



دانشگاه گوارش و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و سوم، شماره دوم، ۱۳۹۵

<http://jwsc.gau.ac.ir>

پیش‌بینی خشک‌سالی جریان رودخانه با استفاده از شاخص SPI و زنجیره مارکف در حوزه آبریز کرخه

*مهرنوش اقتداری^۱، جواد بذرافشان^۲، مریم شفیع^۱ و سمیه حاجبی^۱

^۱دانشجوی دکتری گروه هواشناسی کشاورزی، دانشگاه تهران، ^۲دانشیار گروه هواشناسی کشاورزی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۹۴/۱/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۱۸

چکیده

سابقه و هدف: خشک‌سالی یکی از پیچیده‌ترین بلاهای طبیعی در جهان است و زمانی رخ می‌دهد که آب قابل دسترس یک سامانه برای تامین نیازهای حداقل یکی از بخش‌های زیستی، اقتصادی و اجتماعی طی یک دوره زمانی قابل ملاحظه کافی نباشد. گرچه به‌طور کلی تعریفی جهانی از خشک‌سالی وجود ندارد، می‌توان خشک‌سالی را به انواع مختلف خشک‌سالی هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و اقتصادی-اجتماعی تقسیم‌بندی نمود. خشک‌سالی هیدرولوژیکی که در این مقاله به آن پرداخته می‌شود، در فاز زمینی چرخه هیدرولوژیکی به‌صورت کاهش مشخص در میزان آب قابل دسترس در همه اشکال آن مانند جریان رودخانه، سطح آب مخازن و دریاچه‌ها و سطح آب زیرزمینی تعریف می‌شود. از جمله اثرات خشک‌سالی هیدرولوژیکی می‌توان به کاهش یا زوال ذخایر آبی، بدتر شدن کیفیت آب، عدم کفایت آب مورد نیاز برای آبیاری و در نتیجه افت محصول، کاهش قدرت تولید، برهم خوردن تعادل زیستگاه‌های ساحلی و تأثیر بر فعالیت‌های اقتصادی-اجتماعی اشاره کرد. هدف از این مقاله ارزیابی خشک‌سالی هیدرولوژیکی در حوزه آبریز کرخه با استفاده از شاخص SDI و پیش‌بینی این نوع خشک‌سالی با استفاده از زنجیره مارکف نایستا می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه، به‌منظور تعیین وضعیت خشک‌سالی هیدرولوژیکی، از شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه (SDI) که براساس حجم تجمعی جریان رودخانه است، برای دوره‌های مرجع ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه در ۴ ایستگاه هیدرومتری واقع در حوزه آبریز کرخه (آفرینه، پلچهر، قورباغستان و پلزال) طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۳۵۴ (دوره آماری ۳۳ ساله) استفاده شد. چهار دوره مرجع منتخب در هر سال هیدرولوژیکی که دارای همپوشانی هستند، عبارت از مهر-آذر، مهر-اسفند، مهر-خرداد، مهر-شهریور (یک‌سال کامل هیدرولوژیکی) می‌باشد. پس از تعیین وضعیت‌های خشک‌سالی برای هر سری زمانی و دوره مرجع، با فرض این‌که فرآیند اصلی دارای ساختار زنجیره مارکف نایستا است، احتمال انتقال وضعیت برای همه ایستگاه‌ها و در همه دوره‌های مرجع محاسبه شد.

یافته‌ها: در حالی‌که همبستگی بین دو شاخص SDI و SPI ضعیف بود، نتایج همبستگی و ارتباط بین مقادیر SDI در دوره‌های مرجع مختلف نشان داد که با اطمینان بسیار بالایی می‌توان در پیش‌بینی وضعیت خشک‌سالی هیدرولوژیکی کل سال از شاخص SDI شش‌ماهه (مهر-اسفند) استفاده نمود. از دیگر نتایج این مطالعه می‌توان به استفاده از

*مسئول مکاتبه: m_eqtedari@ut.ac.ir

داده‌های بارش به‌جای داده‌های جریان رودخانه به‌منظور پیش‌بینی خشک‌سالی هیدرولوژیکی در ایستگاه‌هایی که همبستگی بالایی بین شاخص SDI و SDI وجود دارد، اشاره کرد.

نتیجه‌گیری: از ویژگی‌های عمده روش مورد استفاده در این مقاله می‌توان به استفاده از شاخصی ساده به نام شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه (SDI)، که شدت خشک‌سالی هیدرولوژیکی را با استفاده از متوسط دبی جریان رودخانه برای دوره‌های دارای همپوشانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه (دوره‌های مرجع) در هر سال هیدرولوژیکی توصیف می‌کند، در نظر گرفتن ۵ طبقه (وضعیت) خشک‌سالی، تولید ماتریس احتمال انتقال وضعیت برای دو دوره مرجع منتخب با فرض تبعیت فرآیند اصلی از زنجیره مارکف، امکان پیش‌بینی شدت خشک‌سالی دوره مرجع تجمعی بلندمدت‌تر با استفاده از شدت خشک‌سالی دوره‌های مرجع قبلی و استفاده از داده‌های بارش به‌جای داده‌های جریان رودخانه به‌منظور پیش‌بینی خشک‌سالی هیدرولوژیکی در ایستگاه‌هایی که همبستگی بالایی بین شاخص SDI و SPI وجود دارد، اشاره کرد.

واژه‌های کلیدی: خشک‌سالی هیدرولوژیکی، شاخص SDI، زنجیره مارکف، پیش‌بینی خشک‌سالی، حوزه کرخه

مقدمه

خشک‌سالی یکی از پیچیده‌ترین بلایای طبیعی در جهان است و هر ساله بیش از نیمی از کره زمین در معرض آن قرار می‌گیرند (۵، ۲۵). خشک‌سالی به‌صورت کمبود آب در یک یا چند مؤلفه چرخه هیدرولوژیکی نظیر بارندگی و دبی جریان رودخانه شناخته می‌شود. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که آب قابل دسترس یک سامانه برای تامین نیازهای حداقل یکی از بخش‌های زیستی، اقتصادی و اجتماعی طی یک دوره زمانی قابل ملاحظه کافی نباشد (۲۲).

گرچه به‌طور کلی تعریفی جهانی از خشک‌سالی وجود ندارد، با این حال می‌توان خشک‌سالی را به انواع مختلف خشک‌سالی هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و اقتصادی-اجتماعی تقسیم‌بندی نمود (۲۶). خشک‌سالی هیدرولوژیکی که در این مطالعه بدان پرداخته می‌شود به‌صورت کاهش‌ی مشخص در میزان آب قابل دسترس در همه اشکال آن مانند جریان رودخانه، سطح آب مخازن و دریاچه‌ها و سطح آب زیرزمینی در فاز زمینی چرخه هیدرولوژیکی تعریف می‌شود. در این میان، جریان

رودخانه از اهمیت زیادی برای نشان دادن وضعیت منابع آب‌های سطحی برخوردار است. از این‌رو، خشک‌سالی هیدرولوژیکی با کاهش جریان رودخانه نسبت به شرایط نرمال مرتبط است (۱۳). ازجمله اثرات خشک‌سالی هیدرولوژیکی می‌توان به کاهش یا زوال ذخایر آبی، بدتر شدن کیفیت آب، عدم کفایت آب مورد نیاز برای آبیاری و در نتیجه افت محصول، کاهش قدرت تولید، برهم خوردن تعادل زیستگاه‌های ساحلی و تأثیر بر فعالیت‌های اقتصادی-اجتماعی اشاره کرد (۸).

