

شناخت منابع تغذیه چشمه‌های کارستی مهم استان خوزستان با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریم

حمیدرضا محمدی بهزاد^(۱)، دکتر نصراله کلانتری^(۲)، دکتر عباس چرچی^(۳) و دکتر آرش ندری^(۴)

۱. دکتری هیدروژئولوژی، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۲. استاد هیدروژئولوژی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران
۳. استادیار تکتونیک، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران
۴. استادیار هیدروژئولوژی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۱/۰۷

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۷/۲۸

چکیده

چشمه‌های کارستی سبزاب و بی‌بی‌تلخون از جمله چشمه‌های پرآب استان خوزستان هستند که به ترتیب از آهک‌های آسماری تاقدیس‌های کمارون و پابده تخلیه می‌شوند. سطح بیرون زده آهک‌های آسماری هر دو تاقدیس متناسب با حجم آب تخلیه شده از این چشمه‌ها نمی‌باشد. بر اساس بررسی‌های بیلان اجمالی و هیدروگراف تخلیه چشمه‌ها، منابع آب مهمی در منطقه مورد مطالعه وجود دارد (از جمله مخزن سد شهید عباسپور و همچنین تاقدیس شیرگون) که می‌توانند در تغذیه چشمه‌های یاد شده دخالت داشته باشند. بنابراین، جهت ارزیابی این موضوع، محتوی ایزوتوپ‌های پایدار ^{18}O و ^2H تمامی منابع آب موجود در منطقه هدف (تخلیه) و در منطقه تغذیه برای دو دوره تر (بهمن ۹۱) و خشک (تیر ۹۲) تعیین شد. سپس، با استفاده از این نتایج ایزوتوپی و خط آب جوی محلی، به بررسی منشأ تغذیه چشمه‌های منطقه هدف پرداخته شد و ارتفاع منطقه تغذیه و سهم تغذیه احتمالی این چشمه‌ها از منابع آب موجود در منطقه تعیین گردید. نتایج نشان داد که ارتفاع منطقه تغذیه چشمه‌های منطقه هدف با ارتفاع آنها در تاقدیس کارستی شیرگون مطابقت دارد. همچنین، مشخص شد که دریاچه سد شهید عباسپور در تغذیه چشمه سبزاب مشارکت دارد. با این حال، سهم آب دریافتی چشمه سبزاب از منبع یاد شده در مقایسه با آب دریافتی از تاقدیس شیرگون، چندان قابل ملاحظه نمی‌باشد.

واژه‌های کلیدی: چشمه‌های سبزاب و بی‌بی‌تلخون، منابع تغذیه، ارتفاع منطقه تغذیه، خط آب جوی، ایزوتوپ‌های پایدار ^{18}O و ^2H .

مقدمه

کارستی ممکن است از یک یا چندین منبع منشأ بگیرند (محمدی بهزاد و همکاران، ۱۳۹۴). در پیچیده‌ترین شرایط، تغذیه می‌تواند هم از حوضه‌های کارستی مجاور و هم از منابع آب سطحی موجود در منطقه

در تجزیه و تحلیل مطالعات منابع آب کارست، شناخت منشأ آب ورودی به سیستم کارستی از اهمیت زیادی برخوردار است. به‌طور کلی آبهای ورودی به یک آبخوان

* نویسنده مرتبط: hmbehzad@yahoo.com

(2014)، Filippini et al. (2015)، Kanduč (2015) و Verbovšek and Liu et al. (2016) نیز کارهای مشابهی را انجام داده‌اند.

در این تحقیق سعی بر این بوده است تا با مقایسه محتوی ایزوتوپ‌های پایدار ^{18}O و ^2H بارندگی، مخزن سد شهید عباسپور و چشمه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه، منابع احتمالی و وضعیت تغذیه دو مورد از مهم‌ترین چشمه‌های کارستی استان خوزستان به نام‌های چشمه سبزاب و چشمه بی‌بی‌تلخون، مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش مطالعه

به‌منظور به دست آوردن جزئیاتی از وضعیت تغذیه چشمه‌های کارستی سبزاب و بی‌بی‌تلخون از آنها در طول دو دوره تر (بهمن ۹۱) و خشک (تیر ۹۲) نمونه‌برداری ایزوتوپی به عمل آمد. علاوه بر این، از چشمه‌های دیگر موجود در منطقه تغذیه (حوضه کارستی شیرگون) شامل چشمه‌های تینا و آبشکالون نیز نمونه‌برداری به عمل آمد. لازم به ذکر است که نمونه‌ها مستقیماً از محل خروج آب هر چشمه برداشت شد. از طرف دیگر، جهت ارزیابی ارتباط هیدرولیکی بین دریاچه سد شهید عباسپور و آبخوان کارستی میزبان چشمه سبزاب (آبخوان کمرون)، از این منبع نیز در بازه‌های زمانی یاد شده دو دوره نمونه‌برداری ایزوتوپی صورت گرفت. این نمونه‌ها از دریچه‌های خروجی^۲ تکیه‌گاه‌های سد برداشت شد. نمونه‌های ایزوتوپی، جهت تعیین مقادیر ایزوتوپ‌های پایدار ^{18}O و ^2H به آزمایشگاه هاج ایزوتوپ دانشکده علوم دانشگاه اتاواای کانادا ارسال شدند که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. ترکیبات ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن تمام نمونه‌ها به‌وسیله دستگاه IRMS^۳ مورد سنجش قرار گرفته است. جهت سنجش ایزوتوپ اکسیژن نمونه‌های آبی از موازنه متداول $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ استفاده شده است (Epstein and Mayeda, 1953). بدین صورت که ابتدا حدود دو میلی لیتر از هر نمونه آبی در دمای استاندارد $1 \pm 25^\circ\text{C}$ با گاز CO_2 موازنه می‌شود، سپس گاز CO_2

صورت بگیرد. چنین وضعیتی، در مناطق توسعه یافته کارستی ممکن است با ظهور چشمه‌هایی با آبدهی غیرقابل انتظار همراه باشد (Kalantari et al., 2016).

مطالعات هیدروژئولوژی اغلب برای تشریح هیدرودینامیک آب‌زیرزمینی در محیط‌های کارستی کربناته کافی نیستند، زیرا که آب‌زیرزمینی هم‌ازدرون شکستگی‌ها و هم‌ازمیان کانال‌های کارستی در جریان می‌باشد (Kohfahl et al., 2008). عوامل متعددی از جمله وضعیت زمین‌ساختاری و لیتولوژیکی می‌توانند هیدرودینامیک آب‌های زیرزمینی در محیط‌های کارستی را در مقیاس‌های محلی و ناحیه‌ای کنترل کنند (Scanlon et al., 2002; Ford and Williams, 2007; Fiorillo, 2009; Kalantari et al., 2011). توجه به این عوامل، برای درک بهتری از نرخ تغذیه و رژیم تغذیه یک سامانه کارستی، ضروری است.

مقایسه ترکیبات ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن (^{18}O) و هیدروژن (^2H) موجود در آب حاصل از بارندگی (چه آب حاصل از باران یا ذوب برف) و آب‌زیرزمینی کارستی می‌تواند یک ابزار ارزشمند برای ارزیابی مکانیسم تغذیه باشد (Barbieri et al., 2005; Yeh et al., 2011). امروزه، استفاده از این ابزار طرفداران زیادی را در دنیا به خود جلب کرده است. به‌عنوان مثال، (Mandić et al., 2008) توانستند با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار اطلاعات مهمی را در رابطه با میانگین ارتفاع مناطق تغذیه چشمه‌های اصلی حوضه آبریز رودخانه گاکا^۱ کرواسی به دست آورند. (Schwarz et al., 2009) با مقایسه ترکیبات ایزوتوپی بارندگی و تخلیه آب‌زیرزمینی، اختلاط بین بخش‌های مختلف مخازن آب‌زیرزمینی یکی از شناخته شده‌ترین و بزرگترین مناطق کارستی آلمان را مورد ارزیابی قرار دادند. (Marques et al., 2013) با استفاده از ردیاب‌های ایزوتوپی به بررسی مسئله تغذیه و مسیرهای جریان محلی و ناحیه‌ای آب‌زیرزمینی در یک سامانه آهکی در مرکز پرتغال پرداختند. (Meng and Liu, 2016) خصوصیات ایزوتوپی بارندگی، آب حاصل از ذوب برف، آب رودخانه و منابع آب‌زیرزمینی را مورد مقایسه قرار دادند و به نتایج ارزشمندی دست یافتند.

