با هم آمیخته شده و پیچیدگی موضوع را افزایش می‌دهد.

۶- تشکر و قدردانی

این تحقیق با استفاده از حمایت مالی شرکت آب منطقه‌ای کرمانشاه با کد CN:KSHW-92123 و کد ملی ۱۳۱۸۴۳-۷۵۹۷ انجام شده است، لذا بر خود لازم می‌دانیم از کمیته تحقیقات شرکت آب منطقه‌ای کرمانشاه کمال تشکر و قدردانی را داشته باشیم. از مساعدت کارشناسان محترم در سازمان جهاد دانشگاهی استان کرمانشاه، اداره هواشناسی استان کرمانشاه، معاون توسعه مدیریت و منابع انسانی جهاد کشاورزی و رئیس کانون جهادگران استان کرمانشاه و همچنین از زحمات بی‌شائبه آقای مهندس اسکندری و آقای مهندس الطافی پور و نیز آقای سهرابی و خانم اسکندری و همچنین آقایان کرمی و ملکی در طی انجام عملیات صحرایی کمال سپاسگزاری را داریم.

پی‌نوشت‌ها

1. Deuterium Excess
2. Residence Time
3. Lag Time

که جریان رودخانه از آبرفت و یا کارست تغذیه می‌شود. برخلاف آن در فصل خشک با پایین افتادن سطح آب در سازند ایلام، با توجه به اینکه رود الوند از ارتفاعات بلند سرچشمه می‌گیرد، می‌توان نتیجه گرفت که نزولات جوی (آب حاصل از ذوب برف و بارش‌های مناطق مرتفع و دور دست) جریان رودخانه را تأمین می‌نماید.

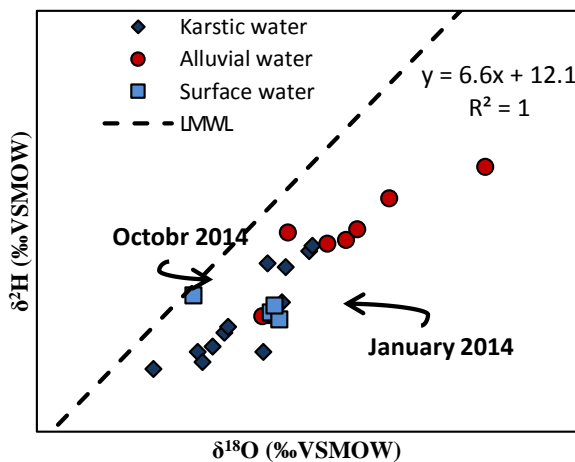


Fig. 6- Comparison of isotopic composition ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) of surface water with alluvial and karstic water

شکل ۶- مقایسه محتوای ایزوتوپی ($\delta^2\text{H}$ و $\delta^{18}\text{O}$) آب‌های سطحی با آب‌های آبرفتی، کارستی

۵- نتیجه‌گیری

در نمودار پراکنش $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ نمونه‌های باران‌های محدوده پل‌ذهاب در بالای خط آب جوی جهانی قرار می‌گیرند و مقادیر بالای دوتریوم مزاد (بیشتر از ۱۰٪) نشان‌دهنده تأثیر رطوبت بازیابی شده از توده آب‌های سطحی بزرگی مانند دریای خزر در شمال و خلیج فارس و دریای عمان در جنوب منطقه و اختلاط آن با بخار آب اتمسفر با منشأ مدیترانه‌ای باشد. داده‌های ایزوتوپی آب زیرزمینی در سمت راست خط آب جوی محلی بدست آمده ($\delta^2\text{H}=6.6*\delta^{18}\text{O}+12.1$) قرار می‌گیرند. علت غنی‌شدگی ترکیب ایزوتوپی اکسیژن ۱۸ در نمونه‌های آب زیرزمینی نسبت به خط آب جوی محلی را می‌توان هم به تاخیر پیش از تغذیه و هم به اثرات ناشی از برهم‌کنش آب و سنگ نسبت داد.

