

## ارزیابی خشکسالی هیدرو-متئورولوژیکی برپایه شاخص تلفیقی خشکسالی و پیش‌بینی آن با زنجیره مارکوف در حوضه رودخانه سرباز (جنوب شرق ایران)

حمید نظری پور<sup>۱\*</sup>، زهرا کریمی<sup>۲</sup> و مهدی صداقت<sup>۳</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۰۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۰۵)

### چکیده

خشکسالی یک ناهنجاری آب و هوایی است که با کمبود (نبود) بارش و مهبایی منابع آب در پهنه جغرافیایی بزرگ پیوند داشته و در طول دوره قابل توجهی از زمان گسترش می‌یابد که می‌تواند بخش‌های مختلف از زندگی و محیط زیست را متأثر سازد. یکی از روش‌های خیلی رایج در ارزیابی و پایش خشکسالی، محاسبه شاخص‌های خشکسالی می‌باشد. گسترش فضایی و زمانی و شدت (سختی) خشکسالی با استفاده از این شاخص‌ها مشخص می‌گردد. در این بررسی، شاخص تلفیقی خشکسالی (هیدرو-متئورولوژی) برای ارزیابی خشکسالی‌های آب شناختی و هواشناختی حوضه رودخانه سرباز در جنوب شرق ایران استفاده شده است. شاخص تلفیقی خشکسالی به‌طور جامع همه اشکال فیزیکی خشکسالی (هواشناختی، هیدرولوژیکی و کشاورزی) را از طریق انتخاب متغیرهای مرتبط به‌هر نوع خشکسالی شامل می‌شود. در این مورد، ارزش‌های ماهانه شاخص خشکسالی جریان رودخانه‌ای و شاخص بارش استاندارد شده برای چهار دوره مرجع مشابه تحت یک تحلیل مؤلفه مبنا قرار گرفته و براساس مؤلفه نخست آن، شاخص تلفیقی هیدرو-متئورولوژیکی ایجاد شده است. دوره مورد بررسی از سال آبی ۶۱-۱۳۶۰ تا ۹۰-۱۳۸۹ شمسی و سرآغاز سال آبی نیز از ماه مهر تعیین گردیده است. براساس نتایج شاخص تلفیقی خشکسالی، یک دوره بزرگ خشکسالی از سال آبی ۷۹-۱۳۷۸ الی ۸۵-۱۳۸۴ در جنوب شرق ایران حاکم بوده است که شدت آن در سال آبی ۸۳-۱۳۸۲ فوق‌العاده خشک بوده است. روش‌شناسی شاخص تلفیقی خشکسالی، یک رویکرد عینی و واضح برای توصیف شدت خشکسالی فراهم می‌کند. شاخص تلفیقی خشکسالی به‌خوبی قادر به نمایش رفتار خشکسالی‌های هیدرو-متئورولوژیکی محدوده مورد مطالعه بوده و به‌عنوان شاخص ترکیبی برای پایش و ارزیابی خشکسالی منطقه‌ای توصیه می‌گردد. در نهایت، حالت‌های خشکسالی هیدرو-متئورولوژیکی براساس آستانه‌های قراردادی منطقه‌ای استخراج و از طریق زنجیره مارکوف مدل‌سازی شده‌اند که اجازه می‌دهد تا برآورد فراوانی انتقال حالت خشکسالی انجام گیرد و پیش‌بینی حالت خشکسالی آینده در زمان واقعی امکان‌پذیر گردد. ماتریس‌های فراوانی انتقال حالت، ابزارهای اصلی برای پیش‌بینی حالت خشکسالی در زمان واقعی می‌باشند. نتایج اعتبارسنجی و انطباق پیش‌بینی‌ها با واقعیت‌ها بیانگر آن است که پیش‌بینی‌های انتقال حالت‌های خشکسالی آب‌شناختی در حوضه مورد مطالعه به‌روش زنجیره مارکوف دارای اعتبار می‌باشد.

کلمات کلیدی: خشکسالی هیدرو-متئورولوژیکی، شاخص تلفیقی خشکسالی، پیش‌بینی خشکسالی، زنجیره مارکوف، حوضه رودخانه سرباز

۱. گروه محیط زیست، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

۲. گروه اقلیم‌شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۳. گروه جغرافیا، دانشگاه پیام‌نور واحد کرمان

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: h.nazaripour@kgut.ac.ir

## مقدمه

تعاریف متعددی از خشکسالی موجود است اما بسط یک تعریف واحد از خشکسالی مشکل است. خشکسالی یک پدیده منطقه‌ای و یک رویداد سه بعدی با مشخصه‌های شدت، دوام و گستره‌ی فضایی می‌باشد (۳۸). خشکسالی بیش از هر مخاطره دیگر، تأثیر بیشتری بر مردم می‌گذارد، اما با این وجود، در بین تمام مخاطره‌های طبیعی، کمتر قابل درک است (۲۸). شناسایی رویدادهای خشکسالی و ارزیابی شدت آنها با ابزار مناسب، خیلی با اهمیت خواهد بود (۴۴). یکی از روش‌های خیلی رایج در ارزیابی خشکسالی، محاسبه شاخص‌های خشکسالی می‌باشد (۱۳، ۳۴، ۴۶ و ۴۷). گسترش فضایی و زمانی و شدت خشکسالی با استفاده از این شاخص‌ها مشخص می‌گردد (۱۷ و ۱۹). هر رویداد خشکسالی از طریق چهار ویژگی مشخص می‌گردد: (الف) شدت، از طریق شاخص خشکسالی، (ب) زمان آغاز و دوام آن، (ج) گستره فضایی و (د) فراوانی رخداد (۲۹). مرور جامع درباره این شاخص‌ها در مقالات و نشریات خاص یافت می‌گردد. پس از یک مطالعه اصولی از شاخص‌های متنوع به‌کار گرفته شده در شناسایی و ارزیابی سختی خشکسالی، به این نتیجه رسیده شده است که هرچند تمامی این شاخص‌ها مفیدند، اما هیچ‌یک از آنها دارای قابلیت کاربست جهانی نیستند. به این دلیل، در سال‌های اخیر چندین شاخص جدید پایش و ارزیابی خشکسالی ابداع گردیده است. از جمله این شاخص‌ها، شاخص تلفیقی خشکسالی است که برای پایش خشکسالی‌های منطقه‌ای کارآمد بوده است (۲۱).

خشکسالی با مشخصه‌های آغاز، پایان، فراوانی و شدت سبب خطر و فاجعه می‌گردد. خطر، به این دلیل که این خشکسالی یک رویداد طبیعی با رخداد غیرقابل پیش‌بینی اما با بازگشت قابل تشخیص است؛ و فاجعه، به دلیل آنکه مطابق با ناکامی رژیم بارش است که سبب اختلال در عرضه آب به اکوسیستم‌های کشاورزی و طبیعی و همچنین دیگر فعالیت‌های انسانی می‌گردد (۳۴). بنابراین، پیش‌بینی آغاز و پایان خشکسالی بسیار مشکل می‌باشد (۱۴). با این حال،

پیشرفت‌های مهمی در رابطه با امکانات استفاده از الگوهای پیوند از دور به‌عنوان مثال نوسان جنوبی - ال‌نینو (انسو) El Nino Southern Oscillation'ENSO' و نوسان اطلس شمالی 'North Atlantic Oscillation'NAO' (با درجه کمتر) به‌عنوان ابزارهای پیش‌بینی انجام گرفته است (۴۸). برای فهم بهتر خشکسالی، توسعه ابزاری برای پیش‌گویی یا پیش‌بینی آغاز و پایان خشکسالی ضروری است. این ابزار در راستای پیاده‌سازی بهنگام و مناسب اقدامات برای مقابله (یا سازش) با خشکسالی ضروری است. این اقدام به‌ویژه در کشاورزی و به‌طور عمده در آبیاری حائز اهمیت است. حل چنین مشکلاتی نیازمند ابراز پایش و پیش‌بینی مناسب می‌باشد؛ و این بدان معنی است که هشدار خشکسالی امکان‌پذیر می‌گردد (۳۸، ۳۷، ۴۰ و ۴۵). زمان تأخیر کافی، یعنی فاصله زمانی بین انتشار پیش‌بینی و آغاز واقعی خطر پیش‌بینی شده، از صحت پیش‌بینی مهم‌تر است (۱۶). این فاصله زمانی برای تصمیم‌گیران و سیاست‌گذاران این امکان را فراهم می‌نماید تا سیاست‌ها و اقدامات لازم را جهت کاهش اثرات خشکسالی به‌موقع اتخاذ نمایند. چندین ماه زمان برای کشاورزان ضروری است تا امکان جایگزینی تصمیمی مناسب برای مقابله با خشکسالی ایجاد گردد. چنین مشکلاتی تا حدودی به توسعه برخی از نمایه‌های هشدار زودهنگام منجر شده است (۴۰، ۴۵ و ۴۹). محققان با یک چالش برای توسعه پیش‌بینی و مهارت‌های مناسب هشدار دهنده زودهنگام برای شرایط اقلیم و کشاورزی در مناطق مستعد خشکسالی روبه‌رو می‌باشند. در این راستا، مدل‌های خود همبستگی و زنجیره مارکوف از جمله مدل‌های سری زمانی هستند که برای پیش‌بینی احتمالاتی بارندگی و رویدادهای خشکسالی به‌کار می‌روند (۳۴).

