

## تفکیک جریان پایه از رواناب سطحی به کمک تکنیک های ایزوتوپی - حوضه کارستی ابوالعباس

حیدر زارعی<sup>۱</sup>، علی محمد آخوندعلی<sup>۲</sup>، حسین محمدزاده<sup>۳</sup>، فریدون رادمش<sup>۴</sup>

۱- ۴- استادیار دانشکده مهندسی و علوم آب دانشگاه شهید چمران

۲- استاد دانشکده مهندسی و علوم آب دانشگاه شهید چمران

۳- استادیار گروه زمین شناسی و مرکز تحقیقات آب زیرزمینی دانشگاه فردوسی مشهد  
[zareih@scu.ac.ir](mailto:zareih@scu.ac.ir)

### خلاصه

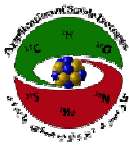
پی بردن به سهم آبهای زیرزمینی در رودخانه موضوع مهمی است که با طیف گسترده‌ای از مباحث مدیریت آب همراه است. در روش های ترسیمی جهت جداسازی جریان پایه از جریان حاصل از بارش، طبق مفاهیم هورتنی فرض می‌شود که بخش اعظم جریان در زمان سیلاب از جریان حاصل از بارش ایجاد شده است. مدل‌های معمول رواناب غالباً فرض می‌کنند 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 همچنین سبب ایجاد نگرشی اساسی به فرآیند تولید رواناب شده است. در این تحقیق در طول زمستان سال ۸۹ سه واقعه که دارای شرایط رطوبت پیشین و شدت متفاوت بودند و سیلاب متناظر آن‌ها نمونه برداری و محتوای ایزوتوپی اکسیژن ۱۸ در دانشگاه اوتاواای کانادا اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که بطور کلی سهم مولفه آب زیرزمینی در حوضه کارستی ابوالعباس با توجه به توسعه کارست در این حوضه بیشتر از رواناب حاصل از بارش می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که سهم مولفه رواناب سطحی در شرایط خشک ناچیز می‌باشد و در شرایط مرطوب سهم این مولفه افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: جریان پایه، رواناب سطحی، ایزوتوپ، اکسیژن ۱۸، حوضه کارستی، ابوالعباس

### ۱. مقدمه

بطور کلی آب رودخانه از دو منبع تامین می‌شود؛ ۱- رواناب سطحی و بارندگی یا جریان‌های زیر سطحی کم عمق سریع، ۲- تخلیه آب‌های زیرزمینی به داخل رودخانه. پی بردن به سهم آبهای زیرزمینی در رودخانه موضوع مهمی است که با طیف گسترده‌ای از مباحث مدیریت آب همراه است. درصد مشارکت این منابع در حوضه‌های مختلف بسته به سطح زهکشی، پارامترهای آب و هوایی و فعالیت‌های انسانی متفاوت می‌باشد. بطور 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 [۱].

در روش های ترسیمی جهت جداسازی جریان پایه از جریان حاصل از بارش، طبق مفاهیم هورتنی فرض می‌شود که بخش اعظم جریان در زمان سیلاب از جریان حاصل از بارش ایجاد شده است [۲]. مدل‌های معمول رواناب غالباً فرض می‌کنند که جریان پایه حاصل از آب زیرزمینی به رودخانه در دوره‌های پرآبی ناچیز می‌باشد. روش‌های ردیابی نشان می‌دهد که چنین نیست و همچنین سبب ایجاد نگرشی اساسی به فرآیند رواناب شده است [۳، ۴]. 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 [۵]. ردیاب ایده آل ماده‌ای است که رفتار در سیستم مورد مطالعه را دقیقاً تا آنجا که به پارامترهای مورد جستجو اهمیت دارند ردیابی کند، و حداقل یک خصوصیت متمایز کننده از مواد ردیابی شده داشته باشند [۶].



