

بررسی عملکرد گسل‌های عرضی در انتقال آب بین حوضه‌ای با استفاده از مطالعات ایزوتوپی و ردیابی رنگی، مطالعه موردی: چشمه دیمه، کوهرنگ

ابراهیم غلامی *

دانشکده علوم زمین، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

علی اکبر صبا

دانشکده علوم زمین، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

علی یساقی

دانشکده علوم زمین، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

محمد مهدی خطیب

دانشکده علوم زمین، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

حاجی کریمی

گروه مرتع و آب‌بخیزداری، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۳۰

*egholami@birjand.ac.ir

چکیده

چشمه دیمه به عنوان سرچشمه اصلی رودخانه زاینده رود با آبدهی حدود ۲,۵ متر مکعب بر ثانیه از تاقدیس زراب واقع در استان چهارمحال و بختیاری، شهرستان چلگرد خارج می‌شود. به دلیل اهمیت این چشمه به لحاظ تأمین آب شرب جمعیت کثیری از ساکنان پایین دست، به منظور تعیین حریم کمی و کیفی آن تاکنون چندین آزمایش ردیابی رنگی در این تاقدیس انجام شده که در هیچکدام از آنها رنگ در چشمه دیمه دیده نشده است. بدین جهت، در مطالعه حاضر با فرض تغذیه این چشمه از کوه‌های زردکوه، جنبه‌های تکتونیکی منطقه از جمله انتقال آب از طریق شکستگی‌های عرضی مدنظر قرار گرفت. لذا پس از شناسایی شکستگی‌های عرضی که تا حوالی چشمه دیمه ادامه یافته‌اند، نسبت به تزریق ۳۰ کیلوگرم رنگ اورانین در یکی از این دره‌ها به نام دره خدنگ اقدام شد که بر خلاف آزمایشات قبلی، نتایج آنالیزها بیانگر مشاهده رنگ در چشمه می‌باشد. علاوه بر این، بررسی نمودار ارتفاع - ترکیب ایزوتوپی بارش نیز بیانگر ارتفاع متوسط کوه‌های زردکوه جهت تغذیه چشمه می‌باشد.

کلمات کلیدی: چشمه کارستی، ردیابی رنگی، مطالعات ایزوتوپی، دره خدنگ، شکستگی‌های عرضی

مقدمه

های محال باخ و ... به سمت تاقدیس کینو و نهایتاً چشمه سوسن سرخاب تأیید کرده‌اند (Karimi Vardanjani et al., 2017). همچنین محمدی بهزاد (Mohammadi Behzad, 2016) طی مطالعات خود تاقدیس‌های شمال شرق خوزستان را از طریق شکستگی‌های تکتونیکی عامل تأمین آب چشمه سبزاب معرفی نموده است.

چشمه‌های کارستی یکی از منابع اصلی تأمین آب شرب در نواحی خشک و نیمه خشک ایران هستند. چشمه کارستی دیمه در جنوب غربی ایران واقع شده است و منبع اصلی تغذیه رودخانه زاینده‌رود است. به همین دلیل توجه به حفاظت حرایم کمی و کیفی این چشمه اهمیت خاص دارد. در سال‌های گذشته با حفر سه تونل در نواحی مجاور چشمه، بخشی از آب سرشاخه‌های بزرگترین رود ایران، کارون، به طرف رودخانه زاینده‌رود منتقل شده است. به لحاظ اهمیت این چشمه، مطالعات متعددی بر روی حوضه آبرگیر آن انجام شده است. با توجه به این که چشمه دیمه از پلانچ تاقدیس زراب خارج می‌شود، فرض اول این است که چشمه از این تاقدیس تغذیه می‌شود. با این وجود در طی دو مرحله ردیابی رنگی با مواد رنگی اورانین و رودامین که در سال ۱۳۸۰ در این تاقدیس انجام شده (Janparvar, 2001)، رنگ در

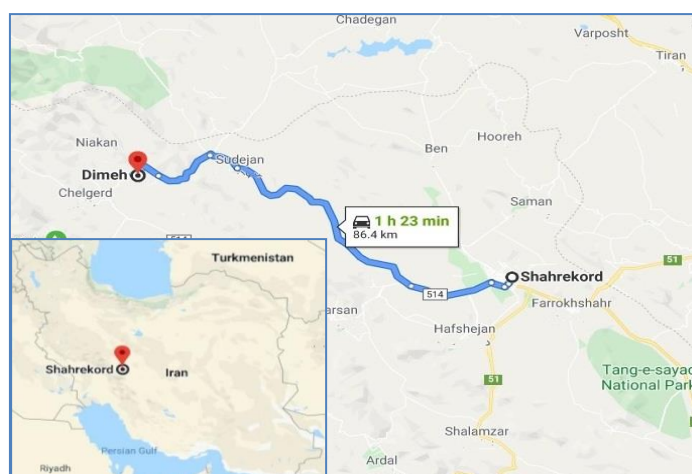
ساخت حوضه تغذیه و مسیرهای جریان منتهی به چشمه‌های کارستی همیشه جزء چالش‌های هیدروژئولوژی مناطق کارستی بوده است. این امر بدان جهت دارای اهمیت است که تعیین حوضه آبرگیر هم به لحاظ کمی در مدیریت آبخوان‌ها اهمیت دارد و هم به لحاظ کیفی نقش اصلی را در تعیین حریم کیفی منابع آب کارستی دارا می‌باشد. با این وجود، ماهیت هتروژن آبخوان‌های کارستی از یک طرف و نقش مهم ساختارهای زمین‌شناسی و تکتونیکی از طرف دیگر باعث گردیده است که تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌های بزرگ کارستی به آسانی صورت نپذیرد. مخصوصاً در مورد چشمه‌های بزرگی که بیان تاقدیس آهکی بالادست آنها جواب‌گوی حجم آبدهی آنها نمی‌باشد، شناسایی مناطق آهکی اطراف که احتمالاً می‌توانند آب نفوذ یافته در خود را به طرق مختلف اعم از جریان معمول در جهت شیب هیدرولیکی و یا جریان متمرکز از طریق خطوط جریان ناشی از عملکرد تکتونیک به سمت چشمه هدایت نمایند، جز مطالعات مهم و بعضاً پیچیده کارست قلمداد می‌شود. به عنوان مثال، کریمی وردنجانی و همکاران با انجام بررسی‌های ایزوتوپی و هیدروشیمیایی بر نقش گسل مفارون در انتقال آب از تاقدیس-

