

پایش و پیش‌بینی اثر خشکسالی‌ها بر دبی چشمه‌های کارستی شهرستان کرمانشاه

امان اله فتح‌نیا* - استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه رازی، کرمانشاه
علی احمدآبادی - استادیار گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی
سعید رجایی - دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه
جعفر معصوم‌پور سماکوش - استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه رازی، کرمانشاه

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۱۷ تأیید نهایی: ۱۳۹۵/۱۱/۲۱

چکیده

آبخوان کارست در مناطق آهکی اهمیت زیادی در تأمین آب مصرفی دارند، این آبخوان‌ها تحت تأثیر دوره‌های افزایش و کاهش بارش و همچنین تغییرات اقلیمی قرار دارند. به‌منظور مدیریت پایدار منابع آب، شناسایی تغییرات دبی چشمه‌های کارستی این آبخوان‌ها ضروری می‌باشد. در تحقیق حاضر تحلیل سری‌های زمانی هیدرولوژیکی، بین دبی چشمه‌های کارستی شهرستان کرمانشاه و بارش با استفاده از شاخص بارش استانداردشده، آزمون من-کندال و زنجیره مارکوف برای پایش و پیش‌بینی خشکسالی و اثر آن بر دبی چشمه‌های انجام گرفت. همچنین ارتباط بارش-دبی و تأخیر زمانی به‌صورت کوتاه و بلندمدت با همبستگی پیرسون بررسی شد. داده‌های تحقیق شامل دبی سراب‌های بی‌ابر، ورمنجه و نیلوفر و بارش ایستگاه‌های هواشناسی کرمانشاه، روانسر و اسلام‌آباد غرب برای دوره زمانی ۱۳۶۸-۸۸ به‌صورت ماهانه و سالانه بود. نتایج تحقیق نشان داد بین دبی سراب ورمنجه (۰/۶۳۹) و بی‌ابر (۰/۶۴۲) با بارش ایستگاه هواشناسی اسلام‌آباد غرب و سراب نیلوفر با ایستگاه هواشناسی کرمانشاه (۰/۴۸۴) بیشترین همبستگی وجود دارد. به دلیل حالات مختلف بارش مانند جامد یا مایع، توزیع و شدت آن، اثر بارش بر افزایش دبی با تأخیر حداقل ۲ ماه و حداکثر ۶ ماه مشاهده شد. نتایج آزمون من-کندال بیانگر افزایش مقدار بارش (۱۳۶۸-۷۶) و سپس کاهش (۱۳۷۷-۸۸) می‌باشد که دبی سراب بی‌ابر همین روند را نشان می‌دهد، و دبی سراب نیلوفر از سال ۱۳۸۷ دچار تغییر کاهشی شده است. نتایج آزمون زنجیره مارکوف نشان داد که در هر سه ایستگاه احتمال رخداد دوره خشک بیشتر از دوره بارانی است، در ایستگاه اسلام‌آباد غرب ۰/۸۹۲، در ایستگاه روانسر ۰/۸۹ و در ایستگاه کرمانشاه ۰/۸۸۶ می‌باشد. مطالعه نشان داد که احتمال افزایش دوره‌های خشک در آینده بیشتر و به‌تبع آن دبی سراب‌های مورد مطالعه کاهش خواهد یافت. مطالعه شاخص SPI سالانه روند کاهش دبی با خشکسالی را نسبت به دوره‌های تر بهتر نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: خشکسالی، چشمه‌های کارستی، دبی، بارش، کرمانشاه.

مقدمه

محیط‌زیست در جهان طی قرن بیستم تغییرات اساسی داشته است (یان^۱ و همکاران، ۱۹۹۹). اخیراً مطالعات در این زمینه توجه دانشمندان علوم زیستی را به خود جلب نموده است، به‌علاوه ارتباط میان آب‌های زیرزمینی و آب‌وهوا برای هیدرولوژیست‌ها دارای اهمیت فراوانی می‌باشد (آلی^۲، ۲۰۰۱). پراکندگی کنونی منابع آب بر روی کره زمین اثر مستقیم گرمایش جهانی می‌باشد (واگنر^۳، ۱۹۹۰).

اساساً دبی سالانه چشمه‌های کارستی به شرایط آب‌وهوایی، وضعیت زمین‌شناسی و کارست بستگی دارد. مطالعه دبی چشمه‌های کارستی در دوره زمانی ۴۲ ساله در منطقه شنتو^۴ کشور چین تغییرات دبی را نسبت به بارش نشان می‌دهد. همچنین فعالیت‌های انسانی در درجه دوم بر میزان آبدی چشمه‌های کارستی اثرگذار بوده است (ما^۵ و همکاران، ۲۰۰۴). شرایط آب‌وهوایی، کارست و خصوصیات زمین‌شناسی، رژیم هیدرولوژیکی سالانه چشمه‌های کارستی را تعیین می‌کند. آبخوان کارست به‌عنوان ذخیره‌گاه طبیعی بارش، تحت تأثیر دوره‌های افزایش و کاهش بارش و همچنین تغییرات اقلیمی بلندمدت قرار دارد (چن^۶ و همکاران، ۲۰۰۴). از نظر وسعت و ارتباط داخلی، دو نوع عمده آبخوان کارستی وجود دارد. یک نوع آن به دلیل گسترش انحلال آهک و وجود درز و شکاف وسیع، هم‌زمان با افزایش و یا کاهش بارش دبی خروجی، عکس‌العمل سریعی نشان می‌دهد (سی‌ویتا^۷، ۲۰۰۵). نوع دوم آبخوان به دلیل گسترش کم درز و شکاف، دبی حداکثر مدتی پس از بارش اتفاق می‌افتد (وایت^۸، ۲۰۰۲). تعیین آبدی سیستم‌های بزرگ کارستی از طریق بررسی بارش و دوره‌های کاهش تغذیه انجام می‌شود. آمارها نشان می‌دهد که سال‌های هیدرولوژیکی تابعی از بارش سال قبل می‌باشند. در شرایط آب‌وهوایی مدیترانه و شرایط هیدرولوژیکی محل، حداکثر اوج سالانه هیدروگراف در طی فصل بهار مشاهده می‌شود، همچنین تغذیه ناکافی به دلیل کمبود بارش سالیانه، اوج هیدروگراف دبی چشمه‌ها را متأثر می‌سازد؛ این هیدروگراف نشان‌دهنده خشکسالی بوده که تحت تأثیر کاهش طولانی‌مدت تغذیه آب طی سالیان متمادی رخ می‌دهد. در سری‌های زمانی طولانی‌مدت و رژیم خاص چشمه‌های کارستی؛ کاهش دبی از اوایل زمستان قابل پیش‌بینی بوده و برای مدیریت منابع آب کارست مفید می‌باشد (فیوریلو^۹، ۲۰۰۹). نتایج مطالعات در منطقه کارستی گوانگزی^{۱۰} در کشور چین نشان می‌دهد که خشکسالی و سیل در مناطق کارستی نتیجه عوامل آب‌وهوایی، زمین‌شناسی و انسان می‌باشد (روی^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۲). نتایج بررسی احتمال وقوع پدیده‌های خشکسالی و ترسالی با استفاده از مدل زنجیره مارکف و نمایه SPI در شهر تهران بیانگر احتمال گذر از یک حالت معین به همان حالت محتمل‌تر از گذر به سایر شرایط است. احتمال Pdd (احتمال وقوع خشکسالی بعد از خشکسالی) بیشتر از Pww (احتمال وقوع ترسالی بعد از ترسالی) است. به‌طور کلی احتمال تعادل حالت نرمال بیش از همه و احتمال تعادل حالت خشکسالی بیشتر از ترسالی است. هرچقدر مقیاس زمانی SPI طولانی‌تر می‌گردد از تعداد خشکسالی‌های مورد انتظار کاسته می‌شود و برعکس طول دوره‌های خشکسالی افزایش می‌یابد و انتظار وقوع پدیده خشکسالی بیش از پدیده ترسالی است (صادقی‌نیا و همکاران،

