



علیرضا صادقی نیا<sup>۱</sup>

دکتر زهرا حجازی زاده<sup>۲</sup>

محسن حمیدیان پور<sup>۳</sup>

راهبه پورسربندان<sup>۴</sup>

## برآورد احتمالات خشکسالی و ترسالی با استفاده از نمایه SPI و مدل زنجیره مارکف

### مطالعه موردی: تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۰۳/۲۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۱۱/۰۷

#### چکیده

در این پژوهش با استفاده از مدل زنجیره مارکف مرتبه اول و نمایه SPI در مقیاس ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه احتمال وقوع پدیده های خشکسالی و ترسالی در شهر تهران مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از داده های بازنگری ماهانه ایستگاه مهرآباد در بازه زمانی ۵۰ ساله (۱۹۵۶-۲۰۰۶) استفاده شد. پس از محاسبه شاخص SPI در مقیاس های نامبرده، انطباق زنجیره مارکف مرتبه اول بر سری SPI با استفاده از آزمون  $X^2$  در سطح معنی داری  $\alpha = 0/05$  بررسی و مورد تایید واقع شد. پس از تشکیل ماتریس احتمال انتقال، احتمال تعادل برای هر یک از حالت های خشکسالی (D)، ترسالی (W) و نرمال (N) محاسبه شد. تعداد متوسط خشکسالی ها و ترسالی های مورد انتظار و میانگین تداوم خشکسالی و ترسالی برای آینده پیش بینی گردید. نتایج به دست آمده بیانگر این است که احتمال گذر از یک حالت معین به همان حالت محتمل تر از گذر به سایر شرایط است. احتمال  $P_{dd}$  (احتمال وقوع

E-mail: a\_sadeghinia@yahoo.com

- ۱ - دانشجوی دکتری اقلیم شناسی، دانشگاه تربیت معلم تهران
- ۲ - استاد دانشگده جغرافیا، دانشگاه تربیت معلم تهران
- ۳ - دانشجوی دکتری اقلیم شناسی، دانشگاه تربیت معلم تهران
- ۴ - کارشناس برنامه ریزی شهری، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

خشکسالی بعد از خشکسالی) بیشتر از  $P_{ww}$  (احتمال وقوع ترسالی بعد از ترسالی) است. هر چه مقیاس زمانی SPI طولانی تر می گردد، احتمال ماندن در تله خشکسالی افزایش می یابد. به طور کلی احتمال تعادل حالت نرمال بیش از همه و احتمال تعادل حالت خشکسالی بیشتر از ترسالی است. هر چقدر مقیاس زمانی SPI طولانی تر می گردد از تعداد خشکسالی های مورد انتظار کاسته می شود و برعکس طول دوره های خشکسالی افزایش می یابد. به طور کلی انتظار وقوع پدیده خشکسالی بیش از پدیده ترسالی است.

**کلید واژه ها:** خشکسالی، ترسالی، مدل زنجیره مارکوف، نمایه SPI، تهران.

#### مقدمه

خشکسالی یکی از مهمترین انواع مخاطرات محیطی و پدیده ای آرام و مرموز است که باعث خسارات شدید می گردد. در دهه های اخیر در میان حوادث طبیعی که جمعیت های انسانی را تحت تاثیر قرار داده اند، تعداد و فراوانی این پدیده، بیش از سایر حوادث بوده است (خزایی، ۱۳۸۰: ۱۲). نیاز به پایش و تعیین درجه، شدت، تداوم، زمان وقوع و خاتمه دوره های خشکسالی و توزیع زمانی و مکانی آن ها محققان را بر آن داشته است تا شاخص هایی را برای مطالعه دوره های خشکسالی ارائه دهند. هدف یک شاخص خشکسالی، تعیین ساده و کمی سه ویژگی شدت، تداوم و گسترش مکانی آن است و ویژگی های مزبور به طور صریح یا غیر صریح به مقیاس زمانی وابسته اند. در میان شاخص هایی که برای خشکسالی استفاده می شود، شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI) یکی از محدود شاخص هایی است که در آن مقیاس زمانی برای پایش دوره های خشک مد نظر قرار گرفته است (بری ابرقویی و همکارانش، ۱۳۸۲: ۱۱۷۸۲). نمایه SPI به علت سادگی محاسبات، استفاده از داده های قابل دسترس بارندگی، قابلیت محاسبه برای هر مقیاس زمانی دلخواه و قابلیت بسیار زیاد در مقایسه مکانی نتایج به عنوان مناسب ترین نمایه برای تحلیل خشکسالی بویژه تحلیل های مکانی شناخته می شود (هایز و همکاران، ۱۹۹۹؛ رضیئی و همکاران، ۱۳۸۶: ۲۵-۳۵). با توجه به این مشخصه ها، شاخص SPI در سرتاسر دنیا برای مطالعه خشکسالی استفاده شده است. پایش خشکسالی های ۱۹۹۳ و ۱۹۹۴ کلرادو (مک کی و همکارانش، ۱۹۹۳)، دوره های خشک ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۶ صحرای جنوبی و ایالات جنوب غربی ایالات متحده (هایز و همکارانش، ۱۹۹۹)، محاسبه مقادیر SPI در

هفت بخش اقلیمی ترکیه (کوموسکو، ۱۹۹۹) و پایش دوره های خشک مناطق ساحل غرب آفریقا (اگنیو، ۲۰۰۰) از جمله این مطالعات محسوب می شود.