(Yuan et al., 2011)، (Sappa et al., 2012)، (Dun et al.,

1. Gacka

2. Drain holes

3. Isotope Ratio Mass Spectrometry

حمیدرضا محمدی بهزاد و همکاران

شده‌اند. لازم به ذکر است که جهت ترسیم خط آب جوی محلی از داده‌های ایزوتوپ‌های پایدار ^{18}O و ^2H آب باران و برف منطقه مطالعاتی شیمبار (شرکت مهندسی مشاوره آب پژوهان خوزستان، ۱۳۹۲) بهره گرفته شده است.

با عمل برودت‌زایی در خط خلأ تصفیه شده، و پس از آن استخراج می‌شود. برای سنجش ایزوتوپ هیدروژن نیز، از روی فلزی^۱ به منظور تولید گاز هیدروژن استفاده شده است (Coleman et al., 1993). این سنجش‌ها با مقادیر $\pm 0.15\%$ برای ^{18}O و مقادیر $\pm 2\%$ برای ^2H تکرار

جدول ۱. نتایج سنجش ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریم منابع آبی محدوده مطالعاتی در طول دو دوره نمونه‌برداری بهمن ۹۱ و تیر ۹۲

ردیف	منابع آبی	بهمن ۹۱ (دوره بارندگی)		تیر ۹۲ (دوره خشک)	
		$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	$\delta^2\text{H}$ [‰]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]	$\delta^2\text{H}$ [‰]
۱	چشمه سبزآب	-۵/۱۴	-۱۹/۴۶	-۵/۲۵	-۲۸/۶۶
۲	چشمه بی‌بی‌تلخون	-۴/۹۸	-۱۴/۲۱	-۴/۷۱	-۱۶/۸۲
۳	چشمه تینا	-۵/۲۱	-۲۵/۵۴	-۵/۵۴	-۲۸/۷۲
۴	چشمه آبشکالون	-۵/۲۶	-۲۵/۶۳	-۵/۶۱	-۲۸/۹۷
۵	دریاچه سد شهید عباسپور	-۵/۱۳	-۲۱/۶۵	-۴/۳۱	-۲۴/۷۰

وضعیت هیدروژئولوژی و زمین‌شناسی عمومی منطقه مورد مطالعه

سازند گچساران از بالا و از جوانب محصور شده است. از لحاظ تکتونیکی، چشمه‌های سبزآب و بی‌بی‌تلخون به ترتیب در راستای پهنه‌های خرد شده حاصل از عملکرد گسل‌های راندگی پنهان اندیکا و پابده ظهور یافته‌اند. این ساختارها مانند ساختارهای اصلی کمر بند چین خورده- رانده زاگرس با روند تقریبی شمال باختر- جنوب خاور به صورت عرضی توسط مجموعه‌ای از گسل‌ها با ساز و کار غالب راستالغز قطع می‌شوند (نجفی و یساقی، ۱۳۸۸). علاوه بر این، عملکرد ساختاری و هیدروژئومورفولوژیک راندگی‌ها، هیدرودینامیک تغذیه و تخلیه چشمه‌ها را نیز کنترل می‌کند، به طوری که این راندگی‌ها در برابر جریان‌های آب ورودی به آبخوان میزبان چشمه‌ها، به صورت یک سد هیدرولیکی عمل می‌کنند و همچنین جهت جریان عمومی آب‌های زیرزمینی درون حوضه‌ای و برون حوضه‌ای نیز تحت کنترل آنهاست. البته، برقراری ارتباط هیدرولیکی و موازنه آبی بین حوضه‌های کارستی منطقه مورد مطالعه توسط گسل‌های دیگری صورت می‌گیرد. این گسل‌ها، در ارتباط با گسل‌های اصلی و بنیادین منطقه یعنی گسل‌های راستالغز چپ‌بر بالا رود و

موقعیت ظهور چشمه سبزآب در کمر شکسته تاقدیس کمارون، در پایین دست سد شهید عباسپور (کارون یک) و در تکیه‌گاه سمت راست آن و موقعیت ظهور چشمه بی‌بی‌تلخون در کمر شکسته تاقدیس پابده (کوه ادیو) و در جناح چپ رودخانه تالوک، در شمال شرق استان خوزستان قرار دارد (محمدی بهزاد، ۱۳۹۰). موقعیت این چشمه‌ها در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است. در واقع تاقدیس‌های کمارون و پابده، مهم‌ترین تاقدیس‌های حاوی مخزن آب‌زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. این تاقدیس‌ها دارای روند NW-SE همراستا با روند عمومی رشته کوه‌های زاگرس هستند و در کمر بند چین خورده- رانده شده زاگرس^۲ واقع شده‌اند (نریمانی و همکاران، ۱۳۸۹ و حاجی علی بیگی و همکاران، ۱۳۹۱). بیشتر پوشش سطحی این تاقدیس‌ها را آهک‌های سخت سازند آسماری (پالتوسن- میوسن) تشکیل داده‌اند. ضخامت آهک آسماری در منطقه مورد مطالعه حدود ۳۰۰ متر می‌باشد که توسط شیل و مارن‌های نفوذناپذیر سازند پابده- گورپی (کامپانین- الیگوسن) در زیر و با لیتولوژی مارن، ژیبس/انیدریت و هالیت (میوسن آغازی)

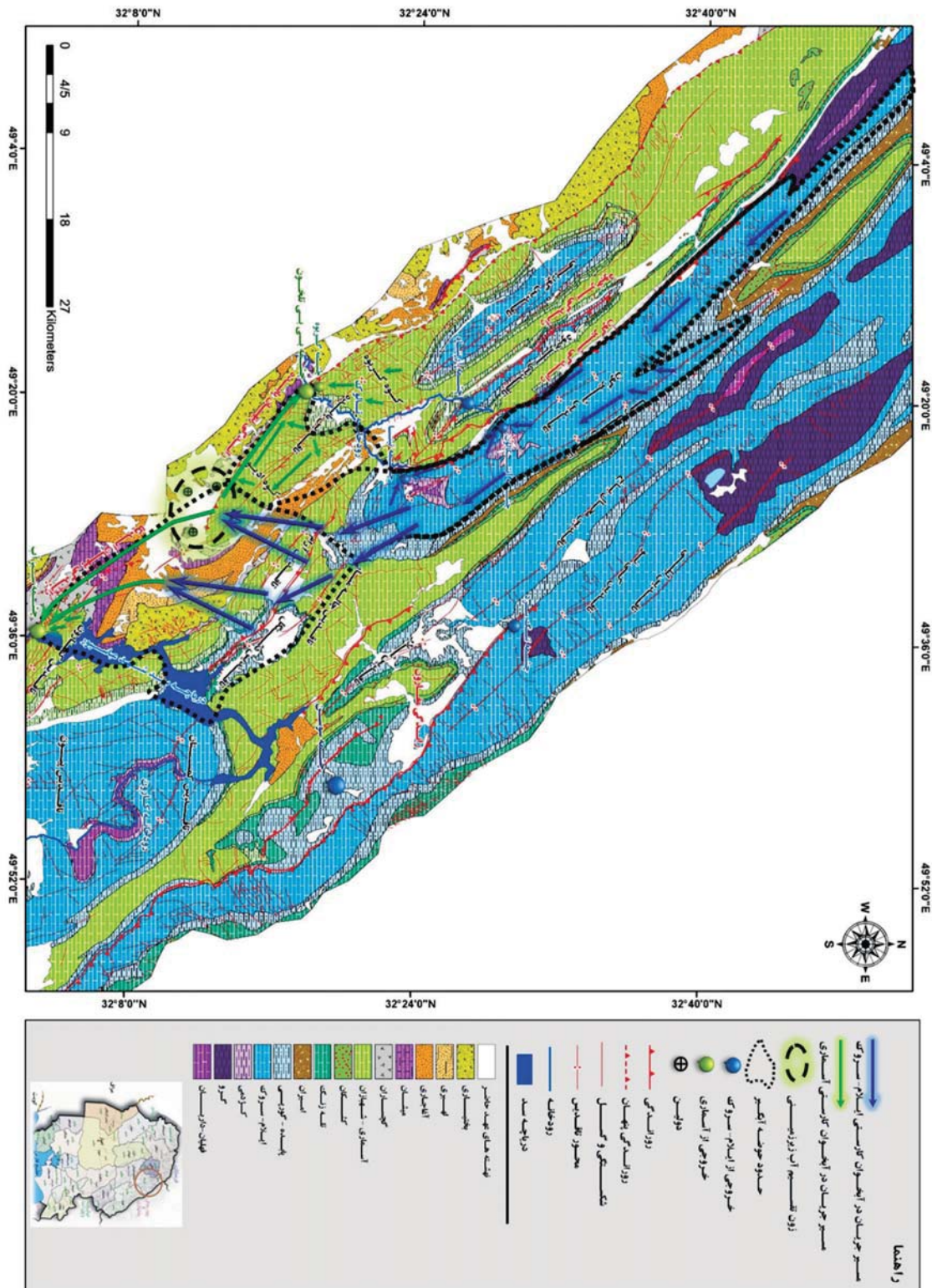
1. Metallic zinc
2. Zagros Folded-Thrust Belt