1- Yan

2- Alley

3- Waggoner

4- Shantuo

5- Ma

6- Chen

7- Civita

8- White

9- Fiorillo

10- Guangxi

11- Rui

(۱۳۹۲). نتایج مطالعه تأثیر تغییر اقلیم بر چشمه کارستی سراب نیلوفر حاکی از آن است که چشمه دارای سیستم افشان و رژیم پایدار است که نسبت به تغییر اقلیم‌ها کمتر واکنش نشان می‌دهد (فتوت و همکاران، ۱۳۸۶). بررسی رابطه ۲۷ متغیر اقلیمی با میزان آبدهی ۴ سراب کارستی خرم‌آباد با استفاده از روش‌های رگرسیونی در مقیاس‌های زمانی مختلف نشان داد برای پیش‌بینی دبی سراب‌های کارستی شهر خرم‌آباد، متغیرهای بارشی در دوره‌های ماهانه، فصلی و سالانه نقش به‌مراتب ضعیف‌تری از متغیرهای دمایی دارد و از بین متغیرهای دمایی، حداقل مطلق دما مؤثرترین متغیر در برآورد مقادیر دبی می‌باشد (لشنی‌زند و غلامرضائی، ۱۳۹۰). خوش‌اخلاق و همکاران (۱۳۹۰) با بررسی نقش خشکسالی‌های شدید در آبدهی چشمه‌های کارستی استان کرمانشاه به این نتیجه رسیدند که چشمه‌های زاگرس شکسته از نوع مجرای هستند. چشمه‌های زون زاگرس شکسته با یک تأخیر زمانی ۳ ماهه نسبت به حداکثر بارش واکنش نشان داده و تقریباً به‌طور کامل خشک گردیده‌اند و تأثیرپذیری چشمه‌های زاگرس شکسته از خشکسالی بسیار بیش‌تر زاگرس چین‌خورده می‌باشد. رحمتی (۱۳۹۳) با بررسی ارتباط بارش و دبی در دو آبخوان کارستی، بیستون-پرآو و کوه پاطاق استان کرمانشاه به این نتیجه رسید که دبی حداکثر با ۱ ماه تأخیر همراه می‌باشد و نشان‌دهنده همبستگی بارش و دبی چشمه‌ها در سطح معنی‌داری ۱ درصد هستند.

نتایج تحلیل همبستگی بلندمدت دوره‌های خشکی شاخص SPI ۱۲ ماهه و دبی کارست در جنوب ایتالیا نشان‌دهنده روند یکسان کاهش بارش و دبی می‌باشد، با کاهش شاخص SPI به کمتر از ۱- دبی کاهش یافته و با کاهش SPI به کمتر از ۱/۵- که نشان از کاهش طولانی‌مدت بارش می‌باشد، دبی چشمه‌های کارستی همان سال کاهش می‌یابد (فیوریلو و گوداگنو، ۲۰۱۰). در استان کرمانشاه حدود ۵۵۰ سراب و چشمه بزرگ و کوچک با آبدهی سالانه ۸۲۷ میلیون مترمکعب وجود دارد. سراب نیلوفر یکی از سراب‌های مهم شهرستان کرمانشاه است و جزء مناطق مهم گردشگری کرمانشاه محسوب می‌شود که از آن همچنین برای مصارف در بخش کشاورزی نیز استفاده می‌شود. با کاهش بارش، این سراب در تابستان ۱۳۹۴ کاملاً خشکید. سراب ورمنجه ۱۵۰ هکتار از زمین‌های کشاورزی روستای ورمنجه و آب آشامیدنی مردم این روستا را تأمین می‌کند، این سراب در تابستان ۱۳۸۷ بر اثر خشکسالی کاملاً خشکید. سراب بی‌ابر نزدیک روستای چقاماران بی‌ابر در دهستان میان‌دریوند بخش مرکزی کرمانشاه واقع شده است، از آب این سراب جهت مصارف بخش کشاورزی این روستا و در درجه دوم برای شرب استفاده می‌شود. سراب بی‌ابر نیز از سال ۱۳۸۶ در ایام گرم سال تقریباً می‌خشکد. با توجه به تحقیقات اهمیت چشمه‌های کارستی ذکرشده در تأمین آب شرب، کشاورزی و گردشگری، هدف پژوهش حاضر، بررسی وضعیت دبی چشمه‌های کارستی و ارتباط آن با نوسانات و تأخیر زمانی بارش و پیش‌بینی تکرار دوره‌های خشک و تر و اثر آن بر دبی در آینده در شهرستان کرمانشاه می‌باشد.

روش تحقیق

در مطالعه حاضر داده‌های دبی ماهانه چشمه‌های کارستی بی‌ابر، نیلوفر و ورمنجه و بارش ماهانه نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی شامل کرمانشاه، روانسر و اسلام‌آباد غرب برای دوره زمانی ۸۸-۱۳۶۸ که به‌صورت هم‌زمان دارای داده کامل بودند، بررسی شد. داده‌های دبی از سازمان آب منطقه‌ای کرمانشاه و داده‌های بارش از سازمان هواشناسی کرمانشاه اخذ گردید. برای بررسی مقادیر دبی و بارش از آزمون من-کندال و شاخص SPI به‌صورت سالانه استفاده شد. همچنین از آزمون زنجیره مارکوف برای بررسی احتمال تکرار دوره‌های خشک یا مرطوب در آینده و تأثیر آن بر دبی سراب‌ها استفاده شد. برای بررسی میزان تأخیر زمانی اثر بارش بر مقدار دبی چشمه‌های کارستی مورد مطالعه، بارش از سال ۱۳۶۸ و دبی از حالت حداقل (هم‌زمان) تا حداکثر تأخیر (۱۲ ماه) آزمون همبستگی گرفته شد، یعنی حداقل

به صورت هم‌زمان و حداکثر تأخیر بارش با دبی ۱۲ ماه بعد همبستگی بررسی شد.

آزمون من-کندال

در آزمون من-کندال بعد از رتبه‌بندی داده‌ها و محاسبه آماره t_i که نسبت رتبه i به رتبه‌های ماقبل خود است، فراوانی تجمعی آماره t_i محاسبه شد. در ادامه، آماره‌های E_i (معرف امید ریاضی)، V_i (واریانس) و U_i (شاخص مقایسه‌ای آزمون)، محاسبه شد که معادله آماره‌های فوق به شرح ذیل می‌باشند:

$$t_i = \sum_{i=1}^n t_i \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$E_i = \frac{n_i(n_i - 1)}{4} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$V_i = \frac{n_i(n_i - 1)(2n_i + 5)}{72} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$u_i = \frac{(\sum t_i - E_i)}{\sqrt{V_i}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در معادلات فوق n_i ترتیب زمانی داده‌ها است. برای ترسیم نمودار آزمون و آشکارسازی روند معنی‌دار یا غیر معنی‌دار سری زمانی باید آماره‌های قرینه‌ای با عناوین t'_i ، E'_i ، V'_i و U'_i محاسبه شود که معادله E'_i و V'_i متفاوت از بالا می‌باشند:

$$E'_i = \frac{[N - (n_i - 1)](N - n_i)}{4} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$V'_i = \frac{[[N - (n_i - 1)](N - n_i)][2(N - n_i)] + 5}{72} \quad \text{رابطه (۶)}$$

در معادلات فوق N طول دوره آماری است. محل تلاقی U_i و U'_i در محدوده اطمینان ۹۵ درصد، بیانگر تغییرات معنی‌دار سری زمانی آمار بوده و رفتار U_i بعد از محل تلاقی وضعیت نزول یا صعود سری را مشخص می‌کند (سهرلی و همکاران، ۱۳۸۸).

