

تحلیل منحنی خشکیدگی سراب کارستی مطهری خرم آباد

بر مبنای ضریب خشکیدگی طی نوسانات هیدرواقليمی

مهدي سليمانی مطلق*، استادیار گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری-دانشگاه لرستان

مسعود شاکرمی، استادیار گروه علوم مهندسی آب-دانشگاه لرستان

چکیده

خصوصیات هیدروگراف چشمه‌ی کارستی و ضریب خشکیدگی می‌تواند منعکس‌کننده‌ی نوسانات هیدرواقليمی و خصوصیات فیزیکی و زمین‌شناسی سیستم آبخوان تغذیه‌کننده‌ی چشمه باشد. در این مطالعه به منظور شناسایی رفتار هیدرولوژئولوژیکی سراب کارستی مطهری خرم‌آباد طی نوسانات هیدرواقليمی از تحلیل کمی منحنی خشکیدگی بر اساس معادله‌نمایی Maillet استفاده و ضریب منحنی خشکیدگی طی دوره‌ی ۲۷ ساله (۱۳۷۰-۷۱ تا ۱۳۹۶-۹۷) محاسبه گردید. برای بررسی اثر نوسانات هیدرولوژیکی بر ضریب خشکیدگی هیدروگراف، تغییرات سری زمانی ضریب تخلیه در هنگام جریان پایه از طریق شاخص خشک‌سالی هیدرولوژیکی SDI تحلیل، سپس همبستگی آماری این شاخص با شاخص خشک‌سالی کسری تبخیر و تعرق SEDI تحلیل گردید. نتایج نشان داد ضریب خشکیدگی دارای روند خطی صعودی بوده و مقدار آن در هنگام خشک‌سالی‌های ملایم تا شدید از ۰/۰۸۲ تا ۰/۰۵۷۴ تغییر کرده است. مقایسه‌ی آماری بین سری زمانی ضریب خشکیدگی با مقادیر شاخص SDI نشان داد که یک همبستگی معکوس معنی‌دار با ضریب منفی ۶۵ درصد وجود دارد؛ یعنی اینکه که با افزایش خشک‌سالی هیدرولوژیکی چشمه، ضریب تخلیه‌ی آن افزایش و زهکشی سریع‌تر صورت می‌گیرد. بخشی از این تغییرات، ناشی از نوسانات اقلیمی و بیولوژیکی است. این اثرات با بررسی همبستگی بین شاخص‌های SDI و SEDI در مقیاس زمانی ۶ ماهه بر اساس روش تحلیل طیفی و همبستگی متقابل در فواصل اطمینان ۹۵ درصد تأیید شد. علاوه بر نوسانات هیدرواقليمی، ضریب خشکیدگی سراب می‌تواند تحت تأثیر خصوصیات سازند کربناته سروک با لیتولوژی آهک و تا حدودی مواد ریزدانه متشکله‌ی آن باشد؛ به‌طوری‌که در زمان خشک‌سالی‌ها، جریان آب پایه تحت جریان مجرای و آب ذخیره‌شده در بدنه‌ی سفره قرار می‌گیرد و در اثر مجاری بزرگ کارستی و گسله‌ی سازند سروک، تحت شیب هیدرولیکی زیاد تخلیه می‌شود. در سال‌های تر علاوه بر هدایت سریع آب توسط مجاری کارستی و شکستگی‌ها، احتمالاً در هنگام تداوم آب پایه با هدایت آب تغذیه‌شده‌ی ماه‌های تر از طاق‌دیس سروک به درون زمینه دارای خلل و فرج ریزتر و شامل مواد آهکی با ترکیب ماسه و مارن در اعماق پایین‌تر، باعث ذخیره‌ی زیاد دینامیکی و تغییرات کم دبی با شیب هیدرولیکی کم در ماه‌های خشک می‌شوند. در مجموع نتایج این تحقیق، نگرشی جامع به مدیریت چشمه‌های کارستی با پیش‌بینی خشک‌سالی‌ها و تحلیل ضریب خشکیدگی آن‌ها می‌دهد.

واژگان کلیدی: ضریب خشکیدگی، منحنی فروکش، کارستیک، شاخص SEDI، سراب مطهری.

۱- مقدمه

بررسی شکل هیدروگراف و نرخ فرود چشمه‌ی کارستی می‌تواند اطلاعات قابل توجهی در مورد ذخیره یا خصوصیات ساختاری آبخوان ارائه نماید. آب نمود یک چشمه در واقع پاسخ هیدروژئولوژیکی آبخوان نسبت به تغذیه‌ی آن است (کریمی وردنجانی، ۱۳۸۹: ۲۷۶). در سیستم کارستی پاسخ به تغذیه طی یک رخداد بارش مشابه با هیدروگراف تخلیه‌ی رودخانه در خروجی یک حوزه‌ی آبخیز است؛ به طوری که بعد از وقوع رگبار و نفوذ آب به داخل سنگ‌ها و تغذیه‌ی سیستم کارستی، تخلیه‌ی سیستم به صورت جریان چشمه ظاهر شده و با یک تأخیری شروع به افزایش و آنگاه به نقطه‌ی اوج می‌رسد. سپس دبی چشمه با نرخ خشکیدگی به حالت قبل از رگبار برمی‌گردد. وقتی که هیدروگراف چشمه در نقطه‌ی اوج قرار دارد، ذخیره در سیستم کارست حداکثر و بعد از یک دوره‌ی طولانی، ذخیره‌ی منحنی خشکیدگی در پایین‌ترین حد خود خواهد بود. نرخ برداشت آب به وسیله‌ی شیب متوالی منحنی خشکیدگی نشان داده می‌شود. خصوصیات نرخ خشکیدگی و پیش‌بینی آن طی خشک‌سالی‌ها برای تعیین ذخیره و مدیریت آب بسیار مهم و ضروری است (Ford and Williams, 2007: 175). معمولاً تحلیل کمی شاخه‌ی خشکیدگی هیدروگراف بر مبنای کار (Boussinesq, 1903 and 1904) و (Maillet, 1905) صورت می‌گیرد؛ به طوری که پیشنهاد کردند تخلیه‌ی یک چشمه تابعی از حجم ذخیره‌ی سیستم است. منحنی فرود چشمه از آبدهی حداکثر در پایان دوره‌ی تر شروع شده و تا زمان افزایش مجدد آبدهی ادامه دارد. در این منحنی، نقطه‌ی عطف (تغییر شیب)، نشان‌دهنده‌ی پایان جریان سریع هیدروگراف است و بعد از آن، آب ذخیره‌شده در سیستم، به مرور زمان تخلیه می‌شود (مهدوی، ۱۳۸۶: ۲۱۸). مشخصات منحنی خشکیدگی هیدروگراف بستگی به خصوصیات فیزیکی و هیدرودینامیکی آبخوان دارد (کریمی وردنجانی، ۱۳۸۹: ۲۷۸). شیب کم شاخه‌ی خشکیدگی نشان‌دهنده‌ی ذخیره‌ی زیاد دینامیکی آبخوان و مبین دائمی بودن چشمه‌های کارستی بوده و شیب تند آن بیانگر ذخایر دینامیکی موقتی بوده و زهکشی در این حالت سریع‌تر صورت می‌گیرد (Milanovic, 1981؛ کریمی وردنجانی، ۱۳۸۹: ۲۸۰). تحقیقات مختلف نشان می‌دهند که با استفاده از تحلیل هیدروگراف چشمه‌های کارستی و منحنی فروکش می‌توان به تغییرات شیب هیدرولیکی و سرعت تخلیه‌ی آب، نوع جریان و رژیم تغذیه و خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان پی برد. به طور مثال، کلانتری و همکاران (۱۳۹۰) با بررسی هیدروگراف فروکش چشمه‌ی بی‌بی‌تلخون استان خوزستان نشان دادند که عمده‌ی تغذیه‌ی آن توسط یک حوضه‌ی کارستی برف‌گیر با رژیم تغذیه‌ی برفی-بارانی صورت می‌گیرد. محمدی‌بهباد و همکاران (۱۳۹۴) با بررسی رفتار هیدروژئولوژیکی چشمه‌ی کارستی سبزآب با استفاده از هیدروگراف‌های تخلیه نتیجه گرفتند که آبخوان کارستی چشمه‌ی مذکور دارای رژیم جریان مجرای و رژیم تغذیه‌ی آن از نوع برفی-بارانی است. علاوه بر این، از لحاظ وقوع یا عدم وقوع بارندگی، دارای رژیم قبل، بعد و حین بارندگی است. مالی و محمدی (۱۳۹۲) با بررسی رفتار هیدرودینامیکی آبخوان‌های کارستی بر مبنای آنالیز سری زمانی و تحلیل هیدروگراف چشمه‌های دیمه و پیر غار نشان دادند که مدت‌زمان پاسخ هیدرولوژیکی این چشمه‌ها به نوسانات بارش به ترتیب ۳ و ۲ ماه است. علاوه بر این، تحلیل ضرایب فرود آن‌ها مبین وجود دو میکرورژیم تخلیه می‌باشند که ضریب ابتدایی بزرگ‌تر از ضریب دومی است که می‌تواند به علت تنوع سازندهای زمین‌شناسی، برف‌گیر بودن منطقه و ذوب تدریجی برف باشد. Fiorillo (۲۰۰۹) هیدروگراف چشمه‌های کارستی را ابزاری جهت شناسایی خشک‌سالی معرفی کردند و نشان دادند که رژیم‌های چشمه‌ی کارستی تحت تأثیر رژیم اقلیمی و خصوصیات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی هستند. علاوه بر این، تحقیقات متعددی با بررسی منحنی فروکش چشمه‌ها به اهمیت آن در تعیین جریان سریع و پایه و خصوصیات آبخوان (Bagheri et al., 2016: 1) میزان تغذیه و درجه‌ی کارستی شدن (Shamsi et al., 2019: 845) و رفتار جریان طی رخداد‌های بارندگی و خشکیدگی پرداخته‌اند (Kumar and Sen, 2017: 539). برخی مطالعات هم با تحلیل سری‌های زمانی هیدروگراف و همبستگی با فاکتورهای اقلیمی به پایش چشمه‌ها پرداخته‌اند (Lo Russo et al., 2015: 7415; Fiorillo, 2020: 347). در برخی دیگر مطالعات، هم به طور خاص چشمه‌ها را به‌عنوان