موضوع دیگری که در مطالعه خشکسالی اهمیت بسیار زیادی دارد، پیش بینی احتمال وقوع پدیده مزبور است. مدل زنجیره مارکف از جمله مدل های سری زمانی می باشد که برای پیش بینی احتمالاتی بارندگی و رویدادهای خشک به کار می رود (رضیئی و همکاران، ۱۳۸۶: ۱۳۰). زنجیره مارکف با روش های ساده ریاضی (مانند ضرب ماتریس ها) حل احتمالات مربوط به فرایندهای وابسته را آسان می نماید و در علوم مختلف مانند هواشناسی، اقلیم شناسی و صنعت کاربرد وسیعی دارد (یوسفی و حجام، ۱۳۸۶: ۱۲۲). کاربرد مدل زنجیره مارکف روی سری زمانی پالمر نشان می دهد که می توان از این مدل برای پیش بینی دوره های خشک و تر بهره گیری نمود (لوهانی و لوگانتان، ۱۹۹۷). همچنین پائولو و همکارانش (۲۰۰۳) روند تغییرات شدت خشکسالی در جنوب پرتقال را با استفاده از مدل های سری زمانی و زنجیره مارکف بر روی سری زمانی SPI بررسی نمودند. رابطه رگرسیونی برقرار شده میان مقادیر مشاهده شده و برآورد شده دوره های خشک استان خراسان نشان دهنده ی دقت بالای مدل زنجیره مارکف در تعیین احتمال وقوع دوره های خشک می باشد (حجازی زاده و شیرخانی، ۱۳۸۲: ۱۳). همچنین رضیئی و همکارانش با استفاده از نمایه SPI و مدل زنجیره مارکف خشکسالی های سیستان و بلوچستان را در مقیاس ۳ و ۶ ماهه محاسبه نمودند و نتیجه گرفتند که در مقیاس شش ماهه احتمال ماندن در تله خشکسالی در نواحی مرکزی استان بیش از ۷۰ درصد و در نواحی شرقی استان کمتر از ۵۰ درصد است.

با توجه به این که شاخص بارش استاندارد شده ابزاری قوی در آنالیز داده های بارندگی و شناخت ویژگی های مربوط به رویدادهای خشکسالی و ترسالی می باشد و شناسایی و پیش بینی خصوصیات این پدیده ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است، در پژوهش پیش رو ابتدا ویژگی های مربوط به خشکسالی های شهر تهران با استفاده از شاخص SPI در مقیاس های زمانی ۶، ۹، ۱۲، ۲۴، و ۴۸ ماهه مورد بررسی قرار گرفت و سپس احتمال وقوع پدیده های خشکسالی و ترسالی در شهر تهران با استفاده از مدل زنجیره مارکف محاسبه شد.

### مواد و روش ها

در این پژوهش از نمایه SPI برای شناسایی دوره های خشک، تر و نرمال و از مدل زنجیره مارکف مرتبه اول برای محاسبه ی احتمال وقوع پدیده های خشکسالی و ترسالی در مقیاس های مختلف SPI استفاده شده است. در ادامه نحوه استفاده از روش SPI و مدل زنجیره مارکف تشریح می گردد.

## شاخص SPI

شاخص بارش استاندارد یکی از شاخص های اساسی در مطالعه تغییرات حول مرکز به شمار می آید که محاسبه آن نیازمند داشتن میانگین و انحراف معیار بلندمدت مقادیر بارندگی برای دوره های مورد مطالعه است (بوناکورسو و همکارانش، ۲۰۰۳). این شاخص به تحلیل گر امکان می دهد تا تعداد وقایع خشکسالی و ترسالی اتفاق افتاده را برای هر گام زمانی دلخواه تعریف و شناسایی نماید (مک کی و همکارانش، ۱۹۹۳). شاخص بارش استاندارد شده به صورت زیر قابل محاسبه است (انصاری و داوری، ۱۳۸۶).

$$SPI = \frac{X_{ik} - \bar{X}_i}{\delta_i} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن  $\delta_i$ : انحراف معیار داده های  $i$  امین ایستگاه،  $X_{ik}$ : مقادیر بارندگی برای  $i$  امین ایستگاه و  $k$  امین مشاهده و  $\bar{X}_i$ : متوسط بارندگی ایستگاه  $i$  ام می باشد. تعیین و پایش دوره خشک شامل تاریخ شروع، خاتمه، تداوم و شدت دوره خشک است. با تعیین SPI میتوان پارامترهای فوق را برای مقیاس های زمانی مختلف محاسبه کرد. در این پژوهش، ابتدا داده های بارندگی ماهانه ایستگاه مهرآباد تهران در بازه زمانی ۵۰ ساله (۱۹۵۶ تا ۲۰۰۶) به صورت یک سری (۶۱۲ ماهه) مرتب گردید و سپس شاخص SPI برای مقیاس های زمانی ۶، ۹، ۱۲، ۲۴، ۴۸ ماهه محاسبه گردید. جهت محاسبه مقادیر SPI از نرم افزار SPI\_SL\_6 استفاده شد. بعد از این مرحله، سری SPI با توجه به شدت های مختلف طبقه بندی گردید. مک کی و همکارانش (۱۹۹۳) جدول زیر را برای طبقه بندی SPI پیشنهاد نموده اند.

جدول ۱- طبقه بندی مقادیر SPI

گروه	ترسالی بسیار شدید	ترسالی شدید	ترسالی ملایم	نزدیک به نرمال	خشکسالی ملایم	خشکسالی شدید	خشکسالی بسیار شدید
مقادیر SPI	۲ و بالاتر	۱/۵ تا ۱/۹۹	۱ تا ۱/۴۹	۰/۹۹ تا ۰/۹۹-	۱- تا ۱/۴۹-	۱/۵- تا ۱/۹۹-	۲- و کمتر

## مدل زنجیره مارکف

پس از شناخت ویژگی دوره های خشکسالی (شدت، تداوم و ...) برای محاسبه ی احتمال وقوع پدیده های خشکسالی و ترسالی در مقیاس های مختلف SPI از مدل زنجیره مارکف مرتبه اول استفاده شد. مدل های زنجیره مارکف از جمله فرایندهای تصادفی هستند که در شبیه سازی و مدل سازی سری های زمانی گسسته کاربرد گسترده