روش زنجیره مارکوف یک تکنیک ریاضی جهت مدل‌سازی پدیده‌های تصادفی می‌باشد که توالی مشاهدات را در طول زمان نشان می‌دهد. وابستگی این زنجیره به زمان یا از طریق ضرایب همبستگی سری و یا با استفاده از ماتریس‌های

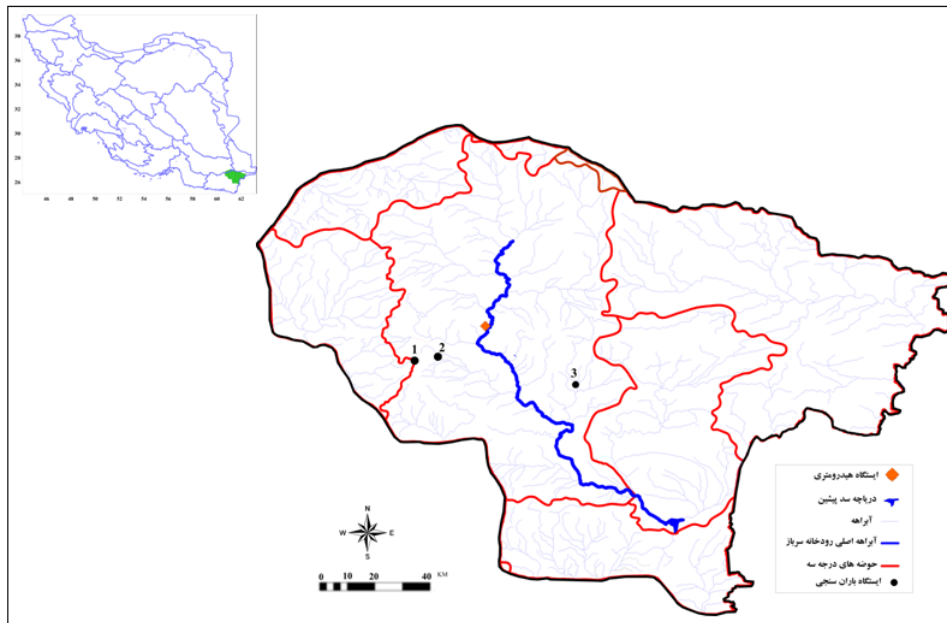
نتایج حاصل از پیش‌بینی‌های یک، دو و سه گام به جلو در گستره ایران نشان داده است که با فرض هر وضعیتی از نظر بارندگی در وضعیت موجود، بسیار محتمل است که در ماه‌های آتی، خشکسالی شدید (۹ درصد) یا وضعیت نرمال (۸۷ درصد) رخ دهد (۵). یوسفی و همکاران (۸) دو روش زنجیره مارکوف و تابع توزیع احتمال را از نظر برآورد احتمال طبقات مختلف خشکسالی براساس بارش‌های سالانه و فصلی مقایسه و به این نتیجه رسیده‌اند که مدل مارکوف تخمین‌های بهتری نسبت به تابع توزیع نرمال ارائه می‌دهد (۸). رجبی و همکاران (۲) رفتار احتمالاتی سری زمانی شاخص بارش استاندارد شده را در استان فارس با استفاده از مدل زنجیره مارکوف شبیه‌سازی و طول مدت خشکسالی را طی یک دوره ۱۰ ساله پیش‌بینی نموده‌اند (۲). با این حال، روش تصادفی ممکن است یک ابزار مفید برای پیش‌بینی خشکسالی باشد.

هدف از این مطالعه شامل دو بخش: (الف) استفاده از یک روش تلفیقی برای ارزیابی خشکسالی هیدرو- متئورولوژیکی بر پایه کمبود جریان رودخانه و بارش، (ب) بررسی امکان پیش‌بینی خشکسالی هیدرو- متئورولوژیکی می‌باشد.

### داده‌ها و روش‌شناسی

محاسبه شاخص تلفیقی خشکسالی (Aggregate Drought Index) نیاز به سری‌زمانی شاخص‌های خشکسالی آب شناختی و هواشناختی دارد. بدین معنی که لازم است ابتدا شاخص‌های خشکسالی آب‌شناختی و هواشناختی برای یک دوره مشابه محاسبه و سپس براساس یک روش‌شناسی بر پایه تحلیل مؤلفه مبنای شاخص تلفیقی خشکسالی ایجاد گردد. برای این منظور، شاخص خشکسالی جریان رودخانه‌ای و شاخص بارش استاندارد شده به‌ترتیب جهت ارزیابی خشکسالی‌های آب‌شناختی و هواشناختی حوضه آبریز رودخانه سرباز در جنوب شرق ایران تعیین گردیده است. ورودی این شاخص‌ها، به‌ترتیب دبی ماهانه رودخانه سرباز در ایستگاه آب‌سنجی پیردان

احتمال انتقال بیان می‌گردد. با کمک این ماتریس‌ها می‌توان وضعیت‌های مختلف را در دوره‌های زمانی آتی با استفاده از سری درازمدت گذشته پیش‌بینی نمود. در این بررسی نیز از ماتریس‌های احتمال انتقال برای بیان وقوع حالت‌های مختلف خشکسالی استفاده می‌گردد. از ضرب مکرر آرایه‌های احتمال در آرایه اولیه، آرایه احتمال تغییر وضعیت آب و هوایی در آینده به‌دست می‌آید که جهت پیش‌بینی وضعیت‌های خشکسالی (یا ترسالی) استفاده می‌گردد (۴). روش زنجیره مارکوف به سری زمانی شاخص پالمر اعمال شده و نشان داده است که ابزار مفید برای هشدار زودهنگام به‌منظور مدیریت خشکسالی می‌باشد (۲۴ و ۲۵). اخیراً، اچولا و کرکیدس (۳۳) از زنجیره مارکوف برای پیش‌بینی دوره‌های خشک استفاده نموده‌اند. استینمن (۴۲) با استفاده از مدل مارکوف چندحالتی برخی از نمایه‌های خشکسالی را مورد بررسی قرار داده است. احتمال وقوع و یا گسترش خشکسالی در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از مدل زنجیره مارکوف مرتبه اول مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی نشان داده است که احتمال ماندن در تله خشکسالی در نواحی مرکزی استان بیش از ۷۰ درصد و در نواحی شرقی کمتر از ۵۰ درصد است. همچنین با توجه به احتمال تعادل خشکسالی، بخش‌های مرکزی استان در ۳۰ درصد مواقع در خشکسالی به سر می‌برد و از این بابت نسبت به سایر بخش‌های استان در وضعیت آسیب پذیرتری قرار دارد (۳). روند تغییرات شدت خشکسالی در جنوب پرتغال با استفاده از مدل‌های سری زمانی و زنجیره مارکوف به‌وسیله پائلو و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است (۳۵). پایش وضعیت خشکسالی هواشناسی در گستره ایران بر مبنای شاخص بارش استاندارد شده در مقیاس زمانی ۶ ماه توسط قمقامی و بذرافشان (۵) انجام شده است. در این بررسی برای پیش‌بینی وضعیت خشکسالی تا سه ماه آینده، از مدل زنجیره مارکوف مرتبه نخست استفاده شده است. نتایج آزمون در گستره ایران نشان داده است که مدل مارکوف توانایی شبیه‌سازی رفتار احتمالاتی خشکسالی را دارا می‌باشد.



شکل ۱. موقعیت حوضه آبریز رودخانه سرباز در جنوب شرق ایران.

موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی با دایره و ایستگاه آب‌سنجی با مربع نشان داده شده است. ایستگاه‌های باران‌سنجی به ترتیب ۱. اسپتکی ۲. آشار ۳. سرگورزبرنگ نام دارند.

سال آبی  $t$  ام طبق معادلات زیر قابل محاسبه است (۳۰).

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{rk} Q_{i,j} \quad i=1,2,\dots,N \quad j=1,2,\dots,12 \quad k=1,2,3,4 \quad [1]$$

در این جا،  $V_{i,k}$  دبی رودخانه برای سال آبی  $t$  ام و دوره مرجع  $k$  ام می‌باشد. شروع سال آبی مبنای دوره مرجع‌ها می‌باشد. برای اقلیم ایران سال آبی از اول پاییز آغاز می‌گردد (۵۲).

بنابراین،  $k=1$  مهر تا آذر،  $k=2$  مهر تا اسفند،  $k=3$  مهر تا خرداد و  $k=4$  مهر تا شهریور می‌باشد. در اینجا فاصله دوره مرجع‌ها ۳ ماه می‌باشد. لازم به ذکر است که شروع سال آبی می‌تواند متفاوت از ماه مهر بوده و فاصله دوره‌های مرجع‌ها نیز متفاوت از ۳ باشد. ولیکن بایستی دوره‌های مرجع همپوشانی داشته باشند. براساس حجم تجمعی دبی رودخانه  $V_{i,k}$ ، شاخص خشکسالی جریان رودخانه برای هر دوره مرجع  $k$  از هر سال آبی  $i$  به طریق زیر برآورد می‌گردد:

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{S_k} \quad i=1,2,\dots,N \quad k=1,2,3,4 \quad [2]$$

و ارتفاع بارش ماهانه در ایستگاه باران‌سنجی سرباز می‌باشد (شکل ۱). دوره پایه مشترک برای ایجاد شاخص تلفیقی خشکسالی دوره آبی ۶۱-۱۳۶۰ الی ۹۰-۱۳۸۹ (۳۰ سال) شمسی براساس موجودیت مطلوب آمار می‌باشد. سرآغاز سال آبی نیز از مهر تعیین گردیده است.

روش‌شناسی محاسبه شاخص خشکسالی جریان رودخانه‌ای (خشکسالی آب‌شناختی) و شاخص بارش استاندارد شده (خشکسالی هواشناختی) و چگونگی تلفیق آنها برای ایجاد شاخص خشکسالی تلفیقی (هیدرولوژیکی-هواشناسی) و پیش‌بینی حالت‌های خشکسالی تلفیقی به ترتیب در زیر تشریح شده است.

#### خشکسالی آب‌شناختی برپایه شاخص خشکسالی جریان رودخانه

چنانچه سری زمانی (به عنوان مثال ماهانه) از دبی رودخانه  $Q_{i,j}$  برای سال‌های آبی (هیدرولوژیکی) موجود باشد، شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی جریان رودخانه‌ای برای ماه  $t$  ام از

جدول ۱. تعریف حالت‌های خشکسالی آب شناختی با شاخص جریان رودخانه‌ای (۳۰)

ملاک	تشریح
$SDI \geq 0/0$	بدون خشکسالی
$-1/0 \leq SDI < 0/0$	خشکسالی خفیف
$-1/5 \leq SDI < -1/0$	خشکسالی متوسط
$-2/0 \leq SDI < -1/5$	خشکسالی شدید
$SDI < -2/0$	خشکسالی فوق‌العاده شدید

این شاخص توسط (۲۶) ایجاد گردیده است، به‌طور گسترده در امریکا (۲۰)، آسیا (۲۷)، افریقا (۳۲ و ۳۹) و اروپا (۱۳، ۱۵، ۲۳، ۳۴، ۳۵ و ۴۴) استفاده شده است.

