

تفکیک جریان پایه از رواناب سطحی به کمک ایزوتوپ پایدار اکسیژن ۱۸ در حوضه کارستی ابوالعباس-استان خوزستان

علی محمد آخوندعلی^۱، حیدر زارعی^{۲*}، حسین محمدزاده^۳ و فریدون رادمنش^۴

۱- استاد، دانشکده‌ی مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز
۲- استادیار، دانشکده‌ی مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز
۳- استادیار، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد
۴- استادیار، دانشکده‌ی مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

zareih@scu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۷/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۳/۱

چکیده

اگر چه مدل‌های تجربی توسعه داده شده برای جداسازی دبی پایه نیازهای مهندسی را برای ارزیابی حجم رواناب حاصل از یک رگبار یا زهکشی یک حوضه برطرف می‌کند، اما درک واقعی از فرایندهای موجود ارائه نمی‌نماید. مدل‌های معمول رواناب غالباً فرض می‌کنند که جریان پایه حاصل از آب زیرزمینی به رودخانه در دوره‌های پرآبی ناچیز می‌باشد. روش‌های ردیابی ایزوتوپی در نقاط مختلف دنیا نشان می‌دهد که چنین نیست و همین سبب ایجاد نگرشی اساسی به فرآیند تولید رواناب شده است. در این تحقیق در طول زمستان سال ۱۳۸۹، سه واقعه دارای شرایط رطوبت پیشین و شدت متفاوت و سیلاب متناظر آن‌ها نمونه برداری شد. نمونه‌ها جهت آنالیز محتوای ایزوتوپی به کشور کانادا ارسال گردید. نتایج نشان داد که سهم مؤلفه رواناب سطحی در شرایط خشک ناچیز می‌باشد و در شرایط مرطوب سهم این مؤلفه افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که به‌طور کلی سهم مؤلفه آب زیرزمینی در حوضه کارستی ابوالعباس با توجه به توسعه کارست در این حوضه، زیاد می‌باشد.

کلید واژه‌ها: جریان پایه، رواناب سطحی، ایزوتوپ پایدار، اکسیژن ۱۸، حوضه کارستی، ابوالعباس.

Base Flow Separation Using ¹⁸O Stable Isotopes in Abolabas Karstic Basin-Khozestan Province

A. M. Akhond Ali¹, H. Zarei², H. Mohammadzadeh³ and F. Radmanesh⁴

- 1- Professor, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz, Iran.
- 2-, Assistant Professor, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz, Iran.
- 3- Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdosi University of Mashhad, Iran.
- 4- Assistant Professor, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz, Iran.

Received: 21.May.2012

Accepted: 2.Oct.2012

Abstract

Although the empirical models of base flow separation meet the engineering desires in evaluating the volume of storm runoff or total drainage of a basin, however, they do not offer an actual understanding of the existing processes. The common runoff models often assume that the groundwater base flow into the river during wet season is minor. The tracing isotopic methods show that it is not the case and it has caused a close look at the runoff generation processes. In this study, during the winter 2010-2011, three rainfall events with different antecedent moisture and intensity and the corresponding flood were sampled to analyze isotopic composition in

stable isotope laboratory of Ottawa University. Results showed that surface runoff component was minor for the low moisture conditions, and it increased for the high moisture conditions. Also, the contribution of groundwater component to total runoff was considerably large due to karst development in the Abolabas basin.

Key words: Base flow, Surface runoff, Stable isotope, 18-Oxygen, Karstic basin, Abolabas.

مقدمه

نمی‌نماید، بلکه غالباً فرض می‌کنند که جریان پایه حاصل از آب زیرزمینی به رودخانه در دوره‌های پرآبی ناچیز می‌باشد (۷). روش‌های ردیابی (ایزوتوپی) در نقاط مختلف دنیا نشان می‌دهند که چنین نیست و همچنین سبب ایجاد نگرشی اساسی به فرآیند رواناب شده است (۵) و (۷).

گرچه مطالعات فیزیکی نشان داده‌اند که در برخی حوضه‌ها جریان حاصل از بخش‌های اشباع (جریان پایه)، نقش مؤثری در تولید رواناب دارند ولی کمتر در مورد نقش آب زیرزمینی در تولید آب بحث شده است (۱۰). بسیاری از منابع در مبحث تولید رواناب، جریان آب‌های زیرزمینی واقعی را به عنوان یک عامل مهم و تأثیرگذار در فرآیند تولید رواناب حاصل از رگبار و ذوب شدن برف نادیده گرفته‌اند. فریز^۱ (۹) نظر هیدرولوژیکی خود را در این موضوع به‌طور خلاصه چنین عنوان می‌کند: "جریان آب‌های زیرزمینی واقعی به ندرت از علل عمده تولید رواناب حاصل از رگبار هستند، نقش اصلی آن در تداوم جریان در دوره‌های کم آبی بین وقایع بارش باران و ذوب برف می‌باشد".

در واقع، تصور این‌که چگونه حرکت کند آب‌های زیرزمینی می‌تواند عکس‌العملی سریع جهت مشارکت در اوج رواناب حاصل از یک رگبار یا ذوب برف داشته باشد، دشوار است. با این حال در دهه گذشته، در سطح حوضه با استفاده از روش‌های ایزوتوپی (ردیاب طبیعی) مشخص شده است که در مناطق مرطوب و نیمه مرطوب اغلب آب‌های زیرزمینی نسبت به رواناب حاصل از ذوب برف سهم بیشتری در تولید رواناب دارند (۸ و ۲۵).

هینتون و همکاران^۲ (۱۴) اکسیژن^{۱۸} و سیلیس را به عنوان شاخص‌های مکمل به کار بردند و با یک نمودار سه مؤلفه آب زیرزمینی (جریان پایه)، آب خاک^۳ و آب جدید^۴ (رواناب حاصل از رگبار) را از هم تفکیک کردند، این مطالعه نشان داد که می‌توان مؤلفه‌های مختلف شرکت کننده در تولید رواناب حوضه را مشخص نمود.

بزرگ‌ترین و جامع‌ترین مطالعات ایزوتوپی توسط کندال و کوپلن^۵ (۱۹) در آمریکا انجام شده است. آن‌ها اظهار کردند که از ترکیب ایزوتوپی رودخانه‌ها، که نشأت گرفته از ترکیب ایزوتوپی باران است،

امروزه تحقیقات در زمینه ایزوتوپ‌های محیطی اهمیت زیادی پیدا کرده است. به‌طور کلی روش‌های ردیابی ایزوتوپی از جدیدترین پیشرفت‌های علمی در مطالعه منابع آب بوده و می‌توانند استنباط و درک بهتری از چرخه آب و در نتیجه اطمینان به موفقیت در برنامه‌ریزی منابع آب و رسیدن به اهداف را ارائه دهند. در دهه ۱۹۶۰ روش‌های ایزوتوپی به عنوان ابزار مکمل روش‌های هیدرولوژیکی متداول برای پاسخ به سوالاتی مانند هنگامی که باران می‌بارد آب کجا می‌رود، چه مسیری را طی می‌کند تا به آبراهه برسد و چه مدتی در حوضه جریان دارد، معرفی شدند (۲۲). ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن^{۱۸} و دوتریم در تحقیقات هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی کاربرد زیادی دارند و می‌توانند در مطالعات آب‌های سطحی برای دینامیک اختلاط رودخانه (۳۵)، بررسی نشت در کانال‌های آبیاری (۱۱) و در جداسازی آب‌نمودها (۶) و در مطالعات آب‌های زیرزمینی در تحقیقات تغذیه آب‌های زیرزمینی (۳۱)، تعیین تأثیر تبخیر بر سیستم‌های آب زیرزمینی (۱۲)، تعقیب و ردیابی آب‌های زیرزمینی و اثرهای متقابل این آب‌ها با آب‌های سطحی (۱۳ و ۱۸) مورد استفاده واقع شوند.