و باعث ایجاد گسل‌ها و شکستگی‌های برشی در سازندهای کربناته توالی‌های رسوبی دوران‌های مختلف زمین‌شناختی این قلمرو شده است. رخنمون‌های اصلی کارستی این ناحیه شامل تاق‌دیس زراب، کوه‌های زردکوه و تاق‌دیس بهلش می‌باشند. چشمه دیمه از پلانچ تاق‌دیس زراب از سازند خانه کت خارج می‌شود. مشخصات اصلی چشمه‌های مهم منطقه در جدول (۱) ارائه شده است. زردکوه با حداکثر ارتفاع ۴۲۲۰ متر برخی از بلندترین قله‌های رشته کوه زاگرس را در خود جای داده و تنها یخچال دائمی این رشته کوه در این کوهستان واقع شده است. واحدهای سنگ‌چینه‌ای رخنمون یافته در حوضه به ترتیب سنی از قدیم به جدید عبارتند از سازندهای: سری هرمز، سازند میلا، سازند ایلبیک، سازند زردکوه، سازند فراقان، سازند دالان، سازند خانه-کت، سازند نیریز-سرمه، سازند گرو، سازند ایلام-سروک، سازند گورپی-امیران، سازند آسماری-جهرم، سازند آغاچاری، سازند بختیاری و رسوبات عهدحاضر. رخنمون سازندهای زمین‌شناسی محدوده مورد بررسی در شکل (۲) ارائه گردیده است. مهم‌ترین عناصر ساختاری منطقه مورد مطالعه، گسل های اردل (MRF) و بازفت (HZF) می‌باشند. گسل اردل با طول حدود ۱۵۰ کیلومتر و راستای شمال‌غربی-جنوب‌شرقی در محدوده اردل و ناغان در دامنه جنوب‌غربی کوه‌های زراب، سالدوران و کوه‌سوخته قرار دارد. اختلاف ارتفاع کوه زراب و کوه سالدوران با روستاهای دشتک و کاج در شمال‌غربی اردل در یک فاصله کوتاه از ویژگی‌های مهم عملکرد گسل اردل می‌باشد. در راستای این گسل در شمال‌غربی اردل در محدوده کاج و دشتک بیرون‌زدگی نمکی مشاهده می‌شود. گسل بازفت از دامنه جنوب‌غربی ارتفاعات زردکوه عبور کرده و یک گسل معکوس با مولفه حرکتی راستالغز راستگرد می‌باشد. رودخانه بازفت در راستای گسل بازفت و به موازات بخش جنوب‌غربی آن جریان دارد. این گسل باعث رخنمون سازندهای دوران اول و گنبد‌های نمکی پرکامبرین و راندگی آنها بر روی کنگلومرای بختیاری که جوان‌ترین سازند منطقه می‌باشد، گردیده است. این گسل نقش مهمی را در شکل‌گیری ارتفاعات زردکوه که جزء بلندترین قله کشور می‌باشد، دارد. طول این گسل در حدود ۱۷۰ کیلومتر و شیب آن به سمت شمال‌شرق می‌باشد. این گسل با عملکرد راندگی از گسل‌های اصلی زاگرس بوده و مرز میان زاگرس مرتفع و زاگرس چین خورده می‌باشد.

چشمه دیمه مشاهده نشده است. فرضیه دوم این بوده که به دلیل حجم بالای آبخوان، رنگ چنان رقیق شده که در چشمه دیمه قابل اندازه‌گیری نبوده است. لذا در سال ۱۳۹۲ مقدار ۱۵ کیلوگرم رنگ در یک فروچاله در فاصله ۱۱ کیلومتر چشمه تزریق شد که در طی آن نیز رنگ در چشمه دیمه مشاهده نگردید (Pourab Co, 2012). فرضیه بعدی که در مقاله حاضر به آن پرداخته می‌شود این است که حوضه اصلی تغذیه‌کننده چشمه دیمه کوه‌های پوشیده از برف زردکوه هستند. هر چند بین این کوه‌ها و چشمه دیمه به دلیل وجود سازندهای نفوذناپذیر ارتباط ظاهری وجود ندارد، لیکن وجود گسل‌های عرضی منتهی به این چشمه این فرض را تقویت نمود که چشمه مزبور حداقل بخشی از آب خود را از زردکوه دریافت می‌نماید. در مقاله حاضر با استفاده از مطالعات ردیابی رنگی و ایزوتوپی در رابطه با منطقه تغذیه و تعیین مسیر جریان چشمه اظهار نظر می‌گردد.