با کاربرد داده‌های ایزوتوپی آب زیرزمینی و در نظر داشتن عواملی مانند موقعیت جغرافیایی، ساختمان زمین‌شناسی و ارتفاع چشمه‌ها می‌توان در سیستم هیدروژئولوژیکی منطقه پل‌ذهاب دو بخش اصلی تشخیص داد: نخست بخش‌های شرق و جنوب‌شرق که حوضه آبگیر چشمه‌های ماراب، ریجاب و قلعه شاهین را تشکیل می‌دهند. در این نواحی ترکیب

- Isotopes in Environmental and Health Studies 43:31-50
- Hoefs J (2004) Stable isotope geochemistry. University Center Press, 330p (In Persian)
- Kabeya N, Katsuyama M, Kawasaki M, Ohte N, Sugimoto A (2007) Estimation of mean residence times of subsurface waters using seasonal variation in deuterium excess in a small headwater catchment in Japan. *Hydrological Processes* 21:308-322
- Karimi H (2007) Physicochemical differences reasons of the Alvand basin's main karst springs. The Conference on Water Resources of Kermanshah Region, Kermanshah Regional Water Authority: 233-245
- Karimi H, Ashjari J (2010) Periodic breakthrough curve of tracer dye in the Gelodareh Spring, Zagros, Iran. *Journal of Cave and Karst Science* 36:5-10
- Karimi H, Raeisi E, Bakalowicz M (2004) Characterising the main karst aquifers of the Alvand basin, Northwest of Zagros, Iran, by a hydrogeochemical approach. *Journal of Hydrogeology* 13:787-799
- Karimi Vardanjani H (2010) Karst hydrogeology: concepts & methods. Shiraz Eram Press, 414p (In Persian)
- Katz B, Chelette A, Pratt T (2004) Use of chemical and isotopic tracers to assess nitrate contamination and ground-water age, Woodville Karst Plain, USA. *Journal of Hydrology* 289:36-61
- Long A, Putnam L (2009) Age-distribution estimation for karst groundwater: Issues of parameterization and complexity in inverse modeling by convolution. *Journal of Hydrology* 376:579-588
- McCallum J, Engdahl N, Ginn T, Cook P (2014) Nonparametric estimation of groundwater residence time distributions: What can environmental tracer data tell us about groundwater residence time? *Water Resources Research* 50:2022-2038
- Mohammadzadeh H, Aravena R (2015) Investigating the origin and interaction between karstic and alluvial aquifers in NW of Zagros Mountain Range, Iran, using isotopic and geochemical tools. *Procedia Earth and Planetary Science* 13:256-260
- Mohammadzadeh H, Amiri H (2016) Isotopic composition ($\delta^2\text{H}$ & $\delta^{18}\text{O}$) of karstic water in Pol-e-Zahab study area. The 2nd National Conference on Application of Stable Isotopes, Mashhad, 2016, Iran (In Persian)
- Mortazavi M (2011) Semi-detailed studies of 12 study areas in Kermanshah Project (sixth volume: 4. Mean Residence Time
5. Transit Time
6. Dispersive
7. Los Gatos Research
8. Isotope Ratio Mass Spectrometer
9. Vienna Standard Mean Ocean Water
10. Per Mill (‰)
11. Global Meteoric Water Line
12. Eastern Mediterranean Meteoric Water Line
13. Local Meteoric Water Line
14. Temperature Effect
15. Alluvial Ground Water Line
16. Karstic Ground Water Line
- ۶- مراجع
- Ashjari J, Raeisi E (2006) Influences of anticlinal structure on regional flow, Zagros, Iran. *Journal of cave and karst studies the National Speleological Society Bulletin* 68(3):118-129
- Blasch K, Bryson J (2007) Distinguishing sources of ground water recharge by using $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$. *Groundwater* 45:294-308
- Craig H (1961) Isotopic variation in meteoric waters. *Science, N.Y.* 133: 1702-1703
- Criss R, Fernandes S, Winston W (2001) Isotopic, geochemical and biological tracing of the source of an impacted karst spring, Weldon Spring, Missouri. *Environmental Forensics* 2:99-103
- Cui B, Li X (2015) Stable isotopes reveal sources of precipitation in the Qinghai Lake Basin of the northeastern Tibetan Plateau. *Journal of Science of the Total Environment* 527-528:26-37
- Delbart C, Barbecot F, Valdes D, Tognelli A, Fourre E, Purtschert R, Couchoux L, Jean- Baptiste P (2014) Investigation of young water inflow in karst aquifers using SF6-CFC-3H/He-85Kr-39Ar and stable isotope components. *Applied Geochemistry* 2014:1-12
- Frisbee M, Wilson J, Gomez J, Phillips F, Campbell A (2013) Are we missing the tail (and the tale) of residence time distributions in watersheds? *Geophysical Research Letters* 40:4633-4637
- Gat JR, Carmi I (1970) Evolution in the isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea area. *Journal of Geophysical Research* 75:3039-3048
- Han L, Hacker P, Groning M (2007) Residence times and age distributions of spring waters at the Semmering catchment area, Eastern Austria, as inferred from tritium, CFCs and stable isotopes.