در مقیاس حوضه آبریز نیز استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار آب در مطالعات هیدرولوژی حوضه فراگیر شده است. ردیاب‌های طبیعی روش‌هایی برای افتراق مکانی فراهم می‌کند که آب از کجا آمده و یا از نظر زمانی چه موقع به جریان در آمده است. چنین تخمین‌هایی می‌تواند به بهبود درک ما از فرآیندها در مقیاس حوضه آبریز کمک کند (۲۳).

به‌طور کلی آب رودخانه از دو منبع تامین می‌شود: رواناب سطحی و بارندگی یا جریان‌های زیر سطحی کم عمق سریع، تخلیه آب‌های زیرزمینی به داخل رودخانه. درصد مشارکت این منابع در حوضه‌های مختلف بسته به سطح زهکشی، پارامترهای آب و هوایی، وضعیت زمین‌شناسی و خاکشناسی و فعالیت‌های انسانی متفاوت می‌باشد. به‌طور کلی تغییرات فصلی در رودخانه‌هایی که منبع اصلی تامین آب آن‌ها بارندگی است، بیشتر و در رودخانه‌هایی که آب آن‌ها از آب زیرزمینی تامین می‌گردد، کمتر است (۳۰).

رواناب سطحی حاصل از رگبار، مهم‌ترین پارامتر برای روندیابی جریان آب در طول یک کانال، سیستم زهکشی و یا در آبراهه‌های طبیعی است. هر چند که با مدل‌های تجربی توسعه داده شده می‌توان حجم رواناب حاصل از یک رگبار یا زهکشی یک حوضه را ارزیابی نمود، اما این مدل‌ها نه تنها درک واقعی از فرایندهای موجود ارائه

1- Freeze

2- Hinton et al.

3- Soil water

4- New water

5- Kendall and Coplen

به رواناب زیرسطحی می‌باشد. این نتایج با مقادیر کم ضریب رواناب مشاهده شده (۴۴/۵-۱۶/۷ درصد) هر دو واقعه همخوانی داشت. با توجه به اهمیت موضوع و این که تاکنون در ایران در زمینه تفکیک جریان پایه از رواناب سطحی به کمک ردیاب‌های ایزوتوپی مطالعه‌ای صورت نگرفته است، بنابراین در این مطالعه به کمک ایزوتوپ پایدار اکسیژن ۱۸ به بررسی نقش آب زیرزمینی در تولید سیلاب در حوضه کارستی ابوالعباس با اقلیم نیمه خشک پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

مطالعه در حوضه آبریز رودخانه ابوالعباس (از سرشاخه‌های رودخانه رود زرد) با مساحت ۲۸۳ کیلومتر مربع واقع در جنوب غربی ایران و در ایستگاه آسنجی پل منجیق (با مختصات جغرافیایی ۳۱°۵۳′ طول شرقی و ۳۱°۳۱′۰۷″ عرض شمالی) انجام شده است. تجهیزات اندازه‌گیری نصب شده در ایستگاه شامل اشل یکپارچه چهار متری، پل تلفریک و لیمنوگراف (دیتالاگر) می‌باشد. ارتفاع این حوضه آبریز کوهستانی از ۶۹۰ تا ۳۲۸۰ متر از سطح دریا (با ارتفاع متوسط ۱۸۸۵ متر از سطح دریا) تغییر می‌کند و ساختاری پیچیده با زیرحوضه‌هایی با اندازه‌های مختلف دارد. پارامترهای مهم حوضه در جدول (۱) ارائه شده است (۱).

سازندهای آهکی ضخیم لایه با گسترش ۶۴ درصدی در سطح حوضه، آب و هوای مساعد توسعه کارست و تکنونیک فعال، شرایط مناسبی برای ایجاد و گسترش کارست در محدوده مورد مطالعه فراهم آورده است. اشکال مختلف کارستی از جمله کارن، فروچاله و چشمه‌های کارستی در حوضه آبریز مشاهده می‌گردد. ۱۵ چشمه در حوضه آبریز وجود دارد که بزرگ‌ترین آن چشمه مال آقا با دبی متوسط ۲۴۳۰ لیتر بر ثانیه می‌باشد. تغییرات آبدهی چشمه مال آقا نسبت به زمان نشان می‌دهد که حداکثر آبدهی این چشمه با مقدار تقریبی ۵۲۰۰ لیتر بر ثانیه در اردیبهشت ماه اتفاق افتاده است. همچنین در حدود ۴۰ درصد از آبدهی چشمه مربوط به جریان سریع است که این امر نشان دهنده توسعه سیستم مجرای در حوضه آبریز چشمه است. همچنین نسبت دبی حداکثر به حداقل (۴/۶۳) نیز مؤید این مطلب است. وجود این اشکال کارستی نشان دهنده پتانسیل بالای توسعه کارست در اعماق می‌باشد (۲).

می‌توان برای بازسازی اقلیم منطقه کمک گرفت، اما باید توجه داشت که محتوی ایزوتوپی آب رودخانه تحت تأثیر کاربری اراضی، ارتباط بین رودخانه و آبخوان قرار گرفته و ممکن است تغییر یابد. بنابراین، مهم است جهت درک بهتر وضعیت هیدرولوژیکی رودخانه‌های مختلف، تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه‌ها، ارزیابی و تعیین تأثیر بشر بر جریان رودخانه‌ها و همچنین تهیه و ارزیابی مدل‌های هیدرولوژیکی در مقیاس جهانی، مطالعات پیش ایزوتوپ پایدار طولانی مدت انجام گردد.

لادون و اسلیمیکر^۱ (۲۲) جهت تفکیک جریان پایه از سطحی، در دو حوضه در رشته کوه‌های ساحلی یکی از ایالت‌های غربی کانادا، از هدایت الکتریکی، غلظت سیلیس و ایزوتوپ‌های پایدار دوتریم و اکسیژن ۱۸ استفاده کردند، نتایج آن‌ها نشان داد که سهم مشارکت جریان پایه خیلی بیشتر از حد انتظار بود (حدود ۹۰-۲۵ درصد در حوضه مرتفع و حدود ۹۰-۶۰ درصد در حوضه کم ارتفاع).

در تحقیقی که توسط لیون و همکاران^۲ (۲۳) انجام شد، امکان جداسازی هیدروگراف تک واقعه بر اساس محتوای دوتریم و اکسیژن ۱۸ موجود در بارش در جنوب غربی ایالات متحده آمریکا ارائه گردید. این مطالعه نشان داد که انتخاب ایزوتوپ مورد استفاده، نتایج حاصل از تفکیک هیدروگراف را تحت تأثیر قرار می‌دهد، به ویژه در حالتی که ترکیب ایزوتوپی آب باران در مقیاس حوضه آبریز از لحاظ زمانی و مکانی متنوع باشد.