جایگاه ساختاری و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

چشمه دیمه با موقعیت جغرافیایی ۴۲۶۲۴۶ و ۳۵۹۶۲۰۳ در مختصات UTM، در ارتفاع ۲۲۲۰ متری از سطح دریا در جنوب غرب ایران در ۱۰ کیلومتری شهر چلگرد مرکز شهرستان کوهرنگ قرار گرفته است. منطقه کوهرنگ از لحاظ هواشناسی یک ناحیه ویژه در ایران است. به طوری که در حوالی این منطقه میزان بارش سالانه در مقایسه با نواحی خشک مجاور بسیار بالاست. متوسط بارش سالیانه ایستگاه چلگرد حدود ۱۳۵۷ میلی‌متر می‌باشد. با این وجود در سال آبی ۲۰۱۷-۲۰۱۸، این منطقه با بارش حدود ۷۵۰ میلی‌متر یکی از خشک‌ترین سال‌های تاریخ خود را سپری نموده است. منطقه مورد مطالعه از لحاظ زمین‌شناسی قسمتی از زون زاگرس مرتفع می‌باشد. کمربند چین-راندگی زاگرس با عنوان بخش بیرونی کوهزایی زاگرس شامل دو قلمرو ساختاری می‌باشد. اولین قلمرو را کمربند راندگی‌های فلسی شکل (Imbricated thrust belt) یا کمربند زاگرس مرتفع (High Zagros belt) یا پهنه خردشده (Crush zone) نیز می‌نامند. قلمرو دوم به کمربند ساده چین‌خورده زاگرس (Zagros simply folded belt) معروف است. این دو قلمرو توسط گسل زاگرس مرتفع (HZF) از یکدیگر جدا می‌شوند (Nemati and Yassaghi 2010). پدیده تفکیک کرنش، متأثر از بردار حرکتی مایل صفحه آفریقا-عربی نسبت به خرده قاره ایران، بر قلمرو زاگرس مرتفع تاثیرگذار بوده است (Authemayou et al., 2006)



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.

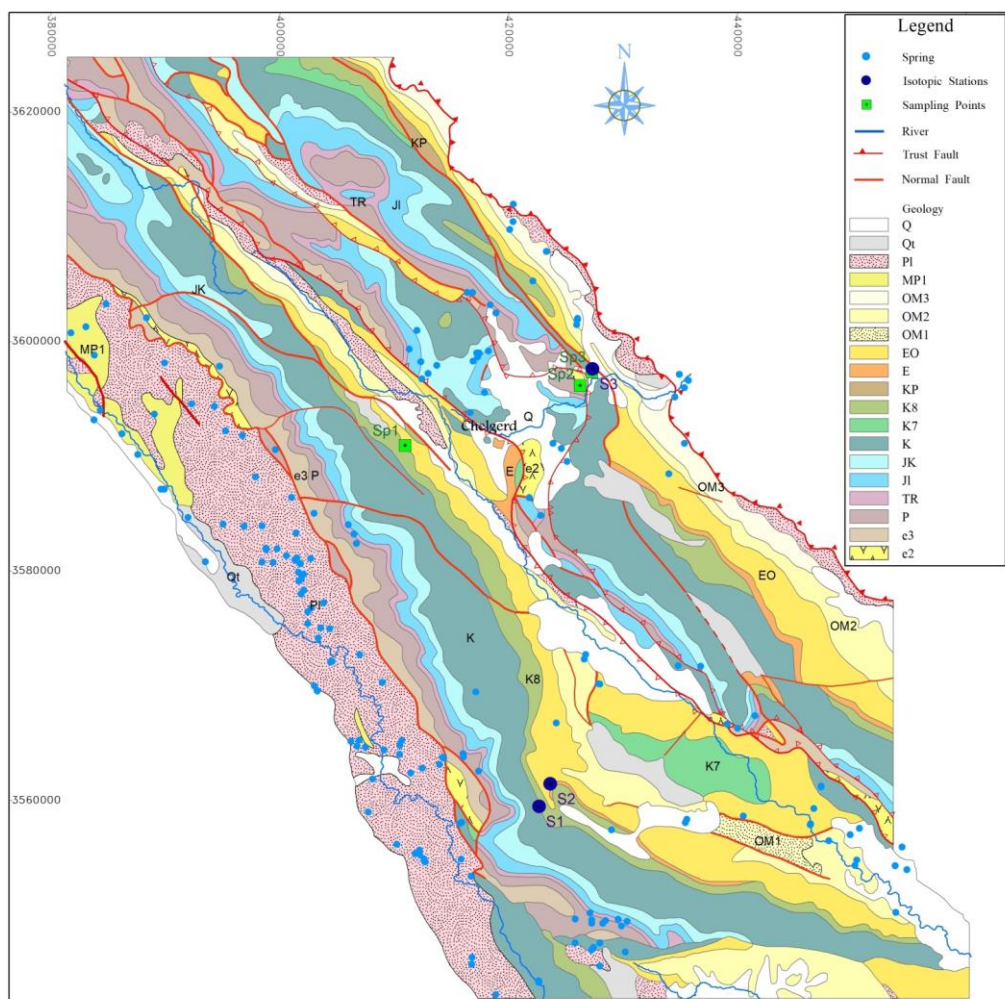
Fig. 1. Geographical location of the study area.

روش کار

خندنگ، سعی شده است تا نقش این پهنه گسلی بر توسعه فضاهای کارستی و انتقال آب بین حوضه‌ای به شکل طبیعی از حوضه آبریز کارون به حوضه آبریز زاینده رود بررسی شود.

