

کاربرد ایزوتوپ پایدار کربن ۱۳ در تجزیه هیدروگراف چشمه های کارستی

یعقوب نیک قوجق^۱، حسین محمد زاده^۲

۱- دانشجوی دکترای هیدروژئولوژی، دانشگاه شهید بهشتی

۲- عضو هیئت علمی دانشگاه فردوسی مشهد، گروه زمین شناسی

آدرس پست الکترونیکی: yaghobnick@gmail.com

خلاصه

امروزه در مطالعات آب زیرزمینی در محیطهای کارستی بررسی و تعیین نقش بخش ایبی کارست در ذخیره سازی و انتقال آب اهمیت فراوانی دارد. مطالعات بسیاری تاکنون انجام گردیده که با استفاده از اندازه گیری ایزوتوپهای ^{18}O و D در طی یک واقعه بارش روشهایی را برای تفکیک جریان پایه از جریان ناشی از واقعه بارش در هیدروگراف دبی چشمه ها ارائه نموده اند. در محیطهای کارستی آب پس از نفوذ در خاک وارد بخش ایبی کارست گردیده و خصوصیات هیدروشیمیایی و ایزوتوپ ^{13}C متفاوتی نسبت به آب زیرزمینی موجود در سنگهای کربناته دارد. با توجه به این امر، دبی جریان پایه چشمه های کارستی شامل دو جزء مربوط به آب بخش ایبی کارست و آب زیرزمینی می گردد. بنابر این تجزیه نهایی هیدروگراف چشمه های کارستی و بدست آوردن سه پارامتر مجهول مربوط به آب ناشی از واقعه بارش، آب بخش ایبی کارست و آب زیرزمینی آبخوان کارستی ابتدا با استفاده از ایزوتوپهای ^{18}O و D تفکیک جریان پایه از جریان ناشی از واقعه بارش صورت می پذیرد و سپس با استفاده از ایزوتوپ ^{13}C سهم هریک از اجزاء مربوط به بخش ایبی کارست و آب زیرزمینی در حجم جریان پایه در هیدروگراف دبی چشمه های کارستی مشخص می گردد.

کلمات کلیدی: ایزوتوپ کربن ۱۳، تجزیه هیدروگراف، کارست

۱. مقدمه

تجزیه هیدروگراف می تواند یک روش مفید در مطالعه ارتباط بین رواناب سطحی و آب زیرزمینی باشد. روش تجزیه هیدروگراف به آب ناشی از یک واقعه بارش و آب مربوط به جریان پایه معمولاً متکی بر روشهای گرافیکی هستند که در متون مقدماتی هیدروژئولوژی از آنها بحث شده است. این روشها بخش عمده ای از حجم آب مربوط به نقطه اوج هیدروگراف جریان را به رواناب ناشی از واقعه بارش نسبت می دهند. در حالیکه در بسیاری از محیطهای طبیعی، مقدار دبی جریان در نقطه اوج هیدروگراف ناشی از واقعه بارش شامل مقادیر قابل توجهی از آب مربوط به جریان پایه می باشد که منشایی متفاوت از آب ناشی از واقعه بارش دارند.

در این نوشتار برخی از روشهای شیمیایی و ایزوتوپی در تجزیه هیدروگراف مورد بررسی قرار گرفتند. این روشها که مبتنی بر تعادل جرمی شیمیایی و یا ایزوتوپی در آب رودخانه می باشند، بویژه در محیطهای کربناته دارای کاربرد گسترده ای هستند. این روشها همچنین در تعیین پارامترهای مربوط به ذخیره آب زیرزمینی در محیط کارستی و نیز بررسی نحوه تغذیه سیستم آبخوان کارستی مفید هستند. تولر (Toller, ۱۹۶۵) با استفاده از بررسی غلظت یونهای کلسیم و کلر در آب زیرزمینی، میزان تخلیه آب زیرزمینی از یک آبخوان سنگ آهک ماسه ای کم عمق بداخل آبخوان عمیق آرتزین را در فلوریدای آمریکا مطالعه نمود. درسیس (Dreiss, ۱۹۸۹) با استفاده از بررسی غلظت یونهای کلسیم و منیزیم در چشمه های کارستی در ناحیه میسوری آمریکا، دبی تخلیه چشمه ها را به دو بخش مربوط به واقعه بارش جدید و بخش مربوط به جریان پایه یا آب پیش از واقعه بارش تفکیک نمود.