ای دارند. وابستگی متغیرهای تصادفی به زمان در سری های زمانی از طریق ضریب همبستگی یا ماتریس های احتمال انتقال بیان می شوند. ماتریس احتمال انتقال ماتریس مربعی است که بسته به تعداد حالت های آن، تعداد  $n$  ترکیب ممکن از احتمال انتقال از حالتی به حالت دیگر را در بر می گیرد. مدل زنجیره مارکف بر اساس تعداد حالت ها و احتمال های انتقال از حالت  $i$  به حالت  $j$  ( $P_{ij}$ ) شناخته می شود. احتمال انتقال بیانگر احتمال قرار گرفتن سیستم در یکی از حالت های ممکن در گام زمانی آینده می باشد. مدل زنجیره مارکف مرتبه اول اصلی ترین شکل مدل زنجیره مارکف به حساب می آید. زنجیره مارکف مرتبه اول عبارت است از یک سری زمانی گسسته، که در آن، رفتار سری در گام زمانی آینده تنها به حال بستگی دارد نه به گام های زمانی گذشته. مدل زنجیره مارکف مرتبه اول به شکل زیر بیان می گردد (ویلیک، ۱۹۹۵؛ رضیئی و همکارانش، ۱۳۸۶).

$$\text{Pr}\{X_{t+1} | X_t, X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_{t-n}\} = \text{pr}\{X_{t+1} | X_t\} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن:  $p$ ، احتمال وقوع حالت  $X_{t+1}$  به شرط وقوع حالت  $X_t$ ،  $X$  تغییر حالت و  $t$  گام زمان می باشد. قبل از اینکه از مدل مارکف استفاده کنیم، ابتدا باید انطباق زنجیره مارکف بر ۵ سری زمانی SPI از نظر آماری آزمون شود و مشخص شود که آیا رویدادهای متوالی SPI دارای خودهمبستگی مرتبه اول معنی دار هستند یا مستقل از هم می باشند (سونگ و همکارانش، ۱۹۹۳). انطباق یا عدم انطباق زنجیره مارکف بر سری های SPI ایستگاه مورد مطالعه با استفاده از آزمون خبی دو در سطح معنی داری  $\alpha = 0.05$  بررسی گردید (سونگ و همکارانش، ۱۹۹۳). شرط دوم برای استفاده از مدل زنجیره مارکف این است که سری داده های SPI ایستا یا مانا ۵ باشد. سری ما زمانی ایستا خواهد بود که احتمالات انتقالی (تبدیلی) در کل سری تغییر معنی دار نداشته باشند. یک روش آسان برای مشخص ساختن ایستایی این است که کل سری به چند زیر دوره تقسیم شود و احتمالات انتقالی (تبدیلی) در زیر دوره ها با هم مقایسه شوند. به منظور تست ایستایی از آماره ی بتا ( $\beta$ ) استفاده شد. (سونگ و همکارانش، ۱۹۹۳).

$$\beta = 2 \sum_t^{T-1} \sum_{ij} n_{ij}(t) \ln[P_{ij}(t) / P_{ij}] \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه بالا  $T$ ، تعداد زیر دوره ها،  $\sum_{ij} n_{ij}(t)$ ، تعداد حالت های انتقال،  $n_{ij}(t)$ ، تعداد انتقال ها در هر زیر دوره،  $P_{ij}(t)$ ، مقدار احتمالات انتقالی (تبدیلی) در هر زیر دوره و  $P_{ij}$ ، مقدار احتمالات انتقالی در کل سری می باشد. بعد از به

دست آوردن آماره  $\beta$  برای داده‌های هر سری معنی‌داری مقدار به دست آمده آزمون شد. برای انجام آن از آزمون  $X^2$  در سطح معنی‌داری  $\alpha = 0/05$  استفاده شد. در این حالت میزان درجه آزادی ( $df$ ) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$df = (T-1) (m-1) (m)$$

پس از یافتن اطمینان درباره وجود خود همبستگی معنی‌دار مرتبه اول و ایستا بودن داده‌ها ابتدا ماتریس تقاطعی شمارش فراوانی انتقال‌ها تهیه شد. ماتریس مزبور شامل نه حالت انتقال است. جدول شماره ۲ حالت‌های انتقال را نشان می‌دهد. این نه حالت انتقال برای هر یک از ۵ سری SPI (۶، ۹، ۱۲، ۲۴، ۴۸ ماهه) به طور جداگانه شمارش شد.

جدول ۲- ماتریس اولیه‌ی انتقال‌ها ی شرطی

	D	N	W
D	$N_{dd}$	$N_{dn}$	$N_{dw}$
N	$N_{nd}$	$N_{nn}$	$N_{nw}$
W	$N_{wd}$	$N_{wn}$	$N_{ww}$

در این ماتریس حرف D ( $X < -0/99$ ) نشانه خشکسالی، حرف W ( $X > 0/99$ ) نشانه ترسالی و حرف N ( $X < 0/99$ ) به منزله حالت نرمال می‌باشد. برای مثال منظور از  $N_{dd}$  کل تعداد دفعات انتقال از حالت خشکسالی به حالت خشکسالی است. جدول مربوط به حالت‌های انتقال شرطی را می‌توانید در بخش یافته‌های تحقیق مشاهده کنید (جدول ۵).

بعد از شمارش تعداد حالت‌های انتقال شرطی، با استفاده از آن‌ها ماتریس احتمال انتقال هر ۵ سری (یعنی ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه) محاسبه می‌شود (تامپسون، ۱۹۹۲؛ رضیئی و همکارانش، ۱۳۸۶). جدول ۵ ماتریس احتمال انتقال را برای نه حالت مزبور نشان می‌دهد.