آسان‌ترین راه برای پایش خشک‌سالی استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی است، زیرا شاخص‌ها روشی کمی برای تعیین آغاز و خاتمه خشک‌سالی فراهم می‌سازند و مقدار آن‌ها سطح شدت خشک‌سالی را نشان می‌دهد (۱۹). شاخص‌های خشک‌سالی متعددی به‌منظور توصیف خشک‌سالی هیدرولوژیکی توسعه یافته‌اند. شاخص شدت خشک‌سالی پالمر (PDSI) یکی از اولین شاخص‌های خشک‌سالی مبتنی بر ترازمندی آب بود که امکان ارزیابی شدت نسبی خشک‌سالی را در مقیاس ملی فراهم کرد (۲۴). یوجویچ (۱۹۶۷) خشک‌سالی را براساس یک سری

می‌توان از شاخصی شبیه شاخص SPI با عنوان شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه (SDI)^۴ استفاده کرد که شاخصی مؤثر، بسیار ساده براساس متوسط جریان ماهانه است. نلبتیس (۲۰۰۸) با استفاده از شاخص SDI خشک‌سالی هیدرولوژی در چهار مقیاس ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه را محاسبه نمود و نشان داد که این شاخص فاکتور مناسبی برای برآورد خشک‌سالی هیدرولوژیکی است (۱۲). نلبتیس و تساکریس (۲۰۰۹) نیز با استفاده از این شاخص به ارزیابی خشک‌سالی هیدرولوژیکی حوزه اویونس در یونان پراخته و با فرض این‌که فرآیند اصلی دارای ساختار زنجیره مارکف نایستا است، روشی برای پیش‌بینی خشک‌سالی هیدرولوژیکی معرفی نمودند (۱۳). لازم به ذکر است که بسیاری از پژوهشگران از جمله لوهانی و همکاران (۱۹۹۸)، پائولو و پیریرا (۲۰۰۷)، نلبتیس و تساکریس (۲۰۰۹)، شارما و پانو (۲۰۱۲) و آکیوز و همکاران (۲۰۱۲) از زنجیره‌های مارکف به‌طور گسترده‌ای در پیش‌بینی خشک‌سالی‌ها استفاده کرده‌اند (۶، ۱۴، ۱۳، ۱۶، ۱). هدف از این مقاله ارزیابی خشک‌سالی هیدرولوژیکی در حوزه کرخه با استفاده از شاخص SDI و روش پیشنهادی نلبتیس و تساکریس (۲۰۰۹) در پیش‌بینی این نوع خشک‌سالی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌ها: حوزه آبریز کرخه در غرب کشور و در مناطق میانی و جنوبی زاگرس قرار دارد و دارای مساحتی بالغ بر ۵۰۷۶۸ کیلومترمربع است، که حدود ۳۳۶۷۴ کیلومترمربع آن در مناطق کوهستانی و مرتفع قرار دارد و حدود ۱۷۰۹۴ کیلومترمربع آن را دشت‌ها و کوهپایه‌ها تشکیل می‌دهند. این حوزه از نظر مختصات جغرافیایی، بین ۴۶ درجه و ۶ دقیقه و ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه

زمانی ایستا و تئوری دنباله^۱ تعریف کرد. وی سری مشاهدات دبی را روی نموداری که محور طول آن زمان بود، قرار داد و سطح آستانه‌ای^۲ را برای آن تعریف نمود که ارقام کم‌تر از آستانه مبین خشک‌سالی و مدتی که جریان کم‌تر از این آستانه قرار می‌گرفت، تداوم خشک‌سالی را تعیین می‌نمود (۱۰). شاخص ذخیره آب سطحی (SWSI) توسط شافر و دزمن (۱۹۸۲) ارائه شد که بر مبنای یک معادله تجربی استوار بود. این شاخص برای طرح مقابله با خشک‌سالی در ایالت کلرادو مطرح شد و بعدها نیز با تغییراتی برای بعضی ایالات مورد استفاده قرار گرفت (۱۵). در سال ۲۰۰۱، استال شاخص کمبود منطقه‌ای (RDI)^۳ را معرفی نمود که در این شاخص از داده‌های روزانه جریان رودخانه استفاده شده و اثر فصلی جریان رودخانه بر خشک‌سالی‌ها حذف شده است. به‌علاوه، این شاخص بزرگی خشک‌سالی را نشان نمی‌دهد و شدت خشک‌سالی را به‌وسیله سطح خشک‌سالی کمی می‌سازد (۱۸). نتیجه این‌که امکان مقایسه خشک‌سالی هیدرولوژیکی در ایستگاه‌های مختلف را غیرممکن می‌سازد (۲۳). علاوه بر شاخص‌های ذکر شده، شاخص‌های دیگری نیز توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده‌اند (۳، ۱۷، ۲۱، ۴، ۲۰) که به‌دلیل تعدد، از ذکر آن‌ها خودداری می‌شود. به‌طور کلی این شاخص‌ها که برای توصیف خشک‌سالی هیدرولوژیکی به‌کار می‌روند، به داده‌های زیاد و حجم محاسباتی بالا نیازمندند. از سوی دیگر، برای خشک‌سالی هواشناسی، شاخص‌های مؤثر و بسیار ساده‌ای مانند شاخص بارندگی استاندارد (SPI) پیشنهاد و به‌طور گسترده مطالعه شده‌اند.

با توجه به موارد ذکر شده و در راستای نیاز به شاخصی ساده برای تعیین خشک‌سالی هیدرولوژیکی،

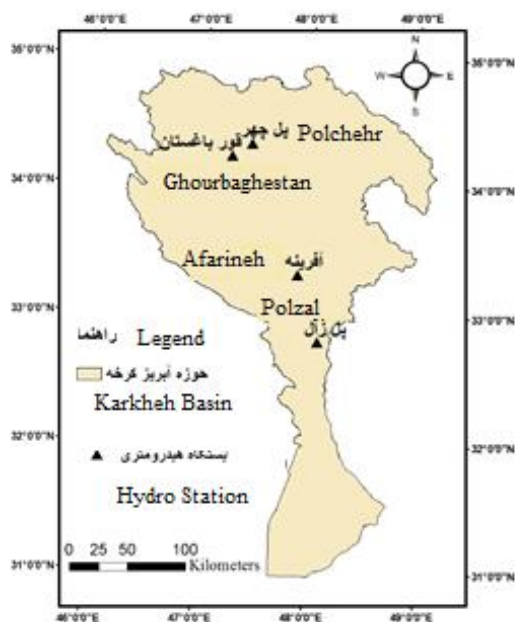
- 1- Run Theory
- 2- Truncation Level
- 3- Regional Deficiency Index

4- Streamflow Drought Index

ضریب کشیدگی دال بر پخ بودن توزیع‌های احتمال دبی است.

