

ارزیابی تأثیرگذاری مرتبه مارکف بر دقت پیش‌بینی خشکسالی بر مبنای شاخص SPEI به‌وسیله زنجیره مارکف

عبدالرسول زارعی*

^۱ استادیار، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فسا

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۲۴

چکیده

خشکسالی یکی از پدیده‌های جدایی‌ناپذیر نوسانات اقلیمی است که سالانه خسارات زیادی را به بخش‌های مختلف وارد می‌سازد. بنابراین، پیش‌بینی خشکسالی می‌تواند در کاهش خسارات ناشی از آن موثر باشد. یکی از روش‌های پیش‌بینی خشکسالی زنجیره مارکف می‌باشد. در این مطالعه، با استفاده از داده‌های اقلیمی پنج ایستگاه سینوپتیک کشور با اقلیم‌های مختلف، طی دوره آماری ۱۹۶۷ الی ۲۰۱۴، تأثیر مرتبه زنجیره مارکف (مرتبه‌های ۱، ۲ و ۳) بر دقت پیش‌بینی خشکسالی (بر مبنای شاخص SPEI) به‌وسیله این مدل بررسی شد. بر اساس نتایج، احتمال انتقال از کل طبقات خشکسالی به طبقه ۴ بیشترین فراوانی و به طبقه ۱ کمترین فراوانی را دارا بود. بررسی‌ها نشان داد که در حالتی که بین طبقات خشکسالی پیش‌بینی شده و مشاهده شده، هیچ اختلافی وجود نداشته باشد، مارکف مرتبه ۳، دارای بهترین نتایج پیش‌بینی است. زمانی که بین طبقات خشکسالی پیش‌بینی شده و مشاهده شده فقط یک طبقه اختلاف وجود داشته باشد، در ۶۰ درصد موارد مارکف مرتبه ۳ و در ۴۰ درصد موارد مارکف مرتبه ۲ دارای بهترین نتایج پیش‌بینی بود. زمانی که بین طبقات خشکسالی پیش‌بینی شده و مشاهده شده دو یا سه طبقه اختلاف وجود داشته باشد، مارکف مرتبه ۳، دارای بهترین نتایج بود. بنابراین، توصیه می‌شود، در پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از شاخص SPEI و زنجیره مارکف، در درجه اول مارکف مرتبه ۳ و در درجه بعد از مارکف مرتبه ۲ استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: اثرات خشکسالی، پایش، تحلیل خشکسالی، شاخص خشکسالی، نوسانات اقلیمی

مقدمه

زمان‌های گذشته، حال و آینده، پایش وضعیت خشکسالی یا به عبارت دیگر، بررسی وضعیت آن در سری زمانی آمار موجود در آن منطقه ضروری است (Ashgar Tosi و Alizadeh، ۲۰۰۸). پایش خشکسالی می‌تواند به دو صورت توصیفی و کمی صورت گیرد. امروزه عمدتاً از روش‌های کمی در بررسی خشکسالی استفاده می‌شود (Klugman، ۲۰۰۴). تا کنون شاخص‌های مختلفی برای محاسبه شدت خشکسالی

خشکسالی و اثرات ناشی از آن یکی از رایج‌ترین و پر خسارت‌ترین پدیده‌های محیطی است که در تمام نواحی اقلیمی رخ می‌دهد (Zarei، ۲۰۱۸؛ Thompson، ۱۹۹۹)، طبیعی است که متناسب با شدت و تداوم خشکسالی، اثرات ناشی از آن متفاوت خواهد بود (Zarei و همکاران، ۲۰۱۶a,b). بنابراین، در راستای امکان بررسی وضعیت خشکسالی در

* مسئول مکاتبات: ar_zareiee@fasau.ac.ir

گذر از یک حالت معین به همان حالت در زمان‌های متوالی بسیار بالا است و در عوض، احتمال گذر از حالت خشک به تر و یا برعکس بسیار پایین است.

Razei (۲۰۱۶) با استفاده از مدل‌های سری زمانی و زنجیره مارکف مرتبه ۱ اقدام به پیش‌بینی پدیده خشکسالی در بخش خشک و نیمه‌خشک مرکز و شرق ایران کرد. نتیجه این بررسی نشان داد که احتمال رسیدن از یک حالت معین به همان حالت در ماه بعدی در همه ایستگاه‌ها، بسیار زیاد و اغلب بیش از ۶۰ درصد است. در مقابل، احتمال گذر از یک وضعیت به وضعیت مخالف در همه ایستگاه‌ها بسیار پائین و اغلب کمتر از ۱۰ درصد است. Hatefi و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی خصوصیات خشکسالی با استفاده از زنجیره مارکف مرتبه ۱ در شهر زاهدان پرداختند. ایشان پس از تعیین وضعیت رطوبتی (خشکسالی) این ایستگاه بر اساس شاخص‌های SPI، RDI و SPEI، در بازه‌های زمانی فصلی و سالانه، اقدام به بررسی قابلیت اطمینان وضعیت آسیب‌پذیری نسبت به خشکسالی کردند. نتایج این بررسی نشان داد که احتمال تغییر حالت از مرطوب به خشک‌سالی نسبت به تغییر حالت از خشکسالی به مرطوب در تمامی بازه‌های زمانی از نوسانات بیشتری برخوردار است. همچنین، احتمال ماندگاری وضعیت نرمال بیش از وضعیت خشکسالی و وضعیت خشکسالی بیش از وضعیت مرطوب است. در این رابطه، می‌توان به تحقیقات دیگری همچون Zarei و Mahmoudi (۲۰۱۷)، Hovenga و همکاران (۲۰۱۶)، Hus و همکاران (۲۰۱۵)، Zareiee و همکاران (۲۰۱۴)، Khalili و همکاران (۲۰۱۱)، Tsakiris و Nalbantis (۲۰۰۹) و Paulo و Pereira (۲۰۰۷) نیز اشاره کرد.

با توجه به کاربرد گسترده مارکف مرتبه ۱ در استفاده از روش زنجیره مارکف به‌منظور پیش‌بینی خشکسالی، در مطالعه حاضر با هدف بررسی میزان دقت مارکف مرتبه ۱ در پیش‌بینی خشکسالی اقدام به بررسی و مقایسه میزان تأثیرگذاری مرتبه مارکف (مرتبه‌های ۱، ۲ و ۳) بر میزان دقت روش زنجیره مارکف در امر پیش‌بینی طبقات شدت خشکسالی در پنج ایستگاه سینوپتیک کشور، با شرایط اقلیمی متفاوت شد.

ارائه شده است. در این مطالعه، از شاخص SPEI به‌عنوان یکی از جدیدترین شاخص‌های ارزیابی خشکسالی (Vicente-Serrano و همکاران، ۲۰۱۰) استفاده و شدت خشکسالی ماهانه بر مبنای آن محاسبه شد. پیش‌بینی خشکسالی به‌عنوان یکی از راهبردهای مقابله با این رخداد طبیعی و کاهش اثرات مخرب آن امری است که در سال‌های اخیر توجه کارشناسان هواشناسی و کشاورزی را به خود جلب کرده است (Zarei و همکاران، ۲۰۱۶c). روش‌های مختلفی برای بررسی و پیش‌بینی خشکسالی وجود دارد، یکی از روش‌های پرکاربرد در این زمینه، مدل زنجیره مارکوف است که برای پیش‌بینی احتمالاتی بارندگی و رویدادهای خشکسالی به‌کار می‌رود.