نظر گرفت، آب ناشی از ذوب توده‌های متراکم برف در سطح حوضه کارستی تغذیه‌کننده این چشمه‌ها می‌باشد. با این حال، در طول دوره مورد بررسی در سطح حوضه‌های کارستی میزبان چشمه‌های سبزاب و بی‌بی‌تلخون، بارش برفی رخ نداده است و این حوضه‌ها برف‌گیر نمی‌باشند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که حوضه (های) کارستی مجاور که برف‌گیر هستند می‌توانند در این تغذیه دخالت داشته باشند.

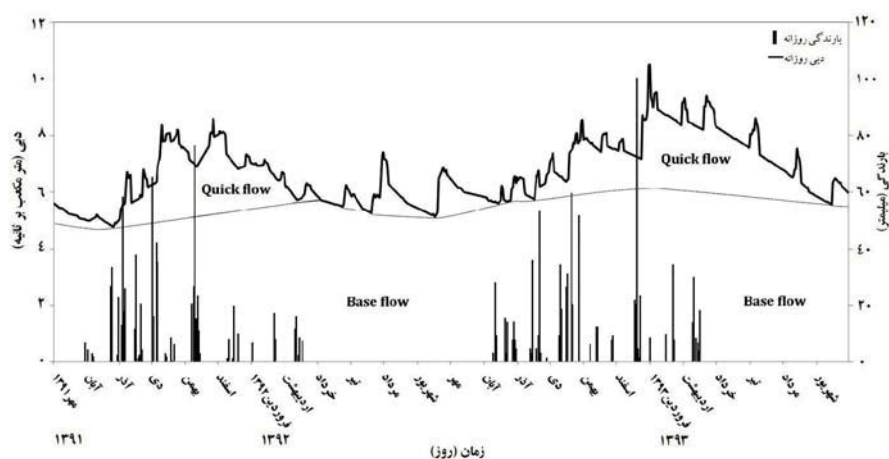
با در نظر گرفتن شرایط زمین‌شناسی و تکتونیکی و تخمین بیلان اجمالی، از میان حوضه‌های کارستی مجاور، حوضه کارستی شیرگون این پتانسیل را دارد که در تغذیه چشمه بی‌بی‌تلخون مشارکت داشته باشد. طبق بررسی‌های بیلان، تقریباً دو سوم (MCM ۱۳۶) از آب چشمه سبزاب می‌تواند از این تأقدیس کارستی (جدول ۲) و مابقی آن نیز (به‌طور متوسط حدود MCM ۷۹) می‌تواند از آب دریاچه پشت سد تغذیه شود (محمدی بهزاد و همکاران، ۱۳۹۴). بعلاوه، سهم تغذیه چشمه بی‌بی‌تلخون از این منبع تغذیه مشترک می‌تواند چیزی در حدود MCM ۵۰ باشد. سطح تأقدیس شیرگون که از تراکم شکستگی‌ها برخوردار است (برخلاف دو تأقدیس کمرون و پابده کوه ادیو)، همه ساله دارای بارش به‌صورت برف می‌باشد. به‌طوری‌که سطح این تأقدیس در نیمی از سال پوشیده از برف می‌باشد. چشمه‌های تینا و آبشکالون خروجی‌های مهم این تأقدیس هستند که در راستای یک راندگی مهمی در این ناحیه بنام راندگی شیرگون ظهور کرده‌اند. مشخصات هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمی این چشمه‌ها به همراه چشمه‌های سبزاب و بی‌بی‌تلخون در جدول ۳ ارائه شده است. متوسط میزان تخلیه تأقدیس شیرگون توسط این چشمه‌ها در حدود ۰/۳۸ متر مکعب بر ثانیه (معادل MCM ۱۲/۳) می‌باشد (جدول ۲). این رقم تنها حدود پنج درصد از حجم آب نفوذی ناشی از بارش‌ها را بر سطح این تأقدیس تشکیل می‌دهد. بنابراین، بیلان آبی این تأقدیس به مقدار قابل توجهی مثبت می‌باشد و بنابر قاعده موازنه هیدرولوژیکی این آب می‌تواند به آبخوان‌های کارستی مجاور که از بیلان آبی منفی برخوردار هستند، انتقال داده شود.

راست‌الغز راست‌بر ایزه هستند که با ایجاد فضاهای کشتی مناسب می‌توانند کمبود آبدهی حوضه‌های کارستی کمرون (چشمه سبزاب) و ادیو (چشمه بی‌بی‌تلخون) را با پتانسیل آبی زیاد حوضه‌های کارستی مجاور موازنه کند.

