

بررسی ویژگی‌های خشک‌سالی هواشناسی استان خوزستان با استفاده از تئوری RUN و مدل زنجیره مارکوف

بهزاد عادل^{۱*}، علیرضا نفرزادگان^۲، آرش ملکیان^۳ و احمد نوحه‌گر^۴

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی چرخه‌های خشک‌سالی و احتمال وقوع آن‌ها در استان خوزستان با به کارگیری شاخص بارش استاندارد (SPI) و ترکیب تئوری RUN و مدل احتمالاتی و استوکاستیک زنجیره مارکوف می‌باشد. بدین منظور ابتدا با استفاده از نمایه SPI وضعیت خشک‌سالی ۴۵ ایستگاه منطقه با طول دوره آماری ۳۱ ساله تعیین گردید. سپس با مدل زنجیره مارکوف در محیط نرم‌افزار متلب، ماتریس فراوانی وضعیت‌های خشک‌سالی (خشک، نرمال و تر)، ماتریس احتمال ماندگاری و ماتریس احتمال انتقال محاسبه شد. در نهایت احتمال وقوع خشک‌سالی، تعداد متوسط خشک‌سالی قابل انتظار و مدت تداوم خشک‌سالی‌ها در طول دوره شبیه‌سازی به دست آمد. به منظور بررسی مطابقت زنجیره مارکوف مرتبه اول بر سری زمانی هر ایستگاه از آزمون کای اسکوئر استفاده شد. نتایج آزمون کای اسکوئر نشان داد که زنجیره مارکوف مرتبه اول بر سری شاخص بارش استاندارد هر ایستگاه در سطح ۹۵ درصد اطمینان مطابقت دارد. نتایج بیانگر احتمال وقوع برابر با ۳۰، ۳۵، ۳۵ درصد به ترتیب برای دوره‌های خشک، نرمال و تر در سطح منطقه مورد مطالعه است. همچنین نتایج نشان داد که احتمال انتقال از وضعیت رطوبتی نرمال به وضعیت خشک‌سالی، بسیار بیشتر از احتمال انتقال از وضعیت ترسالی به شرایط خشک‌سالی است.

واژه‌های کلیدی: احتمال ماندگاری، انتقال وضعیت، خشک‌سالی، زنجیره مارکوف، مدل تصادفی.

ارجاع: بهزاد عادل، ب. نفرزادگان، ع. ملکیان، آ. و نوحه‌گر. ۱۳۹۷. بررسی ویژگی‌های خشک‌سالی هواشناسی استان خوزستان با استفاده از تئوری RUN و مدل زنجیره مارکوف. مجله پژوهش آب ایران. ۲۹: ۳۹-۲۹.

۱- دانشجوی دکترای آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان.

۲- دانشجوی دکترای آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان.

۳- دانشیار گروه مهندسی احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۴- استاد دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران.

* نویسنده مسؤول adeli_behzad66@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۸/۱۲

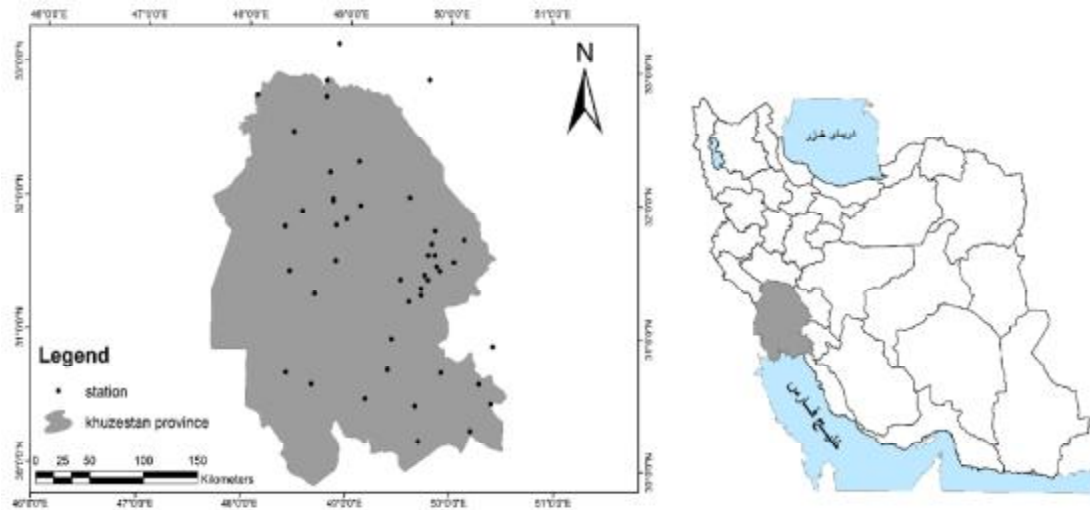
مقدمه

خشک‌سالی، کاهش غیر قابل انتظار بارش در یک زمان مشخص در یک محدوده جغرافیایی است که لزوماً منطقه‌ای خشک نیست (وارن و خقالی، ۱۹۹۲). نقطه آغاز آنچه تحت عنوان خشک‌سالی - از جمله خشک‌سالی هواشناسی، خشک‌سالی کشاورزی، خشک‌سالی هیدرولوژی و خشک‌سالی اقتصادی - اجتماعی - مورد بررسی و پژوهش قرار می‌گیرد، کمبود یا نقصان ریزش‌های جوی نسبت به میانگین بلند مدت یک منطقه است (زمانی و همکاران، ۲۰۱۳) که به‌عنوان خشک‌سالی هواشناسی شناخته می‌شود (نفرزادگان و همکاران، ۲۰۱۲). این نوع خشک‌سالی، فراگیرترین نوع خشک‌سالی و در واقع نقطه شروع برای دیگر انواع خشک‌سالی است. برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در زمینه منابع آب نیاز به پیش‌بینی خشک‌سالی است.