گرچه مطالعات فیزیکی نشان داده‌اند که در برخی حوضه‌ها جریان سطحی حاصل از بخش‌های اشباع (جریان پایه) نقش موثری در تولید رواناب دارند ولی کمتر در مورد نقش آب زیرزمینی در تولید هیدروگراف بحث شده است [۷]. بسیاری از منابع در مبحث تولید رواناب، جریان آبهای زیرزمینی واقعی به عنوان یک عامل مهم و تاثیرگذار در فرآیند تولید رواناب حاصل از رگبار و ذوب شدن برف نادیده گرفته‌اند. فریتز<sup>۱</sup> [8] نظر هیدرولوژیکی خود را در این موضوع بطور 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 دوره های کم آبی بین وقایع بارش باران و ذوب برف می باشد."

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 و هیدروشیمیایی 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. هوپر<sup>۲</sup> و شوماخر<sup>۳</sup> (۱۹۸۶) جهت مقایسه نتایج تفکیک هیدروگراف به روش ایزوتوپی و هیدروشیمیایی، سه واقعه ذوب برف و یک بارندگی در حوضه‌ای واقع در یکی از ایالت‌های شمال غربی آمریکا را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که در این حوضه سیلیس محلول می‌تواند به عنوان یک ردیاب پایدار عمل نماید [۹]. در تحقیقی مانانینزا و همکاران (۲۰۱۲) به کمک ایزوتوپ‌های دوتریم و اکسیژن ۱۸ و پارامترهای هیدروشیمیایی کلر و سیلیس محلول به تفکیک دو و سه مولفه‌ای آب‌نمود در کشور رواندا پرداختند. نتایج حاصل از جداسازی دو مولفه‌ای آب‌نمود با استفاده از سیلیس محلول و کلرید توسط نتایج جداسازی سه مولفه‌ای با استفاده از سیلیس محلول و دوتریم تایید شد. نتایج این تحقیق نشان داد که در دو سیلاب بیش از ۸۰ درصد از سیلاب مربوط به رواناب زیرسطحی می‌باشد [۱۰].

با توجه به نقش مهم آب زیرزمینی در تولید جریان در حوضه‌های واقع در مناطق مرطوب دنیا، هدف این تحقیق بررسی نقش آب زیرزمینی در تولید جریان در حوضه کارستی ابوالعباس با اقلیم خشک و نیمه خشک با استفاده از ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ می‌باشد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. منطقه مورد مطالعه

مطالعه در حوضه آبریز رودخانه ابوالعباس (از سرشاخه‌های رودخانه رود زرد) در ایستگاه آبسنجی پل منجنیق با مختصات جغرافیایی ۳۱°، ۵۳'، ۴۹ طول شرقی و ۳۱°، ۰۷'، ۳۱ عرض شمالی با مساحت ۲۸۳ کیلومتر مربع واقع در جنوب غربی ایران انجام شد. تجهیزات اندازه‌گیری آن شامل اشل یکپارچه ۴ متری، پل تفریک و لیمنی‌گراف (دیتا‌لاگر) می‌باشد. همچنین دیگر پارامترهای مهم حوضه در جدول ۱ ارائه شده است. ارتفاع در این حوضه آبریز کوهستانی از ۶۹۰ تا ۳۲۸۰ متر از سطح دریا تغییر می‌کند و ارتفاع متوسط آن نسبت به سطح دریا در حدود ۱۸۸۶ متر می‌باشد. متوسط بارش سالانه طولانی مدت این حوضه ۸۲۵ میلی‌متر که بده متوسط سالانه ۳۷۰ میلی‌متر را تولید می‌کند.

جدول ۱- خلاصه مشخصات فیزیوگرافی حوضه آبریز رودخانه ابوالعباس در ایستگاه آبسنجی پل منجنیق

| پارامتر | مختصات | مختصات | مختصات | مختصات | مختصات | مختصات | مختصات | مختصات | مختصات |     |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
| مختصات  | مختصات | مختصات | مختصات | مختصات | مختصات | مختصات | مختصات | مختصات | مختصات |     |
| مختصات  | ۸۵/۵۵  | ۲۸۳    | ۱/۴۳   | ۳۲۸۰   | ۶۹۰    | ۱۸۸۶   | ۱۹/۴   | ۴/۳۸   | ۳۹/۹   | ۵/۲ |
| مختصات  | ۸۵/۵۵  | ۲۸۳    | ۱/۴۳   | ۳۲۸۰   | ۶۹۰    | ۱۸۸۶   | ۱۹/۴   | ۴/۳۸   | ۳۹/۹   | ۵/۲ |

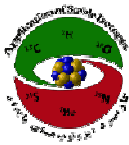
### ۲.۲. فرضیات

اصل استفاده از ردیاب‌ها در تفکیک هیدروگراف براساس مغایرت غلظت ردیاب در آب زیرزمینی حوضه آبریز و باران می‌باشد. اگر اختلافی بین غلظت ردیاب آب زیرزمینی و رگبار وجود نداشته باشد، تفکیک هیدروگراف با استفاده از ردیاب امکان پذیر نمی‌باشد.