جهت امکان‌سنجی اولیه، بیان محدوده آهکی زردکوه با آبدهی چشمه‌های این محدوده مقایسه گردید. به منظور انجام مطالعات بیان، لازم است سایر چشمه‌های مهم منطقه که متأثر از زردکوه می‌باشند نیز مورد بررسی قرار گیرند. لذا قبل از ردیابی نسبت به شناسایی مهم‌ترین چشمه‌های منطقه اقدام گردید. به طور کلی آنچه در پهنه زردکوه اهمیت بیشتری دارد، چشمه‌های بزرگ کوه‌رنگ، ماربر، دره آب سرده، سراب رستم‌آباد، ترکی، دیمه و غلام‌آباد می‌باشد که خصوصیات آنها در جدول (۱) ارائه گردیده است. بر اساس اطلاعات موجود متوسط آبدهی چشمه‌های زردکوه در حدود ۱۰/۸ متر مکعب در ثانیه است. مساحت آهک‌های تاقدیس سروک در زردکوه بین سر آقا سید در شمال غرب تا نواحی نزول ارتفاع آهک در جنوب شرق حدود ۳۵۰ میلیون متر مربع است که با توجه به بارش و نفوذ منطقه (بر اساس نظر کارشناسی) می‌تواند تخلیه‌کننده حدود ۱۵/۵ متر مکعب در ثانیه باشد. در نتیجه، محاسبات بیان نشان‌دهنده تخلیه‌های دیگری از این محدوده است. چنانکه در بخش ردیابی ذکر خواهد شد، حداقل بخشی از این تخلیه به سمت چشمه‌های دیمه و غلام‌آباد می‌باشد.

بر اساس مطالعه Casini و همکاران (۲۰۱۱) در پهنه ساده چین‌خورده زاگرس شکستگی‌ها در سازند سروک-ایلام با توجه به زمان تشکیل به سه گروه تقسیم‌بندی می‌شوند: شکستگی‌های همزمان با رسوب‌گذاری، شکستگی‌های همزمان با چین‌خوردگی و شکستگی‌های پس از چین‌خوردگی. شکستگی‌های همزمان با رسوب‌گذاری در کرتاسه پایانی و همزمان با رسوب‌گذاری در رژیم زمین‌ساخت کشتی در نهشته‌های حاشیه شمالی ورقه عربی بوجود آمده‌اند. شکستگی‌های همزمان با چین‌خوردگی طی دگرشکلی فشاری حاصل وارونگی زمین‌ساختی (Inversion tectonics) از مایستریشتین تا پایان میوسن در نهشته‌های حاشیه غیر فعال ورقه عربی شکل گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان به گسل اصلی معکوس زاگرس، گسل زاگرس مرتفع (گسل بازفت)، گسل پیشانی کوهستان و شکستگی‌های مزدوج عرضی اشاره کرد. دسته دیگر شکستگی‌های پس از چین‌خوردگی هستند که حاصل تغییر جهت بردار همگرایی ورقه عربی نسبت به اوراسیا می‌باشند که این تغییر جهت یک مولفه حرکت راست‌الغز را به شکستگی‌های قبلی از جمله بر شکستگی‌های مزدوج عرضی اعمال نموده و باعث بازفعالی (Re-activate) این شکستگی‌های قدیمی شده است و همین پدیده بالاخص در محل تلاقی این شکستگی‌ها فضای مناسب توسعه مجاری کارستی را فراهم آورده است. در این پژوهش با تمرکز بر روی یکی از این خطواره‌های عرضی بازفعال شده به نام پهنه گسلی



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه.
Fig. 2. Geological map of the study area.

جدول ۱- خصوصیات اصلی چشمه‌های مهم منطقه مورد مطالعه.

Table 1. Main characteristics of important springs in the study area.

No.	Spring Name	UTM(X)	UTM(Y)	Elevation(masl)	Discharge (L/sec)	Formation
1	Dimeh	426246	3596203	2226	2500	Khanekat
2	Gholam Abad	429022	3594538	2220	1000	Asmari
3	Kouhrang	410978	3590937	2530	3100	Sarvak
4	Marbor	421648	3576901	2380	2500	Sarvak
5	Terki	407746	3580788	2350	2900	Dalan
6	Darreh Absardeh	420139	3581047	2371	350	Sarvak
7	Sarab Rostamabad	453810	3550241	1810	2000	Sarvak

ردیابی رنگی

الف: نوع و مقدار رنگ

به‌طور کلی رفتار فیزیکی و شیمیایی ردیاب‌ها در آب اهمیت زیادی دارد و بر همین اساس یک ردیاب خوب، ردیابی است که خصوصیات لایه‌ی آبدار را نشان دهد و با همان سرعت و جهتی حرکت کند که آب زیرزمینی حرکت می‌کند. معمولاً اولین انتخاب جهت ردیابی در محیط‌های کارستی رنگ اورانین (فلوئورسین سدیم) می‌باشد (Karimi Vardanjani, 2014) که در ردیابی چشمه دیمه نیز مورد استفاده قرار گرفته است. مقدار ماده رنگی به کار برده شده در یک آزمایش ردیابی اهمیت فراوانی دارد. چون از طرفی به دلیل گرانی- قیمت بودن مواد رنگی، باید هزینه‌ی طرح مورد توجه قرار گیرد و طرح توجیه اقتصادی داشته باشد و از طرف دیگر کم بودن مقدار ماده‌ی رنگی، ممکن است باعث شود که به‌علت رقیق شدگی، جذب یا عوامل دیگر، مقدار ماده رنگی در نمونه‌ها، کمتر از حد تشخیص دستگاه شود و آزمایش ناموفق گردد. تعیین مقدار مناسب ماده رنگی به عوامل مختلفی مثل دبی خروجی از چشمه‌ها، سرعت آب، تعداد و پیچ و خم مسیرها، جنس مواد لایه‌ی آبدار، زمان ردیابی، فاصله‌ی محل تزریق تا محل نمونه‌برداری و عوامل دیگر بستگی دارد. بنابراین

ارائه یک فرمول دقیق برای تعیین مقدار ماده‌ی رنگی مورد نیاز امکان‌پذیر نمی‌باشد و فرمول‌های ارائه شده تنها برای شرایط خاص معتبر می‌باشد. کاربرد اصلی این فرمول‌ها تعیین مقدار تقریبی ماده رنگی مورد نیاز در آزمایشات گوناگون می‌باشد. لذا ارزشمندترین عامل، تجربه‌ی محققان می‌باشد. از بین فرمول‌های تجربی موجود می‌توان به فرمول کاس (Kass) اشاره کرد (Karimi Vardanjani, 2014):

$$M = L \cdot k \cdot B \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه داریم:

M = مقدار ردیاب مورد نیاز که واحد آن کیلوگرم می‌باشد.