روش‌های آماری و احتمالاتی مختلفی برای بررسی و پیش‌بینی خشک‌سالی‌ها مورد پذیرش واقع شده است. در میان این روش‌ها، زنجیره مارکوف در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. زنجیره مارکوف با روش‌های ساده ریاضی (مانند ضرب ماتریس‌ها) حل احتمالات مربوط به فرآیندهای وابسته را بسیار آسان می‌کند (خوش‌اخلاق و همکاران، ۱۳۸۹). در علم احتمالات، زنجیره مارکوف به‌عنوان ابزار توصیفی، با هدف عمده پیش‌بینی رفتار آینده نظام‌های مدیریتی است (وفاخواه و بشری سه‌قلعه، ۱۳۹۱). این مدل که در زمره مدل‌های تصادفی قرار می‌گیرد، برای تحلیل احتمالاتی سری زمانی بسیاری از متغیرهای اقلیمی و آب‌شناختی از جمله دما، بارندگی، جریان رودخانه و همچنین برای تخمین پارامتر در مدل‌های بارش - رواناب (یوسفی و حجام، ۱۳۸۶؛ علیجانی و همکاران، ۱۳۸۹؛ عساکره و صیادی، ۱۳۹۳؛ بی‌تس و کمپیل، ۲۰۰۱؛ آکیوز و همکاران، ۲۰۱۲) استفاده شده است. در این بین هدف از تجزیه و تحلیل خشک‌سالی‌ها با استفاده از زنجیره مارکوف، محاسبه احتمال وقوع، تداوم دوره حاکم، زمان تکرار یک وضعیت رطوبتی خاص و مدت زمان لازم برای تغییر وضعیت یک طبقه رطوبتی است. در واقع زنجیره مارکوف این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان رفتار سری‌های زمانی را در گام زمانی آینده $(t+1)$ با توجه به گام حال (t) یا

گام‌های گذشته از طریق به کار بردن حالت‌های احتمالی و ماتریس احتمالات انتقال پیش‌بینی کرد. این مدل به وسیله تعدادی از حالات (S) و احتمال انتقال بین حالات (P_{ij}) مشخص می‌شود. از جمله پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه می‌توان به مواردی در پرتغال (پائولو و همکاران، ۲۰۰۵؛ پائولو و پیرا، ۲۰۰۷)، چین (جئونگ و لی، ۲۰۱۴) و ایران (مرادی و همکاران، ۱۳۸۷؛ بشیرزاده و عراقی‌نژاد، ۱۳۸۹؛ عساکره و مازینی، ۱۳۸۹؛ علیجانی و همکاران، ۱۳۹۰؛ مرادی و همکاران، ۲۰۱۱؛ حنفی و همکاران، ۱۳۹۱؛ وفاخواه و بشری سه‌قلعه، ۱۳۹۱؛ محمودی و همکاران، ۱۳۹۲) اشاره کرد. به طور کلی مطالعات نشان داده‌اند که علاوه بر اینکه نمایه SPI شاخصی قابل اعتماد برای نمایان ساختن وضعیت خشک‌سالی‌ها است، ترکیب مدل زنجیره مارکوف با تئوری RUN از توانایی بالایی برای بررسی احتمال انتقال و احتمال ایستای وضعیت‌های رطوبتی در مناطق مختلف برخوردار است.

استان خوزستان با داشتن شرایط اقلیمی مناسب، امکان کشت در چهار فصل را دارد. از آنجایی که سالانه بیش از یک میلیون و ۲۰۰ هزار هکتار از زمین‌های این استان زیر کشت محصولات کشاورزی می‌رود (خباززاده، ۱۳۸۹)، علاوه بر تهدیدهای وارده از سوی طرح‌های انتقال آب و سدسازی‌های افراطی، این استان همواره با خطر رخداد خشک‌سالی روبرو بوده و است. از این‌رو تحلیل و پیش‌بینی ویژگی‌های خشک‌سالی می‌تواند چراغ راه سیاست‌گذاران و مدیران بخش‌های مرتبط با آب باشد؛ بنابراین هدف از پژوهش حاضر، استفاده از نمایه SPI و ترکیب تئوری RUN و مدل زنجیره مارکوف برای شناخت بهتر وضعیت خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌های استان و همچنین درک و پیش‌بینی رژیم چرخش دوره‌های خشک و تر در این استان - استراتژیک از نظر کشاورزی - است. در ضمن در این پژوهش سعی شده است از طریق ارائه نقشه‌های پهنه‌بندی، گستره مناطقی که احتمال نسبی بیشتری برای گرفتاری در تله خشک‌سالی دارند، مشخص شود. نتایج این پژوهش می‌تواند به مدیریت بهتر منابع آب استان خوزستان کمک کند.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه و ایستگاه‌های مورد مطالعه

مقیاس‌های کوتاه مدت برای بررسی حالت‌ها خشک‌سالی دارای ارجحیت است (مک‌کی و همکاران، ۱۹۹۳). لذا در این پژوهش از مقیاس سالانه برای بررسی حالات خشک‌سالی منطقه استفاده شد.

مدل زنجیره مارکوف

مدل زنجیره مارکوف یک سری از مشاهدات و تغییر هرکدام از مشاهدات از حالتی به حالت دیگر را بررسی می‌کند (علیزاده، ۱۳۸۷؛ هان و همکاران، ۱۹۷۶؛ جکسون، ۱۹۷۵). در این روش چنانچه $(X_n, n = 0, 1, 2, \dots)$ فرآیندی تصادفی باشد، در آن X_n می‌تواند هر مقدار متناهی از مقدار ممکن را به خود اختصاص دهد و چنانچه $X_n = i$ باشد، آنگاه این فرآیند منعکس کننده حالت i در زمان n خواهد بود. پس می‌توان نتیجه گرفت هرگاه این فرآیند در وضعیت i باشد، با احتمال ثابتی (P_{ij}) می‌توان تغییر حالت آن به j را در آینده برآورد کرد. بر این اساس:

$$\Pr obability(X_{n+1} = i, X_n = j, \dots, X_0 = i_0) = P_{ij} \quad (1)$$

که برای همه حالت‌های $i_0, i_1, \dots, i_{n-1}, i_n$ و همه $n \geq 0$ صادق است. پس توزیع شرطی هر حالت آتی X_{n+1} با توجه به حالت موجود X_n و حالت‌های گذشته i_0, i_1, \dots, i_n ، فقط وابسته به حالت موجود و مستقل از حالت‌های گذشته است؛ یعنی وابستگی شرایط اقلیمی فردا فقط به شرایط اقلیمی امروز است و از شرایط اقلیمی روزهای

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

استان خوزستان در جنوب‌غرب کشور در محدوده جغرافیایی $29^{\circ} 56'$ تا $33^{\circ} 05'$ عرض شمالی و $47^{\circ} 42'$ تا $50^{\circ} 22'$ طول شرقی واقع شده است. شکل ۱ موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه را به همراه موقعیت مکانی ایستگاه‌های مورد استفاده پژوهش نشان می‌دهد. مساحت این استان حدود ۶۷۰۰۰ کیلومترمربع است. متوسط بارش سالانه از حدود ۳۰۰ میلی‌متر در بخش جلگه‌ای تا حدود ۸۰۰ میلی‌متر در بخش کوهستانی متغیر است. تغییرات ارتفاعی استان از نزدیک صفر تا نزدیک ۴۰۰۰ متر نوسان دارد که این امر استان را به دو بخش جلگه‌ای به مساحت حدود ۴۱۰۰۰ کیلومتر مربع و کوهستانی با مساحت تقریبی ۲۶۰۰۰ کیلومتر مربع تقسیم کرده است (میراکبری و همکاران، ۲۰۱۰).