۲-۲. شاخص استاندارد شده بارش

برای بررسی وجود خشکسالی در دوره‌های مورد مطالعه از شاخص SPI استفاده شد که در اینجا توضیح داده می‌شود.

$$SPI = \frac{P_{ik} - \bar{P}_i}{\sigma_i} \quad \text{رابطه (۷)}$$

SPI: شاخص بارش استاندارد شده، P_{ik} : مقادیر بارش ایستگاه در k امین مشاهده به میلی‌متر، \bar{P}_i : میانگین بارش ایستگاه به میلی‌متر، σ_i : انحراف معیار ایستگاه می‌باشد. نتایج شاخص بر حسب مقدار (جدول ۱) باید طبقه‌بندی می‌شود (مک‌کی و همکاران، ۱۹۹۳).

جدول ۱: مقیاس طبقه‌بندی شاخص SPI

وضعیت	ترسالی بسیار شدید	ترسالی شدید	ترسالی	نرمال	خشکسالی ضعیف	خشکسالی شدید	خشکسالی بسیار شدید
SPI مقدار	≥ 2	۱/۵ تا ۱/۹	۱ تا ۱/۴۹	-۰/۹۹ تا +۰/۹۹	-۱ تا -۱/۴۹	-۱/۵ تا -۱/۹۹	≤ -2

لازم به ذکر است در ابتدای تحقیق خصوصیات زمین‌شناسی و اثر آن بر پیدایش چشمه‌های کارستی بررسی شد. در ادامه تحقیق اثر تأخیر زمانی بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه بر دبی چشمه‌های کارستی و ضریب همبستگی آن‌ها با روش پیرسون در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ به‌طور ماهانه مورد مطالعه قرار گرفت.

زنجیره مارکوف

فرایند تصادفی $X = [X_t, t \in N]$ یک زنجیره مارکوف نامیده می‌شود، اگر برای هر $t \in N$ و $j \in E$ ، شرط زیر صادق باشد که در آن، E یک مجموعه قابل شمارش است (حکیمی‌پور، ۱۳۷۶):

$$P[X_{t+1} = j | X_t, X_{t-1}, \dots, X_1] = P[X_{t+1} = j | X_t] \quad \text{رابطه ۸}$$

عبارت فوق بیانگر احتمال وجود سیستم در زمان $t+1$ در حالت z است، به شرط اینکه در زمان t حالت i سیستم مشخص و حالت‌های رخ داده قبلی نیز مشخص باشد. در واقع، P احتمال شرطی است و بیان می‌کند که نتیجه هر فرایند در زمان $t+1$ تنها به شرایط در زمان t بستگی دارد. فرایندهایی که چنین خاصیتی دارند یک زنجیره مارکوف مرتبه اول نامیده می‌شوند.

احتمال شرطی P_{ij} ، $P[X_{t+1} = j | X_t = i]$ برای $i, j \in E$ ، احتمال انتقال سیستم از حالت i به j نامیده می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$P_{ij} = P[X_{t+1} = j | X_t = i] = \frac{N[X_t = i, X_{t+1} = j]}{N[X_t = i]} \quad \text{رابطه ۹}$$

که در رابطه فوق، $N[X_t = i, X_{t+1} = j]$ ، تعداد انتقالات از حالت i به حالت j و $N[X_t = i]$ تعداد کل دوره‌های قرار گرفته در حالت i می‌باشد. معمولاً P_{ij} را با توجه به حالت‌های یک سیستم با یک آرایش مربعی مرتب می‌کنند و نتیجه آن ماتریس مربع P است که ماتریس انتقال زنجیره مارکوف X نامیده می‌شود:

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & \dots & P_{2n} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & \dots & P_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{n3} & \dots & P_{nn} \end{pmatrix} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

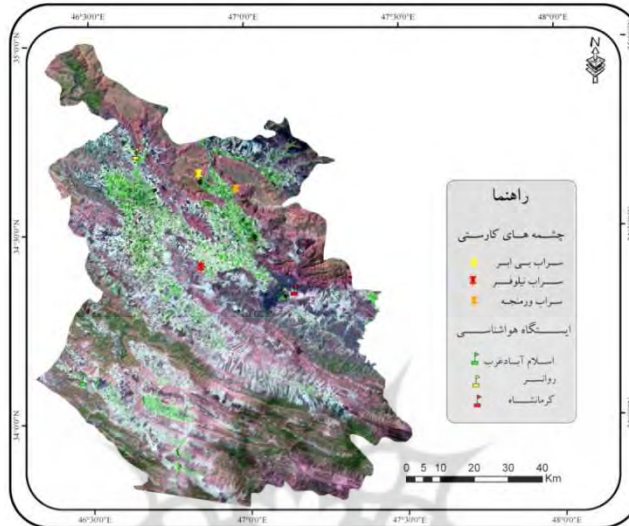
در ماتریس P ، احتمال ورود به سیستم از حالت i به حالت j بزرگتر یا مساوی صفر می‌باشد (برای هر $i, j \in E$ ، $P_{ij} \geq 0$). همچنین به دلیل آنکه یک سیستم به احتمال صد درصد در یکی از مجموعه حالت‌های ممکن در هر

لحظه‌ای از زمان خواهد بود، مجموع احتمالات هر سطر می‌بایست برابر با یک باشد یعنی برای هر $i \in E$ ، $\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1$.

است (حکیمی‌پور، ۱۳۷۶). لازم به ذکر است که عناصر قطر اصلی ماتریس P بیانگر پایداری و ابقای هر وضعیت می‌باشد. در این پژوهش برای بررسی احتمال تکرار دوره‌های خشک یا مرطوب و اثر آن بر دبی چشمه‌های کارستی از مدل زنجیره مارکوف استفاده شد.

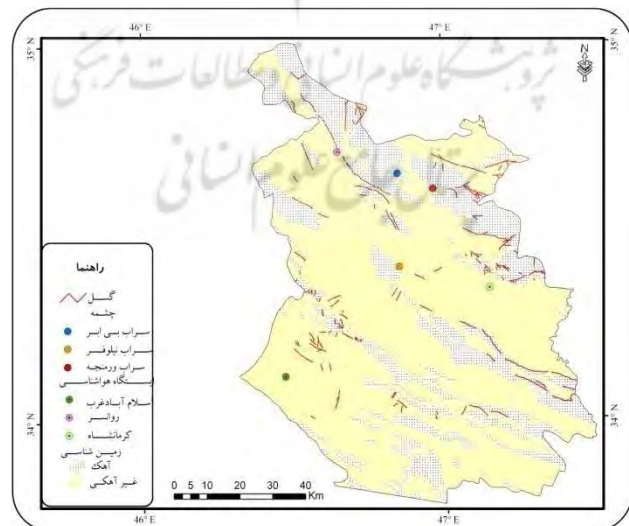
بحث و یافته‌ها

سراب بی‌ابر و ورمنجه در بخش‌های شمالی منطقه مورد مطالعه و در کوهستان‌های حجیم‌تر نسبت به سراب نیلوفر قرار گرفته است. شکل ۱ توزیع ایستگاه‌های هواشناسی و سراب‌ها بر روی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. همچنان که ملاحظه می‌شود سراب‌ها در شمال و جنوب، آب دشت کرمانشاه را تأمین می‌کنند. علت انتخاب ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک کرمانشاه، روانسر و اسلام‌آباد غرب، نزدیکی به منطقه مورد مطالعه بود.