- Plummer L, Busenberg E, McConella J, Drenkard S, Schlosser P, Michel R (1998) Flow of river water into a Karstic limestone aquifer. 1. Tracing the young fraction in groundwater mixtures in the Upper Floridan Aquifer near Valdosta, Georgia. *Applied Geochemistry* 13:995-1015
- Raeisi E (2004) Semi-detailed project karst basin Kermanshah Alvand (The third volume of report groundwater and zones of karst basin Alvand). Shiraz University (In Persian)
- Rezaeei S, Sahabi F, Memarian H (2012) Investigation of source H₂S in Nosood tunnel (west of Kermanshah). *Journal of Engineering Mine* 15(7):1-14 (In Persian)
- Sharp Z (2007) Principles of stable isotope geochemistry. Farhikhtegan Alavi Press, 606p (In Persian)
- Skelton A, Andren M, Kristmannsdottir H, Stockmann G, Morth C, Sveinbjornsdottir A, Kockum I (2014) Changes in groundwater chemistry before two consecutive earthquakes in Iceland. *Journal of Nature Geoscience* 7:752-756
- Yuce G (2005) Determination of the recharge area and salinization degree of karst springs in the Lamas Basin (Turkey). *Isotopes in Environmental and Health Studies* 41:391-404
- Hydrogeology and hydrogeochemistry report of Pol-e-Zahab study area) (In Persian)
- Murillo R, Birkel C, Welsh K, Esquivel G, Corrales J, Boll J, Araguas LJ (2016) Key drivers controlling stable isotope variations in daily precipitation of Costa Rica: Caribbean Sea versus Eastern Pacific Ocean moisture sources. *Journal of Quaternary Science Reviews* 131:250-261
- Osati Kh, Koeniger P, Salajegheh A, Mahdavi M, Chapi K, Malekian A (2014) Spatiotemporal patterns of stable isotopes and hydrochemistry in springs and river flow of the upper Karkheh River Basin, Iran. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2014:1-15
- Ozyurt N, Lutz H, Hunjak T, Mance D, Roller-Lutz Z (2014) Characterization of the Gacka River basin karst aquifer (Croatia): Hydrochemistry, stable isotopes and tritium-based mean residence times. *Journal of Science of the Total Environment* 487:245-254
- PavlovskiyL, Selle B (2014) Integrating hydrogeochemical, hydrogeological, and environmental tracer data to understand groundwater flow for a karstified aquifer system. *Ground water* 1:156-65