شاخص‌های خشک‌سالی مدنظر قرار داده‌اند (Rice, 2007: 1- 155) یا اثرات خشک‌سالی را روی تغییر رژیم تخلیه‌ی چشمه‌ها مهم دانسته‌اند (Staško, 2018: 741).

بررسی منابع فوق نشان می‌دهد که نوع و میزان تغذیه، عوامل اقلیمی و خصوصیات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی در تحلیل هیدروگراف چشمه‌های کارستی و بالأخص منحنی خشکیدگی و شیب هیدرولیکی آن‌ها اثرگذار است. لذا در این مطالعه سعی شده است که شیب منحنی خشکیدگی هیدروگراف سراب کارستی مطهری خرم‌آباد طی دوره‌ی آماری ۲۷ ساله در دوره‌های خشک بعد از رخداد بارش‌ها تعیین شود و سپس ارتباط آن با شاخص خشک‌سالی تخلیه‌ی سراب (SDI)، عوامل اقلیمی و شاخص کسری تبخیر و تعرق استاندارد شده (SEDI)، (Zhang et al., 2019: 1274) تحلیل شود. علاوه بر این، به نقش خصوصیات سازنده‌های زمین‌شناسی در ارتباط با شیب منحنی خشکیدگی سراب و تداوم جریان پایه پرداخته شده است. در مجموع، این مقاله می‌تواند به شناسایی رفتار هیدرولوژئولوژیکی چشمه‌های کارستی طی نوسانات هیدرواقلیمی و تغییرات بارش برای یک دوره‌ی بلندمدت کمک کند.

۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

در این تحقیق، وضعیت هیدروژئولوژیکی سراب مطهری واقع در شهر خرم‌آباد مطالعه شده است. این چشمه از سری چشمه‌های کارستی واقع در منطقه بوده که از تماس آهک‌های کرتاسه‌ی بالایی و پایینی سرچشمه می‌گیرد (Ahmadipour, 1999: 217). سازند سروک با لیتولوژی سنگ‌آهک خاکستری تیره، سنگ‌آهک توده‌ای به رنگ قهوه‌ای روشن و سنگ‌آهک ضخیم لایه، هسته‌ی طاقدیس کوه سفید واقع در شمال غربی چشمه‌ی مذکور را تشکیل می‌دهد. این سازند کربناته، شدیداً کارستی بوده و آبخوان اصلی سراب‌های منطقه را تشکیل می‌دهد. بر روی این سازند، سازند نیمه‌تراوای ایلام-سورگه با لیتولوژی سنگ‌آهک‌رسی ریزدانه به رنگ خاکستری روشن تا تیره و میان لایه‌های نازک شیل قرار دارد. سازند سروک از آلبین تا سنومانین (در یال‌های شمال شرقی و جنوب غربی طاقدیس کوه سفید خرم‌آباد رخنمون دارد و از نظر لیتولوژی از پایین به بالا مرکب از آهک ماسه‌ای خاکستری تیره با باندهای خاکستری تیره مارن در داخل آن و مقدار زیادی فسیل‌های آمونیت است که در بالا تبدیل به آهک ضخیم گچی می‌شود. پس از آن، لایه‌ی ضخیم‌تری از آهک به رنگ خرمایی قابل تشخیص است (سنگاب زاگرس، ۱۳۹۶: ۳۸). شکل (۱) نقشه‌ی زمین‌شناسی حوضه‌ی آبخیز خرم‌آباد و موقعیت سراب مطهری را نشان می‌دهد.

