



## Predicting the probability of droughts using SPI drought index based on Markov chain model (Case study: Villages of Sistan and Baluchistan province)

Hadi Siasar<sup>1</sup> and Amir Salari<sup>2</sup> \*

|   |  |
|---|--|
| Article history:<br>Submitted: 10 August 2022<br>Revised : 13 October 2022<br>Accepted: 24 December 2022<br>Available Onlin: 4 April 2023 | How to cite this article:<br>Siasar, H., and Salari, A. 2023. Predicting the probability of droughts using SPI drought index based on Markov chain model (Case study: Villages of Sistan and Baluchistan province). Rural Development Strategies, 10(3): 387-402.<br>DOI: 10.22048/rdsj.2023.352852.2042 |
|---|--|

### Abstract

Following the intensification and duration of the drought period in Iran and the occurrence of acute water shortage problems, drought risk management especially in rural areas has doubled. A variety of methods, including the Markov chain, are used to predict the likelihood of drought. In this study, the drought situation of rural areas were studied in Sistan and Baluchestan province according to the monthly rainfall data of six stations of Iranshahr, Chabahar, Khash, Zabol, Zahedan and Saravan stations using the standardized precipitation index method (SPI) in time scales of 3, 6, 9, 12, 24 and 48 months. The results showed that the cities of Zahedan, Chabahar, Zabol, Saravan, and Khash in the long term in 11.49, 35.14, 35.13, 11.62 and 35.13% of the times were in a dry situation, respectively. Zahedan, Chabahar, Zabol, Saravan, and Khash stations in 77.2 59.46, 62.17, 75.68 and 59.46% of the times were in normal condition and in 11.49, 5.40, 2.70, 2.70 and 5.41% of the times were in wet conditions, respectively. The results also showed that on average, the probability of equilibrium of dry, wet and normal periods in the stations of the province is 29, 5 and 66%, respectively. In other words, the region is in normal climatic conditions, while the probability of occurrence of dry conditions is almost six times that of wet conditions. The most severe drought in Sistan and Baluchestan province in 2008 with an SPI coefficient of -2.8 and the most severe drought in the province in 1995 with an SPI coefficient of +0.08 occurred. The general results showed that the changes in the SPI index have a negative trend and the creation of a comprehensive risk management system is essential.

**Keywords:** Standardized precipitation index, normal conditions, dry conditions, Sistan and Baluchestan.

1 - Assistant Professor, Department of Agriculture, Payame Noor University, Iran (PNU).

2 - Assistant Professor, Department of Sciences and Water engineering, Minab Higher Education Center, University of Hormozgan



Corresponding Email: [Salari.1361@yahoo.com](mailto:Salari.1361@yahoo.com)

© 2022, University of Torbat Heydarieh. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

## مقاله پژوهشی

# پیش‌بینی احتمال وقوع خشکسالی با استفاده از زنجیره مارکوف (مطالعه موردی: روستاهای استان سیستان و بلوچستان)

هادی سیاسر<sup>۱</sup> و امیر سالاری<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۹ مرداد ۱۴۰۱

تاریخ بازنگری: ۲۱ مهر ۱۴۰۱

تاریخ پذیرش: ۳ دی ۱۴۰۱

## چکیده

در پی تشدید شدت و طول دوره خشکسالی در ایران و بروز مشکلات حاد کم‌آبی، مدیریت ریسک خشکسالی مخصوصاً در مناطق روستایی نمود دوچندانی یافته است. روش‌های متنوعی از جمله زنجیره مارکوف جهت پیش‌بینی احتمال خشکسالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق به بررسی وضعیت خشکسالی‌های مناطق روستایی استان سیستان و بلوچستان با توجه به داده‌های بارش ماهانه در سطح شش ایستگاه ایرانشهر، چابهار، خاش، زابل، زاهدان و سراوان و با استفاده از روش شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در مقیاس های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه پرداخته شد. نتایج نشان داد مناطق روستایی شهرستان‌های زاهدان، چابهار، زابل، سراوان و خاش در بازه بلندمدت به ترتیب در ۱۱/۴۹، ۳۵/۱۴، ۳۵/۱۳، ۱۱/۶۲ و ۳۵/۱۳ درصد از اوقات، گرفتار وضعیت خشک بوده و در ۷۷/۲، ۵۹/۴۶، ۶۲/۱۷، ۷۵/۶۸ و ۵۹/۴۶ درصد اوقات وضعیت نرمال و به ترتیب در ۱۱/۴۹، ۵/۴۰، ۲/۷۰، ۲/۷۰ و ۵/۴۱ درصد اوقات، شرایط مرطوب برقرار بود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که به طور میانگین، احتمال تعادل دوره‌های خشک، مرطوب و نرمال در ایستگاه‌های استان به ترتیب ۲۹، ۵ و ۶۶ درصد است، به عبارتی در بیشتر مواقع، منطقه از نظر اقلیمی در شرایط نرمال قرار دارد، در حالی که احتمال وقوع شرایط خشک تقریباً شش برابر شرایط مرطوب است. شدیدترین خشکسالی استان سیستان و بلوچستان در سال ۱۳۸۷ با مقدار شاخص SPI برابر با ۲/۸ - و شدیدترین ترسالی استان مربوط به سال ۱۳۷۴ با مقدار SPI برابر با ۲/۰۸ + اتفاق افتاده است. نتایج کلی نشان داد که تغییرات شاخص SPI دچار تداوم روند منفی بوده و ایجاد سامانه جامع مدیریت ریسک امری ضروری می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** شاخص بارش استاندارد شده، شرایط نرمال، شرایط خشک، سیستان و بلوچستان.

۱- استادیار گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، ایران

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، مجتمع آموزش عالی میناب، دانشگاه هرمزگان  
\* - نویسنده مسئول: [Salari.1361@yahoo.com](mailto:Salari.1361@yahoo.com)

## مقدمه

خشکسالی از جمله بلایای طبیعی با احتمال وقوع تصادفی و شدت و تداوم مختلف است که تقریباً در تمامی مناطق کره زمین اتفاق افتاده است. هرچند پیش‌بینی وقوع خشکسالی امری سخت و پیچیده و با عدم قطعیت زیاد همراه است، اما شناخت روندهای زمانی و مکانی آن، می‌تواند منجر به کاهش خطر ریسک خشکسالی گردد. خشکسالی بر تمامی تولیدات کشاورزی آبی و دیم مخصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأثیر زیاد و مستقیمی دارد. یکی از این مناطق خشک ایران که کشاورزی نقشی حیاتی و اساسی در رونق و توسعه و اشتغال آن دارد، مناطق روستایی استان سیستان و بلوچستان با اقلیمی گرم و خشک می‌باشد. خشکسالی انواع و اقسام مختلفی از جمله خشکسالی هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و اقتصادی-اجتماعی داشته که خشکسالی هواشناسی پایه و اساس ایجاد سایر خشکسالی‌ها محسوب می‌گردد. بنابراین اولین گام اساسی در پیش‌بینی و کشف احتمال وقوع، روندها و ماهیت خشکسالی و همچنین راهکارهای مقابله و کاهش خسارات احتمالی در قالب مدیریت بحران و کاهش ریسک، پایش خشکسالی هواشناسی در منطقه می‌باشد.

تاکنون تعاریف مختلفی برای خشکسالی ارائه گردیده است. طبق نظر پالمر، خشکسالی عبارت است از کمبود مستمر و غیرطبیعی رطوبت در یک دوره زمانی معین که معمولاً یک سال می‌باشد. هر پدیده خشکسالی با دو ویژگی بارز و مهم شدت و تداوم خشکسالی تعریف و توصیف می‌شود (دالزویس<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۹۱). تاکنون شاخص‌های خشکسالی زیادی از جمله شاخص پالمر<sup>۲</sup> (PDSI) (پالمر، ۱۹۶۹)، شاخص دهک‌ها

(Deciles) (گیبز و ماهر<sup>۳</sup>، ۱۹۶۷)، شاخص بارش استاندارد شده (SPI<sup>۲</sup>) (مکی<sup>۴</sup> و همکاران، ۱۹۹۳)، شاخص خشکسالی موثر (EDI<sup>۳</sup>) (بیون و وایت<sup>۵</sup>، ۱۹۹۹) و شاخص اکتشاف خشکسالی (RDI<sup>۴</sup>) (تساکیس و انگلیس<sup>۶</sup>، ۲۰۰۵) توسط محققین پیشنهاد شده است. شاخص‌های خشکسالی در طول سالیان متمادی و انجام تحقیقات گسترده از جمله آلی<sup>۷</sup> (۱۹۸۴)، تیت<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۰۰)، وو<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۰۱)، اسماخترین و هوقوس<sup>۱۰</sup> (۲۰۰۴) و اسماخترین و هوقوس (۲۰۰۷) مورد بازنگری قرار گرفته‌اند و از این میان، شاخص SPI به عنوان شاخص مرجع توسط سازمان جهانی هواشناسی (WMO) مورد قبول قرار گرفته است.

