

The Evaluation of Discharge Regime Impressibility of Karstic Springs from Drought Occurrence (Case Study: Karstic Springs of Alvand River Basin)

Saeed Negahban ^{1*}, Sajjad Bagheri ², Zeynab Payandeh ³, Sirus Naderi ⁴, Peyman Shiravand ⁵

¹ Assistant Professor of Geomorphology, Department of Geography, Shiraz University, Shiraz, Iran

² Ph.D. student of geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Master of Geomorphology, Tabarestan University, Chalous, Chalus, Iran

⁴ Master of Science in Climatology, Azad University of Science Researches, Tehran, Iran

⁵ Master of Science in Climatology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

Drought occurrence as an anomaly of the atmosphere rooted in change of climate lead to the imbalance between supply and demand for water, as well as social, economic and environmental consequences (Zhang et al, 2012: 482). The lack of rainfall in one area for a long period of time is known as meteorological drought and this lack of water in the hydrological cycle causes different types of drought (Fiorillo and Guadagno, 2010: 1868). Karstic systems respond to drought is controlled by the rate of the development of karstic systems. Sarabgarm, Vardanaw and Marab springs with a total discharge of more than 80 million liters of cubic meters supply water needed for drinking and agriculture for the societies around them and have a fundamental role in sustaining the human life in the area. Thus, understanding the influence of drought on these springs is essential for the management of karstic water resources in the region. The purpose of this study is to evaluate the impressibility of discharge regime of karstic springs of Sarabgarm, Marab, and Vardanaw from drought occurrence. According to the purpose of the study, the three springs of Sarabgarm, Vardanaw and Marab having the same climatic conditions were selected. To identify the drought occurrence in the area SPI index was used. The results of the study showed that Karstic springs under the study were influenced by fluctuations in rainfall and from 1998 they are in a downward discharge trend. Due to memory effect of aquifer, meteorological drought occurrence and its impact on hydrological drought in the springs are not equal and impressibility of Sarabgarm has been less than the two other springs. Impressibility of these springs from fluctuations in rainfall depends on development of Karstic systems, memory effect of aquifer and the duration of precipitation fluctuations and severity of the occurrence. The occurrence of severe dry periods (1997-1998 to 2000-2001 and 2005-2006 to 2009-2010) largely modifies the memory effect of aquifer and cause the predominance of mild hydrological drought in the period of 1999 to 2010.

Key words: Drought, Karstic springs, Discharge regime, RAPS, Alvand River Basin.

* Snegahban@shirazu.ac.ir

ارزیابی تأثیرپذیری رژیم آبدهی چشمه‌های کارستی از رخداد خشکسالی مطالعه موردی: چشمه‌های کارستی حوضه رودخانه الوند

سعید نگهبان*: استادیار ژئومورفولوژی بخش جغرافیا، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

سجاد باقری سیدشکری: دانش‌آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

زیب پاینده: کارشناس ارشد ژئومورفولوژی، دانشگاه طبرستان، چالوس، چالوس، ایران

سیروس نادری: کارشناس ارشد اقلیم‌شناسی، دانشگاه آزاد علوم تحقیقات تهران، تهران، ایران

پیمان شیرآوند: کارشناس ارشد اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

وصول: ۱۳۹۳/۱۰/۱۰ پذیرش: ۱۳۹۴/۵/۲۷، صص ۱۷۶-۱۶۳

چکیده

آبخوان‌های کارستی از مهم‌ترین منابع تأمین آب مورد نیاز برای شرب و کشاورزی در استان کرمانشاه است. وقوع خشکسالی‌های دو دهه گذشته، سبب کاهش شدید میزان آبدهی این آبخوان‌ها شده است و این امر تأثیر زیادی بر جوامع انسانی منطقه داشته است. هدف از این پژوهش ارزیابی تأثیرپذیری رژیم آبدهی و همچنین شناخت روند رژیم آبدهی چشمه‌های کارستی حوضه رودخانه الوند از رخداد خشکسالی در طول چندین دهه گذشته است. آمار ماهانه بارش و دبی ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری، داده‌های اصلی پژوهش هستند و بر اساس مشابه‌بودن شرایط اقلیمی، ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی کارست سه چشمه سرابگرم، ماراب و ورده‌ناو به‌عنوان چشمه‌های شاخص انتخاب شدند. از شاخص SPI برای تحلیل خشکسالی‌ها و از روش‌های آماری استانداردسازی دبی و بارش، RAPS، محاسبه شاخص δ و تعیین خشکسالی هیدرولوژیکی و ارتباط آن با خشکسالی هواشناسی برای ارزیابی و برآورد تأثیرپذیری رژیم آبدهی چشمه‌ها از رخداد خشکسالی استفاده شد. نتایج پژوهش نشان داد، هر سه چشمه به کاهش بارش حساس است؛ اما زمان واکنش به کاهش بارش در سه چشمه یکسان نیست؛ همچنین تأخیر زمانی بین رخداد خشکسالی هواشناسی با کاهش آبدهی چشمه‌ها وجود دارد و از ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۹ روند نزولی در رژیم آبدهی چشمه‌ها مشاهده می‌شود. تأثیرپذیری آبدهی چشمه‌ها از خشکسالی به توسعه‌یافتگی سیستم‌های کارستی، حجم ذخیره دینامیکی (اثر حافظه) آبخوان، مدت و شدت خشکسالی بستگی دارد و رخداد دو دوره خشک شدید، اثر حافظه آبخوان‌ها را تعدیل کرده و باعث شده است که از سال ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۹ خشکسالی هیدرولوژیکی ملایمی در رژیم آبدهی چشمه‌ها غلبه داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: خشکسالی، چشمه‌های کارستی، رژیم آبدهی، RAPS، حوضه رودخانه الوند

مقدمه

خشکسالی از اصلی‌ترین و قدیمی‌ترین بلاایهای طبیعی است که انسان از دیرباز با آن آشنا بوده است (فرج‌زاده؛ ۱۳۸۴، ۵) و از مهمترین بلاای طبیعی است که با وقوع آرام و تدریجی‌اش، بر هر اقلیمی تأثیر می‌گذارد و بر ابعاد مختلف زندگی بشر نیز تأثیرگذار است (حسن‌زاده و همکاران؛ ۱۳۹۱، ۲). خشکسالی فاجعه‌ای زیست‌محیطی شناخته شده است (میشرا و سینگ؛ ۲۰۳، ۲۱۰) و به یک دوره زمانی تسلط آب و هوای خشک غیرعادی گفته می‌شود که باعث عدم تعادل بین عرضه و تقاضای آب شده است و تأثیرات اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی را به دنبال دارد (زانگ و همکاران؛ ۲۰۱۲، ۴۸۲).

کمبود بارش در یک منطقه برای دوره‌های زمانی طولانی مدت به‌عنوان خشکسالی هواشناسی شناخته می‌شود. این کمبود آب در چرخه هیدرولوژیکی منتشر می‌شود و انواع مختلف خشکسالی را ایجاد می‌کند (فیوریلو و گادانگو؛ ۲۰۱۰، ۳؛ ۱۸۶۸). بروز خشکسالی و کاهش بارش بر منابع آب و کشاورزی در هر منطقه تأثیرگذار است (خوش‌اخلاق و همکاران؛ ۱۳۸۹، ۲۰). تغییرپذیری منابع آب زیرزمینی از تغییرات اقلیمی ناشی از فرایندهای هیدرولوژیکی مانند بارش، تبخیر و تعرق و تعامل با آب سطحی انجام می‌گیرد (چن و همکاران؛ ۲۰۰۴، ۴۵؛ ۲۰۰۴). تالاکسن و وان‌لانین (۲۰۰۴) معتقدند، اگر تغذیه آب‌های زیرزمینی و جریان‌های سطحی با تأثیر از خشکسالی

کاهش یابند، خشکسالی هیدرولوژیکی رخ می‌دهد.