L = فاصله‌ی دورترین نقطه‌ی نمونه‌برداری بر حسب کیلومتر

K = ضریب ردیاب

B = فاکتور شرایط هیدرولیکی (جدول ۲)

بر اساس فرمول فوق، میزان رنگ مورد نیاز جهت تزریق در زردکوه حدود ۳۰ کیلوگرم تعیین گردید.

جدول ۲- فاکتورهای k و B برای محاسبه‌ی میزان تزریق.

 Table 2. k and B factors to calculate the injection rate.

Tracer	k	Framework conditions	B
Water soluble tracers: mass [kg]		Surface streams	0.1-0.9
Uranine	1	Karst aquifers (conduits)	
Eosin	5.5	Pure sand/gravel aquifers	
Sulforhodamine B	4	Highly fissured aquifers	
Amidorhodamine G	2	Impure sand/gravel aquifers	2-4
Pyranine	5.5	Injection into groundwater through unsaturated zone	
Naphthionate	15	Karst aquifers (matrix),	
Tinopal	3	Poorly fissured aquifers	
NaCl	20000	River bank filtration	
LiCl	1000	Turbid sampling water or tracer background level > 0	
KCl	10000	Injection through thick or loamy unsaturated zone	5-10
Particle tracers: number of particles		High clay/silt contents	
Microspheres	1E+12		
Bacteriophages	1E+13		
Bacteria (<i>Serratia marcescens</i>)	1E+13		

ب: بررسی‌های مقدماتی، انتخاب محل تزریق و تزریق رنگ

مهم‌ترین مرحله در شناخت حوضه آبریز یک چشمه از طریق ردیابی، انتخاب محل تزریق ردیاب است. خطا در این انتخاب می‌تواند باعث دستیابی به نتایج غلط گردد. بر همین اساس اولویت اصلی این مطالعه پیدا کردن نقاطی است که

اولاً ارتباط آنها با سفره اصلی تا حد زیادی محرز باشد و ثانیاً فاصله آنها حتی الامکان نسبت به چشمه دیمه کم باشد. از طرف دیگر شرایط زمین‌شناسی از قبیل وجود گسل‌های سراسری، امکان ارتباط آنها را با چشمه دیمه بیشتر نماید و بیان اجمالی و شرایط نفوذپذیری، امکان تأمین آبدی نسبتاً زیاد چشمه

جنوب شرق انتخاب گردید (شکل ۳). تزریق رنگ درون یک چشمه با آبدهی حدود ۳ لیتر بر ثانیه انجام شد. آب این چشمه که از نقطه فوق الذکر در کف دره خارج می‌شود، پس از طی فاصله حدود ۱۰۰ متر کاملاً به درون زمین رفته و ناپدید می‌شود.

عملیات تزریق رنگ اورانین با حل آن در درون دو بشکه ۱۰۰ لیتری به همراه سود سوزآور در ساعت ۱۵ تاریخ ۱۵ مرداد سال ۱۳۹۷ انجام شد (شکل ۴). پس از عملیات تزریق، به منظور جلوگیری از بروز ایجاد خطا در نتیجه پخش ناخواسته ماده رنگی، کلیه وسایل مورد استفاده در عملیات در همان محل سوزانده شده و تیم تزریق بلافاصله منطقه را ترک نمود.

دیمه و چشمه‌های مسیر آن را فراهم سازد. امکان حمل آب جهت تزریق نیز از سایر ویژگی‌های لازم نقاط تزریق است. جهت شناسایی چنین نقاطی، ابتدا تصاویر هوایی و ماهواره‌ای منطقه مورد بررسی قرار گرفت و سپس با استفاده از راهنمایان محلی نسبت به بازدید از مناطق مختلف منطقه اقدام شد. بر این اساس در چندین مرحله نسبت به بازدید نواحی دارای پتانسیل تزریق در زردکوه اقدام گردید و در نهایت با توجه به وضعیت ساختاری منطقه (گسل‌های عرضی موجود) و همچنین ارتفاع چشمه‌های بزرگی مثل چشمه کوه‌رنگ، ترکی و ماربر، نقطه‌ای واقع در دره خدنگ منتهی به قله زردکوه با مختصات (۴۱۷۲۲۳ و ۳۵۸۴۲۹۷) در ارتفاع ۲۶۷۵ متر از سطح دریا و تقریباً هم ارتفاع با چشمه‌های مذکور در فاصله حدود بیست کیلومتری از چشمه دیمه بسمت



شکل ۳- نمایی از محل تزریق و ارتباط آن با گسل‌های عرضی موجود در منطقه.

Fig. 3. View of the injection site and its relationship with transverse faults in the study area.



شکل ۴- نمایی از عملیات تزریق رنگ در دره خدنگ.

Fig. 4. View of the dye injection in the Khadang Valley.

