



Modeling transition probability of the Various Classes of the Standardized Precipitation Index (SPI) in a monthly scale in Iran

Peyman Mahmoudi^{1*}, Taghi Tavousi², Allah Bakhsh Rigi³

1- Associate Professor, Department of Physical Geography, Geography and Regional Planning Faculty, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

2- Professor, Department of Physical Geography, Geography and Regional Planning Faculty, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

3- M.Sc of climatology, Department of Physical Geography, Geography and Regional Planning Faculty, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

p_mahmoudi@gep.usb.ac.ir

Abstract

Drought is a natural disaster, which frequently or continually occurs. This phenomenon affects all societies in respect to economical, bioenvironmental and developmental aspects etc. The main objective of this study is predicting transitions of Monthly Drought Class Probabilities of Iran using Markov chain model. Monthly precipitation data are of 43 synoptic of country within an interval of 34 years (1976- 2009) are used to achieve the objectives of this research. After providing data base four drought classes or four statue of droughts are considered using standardized precipitation index, then transitions frequency matrix for above mentioned stations are evaluated using these statues, meanwhile data correlation is assessed using independent K-square test. The results of this test confirmed correlated data of 20stations. Finally, after arranging the transition probability matrices for these stations modeling of homogeneous and non-homogeneous Markov chains and extracted features of them including the occurrence probability of each class from drought severity, residence term in each class from drought severity, expected time period from different drought classes to wet class and predicting short-term drought are obtained. The results of Predicting different drought classes using homogeneous Markov chain showed for all conditions the results of predicting drought in each class of primary conditions of drought class are obtained. The results of non-homogeneous Markov chain showed Predicting climate classes occurred for next 1,2 and 3 months for first conditions (January, April and October). The mild drought is predicted for most of stations of different drought classes within future 1, 2 and 3 future months in the winter. When the first month is April in spring, and the first condition in this spring is severe and extreme drought for Semnan Station and Yazd, then the predicted class in above mentioned stations for next three months will be severe and extreme droughts. The obtained results of two homogeneous and non-homogeneous Markov chains showed the non-homogeneous Markov chain, while depends on first month, but it is more enable to predict different droughts classes and the homogeneous Markov chains is not recommended for predicting droughts of country.

Keywords: drought, homogeneous, non-homogeneous Markov chains, Iran

مدلسازی احتمال انتقال طبقات مختلف شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در یک مقیاس ماهانه برای ایران

پیمان محمودی^{۱*}، تقی طاوسی^۲، اله بخش ریگی^۳

۱- دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲- استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۳- دانش آموختارشناسی ارشد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

p_mahmoudi@gep.usb.ac.ir

چکیده

خشکسالی یکی از بلایای طبیعی است که به صورت مکرر یا متناوب اتفاق می‌افتد و تمامی ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی یک جامعه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هدف اصلی این پژوهش پیش بینی احتمال انتقال طبقات مختلف خشکسالی‌های ایران با استفاده از مدل زنجیره مارکوف است. جهت دستیابی به اهداف پژوهش از داده های بارش ماهانه ۴۳ ایستگاه سینوپتیک کشور در یک دوره ۳۴ ساله (۲۰۰۹-۱۹۷۶) استفاده شد. بعد از فراهم شدن پایگاه داده‌ها با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) چهار طبقه خشکسالی یا عبارتی دیگر چهار حالت از خشکسالی در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از این حالت‌ها ماتریس فراوانی انتقالات برای ایستگاه‌های مورد بررسی تهیه و با استفاده از آزمون خی دو مستقل و همبسته بودن داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمون خی دو همبسته بودن داده‌های ۲۰ ایستگاه را مورد تأیید قرار داد. در نهایت بعد از تنظیم ماتریس احتمال انتقالات برای ایستگاه‌های مورد مطالعه، مدل بندی زنجیره های مارکوف همگن و غیر همگن انجام و ویژگی‌های مارکوفی خشکسالی ها شامل احتمال وقوع طبقات مختلف شدت خشکسالی ها، متوسط زمان ماندگاری قابل انتظار در هر طبقه از شدت خشکسالی ها، زمان اولین گذار قابل انتظار از طبقات مختلف خشکسالی ها به طبقه ترسالی و پیش بینی کوتاه مدت طبقات مختلف خشکسالی ها استخراج شدند. بطور کلی نتایج حاصل از دو زنجیره مارکوف همگن و غیر همگن نشان داد که زنجیره مارکوف غیر همگن با توجه به آنکه وابستگی به ماه آغازین دارد توانایی بیشتری برای پیش بینی طبقات مختلف خشکسالی از خود نشان می‌دهد و زنجیره مارکوف همگن که مستقل از ماه است از این توانایی بی بهره است.

واژه های کلیدی: خشکسالی، زنجیره مارکوف همگن، زنجیره مارکوف غیر همگن، ایران

۱- مقدمه

بلاای طبیعی بخشی از حوادث محیط اطراف ما را تشکیل می‌دهند که بخشی از این حوادث ناشی از فعالیت‌ها و فرایندهای ژئومورفولوژیکی نظیر سیل، آتشفشان، زمین لرزه بوده و برخی دیگر ناشی از فرایندهای آب و هوایی مانند خشکسالی، طوفان‌های سهمگین، رعد و برق و ... می‌باشند. این بلاها همواره بر زندگی انسان‌ها تأثیر منفی داشته و در بیشتر موارد آسیب‌های جبران ناپذیری را در پی دارند. امروزه تعداد و موارد وقوع این حوادث نسبت به ۳۰ سال گذشته افزایش یافته و حدود ۲۵٪ از آن‌ها رخدادهایی می‌باشند که به نحوی با عوامل جوی مرتبط هستند (محمدی و همکاران، ۱۳۸۲). در میان این پدیده‌ها فراوانی خشکسالی‌ها بیش از سایر حوادث می‌باشد. به طوری که تعداد کل آسیب دیدگان از خشکسالی‌ها طی سال‌های ۱۹۶۶ تا ۱۹۸۸ بالغ بر یک و نیم میلیارد نفر برآورد شده است که ۵۲ درصد آسیب دیدگان از کل بلاهای طبیعی است (بری ابرقویی و همکاران، ۱۳۸۲).

کشور پهناور ایران که در یکی از مناطق خشک و نیمه خشک جهان قرار دارد بارشی حدود یک سوم بارش جهانی را دریافت می‌کند (کردوانی، ۱۳۷۱). این میزان بارش کم نیز در سال‌های مختلف دارای نوسانات شدیدی می‌باشد که پیامدهایی همچون کاهش عملکرد مراتع، کاهش تولید محصولات زراعی، کاهش منابع آب کشاورزی و ... را در پی دارد بگونه‌ای که در یک مطالعه انجام شده در زمینه شدت و وسعت خشکسالی‌های ایران طی دوره آماری ۴۰ ساله مختوم به سال ۲۰۰۳ مشخص شده است که در سال آبی ۱۹۹۹-۲۰۰۰ بیش از ۹۶ درصد گستره ایران در سیطره خشکسالی قرار داشته است. علاوه بر این، بیش از دو خشکسالی گسترده دیگر در سال‌های ۱۹۷۱-۱۹۷۰ و ۱۹۸۹-۱۹۸۸ اتفاق افتاده است که به ترتیب ۸۲/۲۱ و ۹۲/۰۵ درصد مساحت کشور را در بر گرفته است (بذرافشان، ۱۳۸۹). بنابراین پیش بینی و تعیین ویژگی‌های خشکسالیها یا ترسالیها در یک منطقه، یکی از نیازهای اساسی برنامه ریزان محیطی و اقتصادی به ویژه

برنامه ریزان مدیریت منابع آب می‌باشد. علاوه بر این، پیش بینی خشکسالی برای ماه‌های آینده به کشاورزان کمک خواهد کرد تا با تغییر در تاریخ کشت محصولات و استفاده از ارقام مقاوم به خشکسالی خسارات ناشی از این پدیده را به حداقل برسانند. در چند دهه اخیر برای پیش بینی خشکسالی از روش‌های آماری مختلفی استفاده شده است که زنجیره مارکوف یکی از این روش‌هاست. زنجیره مارکوف این امکان را فراهم می‌آورد تا آینده را با بکار بردن حالت‌های احتمالی و ماتریس احتمال انتقال پیش بینی کنند. این زنجیره در علوم مختلفی مانند هواشناسی، اقتصاد و صنعت کاربرد وسیعی دارد بگونه‌ای که فرینگ و توماس در سال ۱۹۶۲ (به نقل از وفاه خواه و بشری سه قلعه، ۱۳۹۱) جزء نخستین محققانی بودند که زنجیره مارکوف مرتبه یک را برای تولید داده‌های جریان رودخانه‌ای پیشنهاد دادند. بعد از آن‌ها محققان زیادی پدیده‌های مختلفی را با این مدل بررسی کردند که میتوان به مطالعات فیرهرم و دین بارک (۱۹۶۷)، مارتین واید و گومز (۱۹۹۸)، اوچالا و همکاران (۲۰۰۳)، عساکره و مازینی (۱۳۸۹) در مدلسازی احتمالاتی وقوع روزهای (۱۳۶۳)، سلیقه و همکاران (۱۳۹۰) در بررسی احتمال وقوع روزهای بارش و علیجانی و همکاران (۱۳۸۹) در بررسی تداوم روزهای یخبندان در ایران اشاره کرد. خشک و تر، هاپکینز و رابیلارد (۱۹۶۴)، استرن (۱۹۸۰)، میهروتا و شارما (۲۰۰۷)، هاشمی (۱۳۴۵)، مشکانی