در مناطق کارستی تعیین سهم آب زیرزمینی (شامل آب بخش اپی کارست و آب آبخوان کارستی) در هیدروگراف جریان دراز مدت، می تواند اطلاعات مهم و مفیدی از نرخ تغذیه منطقه ای، خصوصیات آبخوان و کیفیت آب زیرزمینی را فراهم نماید. تجزیه هیدروگراف جریان مربوط به یک واقعه بارش شدید نیز می تواند واکنش سیستم زهکشی در برابر وقایع بارش شدید و مجزا را نشان دهد و بنابراین می تواند اطلاعات دقیق تری را از ویژگیهای هیدرودینامیک سیستم آبخوان کارستی فراهم نماید.

از آنجا که ایزوتوپهای پایدار اکسیژن، دوتریم، سولفور و کربن در تحقیقات هیدروژئولوژی بصورت گسترده مورد استفاده قرار می گیرند، اطلاعات ارزنده ای را در ارتباط با پارامترهای آبخوان، خصوصیات ذخیره و مشخص نمودن سهم آب ورودی از منابع سطحی و زیرزمینی در طول هیدروگراف جریان یک واقعه بارش شدید، فراهم می آورند. مطالعات موردی بسیاری با استفاده از ایزوتوپهای پایدار اکسیژن و دوتریم هم در مطالعات آبهای زیرزمینی و هم در آبهای سطحی توسط افرادی مانند فریتز (Fritz et al., ۱۹۷۶)، گروور و کروت (Gruver and Krothe, ۱۹۹۱) و لاکي و کروت (Lahey and Krothe, ۱۹۹۶) انجام گردیده است. اما در مورد استفاده از ایزوتوپ پایدار کربن در تجزیه هیدروگراف چشمه های کارستی مطالعات چندانی صورت نگرفته است.

۲. مدل های اختلاط ایزوتوپی

پیش از این اعتقاد بر این بود که حجم تخلیه آب چشمه های کارستی ناشی از اختلاط آب از دو منشأ مختلف است که بخشی از آن مربوط به جریان پیش از واقعه بارش (Qps) و بخش دیگر مربوط به جریان ناشی از واقعه بارش (Qr) می باشد که قبلاً توسط افرادی مثل گروور و کروت (Gruver and Krothe, ۱۹۹۱) و لاکي و کروت (Lahey and Krothe, ۱۹۹۶) بحث شده بود.

بر این اساس دو معادله زیر برای بیان تعادل جرمی آب و ترکیب ایزوتوپی آن ارائه شده است (Fritz, ۱۹۷۶):

$$Q_m = Q_r + Q_{ps} \quad (1)$$

$$Q_m \delta_m = Q_r \delta_r + Q_{ps} \delta_{ps} \quad (2)$$

در معادلات فوق Q_m دبی لحظه ای اندازه گیری شده چشمه است که هم شامل جریان پایه و هم جریان ناشی از واقعه بارش می گردد. Q_r دبی ناشی از واقعه بارش و Q_{ps} دبی مربوط به جریان پایه یا دبی پیش از واقعه بارش است. عبارات δ_m و δ_r و δ_{ps} به ترتیب نشاندهنده ترکیب ایزوتوپ پایدار در دبی خروجی چشمه پس از واقعه بارش و در آب باران و در جریان پایه پیش از واقعه بارش می باشند که بطور مستمر اندازه گیری می گردند.