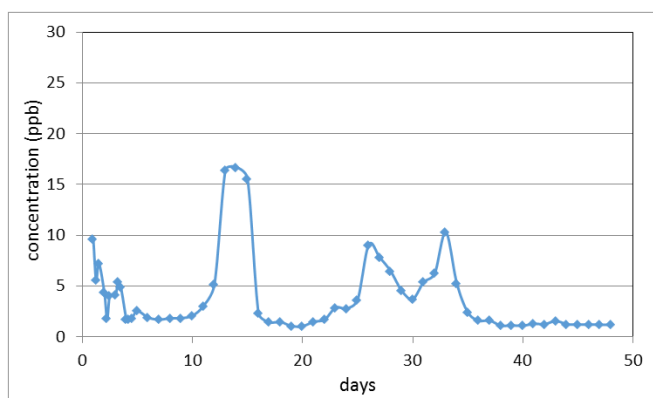
ریزی شد و در سایر منابع آبی از کیسه‌های ذغال فعال جهت تعیین ارتباط هیدروژئولوژیکی استفاده شد.

پس از جمع‌آوری نمونه‌ها از محل‌های نمونه‌برداری، بطری‌های نمونه بر اساس محل نمونه‌برداری و ساعت و تاریخ نمونه‌برداری نام‌گذاری شدند. نمونه‌های آب برداشت شده، به صورت هفتگی در محیط تاریک به آزمایشگاه

ج: نمونه برداری و انجام آنالیز اسپکتروفلوومتری نمونه‌ها

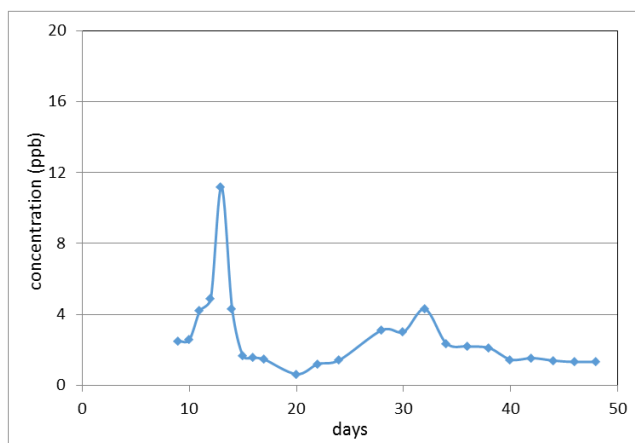
با توجه به شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه، امکان حرکت رنگ تزریق شده از تاقدیس تک یال زردکوه به سمت چشمه‌های کوه‌رنگ، ماربر، دره آب‌سرد، اسد، غلام‌آباد و دیمه و همچنین خروجی تونل دوم و تونل سوم و مسیر رودخانه کوه‌رنگ وجود دارد. لذا نمونه‌برداری از چشمه‌ها و نقاط مورد اشاره برنامه

بعد از تزریق دیده می‌شود با تشابه زمانی در چشمه غلام‌آباد نیز دیده می‌شود دارای حداکثر غلظتی حدود ۱۰ ppb در فاصله زمانی ۳۳ روز از زمان تزریق می‌باشد و بعد از بازه زمانی حدود ۱۰ روز غلظت ماده رنگی به غلظت زمینه باز می‌گردد. شکل ۶ نمودار غلظت - زمان مربوط به چشمه غلام‌آباد را نشان داده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌گردد، منحنی غلظت رنگ دارای دو قله می‌باشد. قله اول مربوط به روزهای ۱۱ تا ۱۶ بوده که با توجه به مشاهده شدن این قله در دیگر نمودارهای نقاط نمونه‌برداری قابل اعتماد نبوده و احتمالاً ناشی از خطا می‌باشد. اما قله دوم که تقریباً از روز ۲۵ ام بعد از تزریق دیده می‌شود دارای حداکثر غلظتی حدود ۴ ppb در فاصله زمانی ۳۲ روز از زمان تزریق می‌باشد و بعد از بازه زمانی حدود ۱۵ روز غلظت ماده رنگی به غلظت زمینه باز می‌گردد.



شکل ۵- نتایج آنالیز رنگ در چشمه دیمه.

Fig. 5. Dye analysis results of Dimeh spring samples.



شکل ۶- نتایج آنالیز رنگ در چشمه غلام‌آباد

Fig. 6. Dye analysis results of Gholam Abad spring samples.

نمونه‌های جمع‌آوری شده جهت آنالیز به آزمایشگاه شرکت مصباح انرژی واقع در شهر اراک ارسال گردید. متوسط مقادیر ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ و دوتریوم در نمونه‌های برداشت شده از چشمه دیمه به ترتیب ۷/۴- و ۳۸/۹- (در هزار) می‌باشد. این مقادیر به وضوح از مقادیر اندازه‌گیری شده در بارش منطقه در ارتفاعات ۲۵۰۰ و ۲۸۰۰ متر بیشتر است (ترکیب ایزوتوپی چشمه دیمه سنگین‌تر از بارش ارتفاعات مزبور است). متوسط ارتفاع تغذیه چشمه دیمه بر اساس نمودار شکل ۸، که بر اساس داده‌های برداشت شده و داده‌های تاقدیس کینو (Karimi Vardanjani et al., 2017) در مجاورت منطقه و حذف داده‌های مشکوک رسم شده است، کمتر از ۲۵۰۰ متر می‌باشد. به دلایل

مطالعات ایزوتوپی

جهت انجام مطالعات ایزوتوپی در منطقه مورد مطالعه نمونه‌برداری برف و باران از سه ایستگاه در سه ارتفاع مختلف شامل ایستگاه (A) در گردنه چری با ارتفاع حدود ۲۸۰۰ متر از سطح دریا (با مختصات UTM ۳۵۵۹۴۷۰ و ۴۲۲۶۸۰) و ایستگاه (B) در گردنه چری با ارتفاع حدود ۲۵۰۰ متر از سطح دریا (با مختصات UTM ۳۵۶۱۴۵۶ و ۴۲۳۶۶۲) و ایستگاه (C) در روستای دیمه با ارتفاع حدود ۲۲۰۰ متر از سطح دریا (با مختصات UTM ۳۵۹۷۲۰۷ و ۴۲۲۷۴۰) انجام گردید. همچنین از چشمه‌های کوه‌رنگ، دیمه، خدنگ و مازه در فصول مختلف جهت آنالیزهای ایزوتوپی نمونه‌برداری شد.

