

## به کارگیری زنجیره مارکوف و تقریب سمبلیک (SAX) به منظور بررسی احتمال خشکسالی در حوزه کشاورزی (مطالعه موردی: منطقه شرقی اصفهان)

یاسر جویباری مقدم\*

دانشجوی دکتری سنجش از دور، گروه مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه  
تهران، ایران

سید قاسم رستمی (gh.rostami@ub.ac.ir)

مربی گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بجنورد، خراسان شمالی، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۲۰ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۹/۲۰)

### چکیده

خشکسالی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی مؤثر در بخش‌های مختلف زیست‌محیطی است که فراوانی آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک بسیار زیاد است. پایش و پیش‌بینی شدت خشکسالی می‌تواند در مدیریت مخاطرات ناشی از این پدیده حائز اهمیت باشد. برای پیش‌بینی خشکسالی، رویکردهای گوناگونی وجود دارد، از جمله به کارگیری شاخص‌های خشکسالی براساس داده‌های سنجش از دوری که از این میان می‌توان به شاخص بارش استاندارد شده و شاخص‌های مشتق از پوشش گیاهی و دمای سطح زمین اشاره کرد. در این مقاله براساس داده‌های دمای سطح زمین، پوشش گیاهی و بارش به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای مادیس و TRMM سری زمانی مربوط به شاخص‌های خشکسالی TVX، VCI و SPI در دوره زمانی زمستان ۲۰۰۰ تا تابستان ۲۰۱۵ برای اقلیم شرقی استان اصفهان طراحی شدند. براساس این سری‌های زمانی و تلفیق دو روش تقریب سمبلیک (SAX) و زنجیره مارکوف، احتمال وقوع شدت خشکسالی برای پاییز ۲۰۱۵ پیش‌بینی شد. برای این منظور ابتدا با به کارگیری روش تقریب سمبلیک سری‌های زمانی هر شاخص به مجموعه‌ای از داده‌های کیفی در پنج وضعیت مختلف مرتبط با میزان خشکسالی تبدیل شدند و سپس با به کارگیری روش زنجیره مارکوف و داده‌های مرحله قبل، ماتریس احتمالاتی برای وضعیت در حالت پیش‌بینی هر شاخص به‌دست آمد. با ادغام این ماتریس‌ها و وضعیت خشکسالی در تابستان ۲۰۱۵ برای هر شاخص، یک مدل احتمالاتی برای خشکسالی در پاییز ۲۰۱۵ پیش‌بینی شد. تحلیل‌ها و ارزیابی‌ها نشان از همبستگی قوی در حدود ۹۰ درصد بین مدل‌های احتمالاتی است و همچنین مدل نهایی به‌دست‌آمده با واقعیت دارای تطابق است که نشان می‌دهد روش پیشنهادی روشی قابل قبول و دارای صحت است.

**واژه‌های کلیدی:** اصفهان، خشکسالی، روش تقریب سمبلیک، زنجیره مارکوف.

## مقدمه

خشکسالی از جمله مخاطرات طبیعی است که به‌طور معمول دربرگیرنده منطقه وسیعی با زمان اثر طولانی است. خشکسالی با توجه به تأثیر بسزا در مسائل هواشناسی، کشاورزی، آبی و اقتصادی-اجتماعی، اثرهای مخرب و زیربنایی در حوزه زیست محیط خواهد داشت. به‌طور کلی با توجه به وابستگی خشکسالی به پارامترهای متعدد و پیچیدگی آن، تعریف مشخص برای این پدیده کار ساده‌ای نیست [۲]. محققان از دیدگاه‌های تخصصی متفاوت به آن می‌نگرند. بر همین اساس خشکسالی را می‌توان به سه دسته کلی هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژی تقسیم کرد [۱۲]. در این زمینه، هواشناسان خشکسالی را کاهش چشمگیر مقدار متعارف ریزش باران، محققان علوم کشاورزی آن را براساس حیات گیاهی و رطوبت خاک، و هیدرولوژیست‌ها خشکسالی را کاهش جریان رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی تعریف می‌کنند؛ از این‌رو تعیین دقیق خشکسالی نیازمند پایش همزمان این سه نوع خشکسالی و تأثیرات متقابل آنها بر یکدیگر است [۷].

بر اثر وقوع خشکسالی، کشاورزی به‌دلیل وابستگی به ذخایر رطوبتی خاک و آب اولین بخشی است که دچار مشکل می‌شود و پیرو آن با توجه به نیازهای مصرفی آب این بخش نیز با مشکل جدی مواجه می‌شود و در نتیجه سطح آب‌های جاری و زیرزمینی نیز کاهش پیدا می‌کند. با بازگشت بارش به حالت نرمال و پایان یافتن خشکسالی هواشناسی، سایر خشکسالی‌ها همچنان تا زمان احیای مجدد منابع آب سطحی و زیرزمینی ادامه دارند و پیامدهای نامطلوب آنها ادامه می‌یابد و اثرهای آن در مدت زمان طولانی و به شرط تغییر نیافتن بارش بازگشت‌پذیرند [۱]. با توجه به اثرها و پیامدهای ناشی از خشکسالی در بخش کشاورزی و آبی از یک‌سو و زمان‌بر بودن طی دوره خشکسالی و بازگشت به شرایط عادی از سوی دیگر، اهمیت پیش‌بینی و پایش خشکسالی در مدیریت‌های زیست‌محیطی بسیار محسوس است.