جدول ۳- ماتریس احتمال برای ۹ حالت انتقال

	D	N	W
D	$\hat{P}_{dd}$	$\hat{P}_{dn}$	$\hat{P}_{dw}$
N	$\hat{P}_{nd}$	$\hat{P}_{nn}$	$\hat{P}_{nw}$
W	$\hat{P}_{wd}$	$\hat{P}_{wn}$	$\hat{P}_{ww}$

روابط استفاده شده برای محاسبه ی احتمال انتقال نه حالت های شرطی به شرح زیر است: روابط ۳ تا ۱۱

$$\hat{P}_{dd} = \frac{N_{dd}}{N_{dd} + N_{dw} + N_{dn}} \quad \hat{P}_{dn} = \frac{N_{dn}}{N_{dd} + N_{dw} + N_{dn}} \quad \hat{P}_{dw} = \frac{N_{dw}}{N_{dd} + N_{dw} + N_{dn}}$$

$$\hat{P}_{nd} = \frac{N_{nd}}{N_{nn} + N_{nd} + N_{nw}} \quad \hat{P}_{nn} = \frac{N_{nn}}{N_{nn} + N_{nd} + N_{nw}} \quad \hat{P}_{nw} = \frac{N_{nw}}{N_{nn} + N_{nd} + N_{nw}}$$

$$\hat{P}_{wd} = \frac{N_{wd}}{N_{ww} + N_{wd} + N_{wn}} \quad \hat{P}_{wn} = \frac{N_{wn}}{N_{ww} + N_{wd} + N_{wn}} \quad \hat{P}_{ww} = \frac{N_{ww}}{N_{ww} + N_{wd} + N_{wn}}$$

روابط بالا به ترتیب احتمال انتقال از حالت خشک به خشک  $\hat{P}_{dd}$ ، خشک به نرمال  $\hat{P}_{dn}$ ، خشک به تر  $\hat{P}_{dw}$ ، نرمال به خشک  $\hat{P}_{nd}$ ، نرمال به نرمال  $\hat{P}_{nn}$ ، نرمال به تر  $\hat{P}_{nw}$ ، تر به خشک  $\hat{P}_{wd}$ ، تر به نرمال  $\hat{P}_{wn}$  و تر به تر  $\hat{P}_{ww}$  را نشان می دهند. برای نمونه احتمال انتقال SPI نه ماهه از حالت خشک به خشک به صورت زیر خواهد بود (جدول ۶ را مشاهده کنید):

$$\hat{P}_{dd} = \frac{77}{77 + 0 + 27} = 0.74$$

در مرحله بعد با استفاده از مقادیر احتمال انتقال شرطی، احتمال تعادل برای هر یک از حالت های خشکسالی (D)، ترسالی (W) و نرمال (N) محاسبه گردید. روابط (۱۲)، (۱۳) و (۱۴)

$$P_D^* = \frac{P_{dd} + P_{wd} + P_{nd}}{N} \quad P_W^* = \frac{P_{ww} + P_{dw} + P_{nw}}{N} \quad P_N^* = \frac{P_{nn} + P_{dn} + P_{wn}}{N}$$

برای مثال در رابطه (۱۲) که احتمال تعادل دوره خشک محاسبه میشود،  $P_D^*$ ، احتمال تعادل دوره خشک،  $P_{dd}$ ، احتمال انتقال از دوره خشک به یک دوره خشک دیگر،  $P_{wd}$ ، احتمال انتقال از دوره تر به یک دوره خشک،  $P_{nd}$ ، احتمال گذر از یک دوره نرمال به یک دوره خشک و  $N$  تعداد کل احتمالات ممکن از یک حالت به حالت دیگر می باشد. به عنوان نمونه احتمال تعادل دوره خشک برای SPI نه ماهه به صورت زیر خواهد بود (شکل ۳ را مشاهده کنید):

$$P_d^* = \frac{0.74 + 0 + 0.63}{0.74 + 0.26 + 0 + 0.7 + 0.3 + 0 + 0.867 + 0.063 + 0.068} = 0.267$$

برای تعیین تعداد دوره های خشک، تر یا نرمال مورد انتظار در آینده ابتدا باید احتمال وقوع دوره های خشک، تر یا نرمال در سری مورد مطالعه تعیین گردد. اگر محیط در حالت تر یا نرمال باشد و به حالت خشک گرایش پیدا کند خشکسالی روی می دهد و بالعکس، اگر محیط در حالت خشک یا نرمال باشد و به حالت تر گرایش پیدا کند، ترسالی روی می دهد. با این توضیح احتمال رویداد خشکسالی، ترسالی و حالت نرمال به ترتیب از رابطه های (15)، (16) و (17) به دست می آید.

$$P_D = P_N^* \times P_{nd} + P_W^* \times P_{wd} \quad ; \quad P_W = P_N^* \times P_{nw} + P_D^* \times P_{dw} \quad ; \quad P_N = P_D^* \times P_{dn} + P_W^* \times P_{wn}$$

برای نمونه احتمال رویداد خشکسالی و ترسالی برای SPI نه ماهه به صورت زیر خواهد بود:

$$P_D = 0.475 \times 0.63 + 0.259 \times 0 = 0.0299 \quad P_W = 0.475 \times 0.68 + 0.267 \times 0 = 0.32$$

جدول ۴- مقادیر مربوط به احتمال رویداد خشکسالی، ترسالی و حالت نرمال

احتمال رویداد	۶ SPI ماهه	۹ SPI ماهه	۱۲ SPI ماهه	۲۴ SPI ماهه	۴۸ SPI ماهه
$P_D$	۰/۰۴۶	۰/۰۲۹۹	۰/۰۲۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰۵
$P_N$	۰/۱۷۲	۰/۱۴۵	۰/۱۱۵	۰/۰۸۸	۰/۰۴
$N_W$	۰/۰۳۴	۰/۰۳۲	۰/۰۱۸	۰/۰۱۶	۰/۰۱

سپس با داشتن اندازه نمونه که برای سری زمانی SPI در مقیاس ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه به ترتیب ۶۰۳، ۶۰۶، ۶۰۰، ۵۸۸، ۵۶۴ می باشد، با استفاده از روابط (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) تعداد دوره های خشک، تر یا نرمال مورد انتظار تعیین شد:

$$E(D) = P_D \times t$$

$$E(w) = P_W \times t$$

$$E(N) = P_N \times t$$

در رابطه (۱۸)،  $E(D)$ ، امید ریاضی خشکسالی و یا تعداد متوسط خشکسالی های مورد انتظار در دوره مطالعه و  $P_D$  احتمال رویداد خشکسالی (احتمال رفتن از حالت های غیر از خشکی به خشکی) می باشد. با توجه به اینکه



مقدار  $t$  برای  $SPI$  نه ماهه برابر  $603$  می باشد، تعداد دوره های خشک و تر مورد انتظار برای این سری به صورت زیر محاسبه می شود (همچنین شکل ۴ را مشاهده کنید):