با توجه به معادلات فوق برای مشخص کردن مقدار Q_r یا حجم آب ناشی از واقعه بارش ابتدا باید مقادیر δ_r و δ_{ps} مشخص باشند و سپس طبق رابطه زیر می توان مقدار Q_r را تعیین نمود:

$$Q_r = Q_m \frac{\delta_m - \delta_{ps}}{\delta_r - \delta_{ps}} \quad (3)$$

معادلات ۱ و ۲ معمولاً بعنوان مدل اختلاط دو جزئی شناخته می شوند که در مطالعات ارتباط بین آب سطحی و زیرزمینی بطور گسترده ای مورد استفاده قرار می گیرد. در مدل های اختلاط دو جزئی پارامترهای مختلفی نظیر غلظت یونهای اصلی، هدایت الکتریکی ویژه و TDS توسط محققان مورد استفاده قرار گرفته اند (Sklash and Farvolden, ۱۹۷۹; and Sklash et al., ۱۹۸۶).

مدلهای دو جزئی در مواردی کاربرد دارند که غلظت پارامترهای شیمیایی انتخابی یا ترکیب ایزوتوپی مشخصه آب زیرزمینی متفاوت از آب سطحی باشد و هیچگونه واکنش شیمیایی در طی فرآیند اختلاط در طول مسیر جریان رخ ندهد. عموماً آب زیرزمینی بدلیل زمان ماندگاری طولانی تر دارای املاح معدنی بیشتری نسبت به آب سطحی است و بکارگیری مدل اختلاط دو جزئی در این حالت بسیار مفید خواهد بود. تجزیه هیدروگراف چشمه های کارستی بوسیله برخی پارامترهای شیمیایی یا ترکیب ایزوتوپی آب مستلزم تهیه یک مدل مفهومی مناسب از سیستم آبخوان کارستی است. همانگونه که در شکل ۵-۳ بصورت شماتیک نشان داده شده، یک حوضه کارستی که توسط چشمه زهکش می گردد شامل زون اپی کارست نازک است و آب ذخیره شده در این زون دارای نقش مهمی در حفظ جریان آب زیرزمینی است.

بنابراین عبارت Q_{ps} در معادله ۱ در واقع متشکل از آب ذخیره شده در زون اپی کارست بعنوان آب معلق و نیز آب ذخیره شده در آبخوان کارستی زیرین می باشد. ویژگیهای آب در این دو بخش از لحاظ خصوصیات شیمیایی و ترکیب ایزوتوپی متفاوت است و این امر بدلیل شرایط متفاوت هریک از این بخشهاست. تفکیک جزء مربوط جریان پایه یا جریان مربوط به قبل از واقعه بارش در هیدروگراف دبی چشمه های کارستی می تواند درک ما از سیستم آبخوان کارستی را نیز بهبود بخشد. در این نوشتار برای بررسی دقیق تر و مناسب تر هیدروگراف دبی چشمه های کارستی کاربرد مدل سه جزئی مورد بررسی قرار می گیرد.

با استفاده از مدل سه جزئی جریان پایه مربوط به قبل از وقوع واقعه بارش را می توان به آب اپی کارست و آب زیرزمینی تقسیم نمود. بنابراین در نمونه های انتخابی از جریان خروجی از چشمه های کارستی، تعادل نسبت های ایزوتوپی های پایدار را می توان بصورت زیر نوشت (Ford and Williams, 1989):

$$Q_m = Q_r + Q_{pk} + Q_{ph} \quad (4)$$

$$Q_m \delta_m = Q_r \delta_r + Q_{pk} \delta_{pk} + Q_{ph} \delta_{ph} \quad (5)$$