پیش‌بینی خشکسالی می‌تواند اهمیت زیادی در کاهش خسارات این پدیده داشته باشد که منوط به تعریف دقیق آن و مرتبط ساختن خشکسالی با یک سری زمانی از شاخص‌های مرتبط با آن است. بر همین اساس شاخص‌های متعددی تعریف شده‌اند که در طول دوره زمانی برای پیش‌بینی خشکسالی مدلسازی می‌شوند. بر اساس مطالعات، این شاخص‌ها به دو دسته کلی شاخص‌های هواشناسی و شاخص‌های ماهواره‌ای سنجش از دور تقسیم می‌شوند [۵]. رایج‌ترین شاخص‌های هواشناسی، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص شدت خشکسالی پالمیر (PDSI) است. شاخص‌های ماهواره‌ای سنجش از دور عموماً شاخص‌های مشتق از شاخص‌های پوشش گیاهی (VI)، دمای سطح زمین (LST) و مشتقات آنها هستند [۶]، هرچند شاخص‌های

مختلف گیاهی، با دمای سطح زمین همبستگی قوی دارند و در روش‌های تخمین ضریب گسیل سطح به‌منظور تعیین دمای سطح زمین به‌کار گرفته می‌شوند [۳، ۴]؛ اما تلفیق آنها سبب ایجاد شاخص‌های جدید سنجش از دوری می‌شود که در زمینه پیش‌بینی و پایش خشکسالی کاربرد دارند. در جدول ۱ برخی از این شاخص‌ها معرفی شده است. از مزایای استفاده از روش سنجش از دور نسبت به روش‌های هواشناسی می‌توان به افزایش نقاط نمونه‌برداری، سطح پوشش وسیع‌تر، قدرت تفکیک زمانی بیشتر و هزینه کمتر اشاره کرد. علاوه بر این، شاخص‌های سنجش از دوری، امکان بررسی تأثیرات خشکسالی بر گیاهان را فراهم می‌کند [۲۰].

تا کنون روش‌های متعددی برپایه استفاده از شاخص‌های هواشناسی و سنجش از دوری برای مدلسازی و پیش‌بینی خشکسالی ارائه شده‌اند. برخی از این مطالعات تنها مبتنی بر استفاده از شاخص‌های هواشناسی بودند که متداول‌ترین آنها به‌کارگیری شاخص شدت خشکسالی پالمر، شاخص ذخیره آب سطحی، شاخص دهک‌ها، شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص رطوبت محصول (CMI) بودند. در مقابل در برخی از پژوهش‌ها تنها از شاخص‌های سنجش از دوری (ماهواره‌ای) استفاده شده است. همچنین پژوهش‌هایی هم در زمینه رابطه بین این دو گروه از شاخص‌ها و استفاده از هر دو نوع شاخص برای پیش‌بینی خشکسالی نیز انجام گرفته است [۱۱، ۹]. در پایش خشکسالی افزون بر نوع شاخص استفاده‌شده، روش پیش‌بینی و مدلسازی برای رسیدن به نتیجه قابل قبول دارای اهمیت است. بیشتر پژوهش‌ها در این زمینه از روش‌های رگرسیون ساده خطی تک‌متغیره یا چندمتغیره استفاده کرده‌اند. همچنین در برخی دیگر از پژوهش‌ها، روش‌های محاسبات هوشمند و فازی به‌کار گرفته شده است که از جمله می‌توان به روش‌های شبکه عصبی، رگرسیون بردار پشتیبان، تلفیق شبکه عصبی و فازی و ماشین بردار کمترین مربعات اشاره کرد.

جدول ۱. برخی از شاخص‌های سنجش از دوری مرتبط با پایش خشکسالی

شاخص	رابطه	ارائه دهنده
شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده NDVI	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	تکر ۱۹۷۶
شاخص سلامت پوشش گیاهی VCI	$VCI = \frac{NDVI_t - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \times 100$	کوگان ۱۹۹۷
شاخص وضعیت دما TCI	$TCI = \frac{BT_{max} - BT_n}{BT_{max} - BT_{min}} \times 100$	کوگان ۱۹۹۷
شاخص ناهنجاری گیاهی تفاضلی نرمال شده NDVIA	$NDVIA = NDVI - \overline{NDVI}$	انیامبا ۲۰۰۱
شاخص گیاهی ذخیره آب WSVI	$WSVI = \frac{NDVI}{LST}$	کلارسون ۱۹۹۸

دستورانی و همکاران (2011) از شبکه عصبی برای پیش‌بینی مقادیر SPI براساس داده‌های یک ایستگاه هواشناسی در یزد استفاده کردند. کسکین و همکاران (2011) نیز از شبکه عصبی برای پیش و تجزیه و تحلیل شاخص‌های هواشناسی استفاده کردند. نیکبخت و حیدرنژاد (2012) از روش ماشین بردار پشتیبان برای مدل‌سازی شاخص SPI به منظور پیش‌بینی خشکسالی هواشناسی در حوضه آبخیز کارون استفاده کردند. شیرمحمدی و همکاران (2013) نیز از تلفیق دو روش موجک و عصبی و عصبی با منطق فازی برای پیش‌بینی شاخص‌های هواشناسی منطقه جنوب شرقی استان آذربایجان شرقی استفاده کردند. جلیلی و همکاران (2014) با استفاده از روش‌های شبکه عصبی و بردار ماشین پشتیبان با به کارگیری شاخص‌های سنجش از دوری خشکسالی کل ایستگاه‌های ایران را مدل‌سازی و پیش‌بینی کردند.

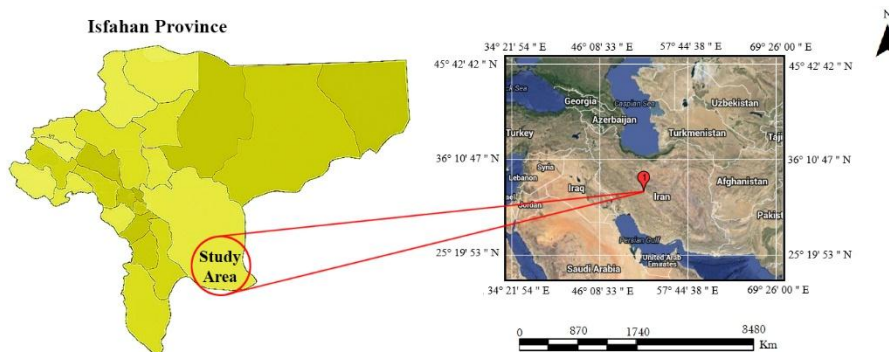
روش‌های که تاکنون با تحلیل سری زمانی شاخص‌های خشکسالی، به منظور پیش‌بینی خشکسالی استفاده شده‌اند، اغلب به صورت مطلق و عددی مقدار شاخص را براساس نوعی برون‌یابی از تابع برازش داده شده به سری زمانی پیش‌بینی می‌کنند. در صورتی که اولاً خشکسالی یک پدیده با ماهیت کیفی است لذا حتی در صورت عددسازی این پدیده در نهایت ارائه نتایج به صورت یک تحلیل کیفی انجام می‌شود و ثانیاً ماهیت پیش‌بینی همواره به صورت احتمالاتی است که در نتیجه ارائه یک مقدار ثابت و مشخص خیلی معنادار نیست. مشکل دیگر روش‌های موجود در تعیین بازه‌های ارتباطی هر داده با داده‌های قبلی است که به نوعی با توجه به عدم قطعیت در تعیین این بازه‌ها (تأخیر) نوعی خطا وارد پیش‌بینی می‌شود. در این پژوهش سعی شده است پیش‌بینی به گونه‌ای صورت بگیرد که موارد بالا در آن لحاظ شود.