در ایستگاه‌هایی که در بازه زمانی پژوهش، داده‌ای ناقص (آمار گمشده یا پرت) در آن‌ها وجود داشت، اقدام به بازسازی و تکمیل داده‌های ناقص شد. در این رابطه از روش همبستگی بین ایستگاه‌ها به‌دلیل کارایی و دقت مناسب آن استفاده گردید.

بررسی وضعیت خشک‌سالی منطقه با استفاده از

نمایه SPI

در مناطقی که تعداد ماه‌های خشک (بدون بارش) آن زیاد باشد، استفاده از مقیاس‌های زمانی بلندمدت نسبت به

با استفاده از ترکیب روش زنجیره مارکوف و تئوری RUN می‌توان شرایط آینده را از نظر خشک‌سالی و ترسالی شبیه‌سازی کرد (علیزاده، ۱۳۸۷). با استفاده از تئوری RUN، امید ریاضی خشک‌سالی بر اساس معادله زیر به دست می‌آید.

$$E(D) = P_D \cdot t \quad (۷)$$

که در آن؛ $E(D)$ امید ریاضی خشک‌سالی و به عبارتی تعداد متوسط خشک‌سالی مورد انتظار طی دوره شبیه‌سازی (t) است. همچنین احتمال رخداد خشک‌سالی یا به عبارت دیگر احتمال انتقال از حالت‌های غیر خشک به حالت خشک (P_D) با استفاده از معادله (λ) محاسبه می‌شود.

$$P_D = P_N^* \cdot P_{ND} + P_W^* \cdot P_{WD} \quad (۸)$$

که در آن P_N^* و P_W^* احتمال ایستایی دوره‌های نرمال و مرطوب است و P_{ND} و P_{WD} احتمال انتقال از حالت مرطوب به خشک‌سالی و احتمال انتقال از حالت نرمال به خشک‌سالی را نشان می‌دهد (تامپسون، ۱۹۹۰). برای محاسبه مدت دوام خشک‌سالی در دوره شبیه‌سازی شده از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$E(L) = \frac{P_D^*}{P_D} \quad (۹)$$

در این پژوهش نیز بر اساس آنچه گذشت یک ماتریس هفت در هفت تشکیل شد. به این ماتریس که بیانگر تغییر وضعیت رطوبتی منطقه از یک وضعیت رطوبتی به وضعیت رطوبتی دیگر می‌باشد؛ ماتریس انتقال گفته می‌شود. بعد از محاسبات؛ درایه‌های سطر اول ماتریس که شامل هفت درایه می‌باشند؛ از چپ به راست هر کدام احتمال تغییر وضعیت رطوبتی ایستگاه مورد بررسی را از وضعیت رطوبتی بسیار خشک به یکی از حالت‌های بسیار خشک، خشک، نیمه خشک، نزدیک نرمال، نیمه مرطوب، مرطوب و بسیار مرطوب را نشان می‌دهد. برای محاسبه ماتریس ایستا که احتمال حاکم شدن هر کدام از وضعیت‌های رطوبتی را طی دوره‌های بلندمدت بر منطقه مورد مطالعه بررسی می‌کند؛ بایستی ماتریس احتمال انتقال را چندین بار در خودش ضرب کرد تا تمامی درایه‌های واقع در هر ستون ماتریس به یک عدد ثابت میل کنند (وفاخواه و بشری سه‌قلعه، ۱۳۹۱). لذا برای انجام این کار ماتریس احتمال انتقال ایستگاه‌های مورد بررسی وارد نرم‌افزار متلب شده و ضرب ماتریس‌ها تا ثابت شدن اعداد ستون‌ها ادامه پیدا کرد.

گذشته مستقل است. چنین فرآیند تصادفی را زنجیره مارکوف می‌نامند. در این فرآیند p_{ij} که از آن به‌عنوان احتمال ثابت نام برده می‌شود، بیانگر احتمال گذر از حالت i به حالت j است. حال اگر P علامت ماتریس احتمالی انتقالات یک مرحله‌ای (P_{ij}) در نظر گرفته شود، ماتریس احتمالات انتقال به‌صورت زیر خواهد بود:

$$P = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} & \dots \\ P_{10} & P_{11} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{i0} & P_{i1} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (۲)$$

اکنون ماتریس فراوانی انتقالات و ماتریس احتمالی انتقالات بین دو حالت متوالی می‌تواند بدین صورت باشد:

$$N = \begin{bmatrix} n_{00} & n_{01} \\ n_{10} & n_{11} \end{bmatrix} \quad (۳)$$

$$P = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix}$$

که n_{ij} و p_{ij} به ترتیب بیانگر فراوانی حالت‌ها و احتمال گذر از حالت i به دیگر حالت‌های ممکن (j) هستند (مون و همکاران، ۱۹۹۴). همچنین W و D به ترتیب بیانگر حالت ترسالی و حالت خشک‌سالی هستند.

بعد از فراهم ساختن ماتریس فراوانی انتقالات و ماتریس احتمالی انتقالات به منظور بررسی مطابقت زنجیره مارکوف مرتبه اول بر سری زمانی هر ایستگاه از آزمون کای اسکوئر (χ^2) استفاده شد (هان و همکاران، ۱۹۷۶).

$$P_{ij} = f_{ij} / \sum_{j=1}^N f_{ij} \quad (۴)$$

$$P_j = \sum_{i=1}^N f_{ij} / \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_{ij} \quad (۵)$$

$$C^2 = 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_{ij} \left| \ln \frac{p_{ij}}{p_j} \right| \quad (۶)$$

که در آن، N تعداد حالت‌ها بوده که در اینجا هفت است. P_{ij} احتمال حالت‌های انتقال از حالت i به دیگر حالت‌های ممکن j است. P_j بیان‌کننده احتمالات حاشیه‌ای برای ستون j از ماتریس احتمالی انتقالات است (علیجانی و همکاران، ۱۳۸۹).

در نهایت نتیجه حاصل از معادله (۶) با توزیع χ^2 در سطح احتمالاتی ۰/۰۵ و درجه آزادی $(N-1)^2$ مقایسه می‌شود؛ در صورتی که مقدار بحرانی χ^2 بزرگ‌تر از مقدار محاسباتی χ^2 باشد، نتایج زنجیره مارکوف مورد قبول قرار می‌گیرد.