در این مطالعه، شاخص بارش استاندارد شده به شیوه کامل مشابه با شاخص خشکسالی جریان رودخانه‌ای (که در زیربخش ۲-۱ تشریح شده است) اصلاح شده است. فرض بر این است که یک سری زمانی ماهانه از بارش ناحیه‌ای  $P_{i,j}$  موجود است که در آن  $i$  بیانگر سال هیدرولوژیکی و  $j$  ماه در آن سال هیدرولوژیکی می‌باشد. بر اساس این سری‌ها، دنباله‌های زیر مشتق شده است (۲۹).

$$R_{i,k} = \sum_{j=1}^{12} P_{i,j} \quad i=1,2,\dots, \quad j=1,2,\dots,12 \quad k=1,2,3,4 \quad [5]$$

در اینجا،  $R_{i,k}$  عمق بارش تجمعی برای دوره مرجع  $k$  ام از سال هیدرولوژیکی  $i$  ام می‌باشد و دوره‌های مرجع نیز قبلاً در زیربخش ۲-۱ تشریح شده است. بنابراین، شاخص اصلاح شده بارش استاندارد شده به شرح زیر محاسبه می‌گردد (۲۹).

$$SPI_{i,k} = \frac{R_{i,k} - \bar{R}_k}{S_{R,k}} \quad i=1,2,\dots, \quad k=1,2,3,4 \quad [6]$$

در این جا،  $\bar{R}_k$  و  $S_{R,k}$  به ترتیب میانگین و انحراف عمق بارش تجمعی برای دوره مرجع  $k$  ام می‌باشد که این آماره‌ها برای دوره زمانی طولانی برآورد می‌گردد (۲۹).

برای حذف چولگی از بارش تجمعی، شاخص اصلاح شده بارش استاندارد شده را می‌توان با معادل آن به شرح زیر

در این جا  $\bar{v}_k$  و  $s_k$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار از حجم تجمعی دبی رودخانه دوره مرجع  $k$  می‌باشند که براساس دوره طولانی مدت برآورد می‌گردند.

به‌طورکلی، برای حوضه‌های آبی کوچک، جریان رودخانه ممکن است از توزیع احتمال نامتوازن پیروی کند که به‌خوبی می‌تواند با استفاده از خانواده توابع توزیع گاما تقریب زده شود. سپس، توزیع به نرمال تبدیل می‌گردد. در این بررسی، از پارامترهای توزیع لگاریتم طبیعی برای نرمال نمودن استفاده می‌گردد. بنابراین، کافی است لگاریتم طبیعی برای حجم دبی رودخانه در نظر گرفته شود. بر این اساس، شاخص خشکسالی جریان رودخانه تعریف می‌گردد:

$$SDI_{i,k} = \frac{y_{i,k} - \bar{y}_k}{S_{y,k}} \quad i=1,2,\dots,N \quad k=1,2,3,4 \quad [3]$$

در این جا

$$y_{i,k} = \ln(V_{i,k}) \quad i=1,2,\dots,N \quad k=1,2,3,4 \quad [4]$$

بر این اساس، حالت‌های خشکسالی آب شناختی تعریف می‌گردند (جدول ۱) که با حالت‌های شاخص‌های خشکسالی هواشناختی مانند بارش استاندارد شده (۲۰)، شاخص شناسایی خشکسالی (۵۳) و شاخص خشکسالی مؤثر همانند می‌باشد (۲۹).

#### خشکسالی هواشناختی برپایه شاخص بارش استاندارد شده

شاخص بارش استاندارد شده (SPI) به‌طور گسترده برای شناسایی و پیش‌خشکسالی‌های هواشناختی استفاده شده است.

جدول ۲. تعریف حالت‌های خشکسالی هوا شناختی با شاخص بارش استاندارد شده

ملاک	تشریح حالت
$SPI \geq 2/0$	ترسالی فوق‌العاده شدید
$1/5 \leq SPI < 2/0$	ترسالی شدید
$1/0 \leq SPI < 1/5$	ترسالی متوسط
$-1/0 \leq SPI < 1/0$	نزدیک نرمال
$-1/5 \leq SPI < -1/0$	خشکسالی متوسط
$-2/0 \leq SPI < -1/5$	خشکسالی شدید
$SPI < -2/0$	خشکسالی فوق‌العاده شدید

تعریف کرد.

$$SPI_{i,k} = \frac{w_{i,k} - \bar{w}_k}{s_{w,k}} \quad i=1,2,\dots, \quad k=1,2,3,4 \quad [7]$$

در این جا

$$w_{i,k} = \ln(R_{i,k}) \quad i=1,2,\dots, \quad k=1,2,3,4 \quad [8]$$

که  $w_{i,k}$  برازش لگارتیم طبیعی از بارش تجمعی برای دوره مرجع  $k$  ام از سال هیدرولوژیکی  $i$  ام می‌باشد و  $\bar{w}_k$  و  $s_{w,k}$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار آنها می‌باشند که این آماره‌ها برای دوره زمانی طولانی برآورد می‌گردد.

ارزش‌های مثبت از SPI بیانگر شرایط ترسالی و ارزش‌های منفی دلالت بر خشکسالی هواشناختی دارند. تعریف حالت‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

### خشکسالی هیدرو-متئورولوژیکی برپایه شاخص تلفیقی خشکسالی

شاخص خشکسالی تلفیقی به‌وسیله کیانتش و دراکوپ در سال ۲۰۰۴ توسعه یافته و شاخص خشکسالی چندمتغیره برای بررسی مقدار حجم آب در رژیم‌های هواشناختی، آب شناختی و کشاورزی می‌باشد (۲۱). این شاخص با استفاده از تحلیل مؤلفه مبنا به‌دست می‌آید (۳۱). تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی (۲۲) مهم‌ترین روش آماری چند متغیره رایج بوده و تقریباً در تمام رشته‌های علمی استفاده می‌شود. تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی، مشاهدات یک جدول داده را تحلیل می‌نماید که توسط

چندین متغیر هم بسته تشریح می‌گردد. جدول داده که به‌وسیله تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی تحلیل می‌گردد شامل  $I$  مشاهدات که به‌وسیله  $J$  متغیر تشریح شده است و در ماتریس  $X$  به‌وسیله  $I \times J$  نشان داده می‌شود، که عنصر عمومی  $x_{i,j}$  می‌باشد. ماتریس  $X$  دارای رتبه  $L$  می‌باشد که  $L \leq \min\{I, J\}$  است. به‌طور کلی جدول داده‌ها قبل از تجزیه و تحلیل، پیش پردازش می‌گردد. تقریباً همیشه، ستون‌های  $X$  مرکزی خواهد بود به گونه‌ای که میانگین هر ستون برابر صفر است (به‌عنوان مثال،  $X^T \mathbf{1} = \mathbf{0}$ ، که در آن صفر یک  $J$  به‌وسیله یک بردار از صفرها و یک به‌وسیله یک بردار از یک‌ها می‌باشد). اگر علاوه بر این، هر عنصر از  $X$  به‌وسیله  $\sqrt{I}$  (یا  $\sqrt{I-1}$ ) تفکیک شده باشد، تجزیه و تحلیل به مؤلفه اصلی کواریانس اشاره دارد به دلیل این‌که، در این مورد ماتریس  $X^T X$  یک ماتریس کواریانس است. علاوه بر مرکزی نمودن، هنگامی که متغیرها با یک‌های متفاوت اندازه‌گیری شده باشند، استانداردسازی هر متغیر به واحد هنجار مرسوم است. استانداردسازی با تقسیم هر متغیر به‌وسیله نرمال آن به‌دست می‌آید. در این مورد، تجزیه و تحلیل اشاره به مؤلفه اصلی همبستگی دارد به این دلیل که، ماتریس  $X^T X$  یک ماتریس همبستگی است. ماتریس  $X$  دارای ارزش واحد تجزیه به‌شرح زیر است (۱۰، ۱۱، ۴۳):

$$X = P \Lambda Q^T \quad [9]$$

در این جا  $P$  ماتریس  $I \times L$  از بردارهای واحد چپ،  $Q$  ماتریس  $J \times L$  از بردارهای واحد راست، و  $\Lambda$  ماتریس قطری

ممکن است. بنابراین این مؤلفه بخش بزرگی از اینرسی جدول داده را تشریح خواهد کرد. ارزش‌های این متغیرهای جدید برای مشاهدات، نمرات عامل‌ها نامیده می‌شود و این نمرات عامل‌ها را می‌توان به صورت هندسی به عنوان پیش‌بینی مشاهدات بر روی مؤلفه‌های اصلی تفسیر نمود.

در تحلیل مؤلفه اصلی، مؤلفه‌ها از طریق تجزیه ارزش واحد از جدول داده‌ها  $X$  به دست می‌آیند. به ویژه، با  $X = PAQ^T$  (رجوع شود به رابطه ۹)، ماتریس  $I \times L$  از نمرات عامل‌ها، با  $F$  مشخص شده، به شکل زیر به دست آمده است:

$$F = PA. \quad [13]$$

ماتریس  $Q$  ضرایبی از ترکیبات خطی را ارائه می‌دهد که برای محاسبه نمرات عامل‌ها استفاده شده است. این ماتریس می‌تواند همچنین به عنوان ماتریس پیش‌بینی تعبیر گردد، به این دلیل که با ضرب  $X$  با  $Q$  ارزش‌های از پیش‌بینی مشاهدات در مؤلفه‌های اصلی ارائه می‌گردد. این را می‌توان با ترکیب معادلات ۹ تا ۱۳ به شکل زیر نشان داد:

$$F = PA = PAQ^T Q = XQ. \quad [14]$$

مؤلفه‌ها همچنین می‌توانند به صورت هندسی با چرخش محورهای اصلی نشان داده شوند. برای نمونه، اگر  $X$  نشانگر دو متغیر (به عنوان مثال،  $Y$  و  $W$ ) باشد، آنگاه تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی این داده با دو عامل متعامد نشان داده می‌شود. در این زمینه، ماتریس  $Q$  به عنوان یک ماتریس کوسینوس جهت تعبیر می‌گردد (زیرا متعامد  $Q$  است). ماتریس  $Q$  نیز همچنین یک ماتریس بارها نامیده می‌شود. در این زمینه، ماتریس  $X$  می‌تواند به عنوان محصولی از ماتریس نمرات عامل‌ها با ماتریس بارها به شکل زیر تعبیر گردد:

$$X = FQ^T \text{ with } F^T F = \Delta^2 \text{ and } Q^T Q = I. \quad [14]$$

این تجزیه اغلب تجزیه دو خطی از  $X$  نامیده می‌شود (رجوع شود به عنوان مثال به منبع (۱۶)).