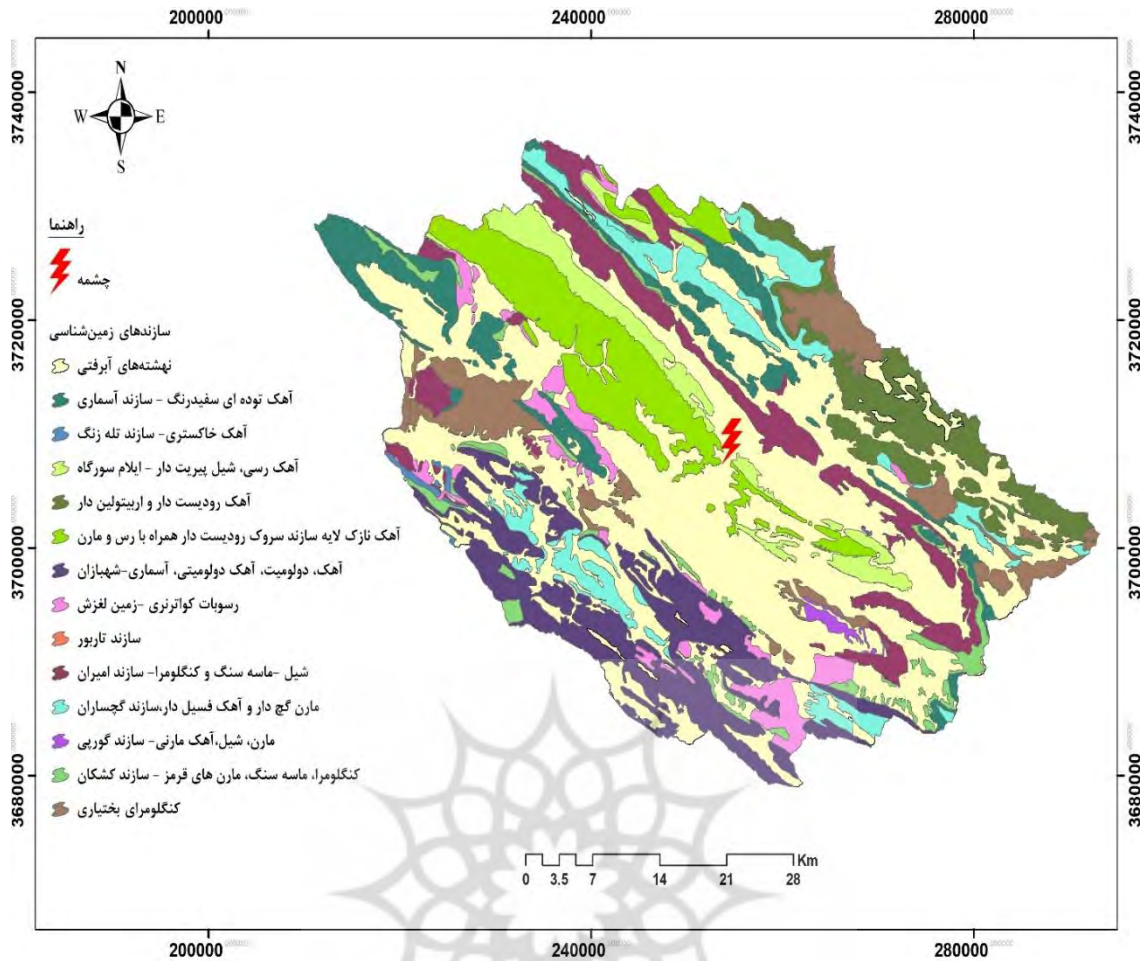
اقلیم منطقه بر اساس روش دمارتن در طبقه‌ی نیمه‌خشک قرار می‌گیرد. بارش در منطقه از مهرماه شروع شده و تا اواخر اردیبهشت ادامه می‌یابد. البته در ماه‌های خشک، بارندگی به ندرت اتفاق افتاده و مقدار آن ناچیز است. بیش‌ترین میانگین بارش ماهانه در ایستگاه خرم‌آباد مختص به فروردین‌ماه به میزان ۸۵/۲۹ میلی‌متر است. کم‌ترین و بیش‌ترین میانگین دمای ماهانه‌ی ایستگاه مذکور متعلق به دی‌ماه و مردادماه به ترتیب حدود ۵/۵۸ و ۲۹/۹۲ درجه‌ی سانتی‌گراد است. همچنین بررسی آماری نشان داد که میانگین دبی سالانه سراب مطهری حدود ۰/۴۶۹ مترمکعب در ثانیه است.

۳- مواد و روش‌ها

در این مطالعه از داده‌های بارندگی و دمای ماهانه ایستگاه هواشناسی سینوپتیک خرم‌آباد و نیز دبی ماهانه سراب مطهری خرم‌آباد طی سال‌های آبی از ۷۱-۱۳۷۰ تا ۹۷-۱۳۹۶ استفاده شده است. میانگین بارندگی و دمای سالانه در ایستگاه مذکور به ترتیب ۴۶۶/۴۴ میلی‌متر و ۱۶/۹۸ درجه‌ی سانتی‌گراد است.

1- Standardised Discharge Index

2- Standardized Evapotranspiration Deficit Index



شکل ۱: نقشه‌ی زمین‌شناسی حوضه‌ی آبخیز خرم‌آباد و موقعیت چشمه‌ی کارستی مطهری

به منظور بررسی و تحلیل شاخه‌ی خشکیدگی هیدروگراف سراب مطهری خرم‌آباد مراحل کار به صورت زیر انجام شده است. ابتدا داده‌های ماهانه‌ی هواشناسی و هیدرولوژی بررسی و ماه‌های فاقد آمار با روش درون‌یابی خطی آدر SPSS بازسازی شد. در گام بعد برای برآورد شیب منحنی خشکیدگی یا ضریب تخلیه (α) از رابطه‌ی (۱) استفاده شد. این ضریب از معادله‌ی کلی بر اساس رابطه‌ی ساده‌نمایی Maillet (۱۹۰۵) به دست آمده است (رابطه‌ی ۲).

$$\alpha = \frac{\log Q_0 - \log Q_t}{0.4343t} \quad \text{رابطه‌ی ۱}$$

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad \text{رابطه‌ی ۲}$$

که در این معادله Q_t : دبی به مترمکعب در ثانیه در زمان t ، Q_0 : دبی اولیه در زمان صفر یا در لحظه‌ی شروع خشکیدگی (معمولاً نقطه‌ی عطف در شاخه‌ی نزولی هیدروگراف به‌عنوان لحظه‌ی شروع خشکیدگی یا فروکش سیل است) (مهدوی، ۱۳۸۶: ۲۱۸؛ علیزاده، ۱۳۸۵: ۵۴۱). t : زمان سپری‌شده (معمولاً بر حسب روز) بین Q_0 و Q_t و e : پایه‌ی لگاریتم نپرین است (Ford و Williams، ۲۰۰۷). با توجه به اینکه داده‌های ماهانه برای سراب مطهری و تاریخ روز اندازه‌گیری آن‌ها موجود بود، فاصله زمانی بین دبی در لحظه‌ی خشکیدگی و در زمان t بر حسب روز محاسبه شد. در این مطالعه سعی شد که در هر سال آبی، شیب شاخه‌ی خشکیدگی از نقطه‌ی عطف منحنی بررسی شود تا پاسخ هیدروژئولوژیکی چشمه به نوسانات اقلیمی مشخص شود. پس از مراحل فوق، برای بررسی اثر نوسانات اقلیمی بر روی شیب شاخه‌ی خشکیدگی، ابتدا خشک‌سالی هیدرولوژیکی چشمه با شاخص SDI بررسی شد و سپس ارتباط آن با

شاخص SPI و شاخص SEDI که جدیدترین شاخص بر مبنای تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل است، تحلیل شد. جزئیات مربوط به شاخص SDI و SPI در پژوهش اقتدارنژاد و همکاران (۱۳۹۵) اشاره شده است. برای محاسبه‌ی SDI از نرم‌افزار Minitab بر اساس دبی ماهانه و متوسط سالانه استفاده شده است. برای داده‌های ماهانه و سالانه به ترتیب توزیع ۲ پارامتره نمایی با P-value برابر ۰/۱۳۵، و لوگ نرمال با P-value برابر ۰/۵۸۵ بهترین برازش را در بین ۱۴ توزیع آماری نشان دادند. بر اساس توزیع‌های انتخاب‌شده و پارامترهای آن‌ها، احتمال تجمعی داده‌ها به دست آمد و سپس به توزیع نرمال تبدیل گردید. شاخص SEDI، به‌عنوان شاخص خشک‌سالی کسری تبخیر و تعرق از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$SEDI = \frac{D-D_{AVE}}{D_{STU}}, D = AET - PET \quad \text{رابطه‌ی ۳}$$

که D: تفاوت بین تبخیر و تعرق واقعی (AET) و تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) بر حسب میلی‌متر و D_{AVE} و D_{STU} : به ترتیب میانگین و انحراف معیار داده‌ها در طول دوره‌ی آماری هستند (Zhang et al., 2019: 1274). برای محاسبه‌ی تبخیر و تعرق واقعی از مدل تورنت‌وایت-ماتر استفاده شد. بدین منظور ابتدا تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه از روش تورنت وایت بر اساس دمای ماهانه برآورد شد (مهدوی، ۱۳۸۶: ۱۰۹). سپس بر اساس ظرفیت نگهداری آب، خاک برآوردشده حدود ۱۴۵ میلی‌متر توسط سنگاب زاگرس (۱۳۹۶) و استفاده از حالات زیر مقدار ذخیره‌ی رطوبتی خاک و تبخیر و تعرق واقعی ماهانه محاسبه گردید (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۴: ۲۹۱).

