

واکاوی اثرات ژئومورفولوژی کارست و خشکسالی بر ویژگی‌های کمی - کیفی منابع آب کارستی محدوده تاقدیس گرین (استان لرستان)

منصور پروین^۱ - استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران.

رامین حاتمی فرد - دانش‌آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی تهران، تهران، ایران.

تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۴/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۹

چکیده

کارست مجموعه‌ای از فرایندهای زمین‌شناسی و پدیده‌های حاصل از انحلال سنگ‌ها در نتیجه بازشدگی‌ها، تخریب و تجزیه سنگ‌ها است که رژیم هیدرولوژیکی، شبکه زهکشی و لندفرم‌های خاص را به وجود می‌آورد. هدف این پژوهش ارزیابی تأثیر توسعه ژئومورفولوژی کارست و رخداد خشکسالی بر ویژگی‌های کمی و کیفی آبخوان‌های کارستی تاقدیس گرین می‌باشد. برای این منظور چشمه‌های امیر، چناره، آهنگران، لاغری و تیمور در یک دوره ۱۵ ساله (۱۳۹۴-۱۳۸۰) مورد مطالعه قرار گرفتند. با استفاده از روش SPI میزان خشکسالی و تأثیر آن در منطقه ارزیابی گردید. همچنین میزان توسعه کارست در هر آبخوان براساس روش مالیک و وجکتوا مشخص گردید. با توجه به ارزیابی‌های هیدرودینامیکی، درجه توسعه‌یافتگی کارست در آبخوان چشمه‌های امیر و چناره بین ۲/۵ تا ۲/۷ بوده و دارای سیستم غالب جریان افشان و زیر رژیم‌های خطی می‌باشند. آبخوان چشمه آهنگران دارای درجه توسعه کارست ۴/۳ بوده و سیستم جریان آن‌ها از نوع مجرای- افشان می‌باشد. آبخوان چشمه‌های لاغری و تیمور دارای درجه توسعه کارست ۵/۵ و سیستم جریان مجرای می‌باشد. با توجه به توسعه متفاوت ژئومورفولوژی کارست می‌توان گفت که در چشمه‌های لاغری و تیمور به علت پایین بودن اثر حافظه و توسعه‌یافتگی آبخوان، واکنش دبی به تغییرات بارشی دارای تأخیر زمانی کوتاه‌مدت بوده است. اما در چشمه‌های امیر و چناره به علت توسعه اندک کارست، تأثیر خشکسالی با تأخیر حدود ۲۴ ماهه مواجه بوده است. بر اساس نتایج هیدروشیمیایی بالاترین و پایین‌ترین مقادیر TDS به ترتیب در چشمه‌های چناره و آهنگران وجود دارد. همچنین بالاترین و پایین‌ترین مقادیر TH به ترتیب مربوط به چشمه‌های آهنگران و تیمور بوده است.

کلیدواژه‌ها: ژئومورفولوژی، تاقدیس گرین، کارست، خشکسالی، SPI

۱- مقدمه

امروزه نیاز به تأمین آب، برای رفع نیاز جوامع انسانی و اکوسیستم‌های طبیعی به‌طور فزاینده‌ای در سطح جهان مورد توجه می‌باشد. تغییرات مقدار بارش و دما به‌عنوان یکی از ویژگی‌های ذاتی نوسانات اقلیمی در مقیاس‌های زمانی مختلف می‌باشد (Gondwe et al, 2011). تغییرات اقلیمی می‌توانند سبب به هم خوردن بیلان آب در مناطق مختلف شده و مقدار آب قابل دسترس را برای مصارف گوناگون کاهش دهند (Ford and Williams, 2007). وقوع خشکسالی هواشناسی و به‌تبع آن خشکسالی هیدرولوژیکی علاوه بر کاهش تغذیه سفره‌های زیرزمینی، موجب افزایش برداشت و تشدید کاهش سطح آب‌های زیرزمینی خواهد شد (Serrano, 2005). به‌عبارت‌دیگر یکی از اثرات پدیده خشکسالی، تأثیرات عمده بر منابع آبی می‌باشد که بهره‌برداری قابل اطمینان از آب‌های سطحی و زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Gondwe et al, 2011). در این بین آبخوان‌های کارستی به علت ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی خاص خود نسبت به سایر آبخوان‌ها بیشتر تحت تأثیر خشکسالی و نوسانات بارشی قرار می‌گیرند (Mudarra and Andreo, 2011). به‌عبارت‌دیگر دبی آبخوان‌های کارستی در یک سال هیدرولوژیکی، از رژیم آب و هوایی، ویژگی‌های زمین‌شناسی و ویژگی‌های کارست منطقه تأثیر می‌پذیرد (Fiorillo & Guadagno, 2012). بیشتر مطالعات انجام گرفته در زمینه تغییرات و نوسانات اقلیمی و تأثیر آن بر منابع آب در جهان بر تأثیرات خشکسالی در آبخوان‌های کارستی معطوف بوده است. نوع سامانه‌های کارستی و میزان توسعه آن‌ها بر پارامتر اثر حافظه یا میزان ذخیره دینامیکی آبخوان‌ها تأثیر گذاشته و سامانه‌های کارستی با توسعه کمتر، واکنش کمتری به رخداد خشکسالی کوتاه‌مدت داشته و زمان پاسخ آن‌ها طولانی‌تر می‌باشد (Krestic & Stevanovic, 2010). بر این اساس سامانه‌های کارستی به دو دسته سامانه‌های مجرای و افشان طبقه‌بندی می‌شوند. در سیستم‌های با سامانه مجرای با توجه به توسعه‌یافتگی کارست، واکنش به بارش در زمان کوتاهی رخ داده اما در سیستم‌های افشان، زمان واکنش به بارش طولانی‌تر خواهد بود (Ford and Williams, 2007). در حال حاضر با توجه به محدودیت‌های کمی و کیفی منابع آب آبرفتی، منابع آب کارستی به‌عنوان ذخایر مهم و استراتژیک ویژه برای تأمین نیازهای شرب محسوب می‌شوند. به‌طوری‌که هم‌اکنون منابع آب کارستی، تأمین‌کننده آب شرب بسیاری از شهرها و روستاها می‌باشد (جلیلود و نوری هندی، ۱۳۸۹: ۶). تاقدیس گرین در استان لرستان تحت تأثیر قرارگیری در مرز زاگرس مرتفع و چین‌خورده، وسعت زیاد سازندهای کربناته، فعالیت‌های تکتونیکی، عوامل اقلیمی، زمین‌شناسی و دیگر عوامل مؤثر، درز و شکاف‌های ثانویه و اشکال مورفولوژیکی از قبیل کارن‌ها، دولین‌ها، شافت، جاما و غارها در آن تشکیل شده و شرایط مناسبی جهت توسعه فرایند کارست‌زایی به وجود آورده است (شکل ۱). چشمه‌های منتخب محدوده تاقدیس گرین تأمین‌کننده آب شرب و کشاورزی جوامع شهری و روستایی شهرهای نورآباد و الشتر بوده و نقشی اساسی در حیات اجتماعی-اقتصادی مردم منطقه دارند. بدین منظور شناخت تأثیرپذیری کمی و کیفی این چشمه‌ها تحت تأثیر رخداد

خشکسالی در محدوده مورد مطالعه ضروری می‌باشد. در نتیجه می‌بایست نسبت به سنجش تأثیر نوسانات اقلیمی در ویژگی چشمه‌های مورد مطالعه با استفاده از مدل‌ها و روش‌های مناسب اقدام نمود. این پژوهش با هدف بررسی و ارزیابی اثرات ژئومورفولوژی کارست و وقوع خشکسالی بر ویژگی‌های کمی و کیفی چشمه‌های محدوده تاقدیس گرین در استان لرستان انجام گرفته است.