در راستای بهره‌گیری از تحلیل مؤلفه اصلی جهت توسعه شاخص تلفیقی خشکسالی، در بین حالت‌های تحلیل مؤلفه

از ارزش‌های واحد است. باید توجه داشت که  $\Delta^2$  برابر است با  $\Lambda$  که ماتریس قطری از مقادیر ویژه (غیرصفر) از  $X^T X$  و  $XX^T$  است.

اینرسی یک ستون به عنوان مجموع عناصر مربع از این ستون تعریف و به شکل زیر محاسبه شده است:

$$\gamma_j^2 = \sum_j x_{i,j}^2 \quad [10]$$

مجموع همه  $\gamma_j^2$  با  $I$  و آنرا اینرسی جدول داده یا اینرسی کل می‌نامند. لازم به ذکر است که اینرسی کل نیز همچنین برابر با مجموع ارزش‌های واحد مربع از جدول داده است.

مرکز ثقل ردیف‌ها (نیز همچنین مرکزی شده نامیده می‌شود (۹ و ۱۲))، با  $g$  مشخص شده است، که بردار میانگین‌های از هر ستون  $X$  است. هنگامی که  $X$  مرکزی شده است، مرکز ثقل آن برابر با  $1 \times J$  بردار ردیف  $0^T$ .

فاصله (اقلیدسی) از مشاهدات  $i$ ام به  $g$  برابر است با:

$$d_{i,g}^2 = \sum_j (x_{i,j} - g_j)^2 \quad [11]$$

هنگامی که داده‌ها مرکزی شده باشند رابطه فوق به شکل زیر تعدیل می‌یابد:

$$d_{i,g}^2 = \sum_j x_{i,j}^2 \quad [12]$$

لازم به ذکر است که مجموع تمام  $d_{i,g}^2$  برابر است با  $I$  که اینرسی جدول داده است.

هدف از اجرای یک تحلیل مؤلفه مبنا عبارت است از: (۱) استخراج اطلاعات مهم از جدول داده‌ها (۲) فشرده‌سازی و کاهش حجم مجموعه داده‌ها با حفظ تنها اطلاعات مهم (۳) ساده‌سازی توصیف مجموعه داده‌ها و (۴) تجزیه و تحلیل ساختار مشاهدات و متغیرها.

برای دستیابی به این اهداف، تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی متغیرهای جدیدی را محاسبه می‌نماید که مؤلفه‌های اصلی نامیده می‌شود و از ترکیبات خطی متغیرهای اصلی به دست می‌آیند. مؤلفه اصلی نخست ملزم به داشتن بزرگترین پراش

جدول ۳. حالت‌های خشکسالی (هیدرو-متئورولوژیکی) براساس شاخص تلفیقی خشکسالی

ملاک	تشریح حالت خشکسالی	حالت خشکسالی
$16^{th} \text{ percentile} < ADI < 84^{th} \text{ percentile}$	شرایط نزدیک به نرمال (بدون خشکسالی)	۰
$7^{th} \text{ percentile} < ADI < 16^{th} \text{ percentile}$	خشکسالی متوسط	۱
$3^{rd} \text{ percentile} < ADI < 7^{th} \text{ percentile}$	خشکسالی شدید	۲
$ADI < 3^{rd} \text{ percentile}$	خشکسالی بسیار شدید	۳

$$ADI = \frac{Z_{e_i}}{\sigma} \quad [18]$$

در این جا،  $Z$  ماتریس استاندارد شده متغیرهای اولیه،  $e$  بردار ویژه مؤلفه نخست و  $\sigma$  انحراف معیار مؤلفه نخست می‌باشد. لازم به ذکر است که چنانچه مؤلفه دوم یا سایر مؤلفه‌ها مقدار زیادی از پراش داده‌ها را تبیین نمایند می‌توان آنها را نیز در تولید شاخص تلفیقی استفاده نمود (۶ و ۷). حالت‌های خشکسالی هیدرو-متئورولوژیکی براساس آستانه‌های قراردادی بر پایه صدک‌ها تعریف می‌گردد. از این نظر می‌توان شاخص مزبور را یک شاخص خشکسالی هیدرو-متئورولوژیکی منطقه‌ای قلمداد نمود.

#### پیش‌بینی انتقال حالت‌های خشکسالی هیدرو-متئورولوژیکی با زنجیره مارکوف

محاسبه شاخص تلفیقی خشکسالی هیدرو-متئورولوژیکی بیان‌گر یک سری از حالت‌های خشکسالی می‌باشد (جدول ۳). در این جا، فرض اساسی بر این است که فرایندها دارای ساختار زنجیره مارکوف نایستا می‌باشند. زنجیره مارکوف به‌طور گسترده برای پیش‌بینی خشکسالی‌ها (عمدتاً هواشناختی) استفاده شده است (۲۴، ۲۵، ۳۳ و ۳۴).

چنانچه سری‌های از حالت‌های خشکسالی هیدرو-متئورولوژیکی  $X_{i,k}$  ( $i = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, 3, 4$ ) برطبق جدول ۳ موجود باشند، برای هر  $k$ ، فرایندهای حالت مرتبط  $X_{i,k}$  دارای ارزش‌های مجزا  $m \in [0, 1, 2, 3]$  می‌باشد. در گام چهارم، فراوانی بروز هر حالت  $m$  در هر دوره مرجع  $k$  که  $F_{m,k}$  می‌باشد برآورد می‌گردد.

اصلی، به‌ویژه از حالت  $P$  استفاده می‌گردد (۵۱). در این حالت، نوسانات زمانی از متغیرهای ورودی در مکان ثابت توصیف و تحلیل می‌گردد.

محاسبه اجزای اصلی نیازمند ساخت یک مربع  $(P \times P)$  که  $P$  تعداد متغیرهاست، متقارن، در تشریح ارتباط بین داده‌های اصلی می‌باشد که ماتریس همبستگی ( $R$ ) نام دارد (۱۸، ۳۶ و ۵۰). معادله شاخص  $ADI$  به‌شکل زیر است.

$$Z = XE \quad [16]$$

در این جا،  $Z$  ماتریس  $n \times p$  از مؤلفه‌های اصلی،  $X$  ماتریس  $n \times p$  از داده استاندارد شده و  $E$  ماتریس  $p \times p$  از بردارهای ویژه و  $n$  تعداد مشاهدات می‌باشد. جزئیات بیشتر درباره تحلیل مؤلفه مبنا در منبع (۱) موجود است.  $ADI$  به‌عنوان مؤلفه اصلی در نظر گرفته می‌شود و بر طبق معادله (۲) و به‌وسیله انحراف معیار، نرمال می‌گردد.

$$ADI_{i,k} = \frac{Z_{i,1,k}}{\sigma} \quad [17]$$

در این جا؛  $ADI_{i,k}$  ارزش  $ADI$  برای دوره مرجع  $k$  ام در سال  $i$  ام و  $Z_{i,1,k}$  مؤلفه اصلی نخست در طول سال  $i$  ام برای دوره مرجع  $k$  ام و  $\sigma$  انحراف معیار ساده از  $Z_{i,1,k}$  برای تمام سال‌های  $i$  می‌باشد.

مؤلفه‌ها ترکیب خطی متغیرهای اولیه بوده و بردار ویژه سبب پیشینه شدن پراش توجیه شده توسط مؤلفه نخست می‌گردد. بنابراین، شاخص تلفیقی خشکسالی از مؤلفه اول پدید می‌آید. زیرا مؤلفه نخست، بخش بزرگی از پراش را تشریح می‌نماید. بر این اساس، با یک تعدیل در معادله (۳) می‌توان شاخص تلفیقی خشکسالی را به صورت زیر نوشت (۲۱):



رودخانه سرباز و سری میانگین فضایی (ناحیه‌ای) بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی محدوده مورد مطالعه (شکل ۱) به ترتیب برای برآورد شاخص‌های خشکسالی آب‌شناختی و هواشناختی مورد استفاده قرار گرفته است. آهنگ زمانی این دو متغیر آب-هواشناختی در شکل ۳ نشان داده شده است. براساس ضریب چسبندگی (۲۹) در جدول ۴ شاخص جریان رودخانه‌ای (خشکسالی آب‌شناختی) و شاخص بارش مؤثر (خشکسالی هواشناختی) به ترتیب با استفاده از معادله ۳ و ۷ محاسبه شده است. بر طبق این آزمون (۴۱) حدودهای بحرانی بالا از ارزش مطلق ضریب چسبندگی برابر ۰/۹۸۶ و ۰/۶۶۲ به ترتیب در ۰/۰۲ و ۰/۱۰ سطح معنی‌داری می‌باشد (۷). بنابراین، برازش لگارتیم برای تمام دوره‌های مرجع هر دو شاخص خشکسالی آب‌شناختی و هواشناختی در حوضه رودخانه سرباز لازم می‌باشد.

سری‌های زمانی شاخص‌های خشکسالی آب‌شناختی و هواشناختی برای دوره‌های مرجع چهارگانه (در زیر قسمت ۲-۱ توضیح داده شده است) به عنوان ورودی به یک تحلیل مؤلفه مبنا جهت تولید شاخص تلفیقی خشکسالی (هیدرو متئورولوژیکی) استفاده شده است. برای این منظور از خروجی شاخص خشکسالی آب‌شناختی و هواشناختی در یک آرایه استاندارد شده و با آرایش  $P_{3 \times 4}$  (۵۲) استفاده شده است. بر طبق شکل ۲، آرایه داده‌ها با حالت  $P_{3 \times 4}$  که سطرهای آن بیانگر زمان (سال‌آبی) و ستون‌ها بیانگر پارامتر (نمایه‌های خشکسالی) می‌باشد، تهیه گردیده است. این آرایه، اساس تجزیه و تحلیل مؤلفه مبنا جهت توسعه شاخص تلفیقی خشکسالی می‌باشد (شکل ۴).