نتایج و بحث

آمده از این آزمون (χ^2 محاسباتی $> \chi^2$ توزیع)؛ نتایج به دست آمده مورد تأیید قرار گرفت. نمایان ساختن حالت‌های مختلف خشک‌سالی هواشناسی منطقه مورد مطالعه با استفاده از نمایه SPI صورت گرفت. سپس احتمال رخداد خشک‌سالی، تعداد متوسط خشک‌سالی مورد انتظار برای هر ایستگاه، مدت تداوم خشک‌سالی‌ها، ماتریس ایستا (بیانگر ماندگاری در یک وضعیت رطوبتی) و ماتریس انتقال (بیانگر تغییر وضعیت رطوبتی از حالت تر و یا نرمال به وضعیت رطوبتی خشک) به دست آمده است. همچنین میانگین احتمالات درازمدت منطقه با متوسط‌گیری (وفاخواه و بشری‌سه‌قلعه، ۱۳۹۱) از تمامی ایستگاه‌های مورد استفاده در پژوهش به دست آمده است.

با بررسی کلیه ایستگاه‌های هواشناسی موجود در سطح استان خوزستان، بعد از رفع نواقص آماری، تعداد ۴۵ ایستگاه با طول دوره مشترک آماری ۳۱ ساله برای بررسی خشک‌سالی‌های منطقه مورد مطالعه با استفاده از شاخص SPI و ترکیب مدل زنجیره مارکوف و تئوری RUN انتخاب شد. جدول ۱ بیانگر نتایج بررسی نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف هستند. همان‌گونه که در جدول ۱ مشخص است، از آنجایی که مقدار P- در آزمون کلموگروف-اسمیرنوف بزرگ‌تر از ۰/۰۵ است، فرض صفر مبنی بر نرمال بودن توزیع داده‌ها، در سطح ۹۵ درصد مورد تأیید قرار می‌گیرد.

همچنین نتایج مدل زنجیره مارکوف با استفاده از آزمون χ^2 مورد سنجش قرار گرفت. با توجه به مقادیر به دست

جدول ۱- نتایج آزمون کلموگروف-اسمیرنوف

| تعداد ایستگاه | مقدار حداقل (میلی‌متر) | مقدار حداکثر (میلی‌متر) | میانگین (میلی‌متر) | انحراف معیار (میلی‌متر) | چولگی | کشیدگی | آماره آزمون | مقدار P- |
|---------------|------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|-------|--------|-------------|----------|
| ۴۵ | ۱۵۵/۲ | ۱۱۱۷/۵ | ۴۲۲/۵۷ | ۲۲۸/۳ | ۰/۲۱ | ۰/۹۲ | ۰/۹۲ | ۰/۳۵۴ |

احتمال انتقال شرایط رطوبتی منطقه از حالت غیرخشک به حالت خشک

نتایج نشان می‌دهد که متوسط احتمال انتقال تغییر وضعیت از یک سال مرطوب به خشک‌سالی پایین و برابر با ۰/۰۴۴ طی دوره مورد مطالعه است. همچنین متوسط احتمال انتقال تغییر وضعیت از شرایط نرمال به خشک‌سالی برابر با ۰/۱۷۷ است؛ بنابراین چنانچه ایستگاهی در وضعیت رطوبتی مرطوب قرار داشته باشد، احتمال تغییر وضعیت آن به خشک‌سالی در منطقه مورد مطالعه، پایین است (جدول ۲).

تداوم خشک‌سالی شبیه‌سازی شده منطقه طی دوره

مورد مطالعه

همان‌طور که در جدول ۲ آمده است، متوسط تداوم خشک‌سالی برای استان خوزستان که از میانگین کلیه ایستگاه‌های مورد بررسی به دست آمده برابر با ۴/۰۷ است. در این بین ایستگاه‌های دارخزین و چشمه شیرین به ترتیب با تداوم خشک‌سالی ۷/۸۷۴ و ۱/۱۹۴ بیشترین و کمترین تداوم خشک‌سالی به خود اختصاص دادند.

تعداد خشک‌سالی مورد انتظار

بر اساس نتایج پژوهش، تعداد خشک‌سالی مورد انتظار در سطح استان برابر با ۲/۴۰ رخداد برآورد شده است (جدول ۲). همچنین نتایج بیانگر این است که بیشترین و کمترین تعداد واقعه خشک‌سالی قابل انتظار برای ایستگاه‌های زیدون‌سردشت و مال‌آقا با ۳/۴۳ و ۱/۳۷ رخ داده است.

بررسی پایداری وضعیت رطوبتی ایستگاه‌های مورد

بررسی در هر یک از وضعیت‌های رطوبتی سه‌گانه

این بخش از نتایج نشان داد که احتمال قرارگیری منطقه در وضعیت رطوبتی مرطوب، خشک و نرمال طی دوره شبیه‌سازی شده به ترتیب برابر ۳۵، ۳۰ و ۳۵ درصد به دست آمده است (جدول ۲). این بدان معناست که منطقه مورد مطالعه طی دوره شبیه‌سازی در ۳۰ درصد موارد در حالت خشک قرار خواهد گرفت.

جدول ۲- مقادیر ماتریس احتمال ایستا و ماتریس احتمال انتقال وضعیت‌های رطوبتی استان خوزستان