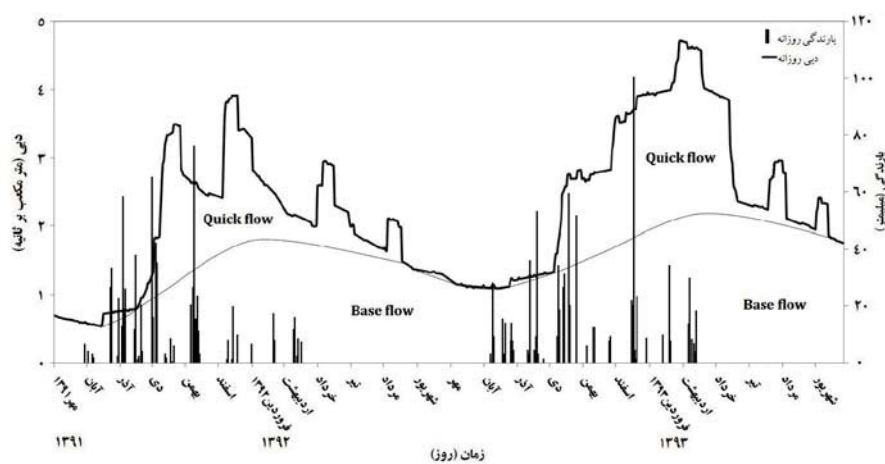
از لحاظ وضعیت هیدروژئولوژی، تغذیه چشمه سبزاب بسیار پیچیده‌تر از چشمه بی‌بی‌تلخون می‌باشد، به طوری‌که تحقیقات انجام شده تاکنون در شناسایی دقیق منابع تغذیه این چشمه توفیقی نداشته‌اند (شبان، ۱۳۹۰). با توجه به نتایج به دست آمده از بررسی‌های بیلان آبی حوضه‌های کارستی منطقه مورد مطالعه (جدول ۲)، آبخوان کارستی کمرون، میزبان چشمه سبزاب، تنها توانایی تغذیه حدود ۷/۳ میلیون مترمکعب از آب این چشمه را دارد و بیلان آبی آن منفی می‌باشد (جدول ۲). از طرف دیگر، آبخوان کارستی ادیو، میزبان چشمه بی‌بی‌تلخون، حدود یک سوم (MCM ۲۲) از آب این چشمه را می‌تواند تأمین کند. بنابراین، انتظار می‌رود بخش بزرگ آب این چشمه‌ها از یک منبع یا منابع دیگری تأمین شود. بررسی هیدروگراف هر دو چشمه نیز شواهد مهمی را در اختیار می‌گذارد. با توجه به هیدروگراف این چشمه‌ها (شکل‌های ۲ و ۳)، در آبدهی هر دو چشمه پیک‌های مهمی در دوره‌های تر و خشک وجود دارد. فواصل زمانی پیک‌های اصلی شکل گرفته در دوره‌های تر در طول دوره مورد بررسی (سال‌های آبی ۹۱-۹۲ و ۹۲-۹۳) از آغاز بارش‌های متمرکز تا زمان وقوع، به‌طور متوسط بیش از یک ماه (بین ۲۹ تا ۳۴ روز برای چشمه سبزاب و ۴۷ تا ۵۱ روز برای چشمه بی‌بی‌تلخون) به طول انجامیده است. این تأخیر زمانی برای یک چشمه کارستی بیش از حد نرمال (تقریباً بین یک تا پنج روز) است (کرمی، ۱۳۷۲) و نشان می‌دهد که چشمه‌های کارستی سبزاب و بی‌بی‌تلخون از حوضه‌آبگیر وسیعی برخوردار هستند و بخش مهمی از تغذیه آنها توسط آب‌هایی تأمین می‌شود که از نقاط دور دست می‌آیند. همچنین در مورد پیک‌های آبدهی که در طول دوره خشک رخ داده‌اند، مسلم است که بارندگی به‌طور مستقیم در شکل‌گیری آنها نقش نداشته است، تنها شواهدی که می‌توان برای وقوع این پیک‌ها در



شکل ۱. نقشه هیدروژئولوژی منطقه مورد مطالعه



شکل ۲. هیدروگراف روزانه چشمه کارستی سبزآب برای سال‌های آبی ۹۱-۹۲ و ۹۲-۹۳



شکل ۳. هیدروگراف روزانه چشمه کارستی بی‌تلخون برای سال‌های آبی ۹۱-۹۲ و ۹۲-۹۳

جدول ۲. بیان اجمالی حوضه‌های کارستی منطقه مورد مطالعه برای سال آبی ۹۲-۹۳

حوضه کارستی	سطح حوضه‌آبگیر (Km ²)	درصد نفوذ	متوسط بارش (mm)	خروجی اصلی	آب ورودی (MCM ^o)	آب خروجی (MCM ^o)	ورودی- خروجی
کمارون	۲۲	۶۰	۶۰۵	چشمه سبزآب	۷/۳	۲۲۲/۰	-۲۱۴/۷
ادیو	۷۲	۵۰	۵۵۲	چشمه بی‌تلخون	۲۱/۸	۷۱/۲	-۴۹/۴
شیرگون	۵۰۸	۶۰	۸۷۵	چشمه‌های تینا و آبشکالون	۲۶۶/۷	۱۲/۳	+۲۵۴/۴

MCM^o: میلیون مترمکعب

جدول ۳. مشخصات هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمی چشمه‌های کارستی منطقه مورد مطالعه

چشمه	تیپ غالب جریان	ارتفاع (m)	سطح حوضه‌آبگیر (Km ²)	میزان تخلیه (m ³ /s)	ذخیره دینامیک (MCM/Annum)	EC (μS/cm)	تیپ غالب آب
سبزآب	مجرایی-انتشاری	۴۶۰	۴۴۸	۵/۲-۱۰/۵	۱۶۴-۳۳۱	۴۷۸-۵۸۲	HCO ₃ -Ca (Mg)
بی‌تلخون	مجرایی-انتشاری	۴۲۰	۱۸۵	۱/۴-۵	۴۴-۱۵۸	۴۱۵-۱۲۷۵	Cl-Na (HCO ₃ -Ca)
تینا	انتشاری	۸۱۶	۱۴	۰/۱-۰/۳۵	۳-۱۱	۴۵۴-۵۶۸	HCO ₃ -Ca
آبشکالون	انتشاری	۸۶۷	۹	۰/۱-۰/۲	۳-۶	۴۶۲-۵۸۱	HCO ₃ -Ca

حمیدرضا محمدی بهزاد و همکاران

جهانی آرایش یافته‌اند (شکل ۴). همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است در این مرحله، چشمه‌های سبزآب و بی‌بی‌تلخون به همراه چشمه‌های تینا و آبشکالون از یک روند خطی تبعیت می‌کنند، به طوری که چشمه‌های تینا و آبشکالون (به‌عنوان یک عضو انتهایی^۱)، در ابتدای این خط و بر روی آن قرار گرفته‌اند و چشمه بی‌بی‌تلخون نیز (به‌عنوان یک عضو انتهایی دیگر) در انتهای آن واقع شده است. چشمه سبزآب نیز در میانه این خط اختلاطی قرار دارد. بر اساس نتایج مرحله دوم نمونه‌برداری ایزوتوپی (تیر ۹۲)، روند خطی بین چشمه‌های یاد شده تکرار شده است (شکل ۵). البته همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، روند خطی بین چشمه‌های سبزآب و بی‌بی‌تلخون در این مرحله، اندکی از هم انحراف پیدا کرده است، به طوری که چشمه سبزآب یک روند خطی جداگانه با دریاچه سد شهید عباسپور و حوضه کارستی شیرگون تشکیل داده است. روند خطی بین چشمه‌های مزبور نشان می‌دهد که احتمالاً هر چهار چشمه از یک منبع آب واحد تغذیه می‌شوند. یا به عبارت دیگر می‌توان گفت که تمامی چشمه‌ها از یک حوضه کارستی (یعنی حوضه کارستی شیرگون) با شرایط اقلیمی و تغذیه‌ای یکسان منشأ می‌گیرند. جهت ارزیابی این موضوع، ارتفاع منطقه تغذیه چشمه‌های سبزآب و بی‌بی‌تلخون با استفاده از دو روش گرادیان ایزوتوپی ارتفاعی و بهره‌گیری از نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی تخمین زده شد که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. لازم به توضیح است که گرادیان ارتفاعی ایزوتوپی را می‌توان با استفاده از نمونه‌های بارندگی که از ارتفاعات مختلف در منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری می‌شود، به دست آورد. برای این منظور، مقادیر ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ در مقایسه با دوتریم بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد (Azzaz et al., 2008). گرادیان ارتفاعی ایزوتوپی به دست آمده برای این تحقیق، با دیگر گرادیان‌های گزارش شده برای نواحی کوهستانی زاگرس مشابه می‌باشد (Karimi et al., 2005). باین‌حال، استفاده غیرمعقول از متوسط گرادیان ایزوتوپی برای یک مقیاس ناحیه‌ای می‌تواند به اشتباهات مهمی در تخمین ارتفاع تغذیه منجر شود (Lastennet, 1994). از اینرو،