در این پژوهش همزمان از شاخص‌های هواشناسی (شاخص بارش استاندارد SPI) و شاخص‌های سنجش از دوری (شاخص سلامت پوشش گیاهی VCI و شاخص وضعیت دما-پوشش گیاهی TVX) استفاده شد. بر همین مبنا سری زمانی ماهانه در بازه زمانی زمستان ۲۰۰۰ تا تابستان ۲۰۱۵ برای این سه شاخص تشکیل شد و با استفاده از روش تقریب سمبلیک مقادیر این شاخص‌ها به داده‌های کیفی (ترسالی شدید، ترسالی، نرمال، خشکسالی، خشکسالی شدید) مرتبط تبدیل شدند و سپس با به کارگیری روش زنجیره مارکوف یک مدل احتمالاتی بر مبنای داده‌های کیفی به دست آمده از روش تقریب سمبلیک، برای خشکسالی پیش‌بینی شد.

### منطقه و داده‌های تحقیق

منطقه تحقیق در این پژوهش اقلیم شرقی استان اصفهان است که منطقه‌ای نیمه‌بیابانی است و

در محدوده عرض جغرافیایی  $34^{\circ} 21' 54''$  N تا  $36^{\circ} 10' 47''$  N و طول جغرافیایی  $45^{\circ} 42' 42''$  E تا  $46^{\circ} 08' 33''$  E قرار دارد. شکل ۱ منطقه تحقیق را نشان می‌دهد. داده‌های استفاده‌شده در این مقاله داده‌های دمای سطح زمین (LST) و شاخص گیاهی تفاضلی نرمال‌شده (NDVI) است که از محصولات سنجنده MODIS که به‌طور رایگان از سایت مشاهدات زمینی ناسا [NASA Earth Observation] دریافت شد همچنین داده‌های دیگر استفاده‌شده مقدار بارش بود که از داده‌های TRMM برای این منظور استفاده شد. این داده‌ها برای مدت ۱۶ سال از زمستان ۲۰۰۰ تا تابستان ۲۰۱۵ به‌طور ماهانه دریافت شدند.



شکل ۱. منطقه تحقیق

## روش‌شناسی

در این بخش از مقاله روش‌های به‌کاررفته در این پژوهش تشریح شدند در بخش اول روش تقریب سمبلیک [Symbolic Aggregation Approximation (SAX)] و در بخش دوم روش زنجیره مارکوف توضیح داده شده است.

### روش تقریب سمبلیک

روش تقریب سمبلیک از روش‌های نمایش یک سری زمانی است که توسط لین و همکاران در سال ۲۰۰۳ ارائه شده است. این روش یک سری زمانی دلخواه را به‌عنوان ورودی دریافت می‌کند و به مجموعه‌ای از رشته به‌عنوان خروجی تبدیل می‌کند [۱۶]. روش تقریب سمبلیک یک سری زمانی دلخواه به طول  $n$  را می‌تواند به یک رشته دلخواه به طول  $w$  تبدیل کند ( $w < n$ ) و به‌طور متداول ( $w \ll n$ ). این روش بر مبنای پیروی سری‌های زمانی نرمال‌شده از توزیع

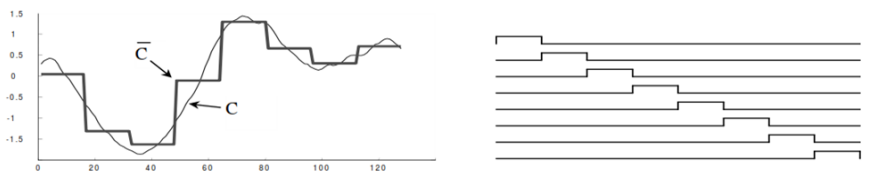
گوسین استوار است [۱۵]. روش تقریب سمبلیک از دو مرحله اصلی تشکیل شده است. ابتدا، اجرای تبدیل تقریب مجموع قطعه‌ای [Piecewise Aggregation Approximation (PAA)] به منظور کاهش بعد سری زمانی و دوم، گسسته‌سازی به منظور تبدیل سری زمانی به دست‌آمده از مرحله قبل به رشته.

### تبدیل تقریب مجموع قطعه‌ای

تبدیل تقریب مجموع قطعه‌ای سری زمانی  $C$  به طول  $n$  را به بردار  $\bar{C} = (\bar{C}_1, \bar{C}_2, \dots, \bar{C}_w)$  با طول دلخواه  $w$  تبدیل می‌کند که مقدار هر مؤلفه از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\bar{C}_i = \frac{w}{n} \sum_{j=\frac{n}{w}(i-1)+1}^{\frac{n}{w}i} C_j \quad (1)$$

در رابطه بالا،  $\bar{C}$  تقریب مجموع قطعه‌ای سری زمانی،  $w$  تعداد قطعه‌بندی انجام‌شده در تبدیل PAA است. به عبارت دیگر تبدیل تقریب مجموع قطعه‌ای به منظور کاهش بعد از  $n$  به  $w$ ، ابتدا سری زمانی اصلی را به  $w$  قسمت برابر تقسیم کرده و مقدار میانگین را برای هر قسمت محاسبه می‌کند. دنباله به دست‌آمده از مقادیر میانگین در واقع تبدیل مجموع قطعه‌ای برای سری زمانی اصلی است. شکل ۲ نمایشی از این تبدیل است.