تا کنون مطالعات زیادی در رابطه با پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از روش زنجیره مارکف صورت گرفته است. Lohani و همکاران (۱۹۹۸) به کمک مدل زنجیره مارکف مرتبه ۱ و بر اساس شرایط خشکسالی در زمان حاضر، اقدام به پیش‌بینی شرایط خشکسالی را برای چند ماه آینده کردند. Sarlak و همکاران (۲۰۰۹) به تحلیل خشکسالی‌های شدید در حوضه رودخانه گوکسو واقع در ترکیه پرداختند. آن‌ها برای بررسی اثرات نوسانات اقیانوس اطلس شمالی از مدل زنجیره مارکوف بهره بردند. Ahmadi Motlaq و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی و پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از مدل زنجیره مارکف مرتبه ۱ و شاخص خشکسالی SPI در استان فارس پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد که در تمامی ایستگاه‌ها وضعیت تقریباً نرمال، بر اساس شاخص SPI با مقیاس زمانی شش ماهه، بیشترین فراوانی را دارا می‌باشد و احتمال گذر از یک حالت معین به همان حالت در زمان‌های متوالی بسیار بالا است، در حالی که احتمال گذر از حالت خشک به تر و یا برعکس بسیار پایین است. Shokri kochak و Behnia (۲۰۱۳) با استفاده از سری‌های زمانی حاصل از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و زنجیره مارکوف مرتبه ۱، پایش و پیش‌بینی گسترش خشکسالی در سطح استان خوزستان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که در تمامی ایستگاه‌ها وضعیت تقریباً نرمال با مقیاس زمانی شش ماهه، بیشترین فراوانی را دارا می‌باشد و احتمال

مواد و روش‌ها

ایستگاه‌های مورد پژوهش: در این مطالعه، از داده‌های اقلیمی پنج ایستگاه سینوپتیک کشور (با شرایط اقلیم متفاوت) طی سال‌های ۱۹۶۷ تا ۲۰۱۴ استفاده شد. ایستگاه‌های مورد مطالعه شامل گرگان با اقلیم نیمه‌مرطوب، رشت با اقلیم مرطوب، شیراز با اقلیم خشک، یزد با اقلیم فرا خشک و زنجان با اقلیم نیمه‌خشک هستند. متوسط بارندگی ایستگاه‌های مورد مطالعه ۴/۸۴ تا ۱۱۲/۷۸ میلی‌متر در ماه نوسان می‌کند. برخی از خصوصیات توپوگرافیکی و اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

روش پژوهش

محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل: در این مطالعه، تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه با استفاده از روش پنمن-مونتیت فائو (فائو ۵۶) محاسبه شد. در این راستا، از

رابطه (۱) (Allen و همکاران، ۱۹۹۸؛ Zarei و همکاران، ۲۰۱۵) و نرم‌افزار Cropwat 8 استفاده شد.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

که در آن، ET_0 تبخیر و تعرق مرجع (میلی‌متر بر روز)، Δ شیب منحنی فشار بخار در دمای T (کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، R_n تابش خالص در سطح گیاه (مگاژول بر متر مربع در روز)، G شار گرمای خاک (مگاژول بر متر مربع در روز)، T دمای هوا در ارتفاع دو متری (سلسیوس)، u_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)، $e^0(T) = e_s$ فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال)، $e_a = e^0(T_{dew})$ فشار بخار واقعی (کیلو پاسکال)، $(e_s - e_a)$ کمبود فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال) و γ ضریب ثابت سایکرومتری (کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد) می‌باشد.

جدول ۱- خصوصیات اقلیمی و جغرافیایی ایستگاه‌های مورد بررسی

نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	متوسط بارش ماهانه (mm)	ارتفاع از سطح دریا (m)	شاخص خشکی	تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه (mm)	اقلیم
گرگان	۳۶/۸۵	۵۴/۲۷	۴۷/۷۶	۱۳	۰/۵۵۷	۸۵/۷۹	نیمه‌مرطوب
رشت	۳۷/۲۵	۴۹/۵۰	۱۱۲/۷۸	-۶	۰/۶۰۶	۷۰/۲۱	مرطوب
شیراز	۲۹/۵۳	۵۲/۶۰	۲۷/۰۰	۱۴۸۴	۰/۱۸۱	۱۴۹/۰۶	خشک
یزد	۳۱/۹۰	۵۴/۲۸	۴/۸۴	۱۲۳۷	۰/۰۲۹	۱۶۸/۰۳	بسیار خشک
زنجان	۳۶/۶۸	۴۸/۴۸	۲۵/۵۵	۱۶۶۳	۰/۲۴۱	۱۰۶/۱۲	نیمه‌خشک

توجه: تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه با استفاده از رابطه فائو پنمن-مونتیت و شاخص خشکی (Aridity Index) بر مبنای روش UNEP که بر اساس نسبت بارندگی به تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه می‌شود، تعیین شده است.

محاسبه شاخص SPEI: این شاخص در مقیاس‌های

زمانی مختلف از معادله ساده بیلان آب، یعنی تفاوت بین بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده می‌کند. با در نظر گرفتن تبخیر و تعرق پتانسیل (ETP)، تفاوت بین بارندگی (P) و تبخیر و تعرق پتانسیل برای ماه i از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$D_i = P_i - ETP_i \quad (2)$$

مقادیر D در مقیاس‌های مختلف زمانی با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$D_n^k = \sum_{n=0}^{k-1} P_{n-1} - ETP_{n-1} \quad (3)$$

که در آن، k (ماه‌ها، فصل‌ها و یا سال‌ها) مقیاس زمانی مورد نظر و n ماه، فصل یا سال مورد نظر در محاسبه است.

یک توزیع سه پارامتری برای محاسبه شاخص خشکسالی نیاز است تا بتواند مقادیر منفی در داده‌های D را پوشش دهد. نتایج انتخاب مناسب‌ترین تابع توزیع نشان داده است که تابع لجستیک لگاریتمی، برازش خوبی بر سری زمانی داده‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف دارد. بدین ترتیب تابع تجمعی احتمال سری داده‌های D بر اساس تابع لجستیک لگاریتمی به صورت رابطه زیر است.

$$F(X) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{X - \gamma} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

که در آن، α پارامتر مقیاس و γ پارامتر اصلی برای مقادیر D در محدوده بین γ و ∞ می‌باشد.

بنابراین، پس از محاسبه تابع تجمعی و تبدیل آن به مقادیر نرمال شاخص SPEI تعیین شد. مقادیر

شاخص SPEI در طبقات مختلف خشکسالی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- طبقه‌بندی شاخص SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)

شماره طبقه	دامنه تغییرات شاخص	طبقه خشکسالی
۱	بزرگ‌تر مساوی از ۲	تر سالی بسیار شدید
۲	۱/۵ الی ۱/۹۹	تر سالی شدید
۳	۱ الی ۱/۴۹	تر سالی متوسط
۴	۰/۹۹- الی ۰/۹۹	نرمال
۵	-۱ الی -۱/۴۹	خشکسالی سالی متوسط
۶	-۱/۵ الی -۱/۹۹	خشکسالی سالی شدید
۷	کوچک‌تر مساوی ۲-	خشکسالی سالی بسیار شدید

زنجیره‌های مارکف تقریب زده می‌شوند. این کار، ساختن مدل‌های بهینه‌سازی تصادفی آسان‌تر را ممکن می‌سازد (Moghimi و Sepaskhah, ۲۰۰۸). احتمال تغییر وضعیت k مرحله‌ای زنجیره مارکوف به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$P_n^k = (i \rightarrow j) = P[X(n+k) = j | X(n) = i] \quad (۶)$$

این احتمال تغییر وضعیت، برابر احتمال بودن در حالت i ام، k دوره زمانی پس از بودن در حالت i ام با آغاز از زمان n است. همان‌طور که در قبل ذکر شد، بیشتر محققین برای شبیه‌سازی خشکسالی، تغییر وضعیت یک مرحله‌ای زنجیره مارکوف را مورد استفاده قرار داده‌اند. طبیعی است در این حالت، احتمال وقوع پدیده به شرط وقوع پدیده خاص در یک زمان قبل از خودش است، اما در مارکف مرتبه ۲ یا ۳ احتمال وقوع پدیده، به شرط وقوع پدیده‌ای خاص، در دو یا سه زمان قبل از خودش بررسی می‌شود (جدول ۳). این احتمالات می‌توانند در قالب یک ماتریس نیز ارائه شوند که به ماتریس تغییر وضعیت زنجیره مارکوف (ماتریس احتمال انتقال) مشهور هستند. در یک ماتریس تغییر وضعیت ردیف‌ها، معرف حالت i و ستون‌ها، معرف حالت j هستند. در مطالعه حاضر، متناسب با تعداد طبقات شدت خشکسالی، ماتریس‌های احتمال انتقال مارکف در مرتبه‌های ۱، ۲ و ۳ مرحله‌ای در نهایت هفت در هفت خواهند بود.