بر اساس بررسی‌های تکتونیکی و شواهد مورفولوژیکی که در فوق اشاره شد، گسل‌های امتدادلغز ناشی از عملکرد پهنه‌های برشی ایذه و بالارود می‌توانند عامل موازنه آبی بین آبخوان‌های کارستی منطقه مورد مطالعه باشند. با در نظر گرفتن این شواهد، مسیرهای احتمالی جریان‌های محلی و ناحیه‌ای مشارکت دهنده در تغذیه چشمه‌های سبزآب و بی‌بی‌تلخون تعیین شد (شکل ۱). بر اساس این شواهد، حداقل دو مسیر اصلی به صورت جریان ناحیه‌ای می‌توانند در تغذیه چشمه سبزآب مشارکت داشته باشند (شبان، ۱۳۹۰ و محمدی بهزاد و همکاران، ۱۳۹۴). یکی از این مسیرها با مسیر تغذیه چشمه بی‌بی‌تلخون مشترک و مسیر دیگر مستقل از آن می‌باشد. بررسی‌های صورت گرفته نشان داده است که هر چند مسیر غیرمشترک در مقایسه با مسیر مشترک، مسافت بیشتری را شامل می‌شود ولی به علت واقع شدن در محل تلاقی پهنه‌های برشی ایذه و بالارود، از خردشدگی بیشتر و در نتیجه از مجاری عریض‌تری برخوردار است (محمدی بهزاد و همکاران، ۱۳۹۴). همچنین، جریان آب زیرزمینی که از آبخوان کارستی شیرگون به سمت آبخوان‌های کمارون و ادیسو انتقال می‌یابد، احتمالاً پس از ورود به این آبخوان‌ها، توسط رانندگی‌های پنهان اندیکا و پابده سد می‌شود و سپس در فصل مشترک سازند آهکی-دولومیتی آسماری با لایه‌های گچی و نمکی سازند گچساران به سمت نقاط خروجی (چشمه‌ها) هدایت می‌شود. به همین دلیل میزان املاح (که در این تحقیق با هدایت الکتریکی (EC) سنجیده شده است) و تیپ غالب آب چشمه‌های یاد شده تحت تأثیر لایه‌های گچی و نمکی مزبور قرار می‌گیرد. این مسئله بالاخص در مورد چشمه بی‌بی‌تلخون صادق است، به طوری که متوسط هدایت الکتریکی آب این چشمه بیش از $1000 \mu\text{S/cm}$ میکرون و تیپ غالب آب آن نیز Cl-Na ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$) می‌باشد (جدول ۳).

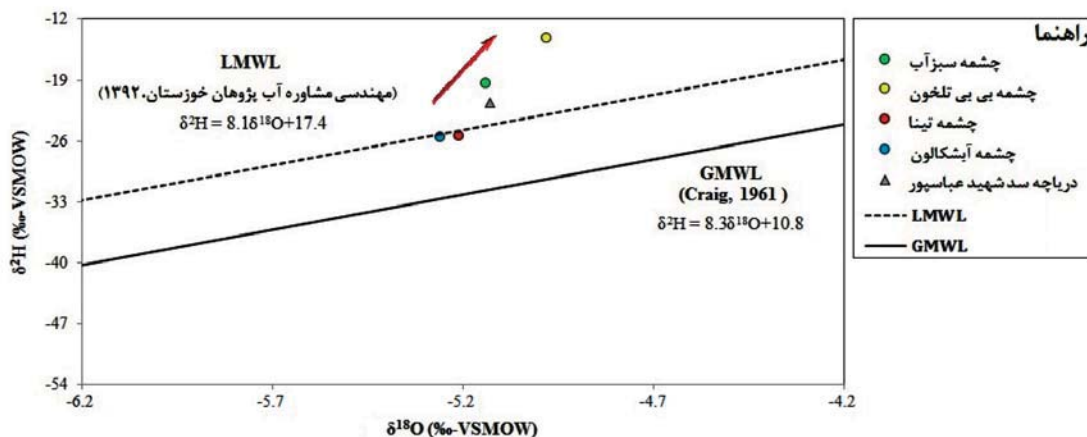
بحث

بر اساس نتایج آنالیز ایزوتوپ‌های ^2H و ^{18}O در مرحله اول مطالعات ایزوتوپی (بهمن ۹۱)، تمامی نمونه‌های آب چشمه‌ها و همین‌طور نمونه آب دریاچه سد در فاصله نزدیک به خط آب جوی محلی و به دور از خط آب جوی

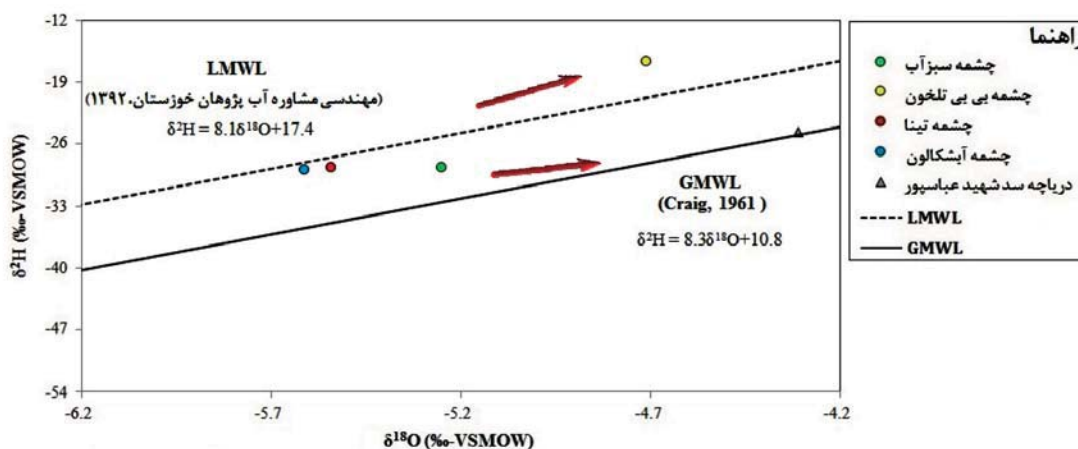
1. End member
2. Parent water

می‌باشد. بدین ترتیب، ارتفاعات تغذیه تخمین زده شده به روش یاد شده، حتماً بایستی توسط معیارهای زمین‌شناسی و توپوگرافی نیز کنترل شود (Azzaz et al., 2008).

استفاده از این گرادیان‌ها، به خاطر پیچیدگی‌های توپوگرافی و ساختارهای زمین‌شناسی و همچنین به دلیل دقت کمی که در تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی (مانند نرخ جریان، نفوذپذیری، اندازه مخزن) وجود دارد، همیشه دشوار



شکل ۴. نمودار ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریم چشمه‌های کارستی سبزآب و بی‌بی‌تلخون با منابع آبی درگیر در تغذیه آنها در دوره اول نمونه‌برداری‌های ایزوتوپی



شکل ۵. نمودار ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریم چشمه‌های کارستی سبزآب و بی‌بی‌تلخون با منابع آبی درگیر در تغذیه آنها در دوره دوم نمونه‌برداری‌های ایزوتوپی

تغذیه چشمه‌های تینا و آبشکالون در تاقدیس شیرگون تقریباً نزدیک است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که حوضه‌های میزبان چشمه‌ها تنها جوابگوی آبدهی آنها نمی‌باشند و تاقدیس کارستی مجاور یعنی تاقدیس شیرگون که از ارتفاع بیشتری برخوردار است و با مقدار تخمین زده شده از هر دو روش تطابق دارد می‌تواند در تغذیه این چشمه‌ها دخالت داشته باشد.

بر اساس نتایج حاصل از روش‌های یاد شده در جدول ۴، حداقل ارتفاع تغذیه چشمه‌های سبزآب و بی‌بی‌تلخون بایستی به ترتیب بیش از ۱۶۵۰ و ۱۷۳۵ متر باشد. این در حالی است که متوسط ارتفاع تاقدیس میزبان چشمه سبزآب یعنی تاقدیس کمارون برابر با ۸۹۰ متر و متوسط ارتفاع تاقدیس میزبان چشمه بی‌بی‌تلخون یعنی تاقدیس پابده برابر با ۱۲۲۸ متر می‌باشد. از طرفی، ارتفاع تغذیه این چشمه‌ها با ارتفاع

جدول ۴. تخمین متوسط ارتفاع منطقه تغذیه چشمه‌های منطقه مورد مطالعه با استفاده از مقادیر $\delta^{18}\text{O}$

ردیف	چشمه	ارتفاع منطقه تغذیه با استفاده از نقشه‌ها (m asl)	ارتفاع منطقه تغذیه با استفاده از گرادیان $^{18}\text{O}/\text{Alt}$ (m asl)
۱	سبزآب	۲۰۲۵	۱۷۳۵
۲	بی‌بی‌تلخون	۱۸۸۵	۱۶۵۱
۳	تینا	۱۷۹۰	۱۷۷۸
۴	آبشکالون	۱۸۳۵	۱۷۹۲