| تعداد خشک‌سالی مورد انتظار | تداوم خشک‌سالی | احتمال خشک‌سالی | ماتریس احتمال ایستا | | | ماتریس احتمال انتقال | | ایستگاه |
|----------------------------|----------------|-----------------|---------------------|---------|---------|----------------------|----------|---------------------|
| | | | P_W^* | P_N^* | P_D^* | P_{WD} | P_{ND} | |
| $E_{(D)}$ | $E_{(I)}$ | P_D | | | | | | |
| 2/811 | 3/768 | 0/091 | 0/309 | 0/350 | 0/342 | 0/059 | 0/207 | عبدالخان - کرخه |
| 3/107 | 3/670 | 0/100 | 0/233 | 0/399 | 0/368 | 0/082 | 0/203 | آب شیرین |
| 3/292 | 2/791 | 0/106 | 0/300 | 0/403 | 0/296 | 0/045 | 0/230 | اهواز |
| 2/442 | 4/892 | 0/079 | 0/233 | 0/381 | 0/385 | 0/049 | 0/176 | عرب حسن - اسد |
| 1/779 | 7/342 | 0/057 | 0/304 | 0/275 | 0/421 | 0/033 | 0/172 | باغملک |
| 2/214 | 4/289 | 0/071 | 0/368 | 0/326 | 0/306 | 0/055 | 0/157 | بارانگرد |
| 1/946 | 1/391 | 0/063 | 0/676 | 0/237 | 0/087 | 0/059 | 0/096 | بتوند-شور |
| 2/521 | 4/385 | 0/081 | 0/282 | 0/361 | 0/357 | 0/041 | 0/193 | بوزی شادگان |
| 3/170 | 1/811 | 0/102 | 0/510 | 0/305 | 0/185 | 0/055 | 0/243 | چم گز کرخه |
| 2/482 | 3/512 | 0/080 | 0/385 | 0/334 | 0/281 | 0/037 | 0/197 | چم نظام مارون |
| 2/485 | 1/194 | 0/080 | 0/582 | 0/322 | 0/096 | 0/053 | 0/153 | چشمه شیرین-رودزرد |
| 1/828 | 7/874 | 0/059 | 0/150 | 0/386 | 0/464 | 0/029 | 0/142 | درخزینه |
| 1/897 | 5/933 | 0/061 | 0/286 | 0/351 | 0/363 | 0/034 | 0/147 | دارخوین |
| 2/362 | 4/350 | 0/076 | 0/300 | 0/368 | 0/331 | 0/021 | 0/190 | ده ملا |
| 2/504 | 4/024 | 0/081 | 0/358 | 0/317 | 0/325 | 0/051 | 0/197 | ده سادات |
| 1/835 | 3/138 | 0/059 | 0/509 | 0/305 | 0/186 | 0/043 | 0/122 | دلی بختیاری |
| 2/127 | 4/586 | 0/069 | 0/337 | 0/348 | 0/315 | 0/052 | 0/147 | گنداب |
| 2/518 | 4/296 | 0/081 | 0/300 | 0/351 | 0/349 | 0/044 | 0/194 | قله تل |
| 2/585 | 3/705 | 0/083 | 0/375 | 0/316 | 0/309 | 0/053 | 0/201 | گرگر |
| 2/821 | 2/376 | 0/091 | 0/451 | 0/333 | 0/216 | 0/057 | 0/196 | گتوند-کارون |
| 2/286 | 3/170 | 0/074 | 0/451 | 0/316 | 0/234 | 0/040 | 0/176 | هفتکل |
| 2/682 | 3/163 | 0/087 | 0/376 | 0/351 | 0/274 | 0/033 | 0/211 | حرمله |
| 2/084 | 5/499 | 0/067 | 0/291 | 0/339 | 0/370 | 0/036 | 0/167 | حمیدیه |
| 1/795 | 4/730 | 0/058 | 0/375 | 0/351 | 0/274 | 0/044 | 0/118 | هندیجان |
| 2/673 | 3/174 | 0/086 | 0/376 | 0/351 | 0/274 | 0/059 | 0/183 | ایدنک |
| 2/091 | 6/473 | 0/067 | 0/258 | 0/305 | 0/437 | 0/033 | 0/193 | ایذه |
| 2/308 | 5/489 | 0/074 | 0/218 | 0/373 | 0/409 | 0/034 | 0/180 | چکونک |
| 2/568 | 3/501 | 0/083 | 0/311 | 0/399 | 0/290 | 0/061 | 0/160 | لالی -بندسرکارون |
| 2/184 | 3/409 | 0/070 | 0/393 | 0/367 | 0/240 | 0/047 | 0/142 | بندرماهشهر |
| 1/371 | 5/449 | 0/044 | 0/437 | 0/322 | 0/241 | 0/024 | 0/105 | مال آقا |
| 2/503 | 3/471 | 0/081 | 0/364 | 0/356 | 0/280 | 0/030 | 0/196 | ماشین - رود زرد |
| 2/507 | 3/676 | 0/081 | 0/364 | 0/339 | 0/297 | 0/051 | 0/184 | ملائانی - کارون |
| 2/095 | 3/901 | 0/068 | 0/363 | 0/373 | 0/264 | 0/031 | 0/151 | مشارگه - ابوتویج |
| 2/004 | 7/193 | 0/065 | 0/150 | 0/384 | 0/465 | 0/029 | 0/157 | پاگچی - رامهرمز |
| 2/006 | 5/624 | 0/065 | 0/304 | 0/332 | 0/364 | 0/056 | 0/144 | پل شالو -سد کارون 3 |
| 2/898 | 2/547 | 0/093 | 0/439 | 0/323 | 0/238 | 0/055 | 0/214 | پل زال |
| 2/214 | 2/830 | 0/071 | 0/492 | 0/306 | 0/202 | 0/025 | 0/193 | رامشیر |

ادامه جدول ۲-

| تعداد خشک‌سالی مورد انتظار | تداوم خشک‌سالی | احتمال خشک‌سالی | ماتریس احتمال ایستا | ماتریس احتمال انتقال | تعداد خشک‌سالی مورد انتظار | تداوم خشک‌سالی | احتمال خشک‌سالی | ایستگاه |
|----------------------------|----------------|-----------------|---------------------|----------------------|----------------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| $E_{(D)}$ | $E_{(I)}$ | P_D | P_W^* | P_N^* | P_D^* | P_{WD} | P_{ND} | |
| 2/575 | 4/248 | 0/083 | 0/291 | 0/356 | 0/353 | 0/048 | 0/194 | سددز |
| 2/602 | 3/323 | 0/084 | 0/300 | 0/421 | 0/279 | 0/025 | 0/182 | سد شهیدعباسپور |
| 2/027 | 3/575 | 0/065 | 0/451 | 0/316 | 0/234 | 0/048 | 0/139 | سدشهدا بهبهان |
| 2/206 | 5/430 | 0/071 | 0/228 | 0/385 | 0/386 | 0/026 | 0/169 | سپید دشت - سزار |
| 3/262 | 3/912 | 0/105 | 0/150 | 0/438 | 0/412 | 0/033 | 0/229 | شوشتر - شطیپ |
| 2/515 | 3/936 | 0/081 | 0/290 | 0/390 | 0/319 | 0/060 | 0/163 | تله زنگ |
| 2/440 | 3/850 | 0/079 | 0/346 | 0/351 | 0/303 | 0/039 | 0/186 | تنگ پنج بختیاری |
| 3/429 | 2/316 | 0/111 | 0/376 | 0/368 | 0/256 | 0/049 | 0/250 | زیدون سردشت |
| ۲/۴۰۱ | ۰/۰۷۲ | ۰/۰۷۷ | ۰/۳۴۸ | ۰/۳۴۸ | ۰/۳۰۴ | ۰/۰۴۴ | ۰/۱۷۷ | متوسط استان |