در رابطه با قابلیت اجرا و محدودیت استفاده از ردیاب‌های ایزوتوپی جهت تعیین سهم مشارکت منابع مختلف در تولید رواناب در مقیاس‌های مختلف در یک حوضه آبریز نیمه خشک در تانزانیا تحقیقی توسط بوت و همکاران^۳ (۵) صورت گرفت، نتایج این تحقیق نشان داد که در مقیاس کوچک (۰/۳ کیلومتر مربع) برای همه ردیاب‌ها، سهم آب قدیمی^۴ (جریان پایه) بین ۸۲-۷۴ درصد می‌باشد. در مقیاس‌های بزرگتر (۲۶ کیلومتر مربع) دو زیرحوضه در تولید جریان مشارکت داشتند.

مانیانیزا و همکاران^۵ (۲۹) به بررسی استفاده از پارامترهای هیدروشیمی و ایزوتوپی جهت جداسازی اجزای مختلف رواناب جریان رودخانه در دو سیلاب یک حوضه متوسط مقیاس در کشور رواندا پرداخته‌اند. در این تحقیق به کمک ایزوتوپ‌های دوتریم و اکسیژن ۱۸ و پارامترهای هیدروشیمیایی کلر و سیلیس محلول به تفکیک دو و سه مؤلفه‌ای آبنمود پرداخته شد، نتایج حاصل از جداسازی دو مؤلفه‌ای آبنمود با استفاده از سیلیس محلول و کلرید توسط نتایج جداسازی سه مؤلفه‌ای با استفاده از سیلیس محلول و دوتریم تأیید شد. نتایج این تحقیق نشان داد که در دو سیلاب بیش از ۸۰ درصد از سیلاب مربوط

1- Laudon and Slaymaker

2- Lyon et al.

3- Bohte et al.

4 Old water

5- Munyaneza et al.

جدول ۱- خلاصه مشخصات فیزیوگرافی حوضه آبریز رودخانه ابوالعباس در ایستگاه آسنجی پل منجیق (۱)

پارامتر	مشخصات فیزیوگرافی	پارامتر	مشخصات فیزیوگرافی
محیط (کیلومتر)	۸۵/۵۵	ارتفاع متوسط حوضه (متر)	۱۸۸۵
مساحت (کیلومتر مربع)	۲۸۳	شیب متوسط حوضه (درصد)	۱۹/۴۳
ضریب گراویلیوس	۱/۴۳	شیب خالص رودخانه (درصد)	۴/۳۸
حداکثر ارتفاع حوضه (متر)	۳۲۸۰	طول رودخانه (کیلومتر)	۳۸/۹۶
حداقل ارتفاع حوضه (متر)	۶۹۰	زمان تمرکز حوضه (ساعت)	۵/۰

روش تحقیق و فرضیات

استفاده از ردیاب‌ها در تفکیک آب‌نمود براساس مغایرت و اختلاف موجود بین غلظت ردیاب در آب زیرزمینی حوضه آبریز و رگبار باران می‌باشد، در غیر این صورت، تفکیک آب‌نمود با استفاده از ردیاب امکان پذیر نمی‌باشد.

در مطالعات تفکیک دو مؤلفه‌ای آب‌نمود، فرض بر این است که دو مؤلفه آب زیرزمینی و بارندگی در تولید رواناب مشارکت دارند. مؤلفه رواناب حاصل از بارندگی به عنوان جریان سطحی و زیرسطحی (جریان در لایه نفوذپذیر خاک در عمق چند سانتی‌متری) قلمداد می‌گردد. تفکیک دو مؤلفه‌ای آب‌نمود به دو مؤلفه جریان پایه (قبل از رگبار) و رواناب حاصل از رگبار توسط رابطه زیر توصیف می‌گردد (۲۰):

$$Q_t = Q_{gw} + Q_r \quad (۱)$$

که در آن Q_t : دبی کل جریان، Q_{gw} : دبی آب زیرزمینی (قبل از رگبار) و Q_r : رواناب حاصل از رگبار می‌باشد.

با نمونه‌گیری و آنالیز نمونه‌های آب از جریان پایه قبل از رگبار و آب بارندگی و آب رودخانه در هنگام بارندگی، محتوای ایزوتوپ آن‌ها (C) مشخص می‌شود و می‌توان قانون بقا جرم را به صورت زیر نوشت:

$$Q_t C_t = Q_{gw} C_{gw} + Q_r C_r \quad (۲)$$

با فرض

$$n = \frac{Q_{gw}}{Q_t} \quad (۳)$$

از رابطه (۱) حاصل می‌شود:

$$1 - n = \frac{Q_r}{Q_t} \quad (۴)$$

رابطه (۲) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$C_t = n C_{gw} + (1 - n) C_r \quad (۵)$$

یا

$$n = \frac{C_t - C_r}{C_{gw} - C_r} \rightarrow Q_{gw} = \left(\frac{C_t - C_r}{C_{gw} - C_r} \right) Q_t \quad (۶)$$

با فرض تغییرات جزئی محتوای ایزوتوپی آب زیرزمینی در نقاط مختلف، این قانون بقای جرم را می‌توان برای هر نقطه در طول آبراهه به کار برد.

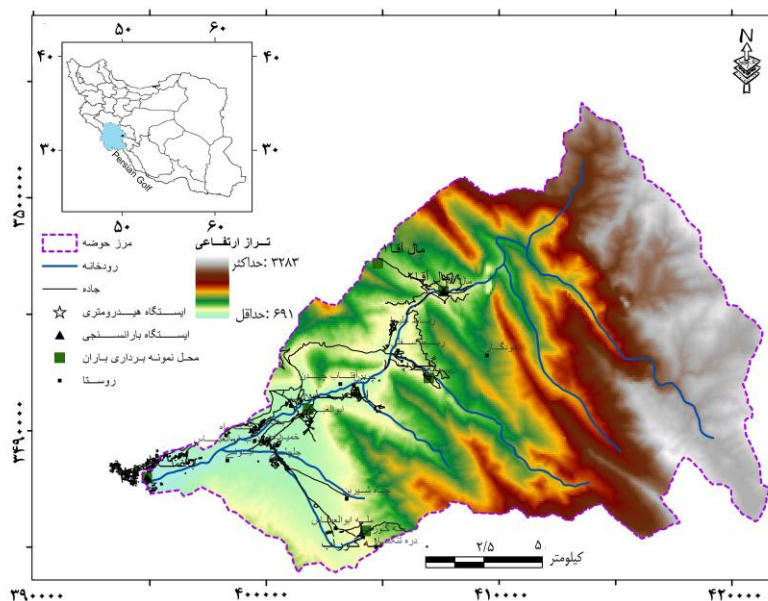
این معادله برای اولین بار توسط پیندر و جونز (۳۱) در سال ۱۹۶۹ برای یک نوع ردیاب شیمیایی جهت جدا نمودن آب‌نمود رگبار سه حوضه آبریز کوچک واقع در کانادا به کار گرفته شد، آن‌ها دریافتند که آب زیرزمینی ۳۲ الی ۴۲ درصد از دبی پیک عبوری برای رگبارهای مورد مطالعه را شامل می‌شود.