بررسی‌های آماری مربوط به خشکسالی و اثرات آن بر بخش‌های مختلف به روش‌های مختلفی از جمله تحلیل سری-های زمانی، همبستگی خطی و غیرخطی و استفاده از توزیع‌های آماری شناخته شده نظیر توزیع نرمال، گامبل، پیرسون و غیره انجام می‌گیرد. در این تحقیق، جهت پایش و بررسی‌های آماری از روش زنجیره مارکوف مرتبه اول استفاده گردید. کاربرد و عملکرد مدل زنجیره مارکوف در علوم مختلفی مانند هواشناسی، اقلیم‌شناسی، اقتصاد و صنعت به اثبات رسیده است. کلارک و کاراس<sup>۱۱</sup> (۱۹۸۹) در تحلیل روابط بین بارندگی و رواناب در سطح یک حوضه آبریز از مدل توزیع احتمال شرطی زنجیره مارکوف برای نشان دادن چگونگی توالی بارش و رواناب، در عرض‌های مختلف جغرافیایی استفاده نمودند (کلارک و

3 - Gibbs and Maher

4 - Mckee

5 - Byun and Wilhite

6 - Tsakiris and Vanglis

7 - Alley

8 - Tate

9 - Wu

10 - Smakhtin and Hughes

11 - Clarke and Karas

1 - Dalezios

2 - Palmer

کاراس، ۱۹۸۹). ازام<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۰) نیز در برآورد بازده مراتع با استراتژی‌های مختلف بهره‌برداری، از مدل زنجیره مارکوف بهره‌جسته و اثرات بارندگی را بر میزان محصول مرتعی بررسی نمودند (اعظم و همکاران، ۱۹۹۰). جعفری‌بهی (۱۳۷۸) با کمک زنجیره مارکوف، احتمالات پیشامدهای متوالی روزهای خشک (غیر بارانی) و تر (بارانی) با آستانه ۰/۱ میلی‌متر در روز برای ماه‌های نوامبر تا آوریل سال‌های ۱۹۹۵-۱۹۶۵ را در ایستگاه‌های بوشهر، شیراز، اصفهان، کرج و بندر انزلی تحلیل نموده و نتیجه گرفت که داده‌های بارندگی روزانه ایستگاه‌های مورد مطالعه برازش خوبی بر زنجیره مارکوف مرتبه اول دارند (جعفری‌بهی، ۲۰۰۰). زارعی و همکاران (۲۰۱۹) با بررسی شاخص‌های خشکسالی در بین ۲۲ ایستگاه سینوپتیک کشور نتیجه گرفتند که بین مقادیر RDI و eRDI در سطح ۵ درصد در مناطق مرطوب تفاوت معنی‌داری نیافته ولی در مناطق خشک و فراخشک، تفاوت‌های معنی‌داری مشاهده نمودند، این محققین برای مناطق خشک و فراخشک، استفاده از شاخص eRDI را پیشنهاد نمودند. نتایج دیگری نشان می‌دهد که تکنیک زنجیره مارکوف به دلیل موقعیت خاص عرض جغرافیایی و بهره‌مندی کمتر از سامانه‌های بارش‌زا برازش خوبی با اقلیم ایران دارد (ماه‌آورپور، ۲۰۱۵). خشکسالی ایستگاه‌های مهم ایران نشان می‌دهد که دوره خشکی به علت تغییر اقلیم در حال تشدید شدن است (بهرامی و همکاران، ۲۰۱۷)؛ بهرامی و همکاران، (۲۰۲۱) و بین سال‌های ۲۰۱۴-۱۹۶۷ در سطح ۴۰ ایستگاه سینوپتیک اصلی ایران، خشکسالی متوسط غالب بوده است.

استان سیستان و بلوچستان به دلیل دور بودن از مسیر سامانه‌های باران‌زای مدیترانه‌ای و قرار گرفتن در موقعیت اصلی پرفشار جنب حاره ای از تغییر پذیری زیادی در پدیده بارندگی

برخوردار بوده و نسبت به سایر نقاط کشور بیشتر در معرض وقوع پدیده خشکسالی قرار دارد. نتایج بررسی احتمال وقوع و یا گسترش خشکسالی با استفاده از مدل زنجیره مارکوف مرتبه اول و شاخص SPI در مقیاس ۳ و ۶ ماهه، در این استان نشان داد که در مقیاس شش ماهه، احتمال ماندن در تله خشکسالی در نواحی مرکزی استان بیش از ۷۰ درصد و در نواحی شرقی کمتر از ۵۰ درصد است. همچنین با توجه به احتمال تعادل خشکسالی، بخش مرکزی استان در ۳۰ درصد از مواقع در وضعیت خشکسالی قرار داشته و از این بابت، بخش مرکزی نسبت به سایر بخش‌های استان در وضعیت آسیب‌پذیرتری قرار دارد (رضی و همکاران، ۲۰۰۷). علیزاده و همکاران (۱۳۸۷) نیز ضمن تأیید این نتایج، نشان دادند که استان سیستان و بلوچستان نسبت به خشکسالی‌های میان مدت و کوتاه مدت حساس بوده و بیشتر خشکسالی‌های اتفاق افتاده در منطقه از نوع ملایم و متوسط می‌باشد (علیزاده و همکاران، ۲۰۰۸). نتایج سایر بررسی‌ها نیز نشان می‌دهد که در منطقه بندرعباس نیز طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ بیشترین احتمال وقوع خشکسالی‌ها مربوط به کلاس نرمال، متوسط و شدید بوده و احتمال گذر از حالت تر به خشک زیاد و بالعکس از حالت خشک به تر کم می‌باشد (زارعی و همکاران، ۱۳۹۶).

با توجه به دقت و کاربرد گسترده زنجیره مارکوف در پیش‌بینی‌های اقلیمی ایران و اهمیت مقدار بارش در برنامه‌ریزی‌های منابع آبی و کشاورزی، در پژوهش حاضر به بررسی احتمالات وقوع آبی خشکسالی هواشناسی در استان سیستان و بلوچستان که شامل زیست‌بوم‌های متنوع و منابع آبی حیاتی چاه‌نیمه‌های زابل می‌باشد، در یک بازه زمانی طولانی مدت ۳۸ ساله در سطح ایستگاه‌های سینوپتیک زاهدان، ایرانشهر، چابهار، زابل، سراوان و خاش پرداخته شد.

اقلیم گرم و خشک به حساب می‌آید.