همچنین از مطالعات صورت گرفته برای پیش بینی خشکسالی با این مدل میتوان به مطالعات لوهانی و لوگانتان (۱۹۹۶) و لوهانی و همکاران (۱۹۹۸) در ایالت ویرجینیا، آناگنوستوپلو و همکاران (۲۰۰۳) و تولیکا و ماهرس (۲۰۰۵) در یونان، پائولو و پیرا (۲۰۰۷) در جنوب پرتغال، لیو و همکاران (۲۰۰۹) در چین، حجازی زاده و شیرخانی (۱۳۸۴) و علیزاده و آشگر طوسی (۱۳۸۷) در خراسان، علیزاده و همکاران (۱۳۸۷) در سیستان و بلوچستان، بشیر زاده و عراقی نژاد (۱۳۸۹) در استان لرستان، وفاه خواه و بشری سه قلعه (۱۳۹۱) در حوزه آبخیز کشف رود و بنی مهد و خلیلی (۱۳۹۳) در رودخانه اترک و دریاباری (۱۳۸۵) و قمقامی و بذرافشان

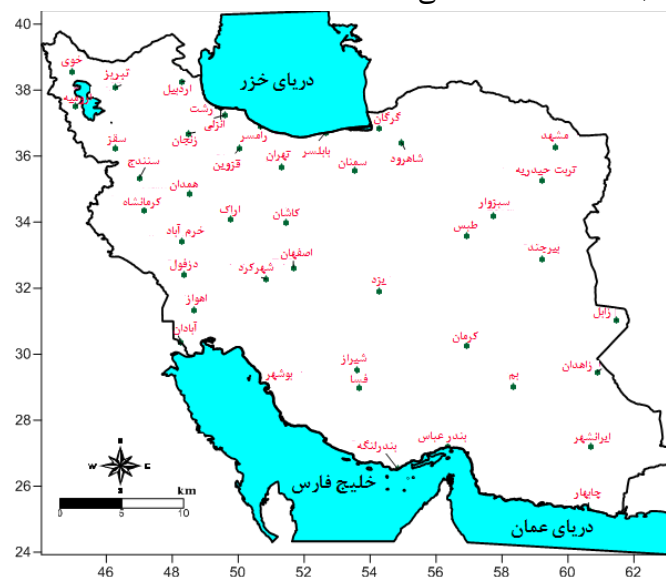
های ایران، آمار بارش ماهانه ۴۳ ایستگاه سینوپتیک کشور برای یک دوره ۳۴ ساله (۲۰۰۹-۱۹۷۶) استفاده شد. این داده‌ها دارای آماری کامل و قابل اعتماد بودند که اندک خلاء آماری آنها با استفاده از همبستگی و مدل‌های رگرسیونی بازسازی شدند. همچنین جهت بررسی درجه صحت و اطمینان داده‌ها از نظر همگنی، از آزمون ران تست (علیزاده، ۱۳۸۹) که مورد توصیه مراجع علمی هواشناسی است برای کلیه ایستگاه‌ها مورد آزمون قرار گرفت و همگنی آن‌ها در سطح بالایی مورد پذیرش قرار گرفتند. توزیع و پراکنش ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل (۱) آورده شده است.

(۱۳۹۱) در گستره ایران اشاره نمود.

بنابراین همواره پیش بینی خشکسالی یکی از دغدغه‌های بزرگ هواشناسان و اقلیم‌شناسان بوده است و در رسیدن به این هدف از روش‌ها و شاخص‌های مختلفی استفاده کرده‌اند؛ لذا هدف اصلی این مطالعه پیش بینی احتمال انتقال طبقات مختلف خشکسالی‌های ماهانه در ایران با استفاده از زنجیره مارکوف است که می‌تواند در راستای توسعه ابزارهای هشدار سریع خشکسالی‌های ماهانه ایران بسیار کمک رسان باشد.

۲- مواد و روش‌ها

برای مدل‌سازی احتمال انتقال طبقات مختلف خشکسالی



شکل ۱- نقشه موقعیت و پراکنش ایستگاه‌های مورد مطالعه

توزیع نرمال استاندارد انتقال داده شد. روش محاسباتی مذکور بطور کامل و جامع در منابع مک کی و همکاران (۱۹۹۳، ۱۹۹۵)، نگارش و همکاران (۱۳۸۹) و زمانی و همکاران (۲۰۱۳) قابل دسترس است. در طبقه بندی خشکسالی براساس شاخص بارش استاندارد شده، مقدار SPI منفی بیانگر بارش کمتر از مقدار متوسط بلندمدت و نشانه‌ی خشکسالی و مقدار SPI مثبت نمایانگر بارش بیشتر از متوسط بلندمدت و پایان خشکسالی را نوید

بعد از تشکیل بانک اطلاعاتی مورد نیاز برای شناسایی فراوانی درجات مختلف خشکسالی در ایران از نمایه بارش استاندارد شده (SPI) در مقیاس زمانی یک ماهه استفاده شد. این نمایه که براساس متغیر بارش استوار است توسط مک کی و همکاران (۱۹۹۳) عرضه و بطور گسترده در سطح جهان مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش داده‌های بارش هر ایستگاه با توزیع گاما برازش و احتمال مقادیر بارش در این توزیع برای دستیابی به مقادیر SPI به

در طول زمان نشان می‌دهد. در این مطالعه، از زنجیره های مارکوف مرتبه اول چهار حالت برای تعیین ویژگی های خشکسالی های ایران استفاده شد. نخستین گام جهت استفاده از مدل زنجیره مارکوف، فراهم نمودن ماتریس شمارش فراوانی انتقالات است. ماتریس شمارش فراوانی انتقالات از شمارش تعداد حالت ها بدست می آید. در گام بعدی از روی ماتریس فراوانی انتقالات، ماتریس احتمال انتقالات محاسبه خواهد شد. برای محاسبه این ماتریس از فرمول (۱) بهره گرفته می شود.

$$\hat{p} \quad (1)$$

که n_{ij} ، شمارش تعداد دفعاتی است که مقدار X_t از حالت i به حالت j انتقال می یابد (جهت آشنایی با نحوه تنظیم این ماتریس ها به منبع علیجانی و همکاران، ۱۳۸۹ مراجعه شود).

بعد از تنظیم ماتریس فراوانی انتقالات، نکته مهم، آزمون وابسته یا مستقل بودن حالت های مختلف ماتریس فراوانی انتقالات است که این آزمون با استفاده از آزمون χ^2 در سطح احتمالاتی $0.05 + \alpha$ و با درجه آزادی $df = (r - 1)(c - 1)$ انجام گرفت که r نشان دهنده تعداد ردیف ها و c تعداد ستون های هر یک از ماتریس های فراوانی انتقالات می باشند.

در نهایت بعد از آزمون وابسته یا مستقل بودن حالت های مختلف ماتریس فراوانی انتقالات و با استفاده از ماتریس احتمال انتقالات می توان ویژگی های مارکوفی مورد نظر را- که در ادامه خواهد آمد از سری زمانی مورد مطالعه استخراج نمود. مدل زنجیره مارکوف با توجه به وابستگی آن به زمان به دو دسته زنجیره مارکوف همگن و زنجیره مارکوف غیر همگن تقسیم می شوند.

در مدل زنجیره مارکوف همگن، ویژگی های مارکوفی سری زمانی مورد مطالعه هیچ گونه وابستگی به یک زمان مشخص ندارند به عبارت دیگر مستقل از زمان آغازین مورد مطالعه هستند. اما در زنجیره مارکوف غیر همگن ویژگی های مارکوفی استخراج شده به زمان شروع محاسبه وابستگی دارند یعنی وابستگی کامل به زمان

می‌دهد (جدول ۱).

جدول ۱- طبقه بندی خشکسالی براساس شاخص SPI

وضعیت	عدد مربوط به شاخص
ترسالی حاد	$SPI \leq -2$
ترسالی شدید	$-1.5 \leq SPI \leq -0.99$
ترسالی متوسط	$-1 \leq SPI \leq -0.49$
ترسالی خفیف	$-0.50 \leq SPI \leq -0.99$
نرمال	$-0.49 \leq SPI \leq -0.99$
خشکسالی ضعیف	$-0.99 \leq SPI \leq -1.50$
خشکسالی متوسط	$-1.49 \leq SPI \leq -1$
خشکسالی شدید	$-1.99 \leq SPI \leq -1.50$
خشکسالی بسیار شدید	$SPI \leq -2$

با توجه به اینکه اندازه نمونه و تعداد حالت های یک سری زمانی می‌تواند بر روی دقت برآوردهای یک مدل زنجیره مارکوف تأثیر گذار باشند (پائولو و پری، ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸) لذا در این مطالعه چهار طبقه خشکسالی یا عبارتی دیگر چهار حالت از خشکسالی در نظر گرفته شده است طبقه بدون خشکسالی (۰)، خشکسالی ضعیف (۱)، خشکسالی متوسط (۲) و خشکسالی شدید و یا بسیار شدید (۳). آستانه های در نظر گرفته شده برای این طبقه بندی در واقع همان آستانه های پیشنهاد شده برای شاخص SPI هستند (مک کی و همکاران، ۱۹۹۳ و ۱۹۹۵) با این تفاوت که طبقات شدید و بسیار شدید در یک گروه قرار داده شده اند. در نهایت بعد از محاسبه و طبقه بندی شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، از زنجیره مارکوف جهت پیش بینی های کوتاه مدت خشکسالی های ایران بهره گرفته شد.