شکل ۱: تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه، توزیع ایستگاه‌های هواشناسی و سراب‌ها

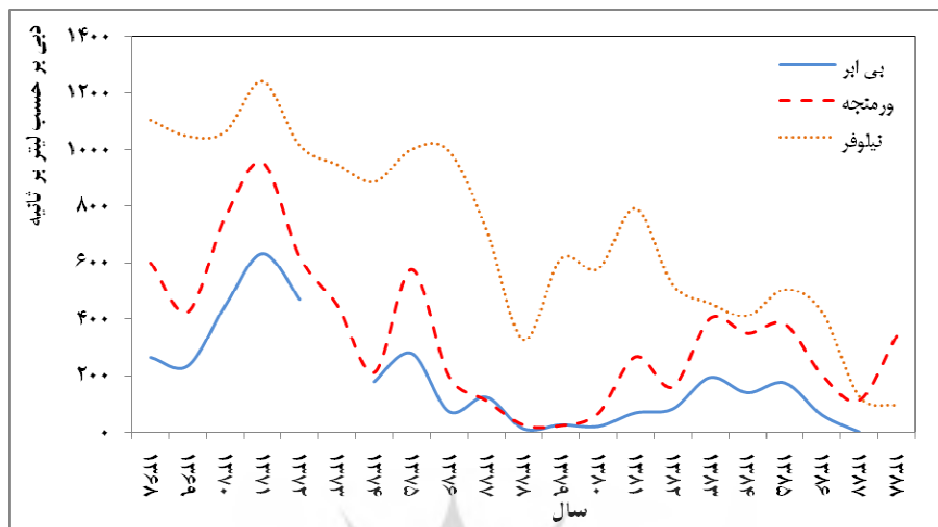
بیشتر حجم توده آهکی به ترتیب در اطراف سراب بی‌ابر، سراب ورمنجه و سراب نیلوفر مشاهده می‌شود. توزیع بیشتر گسل‌ها بر روی توده کوهستانی تغذیه‌کننده سراب ورمنجه نشان‌دهنده نقش آن در توسعه این سراب می‌باشد. اما در نزدیکی دیگر چشمه‌های کارستی گسل مشاهده نمی‌شود. شکل ۲ وضعیت زمین‌شناسی و گسل‌های منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۲: وضعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، گسل، توزیع ایستگاه‌های هواشناسی و سراب‌ها

مقدار دبی چشمه‌های کارستی برحسب لیتر بر ثانیه در هر سال نشان می‌دهد (شکل ۳) بیشترین مقدار دبی مربوط به سراب نیلوفر و سپس ورمنجه می‌باشد. کمترین ارتفاع مربوط به سراب نیلوفر با ارتفاع ۱۳۲۰ متر و سپس سراب ورمنجه با ارتفاع ۱۳۲۹ متر و سراب بی‌ابر با ارتفاع ۱۳۶۳ متر می‌باشد. از ابتدای دوره مطالعاتی تا سال ۱۳۸۸ در چشمه‌های کارستی روند کاهش دبی مشاهده می‌شود که بیشترین کاهش مربوط به سراب نیلوفر است که از بالاترین مقدار (۱۲۴۱)

لیتر بر ثانیه) به کمتر از ۱۰۰ لیتر بر ثانیه در سال ۸۸ کاهش یافته است. اما بیشترین ضریب تغییرات در سراب بی‌ابر به مقدار ۰/۹۴، سپس سراب ورمنجه به مقدار ۰/۷۲ و در نهایت مربوط به سراب نیلوفر به مقدار ۰/۴۷ می‌باشد.



شکل ۳: مقدار دبی سراب‌ها برحسب لیتر بر ثانیه در سال (۱۳۶۸-۸۸)

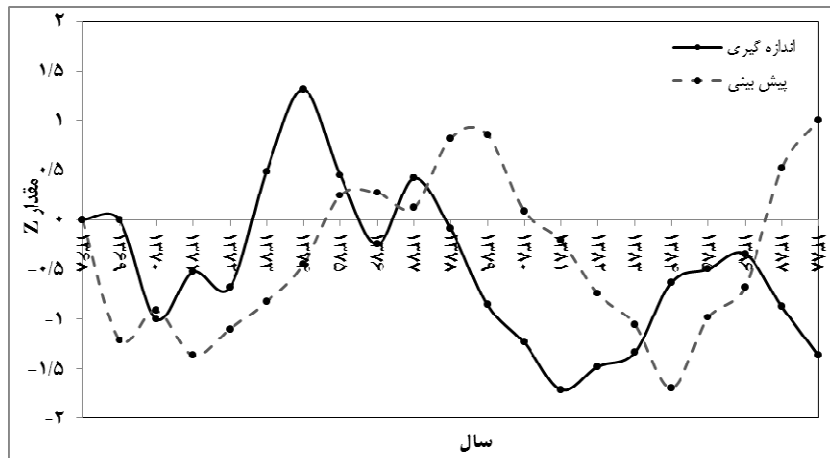
مقدار دبی همراه با افزایش یا کاهش بارش نوسان می‌کند. برای بررسی مقدار همبستگی دبی به بارش از نزدیک‌ترین ایستگاه‌های مجاور استفاده شد (جدول ۲). همبستگی سراب‌های بی‌ابر و ورمنجه با ایستگاه اسلام‌آباد غرب بیشتر بوده و سراب نیلوفر با بارش ایستگاه هواشناسی کرمانشاه بیشتر می‌باشد، به آن معنی که نوسان بارش ایستگاه‌های کرمانشاه و اسلام‌آباد غرب به ترتیب تغییرات دبی سراب‌های نیلوفر و بی‌ابر را در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ توجیه می‌کند.

جدول ۲: همبستگی مقدار دبی چشمه‌های کارستی با بارش ایستگاه‌های هواشناسی

سراب	ایستگاه هواشناسی	کرمانشاه	روانسر	اسلام‌آباد غرب
سراب بی‌ابر	۰/۵۸	۰/۵۷	۰/۶۴	
سراب نیلوفر	۰/۴۸	۰/۴	۰/۴۲	
سراب ورمنجه	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۶۴	

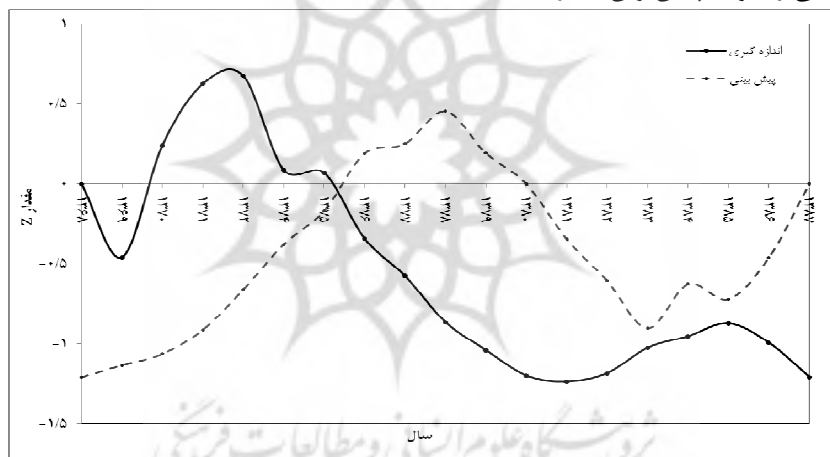
* همبستگی پیرسون در سطح معنی‌داری ۱ درصد می‌باشد

نتایج آزمون من-کنندال بارش ایستگاه اسلام‌آباد غرب (شکل ۴) با سراب بی‌ابر (شکل ۵) و ورمنجه (شکل ۶) به دلیل همبستگی بیشتر ابتدا مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد خط ممتد U_i (مقدار واقعی) از سال ۱۳۶۸ تا ۱۳۷۶ نسبت به خط منقطع U_i' (مقدار پیش‌بینی) افزایش یافته و مثبت است، بنابراین یک دوره ترسالی رخ داده است، اما بین سال‌های ۱۳۷۷-۸۸ دو خط U_i و U_i' همدیگر را قطع نموده و U_i' مقدار بیشتری نسبت به مقدار واقعی پیش‌بینی کرده است که نشان یک دوره خشکسالی است. با توجه به اینکه در طی دوره مطالعاتی مقدار واقعی بارش از محدوده اطمینان ۹۵ درصد (۲ تا -۲) خارج نشده است، روند مشاهده‌شده نوسان کاهشی یا افزایشی بوده و تغییر نمی‌باشد. ضریب من-کنندال سراب بی‌ابر با ایستگاه اسلام‌آباد غرب حدود ۰/۴۵ در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ و سراب نیلوفر با ایستگاه کرمانشاه حدود ۰/۴۲ در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ و سراب ورمنجه با ایستگاه روانسر حدود ۰/۴۷ در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ می‌باشد.