مهم‌ترین کار در زمینه ایجاد یا توسعه شاخص برای تعریف خشکسالی هیدرولوژیکی، ایجاد آستانه‌هایی از متغیرهای هیدرولوژیکی برای بارش، دبی رودخانه، دبی چشمه، سطح آب زیرزمینی و سطح دریاچه است که پس از تعریف این آستانه می‌توان آغاز، شدت، مدت و پایان خشکسالی هیدرولوژیکی را تعریف کرد (فیوریلو و گادانگو؛ ۲۰۱۲، ۲۲۷).

آبخوان‌های کارستی مثل مخازن بزرگ طبیعی بارندگی عمل می‌کنند و دبی چشمه‌های کارستی منعکس‌کننده دوره‌های خشک، تر و تغییرات درازمدت بارشی هستند (اسمیت و هنت؛ ۲۰۱۰، ۶۱۳). دبی آبخوان‌های کارستی از اقلیم، ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی کارست تأثیر می‌پذیرد (فیوریلو؛ ۲۰۰۹، ۷؛ ۲۹۰) و واکنش سیستم‌های کارستی به نوسانات بارش با میزان توسعه‌یافتگی سیستم کارستی کنترل می‌شود و بر این اساس سیستم‌های کارستی در دو دسته سیستم‌های مجرای و افشان طبقه‌بندی می‌شوند. در سیستم‌های با سامانه مجرای، واکنش به بارش در زمان کوتاه رخ می‌دهد، اما در سیستم‌های افشان، زمان واکنش به نوسانات بارش طولانی‌تر است.

امروزه نیاز به تأمین آب، برای رفع نیاز جوامع انسانی و زیست‌بوم‌های طبیعی به‌طور فزاینده‌ای در سطح جهان اهمیت یافته است (گونند و همکاران؛ ۲۰۱۱، ۲۴؛ ۸). آبخوان‌های کارستی در مناطق نیمه‌خشک در برابر تغییرات اقلیمی بسیار آسیب‌پذیر

1 - Mishra and Singh, 2010

2 - Zang et al, 2011

3 - Fiorillo, Guadagno, 2010

4 - Chen et al, 2004

5 - Tallaksen and Van Lanen 2004

6 - Smith and Hunt, 2010

7 - Fiorillo, 2009

8 - Gondwe et al (2011)

همکاران^۳ (۲۰۰۴) در پژوهشی به ارزیابی واکنش چشمه کارستی شنتو^۴ در شمال چین پرداختند و با استفاده از روش تجزیه فصلی در بازه زمانی ۱۹۵۸ تا ۱۹۹۸ نشان دادند کاهش شدید دبی در چندین دهه گذشته به علت کاهش بارش در منطقه بوده است.

فیوریلو و همکاران (۲۰۰۷) به تجزیه و تحلیل آبدی چشمه‌های کارستی در منطقه ناپل ایتالیا با استفاده از روش‌های آماری و سری زمانی پرداختند. آنها بیان کردند کاهش تغذیه به علت کاهش بارش سبب کاهش دبی شده است. فیوریلو (۲۰۰۹) به بررسی هیدروگراف چشمه‌ها به عنوان یک شاخص خشکسالی در مناطق کارستی جنوب ایتالیا پرداخت. نتایج نشان داد رخداد خشکسالی هواشناسی منجر به خشکسالی هیدرولوژیکی در یک سال بعد می‌شود.

فیوریلو و همکاران (۲۰۱۰) در بررسی ارتباط بین دبی چشمه‌های کارستی و بارش با استفاده از روش ارتباط متقابل نشان دادند ارتباط قوی بین کاهش بارش و کاهش دبی وجود دارد. فیوریلو و همکاران (۲۰۱۰) در ارزیابی ارتباط دوره‌های خشک با دبی چشمه‌ها با استفاده از شاخص SPI در جنوب ایتالیا اظهار داشتند هنگامی که میزان SPI ۱۲ ماهه ۱- باشد، کاهش دبی رخ می‌دهد و هنگامی که این میزان به ۱/۵- برسد، هیدروگراف بدون نقطه اوج مشخص است.

فیوریلو و همکاران (۲۰۱۲) سری زمانی طولانی مدت دبی چشمه را در ارتباط با خشکسالی در چشمه‌های کارستی جنوب ایتالیا مطالعه کردند. آنها با استفاده از شاخص SPI و شاخص‌های آماری نشان

هستند، بنابراین ارزیابی کمی و کیفی منابع آب کارست و حفاظت از آنها در طی دو دهه گذشته در فهرست اولویت‌های اصلی بسیاری از جوامع قرار گرفته است (پاول و همکاران؛ ۲۰۰۷، ۴۷۹).

در منطقه نیمه خشک غرب ایران، چشمه‌های کارستی، منبع تأمین آب جوامع انسانی هستند و در طول دو دهه گذشته این آبخوان‌ها، از افزایش دوره‌های خشکسالی و همچنین آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی تأثیر گرفته‌اند. چشمه‌های منتخب سرابگرم، ماراب و ورده‌ناو با مجموع آبدی بیش از ۸۰ میلیون مترمکعب تأمین کننده آب شرب و کشاورزی جوامع انسانی اطراف خود هستند و نقش اساسی در تداوم حیات انسانی را در منطقه دارند؛ بنابراین شناخت تأثیرپذیری این چشمه‌ها از رخداد خشکسالی‌ها برای مدیریت منابع آب کارست در منطقه امری لازم و ضروری است. هدف از این پژوهش ارزیابی تأثیرپذیری رژیم آبدی چشمه‌های کارستی سرابگرم، ماراب و ورده‌ناو از رخداد خشکسالی است. در زمینه بررسی تأثیر خشکسالی‌ها بر منابع آب کارست، پژوهش‌های متعددی در سطح جهان و تا حدودی ایران انجام شده است که در این زمینه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

اورهوا^۲ (۲۰۰۴) با بررسی خشکسالی بلندمدت طی دوره آماری ۱۹۸۲-۱۹۹۴ در بلغارستان مشخص کرد، آبدی چشمه‌های کارستی در آبخوان‌های کارستی انتخابی کاهش قابل توجهی داشته است و این منابع در مقابل خشکسالی‌ها آسیب‌پذیر هستند. ما و

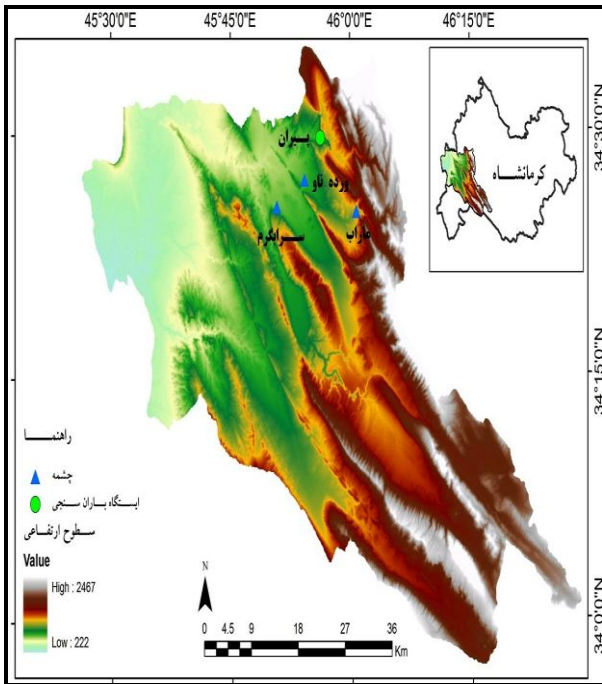
^۳ -Ma et al

^۴ - Shentou

^۱ - Paul et al, 2007

^۲ - Orehova

هیدرولوژیکی چشمه‌های مورد بررسی را در دوره آماری مورد مطالعه نشان می‌دهند. حداکثر و حداقل دبی چشمه‌های سراب گرم و ورده‌ناو در ماه‌های اسفند و مهر و در چشمه ماراب، در فروردین و مهر رخ می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- ویژگی‌های بارش ایستگاه پیران