به خاطر همین موارد است که موقعیت چشمه‌های سبزآب و بی‌بی‌تلخون نسبت به خط آب جوی محلی دارای انحراف می‌باشد. با این حال، ترکیب ایزوتوپ‌های ^2H و ^{18}O هر دو چشمه با یکدیگر تفاوت بارزی دارد، هر چند که هر دو چشمه در ارتفاع تقریباً یکسانی ظاهر شده‌اند (جدول ۳). در حقیقت، چشمه سبزآب نسبت به چشمه بی‌بی‌تلخون تهی‌شدگی بیشتری را نشان می‌دهد و این می‌تواند به چند دلیل ذیل اتفاق بیفتد:

اولین دلیل، تأمین بخشی از آبدهی چشمه سبزآب از دریاچه سد شهید عباسپور (به‌عنوان یک منبع احتمالی دیگر) می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۴ مشخص است، نمونه ایزوتوپی دریاچه سد در دوره اول مطالعات ایزوتوپی نسبت به چشمه سبزآب ترکیب ایزوتوپی سبک‌تری دارد ولی با این حال به خط همبستگی چشمه سبزآب و دیگر چشمه‌ها تقریباً نزدیک می‌باشد و یک همبستگی نسبتاً ضعیفی را شکل داده است (شکل ۴). علت همبستگی نسبتاً ضعیف دریاچه سد با چشمه سبزآب، می‌تواند به خاطر تغذیه بیشتر چشمه سبزآب در این زمان (بهمین ۹۱) از حوضه کارستی شیرگون باشد. از همین رو است که یک خط همبستگی قوی بین چشمه سبزآب و نماینده‌های حوضه کارستی شیرگون یعنی چشمه‌های آبشکالون و تینا دیده می‌شود. همچنین در این بازه زمانی، تبخیر از آب دریاچه سد، نسبتاً جزئی می‌باشد که به تهی‌تر شدن آب این منبع و ایجاد رابطه همبستگی نسبتاً ضعیف آن با چشمه سبزآب کمک کرده است. در حقیقت، ترکیب ایزوتوپی آب‌زیرزمینی که از حوضه کارستی شیرگون در تغذیه چشمه سبزآب مشارکت می‌کند در این دوره از سال (فصل تر) نسبت به ترکیب ایزوتوپی آب مخزن سد غنی‌تر است و این غنی‌شدگی می‌تواند بیشتر در ارتباط با تبادلات

با توجه به شباهت‌های ذکر شده، تفاوت‌هایی نیز در ترکیب ایزوتوپ‌های پایدار ^2H و ^{18}O هر کدام از چشمه‌ها با یکدیگر وجود دارد. به طوری که چشمه‌های تینا و آبشکالون نسبت به چشمه‌های سبزآب و بی‌بی‌تلخون تهی‌شدگی بیشتری نشان می‌دهند که این را می‌توان چنین توجیه کرد: ۱- ارتفاع ظهور بالاتر چشمه‌های تینا و آبشکالون نسبت به چشمه‌های سبزآب و بی‌بی‌تلخون (جدول ۳)، ۲- چشمه‌های تینا و آبشکالون در فاصله نزدیک‌تری به منبع تغذیه قرار دارند و عمق چرخش آب درون آبخوان کارستی تغذیه‌کننده این چشمه‌ها در مقایسه با چشمه‌های سبزآب و بی‌بی‌تلخون کمتر است، از اینرو با فاصله زمانی کمتری هم به بارندگی پاسخ می‌دهند، ۳- تنها یک منبع (یعنی فقط حوضه کارستی شیرگون) در تغذیه آنها دخالت دارد، به همین دلیل اختلاط و تفکیک ایزوتوپی کمتری در آبخوان این چشمه‌ها اتفاق می‌افتد. اما آب‌های مشارکت دهنده در تغذیه چشمه‌های سبزآب و بی‌بی‌تلخون علاوه بر چرخش در درون آبخوان آهکی شیرگون و طی کردن مسیر طولانی، بایستی از درون چندین لایه سازندی (لایه‌های شیلی و مارنی سازندهای پابده-گوری) عبور کند تا به آبخوان آهکی- دولومیتی میزبان چشمه‌ها، وارد شوند. بنابراین، واکنش بین آب و سنگ به دلیل طولانی بودن مسیر جریان، می‌تواند از جمله فاکتورهای مؤثر در افزایش تبادلات ایزوتوپی آب‌های تغذیه‌کننده این چشمه‌ها باشد (Cartwright et al., 2012; Kanduč et al., 2014; Verbovšek and Kanduč, 2015; Mustafa et al., 2016). از طرفی، واکنش آب‌های تغذیه‌ای با لایه‌های گچی، نمکی و مارنی سازند گچساران که در تماس مستقیم با آبخوان میزبان هر دو چشمه قرار دارند نیز می‌تواند منجر به افزایش تبادلات ایزوتوپی (به‌ویژه در مورد چشمه بی‌بی‌تلخون) شود.

به محلول رقیق شده و یا مقدار $\delta^{18}\text{O}$ در آب‌های سطحی و زیرزمینی و آب اختلاطی می‌باشند.

با توجه به نتایج حاصل از محاسبات در مرحله دوم مطالعات ایزوتوپی (تیر ۹۲)، تقریباً دو سوم (۶۸ درصد) از سهم تغذیه چشمه سبزآب مربوط به ورودی زیرزمینی از حوضه کارستی شیرگون و یک سوم (۳۲ درصد) از آن نیز مربوط به ورودی سطحی از دریاچه سد می‌باشد. بنابراین، ملاحظه می‌شود که این نتایج به نتایج حاصل از مطالعات بیلان که در فوق نیز بدان اشاره شد، نزدیک است. لازم به توضیح است که در تعیین درصد تغذیه چشمه سبزآب، میانگینی از ترکیب ایزوتوپ پایدار $\delta^{18}\text{O}$ چشمه‌های تینا و آبشکالون به‌عنوان ترکیب ایزوتوپی مؤلفه ورودی آب زیرزمینی در نظر گرفته شده است. همچنین لازم به ذکر است که در مرحله اول مطالعات ایزوتوپی (بهمن ۹۱) به دلیل سبک‌تر (تهی‌تر) بودن مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ آب‌های زیرزمینی و سطحی مشارکت دهنده در تغذیه چشمه سبزآب که دلایل آن در فوق اشاره شد، تخمین سهم تغذیه چشمه از منابع یاد شده امکان‌پذیر نبوده است. در حقیقت، در این دوره ترکیب ایزوتوپی آب چشمه ما بین منابع تغذیه‌کننده آن قرار نداشته است و چشمه خود یک عضو انتهایی را تشکیل داده است. دومین دلیل تهی‌شدگی بیشتر چشمه سبزآب نسبت به چشمه بی‌تلخون، می‌تواند به درصد تغذیه بیشتر چشمه سبزآب از منابع تغذیه مشترک آن با چشمه بی‌تلخون (یعنی حوضه کارستی شیرگون) مربوط شود. سومین دلیل، می‌تواند درصد جریان سریع بیشتر چشمه سبزآب نسبت به چشمه بی‌تلخون باشد (شبان، ۱۳۹۰). از این موضوع، می‌توان انتظار داشت که سرعت انتقال جریان آب زیرزمینی در حوضه آبگیر چشمه سبزآب نسبت به حوضه آبگیر چشمه بی‌تلخون بیشتر است و این بر اساس شواهد تکتونیکی و ژئومورفولوژیکی که در فوق ذکر شد، می‌تواند به دلیل توسعه بیشتر مجاری کارستی در حوضه آبگیر چشمه سبزآب باشد. در نهایت چهارمین علت، می‌تواند به تبادل ایزوتوپی بیشتر چشمه بی‌تلخون در مقایسه با چشمه سبزآب، بنا به دلیل تأثیرپذیری بیشتر از لایه‌های تبخیری سازند گچساران که در