روش تحقیق: در این مطالعه، اول مهرماه به‌عنوان آغاز سال هیدرولوژیکی در نظر گرفته شد. هر سه ماه یکبار (۳۰ آذر، ۲۹ اسفند، ۳۱ خرداد و ۳۱ شهریور) ارزیابی خشک‌سالی‌های هواشناسی (با استفاده از شاخص خشک‌سالی بارش استاندارد، SPI) و هیدرولوژی (با استفاده از شاخص جریان رودخانه، SDI) انجام شد. چهار دوره مرجع منتخب در هر سال هیدرولوژیکی که دارای همپوشانی هستند، عبارتند از: مهر-آذر، مهر-اسفند، مهر-خرداد، مهر-شهریور (یک‌سال کامل هیدرولوژیکی). برای پیش‌بینی احتمالاتی خشک‌سالی هیدرولوژی از معادله بین SDI و SPI در دوره‌های مرجع مختلف و SDI یک دوره با دوره‌های مرجع قبلی استفاده و پیش‌بینی احتمالاتی خشک‌سالی هیدرولوژی نیز به کمک زنجیره مارکف نایستا انجام شد. در ادامه، روش مورد استفاده تشریح خواهد شد.

طول شرقی و بین ۳۲ درجه و ۳۰ دقیقه و ۳۴ درجه و ۵۶ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). این حوزه از شمال به حوزه‌های رودخانه‌های سیروان، سفیدرود و قره‌چای، از غرب به رودخانه‌های مرزی و غرب ایران (عراق) و از شرق به رودخانه دز محدود می‌شود. در پایاب این حوزه سد کرخه احداث شده است که از آب ذخیره شده در مخزن این سد برای تامین آب در بخش کشاورزی، صنعت و شرب استفاده می‌شود (۲). از بین ایستگاه‌های واقع در پنج زیرحوزه اصلی حوزه کرخه، با توجه به توزیع مکانی مناسب و دارا بودن آمار کافی، ۴ ایستگاه هیدرومتری با طول دوره آمار ۳۳ ساله (۱۳۸۷-۱۳۵۴) انتخاب شدند (جدول ۱). تغییرات میانگین سالانه دبی از ۳/۳ تا ۸۶ مترمکعب بوده، مقدار حداکثر دبی ۱۹/۰۶ مترمکعب و مربوط به ایستگاه پل زال و حداقل دبی ۱/۲ مترمکعب مربوط به ایستگاه آفرینه می‌باشد. ضریب چولگی نزدیک به صفر بیانگر نرمال بودن توزیع سری‌های زمانی است. هم‌چنین کم بودن



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری و حوزه آبریز کرخه.

Figure 1. Hydrometric stations and Karkheh basin location.

جدول ۱- ویژگی‌های ایستگاه‌های واقع در حوزه آبریز کرخه.

Table 1. Characteristics of stations located in Karkheh basin.

مشخصات آماری سری سالانه دبی					Discharge average (m ³ /s)	مشخصات جغرافیایی				ایستگاه	زیرحوزه		
Statistical characteristics of discharge annual series						Geographical characteristic							
Kurtosis	کشیگی	Skewness	چولگی	Maximum	حداکثر	Minimum	حداقل	Standard deviation	انحراف معیار	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا	ارتفاع (متر)
1.408	0.678	77.3	6.2	15.2	32.5	1306	47° 26'	34° 20'	پل چهر	گاماسیاب	Polchehr	Gamasiab	
0.643	0.045	40.6	3.3	9.4	20.6	1300	47° 15'	34° 13'	قورباغستان	قره‌سو	Ghourbaghestan	Gharesoo	
0.042	0.410	8.4	1.2	1.6	3.9	742	46° 50'	34° 33'	آفرینه	سیمره	Afarineh	Seymareh	
0.947	0.425	190.6	14.4	36.5	86	90	48° 09'	32° 25'	پل زال	کرخه پایین	Polzal	LowKarkheh	

$$SDI_{i,k} = \frac{Q_{i,k} - \bar{Q}_k}{S_k} \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots \quad k = 1, 2, 3, 4$$

که در آن، \bar{Q}_k و S_k به ترتیب میانگین و انحراف معیار حجم تجمعی جریان رودخانه دوره مرجع k هستند که در دوره بلندمدت برآورد می‌شوند. در این تعریف، \bar{Q}_k به عنوان سطح آستانه در نظر گرفته شده است. شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه در واقع معادل حجم رودخانه استاندارد شده است. در این مطالعه، به جای حجم از متوسط داده‌های دبی رودخانه استفاده شد.

بر اساس شاخص محاسبه شده، ۵ وضعیت برای خشک‌سالی هیدرولوژیکی تعریف شدند. همان‌طور که در جدول ۲ آمده است، پنج وضعیت اعداد صحیحی هستند که در محدوده بین اعداد صفر (فاقد خشک‌سالی) تا ۴ (خشک‌سالی بسیار شدید) قرار می‌گیرند.

شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه: چنانچه فرض شود که سری‌های زمانی ماهانه حجم جریان رودخانه ($q_{i,j}$) در دسترس است که در آن اندیس i اشاره به سال هیدرولوژیکی و اندیس j اشاره به ماه در یک سال هیدرولوژیکی دارد ($j=1$ برای مهر و $j=12$ برای شهریور). بر مبنای این سری‌ها، حجم تجمعی جریان رودخانه به صورت زیر خواهد بود:

$$Q_{i,j} = \sum_{j=1}^{3k} q_{i,j} \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots \quad j = 1, 2, \dots, 12 \quad k = 1, 2, 3, 4$$

که در آن، $Q_{i,j}$ حجم تجمعی جریان رودخانه برای i امین سال هیدرولوژیکی و k امین دوره مرجع ($k=1$ برای مهر- آذر، $k=2$ برای مهر- اسفند، $k=3$ برای مهر- خرداد و $k=4$ برای مهر- شهریور) می‌باشد. بر مبنای حجم تجمعی جریان $Q_{i,j}$ ، شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه (SDI) برای هر دوره مرجع k و i امین سال هیدرولوژیکی به صورت زیر تعریف می‌شود:

این امکان را می‌دهد تا تعداد وقایع خشک‌سالی و ترسالی اتفاق افتاده را برای هر گام زمانی دلخواه تعریف و شناسایی نماید (۷). مقادیر مثبت SPI بیانگر شرایط مرطوب و مقادیر منفی اشاره به خشک‌سالی هواشناسی دارد. آستانه‌های تمایز کلاس‌های مختلف خشک‌سالی بر مبنای این شاخص همانند شاخص SDI است (جدول ۲).

شاخص بارش استاندارد: شاخص بارش استاندارد (SPI) به صورت گسترده‌ای در تعیین و پیش‌بینی خشک‌سالی هواشناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۳). مک‌کی و همکاران (۱۹۹۳) برای اولین بار از این شاخص در ایالت کلرادو آمریکا استفاده کردند (۷). این شاخص اساساً برای تعریف و پیش‌بینی خشک‌سالی و ترسالی ارائه شده است و به پژوهشگر

جدول ۲- تعیین وضعیت‌های خشک‌سالی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص SDI.

Table 2. Determining hydrological drought states using SDI index.