چشمه	دبی	دبی	دبی	ضریب
میانگین	حداکثر	حداقل	تغییرات	
سرابگرم	۱۸۲۷	۲۸۰۵	۶۱۶	۱/۱۹
ورده‌ناو	۱۳۲	۲۷۶	۵۸	۱/۶۵
ماراب	۶۹۰	۲۶۷۸	۲۴۷	۳/۵۲

جدول ۲- ویژگی‌های هیدرولوژیکی چشمه‌های

مورد مطالعه

ایستگاه	بارش	بارش	بارش	میانگین
میانگین	حداکثر	حداقل	دما	
پیران	۵۱۹	۸۵۷	۱۹۵	۱۹/۸

دادند به علت وجود حافظه آبخوان، خشکسالی هیدرولوژیکی با تأخیر زمانی نسبت به خشکسالی هواشناسی رخ می‌دهد.

عابدینی (۱۳۸۹) به بررسی ارتباط خشکسالی و منابع آب کارستی در حوضه مهارلو پرداخت. نتایج وی نشان داد نوسانات سطح ایستایی و آبدهی چشمه در آبخوان‌های کارستی مورد مطالعه، مستقل از خشکسالی‌های کوتاه‌مدت و رفتار این آبخوان‌ها بیشتر متأثر از رخداد خشکسالی‌های بلندمدت است.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

حوضه کارستی رودخانه الوند در زون زاگرس چین‌خورده در غرب استان کرمانشاه واقع شده است (شکل ۱) و از نظر تقسیمات سیاسی بخش‌هایی از شهرستان‌های گیلانغرب، سرپل ذهاب، دالاهو و قصرشیرین را در بر می‌گیرد. رخنمون سازندهای کربناته آسماری، آسماری-شهبازان و ایلام و فراهم بودن سایر شرایط مؤثر در فرایند کارست‌زایی، باعث شکل‌گیری ژئومورفولوژی کارست توسعه‌یافته در ارتفاعات منطقه و در نتیجه سبب شکل‌گیری آبخوان‌های کارستی و سراب‌های متعدد در این حوضه شده است.

بر اساس آمار ۴۵ سال ایستگاه پیران، ماه‌های بهمن و اسفند با ۹۵ و ۹۲ میلیمتر بارش مرطوب‌ترین و ماه‌های تیر و مرداد بدون بارش هستند. به علت زمستانه بودن بارش منطقه، درصد قابل توجهی از بارش در ارتفاعات بالای ۱۵۰۰ متری به صورت برف نازل می‌شود که این امر تأثیر قابل توجهی بر سیکل هیدرولوژیکی چشمه‌ها دارد. جدول (۱) ویژگی‌های بارش ۴۵ ساله ایستگاه پیران و جدول (۲) ویژگی‌های

مواد و روش‌ها

با توجه به هدف پژوهش، ابتدا سه چشمه سرابگرم، ورده‌ناو و ماراب که از نظر اقلیمی شرایط مشابهی دارند و در یک منطقه واقع شده‌اند، به‌عنوان چشمه‌های شاخص انتخاب شدند. به‌منظور پایش خشکسالی‌های رخ داده در ایستگاه باران‌سنجی پیران در بازه زمانی ۴۵ ساله، از شاخص SPI استفاده شد. برای ارزیابی تأثیرپذیری دبی چشمه‌ها از نوسانات بارشی و رخداد خشکسالی‌ها از مقایسه بارش سالانه استاندارد شده (معادله ۱) و دبی سالانه استاندارد شده (معادله ۲) استفاده شد. تحلیل روند دبی چشمه‌ها و بارش منطقه با استفاده از روش آماری RAPS^۱ یا مجموع جزئی تعدیل‌یافته (معادله ۳) انجام شد. برای ارزیابی تأثیر بارش بر رژیم آبدهی چشمه‌ها نیز ابتدا میانگین استاندارد شده متوسط سالانه دبی و بارش (معادله ۴ و ۵) محاسبه و سپس با استفاده از معادله (۶) تأثیرپذیری رژیم آبدهی چشمه‌ها از رخداد خشکسالی مشخص شد. با مقایسه دبی میانگین سالانه استاندارد شده با شاخص (SPI) در مقیاس‌های زمانی مختلف ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه، تأثیر خشکسالی‌های هواشناسی بر رخداد خشکسالی هیدرولوژیکی در چشمه‌ها ارزیابی شد. از داده‌های بارش ماهانه ایستگاه باران‌سنجی پیران در بازه زمانی ۱۳۹۰-۱۳۴۵ و دبی ماهانه ایستگاه‌های هیدرومتری چشمه سرابگرم در بازه زمانی (۱۳۹۰-۱۳۶۲) و چشمه‌های ماراب و ورده‌ناو در دوره زمانی (۱۳۹۰-۱۳۷۳) به‌عنوان داده‌های اصلی پژوهش بهره گرفته شد. محاسبات آماری و ترسیم نمودارهای مربوطه در محیط نرم‌افزارهای Minitab و Excel انجام شد.

یافته‌های پژوهش

شاخص SPI

مکی و همکاران^۲ (۱۹۹۳) برای ارزیابی خشکسالی، شاخص SPI^۳ را ارائه دادند. این شاخص به‌علت سادگی، استفاده از داده‌های قابل دسترس و قابلیت محاسبه برای مقیاس زمانی دلخواه، مناسب‌ترین نمایه برای تحلیل خشکسالی و تحلیل مکانی آن است (هیس و همکاران^۴؛ ۱۹۹۹، ۴۳۰) و امکان مطالعه وضعیت منابع آب در دوره‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت را که در کشاورزی، مطالعات جریان‌های سطحی و آبخوان‌های زیرزمینی دارای اهمیت است، فراهم می‌کند (وو و همکاران^۵؛ ۲۰۰۱، ۷۴۷). SPI از اختلاف بارش و میانگین بارش نسبت به انحراف معیار بارش به‌دست می‌آید. این روش از طریق برآزش توزیع احتمال مناسب بر سری مجموع بارش‌های ماهانه در بازه زمانی معین حاصل و با تبدیل احتمالات تجمعی توزیع گاما به توزیع نرمال استاندارد محاسبه می‌شود که خشکسالی به‌عنوان $SPI < 0$ تعریف می‌شود. جدول (۳) شدت خشکسالی را بر اساس مقادیر SPI نشان می‌دهد. در این مطالعه، شاخص SPI برای مقیاس‌های زمانی سالانه و ماهانه (۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه) تعریف شده است.