آب-سنگ به دلیل مسیر جریان طولانی باشد که آب زیرزمینی بایستی طی کند تا به حوضه کارستی میزبان چشمه‌های سبزآب و بی‌تلخون برسد. بنابراین، در طول این مسیر، فرصت به‌اندازه کافی وجود دارد تا آب چرخش یافته در درون سیستم با سنگ‌های میزبان (سازندهای ایلام-سروک و آسماری) محیط پیرامونی خود تبادلات ایزوتوپی داشته باشد. ذکر این نکته لازم است که اثر تبخیر در آب زیرزمینی حوضه کارستی شیرگون می‌تواند بر تغذیه چشمه‌ها تأثیر داشته باشد و آن‌هم مربوط به تبخیر در حین ریزش نزولات جوی و یا آب ناشی از ذوب برف است که به درون سامانه کارستی شیرگون نفوذ می‌کند اما این مسئله برای چشمه‌های منطقه مبدأ یعنی چشمه‌های تینا و شیرگون نیز یکسان است. در مرحله دوم مطالعات ایزوتوپی (تیر ۹۲) به دلیل کاهش حجم آب ورودی از حوضه کارستی شیرگون و به دنبال آن افزایش سهم نسبی دریاچه سد در تغذیه چشمه سبزآب، یک همبستگی قوی‌تری بین این دو منبع شکل گرفته است (شکل ۵). در این دوره، به دلیل کاهش مشارکت سرچشمه‌های تغذیه‌کننده دریاچه سد به دنبال قطع بارش‌ها از یک‌سو و افزایش میزان تبخیر از سطح آب دریاچه سد از سوی دیگر، یک غنی‌شدگی ایزوتوپی در آب این منبع اتفاق افتاده است که این اثر غنی‌شدگی را می‌توان به‌وضوح در نمونه ایزوتوپی چشمه سبزآب مشاهده کرد. به بیان روشن‌تر، در این دوره چشمه سبزآب بر روی خط اختلاطی با دو عضو انتهایی واقع شده است: یک عضو انتهایی با ترکیب ایزوتوپی سبک‌تر از چشمه سبزآب، مربوط است به چشمه‌های آبشکالون و تینا که به‌عنوان مؤلفه ورودی آب زیرزمینی از حوضه کارستی شیرگون می‌باشند و یک عضو انتهایی با ترکیب ایزوتوپی سنگین‌تر از چشمه سبزآب که به مؤلفه آب سطحی ورودی از دریاچه سد مربوط می‌شود. بر این اساس می‌توان با استفاده از رابطه ذیل، درصد تغذیه چشمه کارستی سبزآب را از ورودی‌های سطحی و زیرزمینی یاد شده تخمین زد:

$$C_{\text{mix}} = FC_{\text{gw}} + (1-F) C_{\text{sw}} \quad (1)$$

که در آن:

F و (1-F)، نشان‌دهنده سهم آب‌های سطحی و زیرزمینی در آب اختلاطی و C، نشان‌دهنده غلظت مربوط

حمیدرضا محمدی بهزاد و همکاران

همخوانی ندارد و در مقابل با ارتفاع منطقه تغذیه آبخوان کارستی شیرگون دارای مطابقت می‌باشد. علاوه بر این، نتایج بررسی‌های ایزوتوپی نشان می‌دهد که چشمه سبزاب علاوه بر تغذیه از منبع یاد شده با دریاچه سد شهید عباسپور نیز دارای یک ارتباط هیدرولیکی می‌باشد. بنابراین، سعی شد تا با استفاده از ایزوتوپ پایدار ^{18}O سهم تغذیه چشمه سبزاب از دریاچه سد و از آبخوان کارستی شیرگون تخمین زده شود. بر این اساس، تقریباً یک سوم از آب چشمه می‌تواند از دریاچه سد تأمین شود ولی بخش بزرگ تغذیه آن از آبخوان کارستی شیرگون می‌باشد. در حقیقت، آبخوان کارستی شیرگون نقش اصلی را در تغذیه چشمه سبزاب و همین‌طور چشمه بی‌تلخون دارد. همچنین، با اینکه شرایط اقلیمی و مکانیسم تغذیه چشمه‌های یاد شده مشابه هم می‌باشد، اما بررسی داده‌های ایزوتوپی نشان می‌دهد که یک تفاوت مشخص بین ترکیب ایزوتوپ‌های پایدار ^2H و ^{18}O هر دو چشمه وجود دارد که این می‌تواند به تفاوت در وضعیت هیدرودینامیک تخلیه آنها برگردد.

قدردانی

بدین‌وسیله از حمایت‌ها و مساعدت‌های مالی مدیریت محترم دفتر پژوهش‌های کاربردی سازمان آب و برق خوزستان، و همچنین همکاری‌های گروه زمین‌شناسی دانشگاه شهید چمران در انجام این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- حاجی علی بیگی، ح.، علوی، س.ا.، افتخار نژاد، ج. و مختاری، م.، ۱۳۹۱. تحلیل هندسی چین‌خوردگی مرتبط با گسلش مدفون فعال بالارود، مطالعه موردی: تاقدیس سیاه کوه، جنوب باختر ایران. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۲۱، ۳۹-۲۵.
- شبان، م.، ۱۳۹۰. تعیین حوضه آبریز و منابع تأمین آب چشمه سبزاب (شمال شرق مسجد سلیمان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۷۴.
- شرکت مهندسی مشاوره آب پژوهان خوزستان، ۱۳۹۲. بررسی منابع آب کارستی و ارتباط هیدرولیکی در

بالا نیز بدان اشاره شد، برگردد. چرا که لایه‌های تبخیری یاد شده در کنتاکت مستقیم با کانال اصلی جریان آب‌زیرزمینی ورودی به آبخوان کارستی میزبان چشمه بی‌تلخون قرار دارند (Kalantari et al., 2016).

نتیجه‌گیری

نتایج بیان اجمالی حوضه‌های کارستی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که سطح توپوگرافیکی آبخوان‌های کارستی میزبان چشمه‌های سبزاب و بی‌تلخون بسیار کمتر از مقدار لازم برای تأمین آب خروجی این چشمه‌ها است. از طرف دیگر، در مجاورت این تاقدیس‌ها آبخوان‌هایی مانند آبخوان کارستی شیرگون وجود دارد که سطح توپوگرافیکی‌شان بسیار بیشتر از مقدار لازم برای تأمین آب چشمه‌های خروجی از آنهاست و می‌توانند کمبود آبدهی چشمه‌های منطقه هدف (منطقه تخلیه) را جبران کنند. از طرف دیگر، وقوع پیک‌های آبدهی مهم و با زمان تأخیر طولانی (به‌طور متوسط بیش از یک ماه) در طول دوره‌های تر و خشک در هیدروگراف چشمه‌های سبزاب و بی‌تلخون نشان می‌دهد که این چشمه‌ها از حوضه‌آبگیر وسیعی برخوردار هستند و بخش مهمی از تغذیه آنها از آب‌هایی تأمین می‌شود که از ذوب برف منشأ می‌گیرند و از نقاط دور دست می‌آیند و از آنجا که حوضه‌های کارستی میزبان آنها برف‌گیر نمی‌باشند در نتیجه انتظار می‌رود حوضه (های) کارستی مجاور که برف‌گیر هستند در این دخالت داشته باشند. جهت بررسی این موضوع، ایزوتوپ‌های پایدار ^2H و ^{18}O چشمه‌های منطقه هدف (شامل چشمه‌های سبزاب و بی‌تلخون) و دو چشمه موجود در منطقه مبدأ (منطقه تغذیه) برای دو دوره‌تر و خشک نمونه‌برداری مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج حاصل از این بررسی‌ها نشان می‌دهد که یک ارتباط خطی قوی بین آبخوان‌های کارستی میزبان چشمه‌های سبزاب و بی‌تلخون با آبخوان کارستی میزبان چشمه‌های منطقه مبدأ (آبخوان کارستی شیرگون) وجود دارد. همچنین بر اساس داده‌های ایزوتوپی و نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی، مشخص شد که ارتفاع منطقه تغذیه چشمه‌های یاد شده با ارتفاع متوسط حوضه‌های میزبان خود، یعنی حوضه‌های کارستی کمارون و پابده