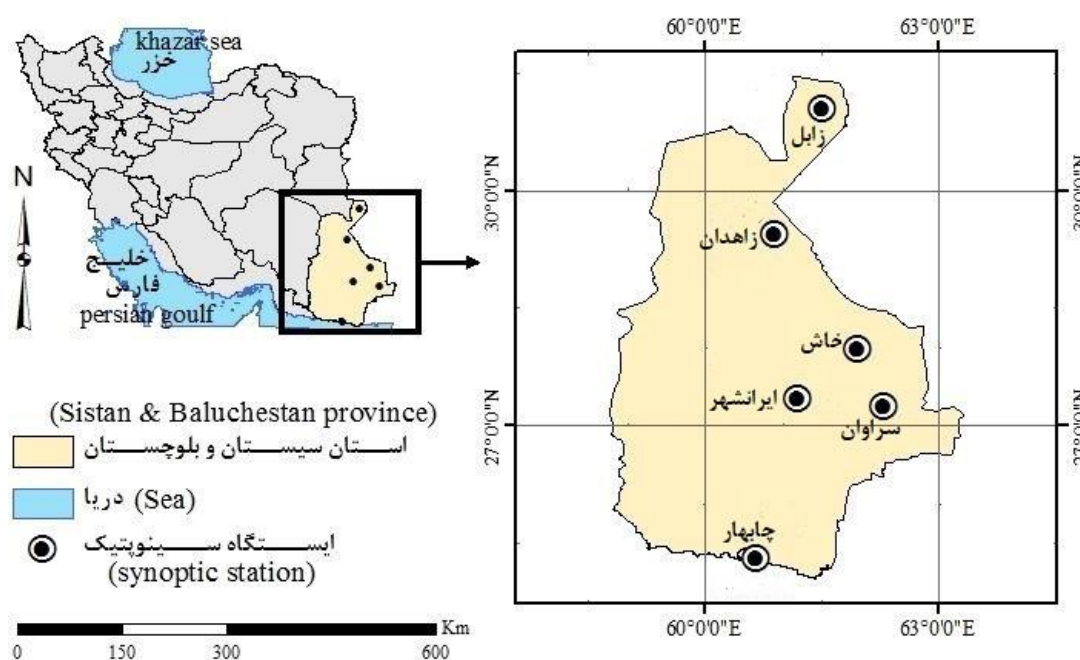
در این پژوهش، جهت تحلیل خشکسالی از داده‌های بارش شش ایستگاه اصلی سینوپتیک استان سیستان و بلوچستان در دوره آماری ۳۸ ساله (۱۳۹۲-۱۳۵۵) استفاده گردید (جدول ۱). دلیل استفاده از این دوره آماری، کامل بودن و در دسترس بودن داده‌های آماری بارش می‌باشد. نقشه پراکندگی مکانی ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۱ آمده است.

## مواد و روش‌ها

استان سیستان و بلوچستان با قرار گرفتن در عرض شمالی ۲۵ درجه و ۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۷ دقیقه و طول شرقی ۵۸ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۶۳ درجه و ۲۱ دقیقه و وسعتی در حدود ۱۸۰۷۲۶ کیلومتر مربع (بیش از ۱۱ درصد از مساحت کل ایران)، از تنوع آب و هوایی و اقلیمی برخوردار بوده و به‌طور کلی جزو

جدول ۱. ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه و مشخصات جغرافیایی آن‌ها

| ایستگاه   | عرض جغرافیایی |       | طول جغرافیایی |       | ارتفاع از سطح دریا (متر) |
|-----------|---------------|-------|---------------|-------|--------------------------|
|           | درجه          | دقیقه | درجه          | دقیقه |                          |
| ایران‌شهر | ۲۷            | ۱۲    | ۶۰            | ۴۲    | ۵۹۱/۱                    |
| چابهار    | ۲۵            | ۱۷    | ۶۰            | ۳۷    | ۸                        |
| خاش       | ۲۸            | ۱۳    | ۶۱            | ۲۹    | ۱۳۹۴                     |
| زابل      | ۳۱            | ۲     | ۶۱            | ۲۹    | ۴۸۹/۲                    |
| زاهدان    | ۲۹            | ۲۸    | ۶۰            | ۵۳    | ۱۳۷۰                     |
| سراوان    | ۲۷            | ۲۰    | ۶۲            | ۲۰    | ۱۱۹۵                     |



شکل ۱. ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه در استان سیستان و بلوچستان

بارندگی جهت اختصاص ارزش عددی به بارش است که از طریق آن می‌توان نواحی با آب و هوای متفاوت را با یکدیگر

## شاخص خشکسالی SPI

شاخص SPI ابزاری مناسب در تحلیل و پردازش داده‌های

گاما از داده‌های نمونه با روش حداکثر درست‌نمایی (MLM) برای هر ایستگاه و برای مقیاس زمانی انتخابی و برای هر ماه از سال برآورد می‌شود. مک کی و همکاران (۱۹۹۳) با استفاده از روش فوق، ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  را بر اساس روابط ۲ و ۳ برآورد نمودند (مکی و همکاران، ۱۹۹۳)

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right] \quad (2)$$

$$\beta = \frac{x}{\hat{\alpha}} \quad (3)$$

مقدار A در معادله ۲ برای n مشاهده از رابطه ۴ بدست می‌آید:

$$A = \ln(\bar{X}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (4)$$

که در آن، n تعداد مشاهدات بارش و  $\bar{X}$  میانگین بارش تجمعی برای یک ماه در طول دوره آماری می‌باشد. چون تابع گاما برای  $x = 0$  (بارش صفر میلی متر) تعریف نشده و توزیع بارش ممکن است دارای مقادیر صفر باشد، احتمال تجمعی کل که دربرگیرنده مقادیر صفر نیز می‌باشد، از رابطه ۵ محاسبه می‌گردد:

$$H(X) = q + PG(X) \quad (5)$$

که در آن،

$$G(x) = \int_0^x g(t) dt \quad (6)$$

و q احتمال صفر بودن مقدار بارش و  $P=1+q$  می‌باشد. اگر m تعداد داده های بارش صفر در سری زمانی n تایی باشد، آنگاه q از رابطه ۷ به دست می‌آید:

$$q = \frac{m}{n} \quad (7)$$

پس از محاسبه احتمال تجمعی کل  $(H(X))$  مقدار متغیر تصادفی نرمال استاندارد، هم احتمال با احتمال مذکور که دارای میانگین صفر و انحراف معیار یک است محاسبه می‌شود. این

مقایسه نمود. از آنجایی که با قرار گرفتن نمایه SPI در محدوده پایین تر از ۱- دوره خشکسالی شروع می‌گردد، بر این اساس می‌توان وضعیت منطقه مورد مطالعه را از نظر وقوع خشکسالی و روند آن مورد بررسی قرار داد. استواری شاخص SPI بر پایه داده‌های بارش باعث گردیده بتوان با استفاده از مقادیر طولانی-مدت بارش (حداقل ۳۰ ساله)، اقلیم یک منطقه را به خوبی تعیین نمود. یکی دیگر از ویژگی‌های این شاخص، انعطاف‌پذیری در مقیاس‌های زمانی متفاوت است زیرا خشکسالی از لحاظ دوره دارای دامنه بسیار گسترده‌ای است. با محاسبه شاخص SPI به صورت کوتاه‌مدت (۱، ۳، ۶ و ۹ ماهه)، می‌توان شرایط رطوبتی خاک و برآورد فصلی از میزان بارش و با استفاده از دوره‌های بلندمدت (۱۲، ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ماهه)، شدت و تداوم دوره‌های خشکسالی، وقوع سیل‌ها، نوسانات سطح آب‌های سطحی و زیرزمینی را به خوبی پیش‌بینی نمود. در این شاخص، در مقیاس‌های کوتاه‌مدت، تغییرات بیشتری مشاهده شده و این بیانگر حساسیت بیشتر به تغییرات شرایط رطوبت می‌باشد. با طولانی‌تر شدن طول دوره، بارش ماه جدید اثر کمتری بر کل بارش داشته و پاسخ نمایه ملایم خواهد بود و با کوچکترین تغییر در بارش ماهانه، سریعاً به بالای صفر و چنانچه منفی باشد، به زیر صفر می‌رود.