جدول ۳ - طبقات خشکسالی بر مبنای شاخص

SPI (مکی و همکاران ۱۹۹۳)

طبقات خشکسالی	SPI مقدار
خشکسالی ملایم	۰ تا ۰/۹۹-
خشکسالی متوسط	۱- تا ۱/۴۹-
خشکسالی شدید	۱/۵- تا ۱/۹۹-
خشکسالی خیلی شدید	کمتر از ۲-

^۲ - Mckee et al, 1993

^۳ - Standardized Precipitation Index

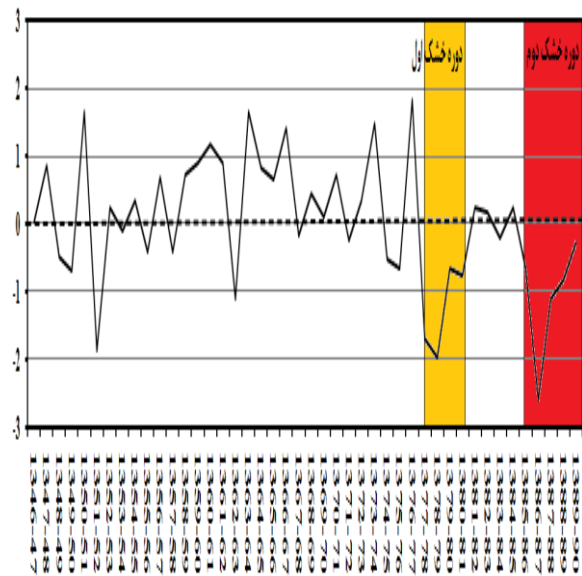
^۴ - Hayes et al., 1999

^۵ - Wu et al, 2001

^۱ - Rescaled adjusted partial sums

در این معادلات P_s بارش استاندارد شده، Q_s دبی استاندارد شده، μ میانگین و σ انحراف معیار سری زمانی بارش و دبی در دوره زمانی مورد نظر هستند. مقایسه بارش و دبی استاندارد شده سالانه (شکل ۳) نشان می‌دهد، دبی هر سه چشمه به کاهش بارش حساس است، اما زمان واکنش به نوسانات بارشی در هر سه چشمه یکسان نیست. در چشمه سرابگرم کاهش بارش و رخداد خشکسالی در طی دوره زمانی ۱۳۶۷ تا ۱۳۷۱ منجر به کاهش دبی شده است، اما بر اثر رخداد خشکسالی سال‌های ۱۳۷۳ تا ۱۳۷۵ دبی استاندارد شده به زیر مقدار متوسط (صفر) نزول می‌کند. با وقوع ترسالی ۱۳۷۵-۷۶ دبی افزایش یافته و دوباره با رخداد دوره خشک اول، دبی استاندارد شده در سال ۱۳۷۹ به زیر مقدار متوسط رفته و کمترین مقدار آن نیز در سال ۱۳۸۸ رخ داده است. به علت کم شدن حجم ذخیره دینامیکی (کاهش اثر حافظه آبخوان) میانگین دبی استاندارد شده سالانه چشمه سرابگرم از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۹ به زیر میانگین افت می‌کند و به این دلیل این چشمه بیشترین تأثیرپذیری را از وقوع خشکسالی‌ها داشته است. واکنش دبی به نوسانات بارش در چشمه سرابگرم همزمان نیست و دارای تأخیر زمانی قابل توجه (حدود ۲۴ ماه) نسبت به نوسانات بارش است. بر اثر رخداد ترسالی ۱۳۷۵-۷۶ و افزایش بارش استاندارد، دبی استاندارد چشمه‌های ماراب و ورده‌ناو افزایش یافته است. با رخداد دو دوره خشک و کاهش بارش، دبی چشمه‌ها کاهش می‌یابد و در سال ۱۳۷۸ پس از رخداد خشکسالی بسیار شدید، میزان دبی استاندارد چشمه‌های ماراب و ورده‌ناو نیز به زیر مقدار متوسط کاهش نزول می‌کند. با نرمال شدن بارش‌ها در

بررسی نمودار شاخص SPI سالانه (شکل ۲) نشان می‌دهد، دو دوره خشکسالی چهارساله از سال آبی ۱۳۷۶-۷۷ تا ۱۳۷۹-۸۰ و یک دوره پنج‌ساله از سال آبی ۱۳۸۴-۸۵ تا ۱۳۸۸-۸۹ در منطقه مورد مطالعه رخ داده است. دو دوره خشک مذکور از نظر تداوم و شدت در دوره آماری ۴۵ ساله بی‌سابقه هستند. فاصله زمانی این دو دوره خشک (۸۱-۱۳۸۰ تا ۸۴-۱۳۸۳) بارش نرمال بوده و ترسالی رخ نداده است.



شکل ۲- نمودار SPI سالانه ایستگاه باران‌سنجی

پیران

ارزیابی اثر اقلیم بر دبی چشمه‌ها

هیدروگراف چشمه‌های کارستی، منعکس‌کننده میزان بارش تجمعی در طول یک سال آبی است (فیوریلیو؛ ۲۰۰۹) که در سال خشک، با تأثیر کاهش بارش، دبی نیز کاهش می‌یابد. برای استانداردسازی مقادیر بارش سالانه P_i و دبی میانگین سالانه Q_i از معادله‌های (۱) و (۲) استفاده شد:

$$Ps = (P_i - \mu) / \sigma \quad \text{معادله (۱)}$$

$$Qs = (Q_i - \mu) / \sigma \quad \text{معادله (۲)}$$

می‌شود:

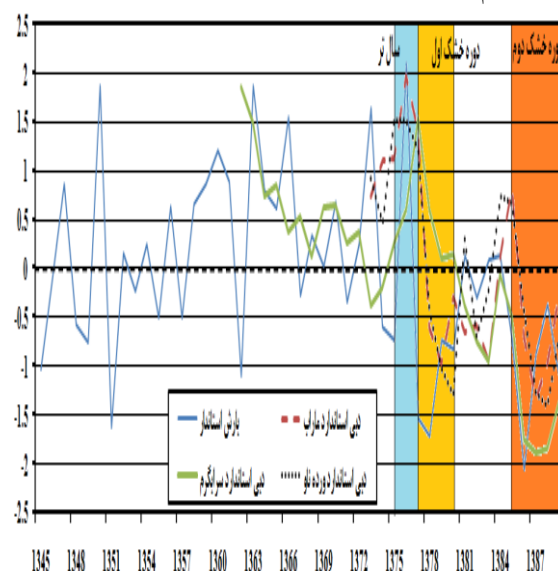
(معادله ۳):

$$RAPS_k = X_k = \sum_{t=1}^{k \leq n} \frac{Y_t - \mu_Y}{\sigma_Y}$$

در این معادله μ_Y میانگین نمونه‌ها، σ_Y انحراف معیار، n تعداد مقادیر سری زمانی و k مقدار نهایی شمارنده جمع است. کاهش ارزش مجموع جزئی تعدیل یافته (Y_t) نشان‌دهنده روند نزولی و افزایش آن نشان‌دهنده روند افزایشی است (فیوریلو و گادانگو؛ ۲۰۱۲، ۲۲۷۸). ارزیابی سری زمانی RAPS در ایستگاه باران‌سنجی پیران و چشمه‌های مورد مطالعه نشان‌دهنده (شکل ۴) وجود روند افزایشی کلی از سال ۱۳۶۲ تا ۱۳۷۶ و روند کاهشی از سال ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۹ است. این روند در نتیجه رخداد دوره‌های طولانی مدت کاهش بارش در منطقه است. در مقیاس زمانی چندساله (شکل ۴)، چندین روند افزایشی و کاهشی در هر یک از چشمه‌ها قابل مشاهده است که بیشتر تحت تأثیر ویژگی‌های آبخوان و اثر حافظه آن است (جدول ۴). در ایستگاه باران‌سنجی پیران و چشمه سرابگرم، روندهای افزایشی ۱ و کاهشی ۱ همزمانی کامل دارد، اما در سایر روندها این همزمانی یکسان نیست. روندهای افزایشی و کاهشی در چشمه‌های ماراب و ورده‌ناو از نظر زمانی همزمان است، اما با ایستگاه پیران همزمانی کامل ندارند.