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، محاسبه اجزای اصلی تحلیل مؤلفه مبنا نیازمند تولید یک ماتریس مربع متقارن در تشریح ارتباط بین داده‌های اصلی می‌باشد که ماتریس همبستگی نام دارد. هراندازه همبستگی میان متغیرهای اولیه بیشتر باشد، تعداد مؤلفه‌ها کمتر و برعکس خواهد بود. همان‌گونه که انتظار می‌رود وابستگی جریان رودخانه‌ای به بارش سبب افزایش

$$F_{m,k} = \frac{n_{m,k}}{N} \quad [19]$$

که  $F_{m,k}$  تعداد رخداد حالت  $m$  در دوره مرجع  $k$  در درون نمونه موجود از  $N$  سال آبی است. این برآوردی از احتمال نهایی  $P_{m,k}$  از بروز حالت  $m$  در دوره مرجع  $k$  می‌باشد.

$$P_{m,k} = P(X_{i,k} = m) \quad m \in [0, 1, 2, 3] \forall i \quad [20]$$

در این جا،  $P(\cdot)$  بیانگر احتمال است. برای هر  $k$ ، احتمالات  $P_{m,k}$  ( $m = 0, 1, 2, 3$ ) از یک  $4 \times 1$  بردار ستونی  $p_k$  می‌باشد. در گام پنجم، فراوانی انتقال حالت  $F_{m,m',k}$  از حالت  $m$  در دوره مرجع  $k$  به حالت  $m'$  در دوره مرجع  $k+1$  از طریق زیر به دست می‌آید.

$$F_{m,m',k} = \frac{n_{m,m',k}}{\sum_{m'} n_{m,m',k}} \quad [21]$$

در این جا،  $n_{m,m',k}$  تعداد رخداد حالت  $m$  در دوره مرجع  $k$  و حالت  $m'$  در دوره مرجع  $k+1$  است. این برآوردی از احتمال انتقال  $P_{m,m',k}$  است که به شرح زیر تعریف می‌گردد.

$$P_{m,m',k} = P(X_{i,k+1} = m' | X_{i,k} = m) \quad m \in [0, 1, 2, 3] \\ m' \in [0, 1, 2, 3] \forall i \quad [22]$$

در این جا،  $P(\cdot | \cdot)$  بیانگر احتمال شرطی است. برای هر  $k$ ، احتمالات انتقال از یک ماتریس  $4 \times 4$  است که به عنوان  $p_k$  مشخص می‌گردد.

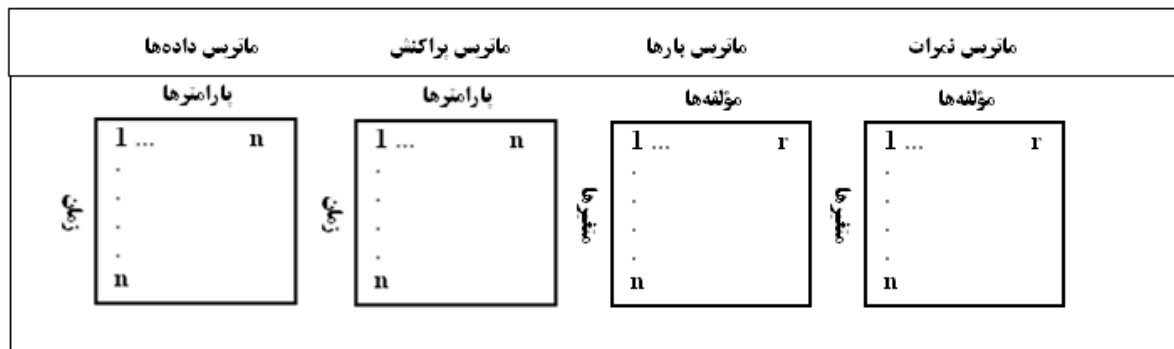
اکنون فرض می‌گردد که فاصله زمانی جاری  $(i, k)$  است. قبل از مشخص نمودن حالت خشکسالی جاری، می‌توان احتمالات نهایی برای دوره مرجع بعدی  $k+1$  را به صورت زیر پیش‌بینی کرد (۲۹).

$$P_{k+1} = P_k P_k \quad [22]$$

در موقعیت‌های واقعی، خروجی این معادله (الف) یک مقدار واحد از حالت جاری و (ب) احتمالات برای حالت‌های آینده خشکسالی می‌باشد که از طریق یک ماتریس ذخیره شده از احتمال انتقال حالت به دست آمده است.

## یافته‌ها و بحث

سری ماهانه دبی ایستگاه هیدرومتری پیردان واقع بر روی

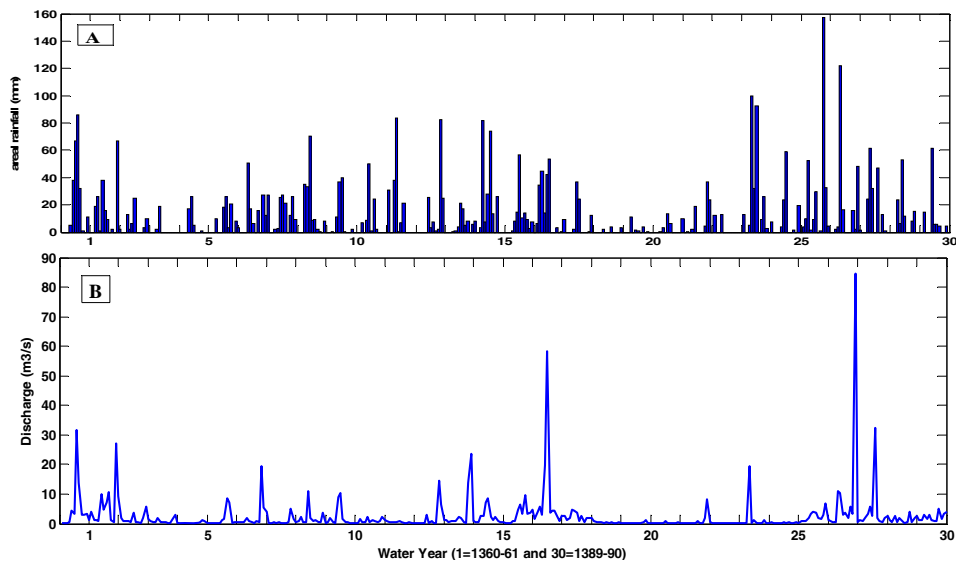


شکل ۲. آرایه داده‌ها، پراکنش، بارها و نمرات در حالت حالت P از تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی

جدول ۴. ضریب چولگی برای جریان رودخانه‌ای تجمعی و برازش لگاریتم طبیعی به آن

متغیر	اساس برآورد	دوره مرجع اول ( $K_1$ )	دوره مرجع دوم ( $K_2$ )	دوره مرجع سوم ( $K_3$ )	دوره مرجع چهارم ( $K_4$ )
جریان رودخانه‌ای	داده اولیه	۲/۵۵	۵/۹۶	۳/۶۱	۲/۹۱
	برازش لگاریتم طبیعی	-۰/۰۶	۰/۱۰	۰/۰۱	-۰/۱۴
بارش ناحیه‌ای	داده اولیه	۳/۳۳	۲/۰۵	۲/۱۲	۳/۴۳
	برازش لگاریتم طبیعی	-۰/۰۳۱	-۰/۲۷۶	-۰/۲۳۴	-۰/۲۲
	داده‌نهایی	-۰/۰۳۱	-۰/۲۷۶	-۰/۲۳۴	-۰/۲۲

ارزش‌های معنی‌دار آماری در سطح ۰/۱۰ احتمال ایتالیک شده‌اند.



شکل ۳. بارش ناحیه‌ای حوضه مورد مطالعه (شکل A) ودبی ماهانه رودخانه سرباز در ایستگاه هیدرومتری

پیردان (شکل B) در دوره آبی ۶۱-۱۳۶۰ الی ۹۰-۱۳۸۹

Variables (Drought Indices)

	SPI <sub>k1</sub>	SPI <sub>k2</sub>	SPI <sub>k3</sub>	SPI <sub>k4</sub>	SDI <sub>k1</sub>	SDI <sub>k2</sub>	SDI <sub>k3</sub>	SDI <sub>k4</sub>
1360-61	-1.12	-0.89	0.20	0.32	-0.79	-0.36	0.17	0.34
.	1.92	1.28	0.78	0.76	1.62	1.11	0.99	0.92
.	1.85	1.12	0.65	0.45	1.03	0.65	0.33	0.26
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	0.32	0.67	0.77	0.87	0.29	0.7	0.72	0.78
.	0.95	0.54	0.69	0.76	0.75	0.66	0.79	0.75
1389-90	0.81	0.63	0.44	0.31	0.7	0.43	0.27	0.18

شکل ۴. ماتریس داده‌ها با حالت P جهت ورود به تجزیه و تحلیل مؤلفه مینا

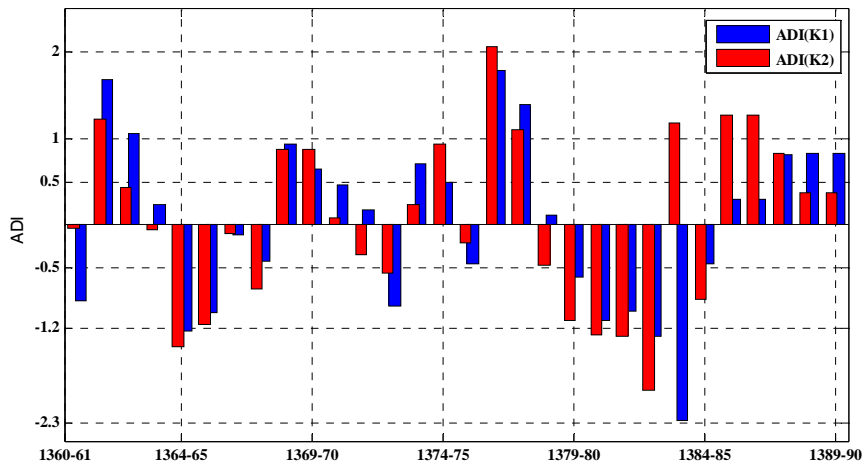
$$R = \frac{1}{29} X^T X = \begin{matrix} SPI_{K1} \\ SPI_{K2} \\ SPI_{K3} \\ SPI_{K4} \\ SDI_{K1} \\ SDI_{K2} \\ SDI_{K3} \\ SDI_{K4} \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 0.76 & 0.65 & 0.61 & 0.93 & 0.72 & 0.64 & 0.57 \\ & 1 & 0.76 & 0.77 & 0.53 & 0.98 & 0.87 & 0.69 \\ & & 1 & 0.87 & 0.65 & 0.68 & 0.96 & 0.88 \\ & & & 1 & 0.55 & 0.62 & 0.76 & 0.94 \\ & & & & 1 & 0.66 & 0.76 & 0.77 \\ & & & & & 1 & 0.87 & 0.83 \\ & & & & & & 1 & 0.87 \\ & & & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