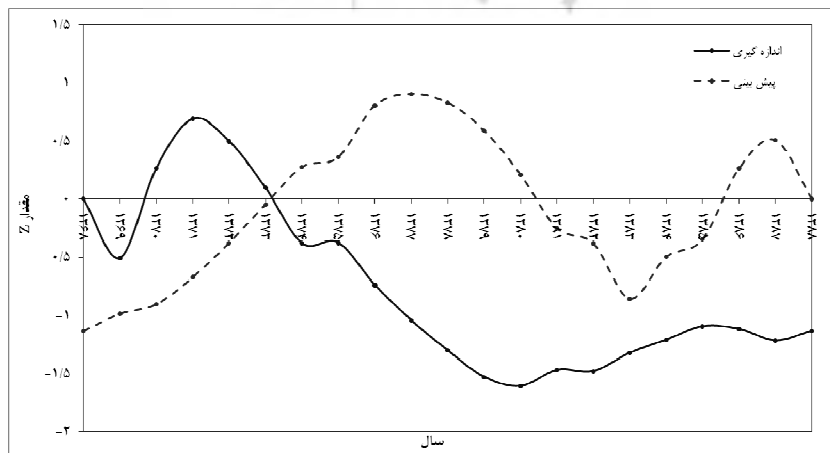
شکل ۴: آزمون من- کندال بارش ایستگاه اسلام‌آباد غرب

دبی سراب بی‌ابر بین سال‌های ۷۶-۱۳۶۸ به دلیل ترسالی بیش از مقدار پیش‌بینی بوده است، اما بین سال‌های ۸۸-۱۳۷۷ به دلیل کاهش بارش، مقدار دبی کمتر از حالت پیش‌بینی بوده است. بیشترین کاهش بارش طی سال ۱۳۸۱ رخ داده که مقدار دبی را نیز به پایین‌ترین حد رسانده است.



شکل ۵: آزمون من- کندال دبی سراب بی‌ابر

مقدار واقعی دبی سراب ورمنجه از سال ۱۳۷۴ تا پایان دوره مطالعاتی از مقدار پیش‌بینی کمتر شده است. در مجموع نوسانات مقدار دبی از مقدار بحرانی (۲ تا -۲) فراتر نرفته است.



شکل ۶: آزمون من- کندال دبی سراب ورمنجه

نتیجه آزمون زنجیره مارکوف برای ۱۲ ماه برای ایستگاه اسلام‌آباد غرب نشان می‌دهد در درجه اول احتمال گذر از خشکی به خشکی و در درجه دوم احتمال گذر از دوره مرطوب به مرطوب وجود دارد (جدول ۳). به عبارت بهتر این امر نشان‌دهنده تکرار دوره‌های خشک‌تر در ایستگاه مورد مطالعه و دبی هر چه کمتر چشمه‌های مرتبط با این ایستگاه در آینده می‌باشد.

جدول ۳: ماتریس احتمال حالات مختلف گذر بر اساس داده‌های بارش ایستگاه اسلام‌آباد غرب

$P(Jan) = \begin{matrix} D & [0.76 & 0.24] \\ W & [0.45 & 0.55] \end{matrix}$	$P(Feb) = \begin{matrix} D & [0.77 & 0.23] \\ W & [0.45 & 0.55] \end{matrix}$	$P(Mar) = \begin{matrix} D & [0.77 & 0.23] \\ W & [0.44 & 0.56] \end{matrix}$
$P(Apr) = \begin{matrix} D & [0.78 & 0.23] \\ W & [0.49 & 0.51] \end{matrix}$	$P(May) = \begin{matrix} D & [0.84 & 0.16] \\ W & [0.52 & 0.48] \end{matrix}$	$P(Jun) = \begin{matrix} D & [0.91 & 0.1] \\ W & [0.48 & 0.53] \end{matrix}$
$P(July) = \begin{matrix} D & [0.91 & 0.09] \\ W & [0.47 & 0.53] \end{matrix}$	$P(Agu) = \begin{matrix} D & [0.91 & 0.09] \\ W & [0.45 & 0.55] \end{matrix}$	$P(Sep) = \begin{matrix} D & [0.91 & 0.09] \\ W & [0.47 & 0.53] \end{matrix}$
$P(Oct) = \begin{matrix} D & [0.86 & 0.14] \\ W & [0.45 & 0.55] \end{matrix}$	$P(Nov) = \begin{matrix} D & [0.81 & 0.19] \\ W & [0.47 & 0.54] \end{matrix}$	$P(Dec) = \begin{matrix} D & [0.8 & 0.21] \\ W & [0.45 & 0.55] \end{matrix}$

D خشکی، W رطوبت

به صورت سالانه در ایستگاه اسلام‌آباد غرب احتمال این که فرایند بارش در یک مرحله از خشک به خشک انتقال یابد برابر با $P_{(D \rightarrow D)} = 0.891$ در صورتی که احتمال در حالت انتقال از حالت خشک به بارانی در یک حالت برابر $P_{(D \rightarrow W)} = 0.11$ است. پس از احتمال حالت خشک به خشک بیشترین احتمال برای چند روز بارش متوالی با ضریب احتمالی $P_{(W \rightarrow W)} = 0.53$ می‌باشد (ماتریس ۱).

$$P = \begin{matrix} D & [0.89 & 0.11] \\ W & [0.47 & 0.53] \end{matrix} \quad (\text{ماتریس ۱})$$

در جدول ۴ نتیجه آزمون زنجیره مارکوف برای ایستگاه روانسر به صورت ماهانه نشان داده شده است. بر این اساس، احتمال خشکی و روزهای بدون بارش از فصل سرد سال به سمت تابستان افزایش می‌یابد. به شکلی که ماه‌های ژوئن، جولای، آگوست و سپتامبر خشک‌ترین ماه‌های سال را نمایش می‌دهد و احتمال بارش تقریباً صفر می‌باشد. این نتایج نشان‌دهنده این مطلب است که مقدار دبی متناسب با احتمال گذر به دوره‌های خشک نیز کاهش می‌یابد.

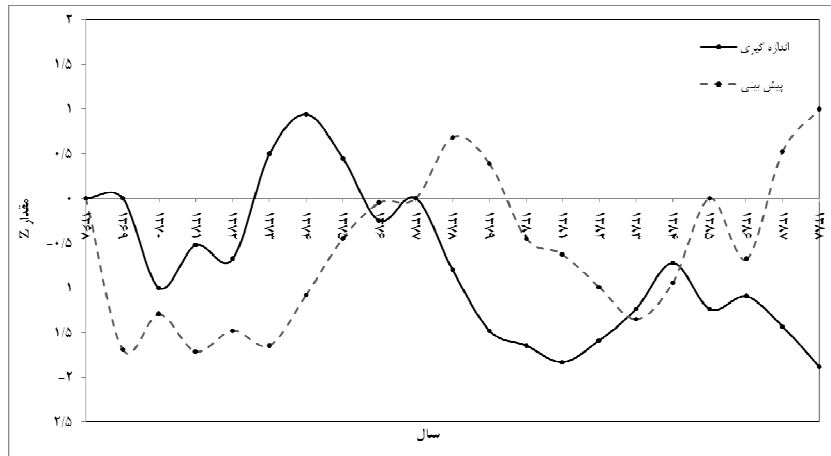
جدول ۴: ماتریس احتمال حالات مختلف گذر بر اساس داده‌های بارش ایستگاه روانسر