هیئتون و همکاران (۱۴) و کندال و همکاران (۲۰) اجزای مهم رواناب و محدودیت‌های مدل دو مؤلفه‌ای را چنین ارائه کردند که ترکیب ایزوتوپی باران، آب حاصل از ذوب برف، آب خاک و آب زیرزمینی تغییر می‌کنند و غالباً با هم تفاوت دارند. بنابراین، برای هر مؤلفه اضافی، پارامتر مستقل دیگری در توازن جرمی مورد نیاز است. استفاده از این روش براساس فرضیات ذیل می‌باشد (۶، ۱۴ و ۳۲):

(۱) اختلاف معنی‌داری بین غلظت ردیاب در مؤلفه‌های مختلف وجود دارد.

(۲) غلظت ردیاب نسبت به زمان ثابت است و نسبت به مکان قابل اندازه‌گیری می‌باشد.

(۳) مشارکت یک مؤلفه اضافی قابل اغماض می‌باشد و یا غلظت ردیاب آن مؤلفه شبیه یکی از مؤلفه‌ها است.



شکل ۱- موقعیت حوضه مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری

جدول ۲- پارامترهای آماری نتایج آنالیز ایزوتوپ اکسیژن ۱۸- (بر حسب %VSMOW)

بارش سوم	بارش دوم	بارش اول	پارامتر	
۱۶	۱۶	۱۰	تعداد	رودخانه
-۴/۳۰	-۲/۹۱	-۴/۵۱	حداکثر	
-۴/۷۳	-۳/۹۵	-۴/۶۳	میانگین	
-۴/۹۱	-۴/۶۵	-۴/۷۰	حداقل	
۰/۱۷	۰/۶۹	۰/۰۶	انحراف معیار	
بارش سوم	بارش دوم	بارش اول	پارامتر	باران
۶	۶	۷	تعداد	
-۳/۰۷	-۰/۱۳	-۰/۹۰	حداکثر	
-۳/۶۶	-۱/۴۰	-۱/۸۳	میانگین	
-۴/۲۱	-۲/۰۶	-۲/۸۳	حداقل	
۰/۴۳	۰/۷۱	۰/۷۶	انحراف معیار	

بین‌المللی انرژی اتمی^۱، طوری طراحی شد که تا زمان نمونه برداری، تبخیر از سطح آب صورت نگیرد. ظروف در نقاط مختلف حوضه قبل از هر بارش نصب و نمونه آب باران جمع آوری شد (شکل ۱). هم‌زمان با شروع بارندگی و شروع سیلاب در خروجی حوضه مورد مطالعه از آب رودخانه به صورت منظم هر نیم ساعت نمونه‌هایی برداشت گردید. در نمونه‌برداری جهت تعیین ایزوتوپ اکسیژن ۱۸، از ظروف کوچک پلی‌اتیلنی ۲۵ میلی لیتری استفاده شد. در هنگام نمونه

۴) ردیاب به خوبی مخلوط شده و پایدار می‌باشد.
 ۵) غلظت ردیاب مؤلفه‌های مختلف مستقل از هم بوده و همبستگی ندارند.
 به هر حال، معیابی در استفاده از ردیاب‌های ایزوتوپ پایدار وجود دارد. از جمله شرایط استفاده از آنها در هر واقعه و رویداد برآورده نمی‌شوند و آنالیز ایزوتوپی نمونه‌ها بسیار گران است (۱۵).
 با توجه به این‌که فرآیند تبخیر محتوای ایزوتوپی را به شدت تغییر می‌دهد، در صورت مناسب نبودن ظروف جمع‌آوری آب باران و کمترین تبخیر، نتایج به حد زیادی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در این تحقیق ظرف جمع‌آوری نمونه آب باران طبق استاندارد جدید اژانس

1- International Atomic Energy Agency.

بارش دوم به میزان ۲۵/۲ میلی‌متر در روز ۲۵ دی ماه اتفاق افتاد. با توجه به بارش پنج روز قبل این بارش که در حدود ۳۱ میلی‌متر بود می‌توان گفت که این بارش در شرایط کاملاً مرطوب اتفاق افتاده است. دبی حداکثر سیلاب حاصل از این بارش ۷۴۱۰ لیتر بر ثانیه برآورد گردید. بارش سوم با مقدار بارش ۱۴/۲ میلی‌متر در دو روز ۱۰ و ۱۱ بهمن ماه اتفاق افتاد. این بارش نیز شبیه بارش دوم در شرایط مرطوب اتفاق افتاده و سبب ایجاد سیلابی با دبی حداکثر ۱۱۹۰۰ لیتر بر ثانیه گردیده است.

با توجه به اینکه بیشترین شدت بارش مربوط به اولین بارش بوده که سیلابی با دبی حداکثر ناچیزی تولید کرده است ولی بارش دوم و سوم که با شدت خیلی کمتر و در شرایط مرطوب رخ داده‌اند، سیلاب بزرگتری تولید کرده‌اند (شکل ۲)، بنابراین، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که اهمیت بارش پیشین به نسبت شدت بارش در تولید سیلاب بیشتر است. در ضمن در بارش سوم با شدت بارش بیشتر نسبت به بارش دوم با شرایط رطوبتی یکسان دبی حداکثر و سیلاب بزرگتری ایجاد شده است و این موضوع اهمیت شدت بارش در زمانی که خاک در شرایط مرطوب باشد را می‌رساند. لازم به ذکر است که جهت ارائه نتیجه‌گیری قطعی ضروری است تعداد بارش بیشتری با شدت و مقدار بارش پیشین متفاوت، مورد ارزیابی قرار گیرند.

برداری ظروف با آب مورد نظر کاملاً سستشو داده شد و به طوری که هیچ‌گونه حباب در ظرف باقی نماند، نمونه برداری صورت گرفت. نمونه‌ها به کشور کانادا ارسال و در آزمایشگاه ایزوتوپی دانشگاه اوتاوا آنالیز گردید. در مجموع ۶۰ نمونه تهیه شد که ۱۸ نمونه مربوط به آب باران (هر بارش در شش محل) و ۴۲ نمونه مربوط به رودخانه می‌باشد. سه نمونه از آب رودخانه قبل از شروع سیلاب، به عنوان آب زیرزمینی در نظر گرفته شد. محتوای ایزوتوپی آب رودخانه قبل از بارندگی در نقطه نمونه‌برداری به عنوان غلظت جریان پایه و غلظت آب باران به عنوان غلظت رواناب سطحی فرض می‌گردد (۶). نتایج در جدول (۲) ارائه شده است:

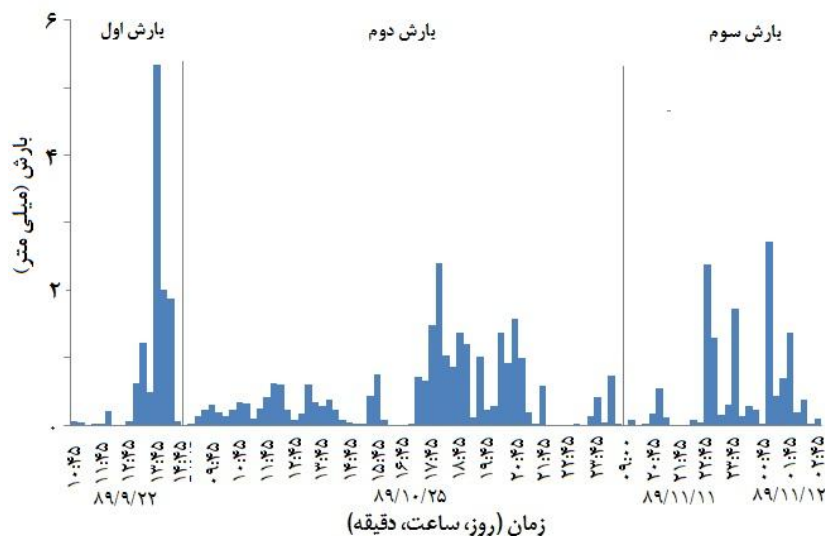
نتایج و بحث

در طول زمستان سال ۱۳۸۹ از سه واقعه بارندگی با شرایط رطوبت پیشین و شدت متفاوت و سیلاب متناظر آن‌ها نمونه‌برداری گردید. خلاصه‌ای از اطلاعات وقایع بارندگی و نتایج اندازه‌گیری پارامترهای صحرایی و نتایج حاصل از آنالیز ایزوتوپی در جدول (۳) ارائه شده است.

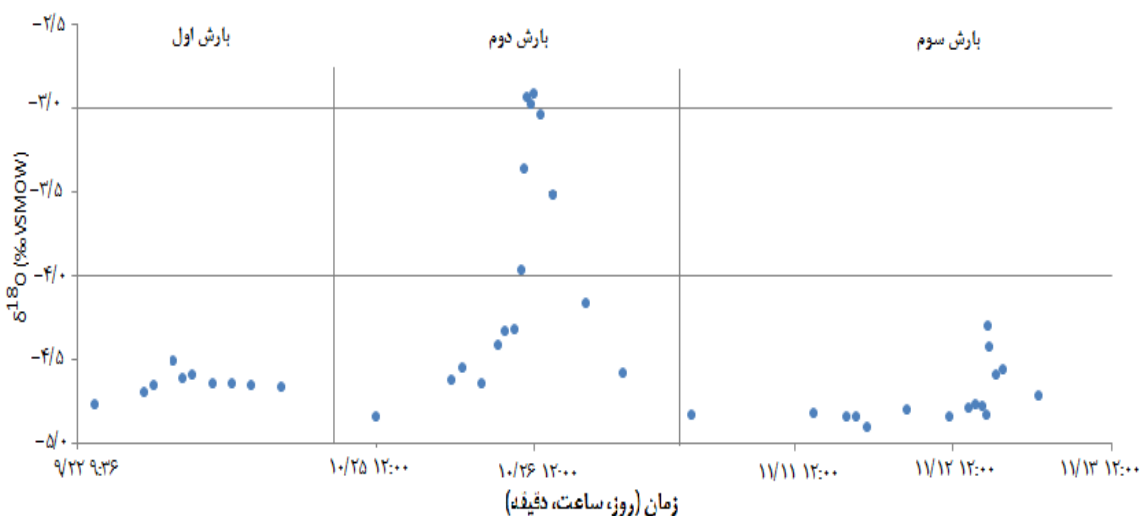
بارش اول که اولین بارش در سال آبی ۱۳۸۹-۹۰ بود با مقدار ۱۲ میلی‌متر به مدت ۲/۵ ساعت در ۲۲ آذر ماه در شرایط کاملاً خشک اتفاق افتاد. حداکثر دبی سیلاب حاصل از این بارش در خروجی حوضه (ایستگاه پل منجینق) ۲۲۳۰ لیتر بر ثانیه محاسبه شد.

جدول ۳- خصوصیات سه بارش مورد بررسی و سیلاب متناظر آنها

واقعه	تاریخ وقوع	بارش (میلی‌متر)	بارش پنج روز قبل (میلی‌متر)	نوع منبع	$\delta^{18}\text{O}$ (%VSMOW)	EC (mohs/cm)	TDS (mg/l)	pH
۱	۱۳۸۹/۹/۲۲	۱۲/۰	۰/۰	آب رودخانه	-۴/۷۷	۵۹۱	۲۶۰	۸/۷۵
				باران	-۱/۸۳	۱۵۸	۷۲	۸/۶۹
۲	۱۳۸۹/۱۰/۲۵	۲۵/۲	۳۰/۰	آب رودخانه	-۴/۸۵	۵۷۸	۲۸۹	۸/۴۹
				باران	-۳/۹۵	۵۵۸	۲۷۹	۸/۴۵
				آب رودخانه	-۱/۴۰	۶۱	۳۱	۸/۸۳
				باران	-۴/۸۳	۵۴۷	۲۷۵	۸/۵۱
۳	۱۳۸۹/۱۱/۱۱	۱۴/۲	۵۸/۵	آب رودخانه	-۴/۷۳	۵۹۳	۲۹۷	۸/۴۵
				باران	-۳/۶۶	۵۶	۲۸	۸/۵۴



شکل ۲- هایتوگراف بارش‌های مورد بررسی



شکل ۳- تغییرات محتوای ایزوتوپی (^{18}O VSMOW) آب رودخانه در سه بارش مورد بررسی (سال ۱۳۸۹)

گردد. بیشترین تغییرات محتوای ایزوتوپی بارش‌ها مربوط به بارش دوم با کمترین شدت بارش و کمترین تغییرات مربوط به بارش اول با بیشترین شدت بارش از بارش‌های مورد بررسی می‌باشد. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که با افزایش شدت بارش، محتوای ایزوتوپی اکسیژن ۱۸ باران سبک‌تر می‌شود که با نتایج حاصل از تحقیق فاروقی ۱۳۸۷ مطابقت دارد (۴). با توجه به مشخص شدن محتوای ایزوتوپی آب زیرزمینی، آب باران و آب رودخانه (جدول ۲)، براساس رابطه (۶) برای سه بارش مورد بررسی تفکیک جریان پایه از رواناب سطحی صورت گرفته است. نتایج در جدول (۴) و شکل (۴) ارائه شده است.

بر اساس نتایج آنالیز ایزوتوپ اکسیژن ۱۸، تغییرات محتوای ایزوتوپی آب رودخانه در سه بارش مورد بررسی در شکل (۳) ترسیم شد. در هر سه واقعه محتوای ایزوتوپی اکسیژن ۱۸ قبل از بارش در جریان رودخانه (جریان پایه) خیلی کمتر از غلظت آن در آب باران است. در مطالعات قبلی در برخی موارد محتوای ایزوتوپی اکسیژن ۱۸ آب زیرزمینی کمتر از بارش بوده است (۲۳، ۲۴ و ۳۳).