حالت ۱- فصل خشک، اگر $P_i - ET_{0i} < 0$ باشد:

$$A_i = A_c \cdot e^{-\frac{L_i}{A_c}}; L_i = L_{i-1} \cdot (P_i - ET_{0i}) \quad \text{رابطه‌ی ۴}$$

حالت ۲- فصل تر، اگر $P_i - ET_{0i} > 0$ باشد:

$$A_i = A_c \quad \text{اگر } A_i \geq A_c \quad \text{و} \quad A_i = A_{i-1} + (P_i - ET_{0i}) \quad \text{رابطه‌ی ۵}$$

در این حالت $L_i = A_c \ln\left(\frac{A_i}{A_c}\right)$ است.

تبخیر و تعرق واقعی در این روش با مقایسه‌ی تبخیر و تعرق پتانسیل و مقدار بارندگی، برحسب میلی‌متر بر اساس روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$AET = ET_0 \quad \text{رابطه‌ی ۶ اگر } p > ET_0, \text{ آنگاه}$$

$$AET = \Delta A_i + p \quad \text{رابطه‌ی ۷ اگر } p < ET_0, \text{ آنگاه}$$

در این رابطه، ΔA_i تغییرات رطوبتی خاک است که برابر است با:

$$\Delta A_i = A_i - A_{i-1} \quad \text{رابطه‌ی ۸}$$

در روابط فوق A_c و A_i به ترتیب ذخیره‌ی رطوبتی ماهانه و ظرفیت نگهداری آب خاک می‌باشند. در رابطه‌ی (۲) L_i پتانسیل تجمعی آب برحسب میلی‌متر است که به صورت مجموع اختلاف بین بارش P برحسب میلی‌متر و ET_0 تبخیر و تعرق پتانسیل برحسب میلی‌متر محاسبه می‌شود. به منظور تحلیل بهتر ارتباط بین این شاخص‌های خشک‌سالی مزبور با استفاده از آنالیز سری‌های زمانی دومتغیره (همبستگی متقابل و طیف متقابل) در محیط SPSS بررسی شد. تحلیل طیف متقابل بر اساس دو تابع تطابق و فاز انجام شد. به این صورت که مقدار فرکانس (F) متناسب با حداکثر تابع تطابق استخراج و سپس با انتقال این فرکانس بر روی نمودار فاز، فاز (P) بین دوسری شاخص محاسبه و میزان تأخیر (k) از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود (مالی و محمدی ۱۳۹۲: ۳۰۵).

$$k = \frac{P}{2\pi F} \quad \text{رابطه‌ی ۹}$$

4- Cross Correlation

5- Cross Spectrum

6- Coherency

7- Phase Diagram

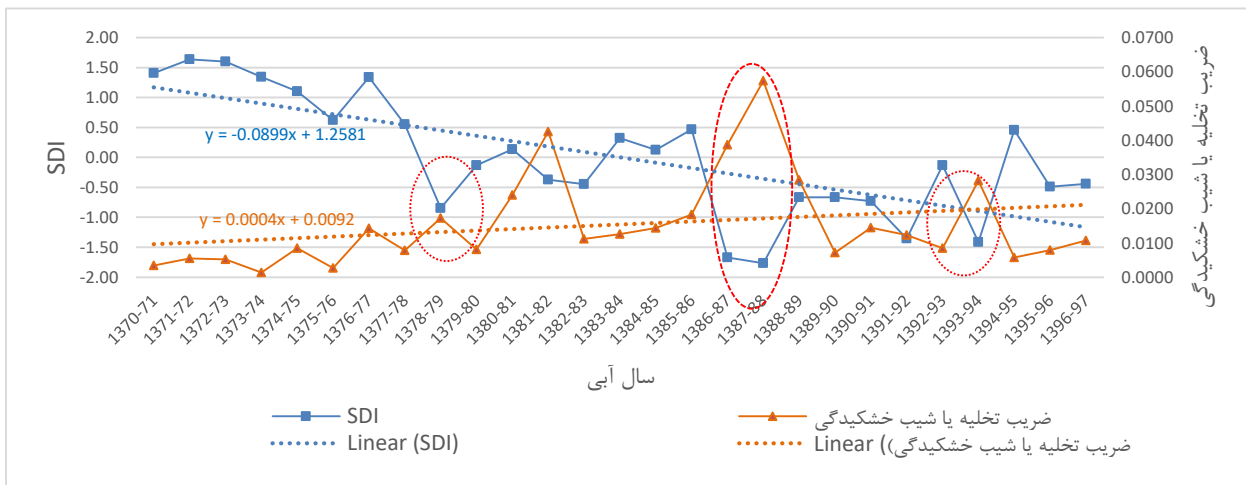
۴- نتایج و بحث

۴-۱- پایش سری زمانی ضریب خشکیدگی

منحنی خشکیدگی سراب مطهری خرم‌آباد در سال‌های آبی دوره‌ی آماری مورد مطالعه، تجزیه و تحلیل شد. بدین منظور در هر سال آبی ضریب تخلیه یا شیب شاخه‌ی خشکیدگی از نقطه‌ی عطف منحنی به بعد (بخش آب پایه هیدروگراف) محاسبه شد. تحلیل اولیه نشان داد که طی دوره‌ی آماری ۲۷ ساله، شیب شاخه‌ی خشکیدگی دارای روند خطی صعودی (ضریب مثبت در معادله خطی) است که بر اساس آماره‌ی t ، فرض صفر مبنی بر وجود شیب صفر در سری زمانی رد می‌شود و در سطح ۱ درصد معنی‌دار (t محاسباتی برابر با ۵/۹۹۵ و sig برابر با صفر) است. مطابق شکل (۲) پایش زمانی داده‌های ضریب تخلیه‌ی سراب مطهری نشان می‌دهد که در ابتدای دوره‌ی آماری، نوسانات شیب تخلیه‌ی جریان پایه کم بوده تا اینکه در سال آبی ۱۳۷۸-۷۹ و اوایل دهه‌ی ۸۰ افزایش یافته است. روند نسبتاً صعودی شیب تخلیه‌ی سراب مورد مطالعه در اواسط دهه‌ی ۸۰ تا حدودی حفظ شده، سپس در اواخر دهه‌ی مذکور، شدت آن به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش نشان می‌دهد. همچنین تغییرات کم‌وبیش این ضریب در دهه‌ی ۹۰ مشهود است.