زنجیره مارکف: چنانچه در سامانه برآوردها در یک زمان، تحت تأثیر برآوردها در زمان‌های دیگر باشد، فرایند از نوع مارکوف است (Jafari Behi, ۱۹۹۸). معمولاً در بسیاری از مدل‌های منابع آب و هیدرولوژی فرض می‌شود که فرایند تصادفی $X(t)$ یک فرایند مارکوف است. در یک فرایند مارکوف، مقادیر زمان $t+1$ (مرحله^۱) یک فرایند، تنها به مقادیر زمان t آن فرایند وابسته است (Moghimi و Sepaskhah, ۲۰۰۸). برای تعریف دقیق فرایند مارکوف مرتبه ۱، می‌توان گفت اگر برای زمان‌های \dots و $n=۳,۲,۱,۰$ تابع ذکر شده در رابطه (۵) برقرار باشد، تابع یک فرایند مارکف مرتبه ۱ می‌باشد.

$$P \left[\begin{matrix} X(n+1) = \\ S(n+1) | X(n) = S(n), X(n-1) = \\ S(n-1), \dots, X(0) = S(0) \end{matrix} \right] = P \left[\begin{matrix} X(n+1) = S(n+1) | X(n) = \\ S(n) \end{matrix} \right] \quad (۵)$$

که در آن، $X(n)$ یک فرایند تصادفی و $S(n)$ مجموعه دلخواهی از حالت‌های فرایند می‌باشد. در فرایند مارکوف، مقدار فعلی فرایند غالباً به‌عنوان حالت فرایند در نظر گرفته می‌شود و این تعبیر، زمانی که از وقوع حالت خاص یا طبقه خاصی از خشکسالی صحبت می‌شود، معنای فیزیکی می‌یابد. یک نوع خاص از فرایند مارکوف، نوعی است که حالت $X(t)$ آن تنها بتواند مقادیر گسسته را اختیار کند. چنین فرایندی را زنجیره مارکوف گویند. در مباحث هیدرولوژی و منابع آب غالباً فرایندهای پیوسته با

¹ Stage

جدول ۳- ماتریس احتمال تغییر وضعیت (احتمال انتقال) از یک طبقه خشکسالی به طبقات دیگر در سری داده

	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	$P(1|1_{t-1})$	$P(1|2_{t-1})$				$P(1|6_{t-1})$	$P(1|7_{t-1})$
۲	$P(2|1_{t-1})$	$P(2|2_{t-1})$				$P(2|6_{t-1})$	$P(2|7_{t-1})$
۳	...	...	...	...	...	...	...
۴	...	...	...	...	...	...	...
۵	...	...	...	...	...	...	...
۶	$P(6|1_{t-1})$	$P(6|2_{t-1})$				$P(6|6_{t-1})$	$P(6|7_{t-1})$
۷	$P(7|1_{t-1})$	$P(7|2_{t-1})$				$P(7|6_{t-1})$	$P(7|7_{t-1})$

الف

	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	$P(1|1_{t-2})$	$P(1|2_{t-2})$				$P(1|6_{t-2})$	$P(1|7_{t-2})$
۲	$P(2|1_{t-2})$	$P(2|2_{t-2})$				$P(2|6_{t-2})$	$P(2|7_{t-2})$
۳	...	...	...	...	...	...	...
۴	...	...	...	...	...	...	...
۵	...	...	...	...	...	...	...
۶	$P(6|1_{t-2})$	$P(6|2_{t-2})$				$P(6|6_{t-2})$	$P(6|7_{t-2})$
۷	$P(7|1_{t-2})$	$P(7|2_{t-2})$				$P(7|6_{t-2})$	$P(7|7_{t-2})$

ب

	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	$P(1|1_{t-3})$	$P(1|2_{t-3})$				$P(1|6_{t-3})$	$P(1|7_{t-3})$
۲	$P(2|1_{t-3})$	$P(2|2_{t-3})$				$P(2|6_{t-3})$	$P(2|7_{t-3})$
۳	...	...	...	...	...	...	...
۴	...	...	...	...	...	...	...
۵	...	...	...	...	...	...	...
۶	$P(6|1_{t-3})$	$P(6|2_{t-3})$				$P(6|6_{t-3})$	$P(6|7_{t-3})$
۷	$P(7|1_{t-3})$	$P(7|2_{t-3})$				$P(7|6_{t-3})$	$P(7|7_{t-3})$

ج

الف) ماتریس احتمال انتقال مارکف مرتبه ۱ است (احتمال وقوع هر طبقه خشکسالی به شرط وقوع طبقه خاصی یک ماه قبل از خود)، ب) ماتریس احتمال انتقال مارکف مرتبه ۲ می‌باشد (احتمال وقوع هر طبقه خشکسالی به شرط وقوع طبقه خاصی دو ماه قبل از خود) و ج) ماتریس احتمال انتقال مارکف مرتبه ۳ می‌باشد (احتمال وقوع هر طبقه خشکسالی به شرط وقوع طبقه خاصی سه ماه قبل از خود).

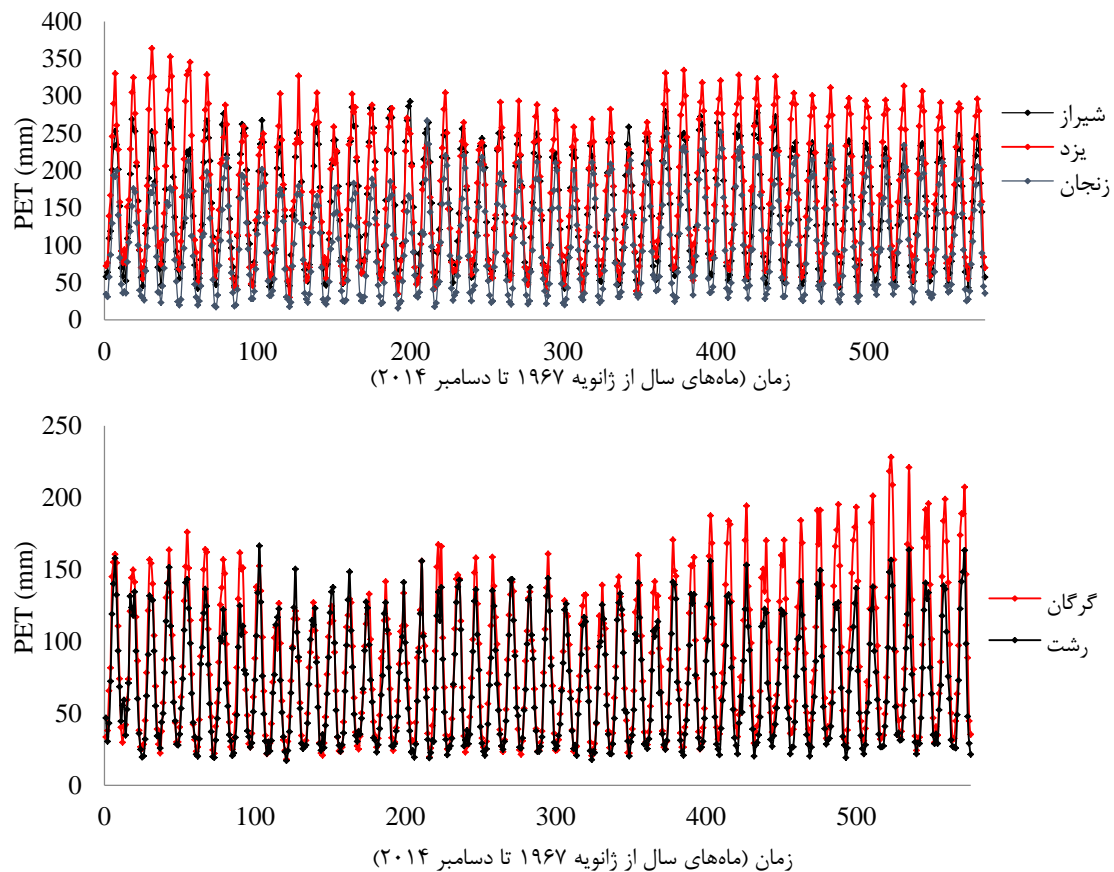
پیش‌بینی با استفاده از زنجیره مارکف در مرتبه‌های مختلف اقدام شد.