۲-۱- زنجیره مارکوف

مدل زنجیره مارکوف یکی از تکنیک های ریاضی برای تحلیل پدیده های تصادفی است که تداومی از مشاهدات را

$$P(X_1=i|X_0=i)P(X_2=i|X_1=i)...$$

$$P(X_{m-2}=i|X_{m-1}=i)P(X_m \neq i|X_{m-1}=i) \quad (4)$$

$$P_{ii}^{m-1}(1-P_{ii})$$

بنابراین، دانستن احتمالات ماندگاری مداوم در هر طبقه خشکسالی i در طول مدت m ماه ($m=1,2,...,k...$)، زمان ماندگاری قابل انتظار در هر طبقه خشکسالی i $E(T_i|X_0)$ بصورت زیر محاسبه می شود.

$$E(T_i|X_0) = \sum_k k P(m=k|X_t=i) \quad (5)$$

میانگین زمان اولین گذار قابل انتظار از طبقات مختلف خشکسالی به طبقه ترسالی

متوسط مدت زمانی که طول می کشد تا فرایند برای اولین بار از یک طبقه آغازین i به یک طبقه دیگر j ، t_{ij} انتقال یابد زمان اولین گذار قابل انتظار نامیده می شود که راه حل یکتای سیستم معادلات خطی است.

$$t_{ij} = 1 + \sum_{k \neq j} P_{ik} t_{kj} \quad \forall i, j \in S \quad (6)$$

در معادله بالا t_{ij} ، متوسط زمان انتقال از کلاس i به کلاس j ، P_{ik} ، احتمال انتقال از کلاس i به کلاس k و t_{kj} ، میانگین اولین زمان گذار با رفتن از کلاس k به کلاس j است.

پیش بینی کوتاه مدت طبقه خشکسالی

پیش بینی کوتاه مدت طبقه خشکسالی مبتنی بر یک طرح پیش بینی شرطی شامل برآورد احتمالاتی تمامی مسیرهای محتمل از حالت فعلی i در زمان t ، $(X_t=i)$ به تمام حالت های آتی j که ممکن است در m ماه آینده $(X_{t+m}=j)$ رخ دهد. پذیرش فرمول بندی زنجیره مارکوف همگن جهت برآورد محتمل ترین طبقه ۱، ۲ و ۳ ماه آینده از روی ماه کنونی به شرح زیر بیان می شود:

$$P(X_{t+1}=j|X_t=i) \quad (7)$$

$$P(X_{t+2}=j|X_t=i) = \sum_{\forall k \in S} P(X_{t+2}=j|X_{t+1}=k) \cdot P(X_{t+1}=k|X_t=i) \quad (8)$$

$$[P(X)]_{t+3} = j|X_t=i) = \sum_{\forall i \in S} \sum_{\forall k \in S} P(X_{T+3}=j|X_{T+2}=i) \cdot P(X_{T+2}=i|X_{T+1}=k) \cdot P(X_{T+1}=k|X_T=i) \quad (9)$$

آغازین مورد مطالعه وجود دارد. مدل بندی زنجیره های مارکوف همگن و غیر همگن امکان محاسبه ویژگی های زیر را میسر می سازند.

- احتمال وقوع هر طبقه از شدت خشکسالی
- زمان ماندگاری در هر طبقه از شدت خشکسالی
- میانگین زمان اولین گذار قابل انتظار از طبقات مختلف خشکسالی به طبقه ترسالی
- پیش بینی کوتاه مدت خشکسالی

زنجیره مارکوف همگن

احتمال وقوع هر طبقه از شدت خشکسالی

در زنجیره مارکوف همگن اولین ویژگی استخراج شده، احتمال وقوع هر طبقه از شدت خشکسالی است که به آن احتمال ساکن نیز گفته می شود که در واقع بیانگر احتمال وقوع هر یک از طبقات مختلف خشکسالی در طول دوره آماری مورد مطالعه است. در بلند مدت، احتمال وقوع طبقات مختلف خشکسالی مستقل از حالت آغازین زنجیره مارکوف خواهند بود. این احتمالات، π_j همچنین اشاره به احتمالات وضعیت پایا نیز دارند. این احتمالات راه حل یکتای سیستم معادلات خطی هستند:

$$\begin{cases} \pi_j = \sum_{k \in S} \pi_k p_{kj}, j \in S \\ 1 = \sum_{j \in S} \pi_j \end{cases} \quad (2)$$

که π_j احتمال بلندمدت طبقه خشکسالی j می باشد، یعنی:

$$\pi_j = \lim_{t \rightarrow \infty} \forall i \quad p(X_t=j|X_0=i), i \wedge j \in S \quad (3)$$

زمان ماندگاری در هر طبقه از شدت خشکسالی

زمان ماندگاری هر طبقه از شدت خشکسالی، اشاره به تداوم زمانی هر یک از طبقات خشکسالی دارد. مثلاً اگر حالت آغازین برای یک ماه، طبقه خشکسالی متوسط باشد، این خشکسالی متوسط چند ماه دیگر دوام خواهد داشت. احتمال یک ماندگاری مداوم، در طول m ماه، در یک طبقه خاص i ، متناظر با حاصلضرب احتمالات انتقال متوالی بین X_m و X_0 است که به شکل زیر نشان داده می شود.

۲-۲- زنجیره مارکوف غیر همگن

در زنجیره های مارکوف غیر همگن، ماتریس‌های احتمال انتقال، ۱۲ ماهه در نظر گرفته می‌شوند که بیانگر انتقال طبقات از ماه ژانویه به فوریه؛ فوریه به مارس، ... و دسامبر به ژانویه است. این ماتریس‌ها، ماتریس‌هایی چرخشی هستند که تغییرات سالانه در آن‌ها مشاهده نمی‌شود بلکه احتمالات انتقال آن‌ها تنها به ماه و نه به سال بستگی دارد. احتمال انتقال این نوع از مدل زنجیره مارکوف به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_{i,j}^{(n,n+1)} = P[X_{n+1}=j | X_n = i], \text{ for } i, j = 1, 2, \dots, 4 \text{ and } n = 1, 2, \dots, 12 \quad (11)$$

که شکل ساده شده آن به صورت زیر می‌باشد:

$$p_{i,j}^{(n,n+1)} = N_{i,j}^{(n,n+1)} / n_{i,j}^{(n)} \quad (12)$$

که $N_{i,j}^{(n,n+1)}$ تعداد انتقالات از طبقه i در ماه n به طبقه j در ماه $n+1$ ، $N_i^{(n)}$ تعداد وقوع طبقه i در ماه n است (لوهانی و لاگاناتان، ۱۹۹۷؛ لوهانی و همکاران، ۱۹۹۸).

احتمال وقوع هر طبقه از شدت خشکسالی

دانستن احتمال وقوع طبقات مختلف خشکسالی برای هر ماه مورد نظر می‌تواند بسیار مفید و سودمند باشد. استعداد خشکسالی یک منطقه در مقادیر احتمالات بالا برای وقوع طبقات مختلف خشکسالی منعکس می‌شود. احتمال وقوع هر طبقه از شدت خشکسالی بطور کلی از فرمول زیر بدست می‌آید.

$$\text{row}[month_{n+1}] = \text{row}[month_n] [p_n] \quad (13)$$

معادله ۱۳ ابزاری جهت ارزیابی احتمالات طبقه ساکن خشکسالی/ترسالی ماهانه فراهم می‌کند که البته ماه آغازین می‌تواند هر یک از ۱۲ ماه سال باشد.

زمان ماندگاری در هر طبقه از شدت خشکسالی

زمان ماندگاری قابل انتظار یک طبقه خاص از خشکسالی، طول مدت زمان ماندگاری آن طبقه از خشکسالی را برای آن منطقه نشان می‌دهد. خشکسالی طبقه i بدون اینکه به طبقه دیگری انتقال یابد برای m مدت زمان در منطقه باقی خواهد ماند که رخداد وقوع آن به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\{X_1 = i = X_2 = \dots = X_{m-1} | X_0 = i\} \quad (14)$$

مدت زمان ماندگاری قابل انتظار برای طبقه j ، $E[R_{ij}]$ بصورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\begin{aligned} E[R_{ij} | \text{starting month}] &= \sum_k k P[m] \\ &= K | \text{starting month} \end{aligned} \quad (15)$$

که R_{ij} ، متغیر تصادفی توصیف کننده زمان ماندگاری در طبقه j است. معادله (۱۵) جهت محاسبه زمان ماندگاری قابل انتظار برای هر ماه و هر طبقه آغازین برای ایستگاه های مورد مطالعه محاسبه شد.