۴-۲- تحلیل آماری ضریب خشکیدگی با شاخص SDI و عوامل مؤثر بر آن

ضریب آبدهی سراب مطهری خرم‌آباد در هنگام جریان پایه تحت تأثیر خصوصیات زمین‌شناسی و فیزیکی منطقه و نوسانات هیدرولوژیکی است. برای بررسی این عوامل، ابتدا ارتباط سری زمانی ضریب تخلیه‌ی سراب مطهری با نوسانات هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص خشک‌سالی هیدرولوژیکی (SDI) مبتنی بر دبی متوسط سالانه‌ی سراب تحلیل و سپس نقش خصوصیات زمین‌شناسی و فیزیکی محیط آبخوان بررسی گردید. بر اساس شکل (۲) مقادیر SDI نشان می‌دهد که در سال‌های آغازین دوره‌ی آماری مورد بررسی، میزان آبدهی سراب مطهری نسبت به شرایط نرمال بالا بوده و هم‌زمان با آن، شیب هیدرولوژیکی تخلیه‌ی سراب کاهش یافته است. میزان آبدهی چشمه در سال ۱۳۷۸-۷۹ تحت تأثیر خشک‌سالی هیدرولوژیکی قرار گرفته و در این سال، شیب تخلیه نسبت به سال‌های قبل از آن افزایش یافته است. از سال ۱۳۷۸-۷۹ به بعد تعداد وقوع خشک‌سالی هیدرولوژیکی و نرمال نسبت به شرایط ترسالی افزایش داشته است. این شرایط باعث تغییرات متفاوتی در شیب تخلیه‌ی سراب شده است. عمده‌تاً در سال‌های دارای خشک‌سالی شدید هیدرولوژیکی برای مثال سال‌های ۸۷-۱۳۸۶، ۸۸-۱۳۸۷ و ۹۴-۱۳۹۳ به ترتیب با مقادیر SDI ۱/۶۷-، ۱/۷۷- و ۱/۴۱- میزان شیب تخلیه به بالاترین مقدار ۰/۳۷۸، ۰/۵۷۴ و ۰/۲۸۲ رسیده است. باید به این نکته توجه داشت که تغییرات شیب هیدرولوژیکی سراب فوق به وضعیت هیدرولوژیکی همان سال و یا سال‌های قبل از آن وابسته است و توسط اثرات حافظه‌ی کوتاه‌مدت یا بلندمدت ناشی از نوسانات هیدرواقليمی کنترل می‌شوند. مشابه این نتیجه در یافته‌های (Fiorillo, 2009: 301) نیز تأکید شده است. برای تحلیل بهتر، ارتباط آماری بین خشک‌سالی هیدرولوژیکی و شیب تخلیه‌ی سراب مطهری در سال‌های مختلف با آزمون پیرسون نشان داد که یک همبستگی منفی نسبتاً قوی با r برابر ۰/۶۵- وجود دارد که در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که در هنگام جریان پایه با کاهش مقادیر SDI یا افزایش خشک‌سالی هیدرولوژیکی سراب مطهری، شیب هیدرولوژیکی آن افزایش یافته است. وقتی که دبی متوسط سالانه چشمه در اثر خشک‌سالی هیدرولوژیکی و کمبود بارش کاهش می‌یابد، شیب هیدرولوژیکی افزایش و دبی سراب به‌طور سریع فروکش می‌کند. این امر می‌تواند به علت کاهش ذخیره‌ی دینامیکی در سازندهای تشکیل‌دهنده‌ی آبخوان کارستیک سراب فوق در سال‌های خشک باشد. نتایج این بخش از تحقیق سازگار با نتایج Milanovic (۱۹۸۱) است؛ به طوری که ایشان شیب کم شاخه خشکیدگی را نشان‌دهنده‌ی ذخیره‌ی زیاد دینامیکی آبخوان و شیب تند آن را نشان‌دهنده‌ی ذخایر دینامیکی موقتی و زهکشی سریع چشمه‌های کارستیک بیان می‌کند.



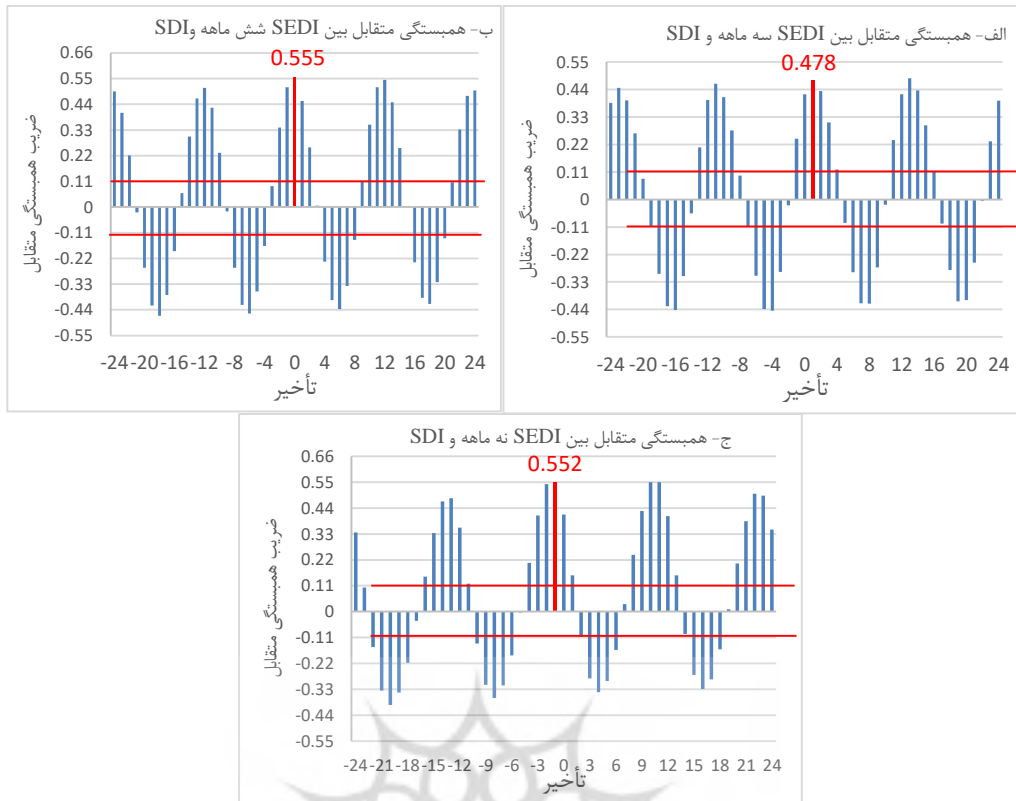
شکل ۲: تغییرات خشک‌سالی هیدرولوژیکی و ضریب خشکیدگی سراب کارستی مطهری خرم‌آباد. نمودارهای نقطه‌چین روند خطی نمودارها و دایره‌های خط‌چین قرمز رنگ تغییرات ضریب خشکیدگی را در هنگام خشک‌سالی‌ها را نشان می‌دهد.