در معادلات فوق عبارات Q_{pk} و Q_{ph} به ترتیب بیانگر سهم آب ذخیره اپی کارست و آب زیرزمینی می باشند. عبارات δ_{pk} و δ_{ph} نیز نشان دهنده نسبت های ایزوتوپی آب ذخیره اپی کارست و آب زیرزمینی می باشند. حال اگر معادلات ۴ و ۵ را بر عبارت Q_m تقسیم کنیم، خواهیم داشت:

$$1 = Q'_r + Q'_{pk} + Q'_{ph} \quad (6)$$

$$\delta_m = Q'_r \delta_r + Q'_{pk} \delta_{pk} + Q'_{ph} \delta_{ph} \quad (7)$$

در دو معادله فوق $Q'_r = \frac{Q_r}{Q_m}$ و $Q'_{pk} = \frac{Q_{pk}}{Q_m}$ و $Q'_{ph} = \frac{Q_{ph}}{Q_m}$ سهم نسبی هر کدام از اجزاء مربوط به آب باران، ذخیره اپی کارست

و آب زیرزمینی را در جریان کل دبی چشمه های کارستی پس از یک واقعه بارش نشان می دهند.

در معادله فوق دارای سه متغیر مجهول (Q_{pk} و Q_{ph} و Q_r) می باشند. با توجه به اینکه جزء مربوط به آب باران (Q_r) با بکارگیری روش های مرسوم تجزیه هیدروگراف نظیر استفاده از مقادیر ایزوتوپیهای ^{18}O و D قابل تعیین می باشد، بنابراین با فرض مشخص بودن سهم آب باران در هیدروگراف جریان چشمه کارستی، اکنون برای حل معادلات فوق و تعیین مقادیر دو متغیر مجهول باقیمانده شامل Q_{pk} و Q_{ph} به ترتیب زیر عمل می نمایم. با فرض اینکه مقادیر نسبت های ایزوتوپ پایدار در هر جزء از اجزاء سه گانه تشکیل دهنده جریان دبی چشمه کارستی اندازه گیری شده و مشخص گردیده اند می توان معادلات ۶ و ۷ را بصورت زیر باز نویسی نمود:

$$Q'_{ph} = 1 - (Q'_r + Q'_{pk}) \quad (8)$$

$$Q'_{pk} = \frac{\delta_m - Q'_r \delta_r - \delta_{ph}(1 - Q'_r)}{\delta_{pk} - \delta_{ph}} \quad (9)$$

از این دو معادله می توان برای محاسبه سهم نسبی ذخیره اپی کارست و آب زیرزمینی در هر نقطه از هیدروگراف چشمه کارستی استفاده کرد. برای انجام این کار اندازه گیری نسبت های ایزوتوپی آب خروجی از چشمه، آب باران، آب منطقه اپی کارست و آب زیرزمینی باید در طول هیدروگراف و همزمان با اندازه گیری دبی خروجی از چشمه کارستی صورت پذیرد. سپس با حل معادلات ۸ و ۹ برای هر نقطه داده ای در طول هیدروگراف دبی خروجی از چشمه کارستی و اتصال نقاط بدست آمده برای هر جزء مشابه در طول هیدروگراف می توان هیدروگراف را به اجزاء مختلف تشکیل دهنده آن تجزیه نمود.

۳. بحث

در عمل تشخیص آب اپی کارست از آب زیرزمینی بر مبنای ترکیب شیمیایی آنها و استفاده از غلظت یونهای اصلی نظیر Ca^{2+} ، Mg^{2+} و یا SO_4^{2-} همیشه آسان نیست و بویژه در سیستم آبخوان کارستی اتوژنیک اختلاف ترکیب شیمیایی این دو جزء معمولاً کوچک تر از میزان خطای آنالیز بوده و تفکیک این دو بخش را با مشکل مواجه می کند (Williams, 1983).