میانگین زمان اولین گذار قابل انتظار از طبقات مختلف خشکسالی به طبقه ترسالی

زمان اولین گذار قابل انتظار به عنوان میانگین مدت زمانی تعریف می‌شود که برای فرایند طول می‌کشد تا از یک طبقه خشکسالی، i ، به عنوان نقطه آغازین، به طبقه دیگر خشکسالی، j ، جابجا شود و با m_{ij} نشان داده می‌شود. جهت محاسبه میانگین اولین گذار برای تمامی ایستگاه های مورد مطالعه از فرمول زیر استفاده شد

$$m_{i,j}^{(n)} = 1 + \sum_{k \neq j} p_{i,k}^{(n,n+1)} m_{k,j}^{(n+1)} \quad (16)$$

پیش بینی کوتاه مدت طبقه خشکسالی

در پیش بینی خشکسالی ماهانه در هر طبقه از خشکسالی i در طول ماه n ، بیشترین طبقه آب و هوایی یعنی K در ماه $(n+1)$ است که به شکل زیر بیان می‌شود.

انتقالات برای ۴۳ ایستگاه تهیه شد. سپس جهت اطمینان از همبسته و یا مستقل بودن حالت های مختلف خشکسالی به یکدیگر از آزمون خی دو استفاده شد. همبسته و مستقل بودن حالت های مختلف خشکسالی با استفاده از این آزمون در سطح احتمالاتی $\alpha = 0.05$ انجام شد که نتایج حاصل از این آزمون در جدول (۲) نشان داده شده است. از بین ۴۳ ایستگاه مورد مطالعه همبسته بودن داده‌های ۲۰ ایستگاه تایید شده است. در این جدول ایستگاه‌هایی که سطح معناداری آن‌ها از ۰/۰۵ کمتر هستند دارای ویژگی مارکوفی هستند و ایستگاه‌هایی که مقدار آن‌ها بیشتر از ۰/۰۵ است دارای ویژگی مارکوفی نیستند. موقعیت ایستگاه‌هایی که دارای ویژگی مارکوفی هستند در شکل (۲) آورده شده است.

جدول ۲ - نتایج آزمون خی دوی ایستگاه های مورد مطالعه

ایستگاه	آزمون خی دو	ایستگاه	آزمون خی دو
آبادان	۰	خرم آباد	۰
اهواز	۰/۳۳	خوی	۰/۹۲
انزلی	۰/۱۱	مشهد	۰/۲۹
اراک	۰/۱۱	ارومیه	۰/۳۳
اردبیل	۰/۷۷	رامسر	۰/۶۸
بابل	۰/۲۵	رشت	۰/۱۱
بم	۰	سبزوار	۰/۴۵
بندرعباس	۰	سقز	۰/۰۹
بندر لنگه	۰/۰۱	سنندج	۰/۰۶
بیرجند	۰	سمنان	۰
بوشهر	۰/۰۶	شهر کرد	۰/۱۸
چابهار	۰/۲۷	شاهرود	۰
دزفول	۰/۰۱	شیراز	۰
اصفهان	۰/۰۱	طیس	۰
فسا	۰	تبریز	۰/۶۹
قزوین	۰/۰۲	تهران	۰/۱۲
گرگان	۰/۹۱	تربت حیدریه	۰/۶۴
همدان	۰/۰۵	یزد	۰
ایران‌شهر	۰	زابل	۰
کاشان	۰/۱۴	زاهدان	۰
کرمان	۰	زنجان	۰/۰۴
کرمانشاه	۰		

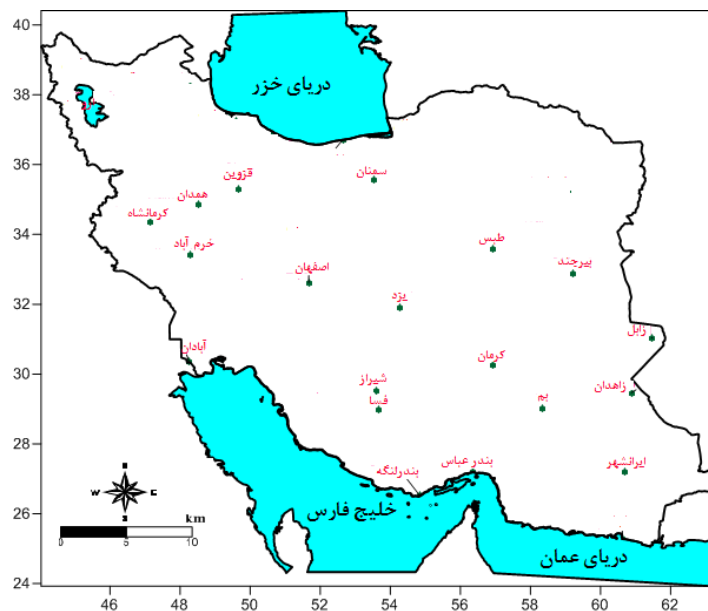
$$P_{MODE}[X_{n+1}|X_n=i] = K^* \quad (17)$$

که در آن K^* طبقه آب و هوایی است که رابطه آن با حداکثر $P_{i,k}^{(n,n+1)}$ برای همه هایی است که برای i داده شده است.

در این تحقیق استخراج ماتریس فراوانی انتقالات با استفاده از نرم افزار SPSS و محاسبه ویژگی های مارکوفی ایستگاه ها در محیط نرم افزاری MATLAB برنامه نویسی گردیده است.

۳- نتایج و بحث

در ابتدا برای برازش مدل زنجیره مارکوف بر داده‌های فراوانی وقوع طبقات مختلف خشکسالی‌ها، ماتریس فراوانی



شکل ۲- ایستگاه‌های باقیمانده از نتایج برازش آزمون خی دو

درصد وقوع در این طبقه ۰/۷۸ در ایستگاه کرمان و سپس ۰/۷۷ در ایستگاه فسا بوده است. همچنین ایستگاه بندر عباس با ۰/۵۳ و بیرجند با ۰/۵۶ کمترین میزان وقوع در این طبقه را دارند. ایستگاه‌هایی که در جنوب شرق و شرق و مرکز کشور قرار گرفته‌اند بیشترین درصد احتمال وقوع طبقه خشکسالی متوسط را داشته‌اند که می‌توان به ایستگاه چابهار (۰/۲۲)، آبادان (۰/۱۸)، طبس و یزد (۰/۱۵) و زابل (۰/۱۴) اشاره کرد. بالاترین مقدار احتمال وقوع طبقه خشکسالی شدید و خیلی شدید متعلق به ایستگاه‌های یزد، کرمانشاه و چابهار ۰/۰۸ و سپس در ایستگاه‌های زابل، دزفول و بندر لنگه با ۰/۰۷ بوده است. همچنین احتمال وقوع این طبقه در ایستگاه ایرانشهر ۰ بوده است که می‌توان گفت خشکسالی شدید و خیلی شدید در این دوره مطالعاتی در این ایستگاه اتفاق نیفتاده است.

اولین ویژگی از زنجیره مارکوف همگن احتمال وقوع هر طبقه از شدت خشکسالی است که در واقع بیانگر احتمال وقوع هر یک از طبقات مختلف خشکسالی در طول دوره آماری مورد مطالعه است. احتمال وقوع هر طبقه از شدت خشکسالی برای ۲۰ ایستگاه باقی مانده با استفاده از ماتریس‌های احتمال انتقال برای ایستگاه‌هایی که ویژگی مارکوفی آن‌ها پذیرفته شده بود بدست آمد که نتایج آن در جدول (۳) آورده شده است. نتایج نشان داد که احتمال وقوع هر طبقه با افزایش شدت خشکسالی از طبقه خشکسالی ضعیف به خشکسالی شدید و خیلی شدید کاهش می‌یابد. بعنوان مثال احتمال وقوع خشکسالی ضعیف در زابل از ۰/۶۷ به ۰/۱۴ در طبقه خشکسالی متوسط و سپس به ۰/۰۷ در طبقه خشکسالی شدید و خیلی شدید کاهش می‌یابد. احتمال وقوع طبقه خشکسالی ضعیف بیشترین درصد وقوع را در بین طبقات مختلف خشکسالی را داشته است بگونه ای که بیشترین