پراکنش مکانی احتمالی ماندگاری هر یک از وضعیت‌های رطوبتی سه گانه

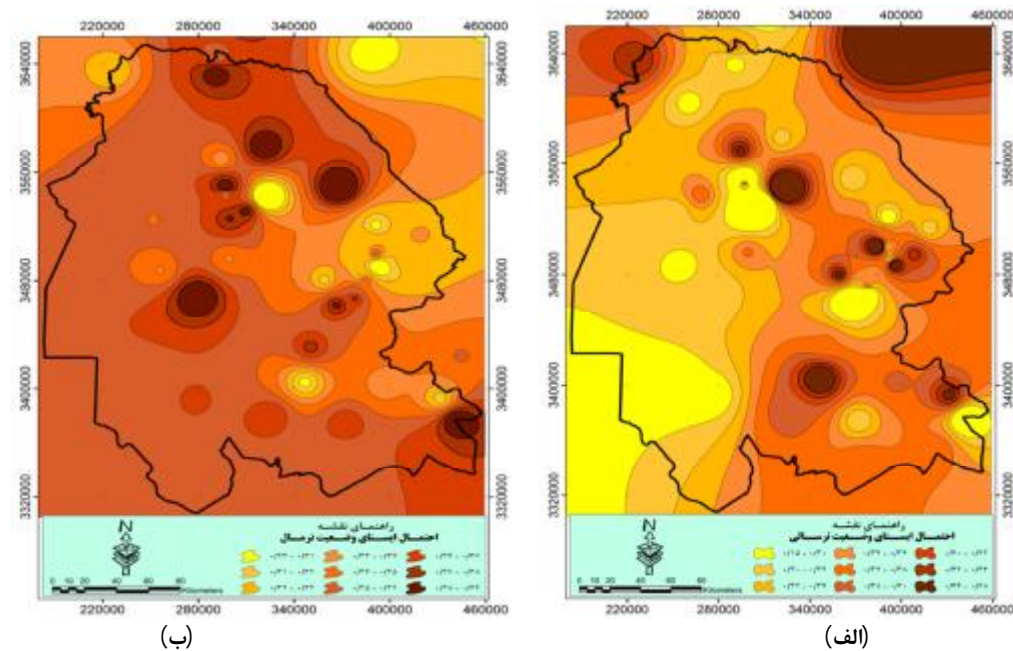
نقشه‌های پهنه‌بندی احتمال پایداری سه وضعیت رطوبتی نرمال، تر و خشک، بر اساس نتایج مدل زنجیره مارکوف از مقدار SPI در گستره استان خوزستان تهیه شد که در شکل‌های ۲- الف، ۲- ب و ۳ به تصویر کشیده شده است. شکل ۲- الف توزیع مکانی احتمال ایستای وضعیت رطوبتی نرمال را نشان می‌دهد. در دید کلی قسمت‌های جلگه‌ای استان از احتمال تقریباً برابری برای ماندگاری در شرایط نرمال برخوردار هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود نقاط دارای احتمال ایستایی بالا هم در بخش کوهستانی (شمال غرب استان) و هم در بخش جلگه‌ای (شرق و جنوب استان) مشاهده می‌شوند؛ به عبارت دیگر تغییرات احتمالی ایستایی وضعیت رطوبتی منطبق بر تغییرات ارتفاعی نیست. بر اساس شکل ۲- ب، احتمال ماندگاری ترسالی با افزایش عرض جغرافیایی دارای روند کلی افزایشی است به طوری که با نزدیک شدن به قسمت‌های شمالی استان، بر احتمال قرارگیری منطقه در این وضعیت رطوبتی افزوده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود احتمال گرفتار شدن در تله خشک‌سالی به طور کلی در بخش‌های شرقی استان بیش از مناطق غربی است.

همان‌طور که در بخش‌های قبل بیان شده است پژوهش حاضر با به کارگیری شاخص SPI، تئوری RUN و مدل

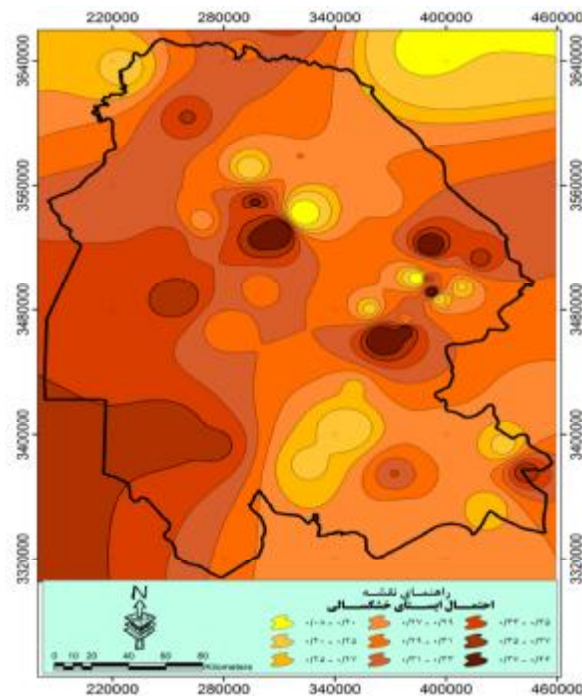
زنجیره‌ای مارکوف، احتمال تداوم، رخداد و انتقال حالت‌های مختلف رطوبتی استان خوزستان با استفاده از داده‌های ۴۵ ایستگاه هواشناسی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. جنونگ و لی (۲۰۱۴)، پالو و پیرا (۲۰۰۷)، محمودی و همکاران (۱۳۹۲)، حنفی و همکاران (۱۳۹۱)، فرید حسینی و همکاران (۱۳۹۱) در پژوهش‌های مشابه به این نتیجه رسیدند که مدل زنجیره مارکوف قابلیت بالایی برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی سری‌های زمانی را دارد. این درحالی است که از دیدگاه نظری مدل زنجیره مارکوف یک مدل تصادفی برای بررسی متغیرهای با رفتار تصادفی است؛ پس چنان‌چه اصل انتخاب متغیر ورودی به مدل رعایت شود نتایج قابل قبولی نیز حاصل خواهد شد. لذا با توجه به این امر انتخاب خشک‌سالی به‌عنوان یک پدیده با رفتار کاملاً تصادفی به‌عنوان متغیر ورودی به مدل، می‌تواند از دلایل اصلی کارایی مدل زنجیره مارکوف در پیش‌بینی و شبیه‌سازی شرایط آینده این متغیر اقلیمی باشد. در ادامه با توجه به نتایج ماتریس احتمال ایستای محاسبه شده برای ایستگاه‌های مورد مطالعه، بالاترین احتمال ایستای وضعیت‌های رطوبتی ترسالی، نرمال و خشک‌سالی مربوط به ایستگاه‌های بتوند، شوشتر و پاگچی به ترتیب با مقدار برابر با ۰/۶۷۶، ۰/۴۳۸ و ۰/۴۶۵ است. در این صورت می‌توان پیش‌بینی کرد که به‌عنوان مثال طی دوره شبیه‌سازی، ایستگاه بتوند حدود هفت سال در وضعیت رطوبتی مرطوب، ایستگاه شوشتر حدود چهار