کمترین محتوای ایزوتوپی اکسیژن ۱۸ آب رودخانه مربوط به نمونه‌های قبل از سیلاب می‌باشد (نمونه‌های معرف آب زیرزمینی) که با شروع سیلاب آب رودخانه از نظر محتوای ایزوتوپی سنگین‌تر شده و با اتمام سیلاب محتوای ایزوتوپی تقریباً به حالت اولیه بر می‌-

جدول ۴- مقادیر دبی کل، جریان پایه و رواناب سطحی (بر حسب لیتر بر ثانیه)

واقعۀ	زمان	دبی کل	دبی	دبی آب	واقعۀ	زمان	دبی کل	دبی	دبی آب
واقعۀ ۱	۱۳۸۹/۰۹/۲۲ ۱۰:۳۰	۱۰۲۰	۱۰۲۰	۰	واقعۀ ۲	۱۳۸۹/۱۰/۲۶ ۰:۰۰	۴۹۰	۲۱۸۵	۲۸۰۵
	۱۳۸۹/۰۹/۲۲ ۱۳:۰۰	۱۰۸۰	۱۰۵۴	۲۶		۱۳۸۹/۱۰/۲۶ ۱:۰۰	۳۸۲۰	۱۸۱۷	۲۰۰۳
	۱۳۸۹/۰۹/۲۲ ۱۳:۳۰	۱۱۴۰	۱۰۹۷	۴۳		۱۳۸۹/۱۰/۲۶ ۳:۰۰	۲۸۴۰	۱۷۴۶	۱۰۹۴
	۱۳۸۹/۰۹/۲۲ ۱۴:۳۰	۱۲۷۰	۱۱۵۸	۱۱۲		۱۳۸۹/۱۰/۲۶ ۸:۰۰	۲۲۳۰	۱۷۹۱	۴۳۹
	۱۳۸۹/۰۹/۲۲ ۱۵:۰۰	۱۴۱۰	۱۳۳۳	۷۷		۱۳۸۹/۱۰/۲۶ ۱۳:۳۰	۱۵۵۰	۱۴۲۹	۱۲۱
	۱۳۸۹/۰۹/۲۲ ۱۵:۳۰	۲۲۳۰	۲۰۹۳	۱۳۷		۱۳۸۹/۱۱/۱۰ ۸:۳۰	۱۶۳۰	۱۶۳۰	۰
	۱۳۸۹/۰۹/۲۲ ۱۶:۳۰	۱۶۶۰	۱۵۸۷	۷۳		۱۳۸۹/۱۱/۱۱ ۳:۰۰	۱۵۵۰	۱۵۳۷	۱۳
	۱۳۸۹/۰۹/۲۲ ۱۷:۳۰	۱۳۶۰	۱۳۰۰	۶۰		۱۳۸۹/۱۱/۱۱ ۸:۰۰	۱۶۴۴	۱۶۴۴	۰
	۱۳۸۹/۰۹/۲۲ ۱۸:۳۰	۱۲۴۰	۱۱۹۴	۴۶		۱۳۸۹/۱۱/۱۱ ۹:۳۰	۳۰۷۰	۳۰۷۰	۰
	۱۳۸۹/۰۹/۲۲ ۲۰:۰۰	۱۱۹۰	۱۱۵۰	۴۰		۱۳۸۹/۱۱/۱۱ ۱۱:۰۰	۲۲۳۰	۲۲۳۰	۰
واقعۀ ۳	۱۳۸۹/۱۰/۲۵ ۰:۰۰	۸۱۲	۸۱۲	۰	واقعۀ ۴	۱۳۸۹/۱۱/۱۱ ۱۷:۰۰	۱۶۳۰	۱۵۸۸	۴۲
	۱۳۸۹/۱۰/۲۵ ۱۱:۳۰	۸۰۵	۷۵۴	۵۱		۱۳۸۹/۱۱/۱۱ ۲۳:۳۰	۱۵۵۰	۱۵۵۰	۰
	۱۳۸۹/۱۰/۲۵ ۱۳:۰۰	۸۳۹	۷۶۶	۷۳		۱۳۸۹/۱۱/۱۲ ۲:۳۰	۱۹۵۵	۱۸۸۸	۶۷
	۱۳۸۹/۱۰/۲۵ ۱۶:۰۰	۸۷۳	۸۲۲	۵۱		۱۳۸۹/۱۱/۱۲ ۳:۳۰	۲۱۳۵	۲۰۲۶	۱۰۹
	۱۳۸۹/۱۰/۲۵ ۱۸:۳۰	۱۳۷۹	۱۲۰۷	۱۷۲		۱۳۸۹/۱۱/۱۲ ۴:۳۰	۲۲۳۰	۲۱۳۵	۹۵
	۱۳۸۹/۱۰/۲۵ ۱۹:۳۰	۲۰۴۰	۱۷۳۳	۳۰۷		۱۳۸۹/۱۱/۱۲ ۵:۰۰	۸۴۱۰	۷۶۹۱	۷۱۹
	۱۳۸۹/۱۰/۲۵ ۲۱:۰۰	۲۷۱۹	۲۳۰۲	۴۱۸		۱۳۸۹/۱۱/۱۲ ۵:۱۵	۱۱۹۰۰	۶۵۰۹	۵۳۹۱
	۱۳۸۹/۱۰/۲۵ ۲۲:۰۰	۳۸۲۰	۲۸۴۶	۹۷۴		۱۳۸۹/۱۱/۱۲ ۵:۳۰	۱۰۳۰۰	۶۷۷۹	۳۵۲۱
	۱۳۸۹/۱۰/۲۵ ۲۲:۳۰	۷۴۱۰	۴۲۱۱	۳۱۹۹		۱۳۸۹/۱۱/۱۲ ۶:۳۰	۶۰۰۰	۴۷۶۹	۱۲۳۱
	۱۳۸۹/۱۰/۲۵ ۲۳:۰۰	۶۷۵۰	۳۰۱۵	۳۷۳۵		۱۳۸۹/۱۱/۱۲ ۷:۳۰	۳۶۹۰	۲۸۳۸	۸۵۲
۱۳۸۹/۱۰/۲۵ ۲۳:۳۰	۶۰۰۰	۲۷۴۹	۳۲۵۱	۱۳۸۹/۱۱/۱۲ ۱۳:۰۰	۲۳۲۵	۲۱۰۶	۲۱۹		

باران بر سطح آب زیرزمینی و افزایش گرادبان هیدرولیکی می‌باشد و در نتیجه آن تخلیه آب زیرزمینی به رودخانه افزایش می‌یابد. همچنین نزدیک بودن مقدار محتوای ایزوتوپی اکسیژن ۱۸ رودخانه در هنگام سیلاب به محتوای ایزوتوپی جریان پایه و اختلاف نسبتاً زیاد آن با محتوای ایزوتوپی آب باران به عنوان تولید کننده رواناب سطحی دلیل دیگری بر تایید سهم بالای جریان پایه در تولید سیلاب در حوضه مورد مطالعه می‌باشد.