شکل ۵. ماتریس مربع متقارن همبستگی با آرایش جهت تشریح ارتباط بین داده‌های اصلی

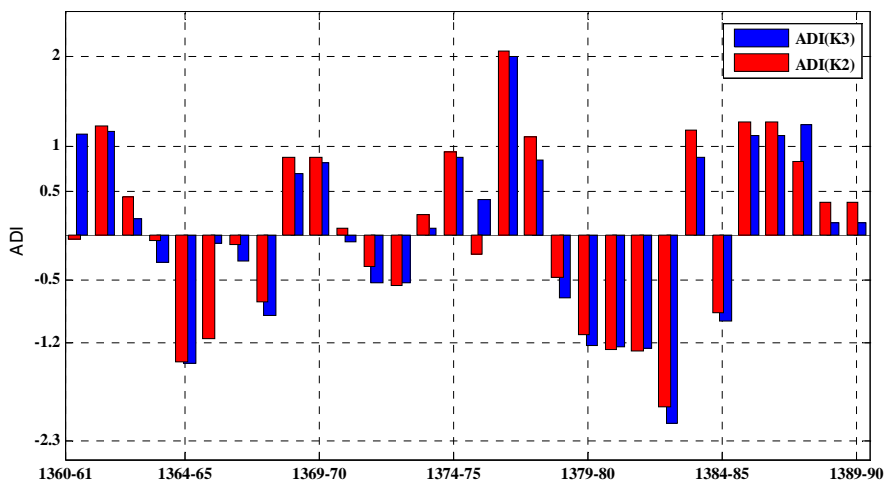
بر اساس معادله (۱۷) استفاده می‌گردد (۲۱). روابط ۱۵ الی ۱۷ مراحل محاسبه شاخص نشان می‌دهند. در این بررسی، مؤلفه نخست حاصل از تحلیل مؤلفه مینا، ۸۹ درصد پراش متغیرهای اولیه را توجیه و به‌عنوان عامل اصلی پراش داده‌ها شناخته می‌شود (جدول ۵). ارتباط متغیرهای اولیه با مؤلفه از طریق بررسی ضرایب متغیرها روی مؤلفه و ضریب همبستگی بین متغیرهای اولیه و مؤلفه‌ها شناسایی می‌گردد. در این‌جا، ضرایب متغیرها روی مؤلفه نخست که همان بردار ویژه مؤلفه نخست می‌باشد به‌همراه ضرایب همبستگی متغیرهای اولیه و مؤلفه نخست در جدول (۶) ارائه شده است. این ضرایب، سهم هر یک را متغیرها را در مؤلفه نخست نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که وزن متغیرهای خشکسالی هواشناختی بر روی مؤلفه نخست بیشتر از متغیرهای خشکسالی آب شناختی می‌باشد.

همبستگی میان متغیرهای اولیه (شاخص‌های خشکسالی هواشناختی و آب‌شناختی) می‌گردد. به‌طور متوسط سری‌های زمانی خشکسالی هواشناختی با سری‌های زمانی مشابه از خشکسالی آب‌شناختی دارای همبستگی بالای ۰/۸۶ می‌باشند. بنابراین، انتظار می‌رود تعداد مؤلفه‌های کمتری پراش حاصل از داده‌های اولیه را توجیه نمایند (شکل ۵). خروجی یک تحلیل مؤلفه مینا، سه آرایه خواهد بود (۱). آرایه بردار ویژه (e) مهم‌ترین آرایه محسوب می‌گردد. زیرا حامل ضرایبی است که حاصل ضرب آنها در متغیرهای اولیه (مرکزی شده)، مؤلفه‌ها را پدید می‌آورد و دارای خاصیتی است که پراش مؤلفه‌ها را بیشینه می‌نماید. پراش مؤلفه‌ها همیشه پایگانی می‌باشد. از آنجا که پراش مؤلفه‌ها پایگانی می‌باشد، در برآورد شاخص تلفیقی خشکسالی از مؤلفه نخست

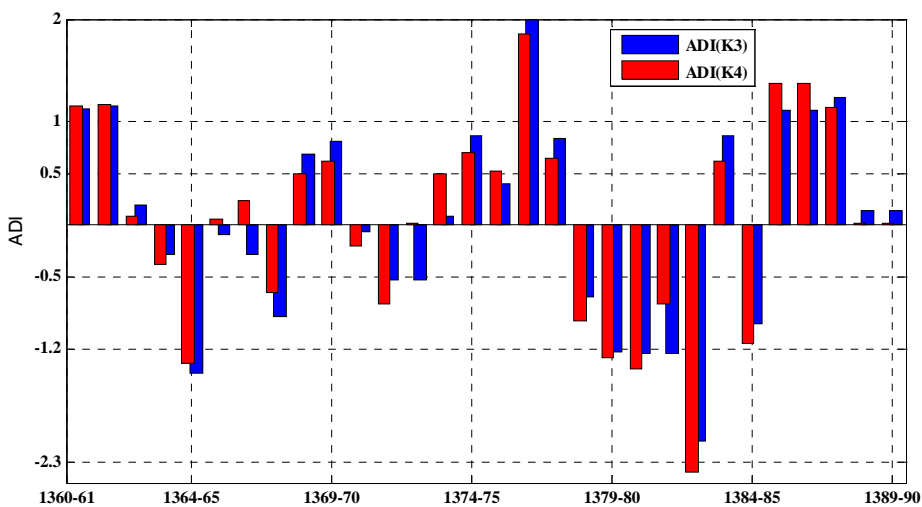




شکل ۷. سری زمانی شاخص خشکسالی تلفیقی (هیدرو-متئورولوژیکی) برای دوره مرجع مهر تا آذر ( $K_1$ ) و مهر تا اسفند ( $K_2$ )



شکل ۸. سری زمانی شاخص خشکسالی تلفیقی (هیدرو-متئورولوژیکی) برای دوره مرجع مهر تا اسفند ( $K_2$ ) و مهر تا خرداد ( $K_3$ )



شکل ۹. سری زمانی شاخص خشکسالی تلفیقی (هیدرو-متئورولوژیکی) برای دوره مرجع مهر تا خرداد ( $K_3$ ) و مهر تا شهریور ( $K_4$ )

جدول ۷. فراوانی انتقال حالت خشکسالی تلفیقی (هیدرو- متئورولوژیکی) بر اساس شاخص تلفیقی خشکسالی در حوضه رودخانه سرباز

حالت خشکسالی مهر تا آذر $K_1$	حالت خشکسالی مهر تا اسفند $K_2$		
	۰	۱	۲
۰	۰/۷۳۳	۰/۲۶۷	۰/۰۰۰
۱	۰/۲۲۲	۰/۵۵۶	۰/۲۲۲
۲	۰/۲۵۰	۰/۴۰۰	۰/۷۵۰

حالت خشکسالی مهر تا اسفند $K_2$	حالت خشکسالی مهر تا خرداد $K_3$		
	۰	۱	۲
۰	۰/۹۲۹	۰/۰۷۱	۰/۰۰۰
۱	۰/۱۱۰	۰/۸۸۹	۰/۰۰۰
۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰

حالت خشکسالی مهر تا خرداد $K_3$	حالت خشکسالی مهر تا شهریور $K_4$		
	۰	۱	۲
۰	۰/۹۲۹	۰/۰۷۱	۰/۰۰۰
۱	۰/۳۳۳	۰/۴۴۴	۰/۲۲۲
۲	۰/۰۰۰	۰/۲۰۰	۰/۸۰۰

۰ بدون خشکسالی؛ ۱ خشکسالی متوسط؛ ۲ خشکسالی شدید و بسیار شدید

توجه بین حالت‌های متفاوت را نشان می‌دهد هنگامی که دوره با  $K_1$  آغاز می‌گردد. هنگام گذر به سایر دوره‌های آغاز، فراوانی انتقال حالت تمایل به یک ارزش نزدیک به عدد یک تثبیت شده هنگام باقی ماندن در همان حالت (حالت مشابه) و تمایل به عدد صفر برای تمام تغییرات حالت را دارا می‌باشد. به بیان دیگر، ماتریس مربوطه گرایش به ماتریس واحد را دارد.

### نتیجه‌گیری

اهداف این بررسی، کاربرد یک روش‌شناسی برای تولید شاخص تلفیقی خشکسالی (خشکسالی‌های هیدرو متئورولوژیکی) و پیش‌بینی حالت‌های خشکسالی‌های در درون حوضه آبریز رودخانه سرباز در جنوب شرق ایران بود. این روش‌شناسی بر پایه نمایه پیشنهاد شده که شاخص تلفیقی خشکسالی نامیده می‌شود، قرار دارد که برای دوره‌های مرجع با پوشش مشترک در درون هر سال آبی محاسبه شده است. این روش‌شناسی بر پایه تحلیل مؤلفه مبنا قرار دارد. ورودی‌های این شاخص شامل ارزش‌های شاخص خشکسالی آب‌شناختی

(د) فراوان‌ترین حالت‌های خشکسالی هیدرو- متئورولوژیکی در منطقه مورد مطالعه به ترتیب حالت‌های ۰، ۱، ۲ و ۳ می‌باشد.