<sup>1</sup> Fritz

<sup>2</sup> Hooper

<sup>3</sup> Shoemaker



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

$$Q_t = Q_{gw} + Q_r \quad (1)$$

در این رابطه  $Q_t$  دبی کل جریان،  $Q_{gw}$  دبی آب زیرزمینی (قبل از رگبار) و  $Q_r$  رواناب حاصل از رگبار می‌باشد. با نمونه گیری از جریان پایه قبل از رگبار، بارندگی و آب رودخانه هنگام بارندگی، محتوای ایزوتوپی آن‌ها (C) مشخص می‌شود و می‌توان قانون بقای جرم را به صورت زیر نوشت:

$$Q_t C_t = Q_{gw} C_{gw} + Q_r C_r \quad (2)$$

$$n = \frac{Q_{gw}}{Q_t} \quad \text{با فرض}$$

$$1 - n = \frac{Q_r}{Q_t} \quad \text{از رابطه ۱ حاصل می‌شود:}$$

رابطه ۲ به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$C_t = n C_{gw} + (1 - n) C_r \quad (3)$$

یا

$$n = \frac{C_t - C_r}{C_{gw} - C_r} \rightarrow Q_{gw} = \left( \frac{C_t - C_r}{C_{gw} - C_r} \right) Q_t \quad (4)$$

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 در سال ۱۹۶۹ توسط پیندر<sup>۱</sup> و جونز<sup>۲</sup> برای یک نوع ردیاب شیمیایی جهت جدا نمودن آبنمود رگبار سه حوضه آبریز کوچک واقع در یکی از ایالات کانادا به کار رفته شد. آن‌ها دریافتند که آب زیرزمینی ۳۲ الی ۴۲ درصد از دبی پیک عبوری برای رگبارهای مورد مطالعه را شامل می‌شود [۱۱]. هینتون<sup>۳</sup> و همکاران (۱۹۹۴) [۱۲] و کندال<sup>۴</sup> و همکاران (۱۹۹۵) اجزاء مهم رواناب و محدودیت های مدل دو مولفه‌ای را چنین ارائه کردند که محتوای ایزوتوپی باران، آب حاصل از ذوب برف، آب خاک و آب زیرزمینی تغییر می‌کنند و غالباً با هم تفاوت دارند. بنابراین، برای هر مولفه اضافی، پارامتر مستقل دیگری در توازن جرمی مورد نیاز است [۱۳]. استفاده از این روش براساس فرضیات ذیل می‌باشد [۱۲، ۱۴، ۱۵]:

(۱) اختلاف معنی داری بین غلظت ردیاب در مولفه‌های مختلف وجود دارد. (۲) غلظت ردیاب نسبت به زمان ثابت است و نسبت به مکان قابل اندازه گیری می‌باشد. (۳) مشارکت یک مولفه اضافی قابل اغماض می‌باشد و یا غلظت ردیاب آن مولفه شبیه یکی از مولفه‌ها است.

(۴) ردیاب به خوبی مخلوط شده و پایدار می‌باشد. (۵) غلظت ردیاب مولفه‌های مختلف مستقل از هم بوده و همبستگی ندارند.