بررسی کلی نمودار RAPS نشان‌دهنده روند افزایشی در دوره زمانی ۱۳۶۲-۱۳۷۷ و روند کاهشی در سال‌های ۱۳۷۸-۱۳۸۹ است. همزمانی این دو دوره در هر سه چشمه و ایستگاه باران‌سنجی یکسان نیست که این امر مربوط به اثر حافظه آبخوان‌ها و همچنین یکسان نبودن طول دوره آماری است. به‌طورکلی، روند

سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۵ میزان دبی استاندارد شده چشمه‌های ماراب و ورده‌ناو به بیشتر از میزان متوسط برمی‌گردد و دوباره بعد از رخداد خشکسالی خیلی شدید ۸۷-۱۳۸۶، میزان دبی استاندارد به زیر مقدار متوسط نزول می‌کند و به کمترین میزان خود در طول دوره آماری می‌رسد. به‌علت کم‌بودن اثر حافظه آبخوان در این آبخوان‌ها، واکنش دبی تأخیر زمانی در حدود ۱۲ ماه دارد و تأثیرات بلندمدت رخداد نوسانات بارشی در این چشمه‌ها کمتر از چشمه سرابگرم است.



شکل (۳) - نمودار میانگین استاندارد شده سالانه

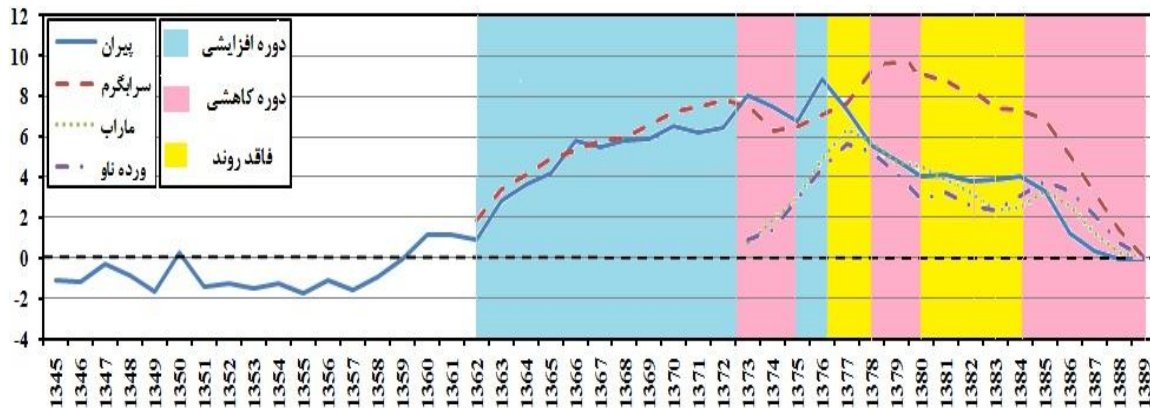
دبی و بارش

روند یابی بارش و دبی

روش RAPS یا مجموع جزئی تعدیل یافته، برای نمایان‌سازی روند و نوسانات آن در برابر زمان در سری‌های زمانی را گریبچت و فرناندز (۱۹۹۴) ابداع کردند و فیوریلو و گادانگو (۲۰۱۰ و ۲۰۱۲) در چشمه‌های کارستی جنوب ایتالیا به‌کار گرفتند. روش RAPS برای هر سری زمانی Y_t به شرح زیر تعریف

و در واقع رخداد این دو دوره خشک، باعث ایجاد روند کاهشی در چشمه‌ها شده است (شکل ۴).

کاهشی کلی رخ داده در چشمه‌ها و ایستگاه باران‌سنجی، کاملاً با دو دوره خشک (۱۳۷۶-۱۳۷۷ تا ۱۳۷۹-۱۳۸۰) و (۱۳۸۴-۱۳۸۵ تا ۱۳۸۸-۱۳۸۹) ارتباط دارد



شکل ۴- نمودار روندیابی بارش و دبی چشمه‌ها در منطقه مورد مطالعه

جدول ۴- نوع روند و زمان رخداد آن در دبی چشمه‌ها و بارش در منطقه مورد مطالعه

ایستگاه-چشمه	روند افزایشی ۱	روند افزایشی ۲	روند کاهشی ۱	روند کاهشی ۲	بدون روند
پیران	۱۳۷۳-۱۳۶۲	۱۳۷۷-۱۳۷۵	۱۳۷۶-۱۳۷۴	۱۳۸۱-۱۳۷۷	۱۳۸۵-۱۳۸۱
سرابگرم	۱۳۷۳-۱۳۶۲	۱۳۸۰-۱۳۷۵	۱۳۷۶-۱۳۷۴	۱۳۸۹-۱۳۸۰	-
ماراب	۱۳۷۸-۱۳۷۳	۱۳۸۶-۱۳۸۳	۱۳۸۳-۱۳۷۸	۱۳۸۶-۱۳۸۹	-
ورده ناو	۱۳۷۸-۱۳۷۳	۱۳۸۶-۱۳۸۳	۱۳۸۳-۱۳۷۸	۱۳۸۶-۱۳۸۹	-

برای هر سال است. به صورت یک فرض، اگر ارتباط کامل بین بارش سالانه و متوسط دبی سالانه چشمه وجود داشته باشد، اختلاف بین $(Q_{s-m} - P_{s-m})$ باید صفر باشد (فیوریلو و گادانگو؛ ۲۰۱۲، ۲۲۷۸) که در عمل به علت ذخیره‌سازی بارش در آبخوان کارستی و تأثیرپذیری دبی از بارش‌های قدیمی‌تر این اتفاق رخ نمی‌دهد. برای ارزیابی میزان تأثیرپذیری دبی سالانه از بارش سالانه از معادله ۶ استفاده شده است:

$$\delta = (Q_{s-m} - P_{s-m}) \quad \text{معادله ۶:}$$

در چشمه سرابگرم، حداکثر ارزش (δ) که نشان‌دهنده تأثیرپذیری دبی از بارش سالانه است، در

ارزیابی تأثیر بارش بر رژیم آبدی چشمه‌ها

برای مقایسه بارش و رژیم آبدی چشمه‌ها، متوسط میانگین استاندارد شده دبی سالانه چشمه Q_{s-m} و میانگین استاندارد شده بارش سالانه P_{s-m} ، برای هر سال با استفاده از معادلات (۴ و ۵) محاسبه شد:

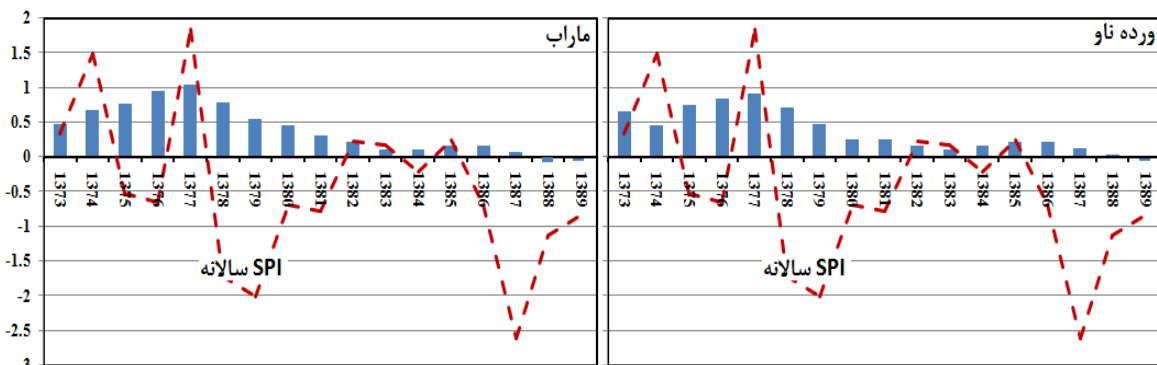
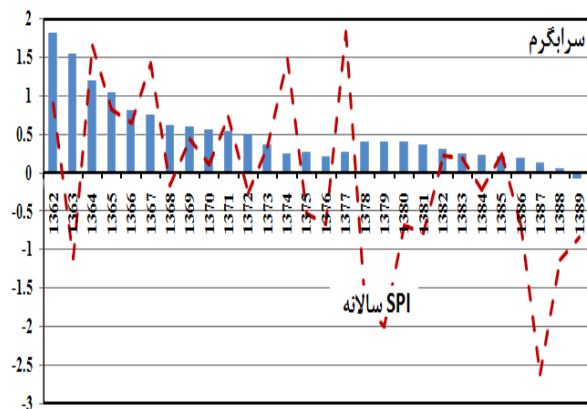
$$Q_{s-m} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_s}{n} \quad \text{معادله ۴:}$$

$$P_{s-m} = \frac{\sum_{i=1}^n P_s}{n} \quad \text{معادله ۵:}$$

در این معادلات Q_s و P_s به ترتیب دبی و بارش استاندارد شده و n مقادیر در دسترس دبی و بارش

شکل ۵- نمودار مقادیر (δ) در چشمه سرابگرم در چشمه‌های ماراب و ورده‌ناو حداکثر و حداقل ارزش (δ) به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۷ و ۱۳۸۹ رخ داده است (شکل ۶). حداکثر ارزش (δ) چشمه‌ها منطبق بر ترسالی ۱۳۷۷ و نشان‌دهنده تأثیر افزایش بارش در میزان تغذیه آبخوان‌هاست. در چشمه ماراب، از سال ۱۳۷۳ تا ۱۳۷۷ روند افزایشی رخ داده است و همزمان با وقوع دوره خشک اول، میزان (δ) کاهش یافته است. در دوره دوم خشک، مقدار (δ) کاهش شدید یافته و در سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۸۹ نیز مقادیر آن منفی شده است که نشان‌دهنده تأثیر کاهش بارش بر تغذیه آبخوان‌ها و در نتیجه کاهش دبی است. تشریح به کار رفته با کمی اختلاف برای چشمه ورده‌ناو قابل تعمیم است. در واقع تأثیرپذیری دبی از بارش در چشمه‌های ماراب و ورده‌ناو در نوسانات بارشی کوتاه‌مدت بیشتر از سرابگرم است. در نوسانات بارشی درازمدت، به علت تأثیرگذاری حافظه آبخوان، چشمه سرابگرم با تأخیر زمانی زیادی به رخداد نوسانات بارشی در سال‌های قبل واکنش نشان داده است، در حالی که دو چشمه دیگر تأخیر زمانی کمتری دارند.

سال ۱۳۶۲ و حداقل آن در سال ۱۳۸۹ رخ داده است. از سال ۱۳۶۲ تا ۱۳۷۷ روندی نزولی در آبدی چشمه مشاهده شده است، سپس، از سال ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۰ روند افزایشی و از سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۹ نیز روند کاهش‌ی حاکم است. بررسی شکل (۵) نشان می‌دهد، اثر حافظه آبخوان کارستی در تأثیرپذیری دبی از بارش نقش اساسی دارد و بعد از رخداد خشکسالی یا ترسالی اثر آن بر دبی دارای تأخیر زمانی است و در دوره خشک (۱۳۷۸ تا ۱۳۸۱) به علت حافظه آبخوان و تأثیر ترسالی ۱۳۷۷ میزان (δ) افزایش یافته است. در دوره خشک (۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹)، به علت کم‌شدن تأثیر حافظه آبخوان، میزان (δ) کاهش یافته است و در سال ۱۳۸۹ منفی می‌شود؛ بنابراین تأثیرپذیری دبی از بارش (δ) در طی دو دوره خشک به علت کاهش تغذیه آبخوان کمتر شده است.



شکل ۶- نمودار مقادیر (δ) در چشمه‌های ماراب و ورده‌ناو

ارزیابی ارتباط خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدرولوژیکی چشمه‌ها