همچنین مطالعات متعدد نشان داده اند که اجزاء مربوط به جریان پایه دبی چشمه کارستی شامل آب ذخیره اپی کارست و آب زیرزمینی آبخوان کارستی دارای مقادیر مشابهی از نسبت های ایزوتوپی ^{18}O و D می باشند و این امر باعث محدود شدن استفاده از آنها برای تجزیه جریان پایه به اجزاء تشکیل دهنده آن می گردد.

با توجه به مباحث فوق اکنون به بررسی کاربرد نسبت ایزوتوپ ^{13}C در تجزیه جریان پایه دبی چشمه های کارستی می پردازیم. نسبت های ایزوتوپ ^{13}C در آب ذخیره اپی کارست و آب زیرزمینی آبخوان کارستی تحت تاثیر تغییر محیط از زون اپی کارست به زون آب زیرزمینی بوده و این تغییر محیط باعث جدایش ایزوتوپی در مقادیر ^{13}C آب می گردد. چنین تغییری اغلب باعث ایجاد تغییرات کافی در نسبت های ایزوتوپ ^{13}C میگردد و می توان بر اساس آن آب های با منشأ متفاوت را از یکدیگر تفکیک نمود.

تجزیه هیدروگراف در محیط های مختلف با استفاده از مدل دو جزئی بسیار معمول است (Bottomley et al., 1984, 1986; Hooper and Shoremaker, 1986; Lakey and Krothe, 1996). با این وجود تعداد بسیار اندکی از مطالعات با استفاده از مدل سه جزئی گزارش گردیده است (Wels et al., 1991; Hinton et al., 1994).

مشکل موجود در کاربرد مدل سه جزئی تا کنون انتخاب دو ردیاب محیطی با غلظتهای متفاوت و پایدار در اجزاء مختلف جریان پایه دبی چشمه ها بوده است. در یک مطالعه موردی توسط هنتون و همکاران (Hinton et al., ۱۹۹۴) در حوضه آبریز کوچکی در کانادا مقادیر ایزوتوپ ^{18}O و غلظت یون SiO_2 بعنوان ردیاب محیطی برای مشخص کردن سهم نسبی آب باران، آب ذخیره خاک و آب زیرزمینی در هیدروگراف جریان رودخانه مورد استفاده قرار گرفت. در مطالعه دیگری که توسط ولز و همکاران (Wels et al., ۱۹۹۱) انجام گردید از مقادیر ایزوتوپ D و غلظت یون SiO_2 برای تجزیه هیدروگراف دبی یک رودخانه به اجزاء تشکیل دهنده آن شامل جریان جدید سطحی، جریان جدید زیرسطحی و آب زیر سطحی قدیمی استفاده گردید. هر دو مطالعه فوق در مناطقی انجام گردید که لیتولوژی غالب آنها را رسوبات آواری یا تیلهای یخچالی با مقادیر غلظت SiO_2 قابل تشخیص تشکیل می دادند.

در محیطهای کارستی معمولاً غلظت برخی یونها نظیر SiO_2 بسیار کم است و همچنین غلظت یونهایی مانند SO_4 و سایر یونهای اصلی بدلیل پیچیدگی مسیر جریان آب در این محیط ها غیر قابل پیش بینی است. بر مبنای فرضیات ذیل ایزوتوپ ^{13}C را می توان در سیستم آبخوان کارستی بعنوان یک ردیاب مطمئن و مفید بکار گرفت:

الف) مقادیر ایزوتوپ ^{13}C در آب باران، آب ذخیره اپی کارست و آب زیرزمینی آبخوان کارستی متفاوت از یکدیگر است.

ب) مقادیر ایزوتوپ ^{13}C آب در هر یک از سه جزء فوق در طی واقعه بارش بصورت ثابت باقی می ماند.