با توجه به مطالب فوق، گرچه نوسانات هیدرولوژیکی می‌تواند تا ۶۵ درصد تغییرات ضریب خشکیدگی جریان پایه را توجیه کند، اما عوامل دیگر از جمله خصوصیات زمین‌شناسی و فیزیکی آبخوان تغذیه‌کننده چشمه و نیز تنش‌های ناشی از پمپاژ آب زیرزمینی می‌تواند دبی سراب و ضریب تخلیه‌ی آن را تحت تأثیر قرار دهد. بررسی خصوصیات زمین‌شناسی محل تغذیه‌ی سراب مطهری نشان داد که این سراب به همراه سایر سراب‌های موجود در منطقه بیش‌تر تحت تأثیر سازندهای کربناته نظیر سروک همراه با رسوبات ریزدانه مارن و رس واقع در ضلع شمال غربی آن قرار دارد (سنگاب زاگرس، ۱۳۹۶: ۳۸). بر اساس مطالعه‌ی بقایری و همکاران (Bagheri et al., 2016: 1) منحنی خشکیدگی چشمه‌های کارستی شامل دو بخش ابتدایی و انتهایی است که بخش ابتدایی آن، جریان سریع ناشی از شکستگی‌ها و مجاری کارستی را نشان می‌دهد و بخش انتهایی آن تحت تأثیر جریان پایه‌ی آهسته در نتیجه‌ی شکاف‌های کوچک با رژیم جریان زمینه یا ماتریکس است. علاوه بر این، در مطالعات دیگر به نقش جریان افشان زمینه در زمان آب پایه تأکید شده است (کریمی وردجانی، ۱۳۸۹: ۲۷۶). در این تحقیق از آنجاکه شیب منحنی خشکیدگی بخش جریان پایه بررسی شده است، لذا به‌طور کلی این بخش با توجه به مطالعات گذشته باید تحت تأثیر جریان زمینه و ذخیره‌ی درون سیستم باشد؛ اما بررسی‌ها نشان می‌دهد در سراب مورد مطالعه، شیب منحنی خشکیدگی در زمان آب پایه بسته به سال‌های تر و خشک احتمالاً به ترتیب تحت تأثیر رژیم‌های درون سیستم و مجاری است. در سال‌های خشک در زمان تداوم آب پایه، آب ناشی از بارش در بدنه‌ی سفره ذخیره شده و بعد از فروکش جریان سریع، با شیب هیدرولیکی زیاد از طریق مجاری کارستی و گسله، سازند کربناته‌ی سروک تخلیه می‌شود. در واقع، این وضعیت در سال‌های خشک، مشابه با تخلیه‌ی جریان سریع از طریق کانال‌ها و مجاری کارستی است. در سال‌های تر علاوه بر اینکه مجاری کارستی و شکستگی‌ها باعث زهکشی جریان سریع می‌شوند، احتمالاً در هنگام تداوم آب پایه این مجاری با هدایت آب تغذیه‌شده‌ی ماه‌های تر از طاق‌دیس سروک به درون زمینه دارای خلل و فرج ریزتر و شامل مواد آهکی با ترکیب ماسه و مارن در اعماق پایین‌تر، باعث ذخیره‌ی زیاد دینامیکی و تغییرات کم دبی با شیب هیدرولیکی کم در ماه‌های خشک می‌شوند.

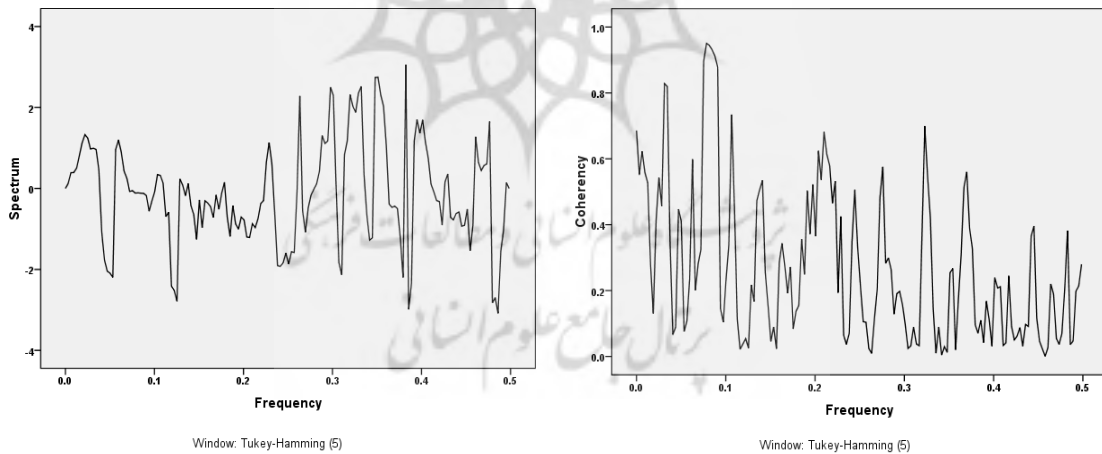
۴-۳- تحلیل طیفی و همبستگی متقابل بین شاخص‌های SEDI و SDI

در بخش قبل، اثر تغییرات خشک‌سالی هیدرولوژیکی روی ضریب خشکیدگی سراب کارستی مطهری بررسی و مشاهده شد که در زمان ترسالی‌ها یا شرایط نرمال این ضریب کاهش می‌یابد و در هنگام وقوع خشک‌سالی‌های شدید، مقدار آن افزایش می‌یابد. این موضوع می‌تواند باعث کاهش ذخیره‌ی دینامیکی آبخوان و درنهایت زهکشی نسبتاً سریع و کاهش دبی چشمه در هنگام تداوم جریان آب پایه شود. نوسانات دبی و خصوصیات هیدروگراف چشمه‌ی کارستی می‌تواند منعکس‌کننده‌ی عوامل هیدروژئولوژیکی و هیدرواقليمی حاکم بر سیستم آبخوان باشد. به منظور بررسی ارتباط هیدرولوژیکی و تأثیرپذیری ضریب خشکیدگی با نوسانات اقلیمی و تغییرات بیولوژیکی، ارتباط شاخص‌های SEDI و SDI بررسی شد. مطابق با نمودارهای شکل (۳) نتایج آنالیز سری زمانی همبستگی متقابل بین این دو شاخص نشان می‌دهد که شاخص SDI با شاخص SEDI در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶ و ۹ ماهه در سطح اطمینان ۹۵ درصد دارای رابطه‌ی معنی‌دار است، اما این همبستگی در مقیاس زمانی ۶ ماهه با تأخیر صفر و ضریب همبستگی متقابل برابر با 0.555 قوی‌تر است. به عبارت دیگر، پاسخ هیدرولوژیکی سراب مطهری به خشک‌سالی‌های اقلیمی و کمبود تبخیر و تعرق حدود ۶ ماه است. قابل توجه است که SEDI می‌تواند خشک‌سالی و انتقال وضعیت تر و خشک اقلیمی را به‌ویژه در مقیاس زمانی ماهانه تشخیص دهد و تغییرات بیولوژیکی اکوسیستم‌ها را در پاسخ به پویایی شدت خشک‌سالی برجسته کند (Zhang et al., 2019: 1273). برای اطمینان بیش‌تر ارتباط زمانی بین دو شاخص فوق از نمودارهای تحلیل طیفی بر مبنای تابع تطابق و فاز استفاده شد. از آنجاکه ارتباط همبستگی متقابل بین شاخص‌های SDI ماهانه و SEDI در مقیاس زمانی ۶ ماهه در تأخیر صفر، معنی‌دار بود، لذا برای تحلیل طیفی همین مقیاس‌های زمانی مبنای قرار گرفت. بر این اساس، نتایج تحلیل طیفی نشان داد که بیش‌ترین تابع تطابق در فرکانس حدود 0/08 اتفاق می‌افتد و با انتقال این فرکانس بر روی نمودار فاز، عدد نزدیک به صفر به دست آمد که با در نظر گرفتن آن در رابطه‌ی تأخیر فاز، مقدار آن صفر محاسبه شد (شکل ۴)؛ یعنی اینکه پاسخ خشک‌سالی هیدرولوژیکی به شاخص خشک‌سالی کسری تبخیر و تعرق حدود ۶ ماه با تأخیر صفر است که مشابه با نتایج همبستگی متقابل است. مطالعه‌ی (مالی و محمدی، ۱۳۹۲: ۳۰۵) نتایج مشابهی از تطابق استفاده این دو روش تحلیل آماری برای بررسی میزان تأخیر بین دبی و بارش نشان داده است.