نتیجه گیری

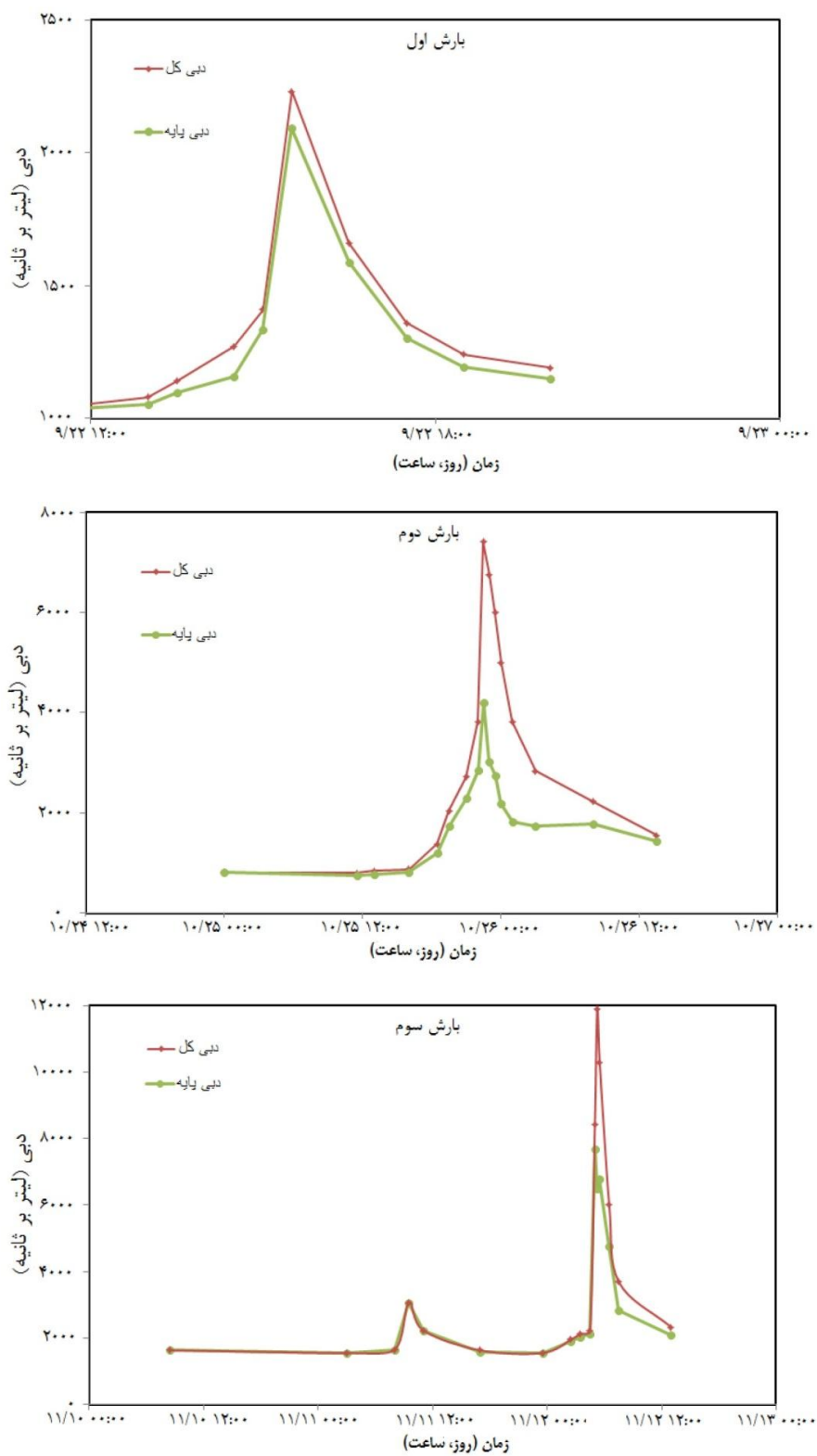
نتایج نشان می‌دهد که سهم مؤلفه جریان حاصل از رگبار (رواناب سطحی) در شرایط خشک (با میزان بارش پیشین کم) ناچیز می‌باشد و در شرایط مرطوب سهم این مؤلفه زیاد می‌گردد. با افزایش شدت بارش می‌بایست سهم مؤلفه رواناب سطحی افزایش یابد ولی براساس نتایج این تحقیق می‌توان چنین استنباط کرد که شرایط رطوبتی خاک تأثیر بیشتری نسبت به شدت بارش بر فرایند تولید رواناب دارد. به دلیل کم بودن آمار، امکان تحلیل آماری وجود ندارد و نتیجه‌گیری قطعی نیاز به بررسی بیشتر دارد.

هرچند که تغییرپذیری اکسیژن ۱۸ و اثر ارتفاعی، عدم قطعیت ایجاد می‌کند اما نتایج قابل قبولی برای جداسازی آب‌نمود به دست آمده است. علاوه بر آن این شرایط در مطالعات دیگر نیز در نظر گرفته نشده است (۱۴، ۱۷، ۲۶ و ۲۸).

بارش اول در شرایط کاملاً خشک اتفاق افتاده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که جریان پایه سهم عمده‌ای در تولید سیلاب داشته و سهم آب جدید (رواناب حاصل از رگبار) در تولید سیلاب ناچیز است. در دبی حداکثر، حدود ۹۴ درصد از سیلاب را آب زیرزمینی تشکیل می‌دهد. از کل حجم سیلاب حاصل از بارش اول ۹۵/۵ درصد سهم آب زیرزمینی می‌باشد.

سهم جریان حاصل از رگبار در بارش دوم و سوم که در شرایط مرطوب اتفاق افتاده است به نسبت بارش اول بیشتر شده است و در بارش دوم و سوم به ترتیب سهم مؤلفه آب زیرزمینی در دبی حداکثر ۵۷ و ۵۵ درصد می‌باشد. از کل حجم سیلاب حاصل از بارش دوم و سوم به ترتیب ۶۲/۵ و ۷۶/۸ درصد سهم آب زیرزمینی می‌باشد.

افزایش حدود ۱۶/۲۵ متری سطح آب چاه‌های پیژومتری حفر شده در مطالعات سد ابوالعباس در حوضه مورد مطالعه، با شروع بارش در سال آبی ۸۵-۱۳۸۴ (۳)، بیانگر کارست شدگی و تأثیر نفوذ آب



شکل ۴- جداسازی مؤلفه آب زیر زمینی در سه سیلاب حاصل از بارش های مورد بررسی (سال ۸۹)

حوضه‌های کارستی و گسترش معابر زیرزمینی به نظر می‌رسد که در حوضه‌های کارستی سهم مؤلفه آب زیرزمینی بیشتر از دیگر حوضه‌ها باشد.

سپاسگزاری

از جناب آقای مهندس سجادیان مدیر امور آب منطقه‌ای شرق استان خوزستان که جهت انجام این تحقیق از هرگونه کمک دریغ نکردند، تشکر می‌گردد.

نتایج نشان می‌دهد که در حوضه کارستی ابوالعباس با اقلیم خشک با توجه به توسعه کارست سهم مشارکت مؤلفه آب زیرزمینی در تولید رواناب بیشتر از سهم رواناب حاصل از بارش می‌باشد. نتایج این تحقیق با نتایج دیگر تحقیقات که در مناطق مرطوب و خشک و نیمه خشک صورت گرفته، همخوانی دارد (۱۶، ۱۹، ۲۱، ۲۲، ۲۹ و ۳۴). بنابراین، تصور این که جریان آب‌های زیرزمینی واقعی به ندرت از علل عمده تولید رواناب هستند و نقش اصلی آن در تداوم جریان در دوره‌های کم آبی بین وقایع بارش باران و ذوب برف می‌باشد، نیاز به بازنگری دارد. بنابراین، ضروری است کارشناسان و محققین با نگرشی متفاوت به بحث جریان پایه و سهم آن در تولید رواناب به خصوص در حوضه‌های کارستی بنگرند. با توجه به نفوذ بیشتر در