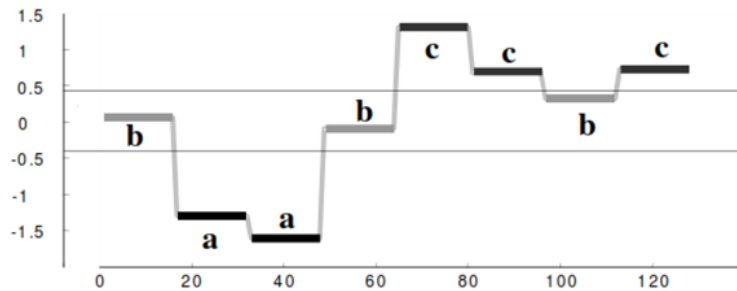


شکل ۲. نمایش تبدیل تقریب مجموع قطعه‌ای

### گسسته‌سازی

پس از داشتن تبدیل تقریب مجموع قطعه‌ای سری زمانی اصلی می‌توان یک تبدیل دیگر به منظور به دست آوردن یک ارائه گسسته از سری زمانی انجام داد. لذا گسسته‌سازی‌ای که بر مبنای تولید یک رشته سمبل با احتمال مشابه با سری زمانی اصلی باشد می‌تواند بسیار مفید باشد. در روش تقریب سمبلیک با به کارگیری دو پارامتر نقطه انفصال [Break point] و کلمه [Word] سری زمانی تبدیل‌شده در مرحله قبل را به حالت گسسته تبدیل می‌کند. کلمه در واقع مجموعه‌ای از رشته‌هاست که برای تبدیل سری زمانی به آنها به کار می‌رود. به این صورت

که در هر بازه بین نقاط انفصال با یک رشته از مجموعه کلمه جایگزین می‌شود. شکل ۳ نمایشی از گسسته‌سازی است؛ با فرض اینکه نقاط انفصال ۰/۴۷ و ۰/۴۷- تعریف شده‌اند و کلمه به صورت abc تعریف شده باشد.



شکل ۳. نمایش از گسسته سازی

### زنجیره مارکوف

زنجیره مارکوف از روش‌های مدل‌سازی است که در آن حالت سیستم از طریق مدل مارکوف و براساس حالت‌های قبلی سیستم و احتمالات گذار پیش‌بینی می‌شود [۸]. ماتریس احتمال گذار  $P$ ، یک ماتریس مربعی است با درایه‌های  $p_{ij}^{(m)}$  که از طریق رابطه ۲ تعیین می‌شود و براساس آن ماتریس احتمال گذار  $P$  به صورت رابطه ۳ نیز قابل تعریف است که در این ماتریس احتمال حالت‌های آغازین سیستم در ستون سمت چپ و احتمال حالت‌هایی که سیستم از آنها گذر می‌کند در طول سطرهای ماتریس نشان داده شده است. با توجه به ماهیت احتمالی بودن درایه‌ها، مقادیر آنها بین صفر و یک قرار است و همچنین جمع احتمالات گذار از یک حالت به تمام حالت‌های ممکن دوره زمانی بعدی باید برابر یک باشد.

$$p_{ij}^{(m)} = \frac{M_{ij}^{(m)}}{M_i} \quad (2)$$

به حالت  $j$  پس از  $m$  گام و  $i$  به حالت  $i$  به حالت  $j$  پس از  $m$  گام،  $M_{ij}^{(m)}$  دفعات انتقال از حالت  $i$  به حالت  $j$  پس از  $m$  گام و  $M_i$  تعداد داده‌هایی است که به حالت  $i$  تعلق دارند.

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{j1} & \cdots & P_{jj} \end{bmatrix} \quad j = 1, 2, 3, \dots, r \quad (3)$$

### پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

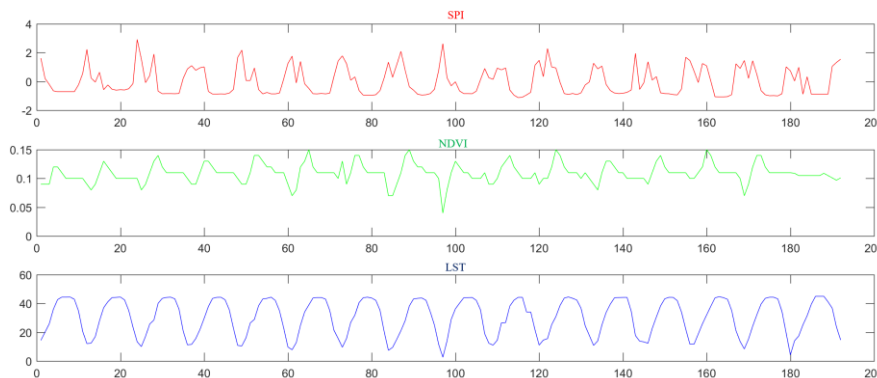
این بخش از مقاله نحوه به‌کارگیری روش پیشنهادی برای پیش‌بینی خشکسالی در منطقه اقلیمی شرق استان اصفهان را تشریح می‌کند که از سه بخش اصلی تشکیل شده است: ۱. پیش‌پردازش داده‌ها؛ ۲. به‌کارگیری تبدیل‌های SAX و زنجیره مارکوف؛ ۳. پیش‌بینی و ارائه مدل احتمالاتی برای پیش‌بینی خشکسالی و ارزیابی نتایج.

#### پیش‌پردازش داده‌ها

ابتدا با استفاده از داده‌های سنجنده TRMM مقدار شاخص بارش استاندارد SPI از طریق رابطه ۴ برای سری زمانی ماهانه از زمستان ۲۰۰۰ تا پایان تابستان ۲۰۱۵ محاسبه شد.

$$SPI = \frac{P - \mu(P)}{\delta(P)} \quad (4)$$

$P$  مقدار بارش، و  $\mu$  و  $\delta$  به ترتیب مقدار میانگین و انحراف معیار برای یک دوره زمانی مشخص‌اند که در این تحقیق ۱۲ ماه برای این منظور در نظر گرفته شده است. شکل ۴ نمایشی از سری‌های زمانی SPI، LST و NDVI در منطقه تحقیق است. جدول ۲ برخی از ویژگی‌های این داده‌ها را نمایش می‌دهد.