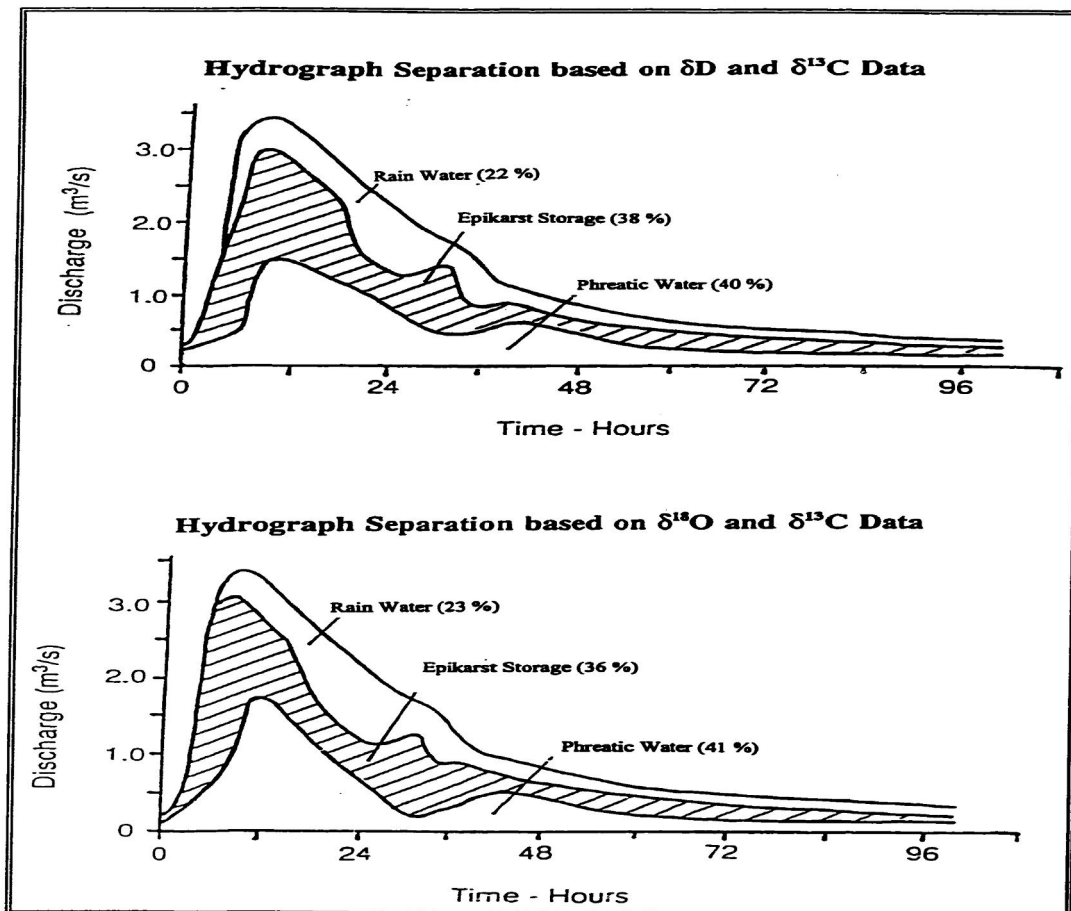
ج) رطوبت موجود در زون خاک بطور مستقیم در دبی خروجی چشمه های کارستی دخالت ندارد. این فرض در سیستمهای کارستی که ضخامت لایه خاک فوقانی نازک بوده و یا در سیستمهای کارستی که در آنها بخش اپی کارست ضخامت زیادی دارد از اعتبار بیشتری برخوردار است.

اگرچه از زمان وقوع پدیده بارش تا زمان مشاهده افزایش جریان خروجی از چشمه های کارستی ممکن است برخی تبدلات ایزوتوپی منجر به غنی تر شدن آب از ایزوتوپ ^{13}C گردد (بدلیل تماس با خاک یا سنگ کف) اما این امر با توجه به اینکه برخی از حجم آب ناشی از بارش از طریق آبروچاله ها و یا حفره های بلعنده بدخل سیستم کارستی تغذیه کننده چشمه نفوذ می کنند، اهمیت چندانی نداشته و قابل چشم پوشی است.