معیار Criterion	شرح Description	وضعیت State
$SDI \geq 0$	فاقد خشک‌سالی Non-drought	0
$-1 \leq SDI < 0$	خشک‌سالی ملایم Mild drought	1
$-1.5 \leq SDI < -1$	خشک‌سالی متوسط Moderate drought	2
$-2 \leq SDI < -1.5$	خشک‌سالی شدید Severe drought	3
$SDI < -2$	خشک‌سالی خیلی شدید Extreme drought	4

$$R_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} P_{i,j} \quad (3)$$

$$i=1, 2, \dots \quad j=1, 2, \dots, 12 \quad k=1, 2, 3, 4$$

در مرحله بعد، توزیع احتمال گاما بر سری تجمعی $R_{i,k}$ برازش یافته و با استفاده از اصل تبدیل احتمال از توزیع گاما به توزیع نرمال استاندارد در سطوح هم احتمال، هر مقدار از سری تجمعی مذکور به صورت زیر استاندارد می‌شود:

اساس شاخص بارندگی استاندارد (SPI)، برازش یک توزیع احتمال مناسب (گاما) بر سری مجموع بارندگی‌های ماهانه در پنجره زمانی معین است. اگر سری زمانی بارندگی ماهانه هر یک از ایستگاه‌های منطقه به صورت $P_{i,j}$ معرفی شود که در آن اندیس i سال هیدرولوژیکی و اندیس j ماه مربوط به سال هیدرولوژیکی مشخص می‌باشد، سری بارندگی تجمعی ($R_{i,k}$) برای k امین دوره مرجع مربوط به i امین سال هیدرولوژیکی از رابطه ۳ حاصل می‌شود:

پیش‌بینی وضعیت‌های مختلف شدت خشک‌سالی جریان رودخانه: به‌منظور پیش‌بینی احتمالاتی وضعیت‌های مختلف شدت خشک‌سالی جریان رودخانه، سری‌های SDI با استفاده از داده‌های بلندمدت دبی جریان رودخانه ایستگاه‌های موردنظر در حوزه کرخه محاسبه و با استفاده از جدول ۲، وضعیت‌های خشک‌سالی برای هر سری و دوره مرجع تعیین شدند. در این پژوهش، فرض بر آن قرار گرفت که فرآیند اصلی دارای ساختار زنجیره مارکف نایستا می‌باشد. اگر $q_{i,j}$ ($i=1,2,\dots,N; k=1,2,3,4$) سری زمانی ماهانه دبی جریان رودخانه باشد (که N تعداد سال‌های هیدرولوژیکی است)، ابتدا دبی متوسط جریان رودخانه $Q_{i,j}$ ($i=1,2,\dots,N; k=1,2,3,4$) با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد. سپس، بر مبنای معادله ۲ سری‌های $SDI_{i,k}$ محاسبه و پس از آن سری‌های وضعیت $x_{i,k}$ ($i=1,2,\dots,N; k=1,2,3,4$) با توجه به جدول ۱ به‌دست آمد. برای هر k ، به وضعیت مربوطه $x_{i,k}$ مقدار گسسته m از صفر تا ۵ اختصاص داده شد. سپس، فراوانی وقوع هر وضعیت m در هر دوره مرجع k یعنی $F_{m,k}$ ، با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$F_{m,k} = \frac{n_{m,k}}{N} \quad (5)$$

که در آن، $n_{m,k}$ تعداد وقوع وضعیت m در دوره مرجع k و N تعداد سال‌های هیدرولوژیکی می‌باشد. $F_{m,k}$ برآورد احتمال حاشیه‌ای $p_{m,k}$ وقوع وضعیت m در دوره مرجع k می‌باشد. برای مثال:

$$p_{m,k} = P(X_{I,k} = m), \quad m \in [0,1,2,3,4] \forall i \quad (6)$$

(۴-الف) برای $0 < H(x) \leq 0.5$

$$Z = SPI = - \left[t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right]$$

(۴-ب) برای $0.5 < H(x) < 1$

$$Z = SPI = + \left[t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right]$$

که در آن،

(۴-ج) برای $0 < H(x) \leq 0.5$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)}$$

(۴-د) برای $0.5 < H(x) < 1$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)}$$

ثابت‌های معادلات عبارتند از:

$$d_1 = 1/432788, d_2 = 0/189269, d_3 = 0/01308$$

$$C_0 = 2/515517, C_1 = 0/802853, C_2 = 0/010328$$

و $H(x)$ احتمال تجمعی بارندگی در پنجره زمانی معین از توزیع گاما به‌ازای مقدار معین $R_{i,k}$ می‌باشد.

پیش‌بینی کمی خشک‌سالی جریان رودخانه: به‌منظور پیش‌بینی کمی خشک‌سالی جریان رودخانه (SDI)، روابط SDI و SPI برای دوره‌های مرجع مختلف و هم‌چنین روابط SDI یک دوره مرجع با SDI دوره‌های مرجع قبلی مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

نوسانات سری‌های زمانی SDI برای هر یک از دوره‌های مرجع در ایستگاه‌های مورد بررسی در شکل ۲ ترسیم شده است. با توجه به شکل مذکور، مشاهده می‌شود که تنها زمان عبور از دوره سه‌ماهه اول (مهر- آذر) به نیمسال اول (مهر- اسفند) تفاوت معنی‌داری مشاهده می‌شود، که دلیل آن رژیم هیدرولوژیکی منطقه یعنی وجود یک دوره مرطوب ۶ ماهه و سپس یک دوره خشک می‌باشد. با بررسی دقیق‌تر شکل ۲ می‌توان دریافت که ممکن است یکسال در دوره مرجعی خاص مثلاً مهر- آذر یا مهر- اسفند سالی خشک بوده، اما همان سال در دوره مرجع بعدی مهر- خرداد سالی مرطوب باشد (به‌عنوان مثال ایستگاه آفرینه در سال ۱۳۷۱-۷۲ و یا پل زال در سال ۱۳۶۵-۶۶ که این موضوع ناشی از بارش‌ها در فصل بهار می‌باشد. بنابراین عدم انطباق و هم‌روند نبودن سری‌های SDI در برخی سال‌ها سبب دقیق نبودن پیش‌بینی‌ها می‌شود. هم‌چنین، در همه ایستگاه‌ها به‌جز ایستگاه پلچهر کم‌ترین مقدار شاخص SDI در دوره مرجع مهر- شهریور (کل سال هیدرولوژیکی) طی سال‌های ۱۳۷۹-۸۱ واقع شده است که اشاره به خشک‌سالی تاریخی کشور در این سال دارد. انتقال بین وضعیت‌های خشک‌سالی مختلف از یک دوره مرجع به دوره مرجع تجمعی در ایستگاه‌های منتخب ارائه شده است. چند نکته مهم در نتایج جدول‌های ۳ و ۴ به چشم می‌خورد. در تمام ایستگاه‌ها احتمال انتقال از تمام طبقات از یک دوره مرجع به طبقات غیرخشک‌سالی (وضعیت ۰) و ملایم (وضعیت ۱) در دوره مرجع تجمعی بعدی، بالاتر از دیگر احتمالات انتقال است. نکته دیگر این‌که، میزان احتمال انتقال از یک وضعیت در یک دوره مرجع به وضعیتی دیگر در