نتایج و بحث

در این مطالعه، پس از محاسبه مقادیر ماهانه تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از روش پنمن مانتیس فائو در ایستگاه‌های مورد مطالعه (شکل ۱) اقدام به محاسبه مقادیر شاخص SPEI ماهانه در هر ایستگاه شد (شکل ۲). نتایج به‌دست آمده از شکل ۱ نشان داد، به‌ترتیب ایستگاه‌های یزد، شیراز، زنجان، گرگان و رشت دارای بیشترین مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه هستند.

ارزیابی میزان دقت پیش‌بینی زنجیره مارکف با

مرتبه‌های مختلف: در این مطالعه، به‌منظور بررسی و ارزیابی میزان دقت پیش‌بینی انجام شده به‌وسیله زنجیره مارکف با مرتبه‌های ۱، ۲ و ۳، اقدام به تهیه ماتریس‌های احتمال انتقال برای طبقات مختلف شدت خشکسالی ماهانه (بر مبنای شاخص SPEI) طی سال‌های ۱۹۶۷ الی ۲۰۰۴ کرده، با استفاده از زنجیره مارکف با مرتبه‌های مختلف نسبت به پیش‌بینی طبقات خشکسالی ماهانه، طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۴ (به مدت ۱۲۰ ماه)، اقدام شد. از مقایسه طبقات پیش‌بینی شده با داده‌های واقعی طی دوره آماری ۱۰ ساله فوق‌الذکر، نسبت به بررسی دقت



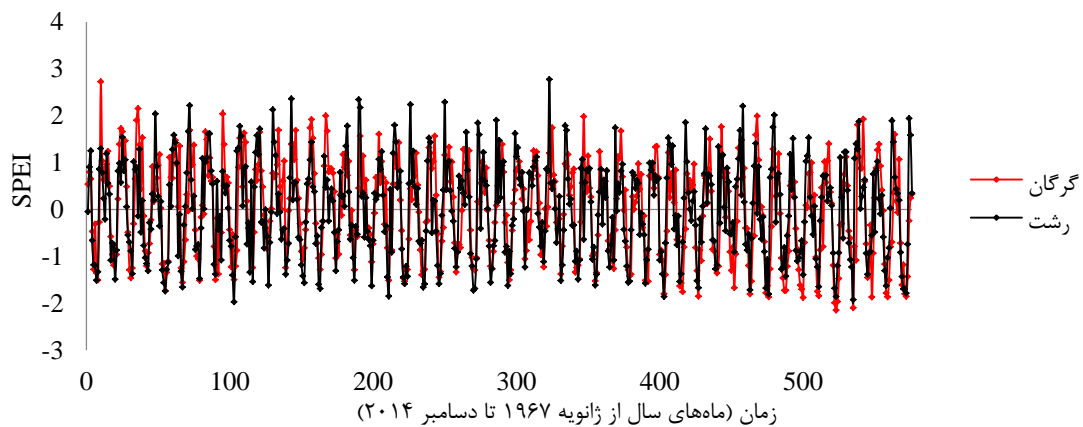
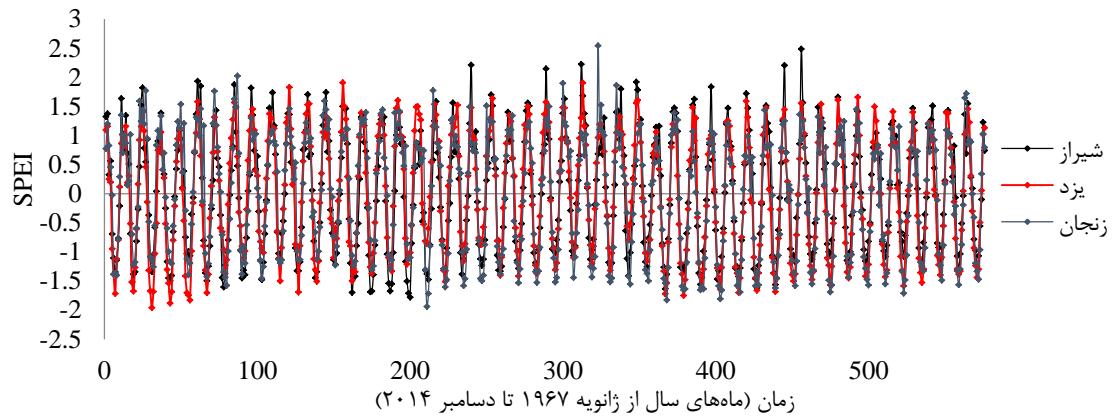
شکل ۱- تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه (بر اساس روش پنمن مونتیث فائو) در ایستگاه‌های مورد بررسی

حالی‌که در تمام ایستگاه‌های مورد بررسی کمترین فراوانی وقوع مربوط به طبقه خشکسالی بسیار شدید (طبقه ۷) می‌باشد (جدول ۴).

سپس، به‌منظور امکان بررسی تأثیرگذاری مرتبه مارکف بر دقت پیش‌بینی زنجیره مارکف اقدام به تهیه ماتریس احتمال انتقال از یک طبقه خشکسالی به طبقه دیگر خشکسالی برای داده‌های موجود در ایستگاه‌های مورد مطالعه طی دوره آماری ۱۹۶۷ الی ۲۰۰۴ در مقیاس زمانی ماهانه شد (جدول ۵ به‌عنوان نمونه). لازم به ذکر است که داده‌های ماهانه دوره آماری ۲۰۰۵ الی ۲۰۱۴ در تهیه ماتریس احتمال انتقال مورد استفاده قرار نگرفتند تا از آن‌ها به‌عنوان داده واقعی یا مشاهده شده در بحث بررسی دقت پیش‌بینی به‌وسیله مارکف با مرتبه‌های ۱، ۲ و ۳ استفاده شود.

نتایج به‌دست آمده از شکل ۲، نشان داد که بیشترین فراوانی وقوع طبقات شدت خشکسالی ماهانه در تمام ایستگاه‌های مورد بررسی مربوط به طبقه خشکسالی نرمال (طبقه ۴) است (شکل ۲ و جدول ۴).