#### روش محاسبه شاخص SPI

محاسبه این نمایه با برازش توزیع گاما بر داده‌های بلند مدت بارش انجام می‌گیرد. تابع چگالی احتمال گاما بر توزیع فراوانی بارش برای یک ایستگاه معین از رابطه ۱ بدست می‌آید:

$$g(X) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} X^{\alpha-1} e^{-X/\beta} \quad (1)$$

در این معادله،  $\alpha$  پارامتر شکل،  $\beta$  پارامتر مقیاس، x مقدار بارندگی و  $\Gamma(\alpha)$  تابع گاما می‌باشد که به صورت  $\int_0^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt$   $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt$  تعریف می‌شود. پارامترهای توزیع چگالی احتمال

جدول ۲. طبقه‌بندی دوره‌های تر و خشک بر اساس شاخص SPI (مک‌کی و همکاران، ۱۹۹۳)

| درصد احتمال | مقادیر SPI   | طبقه‌بندی                  |
|-------------|--------------|----------------------------|
| ۲/۳         | $\geq 2$     | شدیداً مرطوب               |
| ۴/۴         | ۱/۵ - ۱/۹۹   | خیلی مرطوب                 |
| ۹/۲         | ۱ - ۱/۴۹     | مرطوب متوسط                |
| ۳۴/۱        | ۰ - ۰/۹۹     | مرطوب خفیف (تقریباً نرمال) |
| ۳۴/۱        | ۰ - -۰/۹۹    | خشک خفیف (تقریباً نرمال)   |
| ۹/۲         | -۱ - -۱/۴۹   | خشک متوسط                  |
| ۴/۴         | -۱/۵ - -۱/۹۹ | خیلی خشک                   |
| ۲/۳         | $\leq -2$    | شدیداً خشک                 |

### زنجیره مارکوف

زنجیره مارکوف در هیدرولوژی و هواشناسی جهت الگوسازی فرایندهایی چون بارش، جریان رودخانه، رطوبت خاک و ذخیره آب در مخازن کاربرد دارد. اگر فرض شود که  $X(t)$  یک فرایند با مقدار گسسته باشد که در زمان صفر شروع شده و در طول زمان ادامه یابد، آن گاه مقادیر  $X(t)$  را به صورت  $X_t (t=0,1,\dots)$  می‌توان نوشت:

$$P[X(t)=X_t | X(0)=X_0, X(1)=X_1, \dots, X(t-1)=X_{t-1}] = P[X(t)=X_t | X(t-1)=X_{t-1}] \quad (12)$$

در رابطه ۱۲،  $p$  احتمال شرطی است و بیان می‌کند که نتیجه هر فرآیند در زمان  $t$  تنها به شرایط در زمان  $t-1$  بستگی دارد. فرایندهایی با چنین خاصیتی را زنجیره مارکوف مرتبه اول یا زنجیره مارکوف ساده می‌نامند.

زنجیره مارکوف ساده با استفاده از ماتریس احتمالی انتقال آن  $P(t)$  تعریف می‌شود. این ماتریس یک ماتریس مربع با عناصر  $P_{ij}(t)$  بوده و به صورت رابطه ۱۳ بیان می‌شود:

$$P_{ij}(t) = P[X(t)=j | X(t-1)=i] = \frac{P[X(t-1)=i, X(t)=j]}{P[X(t-1)=i]} \quad (13)$$

برای تمام جفت‌های  $i$  و  $j$ ، زنجیره ممکن است از حالت  $i$  در زمان  $t-1$  به حالت  $j = 1, 2, \dots, r$  در زمان  $t$  تغییر

مقدار، همان شاخص SPI است. روابط ۸ و ۹،  $Z$  یا SPI را از روی مقادیر  $H(X)$  ارائه می‌دهد.

$$Z = SPI = - \left[ t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right] \quad (0 < H(X) \leq 0.5) \quad (8)$$

$$Z = SPI = + \left[ t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right] \quad (0.5 < H(X) \leq 1) \quad (9)$$

اگر  $0 < H(X) \leq 0.5$

$$t = \sqrt{\ln \left( \frac{1}{H(X)^2} \right)} \quad (10)$$

و

اگر  $0.5 < H(X) \leq 1$

$$t = \sqrt{\ln \left( \frac{1}{1-H(X)^2} \right)} \quad (11)$$

در این روابط،  $c_0, c_1, c_2, d_1, d_2, d_3$  مقادیر ثابت و  $H(X)$  احتمال تجمعی است.

طبقه‌بندی خشکسالی بر اساس شاخص SPI در جدول ۲ نشان داده شده است. طبیعتاً SPI بیانگر نمره  $Z$  یا عددی با انحراف معیار بالاتر یا پایین‌تر از میانگین یک رویداد می‌باشد، هرچند برای مقیاس‌های زمانی کوتاه یا زمانی که توزیع بارش اصلی چولگی دارد، نمی‌تواند کاملاً صحیح باشد. شاخص SPI، موقعیت مکانی ایستگاه را به صورت نرمال در می‌آورد، چرا که توزیع فراوانی بارش را توأم با تغییرات و پراکنش آن در ایستگاه برآورد می‌کند. علاوه بر این، SPI در مقیاس زمانی نیز به صورت نرمال در می‌آید، زیرا می‌تواند در هر مقیاس زمانی بسته به نقطه نظر تحلیل‌گر محاسبه شود. بنابراین از آنجا که شاخص SPI محدودیت مقیاس زمانی با موقعیت مکانی ندارد، احتمال تجمعی را در رابطه با دوره پایه‌ای که پارامترهای توزیع برای آن برآورده شده‌اند، تخمین می‌زند.

احتمال انتقال  $n$  مرحله ای  $P^{(n)}$  هستند که با ضرب کردن  $n$  بار ماتریس احتمال انتقال  $P$  در خودش بدست می آید.

در این پژوهش شاخص SPI با استفاده از نرم افزار Drink و در مقیاس های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه محاسبه گردید. با توجه به وضعیت بارش ایستگاه های استان سیستان و بلوچستان، وضعیت های مختلف خشکسالی در استان به سه طبقه خشک، نرمال و مرطوب تقسیم شده است. با استفاده از شاخص SPI و زنجیره مارکوف به پایش خشکسالی و پیش بینی آن در طولانی مدت اقدام گردید. جهت تحلیل زنجیره مارکوف، فرض گردید که وقوع یکی از وضعیت های خشکسالی در یک سال فقط به این بستگی دارد که در سال قبل آن چه وضعیت رطوبتی اتفاق افتاده است. در ادامه ماتریس احتمال انتقال  $3 \times 3$ ، که هر یک از درایه های آن، احتمال انتقال وضعیت از حالتی به حالت دیگر است، تشکیل شد (به عنوان مثال، درایه های سطر اول ماتریس هر کدام از چپ به راست احتمال این را که وضعیت خشکسالی از خشک به یکی از حالت های خشک، نرمال و مرطوب تغییر کند بیان می کند).

### نتایج و بحث

در این تحقیق، به بررسی شاخص SPI برای دوره های ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه با استفاده از آمار بارندگی در سطح استان سیستان و بلوچستان پرداخته شد. به منظور مطالعه پدیده خشکسالی در استان سیستان و بلوچستان، با پیروی از روش پیشنهادی مک کی و همکاران (۱۹۹۳)، ابتدا توزیع های مختلف آماری به سری داده های بارندگی برآزش داده شد تا مناسب ترین توزیع جهت محاسبه SPI شناسایی گردد. نتایج این بررسی ها نشان داد که به علت وجود داده های بسیار زیاد صفر در سری داده ها، چولگی توزیع داده ها بسیار شدید بوده بطوری که در اغلب موارد، برآزش مناسبی بین توزیع های آماری و داده ها

یابد. لذا با معلوم بودن وضعیت در زمان  $t-1$  احتمالات انتقال متناظر در زمان  $t$  با  $P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{ir}$  نشان داده می شوند و لذا:

$$\sum_{j=1}^r P_{ij}(t) = 1 \quad i=1, 2, \dots, r \quad (14)$$

چنانچه ماتریس انتقال  $P(t)$  وابسته به زمان نباشد زنجیره مارکوف را ایستا یا همگن گویند و در این حالت می توان از  $P$ ،  $P_{ij}$  به جای  $P_{ij}(t)$  استفاده نمود. ماتریس احتمال انتقال به صورت زیر نوشته می شود:

$$\begin{bmatrix} r & & & & \\ 0 & P_{00} & P_{01} & P_{02} & \dots & P_{0r} \\ 1 & P_{10} & P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1r} \\ 2 & P_{20} & P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r & P_{r0} & P_{r1} & P_{r2} & \dots & P_{rr} \end{bmatrix}$$

در ماتریس فوق، عناصر قطر اصلی ماتریس بیانگر پایداری هر وضعیت می باشد.