که در آن، $P(0)$ معرف احتمال است. برای هر k ، احتمالات $p_{m,k}$ ($m=0,1,2,3,4$) تشکیل یک ماتریس 5×1 (p_k) را می‌دهند. در گام بعدی، فراوانی انتقال وضعیت ($F_{m,m',k}$) از وضعیت m در دوره مرجع k به وضعیت m' در دوره مرجع $k+1$ با استفاده از معادله زیر محاسبه شد:

$$F_{m,m',k} = \frac{n_{m,m',k}}{\sum n_{m,m',k}} \quad (7)$$

که در آن، $n_{m,m',k}$ تعداد وقوع وضعیت m در دوره مرجع k و وضعیت m' در دوره مرجع $k+1$ می‌باشد. $F_{m,m',k}$ برآوردی از احتمال انتقال ($p_{m,m',k}$) که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_{m,m',k} = P(X_{i,k+1} = m' | X_{i,k} = m) \quad (8)$$

$$m \in [0,1,2,3,4] \quad m' \in [0,1,2,3,4] \quad \forall i$$

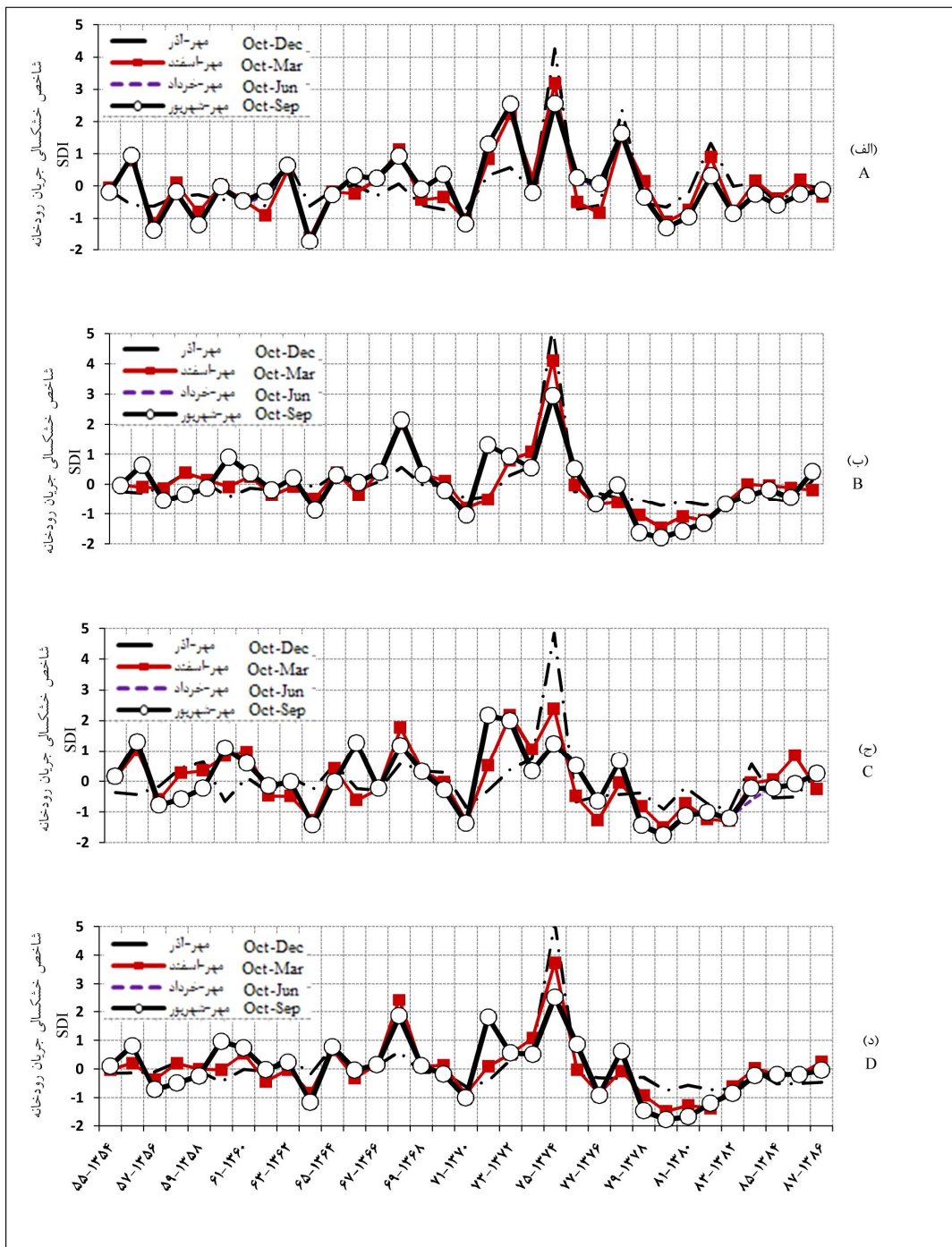
که در آن، $P(\cdot|\cdot)$ احتمال شرطی است. برای هر مقدار k ، احتمالات انتقال تشکیل یک ماتریس 5×5 (P_k) را می‌دهند. اگر فرض شود که موقعیت زمانی، دوره مرجع k ام از سال هیدرولوژیکی i ام باشد، قبل از تعیین وضعیت خشک‌سالی موجود، می‌توان احتمالات حاشیه‌ای برای دوره مرجع بعدی ($k+1$) را با استفاده از رابطه زیر پیش‌بینی کرد:

$$P_{k+1} = P_k P_k \quad (9)$$

در رابطه بالا، تنها یک مولفه بردار p_k برابر یک و سایر مؤلفه‌های آن برابر صفر هستند. رابطه ۹ مشخص می‌سازد که تنها اطلاعات مورد نیاز برای پیش‌بینی خشک‌سالی ماتریس P_k است که توسط ماتریس فراوانی انتقال وضعیت برآورد می‌شود و این خروجی اصلی روش به‌کار رفته در این مطالعه است.

دوره مرجع تجمعی بعدی، تابع اضافه شدن فصول خشک‌تر به دوره‌های مرجع تجمعی بعدی است. به‌عنوان مثال، در ایستگاه آفرینه احتمال انتقال از طبقه خشک‌سالی متوسط (وضعیت ۲) در دوره مرجع مهر- آذر به طبقه غیرخشک‌سالی (وضعیت ۰) در دوره مرجع مهر- اسفند، مهر- خرداد و مهر- شهریور به دوره‌های مرجع تجمعی مهر- خرداد و مهر- شهریور است. به همین دلیل هم در همه ایستگاه‌ها، احتمال انتقال صفر تحلیل‌های احتمالاتی، در این مطالعه، به‌منظور پیش‌بینی طولانی‌تر شدن دوره مرجع کاهش می‌یابد. علاوه بر کمی جریان رودخانه، روابط سری‌های زمانی SDI با SPI و SDI دوره‌های قبلی مورد بررسی قرار گرفت. ترتیب برابر یا ۰/۴۵۴، ۰/۳۴۵ و ۰/۳۱۷ می‌باشد و علت این کاهش روند، همان‌طور که ذکر شد، به‌دلیل قرار گرفتن دو فصل خشک‌تر بهار و تابستان به‌ترتیب در شکل ۳ به‌عنوان نمونه، رابطه بین SDI₄ (دوره مرجع چهارم) با SDI₁، SDI₂، SDI₃، SPI₁، SPI₂ و SPI₃ را در ایستگاه قورباغستان نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که وابستگی بین SDI₄ با سری‌های SDI دوره‌های مرجع ۱، ۲ و ۳ بهتر از سری‌های SPI دوره‌های مرجع مذکور است. این نتیجه در مورد پیش‌بینی SDI₂ و SDI₃ نیز صادق است. ضرایب تبیین SDI در دوره‌های مرجع مختلف با مقادیر SDI و SPI در دوره‌های مرجع قبلی در جدول ۵ ارائه شده