عدم قطعیت را برای تعیین اجزای رواناب به این روش می‌بایست در نظر گرفت [۱۶-۱۹]. عدم قطعیت به دلایل (۱) آنالیز ردیاب و اندازه گیری جریان، (۲) تغییرات زمانی غلظت ردیاب حین بارش، (۳) اثر ارتفاع بر غلظت ردیاب، (۴) انحلال برخی کانی‌ها در هنگام تشکیل رواناب و (۵) تغییرات مکانی غلظت ردیاب، ایجاد می‌شود. که مهم ترین آن، تغییرات مکانی غلظت ردیاب می‌باشد، در صورتی که بتوان تغییرات مکانی غلظت ردیاب را محاسبه و در محاسبات دخالت داد، می‌توان تا حدود زیادی از خطای این روش کاست [۱۷]. هرچند که عوامل مذکور می‌تواند سبب ایجاد عدم قطعیت گردد، اما نتایج قابل قبولی برای جداسازی آب نمود به دست آمده است. علاوه بر آن این شرایط در مطالعات دیگر نیز در نظر گرفته نشده است [۱۰، ۱۲، ۲۰-۲۴].

<sup>1</sup> Pinder

<sup>2</sup> Jones

<sup>3</sup> Hinton

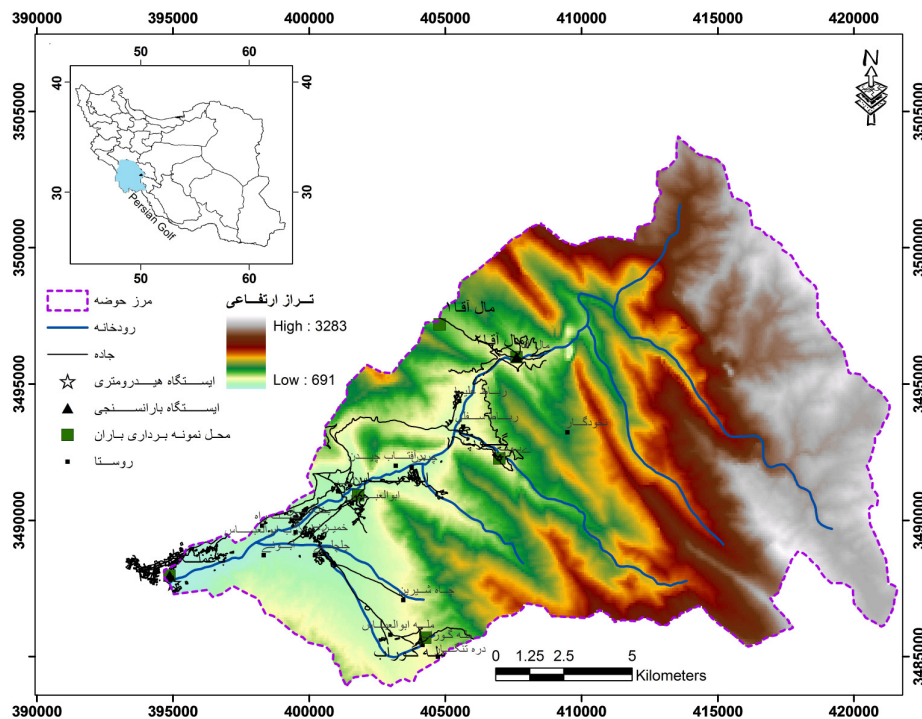
<sup>4</sup> Kendall

### ۳.۲. روش تحقیق

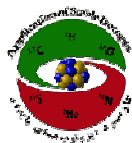
در طول زمستان سال ۱۳۸۹ از سه واقعه بارندگی با شرایط رطوبت پیشین و شدت متفاوت و سیلاب متناظر آن‌ها نمونه برداری گردید. در ابتدا چند ظرف جهت جمع آوری نمونه آب باران در سطح حوضه آبریز طراحی (شکل (۱)) و در نقاط مختلف حوضه در هر بارش نمونه آب باران جمع آوری شد (شکل (۲)).



شکل ۱- ظرف جمع آوری نمونه آب باران



شکل ۲- موقعیت حوضه مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری



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 مجموع ۶۰ نمونه تهیه شد که ۱۸ نمونه مربوط به آب باران (هر بارش در ۶ محل) و ۴۲ نمونه مربوط به رودخانه می‌باشد. ۳ 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 محتوای ایزوتوپی آب باران به عنوان غلظت رواناب سطحی فرض می‌گردد [۱۴]. محتوای ایزوتوپی نمونه‌ها در آزمایشگاه ایزوتوپی گروه زمین شناسی دانشگاه اوتاوا آنالیز شد.