- Coleman, M., Eggenkamp, H., Matray, J.M. and Pallant, M., 1993. Reduction of water with zinc for hydrogen analyses. *Analytical Chemistry*, 54(6), 993-995.
- Dun, Y., Tang, C. and Shen, Y., 2014. Identifying interactions between river water and groundwater in the North China Plain using multiple tracers. *Environmental Earth Sciences*, 72(1), 99-110.
- Epstein, S. and Mayeda, T.K., 1953. Variations of the $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratio in natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 4(213), 1702-1703.
- Filippini, M., Stumpp, C., Nijenhuis, I., Richnow, H.H. and Gargini, A., 2015. Evaluation of aquifer recharge and vulnerability in an alluvial lowland using environmental tracers. *Journal of Hydrology*, 529, 1657-1668.
- Fiorillo, F., 2009. Spring hydrographs as indicators of droughts in a karst environment. *Journal of Hydrology*, 373, 290-301.
- Ford, D. and Williams, P., 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Chapman and Hall, London.
- Kalantari, N., Ghafari, H.R., Keshavarzi, M.R. and Mallaei, M.R., 2011. Factors impacting on flow pattern in the Shimbar karstic area in the southwest of Iran. 9th conference on limestone hydrogeology, 257-260, Besancon, France.
- Kalantari, N., Charchi, A., Mohammadi-Behzad, H.R. and Nadri, A., 2016. Bibitalkhone and Gariveh Springs paradox symbol of the Pabdeh karstic anticline in southwest Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(2), 1-8.
- Karimi, H., Raeisi, E. and Bakalowicz, M., 2005. Characterising the main karst aquifers of the Alvand basin, northwest of Zagros, Iran, by a hydrogeochemical approach. *Hydrogeology Journal*, 13, 787-799.
- محدوده‌های کوشک، شیمبار و چشمه بی‌تلخون، شمال شرق استان خوزستان. کارفرما: سازمان آب و برق خوزستان.
- کرمی، غ.، ۱۳۷۲. بررسی رابطه بین عوامل مؤثر بر نفوذ آب و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی کوه‌های گر و برم فیروز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبشناسی، بخش زمین‌شناسی، دانشگاه شیراز، ۳۵۵.
- محمدی بهزاد، ح. ر.، ۱۳۹۰. شناسایی منشأ تغذیه و بررسی خصوصیات فیزیکو-شیمیایی چشمه کارستی بی‌تلخون. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۹۳.
- محمدی بهزاد، ح. ر.، چرچی، ع. و کلانتری، ن.، ۱۳۹۴. بررسی رفتار هیدروژئولوژیکی چشمه کارستی سبزآب، شمال شرق استان خوزستان. فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۱۵، ۱۹-۱۰.
- نجفی، م. و یساقی، ع.، ۱۳۸۸. شواهد ساختاری از عملکرد گسل عرضی نظام‌آباد بر پیشانی کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۰، ۴۵-۳۷.
- نریمانی، ح.، یساقی، ع. و حسن گودرزی، م. ح.، ۱۳۸۹. تحلیل الگوی چین‌خوردگی تاقدیس میش در زاگرس چین‌خورده-رانده. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۵، ۵۰-۳۹.
- Azzaz, H., Cherchali, M., Meddi, M., Houha, B., Puig, J.M. and Achachi, A., 2008. The use of environmental isotopic and hydrochemical tracers to characterize the functioning of karst systems in the Tlemcen Mountains, northwest Algeria. *Journal of Hydrogeology*, 16(3), 531-546.
- Barbieri, M., Boschetti, T., Petitta, M. and Tallini, M., 2005. Stable isotopes (2H , 18O and $87\text{Sr}/86\text{Sr}$) and hydrochemistry monitoring for groundwater hydrodynamics analysis in a karst aquifer (Gran Sasso, Central Italy). *Applied Geochemistry Journal*, 20(11), 2063-2081.
- Cartwright, I., Weaver, T.R., Cendón, D.I., Fifield, L.K., Tweed, S.O., Petrides, B. and Swane, I., 2012. Constraining groundwater flow, residence times, inter-aquifer mixing and aquifer properties using environmental isotopes in the southeast Murray Basin, Australia. *Applied Geochemistry Journal*, 27(9), 1698-1709.

- Kanduč, T., Grassa, F., McIntosh, J., Stibilj, V., Ulrich-Supovec, M., Supovec, I. and Jamnikar, S., 2014. A geochemical and stable isotope investigation of groundwater/surface-water interactions in the Velenje Basin, Slovenia. *Journal of Hydrogeology*, 22(4), 971-984.
- Kohfahl, C., Sprenger, C. B., Herrera, J., Meyerc, H., Fernandez Chacon d. F., and Pekdeger, A., 2008. Recharge sources and hydrogeochemical evolution of groundwater in semiarid and karstic environments: A field study in the Granada Basin (Southern Spain). *Applied Geochemistry Journal*, 23, 846-862.
- Lastennet, R., 1994. Role of the unsaturated zone in the functioning of karstic aquifers: approach by physical, chemical and isotopic studies of inlet signals and spring outlets in the Ventoux Mountain (Vaucluse). PhD Thesis, Avignon University, France, 116-117.
- Liu, J., Chen, Z., Zhang, Y., Li, Z., Zhang, L. and Liu, F., 2016. Stable isotope evidences on sources and mechanisms of groundwater recharge in Hohhot basin, China. *Environmental Earth Sciences*, 75(5), 1-10.
- Mandić, M., Bojić, D., Roller-Lutz, Z., Lutz, H.O. and Krajcar Bronić, I., 2008. Note on the spring region of Gacka River (Croatia). *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 44(2), 201-208.
- Marques, J.M., Graça, H., Eggenkamp, H.G., Neves, O., Carreira, P.M., Matias, M.J., Mayer, B., Nunes, D. and Trancoso, V.N., 2013. Isotopic and hydrochemical data as indicators of recharge areas, flow paths and water-rock interaction in the Caldas da Rainha-Quinta das Janelas thermomineral carbonate rock aquifer (Central Portugal). *Journal of Hydrology*, 476, 302-313.
- Meng, Y. and Liu, G., 2016. Isotopic characteristics of precipitation, groundwater, and stream water in an alpine region in southwest China. *Environmental Earth Sciences*, 75(10), 1-11.
- Mustafa, O., Tichomirowa, M., Kummer, N.A. and Merkel, B., 2016. Assessment of water-rock interaction processes in the Karst springs of Makook Anticline (Kurdistan Region, Iraq) using Sr-isotopes, rare earth, and trace elements. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(5), 1-26.
- Sappa, G., Barbieri, M., Ergul, S. and Ferranti, F., 2012. Hydrogeological conceptual model of groundwater from carbonate aquifers using environmental isotopes (^{18}O , ^2H) and chemical tracers: a case study in Southern Latium Region, Central Italy. *Journal of Water Resource and Protection*, 4(09), 695-716.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W. and Cook, P.G., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Journal of Hydrogeology*, 10, 18-39.
- Schwarz, K., Barth, J.A.C., Postigo-Rebollo, C. and Grathwohl, P., 2009. Mixing and transport of water in a karst catchment: a case study from precipitation via seepage to the spring. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 285-292.
- Verbovšek, T. and Kanduč, T., 2015. Isotope Geochemistry of Groundwater from Fractured Dolomite Aquifers in Central Slovenia. *Aquatic Geochemistry*, 22(2), 1-21.
- Yeh, H.F., Lee, C.H. and Hsu, K.C., 2011. Oxygen and hydrogen isotopes for the characteristics of groundwater recharge: a case study from the Chih-Pen Creek basin, Taiwan. *Environmental Earth Sciences*, 62(2), 393-402.
- Yuan, R., Song, X., Zhang, Y., Han, D., Wang, S. and Tang, C., 2011. Using major ions and stable isotopes to characterize recharge regime of a fault-influenced aquifer in Beiyishui River Watershed, North China Plain. *Journal of Hydrology*, 405(3), 512-521.