یو (Yu, ۱۹۹۹) برای تجزیه هیدروگراف ناشی از یک واقعه بارش شدید در یک چشمه کارستی در ایندیانا آمریکا و تعیین سهم هریک از اجزای سه گانه تشکیل دهنده هیدروگراف دبی چشمه کارستی شامل آب ناشی از بارش، آب ذخیره اپی کارست و آب زیرزمینی آبخوان کارستی علاوه بر ایزوتوپهای پایدار اکسژن و دوتریم از ایزوتوپ ^{13}C نیز استفاده نمود. او در تحقیقات خود با بکارگیری مدل اختلاط سه جزئی و اندازه گیری مقادیر ایزوتوپهای پایدار در طول هیدروگراف جریان خروجی از یک چشمه کارستی توانست بر اساس روابط ۸ و ۹ هیدروگراف جریان خروجی چشمه کارستی را بصورت کمی به اجزاء تشکیل دهنده آن تفکیک نماید. در شکل ۱ نتایج بدست آمده از تحقیقات وی نشان داده شده است. با توجه به این شکل سهم آب بارش ۲۲-۲۳ درصد و سهم آب ذخیره اپی کارست ۳۶-۳۸ درصد و سهم آب زیرزمینی آبخوان کارستی به میزان ۴۰-۴۱ درصد کل جریان خروجی از چشمه کارستی مورد بررسی وی بوده است.

تغذیه آبهای سطحی بدخل سیستم آبخوان کارستی اغلب از طریق مجاری انحلالی صورت گرفته و تخلیه سیستم کارستی نیز عمدتاً از طریق چشمه های کارستی بزرگ در خروجی حوضه های کارستی صورت می پذیرد که بعنوان نقاط عمده تخلیه سیستم آبخوان در نظر گرفته می شوند. بنابراین، کمیت و کیفیت تخلیه چشمه ها منعکس کننده ویژگیهای سیستم کارستی شامل ساختار درونی ذخیره آب، مکانیزمهای تغذیه و واکنشهای شیمیایی بین ماتریس سنگ کربناته و آب می باشند.

روش ارائه شده برای تجزیه هیدروگراف ناشی از یک واقعه بارش مجزا در این نوشتار از این نظر منحصر بفرد می باشد که در آن به منظور حل مدل اختلاط سه جزئی، ایزوتوپهای پایدار ^{18}O (یا D) و ^{13}C بطور همزمان مورد استفاده قرار می گیرند. با استفاده همزمان از این ایزوتوپها، قادر خواهیم بود اطلاعاتی در خصوص سهم نسبی آبهای با منشاء مختلف در جریان کل تخلیه چشمه های کارستی بدست آوریم. در سیستم آبخوانهای کارستی، این اطلاعات با استفاده از ایزوتوپهای پایدار اکسیژن و دوتریم به تنهایی، قابل دستیابی نیستند.



شکل ۱- تجزیه هیدروگراف یک چشمه کارستی پس از واقعه بارش به اجزاء سه گانه تشکیل دهنده آن

۴. نتیجه گیری

نتایج حاصل از این نوشتار نشان می دهند که ایزوتوپ پایدار کربن می تواند بعنوان یک ردیاب پایدار در مطالعات سیستم آبخوان های کارستی بکار رود. تجزیه هیدروگراف یک واقعه بارش مجزا با استفاده از ایزوتوپهای پایدار ^{18}O و D و ^{13}C یک گام اولیه بسوی درک بهتر رفتار هیدرودینامیک سیستم آبخوان کارستی است. با اندازه گیری دراز مدت این ایزوتوپها و بررسی تغییرات آنها در طی هیدروگراف دراز مدت جریان چشمه های کارستی می توان سهم سایر منشاء های احتمالی در تغذیه چشمه های کارستی را بررسی نمود.