شکل ۴. نمایش سری زمانی SPI، LST و NDVI

با استفاده از داده‌های سری زمانی دمای سطح زمین (LST) و همچنین شاخص گیاهی نرمال‌شده (NDVI) برای بازه زمانی مشابه با داده‌های بارش دو شاخص TVX و VCI با استفاده از معادله‌های ۵ و ۶ محاسبه شدند.



$$TVX = \frac{LST}{NDVI} \quad (5)$$

$$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (6)$$

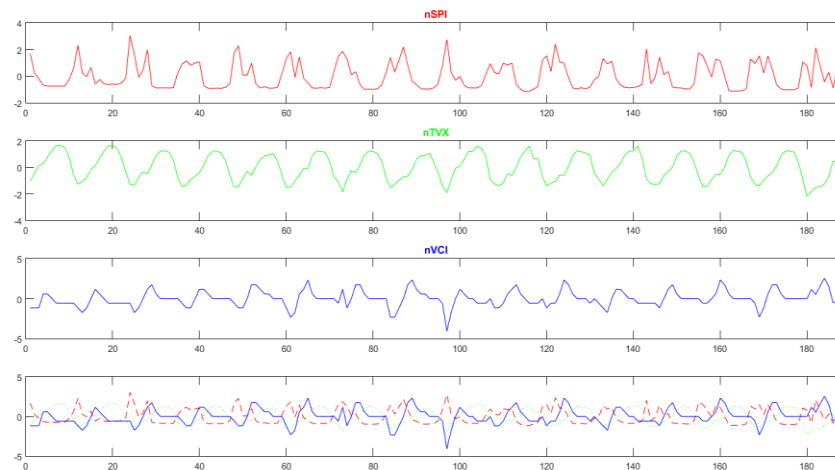
جدول ۲. برخی از اطلاعات آماری مربوط به NDVI، SPI و LST در منطقه تحقیق

Index	Mean	SD	Max	Min
SPI	۰	۰/۹۵	۲/۹۲	-۱/۱۲
NDVI	۰/۱۰	۰/۰۲	۰/۱۵	۰/۰۴
LST (°C)	۳۰/۵۱	۱۲/۵۸	۴۵	۲/۶۶

در رابطه ۶،  $NDVI_{min}$  و  $NDVI_{max}$  به‌ترتیب کمینه و بیشینه مقدار NDVI در یک دوره زمانی بلندمدت است و کمیت NDVI در رابطه ۶ مقدار آن در همان ماه است. برای این شاخص بازه‌های زمانی برای تعیین بیشینه و کمینه چهارساله در نظر گرفته شد. دلیل به‌کارگیری شاخص TVX در این تحقیق استفاده همزمان این شاخص از دو پارامتر مهم و مرتبط با خشکسالی دمای سطح زمین و پوشش گیاهی است. شاخص‌های خشکسالی TVX، SPI و VCI برای یک مجموعه زمانی نزدیک به ۱۶ سال ساخته شدند. با توجه به اینکه مقادیر این شاخص‌ها در محدوده‌های بازه‌ای مختلف قرار دارند و هدف این پژوهش تلفیق این سه شاخص به‌منظور پیش‌بینی کامل هر سه نوع خشکسالی است سری زمانی هر شاخص از طریق رابطه ۷ نرمال‌سازی شد.

$$Index = \frac{Index - \mu(Index)}{\delta(Index)} \quad (7)$$

در رابطه بالا،  $Index$  نشان‌دهنده مقدار شاخص و  $\mu$  و  $\delta$  به‌ترتیب مقدار میانگین و انحراف معیار شاخص را نشان می‌دهند. شکل ۵ سری زمانی نرمال‌شده شاخص‌های به‌کارگرفته‌شده برای منطقه تحقیق را نشان می‌دهند. محور افقی نشان‌دهنده زمان است که به‌طور پیوسته شماره‌گذاری شده است ماه ژانویه ۲۰۰۰ نقطه شروع در نظر گرفته شد و کار در گام‌های ماهانه تا تاریخ سپتامبر ۲۰۱۵ انجام گرفت. همچنین محور عمودی نشان‌دهنده مقدار نرمال‌شده هر شاخص است.

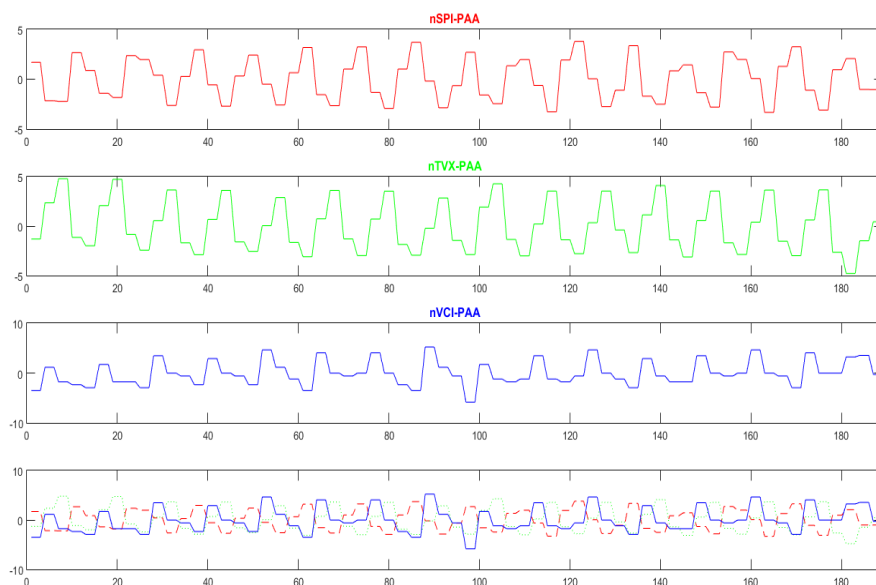


شکل ۵. نمایش سری زمانی شاخص‌های خشکسالی (از بالا به پایین: شاخص SPI، TVX و VCI - و سری زمانی آخر مربوط به هر سه شاخص است)