در مرحله بعد، به کمک نرم‌افزار SPSS 20 اقدام به تهیه ماتریس وضعیت آغازین خشکسالی (π_0) در ایستگاه‌های مورد مطالعه در بحث طبقات خشکسالی شد (جدول ۴). این ماتریس در حقیقت نشان‌دهنده فراوانی وقوع طبقات مختلف شدت خشکسالی در سری داده‌های مورد بررسی طی دوره آماری ۱۹۶۷ الی ۲۰۱۴ می‌باشد. نتایج حاصل از این ماتریس نشان داد که در تمام ایستگاه‌های مورد بررسی بیشترین فراوانی وقوع طبقات خشکسالی مربوط به طبقات نرمال، خشکسالی متوسط و ترسالی متوسط است. در



شکل ۲- شاخص SPEI ماهانه در ایستگاه های مورد بررسی

جدول ۴- ماتریس احتمال آغازین یا ماتریس احتمال پای صفر (II₀) در ایستگاه های مورد بررسی (دوره آماری ۱۹۶۷ الی ۲۰۱۴)

احتمال وقوع طبقات مختلف خشکسالی در سری داده های در دسترس							نام ایستگاه
EW	VW	MW	N	MD	SD	ED	
۰/۰۰۸	۰/۰۴۹	۰/۱۱۷	۰/۶۳۲	۰/۱۳۸	۰/۰۵۷	۰/۰۰۰	گرگان
۰/۰۲۱	۰/۰۵۳	۰/۰۹۲	۰/۶۴۷	۰/۱۲۱	۰/۰۶۶	۰/۰۰۰	رشت
۰/۰۱۰	۰/۰۵۷	۰/۱۲۹	۰/۵۵۸	۰/۲۱۸	۰/۰۲۹	۰/۰۰۰	شیراز
۰/۰۰۰	۰/۰۳۷	۰/۲۰۳	۰/۵۴۲	۰/۱۶۶	۰/۰۵۳	۰/۰۰۰	یزد
۰/۰۰۴	۰/۰۲۱	۰/۱۸۳	۰/۵۳۶	۰/۱۹۱	۰/۰۶۴	۰/۰۰۰	زنجان

کمترین احتمال انتقال در ایستگاه های گرگان، رشت، زنجان و شیراز مربوط به انتقال از طبقات ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ به طبقه ۱ و در ایستگاه یزد مربوط به انتقال از طبقاتی ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ به طبقه ۲ است (جدول ۵ به عنوان نمونه). در مرحله بعد با استفاده از ماتریس های احتمال انتقال تهیه شده برای ایستگاه های مورد بررسی (با مرتبه های ۱، ۲ و ۳ مارکف)، بر اساس شاخص SPEI طی دوره آماری ۱۹۶۷ الی ۲۰۰۴، اقدام به پیش بینی طبقات شدت خشکسالی ماهانه طی دوره آماری ۲۰۰۵ الی ۲۰۱۴ (۱۲۰ ماه) شد (جدول ۶).

نتایج به دست آمده، نشان داد که ماتریس احتمال انتقال در مرتبه های ۱، ۲ و ۳ مارکف در ایستگاه های گرگان، رشت، زنجان و شیراز به صورت ماتریس ۶×۶ است (عدم وجود طبقه خشکسالی بسیار شدید یا طبقه ۷) و در ایستگاه یزد به صورت ماتریس ۵×۵ (عدم وجود طبقات ترسالی بسیار شدید یا طبقه ۱ و خشکسالی بسیار شدید یا طبقه ۷). ماتریس احتمال انتقال در ایستگاه های مورد بررسی نشان داد که بیشترین احتمال انتقال در ایستگاه های گرگان، رشت، زنجان و شیراز مربوط به انتقال از طبقات ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ به طبقه ۴ و در ایستگاه یزد مربوط به انتقال از طبقات ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ به طبقه ۴ است. همچنین،

جدول ۵- ماتریس احتمال انتقال از یک طبقه خشکسالی به طبقه دیگر در سری داده‌های ایستگاه شیراز طی دوره ۱۹۶۷ الی ۲۰۰۴

	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۰/۰۰۰	۰/۴۰۰	۰/۲۰۰	۰/۴۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
۲	۰/۰۰۰	۰/۱۷۲	۰/۳۷۹	۰/۴۴۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
۳	۰/۰۳۰	۰/۱۳۴	۰/۳۵۸	۰/۴۷۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
۴	۰/۰۱۰	۰/۰۴۵	۰/۱۰۸	۰/۶۸۳	۰/۱۵۰	۰/۰۰۳
۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۳۸۴	۰/۵۳۶	۰/۰۸۰
۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۶۷	۰/۶۰۰	۰/۳۳۳

الف

	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۲۰۰	۰/۸۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
۲	۰/۰۰۰	۰/۰۳۴	۰/۲۰۷	۰/۷۵۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
۳	۰/۰۰۰	۰/۰۶۱	۰/۱۶۷	۰/۷۲۷	۰/۰۴۵	۰/۰۰۰
۴	۰/۰۱۷	۰/۰۸۴	۰/۱۶۴	۰/۴۶۳	۰/۳۴۴	۰/۰۲۸
۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۹	۰/۶۳۴	۰/۳۱۳	۰/۰۴۵
۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۶۰۰	۰/۲۶۷	۰/۱۳۳

ب

	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۴۰۰	۰/۶۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۶۹	۰/۷۹۳	۰/۱۳۸	۰/۰۰۰
۳	۰/۰۰۰	۰/۰۳۰	۰/۰۶۱	۰/۶۸۲	۰/۲۱۲	۰/۰۱۵
۴	۰/۰۱۷	۰/۰۹۱	۰/۱۷۸	۰/۳۸۱	۰/۲۹۰	۰/۰۴۲
۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۹	۰/۰۵۴	۰/۸۳۰	۰/۰۸۹	۰/۰۱۸
۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۶۷	۰/۸۶۷	۰/۰۶۷	۰/۰۰۰

ج

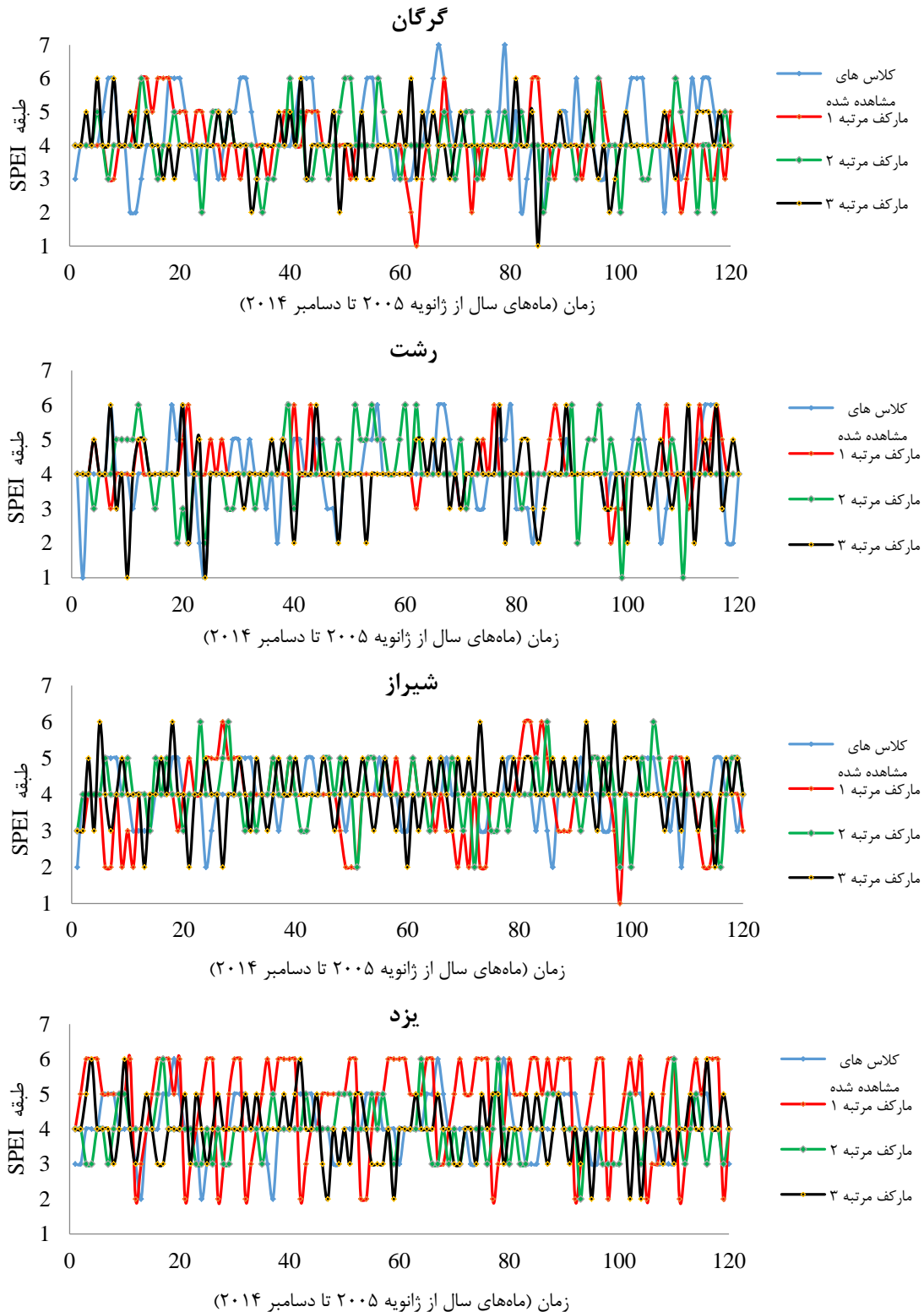
الف) ماتریس احتمال انتقال مارکف مرتبه ۱، ب) ماتریس احتمال انتقال مارکف مرتبه ۲ و ج) ماتریس احتمال انتقال مارکف مرتبه ۳