شکل ۱- نمونه‌ای از دولین‌های تشکیل شده محدوده تاقدیس گرین

فیوریلو و همکاران (۲۰۱۰) ارتباط بین دوره‌های خشکسالی و دبی چشمه‌های جنوب ایتالیا را با استفاده از شاخص SPI را بررسی نموده است. نتایج این پژوهش نشان داده است که در شرایطی که میزان SPI ۱۲ ماهه به میزان ۱- باشد چشمه‌های منطقه با کاهش دبی مواجه شده و هنگامی که این میزان به ۱/۵- برسد، هیدروگراف چشمه‌ها فاقد نقطه اوج می‌باشند. فیوریلو و همکاران (۲۰۱۲) تغییرات سری زمانی دبی چشمه‌های جنوب ایتالیا را در ارتباط با رخداد خشکسالی مورد ارزیابی قرار داده و نتیجه گرفته‌اند که به علت تأثیر حافظه آبخوان، بین وقوع

خشکسالی هیدرولوژیکی و هواشناسی در حوضه چشمه‌ها تأخیر زمانی وجود دارد. خوش‌اخلاق و همکاران (۱۳۹۳) با بررسی تأثیر خشکسالی بر آبدهی چشمه‌های کارستی در استان کرمانشاه نتیجه گرفته‌اند که تأثیر خشکسالی بر آبدهی چشمه‌های منتخب بدون تأخیر زمانی و تقریباً همزمان رخ داده است. چشمه‌های زون زاگرس شکسته با یک تأخیر زمانی سه ماهه نسبت به خشکسالی واکنش داشته‌اند، اما در زاگرس چین‌خورده چشمه‌های منتخب روند مشخص نداشته‌اند. نگهبان و همکاران (۱۳۹۵) تأثیرپذیری رژیم آبدهی چشمه‌های حوضه رودخانه الوند تحت تأثیر خشکسالی را بررسی نموده‌اند. نتایج حاکی از آن است که خشکسالی موجب شده آبدهی چشمه‌های منتخب روند نزولی داشته باشد. همچنین تأثیرپذیری آبدهی چشمه‌ها از خشکسالی، به توسعه‌یافتگی سیستم‌های کارستی، حجم ذخیره دینامیکی (اثر حافظه) آبخوان، مدت و شدت خشکسالی بستگی داشته است. فتح‌نیا و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از آزمون زنجیره مارکوف و شاخص SPI تأثیر خشکسالی بر چشمه‌های کارستی شهرستان کرمانشاه را ارزیابی کرده‌اند. با توجه به نتایج این پژوهش احتمال رخداد افزایش دوره‌های خشک در آینده بیشتر بوده و به تبع آن دبی سراب‌های مورد مطالعه کاهش خواهد یافت. همچنین شاخص SPI سالانه روند کاهش دبی با خشکسالی را نسبت به دوره‌های مرطوب بهتر نشان داده است. زارعی و همکاران (۱۳۹۶) با بررسی نوسانات آبدهی چشمه بی‌بی تلخون (استان خوزستان) تحت تأثیر رخداد خشکسالی، نشان داده‌اند که خشکسالی در بازه زمانی مورد مطالعه توانسته آبدهی چشمه بی‌بی تلخون را به میزان ۶۶ درصد کاهش دهد. همچنین میزان EC و TH چشمه مذکور در مواقع خشکسالی بیشتر از دوره‌های مرطوب بوده است. رحمتی و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از شاخص‌های SDI و SPI وضعیت هیدروژئولوژیکی آبخوان‌های کارستی استان کرمانشاه را ارزیابی کرده‌اند. نتایج نشان دهنده این است که بین رخداد خشکسالی و افت سطح آب آبخوان‌ها یا تأخیری وجود نداشته و یا اینکه با حداکثر یک ماه تأخیر رخ داده است. همچنین پژوهشگران دیگری نیز در زمینه تأثیر خشکسالی بر منابع آب پژوهش‌های موردی را انجام داده‌اند. از جمله تمدن و نوذری، ۱۳۹۶؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹۷؛ روشان و حبیب‌نژاد روشن، ۱۳۹۷؛ احراری رودی، ۱۳۹۷؛ Adhikary, 2013; Seeboonruang, 2015; Hao et al, 2016; Sebenik, 2017.

۲- مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر یک تحقیق کاربردی مبتنی بر روش تحلیل هیدروگراف و همچنین تحلیل‌های آماری می‌باشد. به‌منظور دستیابی به اهداف پژوهش و پایش وضعیت خشکسالی در منطقه مورد مطالعه، از آمار بارش ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی (وزارت نیرو) نورآباد و دره‌تنگ الشتر در یک دوره از شاخص بارش استاندارد SPI (معادله ۱) استفاده شده است. مک‌کی^۱ و همکاران (۱۹۹۳) به‌منظور تعیین خشکسالی شاخصی را پیشنهاد دادند که از اختلاف بارش و میانگین بارش و انحراف معیار بارش حاصل می‌شود که تحت عنوان "شاخص بارش استاندارد شده"

1 Mckee

شناخته می‌شود. به عبارت دیگر شاخص SPI اساساً برای تعریف و پایش خشکسالی و ترسالی ارائه شده است و به تحلیلگر امکان می‌دهد تا تعداد وقایع خشکسالی و ترسالی اتفاق افتاده را برای هر گام زمانی دلخواه تعریف و شناسایی نماید. شاخص SPI از طریق برازش توزیع احتمال مناسب بر سری مجموعه بارش‌های ماهانه در بازه زمانی معین حاصل می‌شود. بدین ترتیب احتمال عدم گذر مقادیر بارش از روی تابع توزیع تجمعی مناسب (توزیع گاما) تعیین و احتمال به دست آمده از این طریق به متغیر تصادفی نرمال استاندارد شده تبدیل می‌شود. مقادیر شاخص SPI به دست آمده از داده‌های بلندمدت بارش برای یک دوره زمانی، از توزیع نرمال تبعیت می‌کند و دارای میانگین صفر و انحراف معیار یک (۱) می‌باشد (جدول ۱) و (معادله ۱).

$$SPI = P_i - (P/\sigma) \quad \text{معادله (۱)}$$

جدول ۱- درجات خشکسالی بر مبنای روش SPI (مک‌کی و همکاران ۱۹۹۳)

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

همچنین برای ارزیابی واکنش چشمه‌های محدوده تاق‌دیس گرین به نوسانات بارشی، از دبی استاندارد چشمه‌های امیر، چناره، آهنگران، لاغری و تیمور در یک دوره زمانی ۱۵ ساله (۱۳۹۴-۱۳۸۰) از (معادله ۲) استفاده شده است. برخی از ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی چشمه‌های مورد مطالعه در جدول (۲) ارائه شده است.

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

در این معادله (۲) و SPI و QS به ترتیب نمایه استاندارد بارش و دبی، P_i و Q_i به ترتیب میانگین بارش (م.م) و دبی سالیانه، P : متوسط بلندمدت بارش، μ : میانگین بارش و σ : انحراف معیار بارش و دبی است که از طریق احتمال تجمعی استاندارد گاما محاسبه می‌شود (Mckee et al., 1993).

جدول ۲- ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی چشمه‌های محدوده مورد مطالعه

ضریب تغییرات (درصد)	ضریب کمترین آبدی	ضریب ناهم‌شکلی	انحراف معیار دبی	دبی حداقل	دبی حداکثر	میانگین دبی سالانه (لیتر / ثانیه)	چشمه
$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100$	$Km = \frac{Q_{min}}{Q_{mean}}$	$Kn = \frac{Q_{max}}{Q_{min}}$					
۲۰	۰/۶۱	۲/۱۵	۹۰	۲۷۷	۵۹۸	۴۵۱	امیر
۲۵/۴	۰/۴۹	۳	۲۶	۵۰	۱۴۹/۵	۱۰۲	آهنگران
۱۹	۰/۶۶	۱/۹۷	۴۶	۱۶۰	۳۱۵	۲۴۱	چناره

ادامه جدول ۲

ضرب تغییرات (درصد) $CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100$	ضرب کمترین آبدهی $Km = \frac{Q_{min}}{Q_{mean}}$	ضرب ناهمشکلی $Kn = \frac{Q_{max}}{Q_{min}}$	انحراف معیار دبی	دبی حداقل	دبی حداکثر	میانگین دبی سالانه (لیتر / ثانیه)	چشمه
۶۶	۰/۰۷	۳۸/۲	۱۶۴	۱۷	۶۵۰	۲۴۹	لاغری
۴۰	۰/۵۲	۳/۰۶	۷۷	۱۰۰	۳۰۶	۱۹۲	تیمور

مأخذ: شرکت آب منطقه‌ای لرستان

از آنجایی که نوسانات در آبدهی چشمه‌های کارستی تنها تحت تأثیر کمبود نزولات جوی نبوده و خصوصیات فیزیکی آبخوان چشمه‌ها نیز در این امر مهم می‌باشند. بنابراین به منظور راستی آزمایی تأثیر خشکسالی بر آبدهی چشمه‌های مورد مطالعه، درجه و میزان توسعه یافتگی کارست در آبخوان هر چشمه با استفاده از روش مالیک و وچکتوا^۱ و معادله (۳) نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha(t-t_0)} \quad \text{معادله (۳)}$$

در این معادله Q_t آبدهی در زمان t (بر حسب مترمکعب در ثانیه) Q_0 آبدهی قبلی در زمان t_0 ، زمان طی شده بین Q_0 و Q_t (بر حسب روز) e پایه لگاریتم طبیعی (عدد نپرین) α ضریب فروکش (تخلیه) چشمه بوده و به قابلیت انتقال و آبدهی ویژه آبخوان بستگی دارد (Ford and Williams, 2007; Kresic and Stevanovic, 2010; Malik and Vojtkova, 2012). همچنین به منظور بررسی تأثیر خشکسالی بر ویژگی‌های هیدروشیمیایی چشمه‌های مورد مطالعه از آنالیزهای هیدروشیمیایی مجموع آنیون‌ها (بی‌کربنات، کلر و سولفات)، کاتیون‌ها (کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم)، هدایت الکتریکی (EC)، میانگین مواد جامد محلول (TDS^2) و سختی کل (TH^3) اخذ شده از شرکت آب منطقه‌ای لرستان استفاده شده است.