چنانچه فرض شود زنجیره در حال حاضر در وضعیت  $i$  قرار دارد و پس از  $n$  مرحله زمانی در حالت  $j$  واقع شده است، احتمال گذر از حالت  $i$  به حالت  $j$  در  $n$  مرحله با  $P_{ij}^{(n)}$  نشان داده شده و به صورت رابطه ۱۵ بیان می شود:

$$P_{ij}^{(n)} = \sum_{k=1}^r P_k^{(n-1)} P_{kj} \quad i, j=1, \dots, r \quad n > 1 \quad (15)$$

چنانچه  $n = 1$  آن گاه  $P_{ij}^{(1)}$  همان عناصر ماتریس احتمال انتقال است. در این رابطه عناصر ماتریس



این ایستگاه دارد. دوره‌های مهم خشک و تر این دو ایستگاه همزمانی زیادی از خود نشان داد. ایستگاه‌های مورد مطالعه با وجود تفاوت‌های قابل توجه، دارای تشابهاتی نیز هستند، دوره‌های خشک، نرمال و مرطوب در این ایستگاه‌ها گاهی از نظر زمانی و یا مقدار شاخص با یکدیگر دارای اندکی تفاوت و ناهماهنگی می‌باشند. در مقیاس‌های مورد مطالعه، مقیاس‌های کمتر از ۶ ماه برای مطالعه خشکسالی‌های کشاورزی و زراعی، مقیاس‌های ۶ تا ۱۰ ماهه برای بررسی تغییرات بارندگی فصلی و تأثیرات آن بر منابع آب‌های سطحی، مقیاس ۱۲ ماهه برای مطالعه تغییرات میان مدت و مقیاس‌های ۱۸ ماهه و بالاتر برای مطالعه خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و تأثیر بر سطح آب‌های زیرزمینی می‌تواند مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌طور کلی در ایستگاه زاهدان ۲۴ دوره نرمال، سه دوره خشکسالی شدید، یک دوره خشکسالی خیلی شدید و یک دوره ترسالی متوسط مشاهده شد، این نتایج بیانگر آن است که، فراوانی دوره‌های نرمال به مراتب بیشتر از دوره‌های خشک و مرطوب می‌باشد. در سطح ایستگاه خاش نیز ۲۲ دوره نرمال، هفت دوره خشکسالی متوسط، سه دوره خشکسالی شدید و سه دوره خشکسالی خیلی شدید تعیین گردید و وقوع دوره‌های نرمال بیش از ۳/۵ برابر دوره‌های خشک و احتمال وقوع دوره‌های خشک، ۲ برابر دوره‌های مرطوب بدست آمد (شکل ۲).

ماتریس احتمال انتقال زنجیره مارکوف برای وضعیت‌های مختلف خشکسالی ایستگاه‌های تحت مطالعه مناطق روستایی استان سیستان و بلوچستان در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که در ماتریس احتمال انتقال زنجیره مارکوف به عنوان نمونه در شهرستان ایرانشهر مشاهده می‌گردد، احتمال گذر از حالت خشک به مرطوب و همچنین از حالت مرطوب به حالت خشک به ترتیب صفر و یک می‌باشد، این در حالی است که احتمال گذر از حالت خشک به خشک و همچنین خشک به نرمال به ترتیب ۳۰/۷۶ و ۶۹/۲۳ درصد می‌باشد.

مشاهده نگردید، این وضعیت برای مقیاس‌های زمانی کمتر از شش ماه بیشتر مشهود بود، مقادیر شاخص SPI یک، سه و شش ماهه که منعکس‌کننده شرایط رطوبتی کوتاه‌مدت هستند، جواب‌های قابل قبولی ارائه نداده و مقادیر SPI ۱۲ ماهه و بیشتر که منعکس‌کننده الگوهای بلندمدت هستند، از دقت پیش‌بینی بیشتری برخوردار بودند. همانگونه نتایج نیز نشان می‌دهد پدیده خشکسالی در این ایستگاه‌ها از فراوانی وقوع بسیار زیادی برخوردارند و بسیاری از رویدادهای خشکسالی در زمره خشکسالی‌های بسیار شدید ارزیابی گردیدند (شکل ۲)، برای نمونه، تحلیل نقطه‌ای تغییرات شاخص بارش استاندارد شده (SPI) ایستگاه‌های زاهدان و خاش در شکل ۲ نشان داده شده است.

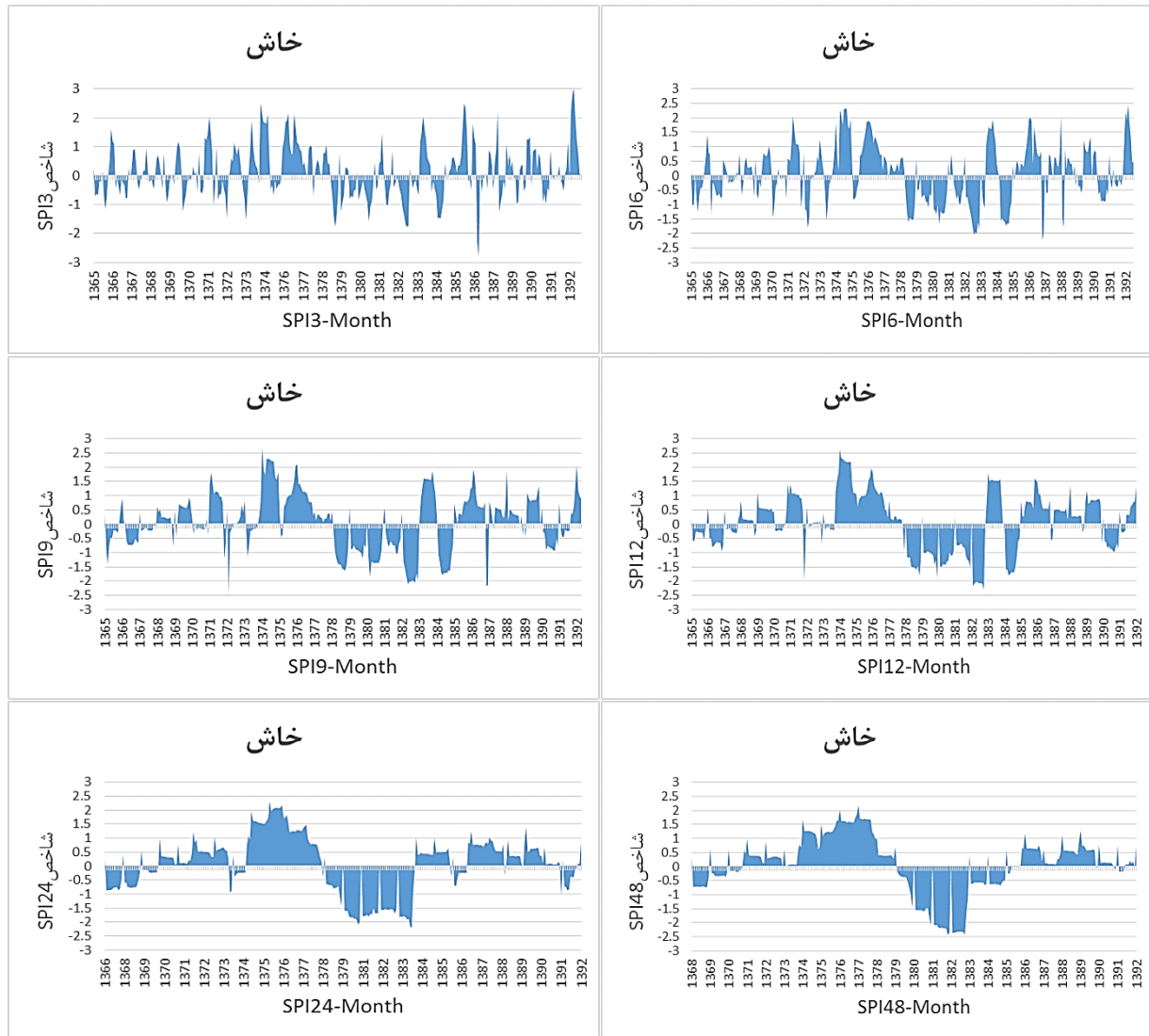
نتایج نشان می‌دهد که رویدادهای خشکسالی که اغلب طولانی‌مدت و دارای شدت‌های بسیار بالا بوده و به‌وسیله دوره‌های مرطوب گسسته می‌شوند و پس از هر دوره مرطوب یک دوره خشک با شدت‌های مختلف اتفاق می‌افتد. به‌عبارت‌دیگر وقوع دوره‌های خشک و مرطوب به‌صورت دوره‌ای رخ می‌دهد. مقیاس زمانی ۶ ماهه که بر مبنای میانگین متحرک شش ماهه استوار می‌باشد عمدتاً برای مطالعه مسائل مرتبط با کشاورزی و آب‌های سطحی مناسب می‌باشد. بررسی‌ها نشان داد که روند دوره‌های تر، خشک و نرمال ایستگاه‌های زاهدان و زابل از یکدیگر پیروی می‌نماید، هرچند از نظر موقعیت جغرافیایی این دو ایستگاه با یکدیگر تفاوت داشته و فاصله تقریباً زیادی از یکدیگر دارند. ارتفاع قرارگیری بسیار بالاتر ایستگاه زاهدان و دریافت بارش‌های موسمی بیشتر نسبت به ایستگاه زابل ازجمله تفاوت‌های بین ایستگاه‌ها است، به‌همین دلیل در سطح ایستگاه زاهدان نسبت به ایستگاه زابل دوره‌ها و شدت‌های ترسالی بیشتری مشاهد گردید (مقادیر SPI بالاتری در ایستگاه زاهدان نسبت به ایستگاه زابل بدست آمد). تداوم زیاد دوره‌های تر به همراه شدت بیشتر شاخص SPI نشان از اهمیت دوره‌های تر در