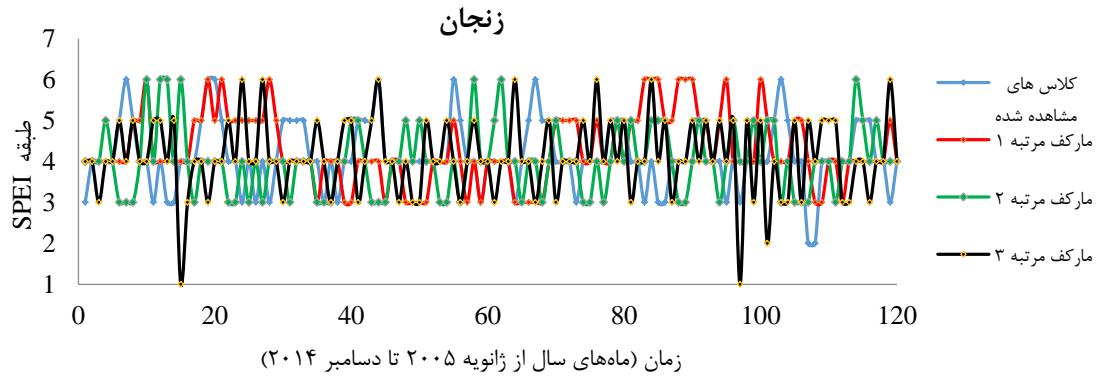
جدول ۶- طبقات خشکسالی ماهانه پیش‌بینی شده در ایستگاه‌های مورد بررسی

نام ایستگاه	مرتبۀ مارکف	ماه‌های پیش‌بینی شده (از ژانویه ۲۰۰۵ تا دسامبر ۲۰۱۴)										
		۱	۲	۳	۴	۵	...	۱۱۶	۱۱۷	۱۱۸	۱۱۹	۱۲۰
گرگان	مرتبۀ ۱	۴	۴	۴	۴	۴	...	۳	۳	۴	۳	۳
		۴	۴	۴	۴	۴	...	۶	۵	۴	۴	۴
		۳	۳	۴	۴	۴	...	۴	۴	۴	۴	۴
		۴	۵	۶	۶	۶	...	۶	۶	۶	۲	۴
		۴	۴	۴	۴	۴	...	۴	۴	۴	۵	۴
گرگان	مرتبۀ ۲	۴	۴	۴	۴	۴	...	۴	۴	۴	۵	۴
		۴	۴	۴	۴	۴	...	۴	۳	۴	۴	۴
		۳	۳	۴	۴	۴	...	۲	۴	۵	۵	۴
		۴	۴	۳	۳	۴	...	۳	۴	۴	۳	۴
		۴	۴	۴	۴	۴	...	۴	۵	۴	۴	۴
گرگان	مرتبۀ ۳	۴	۴	۵	۴	۵	...	۶	۴	۵	۴	۴
		۴	۴	۴	۳	۶	...	۴	۵	۴	۶	۴
		۳	۳	۴	۵	۴	...	۶	۳	۵	۵	۴
		۴	۴	۴	۴	۶	...	۴	۶	۵	۵	۴
		۴	۴	۴	۴	۳	...	۴	۴	۳	۴	۴

با مقادیر عددی به دست آمده در سری داده‌های واقعی یا مشاهده شده نیز دارای هم‌خوانی است. نتایج حاصل از پیش‌بینی نشان داد که طبقه خشکسالی بسیار شدید یا طبقه ۷ دارای کمترین فراوانی وقوع در سری‌های پیش‌بینی شده است (شکل ۳ و جدول ۷).

نتایج حاصل از پیش‌بینی طبقات خشکسالی ماهانه نشان داد که در تمام ایستگاه‌های مورد بررسی طبقه خشکسالی نرمال یا ۴ در تمام پیش‌بینی‌های انجام شده (بر مبنای مارکف با مرتبه‌های ۱، ۲ و ۳) دارای بیشترین فراوانی وقوع می‌باشد، که این موضوع





شکل ۳- طبقات شاخص SPEI ماهانه مشاهده شده و پیش‌بینی شده بر اساس روش زنجیره مارکف با مرتبه ۱، ۲ و ۳ در ایستگاه‌های مورد بررسی

جدول ۷- درصد وقوع طبقات مختلف خشکسالی ماهانه (مشاهده شده و پیش‌بینی شده بر مبنای مرتبه‌های مختلف مارکف) در ایستگاه‌های مختلف از ژانویه ۲۰۰۵ تا دسامبر ۲۰۱۴

درصد وقوع طبقات مختلف خشکسالی							نام ایستگاه
EW	VW	MW	N	MD	SD	ED	
۰/۰۰۰	۰/۰۴۲	۰/۱۰۰	۰/۵۳۳	۰/۱۳۳	۰/۱۷۵	۰/۰۱۷	مشاهده شده
۰/۰۰۸	۰/۰۲۵	۰/۱۴۲	۰/۶۲۵	۰/۱۲۵	۰/۰۷۵	۰/۰۰۰	مرتبه ۱ مارکف
۰/۰۰۰	۰/۰۸۳	۰/۱۰۰	۰/۶۰۸	۰/۱۵۰	۰/۰۵۸	۰/۰۰۰	مرتبه ۲ مارکف
۰/۰۰۸	۰/۰۳۳	۰/۱۰۰	۰/۶۳۳	۰/۱۸۳	۰/۰۴۲	۰/۰۰۰	مرتبه ۳ مارکف
۰/۰۱۷	۰/۰۵۸	۰/۱۰۰	۰/۶۰۰	۰/۱۳۳	۰/۰۹۲	۰/۰۰۰	مشاهده شده
۰/۰۰۰	۰/۰۰۸	۰/۰۵۰	۰/۷۹۲	۰/۰۸۳	۰/۰۶۷	۰/۰۰۰	مرتبه ۱ مارکف
۰/۰۱۷	۰/۰۳۳	۰/۰۷۵	۰/۶۵۰	۰/۱۵۰	۰/۰۷۵	۰/۰۰۰	مرتبه ۲ مارکف
۰/۰۱۷	۰/۰۶۷	۰/۰۹۲	۰/۶۳۳	۰/۱۱۷	۰/۰۷۵	۰/۰۰۰	مرتبه ۳ مارکف
۰/۰۰۰	۰/۰۳۳	۰/۱۴۲	۰/۶۵۸	۰/۱۶۷	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	مشاهده شده
۰/۰۱۷	۰/۱۰۰	۰/۱۳۳	۰/۵۵۰	۰/۱۶۷	۰/۰۳۳	۰/۰۰۰	مرتبه ۱ مارکف
۰/۰۰۰	۰/۰۴۲	۰/۱۱۷	۰/۶۰۰	۰/۲۰۸	۰/۰۳۳	۰/۰۰۰	مرتبه ۲ مارکف
۰/۰۰۰	۰/۰۴۲	۰/۱۲۵	۰/۵۴۲	۰/۲۴۲	۰/۰۵۰	۰/۰۰۰	مرتبه ۳ مارکف
۰/۰۰۰	۰/۰۲۵	۰/۱۸۳	۰/۵۰۰	۰/۲۶۷	۰/۰۲۵	۰/۰۰۰	مشاهده شده
۰/۰۰۰	۰/۰۱۷	۰/۰۹۲	۰/۵۰۸	۰/۱۹۲	۰/۱۹۲	۰/۰۰۰	مرتبه ۱ مارکف
۰/۰۰۰	۰/۰۰۸	۰/۲۱۷	۰/۶۱۷	۰/۱۲۵	۰/۰۳۳	۰/۰۰۰	مرتبه ۲ مارکف
۰/۰۰۰	۰/۰۴۲	۰/۱۷۵	۰/۵۵۸	۰/۱۹۲	۰/۰۳۳	۰/۰۰۰	مرتبه ۳ مارکف
۰/۰۰۰	۰/۰۱۷	۰/۱۵۰	۰/۵۵۸	۰/۲۱۷	۰/۰۵۸	۰/۰۰۰	مشاهده شده
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۱۵۰	۰/۵۰۰	۰/۲۵۰	۰/۱۰۰	۰/۰۰۰	مرتبه ۱ مارکف
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۲۵۸	۰/۵۲۵	۰/۱۵۸	۰/۰۵۸	۰/۰۰۰	مرتبه ۲ مارکف
۰/۰۱۷	۰/۰۰۸	۰/۱۸۳	۰/۴۹۲	۰/۲۴۲	۰/۰۵۸	۰/۰۰۰	مرتبه ۳ مارکف