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

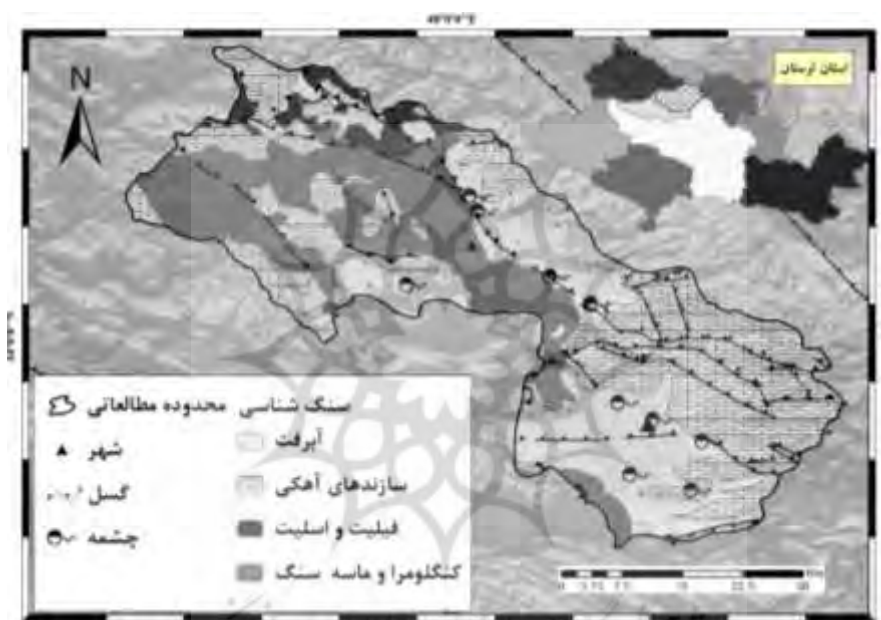
تاق‌دیس گرین با روند شمالغرب- جنوب‌شرق و ارتفاع بیش از ۳۷۰۰ متر از جمله ارتفاعات مهم زاگرس در استان لرستان است. این تاق‌دیس مجموعه ناهمگونی از سنگ‌های رسوبی و آتشفشانی متعلق به بازه زمانی کرتاسه تا الیگومیوسن را در خود جای داده است. در بین این سنگ‌ها، سری‌های آهکی و دولومیتی از گسترش فراوانی برخوردار هستند. بیشترین وسعت سنگ‌های کربناته در تاق‌دیس گرین مربوط به سنگ‌های دولومیتی و آهک‌های ژوراسیک پایینی است که معادل دولومیت سازند نیریز و کربنات‌های سازند سورمه می‌باشد. بخشی از محدوده مورد

1 Malik and Vojtkova

2 Total Dissolved Solids

3 Total Hardness

مطالعه در زون زمین‌ساختی زاگرس مرتفع و بخشی از آن در زون سنندج - سیرجان قرار گرفته است. این منطقه به شدت تکتونیزه شده و گسل و شکستگی‌های متعددی توده‌های سنگی منطقه را قطع نموده‌اند. جهت‌گیری گسل‌ها به طور عمده شمال‌غربی - جنوب شرقی است که مهم‌ترین آن‌ها گسل‌های گرین - گاماسیاب و گرین - کهمان می‌باشد (قبادی و همکاران، ۱۳۹۰: ۳۰۱). در منطقه مورد مطالعه انواع پدیده‌های ژئومورفولوژیکی کارست مانند دولین‌ها، غارها، چشمه‌های کارستی، پونورها، چاه‌های کارستی، حفرات انحلالی، پنجره‌های کارستی و انواع کارن قابل مشاهده است. در این بین چشمه‌های کارستی به دلیل تأمین بخش عمده آب شرب و کشاورزی شهرها و روستاهای منطقه از اهمیت فراوانی برخوردار می‌باشند (شکل ۲).



شکل ۲- زمین‌شناسی و موقعیت تاق‌دیس گرین در استان لرستان

۳- بحث و نتایج

۳-۱- محاسبه توسعه کارست در آبخوان چشمه‌ها

وجود چشمه‌ها از جمله یکی از ویژگی‌های مناطق کارستی می‌باشد که بخش عمده‌ای از ذخیره دینامیکی آبخوان‌ها را تخلیه می‌کنند (Kresic and Stevanovic, 2010). به منظور تعیین درجه توسعه‌یافتگی کارست، از منحنی فرود هیدروگراف چشمه‌های مورد مطالعه و روش مالیک و وجکتوا استفاده شده است. نتایج روش مالیک و وجکتوا در محدوده تاق‌دیس گرین نشان داده است که آبخوان چشمه‌های امیر و چناره درجه توسعه‌یافتگی کارست در آن‌ها به ترتیب ۲/۷ و ۲/۵ بوده و دارای سیستم غالب جریان افشان و زیر رژیم‌های خطی می‌باشند. آبخوان چشمه

آهنگران دارای درجه توسعه کارست ۴/۳ بوده و سیستم جریان در آن‌ها از نوع مجرای- افشان است. آبخوان چشمه‌های لاغری و تیمور دارای بالاترین میزان توسعه کارست در محدوده تاقدیس گرین می‌باشند. به گونه‌ای درجه توسعه کارست برای آبخوان این چشمه‌ها برابر با ۵/۵ بوده و هر کدام دارای دو زیر رژیم خطی و یک زیر رژیم آشفته می‌باشند. به عبارت دیگر در تاقدیس گرین آبخوان چشمه‌های لاغری و تیمور از توسعه کارستی بیشتری نسبت به سایر چشمه‌های منتخب برخوردار می‌باشند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که چشمه امیر و چشمه‌های لاغری و تیمور متناسب با میزان توسعه کارست به ترتیب دارای بالاترین و پایین‌ترین میزان حجم ذخیره دینامیکی هستند. زیرا آبخوان چشمه امیر دارای کارست توسعه نیافته و آبخوان چشمه‌های لاغری و تیمور از کارست توسعه‌ای برخوردار است (جدول ۳).

جدول ۳- رابطه منحنی فرود، رژیم‌های جریان و درجه توسعه کارست محدوده تاقدیس گرین

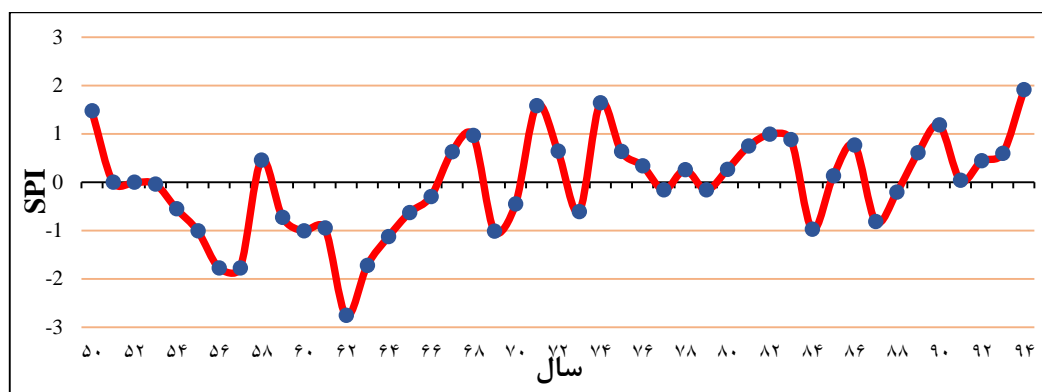
چشمه	رابطه منحنی فرود	زیر رژیم- های جریان	زمان مرگ $t_0 = \frac{t \cdot \log e}{\log Q_0 / Q_t}$	حجم ذخیره دینامیکی (m^3)	درجه توسعه کارست
امیر	$Qt = 0.016e^{-0.004(30)} + 0.455e^{-0.001(60)}$	افشان	۳۱۳	۴۱۶۰۱۶۰۰۰	۲/۷
آهنگران	$Qt = 0.184e^{-0.005(60)} + 0.134(1 - 0.26t)$	افشان- مجرای	۲۵۰	۱۳۹۳۲۰۵۱	۴/۳
چناره	$Qt = 0.265e^{-0.001(60)} + 0.242e^{-0.0008(90)}$	افشان	۴۶۲	۵۸۷۰۸۸۰۰	۲/۵
لاغری	$Qt = 0.473e^{-0.015(90)} + 0.122e^{-0.004(30)} + 0.609(1 - 0.08t)$	مجرایی	۲۴۴	۱۱۹۳۴۰۰۰	۵/۵
تیمور	$Qt = 0.13e^{-0.009(30)} + 0.11e^{-0.113(30)} + 0.41(1 - 0.05t)$	مجرایی	۲۱۵	۹۳۶۵۷۶۰	۵/۵