خواهد شد و به ترتیب در ۱۱/۴۹، ۵/۴۰، ۲/۷۰، ۲/۷۰ و ۵/۴۱ درصد اوقات، شرایط مرطوب برقرار خواهد بود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که به طور میانگین، احتمال تعادل دوره‌های خشک، مرطوب و نرمال در ایستگاه‌های استان به ترتیب ۲۹، ۵ و ۶۶ درصد است، به عبارتی در بیشتر مواقع، منطقه از نظر اقلیمی در شرایط نرمال قرار دارد در حالی که احتمال وقوع شرایط خشک تقریباً شش برابر شرایط مرطوب است (جدول ۴).

نتایج احتمال وقوع خشکسالی‌ها در حالت پایدار (بلندمدت) بر اساس SPI سالانه در شهرستان ایرانشهر نشان داد در بلندمدت به ترتیب ۳۵/۱۲، ۶۲/۱۸ و ۲/۷ درصد از اوقات شرایط خشکسالی خشک، نرمال و مرطوب اتفاق خواهد افتاد. شهرستان‌های زاهدان، چابهار، زابل، سراوان و خاش در بازه بلندمدت به ترتیب در ۱۱/۴۹، ۳۵/۱۴، ۳۵/۱۳، ۱۱/۶۲ و ۳۵/۱۳ درصد از اوقات، گرفتار وضعیت خشک بوده و در ۷۷/۲، ۵۹/۴۶ و ۶۲/۱۷، ۷۵/۶۸ و ۵۹/۴۶ درصد از اوقات، وضعیت نرمال مشاهده



شکل ۲. مقادیر SPI مقیاس زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه در ایستگاه زاهدان



ادامه شکل ۲. مقادیر SPI مقیاس زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه در ایستگاه خاش

مربوط به سال ۱۳۷۴ با شاخص SPI برابر با ۲/۰۸ در شهرستان زاهدان اتفاق افتاده است. از نظر استمرار و توالی خشکسالی، بیشترین تکرار آن بین سال‌های ۱۳۸۲-۱۳۷۸ رخ داده است. به دلیل دوری شمال استان سیستان و بلوچستان از منابع رطوبتی، ضعیف بودن سیستم‌های باران‌زای مدیترانه‌ای وارده به منطقه و تأثیر شرایط منطقه‌ای، مقدار بارندگی کم و متغیر بود، به گونه‌ای که مقدار بارندگی در ایستگاه‌های بسیار نزدیک به هم نیز در بسیاری از سال‌ها تفاوت قابل توجهی با یکدیگر داشته و گاهی دو ایستگاه نزدیک به هم، در دو فاز مختلف خشکسالی و ترسالی قرار گرفتند.

با توجه به آمارهای موجود، مناطق روستایی استان سیستان و بلوچستان با متوسط بارش سالانه ۶۰ میلیمتری همواره با خشکسالی‌های پی‌درپی مواجه بوده است، از آنجایی که استمرار حالت خشک در یک منطقه خود می‌تواند گویای شدت خشکسالی نیز باشد (فرج‌زاده، ۲۰۰۵) و بر اساس نتایج بدست آمده مناطق روستایی شهرستان‌های ایرانشهر، چابهار، زابل و خاش همواره به استمرار بیشتر و شدت خشکسالی بالاتری نسبت به مناطق زاهدان و سراوان گرفتار بوده‌اند. شدیدترین خشکسالی استان در سال ۱۳۷۸ در شهرستان‌های ایرانشهر و سراوان با شاخص SPI برابر با -۲/۳۸ و شدیدترین ترسالی

جدول ۳. ماتریس احتمال انتقال وضعیت‌های مختلف خشکسالی ایستگاه‌های استان سیستان و بلوچستان

| منطقه    | مرطوب  | نرمال  | خشک    | وضعیت |
|----------|--------|--------|--------|-------|
| زاهدان   | ۰/۳۳   | ۰/۳۴   | ۰/۳۳   | خشک   |
|          | ۰/۱    | ۰/۸    | ۰/۱    | نرمال |
|          | ۰      | ۱      | ۰      | مرطوب |
| ایرانشهر | ۰      | ۰/۶۹۲۳ | ۰/۳۰۷۶ | خشک   |
|          | ۰/۰۴۳۴ | ۰/۶۰۸۷ | ۰/۳۴۷۹ | نرمال |
|          | ۰      | ۰      | ۱      | مرطوب |
| چابهار   | ۰      | ۰/۶۱۵۳ | ۰/۳۸۴۷ | خشک   |
|          | ۰/۰۹۰۹ | ۰/۶۳۶۴ | ۰/۲۷۲۷ | نرمال |
|          | ۰      | ۰      | ۱      | مرطوب |
| زابل     | ۰      | ۰/۶۱۵۴ | ۰/۳۰۷۷ | خشک   |
|          | ۰      | ۰/۶۵۲۲ | ۰/۳۴۷۸ | نرمال |
|          | ۰      | ۰      | ۱      | مرطوب |
| سراوان   | ۰      | ۰/۸۷۵۰ | ۰/۱۲۵۰ | خشک   |
|          | ۰/۰۳۵۷ | ۰/۷۱۴۳ | ۰/۲۵   | نرمال |
|          | ۰      | ۱      | ۰      | مرطوب |
| خاش      | ۰      | ۰/۵۳۸۵ | ۰/۴۶۱۵ | خشک   |
|          | ۰/۰۴۵۵ | ۰/۶۳۶۳ | ۰/۳۱۸۲ | نرمال |
|          | ۰/۵    | ۰/۵    | ۰      | مرطوب |