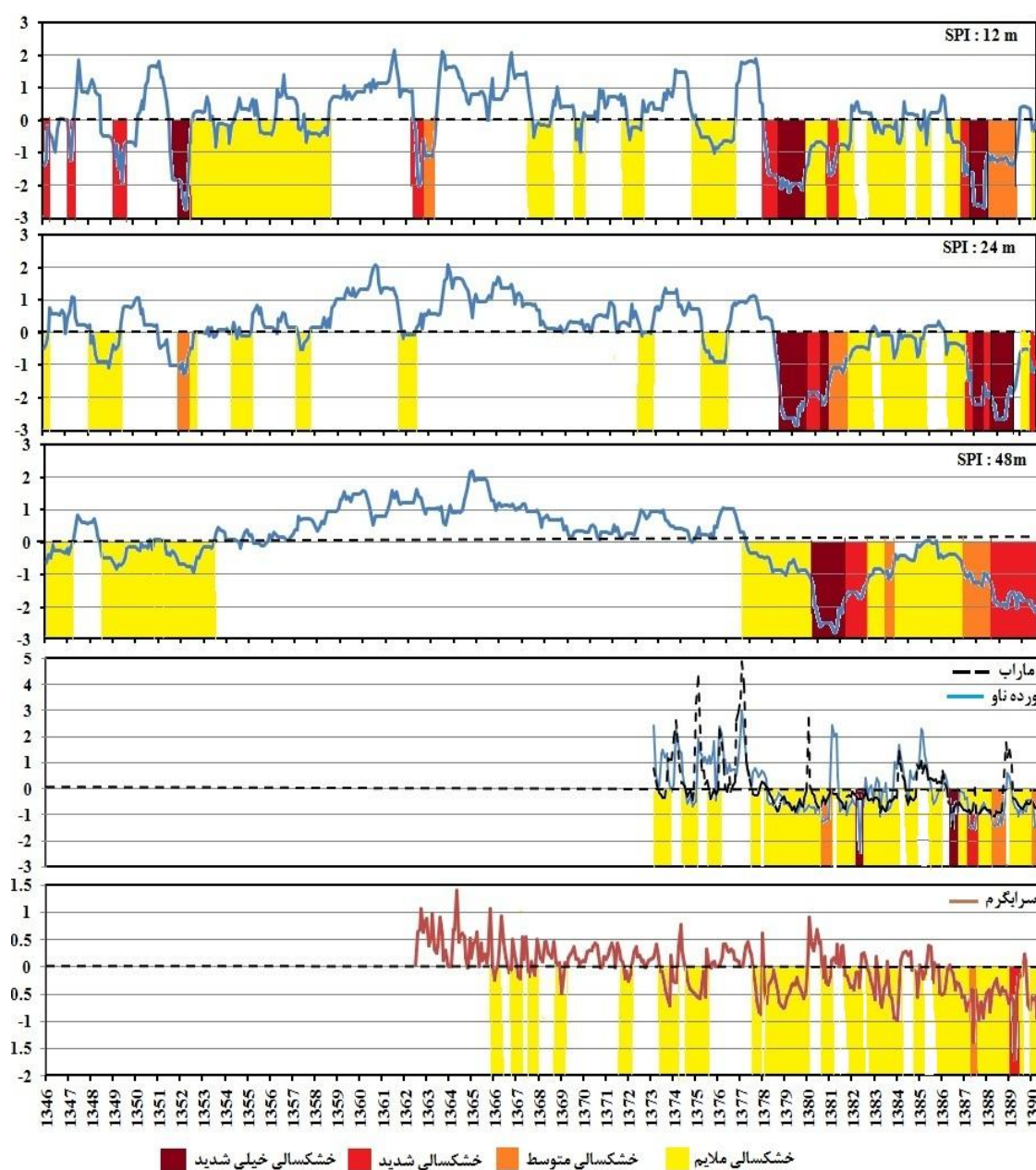
فیوریلو و گادانگو (۲۰۱۲) معتقدند دلیل اصلی خشکسالی هیدرولوژیکی در آب‌های زیرزمینی، کاهش بارندگی تجمعی در طی یک دوره زمانی بلندمدت است. در سیستم‌های کارستی، به‌علت حافظه آبخوان، کمبود بارش در مقیاس ماهانه نمود بارزی در آبدهی آبخوان‌های کارستی ندارد. طبق پژوهش‌های پیترز و همکاران^۱ (۲۰۰۳)، هیس‌دال و همکاران^۲ (۲۰۰۴)، نالبانتیس و تساکریس^۳ (۲۰۰۹) و فیوریلو و گادانگو (۲۰۱۰)، خشکسالی هواشناسی طولانی مدت باعث کاهش سطح پی‌زومتري و در نهایت کاهش دبی چشمه‌ها و منجر به رخداد خشکسالی هیدرولوژیکی می‌شود. در این پژوهش برای بررسی ارتباط بین خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی از مقایسه نمایه SPI‌های ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه و سری زمانی دبی میانگین استاندارد شده ماهانه استفاده شده است. در واقع تغییرات مشابه در دبی میانگین استاندارد شده ماهانه و نمایه SPI ماهانه، امکان مقایسه مستقیم بین بارش و دبی ماهانه را امکان‌پذیر می‌سازد (فیوریلو و گادانگو، ۲۰۱۲: ۲۲۸۰). برای تعیین شدت خشکسالی‌ها از تقسیم‌بندی مک‌کی و همکاران (۲۰۰۳) استفاده شده است (جدول ۳). بررسی شکل (۷) نشان می‌دهد اختلاف زمانی بین رخداد خشکسالی هواشناسی با خشکسالی هیدرولوژیکی وجود دارد و همچنین شدت خشکسالی هواشناسی با

خشکسالی هیدرولوژیکی یکسان نیست. بازتاب خشکسالی‌های هواشناسی در خشکسالی‌های هیدرولوژیکی در سیستم‌های کارستی حوضه رودخانه الوند، عمدتاً به‌صورت خشکسالی‌های ملایم طولانی مدت است و در این میان واکنش چشمه‌های ماراب و ورده‌ناو با واکنش چشمه سرابگرم تفاوت دارد. در چشمه‌های ماراب و ورده‌ناو، بعد از خشکسالی‌های شدید و خیلی شدید ۱۳۷۹، ۱۳۷۸ و خشکسالی‌های متوسط ۱۳۸۰ و ۱۳۸۱ یک خشکسالی هیدرولوژیکی متوسط در سال ۱۳۸۱ رخ داده است، در حالی که بازتاب این خشکسالی‌ها در چشمه سرابگرم به‌صورت خشکسالی هیدرولوژیکی ملایم است. طی رخداد خشکسالی‌های متوسط، خیلی شدید، شدید و متوسط ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹، چشمه‌های ماراب و ورده‌ناو دو خشکسالی خیلی شدید و شدید و دو خشکسالی متوسط را تجربه کرده‌اند در حالی که در چشمه سرابگرم یک خشکسالی شدید و یک خشکسالی متوسط هیدرولوژیکی رخ داده است. در این دوره خشک، خشکسالی متوسط هیدرولوژیکی در هر سه چشمه غلبه دارد و در بازه زمانی ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۹ به‌علت رخداد خشکسالی‌های متعدد هواشناسی، خشکسالی‌های هیدرولوژیکی با شدت ملایم در چشمه‌های کارستی غلبه داشته‌اند. اختلاف در واکنش به خشکسالی هواشناسی در چشمه‌ها، به اثر حافظه آبخوان کارستی بستگی دارد.

¹ - Peters et al. 2003

² - Hisdal et al. 2004

³ - Nalbantis and Tsakiris, 2009



شکل ۷- نمودار مقایسه دبی استاندارد شده چشمه‌ها و شاخص SPI

بحث و نتیجه‌گیری

تأثیرپذیری رژیم آبدهی چشمه‌های کارستی از نوسانات بارشی، تحت تأثیر عوامل مختلفی همچون ویژگی‌های آبخوان و میزان حافظه آن، ویژگی‌های ژئومورفولوژی کارست حوضه تغذیه‌کننده آبخوان، ویژگی‌های اقلیمی همچون میزان نوسان بارش، زمان

کاهش بارش در سال آبی، نوع بارش، میزان تبخیر و دما و ویژگی‌های محیطی همچون پوشش گیاهی و خاک بستگی دارد. نوسان شدید در میزان بارش همچون رخداد خشکسالی و ترسالی‌های شدید و وقوع دوره‌های خشک و تر طولانی مدت، تأثیر زیادی بر دبی آبخوان‌های کارستی دارد و تأثیرات دیگر

عوامل مؤثر را کاهش می‌دهند. مقایسه دبی و بارش میانگین استاندارد شده سالانه نشان می‌دهد هر سه چشمه به کاهش بارش حساس بوده است، اما زمان واکنش به کاهش بارش در سه چشمه یکسان نیست. چشمه سرابگرم به علت حجم ذخیره دینامیکی بالا و اثر حافظه زیاد آبخوان در مقابل نوسانات یک سال بارش پایدار است. روندیابی بارش و دبی ایستگاه باران‌سنجی پیران و چشمه‌های مورد مطالعه با استفاده از روش RAPS نشان دهنده وجود روند افزایشی کلی از سال ۱۳۶۲ تا ۱۳۷۶ و روند کاهشی از سال ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۹، در نتیجه رخداد دوره‌های طولانی مدت کاهش بارش در منطقه است. وجود روندهای مختلف در مقیاس زمانی کوتاه مدت در چشمه‌ها تحت تأثیر ویژگی‌های آبخوان و اثر حافظه آن از رخداد نوسانات بارشی کوتاه مدت هستند. به این دلیل، بین رخداد روندها در بارش و دبی چشمه‌ها اختلاف زمانی وجود دارد و از سال ۱۳۷۷ به بعد چشمه‌ها دارای روند کاهشی هستند. ارزیابی ارزش (δ) در چشمه‌های مورد مطالعه نشان دهنده روند کاهشی است که این امر به معنی کاهش تغذیه آبخوان‌ها بر اثر رخداد خشکسالی است و در نتیجه دبی بر اثر رخداد خشکسالی کاهش می‌یابد. چشمه سرابگرم به علت حجم ذخیره دینامیکی بالا و در نتیجه اثر حافظه قوی در مقابل نوسانات بارشی کوتاه مدت پایدارتر و دارای زمان تأخیر طولانی نسبت به نوسان بارش است. در چشمه‌های مورد مطالعه، اختلاف زمانی بین رخداد خشکسالی هواشناسی با خشکسالی هیدرولوژیکی وجود دارد و همچنین شدت آنها یکسان نبوده است و بازتاب خشکسالی‌های هواشناسی در خشکسالی‌های هیدرولوژیکی عمدتاً به صورت خشکسالی‌های ملایم