مأخذ: یافته‌های تحقیق

۳-۲- محاسبه شاخص SPI

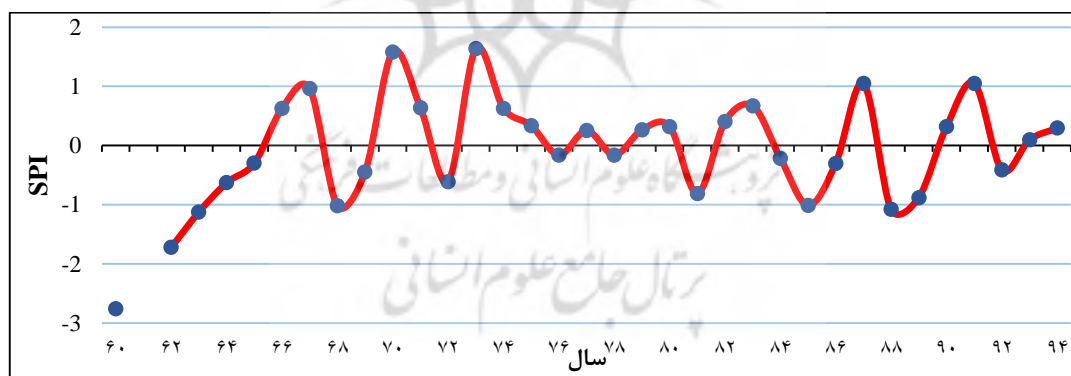
نتایج حاصل از پایش خشکسالی ایستگاه‌های محدوده تاقدیس گرین به روش SPI نشان داده است که در بازه زمانی ۴۵ ساله (۹۴-۱۳۵۰) در ایستگاه دره‌تنگ الشتر چندین دوره خشکسالی متوسط، شدید تا خیلی شدید رخ داد است. به گونه‌ای که یک دوره خشکسالی متوسط چهار ساله در فاصله سال‌های ۱۳۵۷-۱۳۵۴ رخ داده و پس از آن یک دوره ترسالی یکساله رخ داده و سپس بر اثر کاهش بارش یک دوره پنج ساله خشکسالی شدید تا خیلی شدید در فاصله سال‌های ۱۳۶۵-۱۳۵۹ رخ داده است. به گونه‌ای که سال ۱۳۶۲ بیشترین تنش خشکسالی را در منطقه شاهد بوده‌ایم. به عبارت دیگر در ایستگاه دره‌تنگ در فاصله سال‌های ۱۳۵۴ تا ۱۳۶۶ (به استثناء سال ۵۸) و نیز دوره ۱۳۷۰-۱۳۶۹ خشکسالی رخ داده است. همچنین علاوه بر این دوره‌های خشکی چندین ساله، دوره‌های خشک یکساله‌ای در

سال‌های ۸۸، ۸۷، ۸۴، ۷۳ و ۱۳۶۹ وجود داشته است. به استثناء دوره‌های خشکی مذکور، وضعیت منطقه به لحاظ وقوع بارش وضعیت مناسبی داشته و ارقام SPI آن‌ها عمدتاً مثبت بوده است (شکل ۳).



شکل ۳- نمودار SPI سالانه ایستگاه دره تنگ الشتر

در ایستگاه نورآباد شاخص SPI نشان می‌دهد که در طول دوره آماری (۱۳۶۰-۱۳۹۴)، در بازه‌های زمانی ۶۵-۶۰، ۶۹-۶۸، ۸۶-۸۴ و ۸۹-۸۸ خشکسالی وجود داشته است. در این ایستگاه شدیدترین دوره خشکسالی در بازه‌های ۱۳۶۰-۱۳۶۵ با تداوم زمانی ۵ ساله اتفاق افتاده است (شکل ۴).

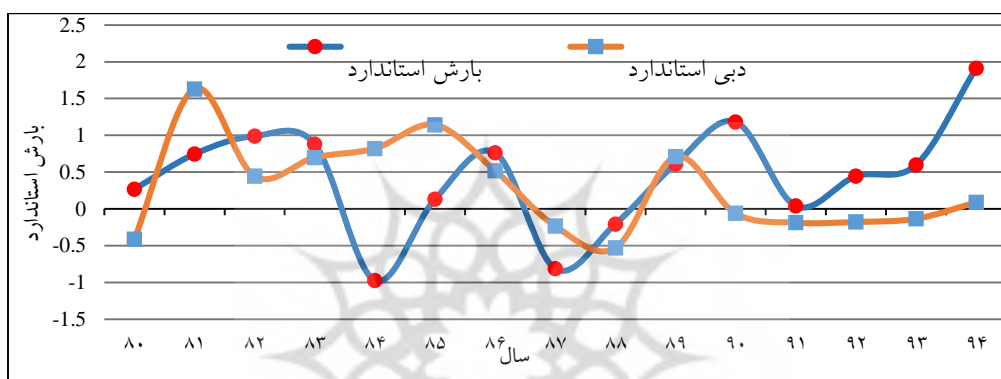


شکل ۴- نمودار SPI سالانه ایستگاه نورآباد

۳-۳- استاندارد سازی دبی چشمه‌ها و بارش

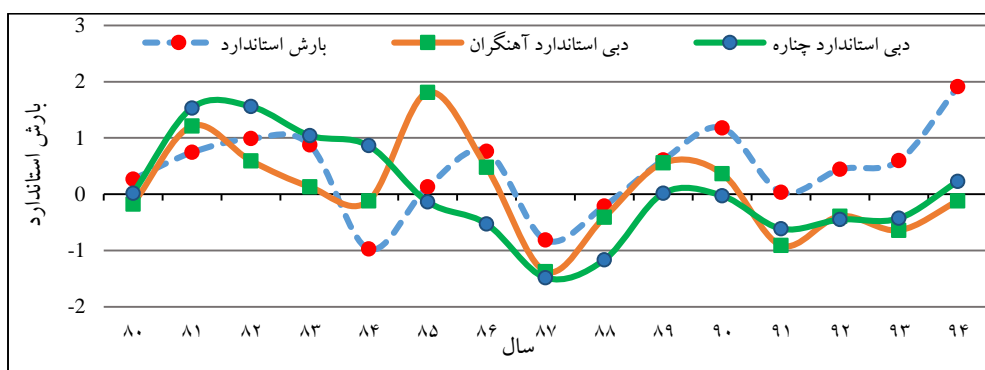
مقایسه بارش و دبی استاندارد چشمه‌های محدوده تاقدیس گرین (در دروه زمانی ۹۴-۱۳۸۰) نشان می‌دهد که دبی این چشمه‌ها نسبت به نوسانات بارش دارای واکنش بوده، اما زمان، مدت و شدت واکنش در هر کدام از این چشمه‌ها با هم متفاوت بوده است. به گونه‌ای که با توجه به شکل (۵) در چشمه امیر اگر چه در سال ۱۳۸۴

خشکسالی رخ داده است، اما این مسئله باعث نشده که دبی استاندارد چشمه به زیر مقدار متوسط (صفر) نزول کند. اما اثرات خشکسالی مذکور منجر به کاهش دبی در سال ۱۳۸۶ شده است. همچنین وقوع خشکسالی در سال ۱۳۸۷ باعث شده که دبی استاندارد چشمه در سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۸۷ دارای افت بوده و پایین‌تر از مقدار میانگین (صفر) قرار گیرد. در واقع وقوع خشکسالی و کاهش دبی در چشمه امیر دارای تأخیر زمانی حدود ۲۴ ماهه می‌باشد. در مجموع باید گفت هر چند وقوع خشکسالی‌های کوتاه مدت منجر به کاهش دبی چشمه امیر در سال‌های مختلف شده است. اما به علت توسعه کمتر کارست و حجم ذخیره دینامیکی (اثر حافظه) بالای این چشمه (جدول ۳) وقوع خشکسالی نتوانسته تأثیر چندانی در کاهش دبی استاندارد چشمه امیر داشته باشد (شکل ۵).