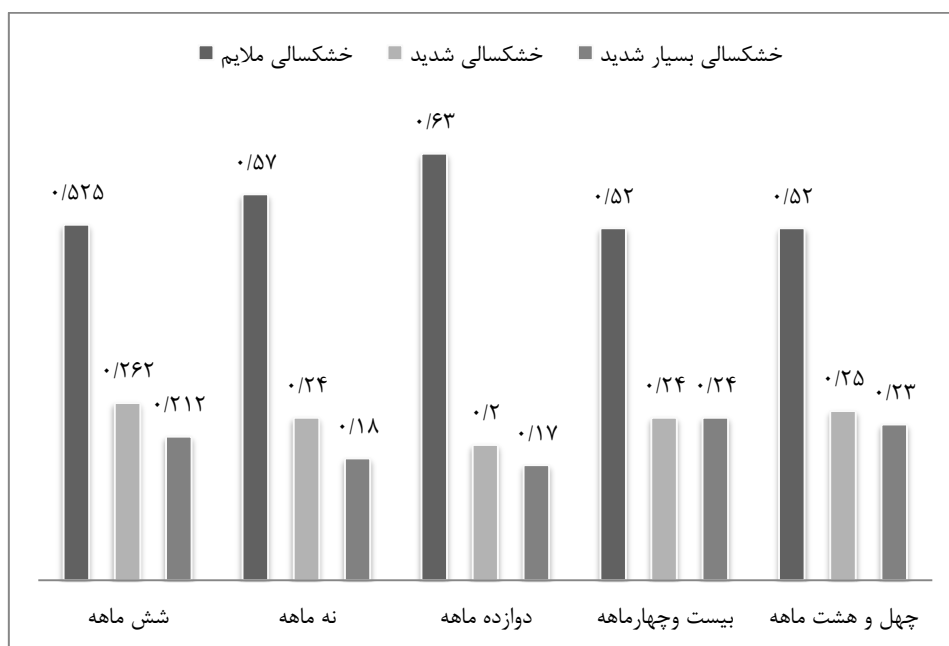
$$E(D) = 0.0299 \times 603 = 18 \quad E(w) = 0.032 \times 603 = 19$$

در پایان با استفاده از روابط زیر میانگین تداوم خشکسالی و ترسالی را برای آینده پیش بینی شد. رابطه (۲۱) و (۲۲)

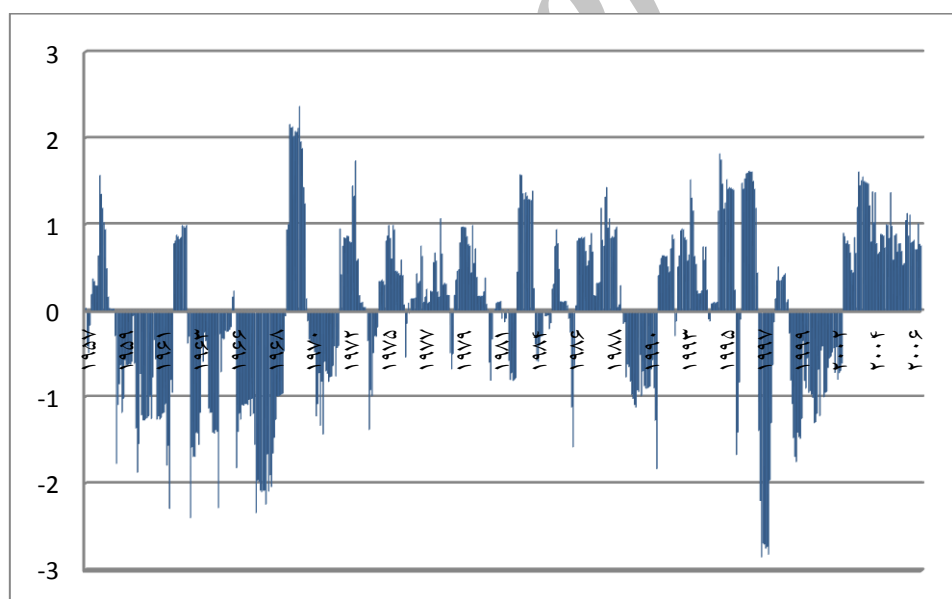
$$E(LD) = \frac{1}{1 - P_{ww}} \quad E(Lw) = \frac{1}{1 - P_{dd}}$$

#### یافته ها

شکل (۱) درصد خشکسالی های ملایم، شدید و بسیار شدید تهران را در مقیاس های زمانی مختلف نشان می دهد. بر اساس این نمودار خشکسالی های ملایم سهم بیشتری را به خود اختصاص داده اند و حداکثر آن ها (۶۳ درصد) در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه بوقوع پیوسته است. مقایسه خشکسالی های بسیار شدید در مقیاس های زمانی متفاوت نشان می دهد که در  $SPI$  بیست و چهار ماهه و چهل و هشت ماهه سهم خشکسالی های بسیار شدید بیشتر بوده است. شدیدترین خشکسالی ها به ترتیب در سالهای ۱۹۹۷ و ۱۹۶۷ و شدیدترین ترسالی در سال ۱۹۶۹ بوقوع پیوسته است. بیشترین تداوم خشکسالی مربوط به رویدادی بوده که از ابتدای سال ۱۹۶۶ شروع شده و تا نیمه اول ۱۹۶۸ تداوم یافته است. اما در بین خشکسالی های بسیار شدیدی که در تهران رخ داده است، رویداد مربوط به سال ۱۹۹۷ از نظر زمانی دارای بیشترین دوام بوده است (شکل ۲). بررسی تداوم زمانی پدیده خشکسالی تهران در مقیاس های مختلف (۶، ۹، ۱۲، ۲۴، و ۴۸ ماهه) نشان دهنده ی این واقعیت است که در مقیاس های زمانی کوتاه تر (برای مثال ۶ و ۹ ماهه) طول دوره های خشکسالی کوتاه، اما تعداد رویدادها زیاد است؛ برعکس در مقیاس های زمانی بلندمدت تر (یعنی ۲۴ و ۴۸ ماهه) از تعداد رویدادها کاسته می شود، لیکن تداوم آن ها افزایش می یابد.