طولانی مدت است. به علت حجم ذخیره دینامیکی (اثر حافظه آبخوان)، رخداد خشکسالی هواشناسی و تأثیر آن در وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی در چشمه‌های مورد مطالعه یکسان نیست و تأثیرپذیری چشمه سرابگرم کمتر از دو چشمه دیگر است؛ زیرا حجم ذخیره دینامیکی چشمه سرابگرم بیشتر از دو چشمه دیگر است. در نهایت اینکه، چشمه‌های کارستی مورد مطالعه، از نوسانات بارشی تأثیر می‌پذیرد و از ۱۳۷۷ به بعد روند آبدهی نزولی است. تأثیرپذیری این چشمه‌ها از نوسانات بارشی به توسعه یافتگی سیستم‌های کارستی، اثر حافظه آبخوان و مدت و شدت رخداد نوسانات بارشی بستگی دارد. رخداد دو دوره خشک شدید (۱۳۷۶-۱۳۷۷ تا ۱۳۷۹-۸۰ و ۱۳۸۴-۸۵ تا ۱۳۸۸) تا حد زیادی اثر حافظه آبخوان را تعدیل می‌کند و باعث غلبه خشکسالی هیدرولوژیکی ملایم در چشمه‌ها در بازه زمانی ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۹ شده است.

منابع

- فرج‌زاده، منوچهر، (۱۳۸۴). خشکسالی از مفهوم تا راهکار. انتشارات سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، تهران.
- حسن‌زاده، ی، لطف‌الهی یقین، م. ع.، شاهوردی، س.، فرزین، س.، فرزین، ن. (۱۳۹۱). نوویز زدایی و پیش‌بینی سری زمانی بر پایه الگوریتم موجک و نظریه آشوب (مطالعه موردی: شاخص پایش خشکسالی SPI شهر تبریز)، تحقیقات منابع آب ایران، شماره ۳، صص ۱۳-۱.
- خوش‌اخلاق، فرامرز، رنجبر، فیروز، طولابی، سوسن، مقبل، معصومه، معصومپور سماکوش، جعفر، (۱۳۸۹). بررسی خشکسالی در سال آبی ۱۳۸۶-۸۷ و اثرات آن بر منابع آب کشاورزی (نمونه موردی: شهرستان مرودشت)، مجله جغرافیا، شماره ۲۴، صص

- No. 3, pp. 429-438.
- Hisdal, H., Tallaksen, L.M., Clausen, B., Peters, E., Gustard, A., 2004, Hydrological drought characteristics, In: Tallaksen LM and Van
- Tallaksen, L.M., Van Lanen, H, A (eds) Hydrological drought: processes and estimation methods for stream flow and groundwater, Elsevier, pp. 139-198.
- Ma, T., Wang, Y., Guo, Q., 2004, Response of carbonate aquifer to climate change in northern China: a case study at the Shentou karst springs, Journal of hydrology, Vol. 297, No. 1, pp. 274-284.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J., 1993, The relationship of drought frequency and duration to time scales, In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183). Boston, MA: American Meteorological Society.
- Mishra, A. K., Singh, V. P., 2010, A review of drought concepts, Journal of Hydrology, Vol. 391, No. 1, pp. 202-216.
- Nalbantis, I., Tsakiris, G., 2009, Assessment of hydrological drought revisited, Water resources management, Vol. 23, No. 5, pp. 881-897.
- Paul Novel, J., Dimadi, A., Zervopoulou, A., Bakalowicz, M., 2007, The Aggitis karst system, Eastern Macedonia, Greece: Hydrologic functioning and development of the karst structure, Journal of Hydrology, Vol. 334, pp. 477- 492.
- Peters, E., Torfs, P. J. J. F., Van Lanen, H. A. J., Bier, G., 2003, Propagation of drought through groundwater—a new approach using linear reservoir theory, Hydrological processes, Vol. 17, No. 15, pp. 3023-3040.
- Smith, B.A, Hunt, B.B., 2010, A comparison of the 1950s drought of record and the 2009 drought, Barton Springs segment of the Edwards Aquifer, Central Texas, Gulf Coast Assoc Geol Soc Trans, VOL. 60: pp. 611-622
- Tallaksen, L.M., Van Lanen, H.L.J., 2004, Drought as a natural hazard. In: (eds) Hydrological drought: processes and estimation methods for stream flow and groundwater, Elsevier, , 579 pp.
- Wu, H., Hayes, M. J., Weiss, A., Hu, Q., 2001. An evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China-Z Index and
- ۱۱۹-۱۳۶
- عابدینی، م. ح.، (۱۳۸۹). ارتباط خشکسالی و منابع آب کارستی (مطالعه موردی: حوضه کارستی مهارلو)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده جغرافیا، به‌راهنمایی دکتر قاسم عزیزی، دانشگاه تهران.
- Chen, Z., Grasby, S.E., Osadetz, K.G., 2004, Relation between climate variability and groundwater levels in the upper carbonate aquifer, southern Manitoba, Canada, Journal of Hydrology, No. 290, 43-62.
- 1) Fiorillo, F., 2009, Spring Hydrographs as Indicators of Droughts in a Karst Environment, Journal of Hydrology, Vol. 373, No. 3-4, pp. 290-301
- Fiorillo, F., 2009, Spring hydrographs as indicators of droughts in a karst environment, Journal of Hydrology, Vol. 373, No. 3, pp. 290-301.
- Fiorillo, F., Guadagno, F. M., 2010, Karst spring discharges analysis in relation to drought periods, using the SPI, Water Resources Management, Vol. 24, No. 9, pp. 1867-1884.
- Fiorillo, F., Guadagno, F. M., 2012, Long karst spring discharge time series and droughts occurrence in Southern Italy, Environmental Earth Sciences, Vol. 65, No. 8, pp.2273-2283.
- Fiorillo, F., Esposito, L., Guadagno, F. M., 2007, Analyses and forecast of water resources in an ultra-centenarian spring discharge series from Serino (southern Italy), Journal of Hydrology, Vol. 336, No. 1, pp. 125-138.
- Garbrecht, J., Fernandez, G. P., 1994, Visualization of Trends And Fluctuations In Climatic Records1, JAWRA Journal of The American Water Resources Association, Vol. 30, No. 2, pp. 297-306.
- Gondwe, B., Alonso, G., Gottwein, G., 2011, The influence of conceptual model uncertainty on management decisions for a groundwater-dependent ecosystem in karst, Journal of Hydrology, Vol. 400, pp. 24-40.
- Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Wilhite, D. A., Vanyarkho, O. V., 1999, Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 80,

- the statistical Z-Score, International journal of climatology, Vol. 21, No. 6, pp. 745-758.
- Zhang, Q., Li, J., Singh, V. P., Bai, Y., 2012, SPI-based evaluation of drought events in Xinjiang, China, Natural hazards, Vol. 64, No. 1, pp. 481-492.
- Orehova, T., 2004, Comparative Estimate of Resistance to Drought for Selected Karstic Aquifers in Bulgaria, International Journal of Speleology, Vol. 33, No. 1-4, pp.73-79.