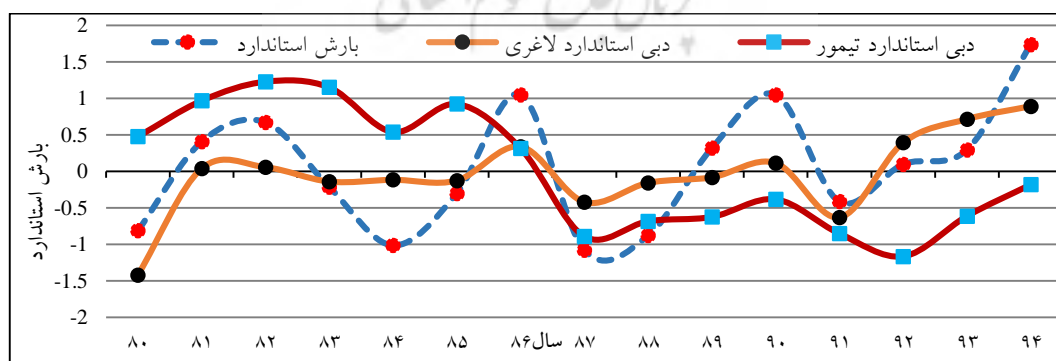
شکل ۵- میانگین سالانه دبی و بارش استاندارد شده چشمه امیر

در چشمه آهنگران کاهش بارش و وقوع خشکسالی در سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۴ باعث نزول و افت منحنی دبی و بارش استاندارد به زیر میانگین (صفر) شده است. با وقوع ترسالی در سال ۱۳۸۵ دبی استاندارد نیز افزایش یافته است. اما وقوع خشکسالی در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ باعث گردیده که دبی استاندارد پایین‌تر از میانگین متوسط (صفر) قرار گیرد. با وجود افزایش بارش در این فاصله به علت کم شدن حجم ذخیره دینامیکی، میانگین دبی استاندارد سالانه چشمه آهنگران در فاصله زمانی ۹۴-۱۳۹۱ با افت شدید مواجه شده و زیر خط میانگین (صفر) قرار گیرد. در حوضه چشمه آهنگران به علت توسعه یافتگی کارست و حجم ذخیره دینامیکی پایین وقوع خشکسالی تأثیرات زیادی بر دبی این چشمه داشته است (جدول ۳ و شکل ۶). مقایسه نمودار دبی و بارش سالانه استاندارد شده در چشمه چناره نشان می‌دهد که کاهش بارش و وقوع خشکسالی سال‌های ۱۳۸۸، ۱۳۸۷ و ۱۳۸۴ باعث شده که دبی استاندارد شده این چشمه در فاصله سال‌های ۸۸-۱۳۸۵ زیر مقدار استاندارد (صفر) قرار گیرد. در چشمه چناره بین کاهش بارش و وقوع خشکسالی یک تأخیر زمانی حدود یکساله وجود دارد. بنابراین بایستی گفت که هر چند که حوضه چشمه چناره از کارست توسعه یافته‌ای برخوردار نیست (جدول ۳)، اما با این وجود کاهش بارش در مقاطعی منجر به کاهش دبی استاندارد در خروجی این چشمه شده است (شکل ۶).



شکل ۶- میانگین سالانه دبی و بارش استاندارد شده چشمه‌های آهنگران و چناره

در آبخوان چشمه لاغری رخداد خشکسالی در سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۹۰ و دوره‌های ۸۵-۱۳۸۳، ۸۸-۱۳۸۷ باعث افت دبی استاندارد به پایین‌تر از مقدار میانگین (صفر) شده است با شروع دوره ترسالی، ۸۲-۱۳۸۱، ۹۰-۱۳۸۹ و ۹۴-۱۳۹۲ دبی استاندارد نیز روندی افزایشی داشته است. در چشمه لاغری به علت پایین بودن اثر حافظه و توسعه‌یافتگی آبخوان، واکنش دبی به تغییرات بارشی دارای تأخیر زمانی کوتاه‌مدت بوده است. در حوضه چشمه تیمور وقوع خشکسالی سال ۱۳۸۰ افت منحنی دبی استاندارد در بالاتر از مقدار میانگین (صفر) را در پی داشته است. افزایش بارش در دوره ۸۲-۱۳۸۱ و کاهش آن در دوره ۸۵-۱۳۸۳ و ۸۸-۱۳۸۷ به ترتیب منجر به افزایش و کاهش دبی استاندارد شده است (جدول ۳ و شکل ۷). در چشمه تیمور به علت توسعه‌یافته بودن سیستم کارستی و پایین بودن حجم ذخیره دینامیک (کمترین حجم در بین چشمه‌های مورد بررسی محدوده تأقدیس گرین)، وقوع دوره‌های خشکسالی ۸۵-۳۸۴ و ۸۸-۱۳۸۷ باعث شده که دبی استاندارد این چشمه از سال ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۴ پایین‌تر از میانگین استاندارد (صفر) قرار گیرد. به عبارت دیگر نوسانات بارشی تأثیر زیادی در آبخوان چشمه تیمور در دوره مورد بررسی داشته است (جدول ۳ و شکل ۷).



شکل ۷- میانگین سالانه دبی و بارش استاندارد شده چشمه‌های لاغری و تیمور

۳-۴- بررسی هیدروشیمیایی چشمه‌های منتخب

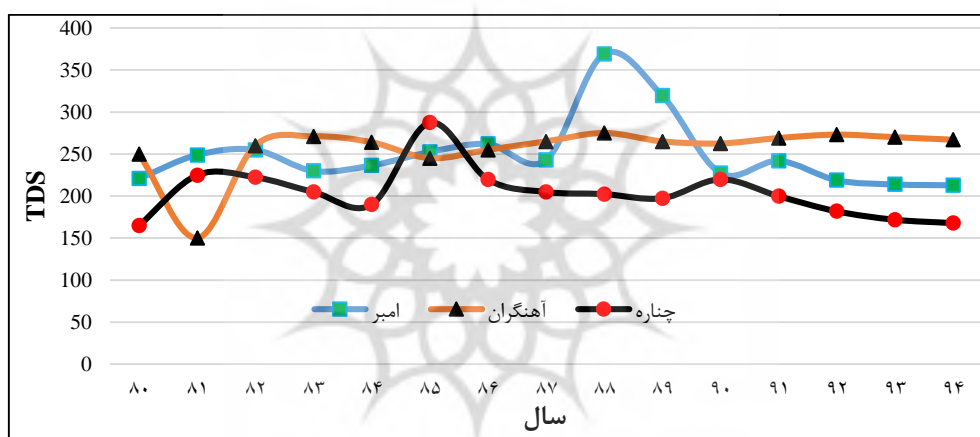
خشکسالی علاوه بر تأثیر در منحنی آبنمود، بر کیفیت هیدروشیمیایی چشمه‌ها نیز تأثیرگذار است. به منظور بررسی‌های هیدروشیمیایی، نمونه آب چشمه‌های منتخب در یک دوره آماری ۱۵ ساله (۱۳۹۴-۱۳۸۰) مورد بررسی قرار گرفت. از جمله مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در تجزیه و تحلیل هیدروشیمیایی چشمه‌ها می‌توان به کلسیم (Ca)، منیزیم (Mg)، نسبت کلسیم به منیزیم (Ca/Mg)، هدایت الکتریکی (EC)، توالی آنیون‌ها (HCO_3 , Cl, SO_4) و کاتیون‌ها (K, Na, Mg, Ca)، سختی کل (TH) و میزان مواد جامد محلول (TDS) اشاره نمود (جدول ۴). در نواحی کارستی متناسب با میزان توسعه کارست و مجاری کارستیک، سطح تماس آب با سنگ بستر متفاوت است. بر این اساس ویژگی‌های هیدروشیمیایی آب از جمله، میزان کاتیون‌ها و آنیون‌ها، TH، TDS و EC نیز متفاوت خواهد بود (کریمی وردنجانی، ۱۳۷۹: ۲۴۹، باقری و همکاران، ۱۳۹۴: ۳۴۱، بهرامی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۱۸). متناسب با توسعه کارست، وقوع خشکسالی نیز می‌تواند در ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هیدروشیمیایی چشمه‌ها مؤثر واقع شود. در محدوده تاقدیس گرین پایین‌تر بودن TDS چشمه‌های تیمور و لاغری در مقایسه با چشمه‌های امیر، آهنگران و چناره، می‌تواند هم نشان‌دهنده توسعه یافتگی کارست و هم حاکی از نزدیکی محل‌های تغذیه و تخلیه در آبخوان این چشمه‌ها باشد. به نظر می‌رسد که در آبخوان چشمه‌های امیر، آهنگران و چناره به علت بالا بودن میزان آنیون‌ها و کاتیون‌ها، سختی زیاد، افزایش مواد جامد محلول و EC بالا، آب مسیر طولانی‌تری را به سمت خروجی چشمه طی نموده و آب با دیواره سنگ تماس زیادی دارد. به عبارت دیگر با توجه به ویژگی‌های هیدروشیمیایی چشمه‌های محدوده تاقدیس گرین، می‌توان گفت که کارست در آبخوان چشمه‌های تیمور و لاغری توسعه یافته‌تر از چشمه‌های امیر، آهنگران و چناره می‌باشد. در نتیجه می‌توان عنوان نمود که توسعه یافته‌تر بودن کارست در آبخوان چشمه‌های تیمور و لاغری باعث شده که وقوع خشکسالی با تأخیر زمانی کمتری در این چشمه‌ها ظاهر شده و میزان مواد جامد (TDS) و سختی آب (TH) در آبخوان این چشمه‌ها پایین باشد.