چگونه بیشترین رخداد خشک‌سالی را تجربه خواهد کرد. در توجیه این نتایج می‌توان به تداوم پایین دوره‌های خشک‌سالی این ایستگاه و ناپایداری اقلیمی حاکم بر آن اشاره نمود. دیگر نتایج حاصل از پژوهش حاضر که با استفاده از ماتریس انتقال به دست آمد، نشان داد که در همه ایستگاه‌های مورد بررسی (۴۵ ایستگاه) احتمال تغییر وضعیت رطوبتی منطقه از وضعیت رطوبتی نرمال به خشک‌سالی بسیار بیشتر از تغییر وضعیت از ترسالی به خشک‌سالی است. پائولو و همکاران (۲۰۰۵) و پائولو و پیرا (۲۰۰۷) نیز نشان دادند که احتمال انتقال از وضعیت رطوبتی خشک‌سالی به کلاس خشک‌سالی با شدت بالاتر بیش از احتمال انتقال به کلاس غیرخشک‌سالی است. نتایج اخیر که بیانگر حرکت آرام و خزنده خشک‌سالی است، ناشی از رفتار تصادفی بارش از یک‌سو و تغییر اقلیم مناطق مورد بررسی به سمت خشک‌سالی از سوی دیگر هستند. نتایج حاصل از پهنه‌بندی احتمال ایستای شرایط خشک‌سالی، نرمال و ترسالی نشان می‌دهد که این متغیرها منطبق بر تغییرات ارتفاعی منطقه نیستند. این امر می‌تواند ناشی از برازش توزیع گاما بر داده‌های بارندگی و سپس عملیات نرمالیزه و استاندارد کردن این داده‌ها برای محاسبه SPI باشد.

سال در وضعیت رطوبتی نرمال و ایستگاه پاچی کمتر از پنج سال در وضعیت رطوبتی خشک قرار خواهند گرفت. همچنین ماتریس ایستای منطقه مورد مطالعه که با استفاده از روش میانگین‌گیری از تمامی ایستگاه‌های مورد پژوهش به دست آمده است، نشان می‌دهد در منطقه مطالعاتی احتمال غالب شدن شرایط خشک‌سالی نسبت به ترسالی بیشتر است. در گذشته نیز مرادی و همکاران (۲۰۱۱) و وفاخواه و بشری‌سه‌قلعه (۱۳۹۱) طی بررسی‌هایی نشان دادند که طی سال‌های اخیر فراوانی خشک‌سالی‌ها نسبت به ترسالی‌ها در مناطقی از ایران افزایش یافته و احتمال غالب شدن شرایط رطوبتی خشک در مناطق بیش از شرایط ترسالی است. البته بایستی این واقعیت را نیز در نظر داشت که دامنه SPI برای حالت رطوبتی نرمال از +۱ تا -۱ است و در این بین خشک‌سالی و ترسالی‌های خفیف قابل رؤیت نیستند. در این صورت غالب بودن شرایط رطوبتی نرمال برای مناطق مورد بررسی مشاهده خواهد شد. این در حالی است که بررسی جزئی نتایج این شاخص نشان می‌دهد تعداد خشک‌سالی‌های خفیف بیش از ترسالی‌های خفیف ایستگاه‌های مورد بررسی بوده است. همچنین نتایج پیش‌بینی شرایط آینده بیانگر این است که ایستگاه



شکل ۲- الف) احتمال ایستای وضعیت رطوبتی نرمال و ب) احتمال ماندگاری ترسالی



شکل ۳- احتمال گرفتار شدن در تله خشک‌سالی در گستره استان خوزستان

خشک‌سالی‌ها و تدارک تمهیدات لازم برای مقابله یا همزیستی با آن می‌باشد. در میان روش‌های پیش‌بینی خشک‌سالی روش مارکوف و تئوری RUN مسبوق به سابقه بوده و نتایج قابل استنادی از آن‌ها ارائه شده است. لذا از این روش‌ها برای بررسی خصوصیات خشک‌سالی‌ها در استان خوزستان استفاده شده است. مطابق با نتایج بدست آمده جهت وضعیت اقلیمی استان خوزستان به سمت خشکی‌های هواشناسی بوده که این امر دشواری بیشتر در تأمین آب مورد نیاز محیط‌زیست و سایر نیازهای انسانی را بدنبال خواهد داشت. با این شرایط امکان بروز منازعات اجتماعی، تحلیل شرایط اقتصادی بویژه در مناطقی که متکی به کشاورزی و دامداری می‌باشد و نیز امکان تشدید مخاطرات طبیعی چون ریزگردها و خشک‌شدن تالاب‌ها و رودخانه‌های استان دور از انتظار نیست.

منابع

۱. بشیرزاده م. و عراقی‌نژاد ش. ۱۳۸۹. پیش‌بینی شدت، تداوم و فراوانی خشک‌سالی با استفاده از تئوری RUN و زنجیره مارکوف مطالعه موردی: استان لرستان. مجله پژوهش آب ایران. ۴(۶): ۹۱-۹۴.

به‌طور کلی در این پژوهش با استفاده از نمایه SPI و مدل زنجیره مارکوف به همراه تئوری RUN، به‌صورت تصادفی-احتمالاتی وقوع وضعیت‌های خشک‌سالی نرمال و ترسالی، همچنین انتقال وضعیت‌های بارشی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین گستره مناطقی که احتمال نسبی بیشتری برای گرفتاری در تله خشک‌سالی دارند، شناسایی شد. بنابر نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان بیان نمود که این امر در تعیین سیاست‌های مدیریتی در زمینه بحران آب، دید خوبی به تصمیم‌سازان برای تسکین آثار خشک‌سالی‌های پیش‌رو در استان استراتژیک خوزستان خواهد داد.