شک ۱- سهم خشکسالی های ملایم، شدید و بسیار شدید در مقیاسهای زمانی متفاوت



شکل ۲- نمودار مقادیر SPI در مقیاس دوازده ماهه

بر مبنای سه حالت تر، خشک و نرمال، ابتدا تعداد حالت های انتقال شرطی برای سری های زمانی SPI در مقیاس زمانی ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ شمارش شد (جدول ۵) و سپس ماتریس های احتمال انتقال برای سری های زمانی SPI

محاسبه شد (جدول ۶). جدول ۶ ماتریس احتمال انتقال سری زمانی SPI را ارائه می نماید. همان گونه که در این جدول مشاهده می کنید، احتمال گذر از یک حالت معین به همان حالت بسیار بالا است و در عوض احتمال گذر از حالت خشک به تر و یا برعکس صفر است. احتمال گذر از حالت خشک به خشک ( $P_{dd}$ )، تر به تر ( $P_{ww}$ ) و نرمال به نرمال ( $P_{nn}$ ) در همه مقیاس های زمانی بیشتر از ۶۰ درصد است. مقایسه نه حالت مزبور در همه مقیاس های زمانی نشان می دهد که احتمال انتقال از حالت نرمال به نرمال ( $P_{nn}$ ) بیش از سایر حالت ها است. احتمال گذر از حالت نرمال به نرمال در SPI ۶ ماهه ۰/۸۴۳ است و در SPI ۴۸ ماهه به ۰/۹۵۶ درصد می رسد. این موضوع بیانگر این است که احتمال قرار گرفتن شهر تهران در شرایط نرمال ( بدون خشکسالی و ترسالی) بیش از دو وضعیت دیگر است. مقایسه حالت  $P_{dd}$  با  $P_{ww}$  بیانگر برتری نسبی حالت خشک نسبت به حالت تر است. مقدار  $P_{dd}$  در اغلب مقیاس های زمانی SPI بیشتر از مقدار  $P_{ww}$  است. در مقیاس های زمانی طولانی تر نیز تعداد رویدادهای خشکسالی بیشتر از رویدادهای ترسالی بوده است. مقادیر مربوط به شمارش حالت های انتقال (جدول ۵) نیز این موضوع را تایید می کند، بدین معنی که در فاصله ی بین سالهای ۱۹۵۶ تا ۲۰۰۶ شهر تهران رویدادهای خشکسالی بیشتری را در مقایسه با ترسالی تجربه کرده است و اقلیم آن تمایل بیشتری برای گذر از حالت نرمال به حالت خشک داشته است. برای مثال در SPI ۶ ماهه تعداد گذر از حالت نرمال به خشک (یعنی  $N_{nd}$ ) ۳۸ مورد بوده است، در حالیکه تعداد گذر از حالت نرمال به تر (یعنی  $N_{nw}$ ) تنها ۲۸ مورد بوده است (جدول ۵ را مشاهده کنید). علاوه بر این هر چه مقیاس زمانی SPI طولانی تر می شود، احتمال رخداد حالت خشک بعد از خشک افزایش نشان می دهد. برای مثال در SPI ۶ ماهه ۶۱ درصد احتمال دارد که بعد از یک رویداد خشک، رویداد خشک دیگری بوقوع پیوندد، در صورتی که همین مقدار در SPI ۴۸ ماهه به ۹۵ درصد می رسد (جدول ۶ را مشاهده کنید).

جدول ۵- مقادیر مربوط به حالت های انتقال شرطی

$N_{dd}$	$N_{dn}$	$N_{dw}$	$N_{ww}$	$N_{wn}$	$N_{wd}$	$N_{nn}$	$N_{nd}$	$N_{nw}$	حالت های انتقال
۶۱	۳۸	۰	۵۶	۲۹	۰	۳۵۵	۳۸	۲۸	SPI ۶ ماهه
۷۷	۲۷	۰	۶۳	۲۷	۰	۳۵۴	۲۶	۲۸	SPI ۹ ماهه
۸۵	۲۲	۰	۶۳	۱۸	۰	۳۷۲	۲۲	۱۸	SPI ۱۲ ماهه
۱۰۰	۱۳	۰	۶۹	۱۶	۰	۳۶۱	۱۳	۱۶	SPI ۲۴ ماهه
۱۰۰	۵	۰	۵۲	۱۱	۰	۳۷۸	۶	۱۱	SPI ۴۸ ماهه