جدول ۴- خصوصیات هیدروشیمیایی چشمه‌های محدوده تاقدیس گرین

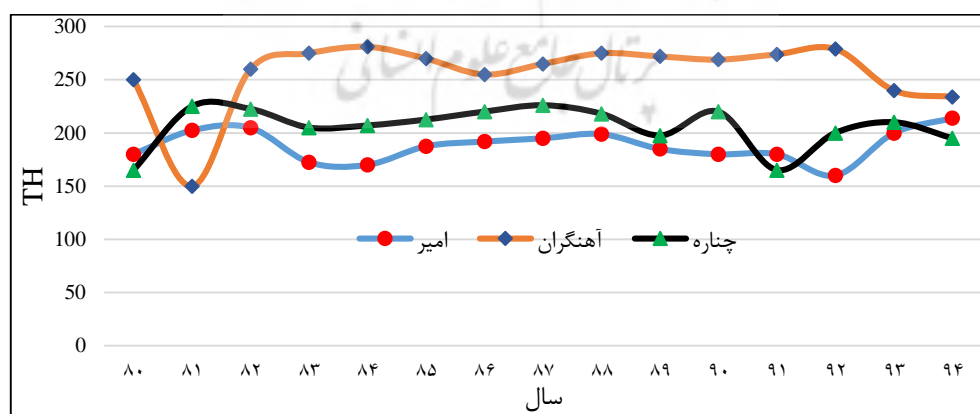
TDS (mg/l)	HCO_3 (mg/l)	TH (mg/l)	SO_4 (mg/l)	EC ($\mu\text{S}/\text{Cm}$)	Ca/Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	پارامتر چشمه
۲۵۲	۳	۱۸۸	۰/۲۹	۵۵۱	۲/۶۷	۲/۶۷	۱	امیر
۳۳۷	۴/۶	۲۵۶/۶	۰/۵	۳۷۸	۲/۶۷	۳/۷۴	۱/۴	آهنگران
۳۵۲	۳/۳	۲۰۶	۰/۳۸	۵۲۷	۲/۷۲	۳/۰۳	۱/۲۱	چناره
۲۳۲	۳/۵	۲۰۲	۰/۴۱	۳۶۸	۲/۵۶	۲/۹۷	۱/۱۶	لاغری
۲۳۵	۳	۱۷۵	۰/۲۸	۳۶۳	۳/۴۱	۲/۷	۰/۷۹	تیمور

مأخذ: شرکت آب منطقه‌ای لرستان

نتایج ارزیابی‌های هیدروشیمیایی در محدوده تاق‌دیس گرین نشان داده است که به هنگام وقوع خشکسالی و افت آبدهی چشمه‌های منتخب، میزان کل مواد جامد (TDS) در آب این چشمه‌ها افزایش یافته است. به گونه‌ای که این میزان همزمان با بالا رفتن بارش و به تبع آن بالا رفتن میزان آبدهی، مقدار کل مواد جامد روند کاهش دارد. در آبخوان چشمه‌های امیر و وقوع خشکسالی در سال‌های ۸۸، ۸۷، ۱۳۸۴ منجر به افزایش مقادیر TDS و TH در آنالیز نمونه آب این چشمه شده است. بررسی ارتباط بین خشکسالی و مقادیر TDS و TH چشمه‌های چناره و آهنگران نیز حاکی از افزایش و کاهش مقادیر پارامترهای هیدروشیمیایی متناسب با ترسالی و خشکسالی در این چشمه‌ها دارد. به طوری که در چشمه آهنگران مقادیر پارامترهای منتخب مذکور در سال‌های ۹۱، ۸۸، ۸۷، ۸۴، ۱۳۸۳ همزمان با وقوع خشکسالی افزایش یافته‌اند. همچنین در آبخوان چشمه چناره مقادیر این پارامترها با وقوع ترسالی و خشکسالی به ترتیب روند کاهشی و افزایش داشته است (شکل‌های ۸ و ۹).

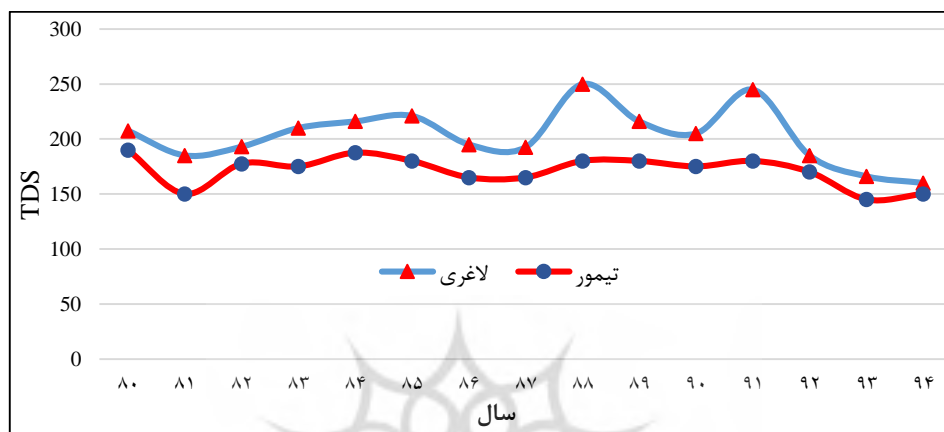


شکل ۸ - کل مواد جامد (TDS) در چشمه‌های امیر، آهنگران و چناره

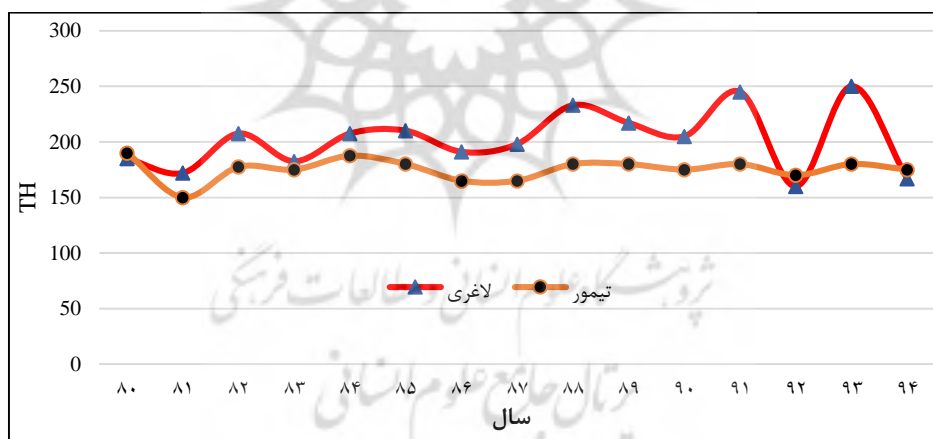


شکل ۹ - سختی کل (TH) در چشمه‌های امیر، آهنگران و چناره

آنالیز نمونه آب چشمه‌های لاغری و تیمور نیز نشان دهنده بالا رفتن سختی آب و افزایش مواد جامد محلول می‌باشد. زیرا در سال‌هایی که بارش کاهش یافته (سال‌های ۸۰ و ۹۰ و دوره‌های ۸۵-۱۳۸۳، ۸۸-۱۳۸۷) میزان سختی (TH) (شکل ۱۰) و کل مواد جامد (TDS) نمونه آب چشمه‌های مذکور به طور محسوسی افزایش داشته است (شکل ۱۱). در نتیجه وقوع خشکسالی اثرات نامطلوبی بر کیفیت آب چشمه‌های محدوده تاقدیس گرین داشته است.