۵. مراجع

- Bottomley, D. J., Craig, D., and Johnson, L. M. (۱۹۸۴). Neutralization of acid runoff by groundwater discharge to streams in Canadian Precambrian Shield watersheds: *Journal of Hydrology*. Vol, ۷۰, ۱-۲۶.
- Bottomley, D. J., Craig, D. and Johnson, L. M. (۱۹۸۶). Oxygen- 18 studies of snowmelt runoff in a small Precambrian Shield watershed: implications for stream acidification in acid-sensitive terrain: *Jornal of Hydrogeology*. Vol, ۸۸, ۲۱۳-۲۲۴.
- Dreiss, S. J. (۱۹۸۹). Regional scale transport in a karst aquifer component separation of spring flow hydrograph: *Water Resources Research*. ۲۵, no. ۱, ۱۱۷-۱۲۵.
- Ford, D. C., and Williams, P. W. (۱۹۸۹). *Karst Geomorphology and Hydrology*: Unwin Hyman Ltd., ۶۰۱ pp.



- Fritz, P., Cherry, J. A., Weyer, K. U., and Sklash, M. (۱۹۷۶). Storm runoff analysis using environmental isotopes and major ions, interpretation of environmental isotope and hydrogeochemical data in groundwater hydrology. IAEA. Vienna. ۱۱۱-۱۳۰.
- Gruver, B., and Krothe, N. C. (۱۹۹۱). Stable isotope separation of spring discharge in a major karst spring, Mitchell Plain, Indiana, USA: Proceedings of the third Conference on Hydrology, Ecology, Monitoring and Management of Groundwater in Karst Terrances, Nashville, Tennessee, U. S. EPA and the Association of Groundwater Scientist and Engineers, NGWA, Dublin, Ohio, ۲۶۵-۲۸۵, December ۱۹۹۱.
- Hinton, M. J., Schiff, S. L., and English, M. C. (۱۹۹۴). Examining the contribution of glacial till water to storm runoff using two and three component hydrograph separations: Water Resources Research. ۳۰, no ۴, ۹۸۳-۹۹۳.
- Hooper, R. P. and Shoremaker, C. A. (۱۹۸۶). A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation: Water Resources Research. vol. ۲۲, no. ۱۰, ۱۴۴۴-۱۴۵۴.
- Lahey, B. L. and Krothe, N. C. (۱۹۹۶). Stable isotopic variation of storm discharge from a Perennial Karst spring, Indiana: Water Resources Research. vol. ۳۲, ۷۲۱-۷۳۱.
- Sklash, M. G. and Farvolden, R. N. (۱۹۷۹). The role of groundwater in storm runoff. Journal of Hydrology. vol. ۴۳, ۴۵-۶۵.
- Sklash, M. G., Stewart, M. K., and Pearce, A. J. (۱۹۸۶). Storm runoff generation in humid headwater catchments ۲. A case study of hillslope and low- order stream response: Water Resource Research. ۲۲, no. ۸, ۱۲۷۲-۱۲۸۲.
- Toler, L. G. (۱۹۶۵). Use of specific conductance to distinguish the base-flow components in Econfina Creek. Florida: U. S. Geological Survey Professional Paper ۵۲۵-L.
- Wels, C., Cornett, J., and LaZerte, B. (۱۹۹۱). Hydrograph separation: a comparison of geochemical and isotopic tracers: Journal of Hydrology. vol. ۱۲۲, ۲۵۳-۲۷۴.
- Williams, P. W. (۱۹۸۳). The role of the subcutaneous zone in karst hydrology: Journal of Hydrology. vol. ۶۱, ۴۵-۶۷.
- Yu, G. H. (۱۹۹۹). Hydrogeology and Geochemistry of the Groundwater in a Karst terrain of southern Indiana, Indiana University. ۱۶۹ pp.