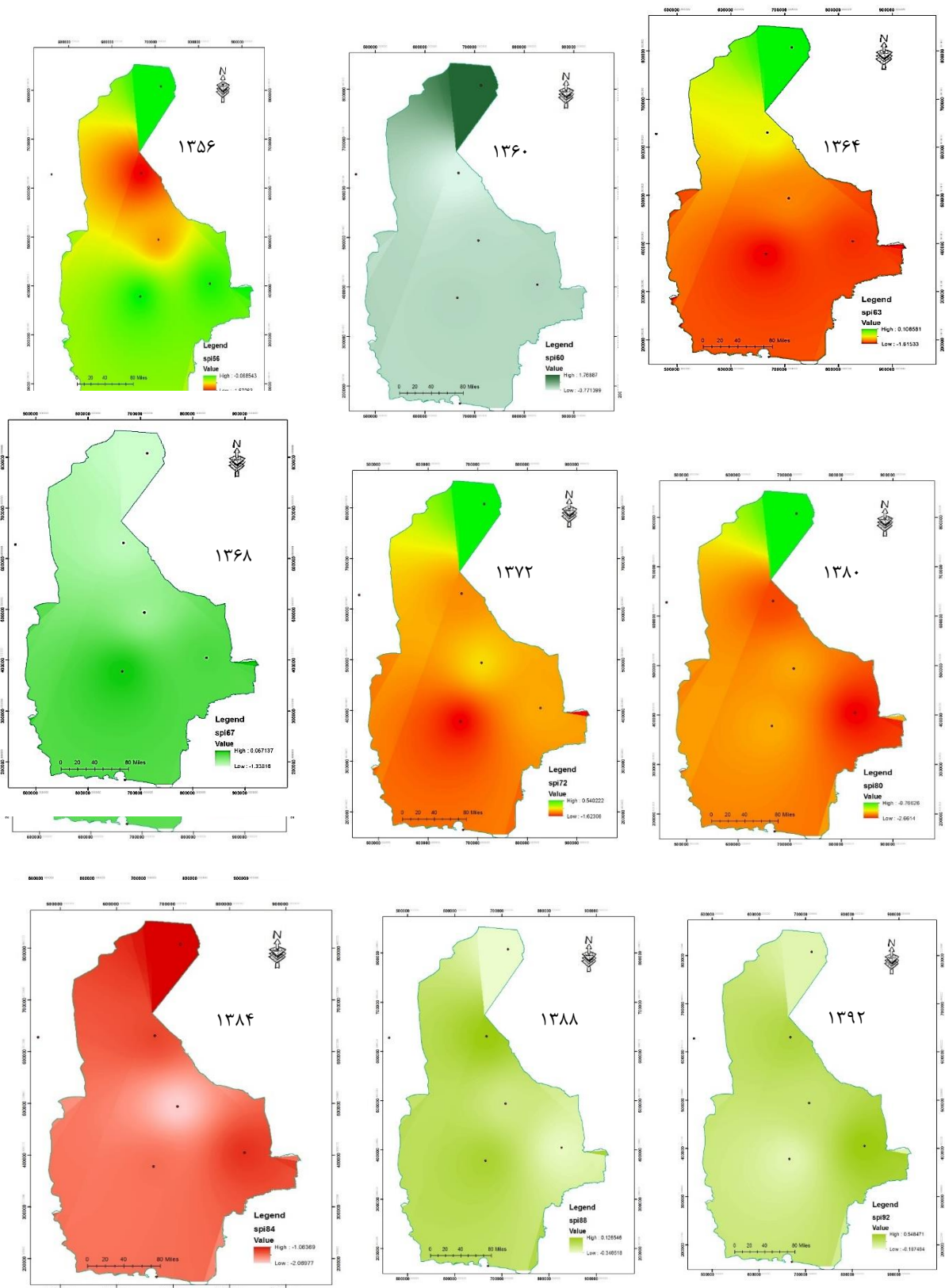
جدول ۴. احتمال وضعیت‌های مختلف خشکسالی ایستگاه‌های استان سیستان و بلوچستان در بلندمدت با استفاده از زنجیره مارکوف

| منطقه    | وضعیت خشک | وضعیت نرمال | وضعیت مرطوب |
|----------|-----------|-------------|-------------|
| زاهدان   | ۰/۱۱۴۹    | ۰/۷۷۰۲      | ۰/۱۱۴۹      |
| ایرانشهر | ۰/۳۵۱۲    | ۰/۶۳۱۸      | ۰/۰۲۷۰      |
| چابهار   | ۰/۳۵۱۴    | ۰/۵۹۴۶      | ۰/۰۵۴۰      |
| زابل     | ۰/۳۵۱۳    | ۰/۶۳۱۷      | ۰/۰۲۷۰      |
| سراوان   | ۰/۲۱۶۲    | ۰/۷۵۶۸      | ۰/۰۲۷۰      |
| خاش      | ۰/۳۵۱۳    | ۰/۵۹۴۶      | ۰/۰۵۴۱      |

تعداد رویدادهای خشک، مرطوب و نرمال مورد انتظار در ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۵ ارائه شده است. به استثنای ایستگاه زاهدان، در بیشتر ایستگاه‌های استان، تعداد دوره‌های نرمال بیشتر از دوره‌های مرطوب و خشک بوده و در اکثر ایستگاه‌ها تعداد دوره‌های خشک بسیار بالاتر از تعداد دوره‌های مرطوب می‌باشد.

جدول ۵. تعداد رویدادهای مورد انتظار در SPI سالانه برای ایستگاه‌های مورد مطالعه

| وضعیت | زاهدان | ایرانشهر | چابهار | زابل | سراوان | خاش |
|-------|--------|----------|--------|------|--------|-----|
| خشک   | ۴      | ۱۳       | ۱۳     | ۱۳   | ۸      | ۱۳  |
| نرمال | ۳۰     | ۲۴       | ۲۳     | ۲۴   | ۲۹     | ۲۳  |
| مرطوب | ۴      | ۱        | ۲      | ۱    | ۱      | ۲   |



شکل ۳. الگوی مکانی مقادیر SPI سالانه منطقه از سال ۱۳۵۶-۱۳۹۲

فواصل خیلی نزدیک می‌باشد (شکل ۳).

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از شاخص خشکسالی SPI، وضعیت خشکسالی‌ها در مناطق روستایی استان سیستان و بلوچستان مورد بررسی قرار گرفت و سپس با استفاده از مدل زنجیره مارکوف مرتبه اول به پیش‌بینی خشکسالی پرداخته شد. نتایج نشان داد که احتمال تعادل دوره‌های خشک، مرطوب و نرمال به طور میانگین در سطح شهرستان‌های استان سیستان و بلوچستان به ترتیب ۲۹، ۵ و ۶۶ درصد است که بدین معنی است که در بیشتر مواقع منطقه از نظر اقلیمی در شرایط نرمال قرار دارد، در حالی که احتمال وقوع شرایط خشک تقریباً شش برابر شرایط مرطوب می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که مدل زنجیره مارکوف حالت‌های خشک و مرطوب در بلندمدت را تقریباً به همان صورتی که در طول دوره آماری ۱۳۹۲-۱۳۵۵ تکرار شده بودند پیش‌بینی نموده است و این نشان می‌دهد که روند منفی تغییرات شاخص SPI، در مناطق روستایی استان همچنان ادامه خواهد داشت. با توجه به اینکه در حال حاضر مناطق روستایی استان سیستان و بلوچستان با کمبود شدید منابع آب مواجه می‌باشند، با ادامه این روند و تداوم توسعه شهرستان‌ها، صنعتی شدن شهر زاهدان، تجاری شدن شهرستان‌های چابهار و زابل، توسعه بخش کشاورزی در شهرستان ایرانشهر و رشد بالای نرخ جمعیت کل استان سیستان و بلوچستان، در آینده کاهش شدید منابع آبی قریب‌الوقوع بوده و از آنجایی که وقوع خشکسالی‌ها همواره اجتناب‌ناپذیر است، ایجاد سامانه جامع مدیریت ریسک و برنامه‌ریزی صحیح برای مقابله با این بالای طبیعی، امری حتمی و ضروری خواهد بود.

طی تحقیق رضیئی و همکاران (۱۳۸۶) در سطح استان سیستان و بلوچستان نیز مشخص گردید که شهرستان زاهدان بر اساس شاخص SPI سه ماهه درازمدت، به ترتیب ۲۳، ۴۲ و ۳۵ درصد اوقات در وضعیت‌های خشک، نرمال و تر قرار داشته و به‌طور میانگین، احتمال تعادل دوره‌های خشک، تر و نرمال مناطق مختلف استان به ترتیب ۲۱، ۳۶ و ۴۴ درصد می‌باشد. منطقه تقریباً در ۵۰ درصد از مواقع در شرایط نرمال قرار داشته و احتمال قرار گرفتن منطقه در یک دوره خشک نیز کمتر از دوره تر می‌باشد، با افزایش طول دوره شاخص SPI به ۶ ماهه، احتمال ماندن در خشکسالی افزایش می‌یابد. بر اساس SPI شش ماهه، احتمال ماندن در دوره خشکسالی در قسمت‌های مرکزی بسیار زیاد بوده (۷۰ تا ۸۰ درصد) و بخش‌های مرکزی بسیار کمتر (کمتر از ۵۰ درصد) دچار این عارضه می‌باشند. بر اساس نتایج این تحقیق، احتمال گذر از حالت خشک به حالت تر در تمامی استان سیستان و بلوچستان کمتر از ۵ درصد بوده و وضعیت دشت زابل و شرق استان بهتر بوده و در مجموع ریسک کم‌آبی و خشکسالی در استان سیستان و بلوچستان به ۶۵ درصد می‌رسد. پیش‌بینی‌ها گویای شدت و گستردگی بالای خشکسالی طی سال‌های آتی در منطقه است، این پدیده در سایر مناطق کشور نیز مشاهده شده است (ابراهیمیان و همکاران، ۲۰۱۷)