#### به کارگیری تبدیل‌های SAX و زنجیره مارکوف

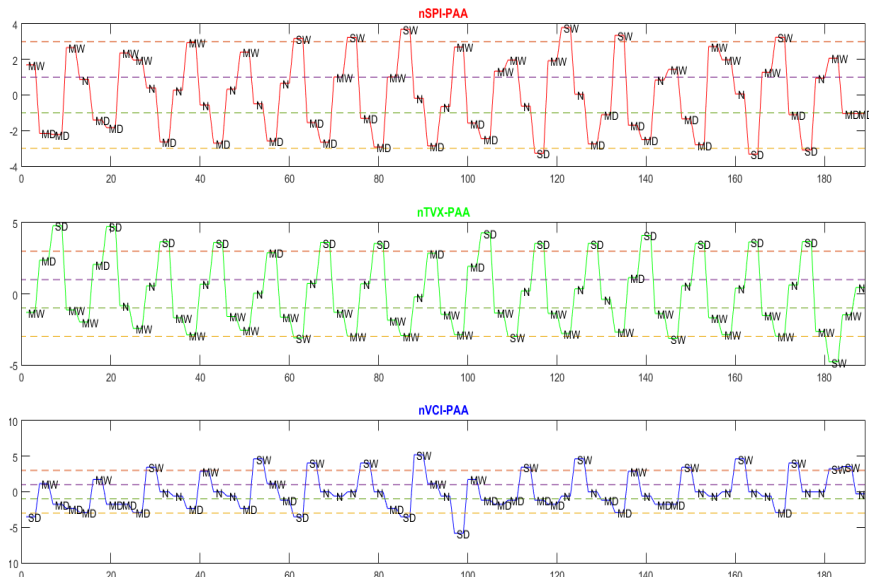
در این مرحله، سری‌های زمانی نرمال شده به عنوان ورودی در روش SAX به کار گرفته شدند. ابتدا با توجه به اینکه تغییرات محیطی به طور محسوس تری در فصل‌ها تغییر می‌کنند، مقدار  $w$  برای تبدیل PAA برابر ۶۳ در نظر گرفته شد تا سری‌های زمانی به صورت فصلی کاهش بعد پیدا کنند. شکل ۶ نمایش PAA سری زمانی شاخص‌های به کاررفته در این تحقیق است. در گام بعدی با فرض در نظر گرفتن توزیع گوسین برای هر شاخص مقادیر  $\delta$  و  $3\delta$  به عنوان نقاط انفصال برای روش SAX انتخاب شدند. این مقادیر براساس سطوح احتمال در نظر گرفته شدند و رشته‌های در نظر گرفته برای تبدیل SAX به شرح زیر انتخاب شدند:

۱. SW: ترسالی شدید
۲. MW: ترسالی
۳. N: نرمال
۴. MD: خشکسالی
۵. SD: خشکسالی شدید



شکل ۶. نمایش PAA سری زمانی شاخص‌های خشکسالی (از بالا به پایین: شاخص SPI، TVX و VCI - و سری زمانی آخر مربوط به هر سه شاخص است)

با توجه به اینکه دو شاخص SPI و VCI رفتاری برخلاف شاخص TVX دارند و به‌عبارت دیگر مقادیر بالا برای دو شاخص اول به‌معنای ترسالی و برای شاخص TVX به‌معنای خشکسالی است از این‌رو شرط تعریف‌شده برای شاخص TVX مخالف دو شاخص دیگر است. بر این مبنای دو شاخص SPI و VCI محدوده بزرگ‌تر از  $3\delta$  ترسالی شدید (SW)، بین  $3\delta$  و  $\delta$  ترسالی (MW)، بین  $\delta$  و  $-\delta$  نرمال (N)، بین  $-\delta$  و  $-3\delta$  خشکسالی (MD) و کمتر از  $-3\delta$  به‌عنوان خشکسالی شدید (SD) در نظر گرفته شده و به‌صورت متضاد برای شاخص TVX تعریف شدند. با توجه به همین قواعد تبدیل SAX پیاده‌سازی شد و سری‌های زمانی به مجموعه‌ای از رشته‌ها که بیانگر کیفیت خشکسالی هستند تبدیل شدند. شکل ۷ نمایش این تبدیل برای هر یک از سری‌های زمانی است. محور افقی نشان‌دهنده محدوده زمانی و محور عمودی نشان‌دهنده مقدار PAA هر شاخص و مقدار نوشته‌شده بر روی هر محدوده مقدار جدید سری زمانی است. به‌عبارت دیگر سری‌های زمانی ورودی بعد از تبدیل SAX به مجموعه رشته‌ای از مقادیر کیفی مربوط به خشکسالی تبدیل شده‌اند.



شکل ۷. نمایش تبدیل سری زمانی شاخص‌های خشکسالی (از بالا به پایین: شاخص SPI، TVX و VCI - و سری زمانی آخر مربوط به هر سه شاخص است)

بعد از تبدیل سری زمانی هر شاخص به داده کیفی از طریق روش SAX در مرحله بعدی این مجموعه داده‌های کیفی با استفاده از روش زنجیره مارکوف برای پیش‌بینی احتمال در حالت بعدی آماده‌سازی شد. به عبارت دیگر ماتریس حالت گذار برای هر شاخص تعیین شد. شکل ۸ مقادیر احتمالاتی برای هر شاخص از طریق زنجیره مارکوف را نشان می‌دهد.

#### ارائه مدل احتمالاتی برای پیش‌بینی خشکسالی و ارزیابی

در این مرحله ابتدا مقادیر احتمالاتی به دست آمده ارزیابی شد. برای این منظور ضریب همبستگی بین مقادیر احتمالاتی هر شاخص با شاخص‌های دیگر برای بررسی دقت محاسبه شدند. نتایج این ارزیابی نشان می‌دهد: ۱. ضریب همبستگی بین شاخص SPI و TVX برابر ۰/۸۹ است؛ ۲. ضریب همبستگی بین شاخص SPI و VCI برابر ۰/۹۵ است؛ ۳. ضریب همبستگی بین شاخص VCI و TVX برابر ۰/۸۹ است. همبستگی زیاد بین مقادیر احتمالاتی نشان‌دهنده قابل قبول بودن مقادیر احتمالاتی به دست آمده است.