شکل ۱۰- کل مواد جامد (TDS) در چشمه‌های لاغری و تیمور



شکل ۱۱- سختی کل (TH) در چشمه‌های تیمور و لاغری

۴- نتیجه‌گیری

در محدوده تاقدیس گرین میانگین بارندگی سالانه ایستگاه‌های دره‌تنگ و نورآباد به ترتیب ۷۲۰ و ۶۹۰ میلی‌متر است. تقسیم‌بندی ارتفاعی نشان می‌دهد که بالاترین و پایین‌ترین ارتفاع در این محدوده به ترتیب ۳۷۰۰ و ۱۴۸۹ متر از سطح دریا می‌باشد. در تاقدیس گرین به دلیل ارتفاع و شیب زیاد و وجود خاک ضعیف، پوشش گیاهی گسترش زیادی نداشته که این امر سبب افزایش فرایند کارست‌زایی شده است. با توجه به آمار و اطلاعات پایه، ویژگی‌ها و

شرایط زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، شرایط اقلیمی و توپوگرافی در قسمت‌های مختلف تاقدیس گرین، تعداد ۵ چشمه در راستای اهداف پژوهشی انتخاب گردید. نتایج روش مالیک و وجکتوا در محدوده تاقدیس گرین حاکی از توسعه‌یافتگی اندک کارست در آبخوان چشمه‌های امیر و چناره بوده و دارای سیستم غالب جریان افشان و زیر رژیم‌های خطی می‌باشند. آبخوان چشمه‌های آهنگران با درجه ۴/۳ دارای کارست نسبتاً توسعه یافته‌ای بوده و سیستم جریان در آن‌ها از نوع مجرای-افشان است. بالاترین میزان توسعه کارست در محدوده تاقدیس گرین برابر با ۵/۵ و در آبخوان چشمه‌های لاغری و تیمور وجود دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که چشمه امیر و چشمه‌های لاغری و تیمور متناسب با میزان توسعه کارست به ترتیب دارای بالاترین و پایین‌ترین میزان حجم ذخیره دینامیکی هستند. زیرا آبخوان چشمه امیر دارای کارست توسعه نیافته و آبخوان چشمه‌های لاغری و تیمور از کارست توسعه یافته‌ای برخوردار می‌باشند (جدول ۲). به طوری که این نتایج با مبانی نظری توسعه سیستم‌های کارستی و رفتار هیدرودینامیکی چشمه‌ها و همچنین تحقیقات: Chang et al., 2015؛ Li et al., 2016؛ Malik and Vojtkova., 2012؛ یمانی و همکاران، ۱۳۹۲؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۹۴؛ بهرامی و همکاران، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۵؛ باقری و همکاران، ۱۳۹۴ مطابقت دارد.

نتایج حاصل از پایش خشکسالی ایستگاه‌های محدوده تاقدیس گرین به روش SPI نشان داده است که در بازه زمانی ۴۵ ساله (۹۴-۱۳۵۰) در ایستگاه دره‌تنگ‌الشر یک دوره خشکسالی متوسط چهار ساله در فاصله سال‌های ۵۷-۱۳۵۴ و یک دوره پنج ساله خشکسالی شدید تا خیلی شدید در فاصله سال‌های ۶۵-۱۳۵۹ رخ داده است. همچنین شاخص SPI ایستگاه نورآباد نشان می‌دهد شدیدترین دوره در بازه‌های ۶۵-۱۳۶۰ با تداوم زمانی ۵ ساله اتفاق افتاده است. نتایج به دست آمده از مقایسه شاخص SPI و دبی چشمه‌های منتخب محدوده تاقدیس گرین نشان می‌دهد که خشکسالی هیدرولوژیکی متعاقب خشکسالی هواشناسی و با توجه به میزان توسعه کارست با تأخیرهای زمانی متفاوتی در آبخوان چشمه‌ها تأثیر داشته است. از جمله دلایل آن می‌توان به شرایط حاکم بر آبخوان‌های کارستی اشاره نمود. بدین صورت که در آبخوان چشمه‌های آهنگران، لاغری و تیمور توسعه فضاهای متخلخل و خالی از نوع درز و شکاف، تشکیل دولین‌ها، لایه‌ها و سایر اشکال ژئومورفولوژی کارستی توانسته است زمینه نفوذ سریع حجم بالایی از آب حاصل از بارش و تخلیه سریع آن از خروجی آبخوان را فراهم نماید. در نتیجه نوسانات بارشی با تأخیر زمانی کمتری در آبخوان چشمه ظاهر شده است. به عبارت دیگر در آبخوان چشمه‌های آهنگران، لاغری و تیمور هر گونه تغییر در حجم آب ورودی به آبخوان خیلی سریع تأثیر خود را بر خروجی نشان می‌دهد. اما در آبخوان چشمه‌های امیر و چناره با توجه به توسعه اندک کارست، خشکسالی با تأخیر زمانی حدود ۲۴ ماه مواجه بوده است یافته‌های مذکور با نتایج خان و همکاران (۲۰۰۸)، رحمتی و همکاران (۱۳۹۷) مطابقت دارد. نتایج هیدروشیمیایی گویای این است که در بین چشمه‌های منتخب بالاترین و پایین‌ترین مقادیر TDS به ترتیب در چشمه‌های چناره و آهنگران وجود دارد. همچنین بالاترین و پایین‌ترین مقادیر TH به ترتیب مربوط به چشمه‌های آهنگران و تیمور بوده

است. با توجه به مبانی نظری، نتایج بررسی توسعه‌یافتگی کارست و سایر نتایج پژوهش حاضر، آبخوان چشمه امیر می‌بایستی دارای مقادیر TDS و TH بالایی باشد. به نظر می‌رسد با توجه به توسعه اندک کارست و در نتیجه تأثیر خشکسالی در حوضه این چشمه، حجم ذخیره دینامیکی بالا (تأثیر اثر حافظه) در چشمه امیر توانسته که میزان غلظت TDS و TH را کاهش دهد. با توجه به ویژگی‌های هیدروشیمیایی چشمه‌های محدوده تاقدیس گرین و نتایج بررسی‌های SPI، می‌توان گفت که کارست در آبخوان چشمه‌های تیمور و لاغری توسعه‌یافته‌تر از چشمه‌های امیر، آهنگران و چناره می‌باشد. در نتیجه توسعه یافته‌تر بودن کارست در آبخوان چشمه‌های تیمور و لاغری باعث شده که وقوع خشکسالی با تأخیر زمانی کمتری در این چشمه‌ها ظاهر شده و میزان مواد جامد (TDS) و سختی آب (TH) در آبخوان این چشمه‌ها پایین باشد.

با توجه به اینکه در این پژوهش داده‌های مربوط به خصوصیات کمی و کیفی چشمه‌های مورد مطالعه به صورت ماهانه بوده است، به منظور شناخت دقیق‌تر توسعه کارست درونی پیشنهاد می‌شود از چشمه‌های مهم منطقه مورد مطالعه به صورت روزانه و یا هفتگی نمونه‌برداری کمی و کیفی صورت گیرد و با استفاده از ردیاب‌ها بررسی دقیق‌تری از آبخوان‌های کارستی انجام شود. همچنین مطالعه همه‌جانبه‌ای در خصوص میزان ذخیره آبخوان‌های کارستی و امکان‌سنجی بهره‌برداری از این منابع در شرایط بحرانی انجام گردد.

کتابنامه

- احراری رودی، محی‌الدین؛ ۱۳۹۷. ارزیابی اثرات خشکسالی بر کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی استان سیستان و بلوچستان. *مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی*. ۲۳(۱۲). صص ۱۱۳-۱۰۴.
- باقری سیدشکری، سجاد؛ یمانی، مجتبی؛ جعفری‌بیگللو، منصور؛ کریمی، حاجی؛ مقیمی، ابراهیم؛ ۱۳۹۴. بررسی توسعه‌یافتگی و ویژگی‌های هیدرودینامیکی سامانه‌های کارستی با استفاده از تجزیه و تحلیل منحنی فرود هیدروگراف (مطالعه موردی آبخوان‌های کارستی حوضه رودخانه الوند). *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی دانشگاه تهران*. ۳(۴۷). صص ۳۳۳-۳۴۶.
- بهرامی، شهرام؛ زنگنه اسدی، محمدعلی؛ جهانفر، علی؛ ۱۳۹۷. ارزیابی توسعه کارست با استفاده از ویژگی‌های هیدرودینامیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی در زاگرس (منطقه مورد مطالعه: تاقدیس قلاجه و توده پراو- بیستون). *مجله جغرافیا و توسعه*. ۴۴(۱۴). صص ۱۲۲-۱۰۷.
- بهرامی، شهرام؛ زنگنه اسدی، محمدعلی؛ رهبر، حمزه؛ ۱۳۹۷. بررسی نقش ژئومورفولوژی در ویژگی‌های هیدرولوژیکی و شیمیایی چشمه‌های حوضه آبخیز کنگیر. *مجله جغرافیا و آمایش شهری- منطقه‌ای*. ۷(۳). صص ۸۴-۷۱.
- تمدن، فاطمه؛ نودزی، هانیه؛ ۱۳۹۶. بررسی تأثیرات خشکسالی بر کمیت و کیفیت آبهای زیرزمینی دشت زرقان فارس طی سالهای ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵. *فصلنامه زمین‌شناسی محیط زیست*. ۴۱(۱۰). صص ۸۴-۷۷.