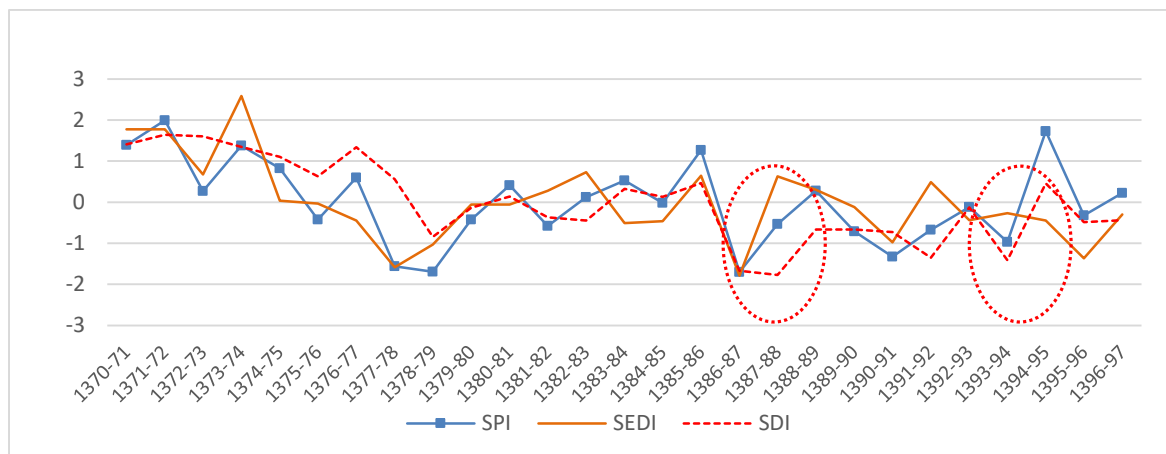
نوسانات تبخیر و تعرق واقعی با تغییرات بارش و رطوبت خاک در ارتباط است این زنجیره می‌تواند روی منابع آب و سیستم آبخوان کارستیک تأثیر بگذارد و درنهایت خصوصیات منحنی فروکش چشمه و ضریب خشکیدگی را تحت تأثیر قرار دهد. وقتی که میزان بارش و رطوبت خاک افزایش یابد و شرایط رشد و توسعه‌ی گیاه فراهم باشد، به واسطه‌ی برگاب بیش‌تر و تعرق بالای بافت گیاه، میزان تبخیر و تعرق واقعی نیز افزایش می‌یابد (سلیمانی‌مطلق و سلیمانی‌ساردو، ۱۳۹۷). برای تحلیل ارتباط تغییرات بارش و تبخیر و تعرق واقعی، همبستگی دو شاخص SEDI و SPI در مقیاس سالانه بررسی شد. مطابق شکل (۵) می‌توان گفت که تغییرات شاخص SEDI از نوسانات SPI تبعیت می‌کند و با افزایش و کاهش شاخص بارش استاندارد، شاخص خشک‌سالی کمبود تبخیر و تعرق، نوسان می‌کند؛ به طوری که ضریب همبستگی بین آن‌ها با آزمون پیرسون حدود ۶۸ درصد بوده و در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. همچنین همبستگی بین شاخص SPI با SDI سراب مطهری حدود ۷۰ درصد است و در سطح ۱ درصد معنی‌دار است؛ بنابراین اثر و ردپای شاخص SEDI و SPI بر روی شاخص خشک‌سالی هیدرولوژیکی چشمه (SDI) مشابه بوده و با آن‌ها می‌توان تغییرات ضریب خشکیدگی را تحلیل کرد؛ به طوری که در سال‌های کمبود بارش و کاهش تبخیر و تعرق واقعی برای مثال سال‌های ۱۳۸۷-۸۷، ۸۸-۱۳۸۷ و ۹۴-۱۳۹۳، خشک‌سالی هیدرولوژیکی هم‌زمان و یا با یک تأخیری اتفاق افتاده و باعث افزایش ضریب خشکیدگی چشمه گردیده که درنهایت باعث افزایش سریع زهکشی و کاهش تداوم جریان آب پایه شده است.



شکل ۳: ضریب همبستگی متقابل بین شاخص SEDI ماهانه و SEDI در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶ و ۹ ماهه در فواصل اطمینان ۹۵ درصد



شکل ۴: توابع تطابق (coherency) و فاز (Spectrum) بین شاخص‌های SEDI ۶ ماهه و SEDI ماهانه



شکل ۵: تغییرات شاخص‌های SPI، SEDI و SDI

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، رفتار هیدرولوژیکی سراب کارستیک مطهری خرم‌آباد نسبت به نوسانات هیدرواقليمی و خصوصیات زمین‌شناسی با تحلیل شیب شاخه‌ی خشکیدگی طی سال‌های آبی مختلف بررسی شد. یافته‌ی اصلی تحقیق نشان داد که شیب شاخه‌ی خشکیدگی سراب مطهری عمدتاً تابع نوسانات جریان سالانه است؛ به طوری که مقدار آن با افزایش میانگین دبی سالانه و وقوع شرایط ترسالی، کاهش و با تقلیل جریان و وقوع شرایط خشک‌سالی، افزایش می‌یابد. به طور مثال در سال‌های مرطوب ۱۳۷۱-۷۲ و ۷۳-۱۳۷۲ با مقادیر SDI بزرگ‌تر از ۱/۶ و میانگین دبی سالانه بیش از ۱۱۹۴ لیتر در ثانیه، شیب منحنی خشکیدگی حدود ۰/۰۰۵ بوده است؛ در صورتی که مقدار شیب این منحنی برای مثال در سال‌های خشک ۷۹-۱۳۷۸، ۸۷-۱۳۸۶، ۸۸-۱۳۸۷ و ۹۴-۱۳۹۳ با مقادیر SDI کم‌تر از ۰/۸۵- و میانگین دبی سالانه کم‌تر از ۲۰۰ لیتر در ثانیه به ۰/۰۱۷۲ تا ۰/۰۵۷۴ رسیده است؛ یعنی شیب منحنی خشکیدگی در شرایط خشک‌سالی نسبت به شرایط ترسالی شدید، حدود ۳/۴ تا ۱۱/۴ برابر، افزایش نشان می‌دهد.

به طور کلی بررسی ارتباط آماری بین مقادیر SDI و تغییرات شیب شاخه خشکیدگی دلالت بر همبستگی معکوس معنی‌دار با ضریب منفی ۰/۶۵ دارد که نشان‌دهنده‌ی پاسخ افزایشی شیب شاخه‌ی خشکیدگی به کاهش جریان متوسط سالانه است. کاهش بارش، عامل مهم کنترل‌کننده‌ی تغذیه و نوسانات هیدرولوژیکی چشمه‌ی مورد مطالعه است. همچنین، این عامل با تأثیر در تغییرات بیولوژیکی و کاهش برگ‌آب، تبخیر و تعرق واقعی و نفوذ می‌تواند روی تغذیه‌ی منابع آب و سیستم آبخوان کارستیک اثر گذارد و در نهایت، خصوصیات منحنی فروکش چشمه و ضریب خشکیدگی را تحت تأثیر قرار دهد؛ از این رو، بررسی ارتباط آماری نوسانات هیدرولوژیکی چشمه‌ی مورد مطالعه به وسیله‌ی شاخص SDI با شاخص‌های SPI و SEDI نشان‌دهنده‌ی همبستگی معنی‌دار اثر سیگنال‌های تغذیه و تغییرات بیولوژیکی بر سیستم آبخوان چشمه است که می‌تواند ویژگی‌های هیدروگراف آن را تحت تأثیر قرار دهد.