جدول ۳- احتمال وقوع هر طبقه از شدت خشکسالی

ایستگاه	طبقات				ایستگاه	طبقات			
	۰	۱	۲	۳		۰	۱	۲	۳
آبادان	۰/۱۳	۰/۶۵	۰/۱۸	۰/۰۴	ایران‌شهر	۰/۲۴	۰/۷۲	۰/۰۴	۰
بم	۰/۳۱	۰/۶۵	۰/۰۳	۰/۰۱	کرمان	۰/۱۵	۰/۷۸	۰/۰۴	۰/۰۳
بندر عباس	۰/۴۴	۰/۵۳	۰/۰۲	۰/۰۱	کرمانشاه	۰/۲۱	۰/۶۷	۰/۰۴	۰/۰۸
بندر لنگه	۰/۱۳	۰/۷۳	۰/۰۷	۰/۰۷	خرم‌آباد	۰/۱۳	۰/۷۲	۰/۱۳	۰/۰۲
بیرجند	۰/۳۷	۰/۵۶	۰/۰۴	۰/۰۳	سمنان	۰/۱۶	۰/۷۳	۰/۰۷	۰/۰۴
چابهار	۰/۱۳	۰/۵۷	۰/۲۲	۰/۰۸	شیراز	۰/۳	۰/۶۳	۰/۰۴	۰/۰۳
دزفول	۰/۱۱	۰/۶۹	۰/۱۳	۰/۰۷	طیس	۰/۱۴	۰/۶۴	۰/۱۵	۰/۰۷
اصفهان	۰/۲۳	۰/۶۷	۰/۰۷	۰/۰۳	یزد	۰/۱۳	۰/۶۴	۰/۱۵	۰/۰۸
فسا	۰/۱۶	۰/۷۷	۰/۰۴	۰/۰۳	زابل	۰/۱۲	۰/۶۷	۰/۱۴	۰/۰۷
قزوین	۰/۱۵	۰/۷۵	۰/۰۵	۰/۰۵	زاهدان	۰/۳۶	۰/۵۸	۰/۰۴	۰/۰۲

طبقه از خشکسالی را داشته‌اند. همچنین کمترین زمان ماندگاری در این طبقه ۱/۲۷ ماه برای ایستگاه‌های چابهار و شیراز بوده است. در طبقه خشکسالی متوسط بیشترین مدت زمان ماندگاری مربوط به ایستگاه یزد با ۰/۴۷ و خرم آباد با ۰/۴۵ ماه بوده است و برای برخی از ایستگاه‌های شرق و جنوب شرق کشور مانند زاهدان، زابل، کرمان و قزوین هیچ تداومی مشاهده نشده است. در طبقه خشکسالی شدید و خیلی شدید بیشترین زمان ماندگاری این طبقه از خشکسالی ۰/۳۷ ماه مربوط به ایستگاه‌های سمنان و فسا می‌باشد و در جهت عکس زابل، آبادان و دزفول کمترین میزان تداوم را داشته‌اند همچنین در ایستگاه‌های بم، بندر عباس، خرم آباد و کرمان هیچ تداومی در این طبقه بدست نیامده است.

ویژگی دوم از زنجیره مارکوف همگن، مدت زمان ماندگاری قابل انتظار در هر طبقه از شدت خشکسالی است که متوسط طول مدت هر طبقه خشکسالی و سپس تداوم آن را نشان می‌دهد. زمان ماندگاری طبقه خشکسالی ضعیف نسبت به دیگر طبقات در کشور بیشتر است که نشان می‌دهد شرایط آب و هوایی تمایل به ماندن در وضعیت خشکسالی ضعیف را برای مدت زمان طولانی را دارد که جدول (۴) به خوبی گویای این مطلب است. براساس نتایج برآوردهای صورت گرفته شده در این تحقیق، بیشترین زمان ماندگاری در طبقه خشکسالی ضعیف در ایستگاه خرم آباد ۴/۲۷ ماه و سپس در ایستگاه‌های کرمان و فسا با ۳/۵۵ ماه بطول انجامیده است که نسبت به سایر ایستگاه‌ها بیشترین تداوم را در این

جدول ۴- متوسط زمان ماندگاری قابل انتظار در هر طبقه از شدت خشکسالی

ایستگاه	طبقات				ایستگاه	طبقات			
	۰	۱	۲	۳		۰	۱	۲	۳
آبادان	۰/۱۱	۱/۳۳	۰/۰۱	۰/۰۶	ایران‌شهر	۰/۴۳	۲/۸۵	۰/۲۳	۰/۳۳
بم	۰/۸۲	۲/۲۳	۰	۰	کرمان	۰/۱۵	۳/۵۵	۰	۰
بندر عباس	۱/۰۸	۱/۳۳	۰	۰	کرمانشاه	۰/۲۸	۱/۷	۰/۱	۰/۲۲
بندر لنگه	۰/۱۶	۳/۱۷	۰	۰/۲۸	خرم‌آباد	۱	۴/۲۶	۰/۴۵	۰
بیرجند	۱/۲۷	۱/۷	۰/۰۵	۰/۱	سمت‌ان	۰/۲	۳	۰/۱۶	۰/۳۷
چابهار	۰/۲۳	۱/۲۷	۰/۲۵	۰/۱۹	شیراز	۰/۲۳	۱/۲۷	۰/۲۲	۰/۲۷
دزفول	۰/۰۸	۱/۷	۰/۰۲	۰/۰۸	طبرس	۰/۱۵	۱/۳۸	۰/۰۲	۰/۱۱
اصفهان	۰/۳۹	۱/۸۶	۰/۰۸	۰/۱	یزد	۰/۲۲	۱/۹۴	۰/۴۷	۰/۱
فسا	۰/۱۶	۳/۵۵	۰/۱۵	۰/۳۷	زابل	۰/۱۶	۱/۶۳	۰	۰/۰۴
قزوین	۰/۱۲	۲/۷	۰	۰/۱۹	زاهدان	۱/۵	۲/۲۳	۰	۰/۱۴

خشکسالی را به طبقه ترسالی نشان می‌دهد. بیشترین زمان اولین گذار قابل انتظار از طبقه خشکسالی شدید و خیلی شدید به طبقه ترسالی مربوط به ایستگاه خرم‌آباد است که ۱۵/۱ ماه طول می‌کشد که از طبقه خشکسالی شدید و خیلی شدید به طبقه ترسالی برسیم و این زمان برای ایستگاه‌های چابهار و دزفول ۸/۷ ماه بطول می‌انجامد و در جهت عکس کمترین زمان اولین گذار قابل انتظار به طبقه ترسالی از این طبقه مربوط به ایستگاه‌های بندر عباس و ایستگاه شیراز است که ۳/۶ ماه بطول می‌انجامد. طولانی‌ترین زمان اولین گذار قابل انتظار از طبقه خشکسالی متوسط و طبقه خشکسالی ضعیف به طبقه ترسالی در ایستگاه خرم‌آباد بیشتر از سایر ایستگاه‌ها است که به ترتیب ۱۲/۴ و ۱۴/۱ ماه بطول انجامیده است.

متوسط زمان اولین گذار قابل انتظار از طبقات مختلف خشکسالی به طبقه ترسالی برای دانستن اینکه چه زمانی دوره خشکسالی یا ترسالی آغاز یا پایان خواهد یافت مفید است. به طور کلی مدت زمان ماندگاری قابل انتظار برای انتقال از طبقات خشکسالی به طبقه ترسالی، هنگامی که طبقات خشکسالی شدیدتر می‌شوند، طولانی‌تر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که شروع خشکسالی نسبت به خاتمه خشکسالی فرایندی کندتر به حساب می‌آید. برای مثال مدت اولین گذار قابل انتظار برای انتقال از طبقه ترسالی به یک طبقه خشکسالی ممکن است مدت زمان بسیاری طول بکشد در حالیکه برای انتقال از طبقات خشکسالی به طبقه بدون خشکسالی این زمان کمتر خواهد بود. جدول (۵) زمان اولین گذار قابل انتظار از طبقات مختلف

جدول ۵- متوسط زمان اولین گذار از هر طبقه از شدت خشکسالی به طبقه ترسالی

ایستگاه	طبقات گذار			ایستگاه	طبقات گذار		
آبادان	۸/۱	۸/۳	۸/۱	ایرانشهر	۴/۵	۵/۷	۴/۸
بم	۴	۵/۱	۵	کرمان	۶/۴	۶/۳	۷/۴
بندر عباس	۲/۶	۳/۲	۳/۶	کرمانشاه	۳/۲	۴/۳	۴/۴
بندر لنگه	۸/۵	۸/۳	۷/۳	خرم آباد	۱۴/۱	۱۲/۴	۱۵/۱
بیرجند	۳/۸	۴/۲	۴/۹	سمنان	۶/۳	۷/۱	۷/۷
چابهار	۸	۸/۳	۸/۷	شیراز	۲/۸	۳/۴	۳/۶
دزفول	۸/۴	۸/۷	۸/۷	طبرس	۷/۶	۷/۶	۸/۴
اصفهان	۴/۳	۵	۵/۶	یزد	۸/۵	۷/۸	۹
فسا	۶/۲	۵/۱	۷/۵	زابل	۸/۱	۷/۹	۸/۶
قزوین	۶	۷	۷	زاهدان	۴/۴	۵/۴	۴/۴

متوسط باشد حالت پیش بینی شده در ماه‌های آینده خشکسالی ضعیف خواهد بود و یا زمانی که طبقه آغازین خشکسالی شدید و یا خیلی شدید در این ایستگاه باشد حالت پیش بینی شده همان طبقه خشکسالی ضعیف خواهد بود.