در حالی که بین طبقات خشکسالی پیش‌بینی شده و مشاهده شده هیچ اختلافی وجود نداشته باشد مارکف مرتبه ۳ دارای بهترین نتایج پیش‌بینی است. به‌طوری که به‌ترتیب در ایستگاه‌های گرگان، رشت، یزد، زنجان و شیراز مقادیر ۰/۴۲۵، ۰/۴۸۳، ۰/۳۶۷، ۰/۳۳۳ و ۰/۳۵۸ درصد پیش‌بینی‌های انجام‌شده به‌صورت صد درصد با مقادیر واقعی مشاهده شده منطبق می‌باشد.

در نهایت، از طریق مقایسه طبقات خشکسالی مشاهده شده (داده‌های واقعی) طی دوره آماری ۲۰۰۵ الی ۲۰۱۴ با طبقات خشکسالی ماهانه پیش‌بینی شده بر اساس روش مارکف با مرتبه‌های مختلف (۱، ۲ و ۳) اقدام به بررسی میزان دقت پیش‌بینی انجام شده به‌وسیله زنجیره مارکف با مرتبه‌های مختلف شد (جدول ۸). نتایج حاصل از این مقایسه، نشان داد که

نتایج نشان داد، در حالتی که بین طبقات خشکسالی پیش‌بینی شده و مشاهده شده فقط یک طبقه اختلاف وجود داشته باشد، در ۶۰ درصد موارد مارکف مرتبه ۳ و در ۴۰ درصد ایستگاه‌های مورد مطالعه مارکف مرتبه ۲ دارای بهترین نتایج پیش‌بینی بودند. به‌طوری که به‌ترتیب در ایستگاه‌های گرگان و رشت مارکف مرتبه ۲ و در ایستگاه‌های یزد، زنجان و شیراز مارکف مرتبه

۳ دارای تطابق بهتری بودند (جدول ۸). نتایج مطالعه نشان داد که مارکف مرتبه ۳ در تمامی ایستگاه‌های مورد بررسی کمترین درصد پیش‌بینی‌های خود را در سطح خطای بالا (حالتی که بین طبقات خشکسالی پیش‌بینی شده و مشاهده شده دو یا سه طبقه اختلاف وجود داشته باشد) به خود اختصاص داده است.

جدول ۸- درصد تطابق طبقات خشکسالی ماهانه پیش‌بینی شده بر مبنای مرتبه‌های مختلف مارکف با طبقات واقعی مشاهده شده در ایستگاه‌های مختلف از ژانویه ۲۰۰۵ تا دسامبر ۲۰۱۴

نام ایستگاه	مرتبه مارکف	اختلاف بین داده مشاهده شده و پیش‌بینی شده دو یا سه طبقه	اختلاف بین داده مشاهده شده و پیش‌بینی شده یک طبقه	اختلاف بین داده مشاهده شده و پیش‌بینی شده صفر طبقه
گرگان	مرتبه ۱	۰/۲۸۴	۰/۳۵۰	۰/۳۶۷
	مرتبه ۲	۰/۳۱۷	۰/۳۵۰	۰/۳۳۳
	مرتبه ۳	۰/۲۵۷	۰/۳۱۷	۰/۴۲۵
رشت	مرتبه ۱	۰/۲۱۰	۰/۳۱۷	۰/۴۶۳
	مرتبه ۲	۰/۲۷۵	۰/۳۵۰	۰/۳۷۵
	مرتبه ۳	۰/۲۰۹	۰/۳۰۸	۰/۴۸۳
شیراز	مرتبه ۱	۰/۲۰۸	۰/۴۴۲	۰/۳۵۰
	مرتبه ۲	۰/۲۵۹	۰/۴۳۳	۰/۳۰۸
	مرتبه ۳	۰/۱۲۵	۰/۵۱۷	۰/۳۵۸
یزد	مرتبه ۱	۰/۲۵۸	۰/۴۱۷	۰/۳۲۵
	مرتبه ۲	۰/۳۱۷	۰/۲۳۳	۰/۳۵۰
	مرتبه ۳	۰/۱۵۸	۰/۴۷۵	۰/۳۶۷
زنجان	مرتبه ۱	۰/۱۷۸	۰/۴۹۲	۰/۳۳۰
	مرتبه ۲	۰/۱۸۳	۰/۵۱۷	۰/۳۰۰
	مرتبه ۳	۰/۱۰۹	۰/۵۵۸	۰/۳۳۳

نتیجه‌گیری

تا کنون شاخص‌های بسیار زیادی در سطح جهان برای بررسی شدت خشکسالی ارائه شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به شاخص‌های CZI, RDI, SPI, MCZI و SPEI اشاره کرد. از بین شاخص‌های ارائه شده، شاخص SPEI (بر مبنای پارامترهای بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل) یکی از کامل‌ترین و جدیدترین شاخص‌های ارزیابی شدت خشکسالی است. آگاهی از وضعیت خشکسالی، ابزاری مناسب برای برنامه‌ریزی در بخش کشاورزی، منابع آب و سایر موارد حادث شده از خشکسالی را فراهم می‌آورد و این امر در پیش‌بینی شدت خشکسالی و کاهش اثرات مخرب یاری‌رسان مردم خواهد بود. یکی از روش‌های پرکاربرد در بحث پایش و پیش‌بینی شدت خشکسالی، استفاده

از روش زنجیره مارکف است (Araghinejad, ۲۰۱۱). در بیشتر تحقیقات انجام گرفته، به‌منظور بررسی و پیش‌بینی خشکسالی، از زنجیره مارکف مرتبه ۱ استفاده شده است. به‌عنوان نمونه می‌توان به تحقیقات Tsakiris و همکاران (۲۰۱۳)، Tabari و همکاران (۲۰۱۵) و Araghinejad (۲۰۱۱) اشاره کرد. در تحقیق حاضر، با استفاده از داده‌های اقلیمی پنج ایستگاه سینوپتیک کشور با اقلیم‌های مختلف به بررسی تأثیرگذاری مرتبه زنجیره مارکف بر دقت پیش‌بینی به‌وسیله این مدل پرداخته شده است. نتایج این بررسی نشان داد که در حالتی که بین طبقات خشکسالی پیش‌بینی شده و مشاهده شده هیچ اختلافی وجود نداشته باشد، مارکف مرتبه ۳ دارای بهترین نتایج پیش‌بینی است. زمانی که بین طبقات

به‌دست آمده و با هدف افزایش سطح دقت پیش‌بینی خشکسالی (بر مبنای شاخص SPEI) به‌وسیله زنجیره مارکف پیشنهاد می‌شود. برای استفاده از زنجیره مارکف در پیش‌بینی خشکسالی بر مبنای شاخص SPEI در درجه اول، از مارکف با مرتبه ۳ و در درجه بعد از مارکف با مرتبه ۲ استفاده شود.