است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در همه ایستگاه‌ها بالاترین همبستگی بین شاخص SDI دوازده ماهه با شاخص SDI نه ماهه و شش ماهه به چشم می‌خورد. بنابراین با اطمینان بسیار بالایی می‌توان در پیش‌بینی وضعیت خشک‌سالی هیدرولوژیکی کل سال از شاخص SDI شش و نه‌ماهه استفاده نمود. لازم به ذکر است، در ایستگاه پل‌چهر در دوره‌های مرجعی که همبستگی بین شاخص SDI و شاخص SPI نسبتاً بالاتر است، در مواقع عدم دسترسی به داده‌های جریان رودخانه، می‌توان از شاخص SPI برای پیش‌بینی خشک‌سالی هیدرولوژیکی استفاده کرد. البته لازم به ذکر است، که فقط در ایستگاه پلچهر همبستگی بالاتری بین دو شاخص SDI و SPI نسبت به سایر ایستگاه‌ها وجود دارد. پایین بودن همبستگی بین بارش و دبی در این پژوهش با نتایج مطالعه مظفری (۱۳۸۵) در حوزه آبریز هم‌جوار دامنه شمالی شیرکوه یزد و مفیدی‌پور و همکاران (۱۳۹۱) در حوزه آبریز اترک همخوانی دارد (۱۱، ۹). به‌نظر می‌رسد در سطح حوزه آبریز کرخه عواملی غیر از بارش نظیر خصوصیات فیزیوگرافی، خاک‌های حوزه، پوشش گیاهی حوزه، زمین‌شناسی، نوع کاربری اراضی و ... در رژیم رودخانه‌های حوزه آبریز کرخه تأثیرگذار بوده که در این پژوهش تنها به‌میزان اثرگذاری عامل بارش پرداخته شده است.



شکل ۲- سیر تغییرات سری‌های SDI در دوره‌های مرجع مهر- آذر، مهر- اسفند، مهر- خرداد، مهر- شهریور در ایستگاه‌های (الف) پلیچهر (ب) قورباغستان (ج) پل زال (د) آفرینه.

Figure 2. Changes trend of SDI series for reference periods October-December, October-March, October-June and October-September in Polchehr, Ghoorbaghestan, Polzal and Afarineh stations.

جدول ۳- احتمالات انتقال وضعیت‌های مختلف خشک‌سالی براساس داده‌های جریان رودخانه ایستگاه آفرینه و پلچهر.

Table 3. Transition probabilities of drought states based on streamflow data in Afarineh and Polchehr stations.

ایستگاه پلچهر Polchehr station					ایستگاه آفرینه Afarineh station					ایستگاه station
وضعیت خشک‌سالی در مهر- اسفند Drought state in Oct-Mar					وضعیت خشک‌سالی در مهر- اسفند Drought state in Oct-Mar					وضعیت خشک‌سالی در مهر- آذر Drought state in Oct-Dec
4	3	2	1	0	*4	3	2	1	0	
0.12	0.12	0.169	0.337	0.253	0.133	0.143	0.184	0.255	0.286	0
0.155	0.155	0.182	0.277	0.23	0.15	0.158	0.188	0.241	0.263	1
0	0	0.121	0.545	0.333	0	0.03	0.151	0.364	0.454	2
0	0	0.121	0.545	0.333	0	0.03	0.151	0.364	0.454	3
0	0	0.121	0.545	0.333	0	0.03	0.151	0.364	0.454	4
وضعیت خشک‌سالی در مهر- خرداد Drought state in Oct-Jun					وضعیت خشک‌سالی در مهر- خرداد Drought state in Oct-Jun					وضعیت خشک‌سالی در مهر- اسفند Drought state in Oct-Mar
4	3	2	1	0	4	3	2	1	0	
0.125	0.16	0.148	0.273	0.295	0.139	0.148	0.194	0.241	0.278	0
0.146	0.171	0.163	0.252	0.268	0.129	0.14	0.193	0.247	0.29	1
0.075	0.132	0.113	0.321	0.358	0.086	0.103	0.19	0.276	0.345	2
0	0.091	0.061	0.394	0.454	0.026	0.053	0.184	0.316	0.421	3
0	0.091	0.061	0.394	0.454	0	0.03	0.182	0.333	0.454	4
وضعیت خشک‌سالی در مهر- شهریور Drought state in Oct-Sep					وضعیت خشک‌سالی در مهر- شهریور Drought state in Oct-Sep					وضعیت خشک‌سالی در مهر- خرداد Drought state in Oct-Jun
4	3	2	1	0	4	3	2	1	0	
0.139	0.167	0.157	0.259	0.278	0.139	0.148	0.194	0.25	0.286	0
0.133	0.163	0.153	0.265	0.286	0.125	0.136	0.193	0.261	0.284	1
0.046	0.116	0.093	0.349	0.395	0.095	0.111	0.19	0.286	0.317	2
0.062	0.13	0.104	0.333	0.375	0.026	0.053	0.184	0.342	0.395	3
0	0.09	0.06	0.394	0.454	0	0.03	0.18	0.364	0.424	4

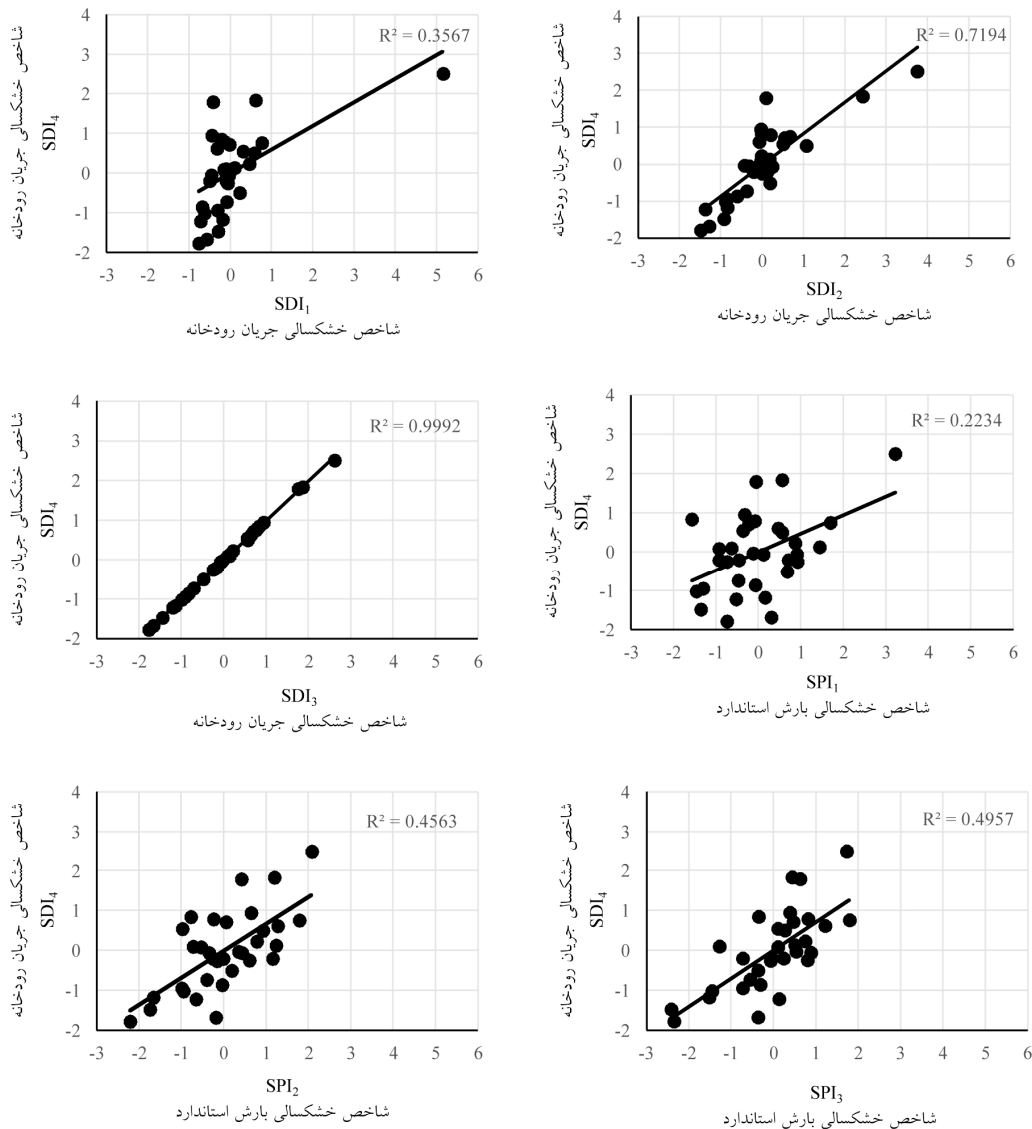
* اعداد ۰ تا ۴ بیانگر وضعیت یا کلاس‌های مختلف خشک‌سالی هستند که شرح آن در جدول ۲ آمده است.