### ۳. نتایج و بحث

خلاصه ای از اطلاعات وقایع بارندگی و نتایج اندازه گیری پارامترهای صحرائی و نتایج حاصل از آنالیز ایزوتوپی در جدول (۲) ارائه شده است.

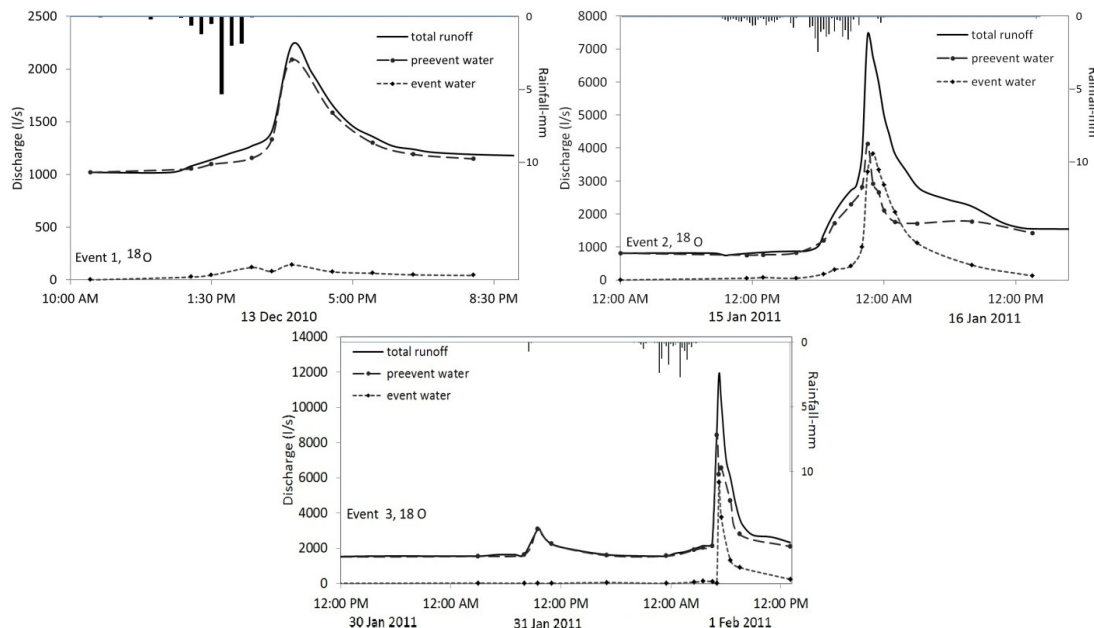
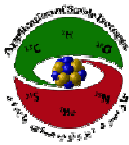
جدول ۲- خصوصیات سه بارش مورد بررسی و سیلاب متناظر آنها

| واقعه | تاریخ وقوع | بارش میلیمتر | بارش ۵ روز قبل میلیمتر | دبی حداکثر سیلاب (l/s) | نوع منبع               | $^{18}\text{O}$ (‰VSMOW) |
|-------|------------|--------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| ۱     | ۲۲/۹/۱۳۸۹  | ۱۲/۰         | ۰/۰                    | ۲۲۳۰                   | آب زیرزمینی (آب قدیمی) | -۴/۷۷                    |
|       |            |              |                        |                        | رودخانه                | -۴/۶۳                    |
|       |            |              |                        |                        | باران                  | -۱/۸۳                    |
| ۲     | ۲۵/۱۰/۱۳۸۹ | ۲۵/۲         | ۳۰/۰                   | ۷۴۱۰                   | آب زیرزمینی (آب قدیمی) | -۴/۸۵                    |
|       |            |              |                        |                        | رودخانه                | -۳/۹۵                    |
|       |            |              |                        |                        | باران                  | -۱/۴۰                    |
| ۳     | ۱۱/۱۱/۱۳۸۹ | ۱۴/۲         | ۵۸/۵                   | ۱۱۹۰۰                  | آب زیرزمینی (آب قدیمی) | -۴/۸۳                    |
|       |            |              |                        |                        | رودخانه                | -۴/۷۳                    |
|       |            |              |                        |                        | باران                  | -۳/۶۶                    |