$P(Jan) = \begin{matrix} D & [0.76 & 0.24] \\ W & [0.42 & 0.59] \end{matrix}$	$P(Feb) = \begin{matrix} D & [0.74 & 0.26] \\ W & [0.4 & 0.6] \end{matrix}$	$P(Mar) = \begin{matrix} D & [0.78 & 0.2] \\ W & [0.43 & 0.57] \end{matrix}$
$P(Apr) = \begin{matrix} D & [0.78 & 0.22] \\ W & [0.47 & 0.54] \end{matrix}$	$P(May) = \begin{matrix} D & [0.84 & 0.13] \\ W & [0.6 & 0.4] \end{matrix}$	$P(Jun) = \begin{matrix} D & [0.98 & 0.02] \\ W & [0.74 & 0.26] \end{matrix}$
$P(July) = \begin{matrix} D & [0.99 & 0.01] \\ W & [0.88 & 0.13] \end{matrix}$	$P(Agu) = \begin{matrix} D & [0.99 & 0.01] \\ W & [1 & 0] \end{matrix}$	$P(Sep) = \begin{matrix} D & [0.99 & 0.02] \\ W & [0.77 & 0.23] \end{matrix}$
$P(Oct) = \begin{matrix} D & [0.93 & 0.07] \\ W & [0.43 & 0.57] \end{matrix}$	$P(Nov) = \begin{matrix} D & [0.83 & 0.17] \\ W & [0.46 & 0.54] \end{matrix}$	$P(Dec) = \begin{matrix} D & [0.8 & 0.2] \\ W & [0.47 & 0.53] \end{matrix}$

در ایستگاه هواشناسی روانسر به صورت سالانه احتمال این که فرایند بارش در یک مرحله از خشک به خشک انتقال یابد برابر با $P_{(D \rightarrow D)} = 0.89$ در صورتی که احتمال در حالت انتقال از حالت خشک به بارانی در یک حالت برابر $P_{(D \rightarrow W)} = 0.11$ است. پس از احتمال حالت خشک به خشک بیشترین احتمال برای چند روز بارش متوالی با ضریب احتمالی $P_{(W \rightarrow W)} = 0.55$ می‌باشد (ماتریس ۲).

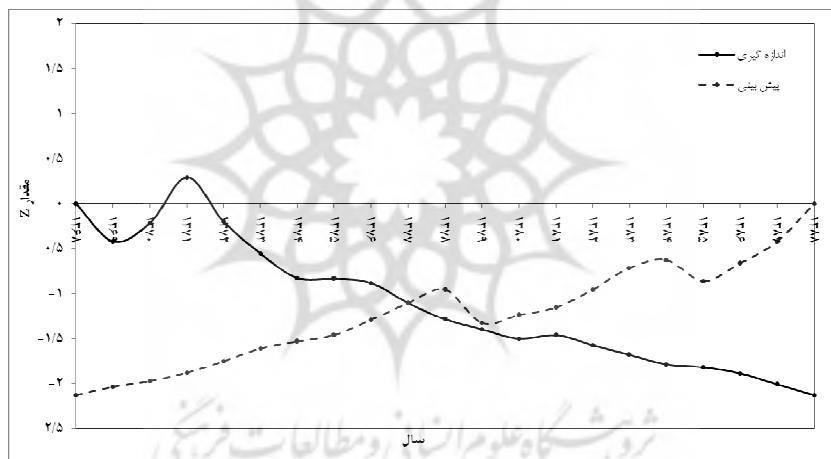
$$P = \begin{matrix} D & [0.89 & 0.11] \\ W & [0.45 & 0.55] \end{matrix} \quad (\text{ماتریس ۲})$$

با توجه به اینکه مقدار همبستگی دبی سراب نیلوفر با بارش ایستگاه کرمانشاه بیشتر بود نتایج آزمون من-کندال باهم بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد بارش طی سال‌های ۷۷-۱۳۶۸ بیش از مقدار پیش‌بینی بوده، اما طی سال‌های ۸۸-۱۳۷۷ از مقدار پیش‌بینی کمتر بوده است. بر اساس آزمون من-کندال از سال ۱۳۸۱ در پارامتر بارش تغییرات بیشتر شده است.



شکل ۷: آزمون من- کندال بارش ایستگاه کرمانشاه

بر اساس آزمون من- کندال مقدار دبی سراب نیلوفر طی سال ۸۸-۱۳۷۷ از مقدار پیش‌بینی کمتر شده است به‌طوری‌که از سال ۱۳۸۷ دچار تغییر (بیش از ۲-) شده است. لازم به ذکر است که بیشترین تغییرات در دبی مربوط به سراب نیلوفر می‌باشد.



شکل ۸: آزمون من- کندال دبی سراب نیلوفر

نتیجه آزمون زنجیره مارکوف به‌صورت ماهانه برای ایستگاه کرمانشاه در درجه اول احتمال گذر از خشکی به خشکی و در درجه دوم احتمال گذر از دوره مرطوب به مرطوب را نشان می‌دهد (جدول ۵). به عبارت بهتر این امر نشان‌دهنده تکرار دوره‌های خشک‌تر در ایستگاه مورد مطالعه و دبی هر چه کمتر سراب نیلوفر در آینده می‌باشد.

جدول ۵: ماتریس احتمال حالات مختلف گذر بر اساس داده‌های بارش ایستگاه کرمانشاه

$P(Jan) = \begin{matrix} D & [0.75 & 0.25] \\ W & [0.48 & 0.52] \end{matrix}$	$P(Feb) = \begin{matrix} D & [0.74 & 0.27] \\ W & [0.47 & 0.53] \end{matrix}$	$P(Mar) = \begin{matrix} D & [0.77 & 0.23] \\ W & [0.45 & 0.56] \end{matrix}$
$P(Apr) = \begin{matrix} D & [0.76 & 0.24] \\ W & [0.53 & 0.48] \end{matrix}$	$P(May) = \begin{matrix} D & [0.87 & 0.13] \\ W & [0.51 & 0.49] \end{matrix}$	$P(Jun) = \begin{matrix} D & [0.98 & 0.02] \\ W & [0.85 & 0.15] \end{matrix}$
$P(July) = \begin{matrix} D & [0.99 & 0.01] \\ W & [0.67 & 0.33] \end{matrix}$	$P(Agu) = \begin{matrix} D & [0.99 & 0.01] \\ W & [1 & 0] \end{matrix}$	$P(Sep) = \begin{matrix} D & [0.99 & 0.01] \\ W & [0.79 & 0.22] \end{matrix}$
$P(Oct) = \begin{matrix} D & [0.92 & 0.08] \\ W & [0.43 & 0.57] \end{matrix}$	$P(Nov) = \begin{matrix} D & [0.83 & 0.17] \\ W & [0.46 & 0.54] \end{matrix}$	$P(Dec) = \begin{matrix} D & [0.8 & 0.2] \\ W & [0.51 & 0.49] \end{matrix}$

در ایستگاه هواشناسی کرمانشاه فرایند احتمال گذر از خشک به خشک برابر با $P(D \rightarrow D) = 0.89$ در صورتی‌که احتمال گذر از حالت خشک به بارانی $P(D \rightarrow W) = 0.12$ است. پس از احتمال حالت خشک به خشک بیشترین احتمال برای

چند روز بارش متوالی با ضریب احتمالی $P(W \rightarrow W) = 0.52$ می‌باشد (ماتریس ۲).
 ماتریس ۲)
$$P = \begin{matrix} D & [0.89 & 0.12] \\ W & [0.48 & 0.52] \end{matrix}$$