پیش بینی طبقات مختلف خشکسالی برای تمام حالت‌ها با استفاده از زنجیره مارکوف همگن بدست آمد که نتایج آن در جدول (۶) آورده شده است. برای تمام ایستگاه‌های مورد بررسی در هر یک از حالت‌های آغازین، طبقه پیش بینی شده طبقه خشکسالی ضعیف است. بعنوان مثال زمانی که حالت آغازین در ایستگاه قزوین خشکسالی

جدول ۶- پیش بینی خشکسالی طبقات مختلف

ایستگاه	طبقات				ایستگاه	طبقات			
	۰	۱	۲	۳		۰	۱	۲	۳
آبادان					ایران شهر				
بم					کرمان				
بندر عباس					کرمانشاه				
بندر لنگه					خرم آباد				
بیرجند					سمنان				
چابهار					شیراز				
دزفول					طیس				
اصفهان					یزد				
فسا					زابل				
قزوین					زاهدان				

خشکسالی شدید

خشکسالی متوسط

خشکسالی ضعیف

ترسالی

گردید. احتمال وقوع طبقات مختلف خشکسالی در طبقه خشکسالی ضعیف بیشتر از سایر طبقات می باشد بیشترین احتمال وقوع طبقه خشکسالی ضعیف در ایستگاه های آبادان، دزفول و یزد زمانی که ماه آغازین ماه ژوئن باشد $0/9$ است همچنین در این طبقه زمانی که ماه آغازین یکی از ماه های فصل پاییز باشد برای ایستگاه زاهدان بیشتر از سایر ایستگاه ها می باشد. احتمال وقوع طبقه خشکسالی متوسط زمانی که ماه آغازین اکتبر باشد در ایستگاه یزد $0/6$ و زمانی که ماه آغازین ماه مه باشد برای ایستگاه آبادان $0/5$ است که نسبت به سایر ایستگاه بیشتر است احتمال رخداد طبقه خشکسالی شدید و خیلی شدید در این چند ایستگاه که بعنوان نمونه در جدول ذکر گردیده است زمانی که ماه آغازین اکتبر باشد در ایستگاه دزفول $0/4$ است و در بسیاری از ماهها صفر بدست آمده است که نشان می دهد در این دوره مورد مطالعه این طبقه از خشکسالی رخ نداده است.

در زنجیره مارکوف غیر همگن به مانند زنجیره مارکوف همگن، تمام ویژگی‌های استخراج شده بر روی همان ۲۰ ایستگاه حاصل از آزمون خی دو خواهد بود. تعداد ماتریس‌های بدست آمده در این مرحله جمعاً به ۱۳۲۰ ماتریس رسید که ۶۶۰ مورد از آن متعلق به ماتریس‌های فراوانی انتقالات و ۶۶۰ مورد دیگر متعلق به ماتریس احتمالات انتقال بوده است. از آنجا که در ماه‌های فصل تابستان به علت کمبود بارش اکثر ایستگاه‌ها با خشکسالی مواجه هستند از محاسبه ویژگی‌های زنجیره مارکوف غیر همگن برای سه ماه جولای، آگوست و سپتامبر خودداری گردید.

احتمال وقوع هر طبقه از شدت خشکسالی برای ۲۰ ایستگاه مورد مطالعه برای ماه‌های فصل زمستان، بهار و پاییز محاسبه گردید. به دلیل آنکه نتایج ۲۰ ایستگاه تعداد صفحاتی بسیاری را در بر گرفت برای رعایت اختصار احتمال وقوع ۵ ایستگاه در جدول (۷) بسط و تشریح

جدول ۷- احتمال وقوع هر طبقه از شدت خشکسالی

	دسامبر	نوامبر	اکتبر	ژوئن	مه	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه	
آبادان	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۲	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰
	۰/۸	۰/۷	۰/۵	۰/۹	۰/۳	۰/۸	۰/۷	۰/۸	۰/۷	۱
	۰	۰/۱	۰/۳	۰	۰/۵	۰	۰/۱	۰	۰/۱	۲
	۰/۱	۰	۰	۰	۰	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۳
دزفول	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۲	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰
	۰/۷	۰/۷	۰/۳	۰/۹	۰/۷	۰/۸	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۱
	۰	۰	۰/۱	۰	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۱	۰/۱	۲
	۰/۱	۰/۱	۰/۴	۰	۰/۱	۰	۰	۰/۱	۰/۱	۳
یزد	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰
	۰/۷	۰/۵	۰/۲	۰/۹	۰/۷	۰/۸	۰/۷	۰/۷	۰/۶	۱
	۰	۰	۰/۶	۰	۰	۰	۰/۱	۰	۰/۲	۲
	۰/۱	۰/۳	۰	۰	۰/۲	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰	۳
زاهدان	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰
	۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۸	۰/۸	۰/۷	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۱
	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۲
	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۳

زمان ماندگاری در طبقه خشکسالی متوسط در سه ماه مذکور در بیشتر ایستگاه‌ها نزدیک به ۰/۳ ماه است. بیشترین زمان ماندگاری برای این طبقه در ماه اکتبر برای ایستگاه کرمانشاه است که ۰/۵ ماه بطول می‌انجامد. در ماه ژانویه از فصل زمستان در بیشتر ایستگاه‌ها مدت زمان ماندگاری صفر است که این علت می‌تواند مربوط به رژیم بارش زمستانه کشور باشد. بیشترین زمان ماندگاری طبقه خشکسالی شدید و خیلی شدید در ماه ژانویه در فسا نزدیک به یک ماه یعنی ۰/۸، در ماه آوریل برای ایستگاه‌های سمنان و یزد ۰/۵ و در ماه اکتبر برای کرمانشاه ۰/۴ ماه بطول می‌انجامد.

جدول ۸ نتایج مدت زمان ماندگاری را برای ماه‌های آغازین ژانویه، آوریل و اکتبر برای ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. برای هر ماه، سه مقدار بیان شده است که معرف طبقات خشکسالی هستند که قبلاً تعریف شده‌اند. زمانی که حالت ۱ یعنی خشکسالی ضعیف در ژانویه رخ دهد انتظار می‌رود ۸/۸ ماه در زاهدان، ۲/۸ ماه در فسا، ۲/۶ ماه در یزد و ۲/۵ ماه در کرمان این طبقه از شدت خشکسالی به طول بینجامد و درحالی‌که این حالت در ماه آوریل ۵/۱ ماه در بندر لنگه، ۳/۵ در فسا بطول می‌کشد. در ماه اکتبر هم طبقه خشکسالی ضعیف در ایستگاه زاهدان نزدیک به ۷ ماه بطول می‌انجامد. مدت

جدول ۸- متوسط زمان ماندگاری قابل انتظار در هر طبقه از شدت خشکسالی

اکتبر			آوریل			ژانویه			اکتبر			آوریل			ژانویه		
۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
ایستگاه									ایستگاه								
آبادان	۰/۳	۰/۳	۳/۳	۰/۳	۰/۳	۲/۳	۰	۰/۳	ایران‌شهر	۰/۳	۰/۳	۲/۳	۰	۰/۳	۱/۸	۰	۰/۳
بم	۰/۳	۰/۳	۲/۳	۰/۳	۰/۳	۲/۱	۰/۳	۰/۳	کرمان	۰/۳	۰/۳	۲/۵	۰/۳	۰	۲/۱	۰	۰/۳
بندر عباس	۰/۴	۰/۵	۲/۱	۰	۰	۰/۳	۰/۳	۰/۳	کرمانشاه	۰/۳	۰/۳	۱/۸	۰	۰/۳	۱/۴	۰	۰/۳
بندر لنگه	۰	۰/۳	۳/۷	۰/۳	۰/۳	۵/۱	۰	۰/۳	خرم‌آباد	۰	۰/۳	۱	۰	۰/۳	۱/۱	۰	۰/۳
بیرجند	۰/۳	۰/۳	۲/۱	۰/۳	۰/۳	۱/۶	۰	۰/۳	سمنان	۰/۳	۰/۳	۲/۲	۰	۰/۳	۳/۳	۰/۲	۰/۳
چابهار	۰/۳	۰/۳	۲/۴	۰/۳	۰/۳	۲/۱	۰	۰/۳	شیراز	۰/۳	۰/۳	۱/۴	۰	۰	۰/۹	۰	۰/۳
دزفول	۰/۳	۰	۱/۹	۰/۳	۰/۳	۱/۸	۰	۰	طیس	۰/۳	۰/۳	۲/۳	۰	۰/۳	۱/۷	۰/۳	۰/۳
اصفهان	۰/۳	۰	۱/۴	۰/۳	۰/۳	۲/۶	۰	۰/۳	یزد	۰/۳	۰/۳	۲/۶	۰	۰	۲/۲	۰/۳	۰/۳
فسا	۰/۳	۰/۳	۰/۵	۰/۳	۰/۳	۳/۵	۰/۳	۰/۳	زابل	۰/۳	۰	۱/۸	۰	۰	۳	۰/۳	۰/۳
قزوین	۰/۳	۰/۳	۶/۹	۰/۳	۰/۳	۲/۶	۰	۰/۳	زاهدان	۰/۳	۰	۸/۸	۰	۰	۱/۵	۰	۰/۳

۹/۲ ماه و سپس در ایستگاه طیس ۸/۵ ماه بطول میانجامد تا از طبقه خشکسالی ضعیف به طبقه ترسالی برسیم در صورتی که بیشترین زمان اولین گذار هنگامی که ماه آغازین ژانویه باشد در این حالت در ایستگاه آبادان ۳ ماه و زمانی که ماه آغازین اکتبر باشد در ایستگاه‌های طیس و خرم‌آباد ۴/۳ ماه بطول می‌انجامد تا از طبقه ۱ به طبقه ۰ برویم. بیشترین زمان گذار از طبقه خشکسالی متوسط به طبقه ترسالی هنگامی که ماه آغازین آوریل باشد در ایستگاه‌های اصفهان (۵/۳) و ایستگاه طیس (۵) اتفاق افتاده است که نسبت به سایر ایستگاه‌ها بیشتر بطول می‌انجامد همچنین زمان گذار از طبقه خشکسالی شدید و خیلی شدید به طبقه ترسالی فقط در ایستگاه طیس، شیراز، دزفول مشاهده شده است که به ترتیب ۵/۲، ۲/۴، ۳/۴ و بطول می‌انجامد.