فراوانی حالت‌های خشکسالی آب‌شناختی بر طبق جدول ۳ و براساس آستانه قراردادی خشکسالی تلفیقی محاسبه گردیده است. بر طبق فراوانی حالت‌های خشکسالی، تعداد خیلی ناچیز از رخداد حالت‌های ۲ (خشکسالی شدید) و ۳ (خشکسالی فوق‌العاده شدید) موجود است. برای جبران این مشکل، حالت‌های دوگانه فوق در یک حالت (حالت ۲) متمرکز گردیدند. ماتریس‌های فراوانی انتقال حالت، ابزارهای اصلی برای پیش‌بینی حالت خشکسالی در زمان واقعی می‌باشند.

در جدول ۷ ماتریس‌های فراوانی انتقال حالت برای تمام جفت دوره‌های مرجع (سه جفت) هنگامی که از یک دوره مرجع به دوره مرجع طولانی‌تری بعدی عبور می‌شود، نشان داده شده است. این ماتریس‌ها، ابزار اصلی برای پیش‌بینی حالت خشکسالی در زمان واقعی در مورد موجود بودن داده‌های جریان رودخانه‌ای می‌باشند. در حوضه رودخانه سرباز، فراوانی انتقال حالت‌های خشکسالی یک پراکندگی معنی‌دار و قابل

محاسبه شاخص تلفیقی خشکسالی هیدرومتئورولوژیکی بیانگر یک سری از حالت‌های خشکسالی برای دوره مرجع‌های یکسان می‌باشد که امکان بررسی احتمالات انتقال حالت‌های خشکسالی و همچنین پیش‌بینی حالت آتی خشکسالی را از طریق زنجیره مارکوف مقدور می‌نماید. بیشینه فراوانی حالت‌های خشکسالی هیدرومتئورولوژیکی در منطقه مورد مطالعه به ترتیب به حالت‌های ۵، ۱، ۲ و ۳ اختصاص دارد. حالت‌های خشکسالی فوق‌العاده شدید و شدید در منطقه مورد مطالعه نادر بوده و یک رویداد فرین تلقی می‌گردند. فراوانی انتقال حالت‌های خشکسالی هیدرومتئورولوژیکی در منطقه مورد مطالعه برای تمام جفت دوره‌های مرجع (سه جفت) هنگامی که از یک دوره مرجع به دوره طولانی‌تر بعدی عبور می‌شود، بررسی شده است. این ماتریس‌ها، ابزار اصلی برای پیش‌بینی حالت خشکسالی در زمان واقعی در مورد موجود بودن داده‌های جریان رودخانه‌ای می‌باشند. در حوضه مورد مطالعه، هنگامی که دوره مرجع پایه دوره نخست قرار دارد فراوانی انتقال حالت‌های خشکسالی یک پراکندگی معنی‌دار و قابل توجه بین حالت‌های متفاوت را نشان می‌دهد. هنگام گذر به سایر دوره‌های پایه، فراوانی انتقال حالت تمایل به یک ارزش نزدیک به عدد یک تثبیت شده هنگام باقی ماندن در همان حالت (حالت مشابه) و تمایل به عدد صفر برای تمام تغییرات حالت را دارا می‌باشد. به بیان دیگر، ماتریس مربوطه گرایش به ماتریس واحد را دارد. به‌طور کلی، ماتریس فراوانی انتقال حالت می‌تواند یک ابزار مفید باشد که امکان ظرفیت پیش‌بینی بالا از خشکسالی را فراهم نماید، به‌ویژه هنگامی که رژیم‌های بارش و جریان رودخانه در درون هر سال آبی تغییر می‌نماید.

(جریان رودخانه‌ای) و شاخص خشکسالی هواشناختی (بارش استاندارد شده) می‌باشد. در حقیقت، این روش شناسی، امکان دسته‌بندی حالت‌های خشکسالی را با ویژگی‌های منطقه‌ای امکان‌پذیر می‌سازد و از این لحاظ یک شاخص منطقه‌ای خشکسالی قلمداد می‌گردد. در نهایت، حالت‌های خشکسالی تلفیقی از طریق زنجیره مارکوف مدل سازی شده‌اند که اجازه می‌دهد تا برآورد فراوانی انتقال حالت خشکسالی انجام گیرد و پیش‌بینی حالت خشکسالی آینده در زمان واقعی امکان‌پذیر گردد.

نتایج تحلیل‌ها بر پایه شاخص تلفیقی خشکسالی هیدرو-متئورولوژیکی سه دوره خشکسالی مهم در حوضه رودخانه سرپاز را آشکار می‌سازد که به ترتیب عبارتند از: الف) ۱۳۷۸-۷۹ الی ۱۳۸۴-۸۵ (ب) ۱۳۶۳-۶۴ الی ۱۳۶۷-۶۸ (ج) ۱۳۷۲-۷۳ الی ۱۳۷۱-۱۳۷۲. دوام خشکسالی همراه با سختی آن در دوره ۷۸-۷۹ الی ۸۴-۸۵ بیشتر از دو دوره دیگر بوده است. در منطقه مورد مطالعه، دوره بزرگ خشکسالی هیدرومتئورولوژی از سال آبی ۱۳۷۸-۷۹ الی ۱۳۸۴-۸۵ حاکم که شدت آن در سال آبی ۱۳۸۲-۸۳ بیشینه بوده است. به دلیل شرایط اقلیمی منطقه، زمان پاسخ فرآیندهای آب‌شناختی (جریان رودخانه) به هواشناختی (بارش) کوتاه بوده و این امر در همانندی دوره مرجع‌های متناظر شاخص خشکسالی جریان رودخانه‌ای و بارش استاندارد شده مشهود است. تفاوت آشکار بین ویژگی‌های خشکسالی هیدرومتئورولوژی دوره مرجع نخست (سه ماه اول ساه آبی) با سایر دوره‌های مرجع وجود دارد که به دلیل وابستگی جریان رودخانه به سال آبی قبل و آغاز دیر هنگام بارش فصل آبی جدید می‌باشد. سهم چشمگیر رژیم تابستانی بارش در برقراری جریان رودخانه سبب همانندی حالت و شدت خشکسالی هیدرومتئورولوژیکی در دوره مرجع‌های ۲، ۳ و ۴ در منطقه مورد مطالعه گردیده است.

## منابع مورد استفاده

۱. خسروی، م. ح. نظری پور. ۱۳۹۱. مطالعه هم‌دید تیپ‌های هوای غالب منطقه سیستان (ایستگاه زابل). مجله ی پژوهش‌های

جغرافیای طبیعی ۳(۸۱): ۶۲-۳۹.

۲. رجیبی، م.، ح. مرادی، م. فرج زاده و ج. بذرافشان. ۱۳۸۶. شبیه‌سازی رفتار احتمالی سری زمانی شاخص بارش استاندارد شده (SPI) با مدل زنجیره مارکف برای هشدار خشکسالی‌های استان فارس، نشریه دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران ۶۰(۴): ۱۱۷۰-۱۱۵۷.
۳. رضیعی، ط.، پ. دانش کار آراسته، ر. اختری و ب. ثقفیان. ۱۳۸۶. بررسی خشکسالی‌های هواشناسی در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از نمایه SPI و مدل زنجیره مارکف، مجله تحقیقات منابع آب ایران ۳(۱): ۳۵-۲۵.
۴. علیزاده، ا. و ش. آشگر طوسی. ۱۳۸۷. توسعه یک مدل برای پایش و ارزیابی خشکسالی (مطالعه موردی استان خراسان رضوی)، مجله ی علوم و صنایع کشاورزی ۲۲(۱): ۲۳۴-۲۲۳.
۵. قمقماقی، م. و ج. بذرافشان. ۱۳۹۱. پیش‌آگاهی وضعیت خشکسالی هواشناسی در گستره ایران با استفاده از مدل زنجیره مارکف، مجله ی حفاظت منابع آب و خاک ۳(۱): ۱۲-۱.
۶. نظری پور، ح. ۱۳۹۲. بررسی کارایی شاخص‌های خشکسالی در پایش و ارزیابی خشکسالی استان فارس و تولید شاخص تلفیقی بر اساس تحلیل مؤلفه اصلی. دومین کنفرانس بین‌المللی مخاطرات محیطی. دانشگاه خوارزمی، ۷ تا ۸ آبان ۱۳۹۲.
۷. نظری پور، ح.، ن. بابائی. ۱۳۹۳. ارزیابی سختی خشکسالی‌های آب‌شناختی برپایه شاخص رواناب استاندارد شده و پیش‌بینی آن با زنجیره مارکوف در حوضه آبریز کویر لوت. دومین کنگره بین‌المللی علوم کشاورزی و محیط زیست. دانشگاه شهیدبهبشتی. ۱۶ اسفند ۱۳۹۳.
۸. یوسفی، ن.، س. حجاج و پ. ایران‌نژاد. ۱۳۸۶. برآورد احتمالاتی خشکسالی و ترسالی با استفاده از زنجیره مارکف و توزیع نرمال (مطالعه موردی: قزوین)، مجله پژوهش‌های جغرافیایی ۶۰(۳۹): ۱۲۸-۱۲۱.
9. Abdi, H. 2009. Centroids. *J. Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics* 1(2): 259-260.
10. Abdi, H. 2007. Singular value decomposition (SVD) and generalized singular value decomposition (GSVD). PP. 907-912. *In: Salkind, N. J. (Ed.), Encyclopedia of measurement and statistics. Thousand Oaks (CA): Sage.*
11. Abdi, H. 2007. Eigen-decomposition: eigenvalue and eigenvectors. PP. 304-308. *In: Salkind, N. J. (Ed.), Encyclopedia of measurement and statistics. Thousand Oaks (CA): Sage.*
12. Abdi, H. and L. J. Williams. 2010. Principal component analysis. *Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics* 2(4): 433-459.
13. Bonaccorso, B., I. Bordi, A. Cancelliere, G. Rossi and A. Sutera. 2003. Spatial variability of drought: an analysis of the SPI in Sicily. *J. Water. Res. Mana.* 17(4): 273-296.
14. Cordery, I. and M. McCall. 2000. A model for forecasting drought from teleconnections. *J. Water. Res. Rese.* 36(3): 763-768.
15. Domonkos, P. 2003. Recent precipitation trends in Hungary in the context of larger scale climatic changes. *J. Nat. Haz.* 29(2): 255-271.
16. Easterling, W. E. 1989. Coping with drought hazard: recent progress and research priorities. PP. 231-270. *In: Siccardi F., Bras, R. L. (Ed.), Natural disasters in european mediterranean countries. US national science foundation and national research council of Italy, Perugia.*
17. Guttman, N. B. 1998. Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 34(1): 113-121.
18. Haan, C. T. 1977. *Statistical Methods in Hydrology.* 378 p., Iowa State Univ. Press, Ames.
19. Hayes, M. J. 2000. Revisiting the SPI: clarifying the process. *drought network news, A newsletter of the international drought information center and the national drought mitigation center* 12/1 (Winter 1999–Spring 2000), 13-15.
20. Hayes, M. J., M. D. Svoboda, D. A. Wilhite and O.V. Vanyarkho. 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society* 80(3): 429-438.
21. Keyantash, J. A., and J. A. Dracup. 2004. An aggregate drought index: Assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage. *J. Water. Res. Rese.* 40(9): 1-13.
22. Kruskal, J. B. 1978. Factor analysis and principal component analysis: Bilinear methods. PP. 307-330. *In: Kruskal,*