به منظور شناخت الگوهای مکانی خشکسالی‌ها در سطح استان، مقادیر SPI سالانه ۶ ایستگاه مورد مطالعه با استفاده از روش‌های زمین آمار در محیط GIS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در بین روش‌های مختلف زمین آمار مورد استفاده، روش معکوس فاصله وزنی (IDW) بهترین نتیجه را بدست داد، دلیل دقت کمتر سایر روش‌های زمین‌آماری، محدود بودن تعداد ایستگاه‌های مورد مطالعه و نیز تفاوت‌های مکانی بیشتر در

## منابع

- Climate and Applied Meteorology*, 23(7), 1100-1109. DOI: 10.1175/1520-0450.
- Azzam, S. A., Azzam, A. M., Nielsen, M. K and Kinder, J. E. (1990). Markov Chain as shortcut method to estimate age distributions in herds of beff cattle. *Journal of Animal science*, 68(1), 5-14. DOI: 10.2527/1990.6815.
- Bahrami, M., Zarei, A. R. and Chakav, S. (2017). Analysis of drought transitions using log-linear models in Iran. *International Journal of Water*, 11(3), 266-278. DOI: 10.1504/IJW.2017.085887.
- Bahrami, M., Bazrkar, S. and Zarei, A. R. (2021). Spatiotemporal investigation of drought pattern in Iran via statistical analysis and GIS technique. *Theoretical and Applied Climatology*, 143(3), 1113-1128. DOI: 10.1007/s00704-020-03480-1.
- Banik, P., Mandal, A., and Rahman, M. S. (2000). Markov Chain analysis of weekly rainfall data in determining drought proneness. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 7, 231-239. DOI: 10.1155/S1026022602000262
- Byun, H.R., and Wilhite, D.A. (1999). Daily quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*, 12(9), 2747-2756. DOI: 10.1175/1520-0442(1999)012<2747:OQODSA>2.0.CO;2.
- Clarke, R., and Karas, M. (1989). Analytical relationship between rainfall and runoff. Third IHAS Assembly, Baltimore, 181, 187-193.
- Dalezios, N. R., Papazafiriou, Z.G., Papamichail, D. M., and Karakostas, T. S. (1991). Drought assessment for the potential of precipitation enhancement in northern Greece. *Theoretical and Applied Climatology*, 44(2), 75-88. DOI: 10.1007/BF00867995.
- Gibbs, W. J., and Maher. J. V. (1967). Rainfall Deciles as drought Indicators. Bureau of Meteorology bulletin No. 48. Common wealth of Australia: Melbourn, 29.
- ابراهیمیان، ر.، آل‌شیخ، ع. ا. و مسعودیان، ا. (۱۳۹۶). شبیه‌سازی و پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از روش CA Markov در دشت نجف‌آباد، *مجله اکوهیدرولوژی*، ۴(۳)، ۶۵۳-۶۶۲.
- رضیئی، ط.، دانش‌کارآراسته، پ.، اختری، ر. و ثقفیان، ب. (۱۳۸۶). بررسی خشکسالی‌های هواشناسی (اقلیمی) در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از نمایه SPI و زنجیره مارکوف، *تحقیقات منابع آب ایران*، ۳(۱)، ۲۵-۳۵.
- زارعی، ع. ر.، مقیمی، م. م. و بهرامی، م. (۱۳۹۶). پیش‌بینی خشکسالی ماهانه با استفاده از شاخص استاندارد بارش و زنجیره مارکوف (مطالعه موردی: جنوب شرق ایران). *مجله جغرافیا و پایداری محیط*، ۷(۲)، ۳۹-۵۱.
- جعفری‌بهی، خ. (۱۳۷۸). تحلیل آماری دوره‌های تر و خشک بارندگی در چند نمونه اقلیمی ایران با استفاده از زنجیره مارکوف. پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تهران.
- علیزاده، ا.، انصاری، ح.، ارشادی، س. و آشگرطوسی، ش. (۱۳۸۷). پیش‌بینی خشکسالی در استان سیستان و بلوچستان، *مجله جغرافیا و توسعه‌ی ناحیه‌ای*، ۱۱(۷)، ۱-۱۷.
- فرج‌زاده، م. (۱۳۸۴). خشکسالی از مفهوم تا راهکار. انتشارات سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، چاپ اول، ۱۶-۱۷.
- ماه‌آورپور، ز. (۱۳۹۳). احتمال وقوع بارش‌های روزانه ایران و پیش‌بینی آن با مدل زنجیره مارکوف، *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، ۲۹(۴)، ۲۲۹-۲۴۰.
- میرعباسی‌نجف‌آبادی، ر.، احمدی، ف.، عاشوری، م. و ناظری-تهرودی، م. (۱۳۹۶). تحلیل خشکسالی‌های شمال شرقی ایران با استفاده از شاخص کمبود توأم، *مجله اکوهیدرولوژی*، ۴(۲)، ۵۷۳-۵۸۵.
- Alley, W.M. (1984). The palmer drought severity index : limitations and assumptions. *Journal of*

- IWMI: Colombo, 24. DOI: 10.3910/2009.255.
- Smakhtin, V. U., and Hughes, D. A. (2007). Automated estimation and analyses of Meteorological Drought characteristics from montly rainfall data. *Enviromental modeling and software*, 22(6), 880- 890. DOI: 10.1016/j.envsoft.2006.05.013
- Subrahmanyam, V. P. (1967). Incidence and spread of cotinental drought, W. M.O/IHD. Project, report. 2: 1- 51.
- Tate, E. L., Meigh, J. R., Prudhomme, C., and McCartney, P.M. (2000). Drought assessment in Southern Africa using river flow data, DFID report 00/4. London, UK.
- Thompson, S. A. (1999). Hydrology for water management, Balkema, Rotterdam Netherlands, 362 Pp. DOI: 10.1201/9780203751435.
- Tsakiris, G, and Vangelis, H. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *Euopen water*. 9/10: 3- 11.
- Wu, H., Hayes, M. J., Welss, A., and Hu, Q. (2001). An evalution the standardized precipitation index, the China-z index and the statistical z-score. *International journal of Climatology*. 21: 745-758. DOI: 10.1002/joc.658.
- Zarei, A. R., Moghimi, M. M. and Bahrami, M. (2019). Comparison of reconnaissance drought index (RDI) and effective reconnaissance drought index (eRDI) to evaluate drought severity. *Sustainable Water Resources Management*. 5: 1345– 1356. DOI: 10.1007/s40899-019-00310-9.
- Hayes, M. J., Svoboda, M. D., wilhite, D. A., and Vabyarkho, O. V. (1999). Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(3), 429- 438.
- Maidment, D. R. (1993). Handbook of Hydrology. Chapter 19 in: Analysis and Modeling of Hydrologic Time Series. salas J. D. Engineering Research Center Colorado state University, Fort Collins, Colorado, 19, 1- 19.
- Mckee, T. B., Doesken, N. J., and Kleist, I. (1993). the Relationship of drought frequency and duration to time scales. 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, 17-22 January, 179-184.
- Morid, S., Smakhtin, V., and Moghaddasi, M. (2006). Comparison of seven meterological indices for drought monitoring in Iran. *International journal of climatology*, 26(7), 971- 985. DOI: 10.1590/0102-7786324009.
- Palmer, W.C. (1965). Meteorological drought. Research paper No. 45. U.S. Department of commerce weather Bureau, Washington, DC.
- Potop, V., Mozny, M., and Soukup, J. (2012). Drought evolution at various time scales in the lowland regions and their impact on vegetable crops in the Czech Republic. *Agricultural and Forest Meteorology*, 156(2), 121- 133. DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.01.002.
- Smakhtin, V. U, and Hughes, D. A. (2004). Review, automated estimation and analyses of drought indices in south Asia. IWMI working paper N 83-drought series paper N 1.