* The numbers 0 through 4 indicate the status of drought or different classes which have been described in Table 2.

جدول ۴- فراوانی انتقال وضعیت حاصل از شاخص SDI براساس داده‌های جریان رودخانه ایستگاه قورباغستان و پل زال.

Table 4. Transition probabilities of drought states based on streamflow data in Ghoorbaghestan and Polzal stations.

ایستگاه پل زال Polzal station					ایستگاه قورباغستان Ghoorbaghestan station					ایستگاه Station
وضعیت خشک‌سالی در مهر- اسفند Drought state in Oct-Mar					وضعیت خشک‌سالی در مهر- اسفند Drought state in Oct-Mar					وضعیت خشک‌سالی در مهر- آذر Drought state in Oct-Dec
4	3	2	1	0	4	3	2	1	0	
0.12	0.12	0.157	0.286	0.313	0.109	0.109	0.151	0.329	0.301	0
0.155	0.155	0.176	0.25	0.263	0.158	0.158	0.177	0.259	0.247	1
0	0	0.091	0.424	0.485	0	0	0.091	0.485	0.424	2
0	0	0.091	0.424	0.485	0	0	0.091	0.485	0.424	3
0	0	0.091	0.424	0.485	0	0	0.091	0.485	0.424	4
وضعیت خشک‌سالی در مهر- خرداد Drought state in Oct-Jun					وضعیت خشک‌سالی در مهر- خرداد Drought state in Oct-Jun					وضعیت خشک‌سالی در مهر- اسفند Drought state in Oct-Mar
4	3	2	1	0	4	3	2	1	0	
0.142	0.15	0.177	0.274	0.257	0.136	0.155	0.175	0.252	0.281	0
0.136	0.146	0.175	0.281	0.262	0.141	0.159	0.177	0.248	0.274	1
0.062	0.083	0.146	0.375	0.333	0.062	0.104	0.146	0.312	0.375	2
0	0.03	0.121	0.454	0.394	0	0.061	0.121	0.364	0.454	3
0	0.03	0.12	0.454	0.394	0	0.061	0.121	0.364	0.454	4
وضعیت خشک‌سالی در مهر- شهریور Drought state in Oct-Sep					وضعیت خشک‌سالی در مهر- شهریور Drought state in Oct-Sep					وضعیت خشک‌سالی در مهر- خرداد Drought state in Oct-Jun
4	3	2	1	0	4	3	2	1	0	
0.133	0.143	0.173	0.286	0.265	0.139	0.157	0.176	0.25	0.278	0
0.139	0.148	0.176	0.278	0.259	0.129	0.15	0.172	0.258	0.29	1
0.075	0.094	0.151	0.358	0.321	0.075	0.113	0.151	0.302	0.358	2
0.03	0.053	0.131	0.421	0.368	0.046	0.09	0.139	0.325	0.395	3
0	0.03	0.12	0.454	0.394	0	0.06	0.12	0.364	0.454	4



شکل ۳- رابطه بین SDI₄ (دوره مرجع چهارم) با SDI₁, SDI₂, SDI₃, SPI₁, SPI₂ و SPI₃ در ایستگاه قورباغستان.
 Figure 3. Linear regression Of SDI₄ on SDI₁, SDI₂, SDI₃, SPI₁, SPI₂ and SPI₃ in Ghoorbaghestan station.

انتقال وضعیت برای دو دوره مرجع منتخب با فرض تبعیت فرآیند اصلی از زنجیره مارکوف، امکان پیش‌بینی شدت خشک‌سالی دوره مرجع تجمعی بلندمدت‌تر با استفاده از شدت خشک‌سالی دوره‌های مرجع قبلی و استفاده از داده‌های بارش به‌جای داده‌های جریان رودخانه به‌منظور پیش‌بینی خشک‌سالی هیدرولوژیکی در ایستگاه‌هایی که همبستگی بالایی بین شاخص SDI و SPI وجود دارد، اشاره کرد.

نتیجه‌گیری کلی

از ویژگی‌های عمده روش مورد استفاده در این مقاله می‌توان به استفاده از شاخصی ساده به نام شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه (SDI)، که شدت خشک‌سالی هیدرولوژیکی را با استفاده از متوسط دبی جریان رودخانه برای دوره‌های دارای همپوشانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه (دوره‌های مرجع) در هر سال هیدرولوژیکی توصیف می‌کند، در نظر گرفتن ۵ طبقه (وضعیت) خشک‌سالی، تولید ماتریس احتمال

جدول ۵- ضریب تبیین مقادیر SDI و SPI در کل دوره‌های مرجع در ایستگاه‌های مورد مطالعه.

Table 5. Determination coefficient of SDI and SPI for reference periods in studied stations.

SPI ₃	SPI ₂	SPI ₁	SDI ₃	SDI ₂	SDI ₁	متغیر مستقل	ایستگاه
						Dependent Var.	
						متغیر وابسته	
						Independent Var.	
-	-	0.3	-	-	0.39	SDI ₂	آفرینه Afarineh
-	0.21	0.11	-	0.6	0.12	SDI ₃	
0.27	0.21	0.11	0.999	0.6	0.11	SDI ₄	
-	-	0.45	-	-	0.8	SDI ₂	پلچهر Polchehr
-	0.61	0.25	-	0.73	0.48	SDI ₃	
0.63	0.6	0.24	0.999	0.71	0.46	SDI ₄	
-	-	0.41	-	-	0.7	SDI ₂	قورباغستان Ghourbaghestan
-	0.46	0.23	-	0.74	0.37	SDI ₃	
0.49	0.46	0.22	0.999	0.72	0.36	SDI ₄	
-	-	0.37	-	-	0.64	SDI ₂	پل زال Polzal
-	0.35	0.24	-	0.86	0.48	SDI ₃	
0.45	0.35	0.23	0.999	0.84	0.46	SDI ₄	

محدود مطالعات انجام شده پژوهش‌های بیش‌تری در این زمینه به‌منظور کاهش اثرات خشک‌سالی به‌ویژه در مناطق مستعد خشک‌سالی، مورد نیاز است.