- W. H., Tannur, J. M. (Ed.), International encyclopedia of statistics. New York: The Free Press.
23. Lloyd-Hughes, B. and M. A. Saunders. 2002. A drought climatology for Europe. *Int. J. Climato.* 22(13): 1571-1592.
  24. Lohani, V. K., G. V. Loganathan and S. Mostaghimi. 1998. Long-term analysis and short-term forecasting of dry spells by the Palmer drought severity index. *J. Hyd. Res.* 29(1) :21-40.
  25. Lohani, V. K. and G. V. Loganathan. 1997. An early warning system for drought management using the Palmer drought index. *J. Am. Water. Resour. Assoc.* 33(6):1375-1386.
  26. McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In proceedings of the 8<sup>th</sup> conference on applied climatology. 17-22 January, USA.
  27. Min, S. K., W. T. Kwon, E. Park and Y. Choi. 2003. Spatial and temporal comparisons of droughts over Korea with East Asia. *Int. J. Climato.* 23(2): 223-233.
  28. Mishra, A. K. and V. R. Desai. 2005. Drought forecasting using stochastic models. *J. Stoch. Environ. Res. Risk. Assess.* 19(5): 326-339.
  29. Nalbantis, I. 2008. Evaluation of a hydrological drought index. *J. Eur. Water.* 23(24): 67-77.
  30. Nalbantis, I. and G. Tsakiris. 2009. Assessment of hydrological drought revisited. *J. Water. Resour. Manage.* 23(5): 881-897.
  31. Norouzi, A., A. Nohegar and A. Ghorbani. 2012. Comparison of the suitability of standardized precipitation index (SPI) and aggregated drought index (ADI) in Minab Watershed (Hormozgan Province/South of Iran). *Afr. J. Agric. Res.* 7(44): 5905-5911.
  32. Ntale, H. K. and T. Y. Gan. 2003. Drought indices and their application to East Africa. *Int. J. Climato.* 23(11): 1335-1357.
  33. Ochola, W. O. and P. Kerkides. 2003. A markov chain simulation model for predicting critical wet and dry spells in Kenia: Analysing rainfall events in the Kano plains. *J. Irrig. Drain.* 52(4): 327-342.
  34. Paulo, A. A. and L. S. Pereira. 2006. Drought concepts and characterization: comparing drought indices applied at local and regional scales. *J. Water. Int.* 31(1): 37-49.
  35. Paulo, A. A., L. S. Pereira and P. G. Matias. 2003. Analysis of local and regional droughts in southern Portugal using the theory of runs and the Standardised Precipitation Index. PP. 55-78. *In: Rossi, G., Cancelliere, A., Pereira, L. S., Oweis, T., Shatanawi, M., Zairi, A. (Eds.), Tools for drought mitigation in mediterranean regions, Kluwer, Dordrecht.*
  36. Preisendorfer, R. W. 1988. Principal component analysis in meteorology and oceanography. 444p. *In: Mobley, C. D (Ed.), Elsevier.*
  37. Rossi, G. 2003. Requisites for a drought watch system. PP. 147-157. *In: Rossi, G., Cabcelliere, A., Pereira, L. S., Oweis, T., Shatanawi, M. and Zairi, A. (Eds.), Tools for drought mitigation in mediterranean regions, Kluwer academic publishers, Dordrecht.*
  38. Rossi, G., M. Benedini, G. Tsakiris and S. Giakoumakis. 1992. On regional drought estimation and analysis. *J. Water. Resour. Manage.* 6(4): 249-277.
  39. Rouault, M. and Y. Richard. 2003. Intensity and spatial extension of drought in South Africa at different time scales. *J. Water. SA.* 29(4): 489-500.
  40. Sivakumar, M. V. K. and D. A. Wilhite. 2002. Drought preparedness and drought management. In International conference on drought mitigation and prevention of land desertification, 21-25 April, Bled, Slovenia.
  41. Snedecor, G. W., W. G. Cochran. 1967. Statistical methods. 6<sup>th</sup> ed. AMES, IA: The Iowa University Press.
  42. Steinemann, A. 2003. Drought indicators and triggers: a stochastic approach to evaluation. *J. Am. Water. Resour. Assoc.* 39(5):1217-1233.
  43. Takane, Y. 2003. Relationships among various kinds of eigenvalue and singular value decompositions. PP. 45-56. *In: Yanai, H., Okada, A. Shigemasu, K. Kano, Y. and Meulman, J. J. (Eds.), New developments in psychometrics, Springer. Japan.*
  44. Tigkas, d. 2008. Drought Identification in Greek Regions. In the Prpceeding of the International Symposium: Water Shortage Management. PP. 121-131. *In: Tsakiris G.(Ed.), 20 June, Athens-Greece.*
  45. Tsakiris, G. and H. Vangelis. 2004. Towards a drought watch system based on spatial SPI. *J. Water. Resour. Manage.* 18(1): 1-12.
  46. Tsakiris, G., D. Pangalou, D. Tigkas and H. Vangelis. 2007b. Assessing the areal extent of drought. PP. 14-16. *In: Karatzas, G. et al. (Eds.), Proceedings of EWRA symposium "Water resources management: new approaches and technologies", Chania, Crete-Greece.*
  47. Tsakiris, G., D. Tigkas, H. Vangelis and D. Pangalou. 2007a. Regional drought identification and assessment. Case study in Crete. PP. 169-191. *In: Rossi et al. (Eds.), Methods and tools for drought analysis and management. Springer Netherlands.*
  48. Vogt, J. V. and F. Somma (Eds.). 2000. Drought and drought mitigation in Europe. Advances in natural and technological hazards research. Kluwer academic publishers. Dordrecht, The Netherlands.

49. Wilhite, D. A., W. E. Easterling and D. A. Wood (Eds.), 1987. Planning for drought. Toward a reduction of societal vulnerability. Westview press, Boulder and London.
50. Wilks, D. S. 1995. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction, Int. Geophys. Ser., vol. 59, 467 pp., Academic, San Diego, Calif.
51. Willmott, C. J. 1978. P-mode principal components analysis, grouping and precipitation regions in California. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B, 26(4), 277-295.
52. Yarnal, B. 1993. Synoptic climatology in environmental analysis: a primer. London: Belhaven press.
53. Zarch, M. A. A., H. Malekinezhad, M. H. Mobin, M. T. Dastorani and M. R. Kousari. 2011. Drought monitoring by reconnaissance drought index (RDI) in Iran. J. Water resour. manage. 25(13): 3485-3504.

## Hydro-Meteorological Drought Assessment Based on Aggregate Drought Index (ADI) and its prediction with Markov Chain in Sarbaz River Basin (Southeast of Iran)

H. Nazaripour<sup>\*1</sup> Z. Karimi<sup>2</sup> and M. Sedaghat<sup>3</sup>

(Received: Feb. 27-2014 ; Accepted : Dec. 26-2015)

### Abstract

Drought is a climatic anomaly that associates with a significant decrease (lack) of precipitation and water resources availability, which spreads on vast temporal and spatial scales, and significantly affects various aspects of life and environment. One of the most common methods of drought assessing and monitoring is calculating drought indices (DIs). Drought areal and temporal extent and its severity are determined by these indices. In this study, an aggregate drought index (Hydro-Meteorological) has been developed for the assessment of hydrological and meteorological droughts in Sarbaz river basin located in southeastern of Iran. The Aggregate Drought Index (ADI) comprehensively considers all physical forms of drought (meteorological, hydrological, and agricultural) through selection of variables that are related to each drought type. In this case, monthly values of Stream flow Drought Index (SDI) and Standardized Precipitation Index (SPI) indicators were used for four similar reference periods with principle component analysis and aggregate hydro-meteorological index was defined based on its first component. The study time span was set between 1981-82 to 2010-11, which begins of October in Iran. Results based on the aggregate drought index (ADI) revealed that a long period of hydro-meteorological drought occurred from 1999-2000 to 2005/06 in southeast of Iran, in which, 2003/04 water year has been extremely a drought year. The ADI methodology provides a clear, objective approach for describing the intensity of drought. This index is appropriately able to represent the behavior of Hydro-Meteorological droughts and recommended as an integrated index for assessing and monitoring of regional droughts. Finally, different states of hydro-meteorological drought have been extracted based on conventional regional thresholds, and have been modeled by Markov chain. This made the estimation of drought state transition frequency possible, and made the prediction of next drought state time more real. State transition frequency matrices, are the main instruments for predicting drought states in real time. Results of validation tests and conforming the predicted results with real data indicate that predicting hydrological drought state transitions in the study area using Markov chain method is valid.

**Keywords:** Hydro-Meteorological Drought, Aggregate Drought Index (ADI), Drought prediction, Markov chain, Sarbaz river basin.

---

1. Dept. of Environ., Graduate Univ. of Advanced Technol., Kerman, Iran.

2. Dept. of Climatology, Univ. of Sistan and Baluchestan, Sistan and Baluchestan, Iran.

3. Dept. of Geography, Univ. of Payam Noor, Kerman Branch, Kerman, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: h.nazaripour@kgut.ac.ir