جدول ۹ نتایج حاصل از محاسبه ویژگی متوسط زمان اولین گذار قابل انتظار از هر یک از طبقات خشکسالی به طبقه ترسالی را برای سه ماه از فصل پاییز، زمستان و بهار را نشان می‌دهد. در این جدول ماه‌هایی که خشکسالی شدید و خیلی شدید و یا متوسط رخ نداده است نمی‌توان ویژگی مارکوفی را محاسبه کرد که بصورت علامت ستاره در جدول نشان داده شده است. بنابراین مقادیری که در داخل جدول آورده شده‌اند مربوط به حالت‌ها یا طبقاتی بوده‌اند که ایستگاه‌های مورد مطالعه در طول این ۳۴ سال آن را تجربه کرده‌اند. بیشترین زمان اولین گذار هنگامی که ماه آغازین آوریل باشد در ایستگاه‌های مورد بررسی از طبقه خشکسالی ضعیف به طبقه ترسالی نسبت به ماه‌های آغازین ژانویه و اکتبر بیشتر بطول می‌انجامد بعنوان مثال زمانی که ماه آغازین آوریل باشد در ایستگاه ایران‌شهر

جدول ۹- متوسط زمان اولین گذار قابل انتظار از هر یک از طبقات خشکسالی به طبقه ترسالی

ایستگاه	ژانویه			آوریل			اکتبر			ایستگاه	ژانویه			آوریل			اکتبر		
	μ	μ	μ	μ	μ	μ	μ	μ	μ		μ	μ	μ	μ	μ	μ	μ	μ	μ
آبادان	۳	۲/۹	*	۶/۸	*	*	۴	*	*	ایران‌شهر	۱/۹	*	*	۹/۲	*	*	۴/۱	*	*
بم	۲/۱	*	*	۷/۶	*	*	۳	*	*	کرمان	۱/۳	*	*	۶/۲	۲/۵	*	۳/۳	*	*
بندر عباس	۱	*	*	۶/۷	*	*	۲/۸	*	*	کرمانشاه	۱/۸	*	*	۷/۳	*	*	۳	*	*
بندر لنگه	۲/۴	*	*	۶/۸	۲/۳	*	۳/۵	*	*	خرم‌آباد	۰/۵	*	*	۷/۵	*	*	۴/۳	*	*
بیرجند	۲/۷	۲/۱	*	۶/۲	۳/۵	*	۲	*	*	سمنان	۱	*	*	۶/۶	*	*	۳	*	*
چابهار	۲/۴	*	*	۷	*	*	۳/۳	*	*	شیراز	۱/۴	*	*	۶	۴/۱	۲/۴	۴/۱	*	*
دزفول	۱/۳	*	*	۶	۳/۱	۳/۴	۰/۲	*	*	طبرس	۱/۹	۲/۶	*	۸/۵	۵	۵/۲	۴/۳	*	*
اصفهان	۱/۷	*	*	۸/۱	۵/۳	*	۳/۹	*	*	یزد	۲/۳	۲/۳	*	۷	*	*	۳/۳	۱/۳	*
فسا	۱	۲/۳	*	۶	*	*	۲/۸	*	*	زابل	۱/۵	*	*	۶/۸	*	*	۰/۵	۱/۱	*
قزوین	۲/۵	*	*	۶/۵	*	*	۳/۳	*	*	زاهدان	۲/۳	*	*	۶/۸	*	*	۱/۷	*	*

خشکسالی متوسط و شدید و خیلی شدید باشد نمی‌توان برای آن حالتی را پیش بینی کرد چون امکان بروز این دو حالت در این ایستگاه‌ها وجود ندارد. در فصل بهار زمانی که ماه آغازین ماه آوریل باشد پیش بینی یک، دو و سه ماه آینده برای طبقات مختلف خشکسالی در جدول مذکور صورت گرفت بعنوان مثال زمانی که حالت آغازین در این فصل خشکسالی شدید و خیلی شدید برای ایستگاه سمنان و یزد در ماه آوریل باشد طبقه پیش بینی شده در این ایستگاه‌ها برای سه ماه آینده طبقه خشکسالی شدید و خیلی شدید خواهد بود. در فصل پاییز ماه آغازین برای پیش بینی ماه اکتبر در نظر گرفته شد. در این ماه در ایستگاه زابل زمانی که طبقه آغازین طبقه ترسالی باشد پیش بینی برای یک و دو ماه آینده خشکسالی شدید و خیلی شدید خواهد بود و یا در ایستگاه کرمانشاه زمانی که حالت آغازین طبقه خشکسالی شدید و خیلی شدید باشد طبقه پیش بینی شده در دو ماه آینده طبقه خشکسالی متوسط خواهد بود.

پیش بینی طبقات آب و هوایی برای ۱، ۲ و ۳ ماه آینده، برای ایستگاه‌های مورد بررسی انجام شد که به دلیل آنکه تعداد صفحات زیادی را در بر می‌گرفت چند ایستگاه بعنوان نمونه انتخاب گردید که نتایج آن در جدول (۱۰) ارائه گردیده است. در فصل زمستان هنگامی که در بندر لنگه شرایط آب و هوایی حاکی از استقرار طبقه خشکسالی ضعیف در ماه ژانویه باشد در سه ماه آینده، خشکسالی متوسط در این ایستگاه پیش بینی خواهد شد و یا در ایستگاه شیراز در همین ماه اگر حالت آغازین خشکسالی متوسط باشد برای یک ماه آینده خشکسالی شدید و خیلی شدید پیش بینی می‌شود. در این فصل برای اکثر ایستگاه‌ها برای طبقات مختلف خشکسالی، پیش بینی برای یک، دو و سه ماه آینده خشکسالی ضعیف خواهد بود مانند ایستگاه‌های بم، فسا و اصفهان زمانی که در این ایستگاه‌ها حالت آغازین طبقه ترسالی و یا خشکسالی ضعیف باشد برای یک، دو و سه ماه آینده طبقه پیش بینی شده طبقه خشکسالی ضعیف خواهد بود همچنین در این ایستگاه‌ها زمانی که حالت آغازین

جدول ۱۰- پیش بینی خشکسالی طبقات مختلف خشکسالی

ایستگاه	t	t=jan			t=apr			t=oct		
		t+1	t+2	t+3	t+1	t+2	t+3	t+1	t+2	t+3
آبادان	۰									
	۱									
	۲				Non	Non	Non			
	۳	Non	Non	Non						
بندر لنگه	۰									
	۱									
	۲	Non	Non	Non				Non	Non	Non
	۳	Non	Non	Non	Non	Non	Non			
سمتان	۰									
	۱									
	۲									
	۳	Non	Non	Non						
شیراز	۰									
	۱									
	۲							Non	Non	Non
	۳							Non	Non	Non
زابل	۰									
	۱									
	۲	Non	Non	Non	Non	Non	Non			
	۳	Non	Non	Non						
		خشکسالی شدید	خشکسالی ضعیف	خشکسالی ضعیف	ترسالی					

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق برای مدل‌سازی خشکسالی از ۲۰ ماتریس برای فراوانی انتقالات و ۲۰ ماتریس برای احتمال انتقالات در زنجیره مارکوف همگن و ۶۶۰ ماتریس برای فراوانی انتقالات و ۶۶۰ ماتریس برای احتمال انتقالات در زنجیره مارکوف غیر همگن استفاده گردید. بعد از استخراج ماتریس‌های فراوانی، سؤالی که در اینجا مطرح می‌شد این بود که آیا داده‌های ایستگاه مورد مطالعه لحاظ آماری به یکدیگر وابسته هستند یا نه مستقل از یکدیگر هستند؟ برای جواب به این سؤال از آزمون خی دو بهره گرفته شد. بنابراین برای تمام ایستگاه‌ها این آزمون نیز اجرا و نتایج آن‌ها ثبت شد؛ و در نهایت مدل بندی زنجیره‌های مارکوف همگن و غیر همگن و ویژگی‌های استخراج شده از آن‌ها - که شامل احتمال وقوع هر طبقه از شدت خشکسالی، زمان ماندگاری در هر طبقه از شدت خشکسالی، مدت زمان قابل انتظار از طبقات مختلف خشکسالی به طبقه ترسالی و پیش بینی کوتاه مدت خشکسالی - برای ایستگاه‌های باقی مانده بدست آمد.