بارش اول که اولین بارش در سال آبی ۹۰-۸۹ 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 منجنیق) ۲۲۳۰ لیتر بر ثانیه محاسبه شد. بارش دوم به میزان ۲۵/۲ میلیمتر در روز ۲۵ دی ماه اتفاق افتاد. با توجه به بارش ۵ 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. براساس محتوای ایزوتوپی اکسیژن ۱۸ آب زیرزمینی، آب باران و آب رودخانه (جدول ۲)، براساس رابطه (۴) برای سه واقعه مورد بررسی تفکیک جریان پایه از رواناب سطحی صورت گرفته است. نتایج در شکل ۳ ارائه شده است.

بارش اول در شرایط کاملاً خشک اتفاق افتاده است. نتایج حاصل از جداسازی توسط اکسیژن ۱۸ 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 ۹۶ درصد سهم آب زیرزمینی می‌باشد.

براساس محتوای ایزوتوپی اکسیژن ۱۸، 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 مولفه آب زیرزمینی در دبی حداکثر ۵۷ و ۵۵ درصد می‌باشد. از کل حجم سیلاب حاصل از بارش دوم و سوم به ترتیب ۶۳ و ۷۷ درصد سهم آب زیرزمینی می‌باشد.



شکل ۳- جداسازی مولفه آب زیر زمینی در سه سیلاب حاصل از بارش های مورد بررسی

افزایش حدود ۱۶/۲۵ متری سطح آب چاه های پیژومتری حفر شده در مطالعات سد ابوالعباس در حوضه مورد مطالعه، با شروع بارش در سال آبی ۸۵-۸۴ (مهتاب قدس، ۱۳۸۶)، بیانگر کارست شدگی و تاثیر نفوذ آب باران بر سطح آب زیرزمینی و افزایش گرادیان هیدرولیکی می باشد و در نتیجه آن تخلیه آب زیرزمینی به رودخانه افزایش می یابد. 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 می باشد.

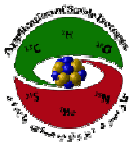
#### ۴. نتیجه گیری و پیشنهادات

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 داده اند، سیلاب بزرگتری تولید کرده اند، بنابراین، می توان چنین نتیجه گیری 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 می رساند. لازم به ذکر است که جهت ارائه نتیجه گیری قطعی ضروری است تعداد بارش بیشتری با شدت و مقدار بارش پیشین متفاوت، مورد ارزیابی قرار گیرند. نتایج این تحقیق نشان می دهد که سهم آب زیرزمینی در حوضه کارستی ابوالعباس با توجه به توسعه کارست در این حوضه، زیاد می باشد و با نتایج حاصل از دیگر مطالعات [۱۵، ۲۵-۲۷] که در نقاط مختلف دنیا صورت گرفته است، مطابقت دارد. بنابراین، تصور این که جریان آب های زیرزمینی واقعی به ندرت از علل عمده تولید رواناب هستند و نقش اصلی آن در تداوم جریان در دوره های کم آبی بین وقایع بارش باران و ذوب برف می باشد، نیاز به بازنگری دارد. ضروری است کارشناسان و محققین با نگرشی متفاوت به بحث جریان پایه و سهم آن در تولید رواناب به خصوص در حوضه های کارستی بنگرند.

#### ۵. مراجع

- Ogrinc, N., et al., Spatial and seasonal variations in  $[\delta]18O$  and  $[\delta]D$  values in the River Sava in Slovenia. *Journal of Hydrology*, 2008. 359(3-4): p. 303-312.
- Linsley, R.K., M.A. Kohler, and J.L.H. Paulhus, *Hydrology for engineers*. 1982: McGraw-Hill.