با توجه به قابل قبول بودن نتایج به دست آمده در گام بعدی پیش‌بینی وضعیت خشکسالی برای پاییز ۲۰۱۵ در اقلیم شرقی اصفهان انجام گرفت. برای این منظور براساس مقادیر

احتمالاتی به دست آمده با به کارگیری وضعیت آخر، هر سه شاخص حالت خشکسالی برای ماه بعدی پیش بینی شد. نتایج این پیش بینی نشان می دهد که در پاییز ۲۰۱۵ در اقلیم شرقی اصفهان به احتمال ۲ درصد خشکسالی شدید، به احتمال ۱۲ درصد خشکسالی، به احتمال ۵۰ درصد وضعیت معمولی (نرمال)؛ به احتمال ۲۵ درصد

ترسالی و به احتمال ۱۰ درصد ترسالی شدید اتفاق می افتد. برای ارزیابی نتایج حاصل مقادیر سه شاخص SPI، VCI و TVX برای سه ماه اکتبر، نوامبر و دسامبر ۲۰۱۵ محاسبه شدند. جدول ۳ مقادیر این شاخص ها را نشان می دهد.

	SD	MD	N	MW	SW		SD	MD	N	MW	SW
SD	۰/۶۶	۰	۰/۱۲	۰/۲۲	۰	SD	۰/۶۷	۰	۰	۰/۱۷	۰/۱۶
MD	۰/۰۲	۰/۷۹	۰/۰۸	۰/۱	۰/۰۱	MD	۰/۰۳	۰/۸۱	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۱
N	۰/۰۴	۰/۱۴	۰/۶۸	۰/۰۹	۰/۰۳	N	۰/۰۲	۰/۱۰	۰/۸۲	۰	۰/۰۵
MW	۰	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۷۳	۰/۰۸	MW	۰	۰/۱۹	۰/۱۴	۰/۶۶	۰
SW	۰	۰/۲۲	۰/۱۱	۰	۰/۶۷	SW	۰	۰/۰۳	۰/۲۳	۰/۶۶	۰

(۲)

(۱)

	SD	MD	N	MW	SW
SD	۰/۶۶	۰	۰/۳۳	۰	۰
MD	۰/۰۴	۰/۷۹	۰/۱۰	۰/۰۶	۰/۰۱
N	۰	۰/۰۵	۰/۶۶	۰/۰۵	۰/۲۳
MW	۰	۰/۱۲	۰	۰/۶۶	۰/۲۲
SW	۰	۰/۲۸	۰/۰۶	۰	۰/۶۶

(۳)

شکل ۸. مقادیر احتمالاتی شاخص ها از طریق زنجیره مارکوف (۱) مدل احتمالاتی برای شاخص خشکسالی VCI (۲) مدل احتمالاتی برای شاخص خشکسالی SPI (۳) مدل احتمالاتی برای شاخص خشکسالی TVX

جدول ۳. مقادیر سه شاخص VCI، SPI و TVX برای سه ماه اکتبر، نوامبر و دسامبر ۲۰۱۵

	SPI	TVX	VCI
اکتبر	۱/۰۵	۳۶۳/۶۹	۰/۳۸
نوامبر	۱/۳۲	۲۴۵/۱۵	۰/۳۴
دسامبر	۱/۵۵	۱۴۵/۴۰	۰/۳۹

جدول ۴. مقادیر نرمال شده سه شاخص VCI، SPI و TVX برای سه ماه اکتبر، نوامبر و دسامبر ۲۰۱۵

	SPI	TVX	VCI
اکتبر	۱/۰۹	۰/۸۳	-۱/۴۰
نوامبر	۱/۳۷	-۰/۲۷	-۱/۴۰
دسامبر	۱/۶۱	-۱/۲۰	-۱/۴۰

در مرحله بعد مقادیر نرمال شده برای این شاخص‌ها بر مبنای رابطه ۷ برای دوره زمانی کلی محاسبه شدند و بر این مبنای و با توجه به مقادیر حد آستانه که پیشتر تعریف شدند به یکی از گروه‌های خشکسالی شدید، خشکسالی، نرمال، ترسالی و ترسالی شدید اختصاص پیدا کردند. جدول ۴ مقادیر نرمال به دست آمده شاخص‌ها را نشان می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهد در ماه اکتبر وضعیت در محدوده خشکسالی و نرمال است و در ماه‌های بعدی نرمال و نرمال ترسالی است که این نتایج با مدل احتمالاتی به دست آمده از روش پیشنهادی تطابق دارد. همچنین با توجه به شرایط فصلی (پاییز و زمستان) انتظار افزایش بارش و کاهش دما وجود دارد که با توجه به بررسی خشکسالی در مقیاس ماهانه می‌تواند توجیه دیگری بر صحیح بودن مدل احتمالاتی باشد.

### نتیجه‌گیری

این پژوهش به منظور بررسی خشکسالی، یکی از مخاطرات طبیعی و موضوعات چالش‌برانگیز کشورمان ایران به منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی آن انجام گرفت. برای این منظور سری زمانی سه شاخص VCI و TVX و SPI بین دوره زمانی زمستان ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ تابستان طراحی و استفاده شدند. در این پژوهش با تلفیق روش‌های SAX و زنجیره مارکوف این کار انجام گرفت.

مزیت استفاده از تلفیق این روش‌ها (روش پیشنهادی) نسبت به روش‌های دیگر ارائه یک مدل احتمالاتی با دید کیفی به پدیده خشکسالی است. در واقع با توجه به ماهیت پدیده خشکسالی که کیفی است و از سوی دیگر ماهیت پیش‌بینی که به‌صورت احتمالاتی و فازی است، این روش منطقی‌تر از دیگر روش‌های مدل‌سازی به نظر می‌رسد. از سوی دیگر با توجه به همبستگی قوی بین مدل‌های احتمالاتی به‌دست‌آمده و همچنین اجرای روش برای حالت مشخص و مشاهده نتیجه منطقی برای این حالت، دقت روش پیشنهادی در این پژوهش نیز مناسب و قابل قبول ارزیابی شد. همچنین پیش‌بینی انجام‌گرفته برای خشکسالی در پاییز ۲۰۱۵ نشان می‌دهد که به احتمال حدود ۵۰ درصد وضعیت نرمال خواهد بود که با مقادیر به‌دست‌آمده از سنجنده‌های سنجش از دوری برای منطقه در آن فصل تطابق دارد.

نویسندگان این مقاله برای کارهای آتی بررسی تأثیر تغییرات مقادیر نقاط انفصال روش SAX بر نتیجه مدل احتمالاتی و همچنین تعیین این مقادیر براساس شرایط هر اقلیم را پیشنهاد می‌کنند. افزون بر این، به‌کارگیری و بررسی قواعد دیگری برای کیفی‌سازی شاخص‌ها که در روش SAX به‌کار می‌روند یا استفاده از روش دیگری برای نمایش سری‌های زمانی، می‌تواند در زمینه پیشبرد این پژوهش راهگشا باشد.