نتایج بدست آمده از دو زنجیره مارکوف همگن و غیر همگن نشان داد که زنجیره مارکوف همگن توانایی زیادی در پیش بینی طبقات مختلف خشکسالی ماهانه در ایران را ندارد که می‌توان به کوچک بودن یا محدود بودن پایگاه داده‌های مورد استفاده و زیاد بودن تعداد حالت‌های استفاده شده در آن اشاره نمود همچنین شاخص بارش استاندارد شده نیز دارای معایب و مشکلاتی است و تا این معایب و به عبارتی نقطه ضعف‌ها بر طرف نگردد نمی‌تواند شاخص مناسبی برای پایش خشکسالی‌ها باشد و از آنجا که این شاخص نیز برای ایران اصلاح نگردیده است نمی‌توان از آن به عنوان یک شاخص ایده آل برای پایش خشکسالی‌ها در کشور نام برد.

منبع‌ها

۱. - بذرافشان ج، ۱۳۸۹. کاربرد مدل های لوگ خطی در تحلیل انتقال طبقات خشکسالی شاخص بارندگی استاندارد (SPI) در ایستگاه های هواشناسی قدیمی ایران طی قرن بیستم. مجله پژوهش آب ایران. ۴ (۷): ۱۱۹-۱۰۹.
۲. - بری ابرقویی ح، بذاقی جمالی ج، توکلی م، ۱۳۸۲. کاربرد برخی از شاخص‌های آماری هواشناسی جهت ارزیابی شدت خشکسالی در مقیاس کشوری. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی. ۱۸ (۲): ۸۶-۱۰۶.
۳. - بشیرزاده م، عراقی نژاد ش، ۱۳۸۹. پیش بینی شدت، تداوم و فراوانی خشکسالی با استفاده از تئوری RUN و مارکوف. پژوهش آب ایران. ۴ (۶): ۹۴ - ۹۱.
۴. - بنی مهد س ا، خلیلی د. ۱۳۹۳. تحلیل انتقال گروه های خشکسالی با استفاده از زنجیره مارکوف و روش خطی-لگاریتمی: راه کاری برای اعلام هشدار اولیه. علوم و مهندسی آبخیز داری ایران. ۸ (۲۴): ۳۷-۴۷.
۵. - حجازی زاده ز، شیرخانی ع، ۱۳۸۴. تحلیل و پیش بینی آماری خشکسالی و دوره های خشک کوتاه مدت در استان خراسان رضوی. پژوهش های جغرافیایی. ۳۷ (۵۲): ۱۳-۳۱.
۶. - دریاباری س ج ا، ۱۳۸۵. پیش بینی خشکسالی براساس مدل های ماتریس احتمال انتقال تجربی در مناطق مختلف ایران. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)، ۵ (۶-۷): ۹۰-۱۰۸.
۷. - سلیقه م، علیجانی ب، دل آرا ق، ۱۳۹۰. تحلیل فضایی بارش فصول مرطوب سال با استفاده از مدل زنجیره مارکوف مطالعه موردی استان اردبیل. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. ۲۰ (۲۲): ۴۴ - ۲۵.
۸. - عساکره ح، ۱۳۸۷. بررسی احتمال تواتر و تداوم روزهای بارانی در شهر تبریز با استفاده از مدل زنجیره مارکوف. تحقیقات منابع آب ایران. ۴ (۲): ۴۶-۵۶.
۹. - عساکره ح، مازینی ف، ۱۳۸۹. بررسی احتمال وقوع روزهای خشک در استان گلستان با استفاده از مدل زنجیره مارکوف. جغرافیا و توسعه. ۷ (۱۷): ۴۴ - ۲۹.
۱۰. - علیجانی ب، محمودی پ، ریگی چاهی ا ب، خسروی پ، ۱۳۹۰. بررسی تداوم روزهای یخبندان در ایران، با استفاده از مدل زنجیره مارکوف. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. ۴۲ (۷۳): ۱-۲۰.

- the Canadian Prairie Provinces, Journal of Applied Meteorology, 3(5): 600-602.
24. Liu X, Ren L, Yuan F, Yang B, Nanjing PR. 2009. Meteorological Drought Forecasting using Markov Chain Model, In 11th International Conference on Environmental Science and Information Application Technology, 4-5 July, Wuhan, China.
25. Lohani VK., Loganatan GV. 1997. An Early Warning System for Drought Management Using the Palmer Drought Index, Journal of American Water Resources Association, 33 (6): 1375-1386.
26. Lohani VK., Loganatan GV, Mostaghimi S. 1998. Long-Term Analysis and Short-Term Forecasting of Dry Spells by Palmer Drought Severity Index, Nordic Hydrology, 29(1): 21-40.
27. McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. 1993. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. 8th Conference on Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, USA.
28. McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. 1995. Drought Monitoring with Multiple Time scales. In 9th AMS conference on Applied Climatology, 15-20 January, Dallas, USA.
29. Martin-Vide J, Gomez L. 1998. Regionalization of Peninsular Spain based on the length of dry spells. International Journal of Climatology, 19 (5): 537-555.
30. Mehrotra R, Sharma A. 2007. A Stochastic Daily Rainfall Occurrence Generator with Higher Time Scale Dependence. In: 30th Hydrology & Water Resources Symposium: Past, Present & Future, 4-7 December, Launceston, USA.
31. Ochola WO, Kerkides P. 2003. A Markov Chain Simulation Model for Predicating Critical Wet and Dry Spells Kenya: Analysing Rainfall Events in the Kano Plains, Irrigation and Drainage, 52 (4): 327-342.
32. Paulo AA, Pereira LS. 2007. Prediction of SPI Drought Class Transitions Using Markov Chains. Water Resources Management, 21 (10): 1813-1827.
33. Stern RD. 1980. The Calculation of Probability Distribution for Models of Daily Precipitation, Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B, 28 (1-2): 137-147.
۱۱. - علیزاده ا، ۱۳۸۹. اصول هیدرولوژی کاربردی. مشهد: آستان قدس رضوی، چاپ بیست و هفتم.
۱۲. - علیزاده ا، اشگر طوسی ش، ۱۳۸۷. توسعه یک مدل برای پایش و پیش بینی خشکسالی خراسان. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۲ (۱): ۲۲۳-۲۳۴.
۱۳. - علیزاده ا، انصاری ح، ارشادی س، اشگر طوسی ش، ۱۳۸۷. پایش و پیش بینی خشکسالی در استان سیستان و بلوچستان. جغرافیا و توسعه ناحیه ای. ۷ (۱۱): ۱۷-۱.
۱۴. - ققمای م، بذرافشان ج، ۱۳۹۱. پیش آگاهی وضعیت خشکسالی هواشناسی در گستره ایران با استفاده از مدل زنجیره مارکوف. حفاظت منابع آب و خاک. ۱ (۳): ۳۱-۱۳.
۱۵. - کردوانی پ، ۱۳۷۱. منابع و مسائل آب ایران «جلد اول: آب های سطحی و زیرزمینی و مسائل بهره برداری از آنها». تهران: انتشارات دانشگاه تهران، ۴۱۴ ص.
۱۶. - محمد ک، داوطلب ر، میثاقی ف، ۱۳۸۲. پهنه بندی خشکسالی اقلیمی در حوضه مارون با استفاده از شاخص آماری SIAP. سومین کنفرانس منطقه ای و اولین کنفرانس ملی تغییر اقلیم، ۲۹ مهر تا ۱ آبان ۱۳۸۲، دانشگاه اصفهان، ایران.
۱۷. - مشکانی م ح، ۱۳۶۳. بررسی احتمال تواتر روزهای خشک بابلسر از دیدگاه بیز تجربی. مجله آب. ۳: ۴۹-۳۷.
۱۸. - نگارش ح، خسروی م، شاه حسینی م، محمودی پ، ۱۳۸۹. مطالعه خشکسالی های کوتاه مدت شهرستان زاهدان. جغرافیا و توسعه. ۸ (۱۸): ۱۳۴-۱۰۹.
۱۹. - وفاخواه م، بشریه سه قلعه م، ۱۳۹۱. بررسی احتمال وقوع دوره های ترسالی و خشکسالی هیدرولوژیک با استفاده از زنجیره مارکوف در حوزه آبخیز کشف رود. پژوهش های آبخیز داری (پژوهش و سازندگی). ۲۵ (۱): ۱-۹.
۲۰. - هاشمی ف، ۱۳۴۵. تجزیه و تحلیل استاتیستیکی از سرمای تهران. تهران: سازمان هواشناسی کشور، صص ۱-۱۲۰.
21. Anagnostopoulou Chr., Maheras P, Karacostas T, Vafiadis M. 2003. Spatial and temporal analysis of dry spells in Greece, Theoretical and Applied Climatology, 74 (1-2): 77-91.
22. Feyerherm AM, Dean Bark L. 1967. Goodness of a Markov Chain Model for Sequences of Wet and Dry Days, Journal of Applied Meteorology, 6 (5): 770-773.
23. Hopkins JW, Robillard P. 1964. Some Statistics of Daily Rainfall Occurrence for

And SPI Index to Forecasting, Monitoring And Zoning of Meteorological Drought Case Study: Chahar Mahal And Bakhtiari province, Iran, Journal of Environmental Research and Development, 8 (2): 316-324.

34. Tolika K, Maheras P. 2005. Spatial and Temporal Characteristics of Wet Spells in Greece. Theoretical and Applied Climatology, 8 (1-2): 71-85.
35. Zamani AMR, Monadi M. Zarei H. 2013. Using a First Order Markov Chain Model