ارتفاعات است که در اثر تبخیر ترکیب ایزوتوپی سنگین تری پیدا نموده است. در این ترکیب می‌توان نقشه اختلاط آب از ارتفاعات مختلف (نظیر تاقدیس زراب) را نیز در نظر گرفت.

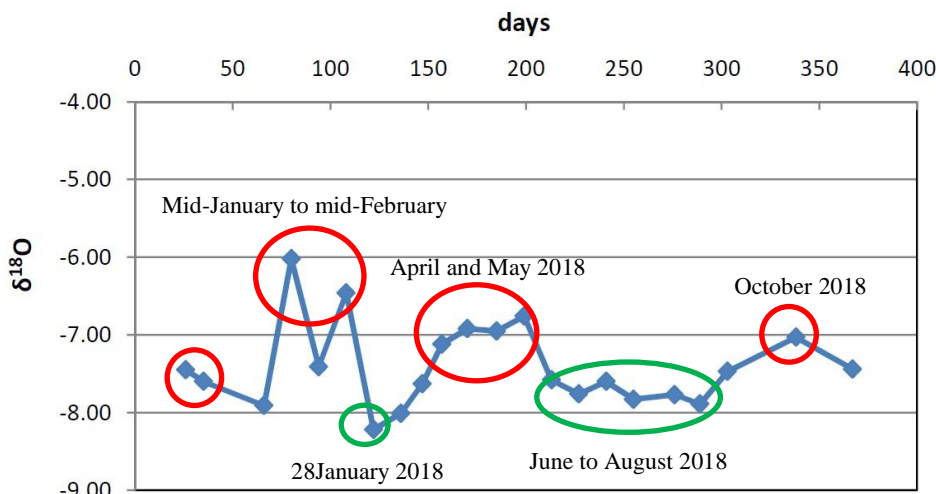
براساس نتایج آزمایشات ایزوتوپی و مقایسه وضعیت ایزوتوپی نمونه آب چشمه دیمه و نمونه آب باران و برف در ارتفاعات مختلف می‌توان نتیجه گرفت که چشمه دیمه از ارتفاعات بالای منطقه تغذیه شده و با تأخیر حدود ۱۰ تا ۱۵ روز تحت تأثیر بارش‌ها قرار می‌گیرد. بطوری‌که این موضوع در نوسانات ماه‌های دی و بهمن، نوسانات ناشی از بارش حدود ۲۰۰ میلی‌متر بین ۲۵ بهمن تا ۶ اسفند ۱۳۹۶ و همچنین بارندگی‌های مهر و آبان ۱۳۹۷ در شکل ۷ قابل مشاهده است که احتمالاً ناشی از انتقال حجم زیادی آب به وسیله مجراها و کانال‌های بزرگ توسعه یافته‌ی کارستی می‌باشد. این کانال‌ها در طول شکستگی‌های بزرگ (گسل‌های عرضی مزدوج) بوجود آمده‌اند و در زون تغذیه با آبروچاله‌های بزرگ موجود در ارتفاعات در ارتباط مستقیم هستند. شایان ذکر است اختلاف جزئی محتوی ایزوتوپی احتمالاً ناشی از اختلاط آب ناشی از بارش در ارتفاعات مختلف با هم بوده که نهایتاً از این سیستم کارستی خارج می‌شوند.

مختلف این امر حالت معمول و مورد انتظار است و علاوه بر آن به دو دلیل زیر می‌توان با قطعیت زیاد، حجم اعظمی از آبدهی چشمه دیمه را به تغذیه در ارتفاعات بالای ۳۰۰۰ متر نسبت داد.

الف: چشمه کوه‌رنگ که در ارتفاع حدود ۲۵۵۰ متری خارج می‌شود، مشخصاً از ارتفاعات بلند زردکوه تغذیه می‌شود. متوسط مقادیر ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ و دوتریوم در نمونه‌های برداشت شده از این چشمه به ترتیب ۶/۲- و ۲۴/۸- (در هزار) می‌باشد که بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده در چشمه دیمه است.

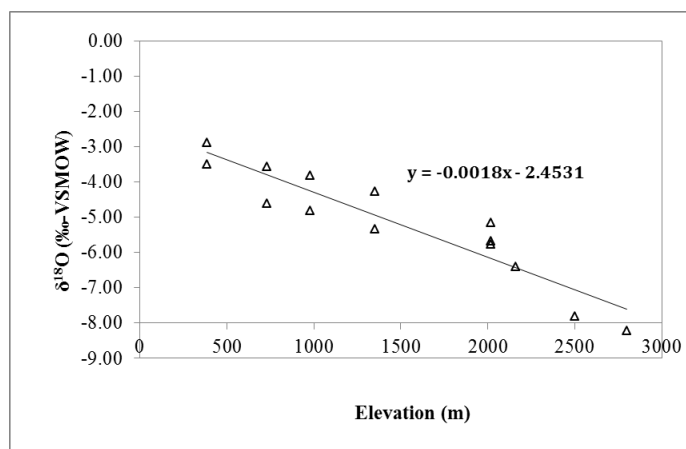
ب: میزان ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ و دوتریوم در نمونه برداشت شده از چشمه خدنگ به ترتیب ۶/۹۶- و ۲۳/۱۸- (در هزار) می‌باشد. این چشمه در ارتفاع حدود ۲۶۰۰ متری قرار داشته و قرار گرفتن آن در پای ارتفاعات برف‌گیر قله‌های اصلی زردکوه و همچنین دمای پایین (حدود ۸ درجه سانتی‌گراد در مرداد ماه ۹۷) تغذیه آن از ذوب برف را محرز می‌سازد. شباهت ترکیب ایزوتوپی این چشمه با نمونه‌های چشمه دیمه می‌تواند نشان‌دهنده تغذیه چشمه دیمه از ارتفاعات بالای زردکوه باشد.