## منابع

- [۱]. جوادنیا، اسلام؛ و مباحثی، محمدرضا (۱۳۸۶). «بررسی روش‌های ارزیابی خشکسالی کشاورزی با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دوری»، ششمین کنفرانس اقتصاد کشاورزی ایران، مشهد: انجمن اقتصاد کشاورزی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد.
- [۲]. جوانمرد، سهیلا؛ بذاق جمالی، جواد؛ احمدیان، جواد؛ و جاودانی، ناصر (۱۳۷۹). «سیستم مراقبت از شدت و وسعت خشکسالی براساس پهنه‌بندی شاخص پالمر»، اولین کنفرانس ملی بررسی راهکارهای مقابله با کم‌آبی و خشکسالی، کرمان: دانشگاه باهنر کرمان.
- [۳]. جویباری مقدم، یاسر؛ آخوندزاده، مهدی؛ و سراجیان، محمدرضا (۱۳۹۴). «ارائه یک الگوریتم پنجره مجزای نوین به‌منظور تخمین دمای سطح زمین از داده‌های لندست-۸»، نشریه علمی پژوهشی علوم و فنون نقشه‌برداری، ج ۵، ش ۱، ص ۱۸۷-۱۷۵.
- [۴]. جویباری مقدم، یاسر؛ آخوندزاده، مهدی؛ و سراجیان، محمدرضا (۱۳۹۴). «ارائه روشی نوین مبتنی بر شاخص‌های گیاهی به‌منظور تخمین ضریب گسیل سطح از تصاویر ماهواره لندست-۸»، نشریه علمی پژوهشی علوم و فنون نقشه‌برداری، ج ۵، ش ۱، ص ۲۲۶-۲۱۵.

- [۵]. سلیمانی، علی (۱۳۸۹). «تحلیل خطرپذیری خشکسالی»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی.
- [۶]. محمودی کهن، فرهاد؛ اسماعیلی، علی؛ و هانی، سید مسعود (۱۳۹۰). «مطالعه نقش بارندگی در وقوع خشکسالی در مناطق خشک با استفاده از شاخص‌های گیاهی سنجش از دور (مطالعه موردی رفسنجان)»، همایش ژئوماتیک ۹۰، تهران: سازمان نقشه‌برداری کشور.
- [۷]. مؤذن‌زاده، روزبه؛ ارشد، صالح؛ قهرمان، بیژن؛ و داوری، کامران (۱۳۹۱). «پایش خشکسالی در کشت‌های غیرآبی با استفاده از تکنیک سنجش از دور»، نشریه مدیریت آب و آبیاری، ج ۲، ش ۲، ص ۳۹-۵۲.
- [8]. Baum, Leonard E.; & Petrie, Ted (1966). "Statistical Inference for Probabilistic Functions of Finite State Markov Chains", *the Annals of Mathematical Statistics*, vol. 37, No. 6, pp: 1554-1563.
- [9]. Berhan, Getachew; Hill, Shawndra; Tadesse, Tsegaye; & Atnafu, Solomon (2011). "Using satellite images for drought monitoring: a knowledge discovery approach." *Journal of Strategic Innovation and Sustainability*, vol.7, No. 1, pp: 135-153.
- [10]. Coco, Musaningabe Rulinda (2007). "Mining Drought from Remote Sensing Images." MSc thesis, *Geo-information Science and Earth Observatio*.
- [11]. Dastorani, Mohammad Taghi; Afkhami, Hamideh (2011). "Application of artificial neural networks on drought prediction in Yazd (Central Iran)", *Desert*, vol. 16, pp: 4-39.
- [12]. Gebrehiwot, Tagel; Van der Veen, Anne; & Maathuis, Ben Maathuis (2011). "Spatial and temporal assessment of drought in the northern highlands of Ethiopia", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 13, pp: 309-332.
- [13]. Heim, Richard (2002). "A review of twentieth-century drought indices used in the United States." *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 83, PP: 1149-1165.
- [14]. Jalili, Mahdi; Gharibshah, Joobin; Ghavami, Seyed Morsal; Beheshtifar, Mohammadreza; & Farshi, Reza (2014). "Nationwide prediction of drought conditions in Iran based on remote sensing data", *IEEE Transaction on Computers*, vol. 63, No.1, pp: 90-101.
- [15]. Keskin, M. Erol; Taylan, E. Dilek; & Kuuml, Derya (2009). "Meteorological drought analysis using artificial neural networks." *Scientific Research and Essays*, vol. 6, No. 2, pp: 4469-4477.
- [16]. Larsen, Richard J. ; & Marx, Morris L. (1986). "An Introduction to Mathematical Statistics and Its Applications." Prentice Hall, Englewood, Cliffs, N.J. 2nd Edition.
- [17]. Lin, Jessica; Keogh, Eamonn; Lonardi, Stefano; & Chiu, Bill (2003). "A symbolic representation of time series, with implications for streaming



- algorithms.” In Proceedings of the 8th ACM SIGMOD workshop on Research issues in data mining and knowledge discovery 2003 Jun 13, pp: 2-11, ACM.
- [18]. Nikhbakht Shahbazi, Alireza; Heidarnejhad, Mohammad (2012). “Meteorological Drought Prediction in Karoon Watershed using Meteorological Variables.” *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, Vol 3, No 9, pp 1760–1768.
- [19]. Palmer, Wayne (1965). "Meteorological Drought". Research paper No.45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau.
- [20]. Shirmohammadi, Bagher; Moradi, Hamidreza; Moosavi, Vahid; Taei Semiromi, Majid; & Zeinali, Ali (2013). “Forecasting of meteorological drought using wavelet-ANFIS hybrid model for different time steps (Case study: southeastern part of east Azerbaijan province, Iran)”, *Natural Hazards*, vol. 69, pp: 389–402.
- [21]. Wilhite, Donald A. (2000). “Drought as a natural hazard.” In D. A. Wilhite (Ed.), *Drought. A Global Assessment*, vol. 1, pp: 1-18, London: Routledge.