جدول ۶- ماتریس احتمال حالت های انتقال شرطی

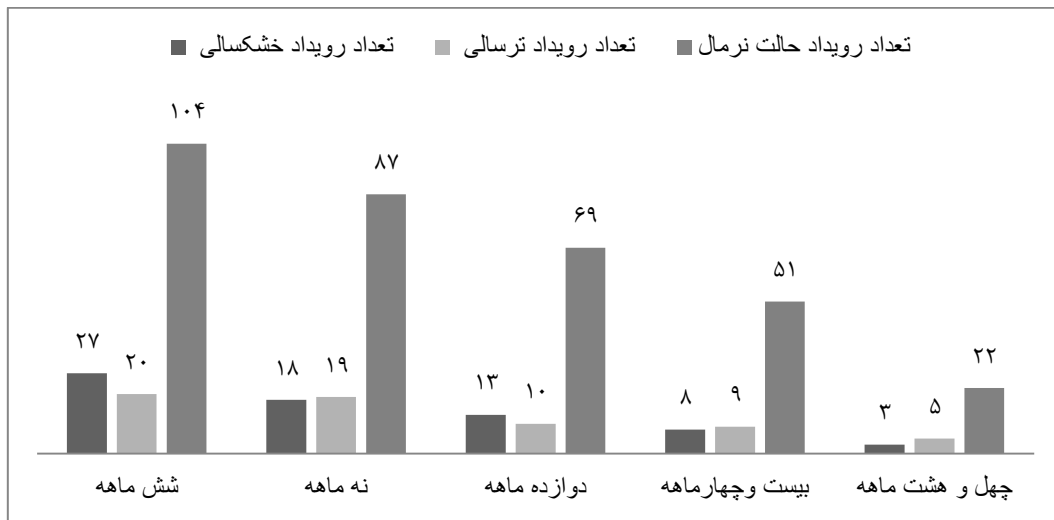
$P_{dd}$	$P_{dn}$	$P_{dw}$	$P_{ww}$	$P_{wn}$	$P_{wd}$	$P_{nn}$	$P_{nd}$	$P_{nw}$	حالت های انتقال شرطی
۰/۶۱۶	۰/۳۸۳	۰	۰/۶۵۸	۰/۳۴۱	۰	۰/۸۴۳	۰/۰۹	۰/۰۶۶	SPI ۶ ماهه
۰/۷۴	۰/۲۶	۰	۰/۷	۰/۳	۰	۰/۸۶۷	۰/۰۶۳	۰/۰۶۸	SPI ۹ ماهه
۰/۸۰۱	۰/۱۹۹	۰	۰/۷۸۷	۰/۲۱۳	۰	۰/۹	۰/۰۵۳	۰/۰۴۳	SPI ۱۲ ماهه
۰/۸۸۵	۰/۱۱۵	۰	۰/۸۱۲	۰/۱۸۸	۰	۰/۹۲۵	۰/۰۳۳	۰/۰۴۱	SPI ۲۴ ماهه
۰/۹۵۲	۰/۰۴۸	۰	۰/۸۲۵	۰/۱۴۳	۰	۰/۹۵۶	۰/۰۱۵	۰/۰۲۷	SPI ۴۸ ماهه

به منظور شناسایی شرایط درازمدت مکان مطالعه مقدار احتمال تعادل برای هر یک از حالت های سه گانه محاسبه گردید. احتمال تعادل بیانگر آن است که هر ایستگاه در درازمدت به طور متوسط چند درصد از زمان را در یک حالت معین باقی خواهد ماند. بدین منظور، احتمال تعادل برای حالت های سه گانه خشکسالی، ترسالی و وضعیت نرمال محاسبه و در شکل ۳ ارائه گردید. ایستگاه تهران بر اساس SPI ۶ ماهه در درازمدت به ترتیب ۰/۲۳۵، ۰/۲۴۱ و ۰/۵۲۲ از زمان را در حالت های خشک، تر و نرمال خواهد بود. مجموع هر سه حالت برابر با یک (۱۰۰ درصد) می باشد. این نمودار نشان می دهد که احتمال تعادل حالت نرمال بیشتر از دو حالت دیگر است و از مقدار آن به سمت SPI بلند مدت تر کاسته می شود. به غیر از مقیاس ۶ ماهه، در تمام مقیاس های زمانی دیگر احتمال تعادل حالت خشک بیشتر از حالت مرطوب است و با حرکت از SPI ۶ ماهه به سمت SPI ۴۸ ماهه احتمال تعادل حالت خشک افزایش قابل توجهی می یابد و این بدان معنی است که در مقیاس زمانی طولانی تر احتمال ماندن در خشکسالی افزایش می یابد و در عوض از احتمال تعادل حالت نرمال کاسته می شود. احتمال تعادل دوره خشک از ۰/۲۳۵ برای SPI ۶ ماهه به ۰/۳۲۲ برای SPI ۴۸ ماهه افزایش یافته است، در حالیکه احتمال تعادل حالت نرمال از ۰/۵۲۲ برای SPI ۶ ماهه به ۰/۳۸۲ در SPI ۴۸ ماهه کاهش داشته است ( شکل ۳). احتمال تعادل وضعیت تر نسبت به دو حالت دیگر در مقیاس های زمانی مختلف تغییر کمتری داشته است. به طور میانگین مکان مطالعه به میزان ۰/۲۸۳ درصد احتمال ماندن در تله خشکسالی را داشته است و در کل احتمال خشکسالی نسبت به ترسالی بیشتر خواهد بود.



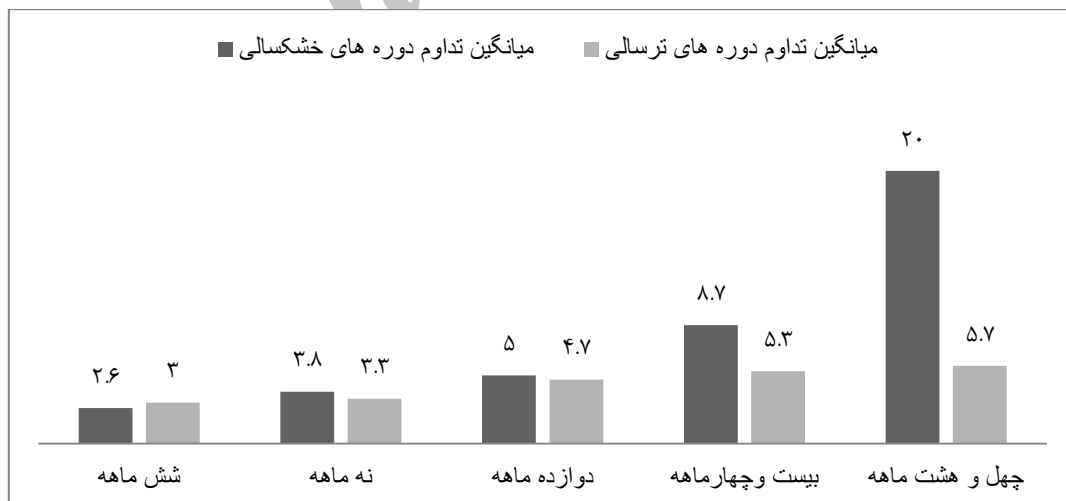
شکل ۳- احتمال تعادل حالت های خشک، نرمال و تر تهران