همچنین باید توجه داشت که ترکیب ایزوتوپی بارش، مربوط به برف تازه است، در حالیکه عمده تغذیه چشمه‌های منطقه مربوط به برف مانده در



شکل ۷- نمودار تغییرات ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ در طول زمان نمونه‌برداری (از ابتدای آبان ماه ۹۶).

Fig. 7. Diagram of Oxygen 18 isotope changes during sampling time (since 23 October 2017).



شکل ۸. نمودار تغییرات ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ به ارتفاع.

Fig. 8. Changes in the oxygen 18 isotope with respect to altitude.

نتیجه گیری

بر اساس نتایج بررسی‌های هیدروژئولوژی و زمین‌شناسی منطقه و با توجه به نتایج ردیابی رنگی انجام شده، و همچنین ارتفاع متوسط به دست آمده جهت حوضه تغذیه چشمه بر اساس بررسی‌های ایزوتوپی، به طور کلی دو مسیر جریان در پهنه زردکوه تشخیص داده می‌شود:

الف: مسیر اصلی

با توجه به میزان آبدهی، مسیر اصلی جریان در پهنه زردکوه، عبارت از جریان به سمت چشمه‌های کوه‌رنگ، دره آب سرده، ماربر و ترکی است. این چشمه‌ها به علت ارتفاع پایین نسبت به سایر نقاط، سطح اساس اصلی پهنه زردکوه را تشکیل داده و با آبدهی زیاد خود قسمت اعظم آب نفوذ یافته در این پهنه را به سمت خود هدایت می‌نماید.

ب: مسیر دوم به سمت چشمه‌های دیمه و غلام‌آباد

با توجه به ارتباط ساختاری بین گسل‌های عرضی مابین گسل اصلی زاگرس و گسل بازفت و گسل‌های فرعی موجود در منطقه مانند گسل پنبه کال، شبکه‌ای ایجاد می‌گردد که قسمتی از آب پهنه زردکوه را به سمت چشمه‌های

دیمه و غلام‌آباد هدایت می‌کند و این موضوع با توجه به تزریق رنگ در ارتفاعات زردکوه و مشاهده آن در چشمه‌های مذکور اثبات گردید. آبخوان چشمه دیمه حجم بزرگی دارد و احتمالاً قسمت اعظمی از بخش میانی پهنه زردکوه خصوصاً بخش‌های تحتانی آن را در بر می‌گیرد، از طرفی با توجه به کاهش ارتفاع حدود ۳۰۰ متری نسبت به چشمه‌های کوه‌رنگ و ماربر، چشمه دیمه دارای سطح اساس پایین‌تری بوده که این موضوع نیز دلیلی دیگر بر حجیم بودن آبخوان کارستی چشمه دیمه است که بوسیله شبکه گسترده‌ای از شکستگی‌های عرضی با چشمه دیمه مرتبط است. بنابراین می‌توان قسمت اعظمی از بخش میانی پهنه زردکوه خصوصاً بخش‌های تحتانی را به عنوان حریم چشمه دیمه در نظر گرفت.

تقدیر و تشکر

از آقای دکتر حسین کریمی وردنجانی بخاطر مشاوره و همچنین همکاری در عملیات صحرائی تزریق رنگ صمیمانه قدردانی می‌گردد.

منابع

- Authemayou, C., Chardon, D., Bellier, O., Malekzadeh, Z., Shabanian, E., Abbassi, M.R., 2006. Late Cenozoic partitioning of oblique plate convergence in the Zagros fold-and-thrust belt (Iran). *Tectonics* 25, TC3002.
- Casini, G., Gillespie, P.A., Vergés, J., Romaire, I., Fernández, N., Casciello, E., Saura, E., Mehl, C., Homke, S., Embry, J-C., Aghajari, L., Hunt, D.W., 2011. Sub-seismic fractures in foreland fold and thrust belts: insight from the Lurestan Province, Zagros Mountains, Iran. *Petroleum Geoscience* 17, 263-282.
- Janparvar, M., 2001. Hydrogeology of Zarab Anticline Springs. MSc Thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran.
- Karimi Vardanjani, H., 2014. Karst Hydrogeology and Geomorphology, Eram Shiraz publications (in Persian).
- Karimi Vardanjani, H., Chitsazan, M., Ford, D., Karimi, H., Charchi, A., 2017. Initial assessment of recharge areas for large karst springs - a case study from the central Zagros Mountains, Iran. *Hydrogeology Journal*, DOI: 10.1007/s10040-017-1703-0.
- Mohammadi Behzad, H.R., 2016. Investigation of recharge sources karstic aquifers by using physico-chemical parameters and stable isotopes (^{18}O and ^2H) in NE Khuzestan. PhD Thesis, Ahvaz, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.
- Nemati, M., Yassaghi, A., 2010. Structural characteristics of the transitional zone from internal to external parts of the Zagros orogen, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 39, 161-72.
- Pourab Consulting Engineers Co., 2012. Dimeh spring studies, Dye tracing report.
- Twiss, R.J., Moores, E.M., 1992. *Structural Geology*, W. H. Freedman and Co., New York, 532.