منابع

- ۱- بی‌نام. ۱۳۸۹ الف. مطالعات شناخت منابع آب تاقدیس منگشت محدوده ایذه. جلد اول، گزارش هواشناسی و هیدرولوژی، مهندسین مشاور پورآب.
- ۲- بی‌نام. ۱۳۸۹ ب. مطالعات شناخت منابع آب تاقدیس منگشت محدوده ایذه. جلد دوم، گزارش هیدروژئولوژی، مهندسین مشاور پورآب.
- ۳- بی‌نام. ۱۳۸۶. مطالعات مرحله اول طرح سد ابوالعباس. گزارش مطالعات زمین‌شناسی مهندسی، مهندسین مشاور مهتاب قدس.
- ۴- فاروقی، ع. ۱۳۸۷. تعیین ویژگی‌های ایزوتوپی باران در استان فارس، پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته هواشناسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.
- 5- Bohté, R., Mul, M. L., Bogaard, T. A., Savenije, H. H. G., Uhlenbrook, S. and T. C. Kessler. 2010. Hydrograph separation and scale dependency of natural tracers in a semi-arid catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7: 1343-1372.
- 6- Buttle, J. M. 1994. Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins. *Progress in Physical Geography*, 18(1): 16-41.
- 7- Clark, I. D. and P. Fritz. 1997. *Environmental isotope in hydrogeology*. First ed., New Yourk: Lewis Publishers.
- 8- Dinçer, T., Payne, B. R., Florkowski, T., Martinec, J. and E. Tongiorgi, 1970. Snowmelt runoff from measurements of tritium and oxygen-18. *Water Resources Research*, 6: 110-124.
- 9- Freeze, R. A. 1974. Streamflow generation. *Reviews of Geophys.*, 12(4): 627-647.
- 10- Fritz, P., Cherry, J. A., Weyer, K. U. and M. Sklash, 1976. Storm runoff analyses using environmental isotopes and major ions. *Interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical Data in Groundwater Hydrology*, Vienna, pp. 111-130.
- 11- Harvey, F. E. and S. S. Sibray. 2001. Delineating ground water recharge from leaking irrigation canals using water chemistry and isotopes. *Ground Water*, 39(3): 408-421.
- 12- Hendry, M. J. 1988. Hydrogeology of clay till in a prairie region of Canada. *Ground Water*, 26 (5): 607-614.

- 13- Herczeg, A. L., Barnes, C. J., Macumber, P. G. and J. M. Olley. 1992. A stable isotope investigation of groundwater-surface water interactions at Lake Tyrrell, Victoria, Australia. *Chemical Geology*, 96: 19-32.
- 14- Hinton, M. J., Schiff, S. L. and M. C. English. 1994. Examining the contributions of glacial till water to storm runoff using 2-component and 3-component hydrograph separations. *Water Resources Research*, 30(4): 983-993.
- 15- Hooper, R. P. and C. A. Shoemaker. 1986. A Comparison of Chemical and Isotopic Hydrograph Separation. *Water Resources Research*, 22(10): 1444-1454.
- 16- Hrachowitz, M., Bohte, R., Mul, M. L., Bogaard, T. A., Savenije, H. H. G. and S. Uhlenbrook. 2011. On the value of combined event runoff and tracer analysis to improve understanding of catchment functioning in a data-scarce semi-arid area. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15: 2007-2024.
- 17- Jenkins, A., Ferrier, R. C., Harriman, R. and Y. O. Ogunkoya. 1994. A case study in catchment hydrochemistry: Conflicting interpretations from hydrological and chemical observations. *Hydrological Processes*, 8: 335-349.
- 18- Katz, B. G., Coplen, T. B., Bullen, T. D. and J. H. Davis. 1997. Use of chemical and isotopic tracers to characterize the interactions between ground water and surface water in mantled karst. *Ground Water*, 35: 1014-1028.
- 19- Kendall, C. and T. B. Coplen. 2001. Distribution of oxygen-18 and deuterium in river waters across the United States. *Hydrological Processes*, 15(7): 1363-1393.
- 20- Kendall, C., Sklash, M. and T.D. Bullen. 1995. Isotope tracers of water and solute sources in catchments., in solute modelling in catchment systems, S.T. Trudgill, Editor., Wiley: New-York.
- 21- Kennedy, V. C., Kendall, C., Zellweger, G. W., Wyerman, T. A. and R. J. Avanzino. 1986. Determination of the components of stormflow using water chemistry and environmental isotopes, Mattole River basin, California. *Journal of Hydrology*, 84: 107-140.
- 22- Laudon, H. and O. Slaymaker. 1997. Hydrograph separation using stable isotopes, silica and electrical conductivity: an alpine example. *Journal of Hydrology*, 201(1-4): 82-101.
- 23- Lyon, S. W., S. L. E. Desilets, and P. A. Troch. 2009. A tale of two isotopes: differences in hydrograph separation for a runoff event when using δD versus $\delta 18O$. *Hydrological Processes*, 23(14): 2095-2101.
- 24- Marc, V., Didon-Lescot, J.-F. and C. Michael. 2001. Investigation of the hydrological processes using chemical and isotopic tracers in a small Mediterranean forested catchment during autumn recharge. *Journal of Hydrology*, 247: 215-229.
- 25- Martinec, J. 1975. Subsurface flow from snowmelt traced by tritium. *Water Resources Research*, 11(3): 496-498.
- 26- Mathieu, R. and T. Bariac. 1996. An isotopic study ($2H$ and $18O$) of water movements in clayey soils under a semiarid climate. *Water Resources Research*, 32(4): 779-789.
- 27- McDonnell, J. J. 2003. Where does water go when it rains? Moving beyond the variable source area concept of rainfall-runoff response. *Hydrological Processes*, 17(9): 1869-1875.

- 28- Merot, P., Durand, P. and C. Morisson. 1995. Four-component hydrograph separation using isotopic and chemical determinations in an agricultural catchment in western France. *Physics and Chemistry of The Earth*, 20(3-4): 415-425.
- 29- Munyaneza, O., Wenninger, J. and S. Uhlenbrook. 2012. Identification of runoff generation processes using hydrometric and tracer methods in a meso-scale catchment in Rwanda. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9: 671-705.
- 30- Ogrinc, N., Kanduc, T., Stichler, W. and P. Vreca. 2008. Spatial and seasonal variations in (δ)¹⁸O and (δ)^D values in the river Sava in Slovenia. *Journal of Hydrology*, 359: 303-312.
- 31- Pinder, G. F. and J. F. Jones. 1969. Determination of the ground-water component of peak discharge from the chemistry of total runoff. *Water Resources Research*, 5(2): 438-445.
- 32- Sklash, M. G. and R. N. Farvolden. 1979. The role of groundwater in storm runoff. *Journal of Hydrology*, 43(1-4): 45-65.
- 33- Taylor, S., Feng, X., Williams, M. and J. McNamara. 2002. How isotopic fractionation of snowmelt affects hydrograph separation. *Hydrological Processes*, 16: 3683-3690.
- 34- Uhlenbrook, S., Didszun, J. and J. Wenninger. 2008. Source areas and mixing of runoff components at the hillslope scale - a multi-technical approach. *Hydrological Sciences Journal*, 53: 741-753.
- 35- Yang, C., Telmer, K. and J. Veizer. 1996. Chemical dynamics of the "St. Lawrence" riverine system: (δ)^DH₂O, (δ)¹⁸O H₂O, (δ)¹³C DIC, (δ)³⁴S sulfate, and dissolved ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 60(5): 851-866.