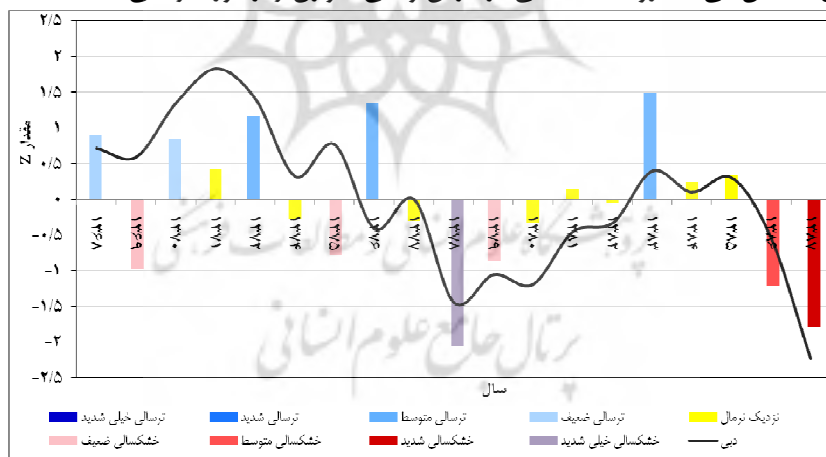
نتایج مقدار تأخیر زمانی بارش (۶ ماهه) و اثر آن بر مقدار دبی به صورت بلندمدت سالیانه در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان داد مقدار بارش ۶ ماه قبل بر مقدار دبی اثرگذار است، برای مثال بارش مهرماه بر دبی فروردین‌ماه اثر بیشتری دارد و به همین ترتیب. بیشترین همبستگی بین بارش فروردین‌ماه و دبی مهرماه وجود دارد و کمترین همبستگی مربوط به بارش ماه‌های مرداد و اسفند و ارتباط آن با دبی بهمن و اسفندماه می‌باشد. لازم به ذکر است که مقدار دبی در کوتاه‌مدت ماهانه با تأخیر دو ماه روبرو بوده است، به‌طوری‌که برای مثال افزایش بارش اردیبهشت‌ماه بر روی دبی تیرماه اثرگذار بوده است. تفاوت تأخیر بلندمدت و کوتاه‌مدت به ویژگی‌های بارش (توزیع روزانه و ماهانه، حالات جامد یا مایع و شدت) برمی‌گردد که احتمالاً دوره مطالعاتی تغییر یافته است.

جدول ۶: اثر تأخیر زمانی بارش ایستگاه‌های مطالعاتی بر مقدار دبی در سراب‌ها

بارش	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
دبی	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
همبستگی	۰/۸۳	۰/۹۹	۰/۱۲	۰/۳	۰/۴۳	۰/۹۵	۱	۰/۹۳	۰/۹۹	۰/۶	۰/۰	۰/۰

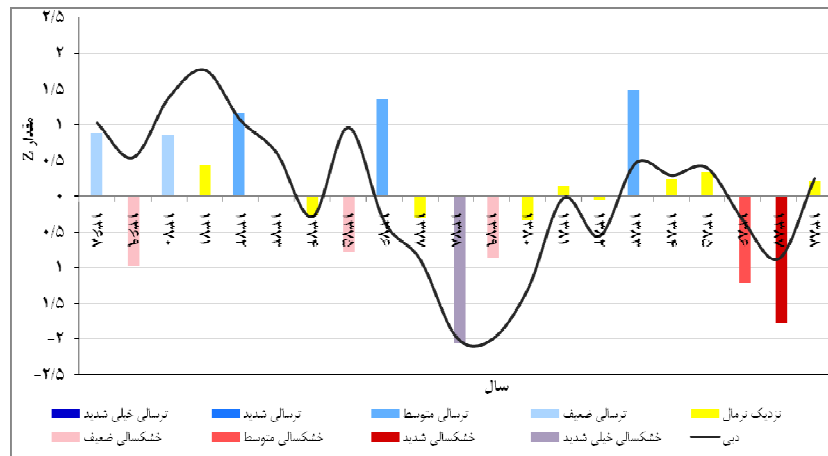
*همبستگی پیرسون در سطح معنی‌داری ۱ درصد می‌باشد

نتایج شاخص بارش استاندارد شده (SPI) برای متغیرهای بارش ایستگاه اسلام‌آباد غرب و دبی سراب بی‌ابر (شکل ۹) نشان می‌دهد که تا سال ۱۳۷۵ مقدار دبی بیش از بارش بوده است و از سال ۱۳۷۸ این حالت برعکس شده است. همچنین شاخص SPI نشان می‌دهد که همراه با نوسان بارش در اغلب موارد چنین روندی در مقدار دبی مشاهده می‌شود که نشان از وابستگی بالای دبی چشمه‌های کارستی به پارامتر بارش است. در دوره مطالعاتی ۲ مورد خشکسالی بسیار شدید مشاهده می‌شود که یکی در سال ۱۳۷۸ و دیگری ۱۳۸۷ که مقدار دبی نیز با همین روند کاهش یافته است. همچنان که شکل ۹ نشان می‌دهد روند خشکسالی در بارش و دبی متوازن‌تر از دوره ترسالی است.

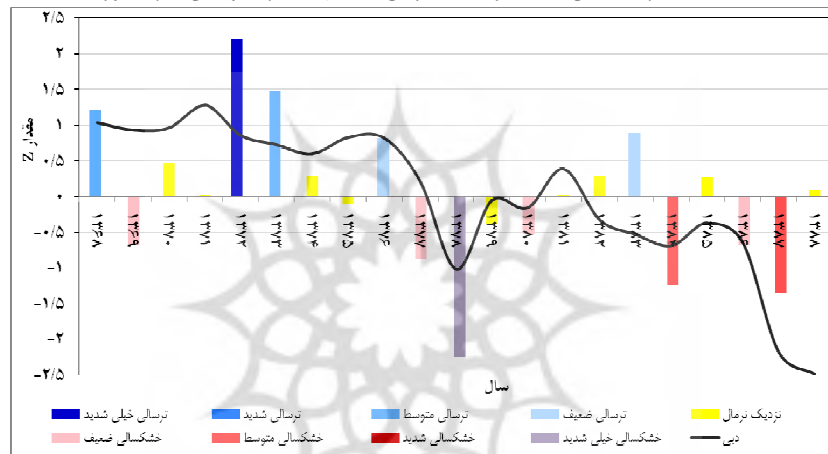


شکل ۹: مقادیر شاخص استاندارد شده بارش اسلام‌آباد غرب و دبی سراب بی‌ابر

نتایج شاخص بارش استاندارد شده (SPI) برای متغیرهای بارش ایستگاه اسلام‌آباد غرب و دبی سراب بی‌ابر (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که یک دوره ترسالی (تا سال ۱۳۷۵) و به‌تبع آن افزایش دبی اتفاق افتاده است، اما با رخداد خشکسالی از سال ۱۳۷۶ تا ۱۳۸۸ مقدار دبی نیاز کاهش چشمگیری داشته است، به‌طوری‌که مقدار دبی از ۵۵۷ لیتر بر ثانیه در سال ۱۳۷۵ به ۱۱۴ لیتر بر ثانیه در سال ۱۳۷۶ کاهش یافته است و در سال ۱۳۷۸ (خشکسالی شدید) به ۲۷ لیتر بر ثانیه رسیده که تا ۱۳۸۱ این کاهش دبی چشمگیر بوده است. مقدار بارش نیز از ۶۳۵ میلی‌متر در سال ۱۳۷۶ به ۲۵۲ میلی‌متر در سال ۱۳۷۸ رسیده است.



شکل ۱۰: مقادیر شاخص استاندارد شده بارش اسلام‌آباد غرب و دبی سراب ورمنجه



شکل ۱۱: مقادیر شاخص استاندارد شده بارش کرمانشاه و دبی سراب نیلوفر

نتایج شاخص بارش استاندارد شده بارش ایستگاه کرمانشاه و دبی سراب نیلوفر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همچنان که ملاحظه می‌گردد در روند خشکسالی بسیار شدید در بارش (۱۳۷۸) مقدار دبی نیز به نحو چشمگیری کاهش داشته است و ارتباط بارش و دبی در خشکسالی‌ها بارزتر است. در مجموع شاخص SPI نشان می‌دهد که در دوره مطالعاتی روند بارش و دبی به سمت کاهش بوده است.