خشکسالی پیش‌بینی شده و مشاهده شده فقط یک طبقه اختلاف وجود داشته باشد، در ۶۰ درصد موارد مارکف مرتبه ۳ و در ۴۰ درصد موارد مارکف مرتبه ۲ دارای بهترین نتایج پیش‌بینی بود. زمانی که بین طبقات خشکسالی پیش‌بینی شده و مشاهده شده دو یا سه طبقه اختلاف وجود داشته باشد، مارکف مرتبه ۲ دارای بهترین نتایج بود. بنابراین، با توجه به نتایج

منابع مورد استفاده

- Ahmadi Motlaq, R., A. Motazedi and N. Amiri Mehdipour. 2011. Drought monitoring and forecasting in Fars Province, using SPI drought index and Markov Chain. 5th National Conference of Watershed Management and Soil and Water Management, Kerman.
- Alizadeh, A. and V.S. Ashgar Tosi. 2008. Development of a model for monitoring and forecasting drought, case study: Khorasan Razavi Province. *Agriculture Science and Industry*, 22(1): 25-35 (in Persian).
- Allen, R.G., L.S. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage*, No. 56, FAO, Rome, Italy, 301 pages.
- Araghinejad, S. 2011. An approach for probabilistic hydrological drought forecasting. *Water Resources Management*, 25: 191-200.
- Hatefi, A., A. Mosaedi and M. Jabbari Nooghabi. 2016. The role of evapotranspiration in meteorological drought monitoring in some climatic regions of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(2): 1-21 (in Persian).
- Hovenga, P.A., D. Wang, S.C. Medeiros, S.C. Hagen and K.A. Alizad. 2016. The response of runoff and sediment loading in the Apalachicola River, Florida to climate and land use land cover change. *Earth's Future*, 4: 124-142.
- Hsu, T.W., D.S. Shih and W.J. Chen. 2015. Destructive flooding induced by Broken Embankments along Linbian Creek, Taiwan, during Typhoon Markov. *Journal of Hydrologic Engineering (ASCE)*, 20(7): 5010-5021.
- Jafari Behi, K. 1998. Statistical analysis wet and dry periods of rain in some climate zone, using Markov Chain Model. MSc Thesis, Tehran University, 186 pages (in Persian).
- Khalili, D., T. Farnoud, H. Jamshidi, A. A. Kamgar-Haghighi and S. Zand-Parsa. 2011. Comparability analyses of the SPI and RDI meteorological drought indices in different climatic zones. *Water Resources Management*, 25: 1737-1757.
- Klugman, M. 2004. Drought in the upper Midwest. *Journal of Applied Meteorology*, 17: 1425-1431.
- Lohani, V.K., G.V. Loganathan and S. Mostaghimi. 1998. Long-term analysis and short-term forecasting of dry spells by Palmer drought severity index. *Hydrology*, 29(1): 21-40.
- Moghimi, M.M. and A.R. Sepaskhah. 2008. Generation of rainfall data in stations with limited data in Fars Province. *Journal of Watershed Management Science*, 2(3): 11-19 (in Persian).
- Paulo, A.A. and L.S. Pereira. 2007. Stochastic prediction of SPI drought class transition. *Water Resources Management*, 22: 1277-1527.
- Razei, T. 2016. Drought prediction in arid and semi-arid regions of Iran, using time series models and Markov Chain. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 8(4): 457-477 (in Persian).
- Sarlak, N., E. Kahya and O. Anwar Beg. 2009. Critical drought analysis, case study: Goksu River (Turkey) and North Atlantic oscillation influences. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(8): 795-802.
- Shokri Kochak, S. and A. Behnia. 2013. Drought monitoring and forecasting in Khozestan Province, using SPI drought index and Markov Chain. *Irrigation Science and Engendering Journal*, 3(36): 1-12 (in Persian).
- Tabari, H., R. Zamani, H. Rahmati and P. Willems. 2015. Markov chains of different orders for streamflow drought analysis. *Water Resources Management*, 29: 3441-3457.
- Tsakiris, G., D. Pangalou and H. Vangelis. 2007. Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*, 21: 821-833.
- Tsakiris, G., I. Nalbantis, H. Vangelis, B. Verbeiren, M. Huysmans, B. Tychon, I. Jacquemin, F. Canters, E.G. Vanderhaegen, L. Poelmans, P. De Becker and O. Batelaan. 2013. A system-based

- paradigm of drought analysis for operational management. *Water Resources Management*, 27(15): 5281–5297.
20. Vicente-Serrano, S.M., S. Begueria and J.I. Lopez-Moreno. 2010. A multicolor drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23: 1696–1718.
 21. Zarei, A.R. 2018. Evaluation of drought condition in arid and semi-arid regions, using RDI index. *Water Resources Management*, DOI <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1898-9>.
 22. Zarei, A.R. and M.R. Mahmoudi. 2017. Evaluation of changes in RDI index affected by different potential evapotranspiration calculation methods. *Water Resources Management*, 31(15): 4981–4999.
 23. Zarei, A.R., M.M. Moghimi and M.R. Mahmoudi. 2016a. Analysis of changes in spatial pattern of drought using RDI index in south of Iran. *Water Resources Management*, 30(11): 3723–3743.
 24. Zarei, A.R., M.M. Moghimi and M.R. Mahmoudi. 2016b. Parametric and non-parametric trend of drought in arid and semi-arid regions using RDI index. *Water Resources Management*, 30: 5479–5500.
 25. Zarei, A.R., M.M. Moghimi, M. Bahrami and M.R. Mahmoudi. 2016c. Evaluation of changes trend in seasonal drought based on actual data (1980-2014) and predicted data (1980-2019) in south-west of Iran. *Desert Management Journal*, 7(1): 71-85 (in Persian).
 26. Zarei, A.R., S. Zare and A.H. Parsamehr. 2015. Comparison of several methods to estimate reference evapotranspiration. *West African Journal of Applied Ecology*, 23: 17-25.
 27. Zareiee, A.R. 2014. Evaluation of changes in different climates of Iran, using De-Martonne index and Mann-Kendall trend test. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2: 2245–2261.

Evaluation of effect of Markov order on the accuracy of drought forecasting based on SPEI index, using Markov Chain method

Abdol Rassoul Zarei^{*1}

¹ Assistant Professor, Faculty of Agriculture, Fasa University, Iran

Received: 15 September 2017

Accepted: 11 June 2018

Abstract

Drought is an inseparable part of climatic fluctuations which caused to lot of damages to different sections annually. Therefore, drought prediction can effectively reduce its damages. Markov Chain method is one of the drought prediction methods. In this study, the effect of Markov Chain order (orders 1, 2 and 3) were evaluated in drought forecasting accuracy (based on SPEI index), using Markov Chain method on climatological data of five synoptic stations of Iran with different climatic conditions during 1967 to 2014. Based on the results, transition probability from all drought classes to class 4 (normal) had the most frequency and to class 1 (extreme wet) had the lowest frequency. Results demonstrated that when observed and predicted drought classes have no difference, Markov order 3 has the best results. When observed and predicted drought classes have one class of difference, in 60% of cases Markov order 3 and in 40% of cases Markov order 2 has the best results. When observed and predicted drought classes have difference of two or three classes, Markov order 3 has the best results. Therefore, it is recommended to use Markov order 3 and Markov order 2, respectively with SPEI index and Markov Chain method, for drought forecasting.

Keywords: Climatic fluctuation, Drought analysis, Drought effects, Drought index, Markov Chain, Monitoring

* Corresponding author: ar_zareiee@fasau.ac.ir