3. Clark, I.D.F., P, Enviromental Isotope in Hydrogeology. First ed. 1997, New Yourk: Lewis Publishers.
4. Bohté, R., et al., Hydrograph separation and scale dependency of natural tracers in a semi-arid catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2010. 7(1): p. 1343-1372.
5. Lyon, S.W., S.L.E. Desilets, and P.A. Troch, A tale of two isotopes: differences in hydrograph separation for a runoff event when using  $\delta D$  versus  $\delta 18O$ . *Hydrological Processes*, 2009. 23(14): p. 2095-2101.
6. Rozanski, K., K. Froehlich, and W.G. Mook, Environmental isotopes in the hydrological cycle: Principles and applications, Surface Water, W.G. Mook, Editor. 2001, Technical Documents in Hydrology: Paris. p. 121.
7. Fritz, P., et al., Storm runoff analyses using environmental isotopes and major ions, in Interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical Data in Groundwater Hydrology. 1976: Vienna. p. 111-130.
8. Freeze, R.A., Streamflow generation. *Rev. Geophys.*, 1974. 12(4): p. 627-647.
9. Hooper, R.P. and C.A. Shoemaker, *Water Resour. Res.*, 1986. 22(10): p. 1444-1454.
10. Munyaneza, O., J. Wenninger, and S. Uhlenbrook, Identification of runoff generation processes using hydrometric and tracer methods in a meso-scale catchment in Rwanda. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2012. 9(1): p. 671-705.
11. Pinder, G.F. and J.F. Jones, Determination of the ground-water component of peak discharge from the chemistry of total runoff. *Water Resour. Res.*, 1969. 5(2): p. 438-445.
12. Hinton, M.J., S.L. Schiff, and M.C. English, Examining the Contributions of Glacial Till Water to Storm Runoff Using 2-Component and 3-Component Hydrograph Separations. *Water Resources Research*, 1994. 30(4): p. 983-993.
13. Kendall, C., M. Sklash, and T.D. Bullen, Isotope tracers of water and solute sources in catchments., in *Solute Modelling in Catchment Systems*, S.T. Trudgill, Editor. 1995, Wiley: New-York.
14. Buttle, J.M., Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins. *Progress in Physical Geography*, 1994. 18(1): p. 16-41.
15. Sklash, M.G. and R.N. Farvolden, The role of groundwater in storm runoff. *Journal of Hydrology*, 1979. 43(1-4): p. 45-65.
16. Haiying, H., et al. Uncertainty Analysis of the Tracer-Based Hydrograph Separation Method. in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2010 Asia-Pacific. 2010.
17. Uhlenbrook, S. and S. Hoeg, Quantifying uncertainties in tracer-based hydrograph separations: a case study for two-, three- and five-component hydrograph separations in a mountainous catchment. *Hydrological Processes*, 2003. 17(2): p. 431-453.
18. Joerin, C., et al., Uncertainty in hydrograph separations based on geochemical mixing models. *Journal of Hydrology*, 2002. 255(1-4): p. 90-106.
19. Genereux, D., Quantifying uncertainty in tracer-based hydrograph separations. *Water Resour. Res.*, 1998. 34(4): p. 915-919.
20. Jenkins, A., et al., A case study in catchment hydrochemistry: Conflicting interpretations from hydrological and chemical observations. *Hydrological Processes*, 1994. 8(4): p. 335-349.
21. Merot, P., P. Durand, and C. Morisson, Four-component hydrograph separation using isotopic and chemical determinations in an agricultural catchment in western France. *Physics and Chemistry of The Earth*, 1995. 20(3-4): p. 415-425.
22. Hrachowitz, M., et al., 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*, 2011. 15(6): p. 2007-2024.
23. Didszun, J. and S. Uhlenbrook, Scaling of dominant runoff generation processes: Nested catchments approach using multiple tracers. *Water Resources Research*, 2008. 44(2).
24. McGlynn, B.L. and J.J. McDonnell, Quantifying the relative contributions of riparian and hillslope zones to catchment runoff. *Water Resources Research*, 2003. 39(11).
25. Li, Y.J., et al., Relating hydrograph components to rainfall and streamflow: a case study from northern Taiwan. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 2012. 57(5): p. 861-877.
26. Matsunaga, T., et al., Isotope hydrograph separation for modeling of runoff mechanisms of atmospherically derived chemical and radioactive pollutants. *Journal of Water and Environment Technology*, 2005. 3 (2): p. 10.
27. Laudon, H. and O. Slaymaker, Hydrograph separation using stable isotopes, silica and electrical conductivity: an alpine example. *Journal of Hydrology*, 1997. 201(1-4): p. 82-101.