نتیجه‌گیری

طی دهه‌های اخیر دسترسی به منابع آب پایدار و مطمئن به یکی از چالش‌های اساسی مدیریت سرزمین تبدیل شده است. بروز خشک‌سالی‌ها یکی از اصلی‌ترین عوامل محدود کننده در این زمینه بوده است. با این حال خشک‌سالی و پیامدهای ناشی از آن همانند بسیاری وقایع طبیعی دیگر قابل مدیریت می‌باشد. لذا از این طریق می‌توان ریسک و خطرات ناشی از آن را کاهش داد. در این میان راه‌های مختلفی وجود دارد که شاید مؤثرترین آن‌ها پیش‌بینی

۲. حنفی ع. خوش‌اخلاق ف. و سلطانی م. ۱۳۹۱. تحلیل خشک‌سالی‌های استان تهران با استفاده از شاخص SPI و پیش‌بینی آن بر اساس مدل زنجیره مارکوف. جغرافیا و پایداری محیط. ۳: ۸۷-۱۰۰.
۳. خباززاده ن. ۱۳۸۹. تحلیل نظام ترویج مدیریت خشک‌سالی در کشاورزی استان خوزستان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس، رشته ترویج و آموزش کشاورزی. ۱۴۳ ص.
۴. خوش‌اخلاق ف. حنفی ع. و احمدی ح. ۱۳۸۹. تحلیل و پیش‌بینی خشک‌سالی‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک خوی. فصلنامه اطلاعات جغرافیایی (سپهر). ۱۹(۷۴): ۲۴-۲۹.
۵. عساکره ح. و صیادی ف. ۱۳۹۳. ارزیابی توان الگوی زنجیره مارکوف در برآورد و پهنه‌بندی احتمالاتی روزهای خشک ایران. جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۳(۱۰): ۳۷-۵۳.
۶. عساکره ح. و مازینی ف. ۱۳۸۹. بررسی احتمال وقوع روزهای خشک در استان گلستان با استفاده از مدل زنجیره مارکوف. فصلنامه جغرافیا و توسعه. ۸(۱۷): ۲۹-۴۴.
۷. علیجانی ب. محمودی پ. چوگان ع. ج. و بیشه‌نیاسر م. ۱۳۹۰. بررسی ساختار تداوم دو وضعیتی بارش‌های سالانه جنوب ایران با استفاده از مدل وضعیت نهان زنجیره مارکوف. فصلنامه جغرافیا و توسعه. ۹(۲۵): ۱-۲۰.
۸. علیجانی ب. محمودی پ. ریگی چاهی ا. و خسروی پ. ۱۳۸۹. بررسی تداوم روزهای یخبندان در ایران، با استفاده از مدل زنجیره مارکوف. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. ۴۲(۷۳): ۱-۲۰.
۹. علیزاده ا. ۱۳۸۷. اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، چاپ یازدهم. ۸۰۸ ص.
۱۰. فریدحسینی ع. روشنی آ. عرفانیان م. بنایان اول م. و علیزاده ا. ۱۳۹۱. بررسی تغییرات زمانی و مکانی دوره‌های خشک سالانه و فصلی در استان خراسان. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۶(۲): ۴۷۱-۴۸۳.
۱۱. محمودی پ. پروین ن. و رضایی ج. ۱۳۹۲. پهنه‌بندی ایران بر اساس طول دوره‌های خشک.
- مطالعات جغرافیایی مناطق خشک. ۴(۱۳): ۸۵-۱۰۶.
۱۲. مرادی ح. ر. طائی‌سمیرمی م. قاسمیان د. چزگی ج. و بهادری ر. ۱۳۸۷. شبیه‌سازی و تحلیل خشک‌سالی‌های آب‌شناختی و اقلیمی با استفاده از مدل‌های احتمالاتی. مجله علمی پژوهشی علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران. ۲(۵): ۷۱-۷۴.
۱۳. وفاخواه م. و بشری‌سه‌قلعه م. ۱۳۹۱. بررسی احتمال وقوع دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی هیدرولوژیک با استفاده از زنجیره مارکوف در حوزه آبخیز کشف‌رود. پژوهش‌های آب‌خیزداری. ۹۴: ۱-۹.
۱۴. یوسفی ن. و حجام س. ۱۳۸۶. برآورد احتمالات خشک‌سالی و ترسالی با استفاده از زنجیره مارکوف و توزیع نرمال، مطالعه موردی: استان قزوین. پژوهش‌های جغرافیایی. ۳۹(۶۰): ۱۲۱-۱۲۸.
15. Akyuz D. E. Bayazit M. and Onoz B. 2012. Markov Chain Models for Hydrological Drought Characteristics. Journal of Hydrometeorology. 13: 298-309.
16. Bates B. C. and Campbell E. P. 2001. A Markov chain Monte Carlo scheme for parameter estimation and inference in conceptual rainfall-runoff modeling. Water Resources Research. 37(4): 937-947.
17. Haan C. T. Alen D. M. and street J. 1976. Markov chain model of daily rainfall. Water Resources Research. 12 (2): 443-449.
18. Jackson B. B. 1975. Markov mixture models for drought lengths, Water Resources Research. 11(1): 64-75.
19. Jeong C. and Lee T. 2014. Copula-based modeling and stochastic simulation of seasonal intermittent streamflows for arid regions. Journal of Hydro-environment Research. 9(4):604-613.
20. Mckee B. T. Doesken N. J. and Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim CA, American Meteorological Society. 17(22): 179-183.
21. Mirakbari M. Ganji A. and Fallah S. R. 2010. Regional Bivariate Frequency Analysis of Meteorological Droughts. Journal of Hydrologic Engineering. 15(12): 985-1000.
22. Moon S. E. Ryoo S. B. and Kwon J. G. 1994. A Markov chain model for daily precipitation occurrence in South Korea. International Journal of Climatology. 14: 1009-1016.

23. Moradi H. R. Rajabi M. and Faragzadeh M. 2011. Investigation of meteorological drought characteristics in Fars province, Iran. *Catena*. 84: 35-46.
24. Nafarzadegan A. R. Rezaeian Zadeh M. Kherad M. Ahani H. Gharekhani A. Karampoor M. and Kousari M. R. 2012. Drought Area Monitoring During the past Three Decades in Fars Province, Iran. *Quaternary International*. 250: 27-36.
25. Paulo A. A. and Pereira L. S. 2007. Prediction of SPI drought class transitions using Markov chains. *Water Resources Management*. 21(10): 1813-1827.
26. Paulo A. A. Ferreira E. Coelho C. and Pereira L. S. 2005. Drought class transition analysis through Markov and Loglinear models, an approach to early warning. *Agricultural Water Management*. 77(1-3): 59-81.
27. Thompson S. A. 1990. A Markov and runs analysis of drought in the central united states. *Physical Geography*. 11(3): 191-205.
28. Warren A. and Khogali M. M. 1992. Assessment of Desertification and Drought in the Sudano-Sahelian Region 1985-1991. United Nations Sudano-Sahelian Office (UNSO), New York.
29. Zamani A. M. R. Monadi M. and Zarei H. 2013. Using a First Order Markov Chain Model 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.