- جلیلوند، رضا؛ نوری هندی، لیلا؛ امیدوار، آزاده؛ ۱۳۹۷. تأثیر کیفیت و منابع آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی بر سلامتی بدن انسان. دومین همایش علوم زمین.
- خوش اخلاق، فرامرز؛ باقری سیدشکری، سجاد؛ صفر راد، طاهر؛ ۱۳۹۷. واکاوی تاثیرگذاری خشکسالی‌های شدید بر آبدهی چشمه‌های کارستی استان کرمانشاه (مطالعه موردی: خشکسالی شدید سال ۸۷-۱۳۸۶). فصلنامه علمی - پژوهشی فضای جغرافیایی. ۴۸(۱۴). صص ۱۹-۱.
- رحمتی، محمد؛ مرادی، حمیدرضا؛ کریمی، حاجی؛ ۱۳۹۷. ارزیابی اثرات خشکسالی هواشناسی بر آبخوان‌های کارستی با شرایط توسعه‌یافتگی کارست متفاوت (مطالعه موردی: دو آبخوان کارستی بیستون - پرآو و کوه پاتاق). نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). ۱(۲۲). صص ۲۶۶.
- روشان، سید حسین؛ حبیب‌نژاد روشن، محمود؛ ۱۳۹۷. پایش تغییرات مکانی و زمانی خشکسالی آب‌های زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های GRI و SWI (مطالعه موردی دشت ساری - نکا). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز. ۱۷(۹). صص ۲۷۹-۲۶۹.
- زارعی، حدیث؛ کلانتری، نصراله؛ محمدی بهزاد، حمیدرضا؛ ندری، آرش؛ ۱۳۹۶. اثر نوسانات اقلیمی بر شرایط کمی و کیفی چشمه کارستی بی‌بی‌تلخون، شهرستان لالی خوزستان. مجله هیدروژئولوژی. ۲(۲). صص ۱۶-۱.
- فتح‌نیا، امان‌اله؛ احمدآبادی، علی؛ رجایی، سعید؛ معصوم‌پور سماکوش، جعفر؛ ۱۳۹۵. پایش و پیش‌بینی اثر خشکسالی‌ها بر دبی چشمه‌های کارستی شهرستان کرمانشاه. مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. ۳(۵). صص ۵۱-۳۸.
- قبادی، محمدحسین؛ عبدی‌لر؛ یاسین؛ محبی، یزدان؛ ۱۳۹۰. اهمیت شناخت خصوصیات ژئومورفولوژیکی، سنگ‌شناسی و فیزیکی سنگ‌های کربناته جهت ارزیابی توسعه کارست در منطقه نهاوند. فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی. ۴(۷). صص ۳۱۰-۲۹۹.
- کریمی وردنجانی، حسین؛ ۱۳۸۹. هیدروژئولوژی کارست، مفاهیم و روش‌ها. انتشارات ارم شیراز.
- محمدی، صدیقه؛ ناصری، فرزین؛ نظری پور، حمید؛ ۱۳۹۷. بررسی تغییرات زمانی و اثر خشکسالی هواشناسی بر منابع آب زیرزمینی دشت کرمان با استفاده از شاخص‌های بارش استاندارد (SPI) و منابع آب زیرزمینی (GRI). مجله اکوهیدرولوژی. ۱(۵). صص ۲۲-۱۱.
- مقصودی، مهران؛ اخوان، هانیه؛ مهدیان ماهفروزی، مجتبی؛ عشورنژاد، غدیر؛ ۱۳۹۴. پهنه‌بندی شدت انحلال سنگ‌های کربناته در زاگرس جنوبی (مطالعه موردی: حوضه سیف‌آباد لاغر). مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. ۱(۴۷). صص ۱۲۴-۱۰۵.
- نگهبان، سعید؛ باقری سیدشکری؛ پاینده، زینب؛ نادری، سیروس؛ شیرآوند، پیمان؛ ۱۳۹۵. ارزیابی تأثیرپذیری رژیم آبدهی چشمه‌های کارستی از رخداد خشکسالی: مطالعه موردی چشمه‌های کارستی حوضه رودخانه الوند. مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی. ۳(۲۷). صص ۱۷۶-۱۶۳.

یمانی، مجتبی؛ شمسی پور، علی اکبر؛ جعفری اقدم، مریم؛ باقری سید شکری، سجاد؛ ۱۳۹۲. بررسی عوامل مؤثر در توسعه یافتگی و پهنه بندی کارست حوضه چله با استفاده از منطق فازی و AHP. استان کرمانشاه. مجله علمی پژوهشی علوم زمین. ۸۸ (۲۲). صص ۶۶-۵۷.

- Adhikary, S.K., Saha, G.C., Chaki, T., 2013. Groundwater drought assessment for barind irrigation project in northwestern Bangladesh. 20th International Congress on Modelling and Simulation. Adelaide: Australia.
- Chang. Yong, Jichun Wu, Ling Liu., 2015. Effects of the conduit network on the spring hydrograph of the karst Aquifer, *Journal of Hydrology*. 527. 517-530.
- Fiorillo, F., Guadagno, F. M., 2010. Karst spring discharges analysis in relation to drought periods, using the SPI, *Water Resources Management*. 24(9). 1867-1884.
- Fiorillo, F., Guadagno, F. M., 2012. Long karst spring discharge time series and droughts occurrence in Southern Italy, *Environmental Earth Sciences*. 65(8). 2273-2283.
- Ford, D & Williams. P., 2007. *Karst Hydrogeology and geomorphology*, John Wiley & Sons Ltd.
- Gondwe, B., Alonso, G., Gottwein, G., 2011. The influence conceptual model uncertainty on management decision for groundwater- dependent ecosystem in karst, *Journal of Hydrology*. 400. 24-40.
- Guangquan, Li., Goldscheider, N., Malcolm S., 2016. Field Modeling karst spring hydrograph recession based on head drop at sinkholes, *Journal of Hydrology*. 542. 820-827.
- Hao, Z., Hao, F., Singh, V., Xia, Y., Ouyang, W., Shen, X., 2016. A theoretical drought classification method for the multivariate drought index based on distribution properties of standardized drought indices. *Adv. Water Resour.* 92(4). 240-247.
- Khan S., Gabriel, H. F., Rana, T., 2008. Standard Precipitation Index to Track Drought and Assess Impact of Rainfall on Water Tables in Irrigation Areas, *J. of Natural Resource. Manage.* 22(2).159-177.
- Kresic, N & Stevanovic, Z., 2010. *Groundwater hydrology of spring*, Elsevier Publication.
- Malík, P., & Vojtková, S., 2012. Use of recession-curve analysis for estimation of karstification degree and its application in assessing overflow/underflow conditions in closely spaced karstic springs. *Environmental Earth Sciences*. 65 (8). 2245-2257.
- Mckee, T. B., Doesken, N. J. Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In proceeding of the 8th Conference on Applied Climatology., Boston Ma, U.S.A: American Meteorological Society. 17(21). 179-183.
- Mudarra, M., Andreo, B., 2011. Relative importance of the saturated and the unsaturated zones in the hydrogeological functioning of karst aquifers: The case of Alta Cadena (Southern Spain). *Journal of Hydrology*. 397. 263-280.
- Sebenik, U., Brilly, M., Šraj, M., 2017. Drought Analysis using the Standardized Precipitation Index (SPI). *Acta Geogr Slov.* 57(1). 31-49.
- Seeboonruang, U., 2015. Impact assessment of climate change on groundwater and vulnerability to drought of areas in Eastern Thailand. *Environ. Earth Sci.* 75(1). 42-62.
- Serrano, S. M. & Moreno, J. I., 2005. Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the standardized precipitation index in a mountainous Mediterranean basin, *Hydrol and Earth Sys Sci.* 9. 523-533.