نتیجه‌گیری

آبخوان کارست از منابع آبی عمده به شمار می‌رود که تحت تأثیر نوسانات و ویژگی‌های بارش در کوتاه و بلندمدت قرار می‌گیرد. مطالعه حاضر باهدف بررسی اثر خشکسالی بر روی مقدار دبی و ارتباط دبی با بارش ایستگاهی و همچنین اثر تأخیر زمانی بارش بر تغییرات دبی انجام گرفت. نتایج تحقیق نشان داد بیشترین همبستگی بین دبی سراب ورمنجه (۰/۶۴) و بی‌ابر (۰/۶۴) با بارش ایستگاه هواشناسی اسلام‌آباد غرب وجود دارد، همچنین همبستگی دبی سراب نیلوفر با ایستگاه هواشناسی کرمانشاه (۰/۴۸) بیشتر است. نتایج تأخیر زمانی بلندمدت بارش بر مقدار دبی نشان داد مقدار بارش ۶ ماه قبل بر روی دبی ماه موردنظر اثرگذار است، برای مثال دبی اردیبهشت‌ماه متأثر از بارش آبان می‌باشد. بارش در کوتاه‌مدت ماهانه حدود ۲ ماه بعد بر روی دبی اثرگذار است. دلیل تفاوت در کوتاه و بلندمدت به ویژگی بارش مانند حالت جامد یا توزیع و شدت مربوط می‌شود. نتایج حاصل از آزمون من- کندال نشان داد که مقدار بارش ابتدا افزایش (۷۶-۱۳۶۸) و سپس کاهش (۸۸-۱۳۷۷) داشته است، دبی سراب بی‌ابر نیز همین روند را نشان می‌دهد. بیشترین نوسان کاهشی در دبی سراب بی‌ابر و بارش مربوط به سال ۱۳۸۱ می‌باشد. کاهش دبی سراب ورمنجه از سال ۱۳۷۴ رخ داده

است. بارش در ایستگاه کرمانشاه بین سال‌های ۸۸-۱۳۷۷ روند کاهشی داشته است که همین روند از سال ۱۳۷۷ در دبی سراب نیلوفر مشاهده می‌شود و از سال ۱۳۸۷ دچار تغییر شده و از مقدار بحرانی فراتر رفته است. در مجموع نتایج شاخص SPI سالانه برای دبی و بارش نشان می‌دهد که این شاخص در نشان دادن روندهای کاهشی دبی با خشکسالی بارش بهتر از دوره‌های تر می‌باشد. نتایج آزمون زنجیره مارکوف به صورت سالانه نشان داد در ایستگاه هواشناسی کرمانشاه ابتدا فرایند احتمال رخداد گذر از دوره خشک به خشک $P_{(D \rightarrow D)} = 0.89$ و سپس احتمال چند روز بارش متوالی با ضریب $P_{(W \rightarrow W)} = 0.52$ می‌باشد، در صورتی که احتمال گذر از حالت خشک به بارانی $P_{(D \rightarrow W)} = 0.12$ است. در ایستگاه اسلام‌آباد غرب احتمال گذر از خشک به خشک $P_{(D \rightarrow D)} = 0.89$ ، سپس احتمال چندین روز بارش متوالی $P_{(W \rightarrow W)} = 0.53$ می‌باشد. در ایستگاه هواشناسی روانسر احتمال گذر از دوره خشک به خشک $P_{(D \rightarrow D)} = 0.89$ در صورتی که احتمال در حالت انتقال از حالت خشک به بارانی در یک حالت برابر $P_{(D \rightarrow W)} = 0.11$ است. در مجموع نتایج آزمون مارکوف نشان‌دهنده افزایش احتمال خشکی در ایستگاه‌های مورد مطالعه است که باعث می‌شود در آینده دبی چشمه‌های مورد مطالعه رو به کاهش بگذارد. پیش‌بینی دوره‌های خشکسالی و اثر آن بر دبی چشمه‌های کارستی می‌تواند در برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری بهینه از ذخایر آبخوان کارست مفید فایده باشد.

منابع

- حکیمی‌پور، ابوالقاسم، ۱۳۷۶، **تصمیم‌گیری در مدیریت، کاربرد فرضیه زنجیره‌های مارکوف در تصمیم‌گیری مدیریت**، چاپ اول، انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد.
- خوش‌اخلاق، فرامرزی، باقری سیدشکری، سجاد و طاهر صفرآباد، ۱۳۹۳، **واکاوی تأثیرگذاری خشکسالی‌های شدید بر آبدهی چشمه‌های کارستی استان کرمانشاه (مطالعه موردی: خشکسالی شدید سال ۸۷-۱۳۸۶)**، فضای جغرافیایی، جلد ۱۴، شماره ۴۸ صفحات ۱۹-۱.
- رحمتی، محمد، ۱۳۹۳، **مقایسه اثر خشکسالی هواشناسی بر آبدهی چشمه‌ها در آبخوان‌های کارستی مختلف**، استاد راهنما، حمیدرضا مرادی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- سهرابی، محمدمهدی، معروفی، صفر، سبزی‌پرور، علی‌اکبر و زهره مریانجی، ۱۳۸۸، **بررسی وجود روند در بارش سالانه استان همدان با استفاده از روش من کندال**، مجله پژوهش‌های حفاظت آب‌و خاک، جلد شانزدهم، شماره ۳، صص ۱۶۹-۱۳.
- صادقی‌نیا، علیرضا، حجازی‌زاده، زهرا، حمیدیان‌پور، محسن و راهبه پورسربندان، ۱۳۹۲، **برآورد احتمالات خشکسالی و ترسالی با استفاده از نمایه SPI و مدل زنجیره مارکف مطالعه موردی: تهران**، فصلنامه فضای جغرافیایی، دوره ۱۳، شماره ۴۳، صص ۸۱-۶۵.
- فتوت، مسعود و علی مهربانی، ۱۳۸۶، **بررسی واکنش چشمه کارستی نیلوفر نسبت به تغییر اقلیم‌های اخیر استان کرمانشاه**، کنفرانس منابع آب استان کرمانشاه، ۱۳۸۶ آذر ۲۵.
- لشنی‌زند، مهران و سارا غلامرضائی، ۱۳۹۰، **بررسی رابطه متغیرهای اقلیمی و آبدهی سراب‌های کارستی به منظور مدیریت منابع آب شهری (مطالعه موردی شهر خرم‌آباد)**، فصلنامه آمایش محیط، شماره ۱۵، صص ۷۹-۶۱.
- Alley, W.M., 2001, **Ground water and climate**. *Ground Water*, 39(2), p. 161.
- Chen, Z., Grasby, S.E., and Osadetz, K.G., 2004, **Relation between climate variability and groundwater levels in the upper carbonate aquifer, southern Manitoba**, *Journal of Hydrology*, Vol. 290, pp. 43-62.
- Civita, M., 2005, **Idrogeologia applicata e ambientale: Casa Editrice Ambrosiana, Milano**, p.794.

- Fiorillo, F., 2009. *Spring hydrographs as indicators of droughts in a karst environment*, *Journal of Hydrology*, Vol. 373, pp. 290–301.
- Fiorillo, F., Guadagno, F.M., 2010, *Karst Spring Discharges Analysis in Relation to Drought Periods, Using the SPI*, *Water Resour Manage*, Vol. 24, pp. 1867–1884.
- Ma, T., Wang, Y., and 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, pp. 274–284.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J., 1993, *The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: 8th conference on applied climatology*, Anaheim, CA. American Meteorological Society, Boston, pp 179–184.
- Rui, Z., Chun-qing, G., Qiu-ju, F., and Lin-yan, P., 2012, *Study on the Drought and Flood Disasters Formation Mechanism in Karst Regions of Middle Guangxi*, *Procedia Engineering*, Vol. 28, pp. 277 – 281.
- Waggoner, P. E., 1990, *Climate Change and US Water Resources*, Wiley, New York.
- White, W.B., 2002, *Karst hydrology: recent developments and open questions*, *Eng. Geol.* Vol. 65, pp. 85–105.
- Yan, J.P., Huang, C.C., and Chen, Y., 1999, *Global Environmental Problems across Centuries and Action and Countermeasure*, Science Press, Beijing, pp. 12–136