خصوصیات سازنده‌های کربناته سروک با لیتولوژی آهک و مواد ریزدانه در لایه‌های پایین از دیگر فاکتورهای مؤثر بر آبدهی و شیب هیدرولیکی منحنی فروکش سراب است. تحلیل نتایج نشان داد که در سال‌های مرطوب جریان سراب، تابعی از تغذیه‌ی مناسب و افزایش ذخیره‌ی دینامیکی آبخوان در بدنه‌ی سیستم است و نقش کانال‌ها و مجاری کارستی در هدایت آب و زهکشی جریان سریع در ماه‌های تر قابل توجه است. همچنین به احتمال زیاد به دلیل تغذیه‌ی مناسب ماه‌های تر و ذخیره‌ی دینامیکی آبخوان، آب پایه در ماه‌های خشک تغییرات اندکی داشته و باعث شیب هیدرولیکی کم می‌شود. در سال‌های خشک در زمان تداوم آب پایه، آب ناشی از بارش در بدنه‌ی سفره ذخیره شده و بعد از فروکش جریان سریع، با شیب هیدرولیکی زیاد از طریق مجاری کارستی و گسله، سازند کربناته‌ی سروک تخلیه می‌شود.

به‌طورکلی نتایج تحقیق نشان داد که سیستم آبخوان تغذیه‌کننده و شیب منحنی خشکیدگی سراب کارستی مطهری خرم‌آباد تحت تأثیر نوسانات هیدرواقليمی و خصوصیات زمین‌شناسی و فیزیکی آبخوان است. این موضوع می‌تواند گامی مهم در تعیین ذخیره و مدیریت منابع آب طی خشک‌سالی‌ها باشد.

۶- منابع

- ۱- اقتدارنژاد، مینا، بذرافشان، ام‌البین، صادقی‌لاری، عدنان (۱۳۸۷). ارزیابی تطبیقی شاخص‌های SDI و RDI در تحلیل مشخصه‌های خشک‌سالی هواشناسی و هیدرولوژیکی (مطالعه‌ی موردی: دشت بم)، نشریه‌ی دانش آب‌و‌خاک، جلد ۲۶، شماره‌ی ۴/۲، صص ۸۱-۶۹.
- ۲- سلیمانی‌مطلق، مهدی، سلیمانی ساردو، مجتبی (۱۳۹۷). برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از سنجش‌ازدور (مطالعه‌ی موردی: استان مرکزی)، اولین همایش بین‌المللی و سومین همایش ملی مدیریت پایدار منابع خاک و محیط زیست، کرمان: دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- ۳- علیزاده، امین (۱۳۸۸). اصول هیدرولوژی کاربردی (چاپ دوم)، مشهد: انتشارات دانشگاه امام رضا (ع).
- ۴- کریمی وردنجانی. حسین (۱۳۸۹). هیدروژئولوژی کارست (مفاهیم و روش‌ها)، شیراز: ارم شیراز.
- ۵- کلاتتری، نصرالله، محمدی بهزاد، حمیدرضا، چرچی، عباس، کشاورزی، محمدرضا (۱۳۹۰). چشمه‌های کارستی به‌عنوان ساده‌ترین ابزار برای تعیین خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان‌های کارستی، (مطالعه‌ی موردی: چشمه‌ی بی‌بی‌تلخون، استان خوزستان)، مجله‌ی زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دوره‌ی ۱، شماره‌ی ۲، صص ۹۰-۱۰۰.
- ۶- گودرزی، مصطفی، عابدی‌کویایی، جهانگیر، حیدرپور، منوچهر، صفوی، حمیدرضا (۱۳۹۴). آنالیز اثرات پارامترهای مختلف بر تغذیه‌ی آب‌های زیرزمینی با استفاده از یک روش هیبریدی، نشریه‌ی آب‌و‌خاک، شماره‌ی ۱۹، صص ۲۹۸-۲۸۷.
- ۷- مالی، سپیده، محمدی، ضرغام (۱۳۹۲). بررسی توسعه‌ی کارست با استفاده از تحلیل هیدروگراف و ارتباط سری زمانی بارندگی و دبی چشمه‌ها، هفدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی.
- ۸- محمدی بهزاد، حمیدرضا، چرچی، عباس، کلاتتری نصرالله (۱۳۹۴). بررسی رفتار هیدروژئولوژیکی چشمه‌ی کارستی سبزاب، شمال شرق استان خوزستان، مجله‌ی زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دوره‌ی ۵، شماره‌ی ۱۵، صص ۱۹-۱۰.
- ۹- مهدوی، محمد (۱۳۸۶). هیدرولوژی کاربردی، جلد دوم، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- ۱۰- مهندسین مشاور سنگاب زاگرس (۱۳۹۶). گزارش پیشنهاد ممنوعیت محدوده‌ی مطالعاتی خرم‌آباد، خرم‌آباد: شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان لرستان.
- 11- Ahmadipour. M.R. (1999). Karst terraines in iran -examples from lorestan. Acta Carsologica.28/2(13):213-224.
- 12- Bagheri, R., Jafari, H., Momeni, A. and Bagheri F (2016). Analysis of karst spring recession curves, west of Iran. Arab J Geosci 9, 731.
- 13- Boussinesq, J. (1903). Sur un mode simple d'e'coulement desnappes d'eau d'infiltration a`lit horizontal, avec rebord vertical tout autour lorsqu'une partie de ce rebord est enleve `e depuis la surface jusqu'au fond. Comptes Rendus, Academie des Sciences (Paris), 137, 5-11.
- 14- Boussinesq, J. (1904). Recherches the'oretiques sur l'e'coulement des nappes d'eau infiltre'es dans le sol et sur le de'bit des sources. Journal de Mathematiques Pures et Appliquees, 10, 5-78.
- 15- Fiorillo, F (2009). Spring hydrographs as indicators of droughts in a karst environment. Journal of Hydrology. 373:290-301.
- 16- Fiorillo, F., Leone, G., Pagnozzi, M. Esposito L (2020). Long-term trends in karst spring discharge and relation to climate factors and changes. Hydrogeology Journal. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02265-0>.
- 17- Ford D and Williams P (2007). Karst Hydrogeology and Geomorphology. John Willy and Sons, Ltd. 562 pp.

- 18- Kumar, V., Sen, S (2018). Evaluation of spring discharge dynamics using recession curve analysis: a case study in data-scarce region, Lesser Himalayas, India. *Sustain. Water Resour. Manag.* 4, 539–557.
- 19- Lo Russo, S., Amanzio, G., Ghione, R. De Maio M (2015). Recession hydrographs and time series analysis of springs monitoring data: application on porous and shallow aquifers in mountain areas (Aosta Valley). *Environ Earth Sci* 73, 7415–7434.
- 20- Maillet, E. (1905). *Essais d'Hydraulique souterraine et fluviale*, Hermann, Paris
- 21- Milanovic, P.T. 1981 *Karst Hydrogeology*, Water Resources Publication, Colorado, 434 pp
- 22- Rice, S.E (2007). Springs as indicators of drought: physical and geochemical analyses in the Middle Verde river watershed, Arizona. Thesis (MSc). Northern Arizona University, USA.
- 23- Shamsi, A., Karami, G.H. & Taheri, A (2019). Recession curve analysis of major karstic springs at the Lasem area (north of Iran). *Carbonates Evaporites* 34, 845–856.
- 24- Staško S & Buczyński S (2018). Drought and its effects on spring discharge regimes in Poland and Germany during the 2015 drought, *Hydrological Sciences Journal*, 63:5, 741-751.
- 25- Zhang, X., Li, M., Ma, Z. et al. (2019). Assessment of an Evapotranspiration Deficit Drought Index in Relation to Impacts on Ecosystems. *Adv. Atmos. Sci.* 36, 1273–1287.