گفتنی است در زمینه کاربرد زنجیره مارکف در تحلیل و پیش‌بینی خشک‌سالی هیدرولوژیکی که توسط شاخص SDI شناسایی شده، با توجه به تعداد

منابع

1. Akyuz, D.E., Bayazit, M., and Onoz, B. 2012. Markov chain models for hydrological drought characteristics. *J. Hydrometeorol.* 13: 298-309.
2. Bazrafshan, O., Salajegheh, A., Fatehi-Marj, A., Mahdavi, M., Bazrafshan, J., and Hejabi, S. 2014. Comparison of stochastic models and conceptual models in hydrological drought forecast (Case study: Karkheh river basin). *J. Range Water. Manage.* 66: 4. 493-508. (In Persian)
3. Dracup, J.A., Lee, K.S., and Paulson Jr. E.G. 1980. On the definition of droughts. *Water Resour. Res.* 16: 2. 297-302.
4. Heim, R.R. 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bull Am. Meteorol. Soc.* 83: 8. 1149-1165.
5. Kogan, F.N. 1997. Global drought watch from space. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 78: 4. 621-63.
6. Lohani, V.K., Loganathan, G.V., and Mostaghimi, S. 1998. Long-term analysis and short-term forecasting of dry spells by the Palmer drought severity index. *Nord Hydrol.* 29: 1. 21-40.
7. McKee, T.B., Doeskin, N.J., and Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to timescales. *Proceedings of the eighth conference on applied climatology, Anaheim, CA, January 17-23. American Meteorological Society Boston MA.* Pp: 179-184.

8. Mishra, A.K., and Singh, V.P. 2010. A review of drought concepts. *J. Hydrol.* 391: 1-2. 202-216.
9. Mofidipoor, N., Sheikh, V., Ownegh, M., and Sadodin, A. 2012. The analysis of relationship between meteorological and hydrological droughts in Atrak watershed. *J. Water. Manage. Res.* 3: 5. 16-26.
10. Morid, S., and Paymozd, S. 2008. Comparison of hydrological and meteorological methods for daily drought monitoring: A case study, the 1998-2000 drought spell of Tehran, Iran. *JWSS - Isfahan University of Technology.* 11: 42. 325-333. (In Persian)
11. Mozafari, G.H. 2006. Meteorological and hydrological drought inequality in two basins in the northern range of Shirkoh. *J. Agric. Sci. Special Geography.* 4: 173-190. (In Persian)
12. Nalbantis, I. 2008. Evaluation of hydrological drought index. *European Water.* 23: 24. 67-77.
13. Nalbantis, N., and Tsakiris, G. 2009. Assessment off hydrological drought revisited. *J. Water Resour. Manage.* 23: 883-897.
14. Paulo, A.A., and Pereira, L.S. 2007. Prediction of SPI drought class transitions using Markov chains. *Water Resour. Manage.* 21: 10. 1813-1827.
15. Shafer, B.A., and Dezman, L.E. 1982. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. In *Proceedings of the (50th) 1982 Annual Western Snow Conference.* Pp: 164-75.
16. Sharma, T.C., and Panu, U.S. 2012. Prediction of hydrological durations based on Markov chains: case of Canadian prairies, *Hydrol. Sci. J.* 57: 4. 705-722.
17. Smakhtin, V.U. 2001. Low flow hydrology: a review. *J. Hydrol.* 240: 3-4. 147-186.
18. Stahl, K. 2001. Hydrological drought: a study across Europe. Doctoral dissertation. Albert-Ludwigs Universität Freiburg, Freiburg, Germany.
19. Tabari, H., Nikbakht, J., and Hosseinzadeh Talaei, P. 2013. Hydrological drought assessment in northwestern Iran based on Streamflow Drought Index (SDI). *Water Resour. Manage.* 27: 137-151.
20. Tallaksen, L.M., and Van Lanen, H.A.J. 2004. Hydrological drought processes and estimation methods for streamflow and groundwater. *Developments in Water Sciences* 48. Elsevier B.V., Netherlands.
21. Tate, E.L., and Gustard, A. 2000. Drought definition: a hydrological perspective, P 23-48. In: J.V. Voght, and F. Somma (Eds) *Drought and drought mitigation in Europe.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
22. Tsakiris, G., Pangalou, D., and Vangelis, H. 2007. Regional drought assessment based on the reconnaissance drought index (RDI). *Water Resour. Manage.* 21: 821-833.
23. Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., and Morán-Tejeda, E. 2012. Accurate Computation of a Streamflow Drought Index. *J. Hydrol. Engin.* 17: 2. 318-332.
24. Wardlaw, B.D., Anderson M.C., and Verdin, J.P. 2012. *Remote Sensing of Drought.* CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group.
25. Wilhelmi, O.V., and Wilhite, D.A. 2002. Assessing vulnerability to agricultural drought: a Nebraska case study. *Nat. Hazard.* 25: 37-58.
26. Yang, W. 2010. Drought analysis under climate change by application of drought indices and copulas. M.Sc. Thesis, Civil and Environmental Engineering. Portland State University.



Prediction of streamflow drought using SPI and Markov chain in Kharkkeh's basin

***M. Eghtedari¹, J. Bazrafshan², M. Shafie¹ and S. Hejabi¹**

¹Ph.D. Student, Dept. of AgroMeteorology, University of Tehran,

²Associate Prof., Dept. of AgroMeteorology, University of Tehran

Received: 04/03/2015; Accepted: 12/09/2015

Abstract

Background and Objectives: Drought is one of the most complex natural disasters in the world and it occurs whenever available water of a system wouldn't be enough for at least supplying one of the biological, economic and social requirements during a considerable period of time. Although there is not a universal definition of drought, drought can be defined in different disciplinary perspectives: meteorological drought, agricultural drought, hydrological drought and socioeconomic drought. Hydrological drought is defined as a significant decrease in the availability of water in all its forms such as streamflow, lake and reservoir level and groundwater level appearing in the land phase of the hydrological cycle. Hydrological droughts can have widespread impacts by reducing or eliminating water supplies, deteriorating water quality, restricting water for irrigation and causing crop failure, reducing power generation, disturbing riparian habitats, limiting recreation activities and affecting a diversity of economic and social activities. The aim of this study is to assess and predict hydrological drought using SDI index and non-stationary Markov chain.

Materials and Methods: In this study, in order to determine hydrological drought state, for reference periods of 3, 6, 9 and 12 months in 4 hydrometric stations located on Kharkkeh basin (Afarineh, Polchehr, Ghoorbaghestan and Polzal) over 1976-2009 (33 years), the Streamflow Drought Index (SDI) based on cumulative streamflow was used which is an index analogous to SPI. Four overlapping selected reference periods in each hydrological year are namely: October–December, October–March, October–June and October–September (one complete hydrological year). Assuming that the underlying process possess the structure of a non-stationary Markov chain, after determining drought states, state transition probability was calculated in all reference periods and all stations.

Results: While the correlations between SDI and SPI indices were poor, correlations between SDI values in different reference periods indicated that hydrological drought state in whole year can be predicted by October-March SDI index with high reliability. Another conclusion can be drawn from the present study is to use precipitation data instead of streamflow's in order to predict hydrological drought at the stations with high correlation between SDI and SPI indices.

Conclusions: The main features of the methodology are using a simple index called Streamflow Drought Index or SDI that is used to characterize severity of the hydrological drought for overlapping periods of 3, 6, 9 and 12 months (reference periods) within each hydrological year, considering five drought states, generating the matrix of state transition frequency for a selected pair of reference periods under the hypothesis of a Markov chain for the underlying state process, possibility of drought severity prediction in longer cumulative reference period using severity drought in prior reference periods and using of rainfall data instead of streamflow's in order to predict hydrological drought at the stations with a high correlation between SDI and SPI.

Keywords: Hydrological drought, SDI, Markov chain, Prediction, Karkkeh

* Corresponding Author; Email: m_eqtedari@ut.ac.ir