شکل ۴ تعداد رویدادهای خشک، تر و نرمال مورد انتظار را برای شهر تهران نشان می دهد. این نمودار نشان می دهد که در بیشتر مقیاس های زمانی تعداد دوره های نرمال بیشتر از دوره های تر و خشک و تعداد رویدادهای خشک بیشتر از رویدادهای تر می باشد. حداکثر رویدادهای نرمال، خشک و تر مربوط به SPI ۶ ماهه و حداقل آن ها مربوط به SPI ۴۸ ماهه می باشد. در SPI ۶ ماهه، ۹ ماهه و ۱۲ ماهه تعداد رویدادهای خشک بیشتر از رویدادهای تر بوده است. نکته قابل توجهی که باید به آن اشاره کنیم این است که هر چه مقیاس زمانی ما طولانی تر می شود از تعداد متوسط خشکسالی های مورد انتظار در دوره مورد مطالعه کاسته می شود، لیکن طول دوره های خشکسالی افزایش می یابد. با توجه به اینکه هر چقدر طول دوره های خشکسالی افزایش یابد خسارات شدیدتری وارد می آورد، پیش بینی میانگین تداوم خشکسالی ها اهمیت زیادی در برنامه ریزی برای منابع آب و فعالیت های کشاورزی دارد.



شکل ۴- تعداد رویدادهای خشکسالی، ترسالی و شرایط نرمال مورد انتظار در تهران

شکل ۵ میانگین تداوم دوره های خشکسالی و ترسالی پیش بینی شده را در مقیاس زمانی ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه نشان می دهد. بر اساس نمودار مزبور میانگین تداوم دوره خشکسالی پیش بینی شده برای شهر تهران در مقیاس زمانی ۶ ماهه سه ماه برآورد گردیده است. این مقدار در مقیاس های طولانی تر افزایش یافته و برای مقیاس های ۲۴ و ۴۸ ماهه، به میزان ۵/۳ و ۷ ماه برآورد گردیده است. میانگین تداوم برای دوره های تر نیز مانند دوره های خشکسالی به سمت مقیاس های طولانی تر افزوده می شود. میانگین تداوم دوره تر فقط در مقیاس ۶ ماهه کمتر از دوره خشک برآورد شده است و در مقیاس ۹، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه بر میانگین دوره خشک پیشی گرفته است.



شکل ۵- میانگین تداوم دوره های خشکسالی، ترسالی و نرمال در تهران

### جمع بندی و نتیجه گیری

به طور کلی نتایج حاصل از این پژوهش را می توان به شرح زیر بیان نمود.

در بررسی شدت خشکسالی های شهر تهران مشخص شد که خشکسالی های ملایم سهم بسیار بیشتری را نسبت به سایر خشکسالی ها به خود اختصاص می دهند. شدیدترین خشکسالی ها به ترتیب در سالهای ۱۹۹۷ و ۱۹۶۷ بوقوع پیوسته اند و در میان تمام رویدادهای خشکسالی، طولانی ترین آن ها مربوط به رویدادی بوده که از ابتدای سال ۱۹۶۶ شروع شده و تا نیمه اول ۱۹۶۸ تداوم یافته است. بررسی احتمالات گذر و ماندگاری در سه حالت خشکسالی، نرمال و ترسالی بیانگر این است که احتمال گذر از یک حالت معین به همان حالت (مثلا خشک به خشک یا تر به تر) محتمل تر از گذر به سایر شرایط است. یافته بالا نشانگر وجود خود همبستگی مرتبه یک در سری SPI شهر تهران است یعنی اینکه اگر در حالت خشکسالی باشیم احتمال اینکه در گام بعدی نیز رویداد خشکسالی وقوع یابد بیشتر از این است که حالت نرمال یا ترسالی اتفاق افتد. به طور کلی در میان تمام حالت های انتقال شرطی SPI احتمال انتقال از حالت نرمال به نرمال ( $P_{nn}$ ) بیشتر از سایر حالت ها است. مقایسه حالت  $P_{dd}$  با  $P_{ww}$  بیانگر برتری نسبی حالت خشک نسبت به حالت تر است. مقدار  $P_{dd}$  در اغلب مقیاس های زمانی SPI، بیشتر از مقدار  $P_{ww}$  است. بر اساس شاخص های مورد بررسی، در فاصله ی بین سالهای ۱۹۵۶ تا ۲۰۰۶ شهر تهران رویدادهای خشکسالی بیشتری را در مقایسه با ترسالی تجربه کرده است و اقلیم آن تمایل بیشتری برای گذر از حالت نرمال به حالت خشک داشته است. مقادیر مربوط به احتمال تعادل (شرایط درازمدت ایستگاه در سه حالت خشکسالی، ترسالی و نرمال) در هر یک از حالت های سه گانه نیز موضوع بالا را تایید می نماید. بر این اساس، احتمال تعادل حالت نرمال بیشتر از دو حالت دیگر و احتمال تعادل حالت خشک بیشتر از حالت تر است. هر چه به سمت مقیاس های بلندمدت تر SPI می رویم از احتمال تعادل حالت نرمال کاسته می شود و احتمال تعادل حالت خشک افزایش می یابد، به طوری که احتمال تعادل دوره خشک از ۰/۲۳۵ برای SPI ۶ ماهه به ۰/۳۲۲ برای SPI ۴۸ ماهه می رسد (شکل ۳). تعداد رویدادهای خشک و تر مورد انتظار برای شهر تهران محاسبه گردید. بیشترین تعداد خشکسالی های مورد انتظار مربوط به SPI ۶ ماهه و کمترین آن مربوط به SPI ۴۸ ماهه است. بدین معنی که هر چه مقیاس زمانی SPI طولانی تر می گردد از تعداد متوسط خشکسالی های مورد انتظار کاسته می شود و از سوی دیگر طول دوره های خشکسالی افزایش می یابد. به طور کلی انتظار وقوع پدیده خشکسالی بیشتر از پدیده ترسالی است.

## منابع

- انصاری، ح؛ داوری، ک (۱۳۸۶)، «پهنه بندی دوره خشک با استفاده از شاخص بارندگی استاندارد شده در محیط GIS (مطالعه موردی: استان خراسان)»، *پژوهش های جغرافیایی*، شماره ۶۰، صص ۹۷-۱۰۸.
- بری ابرقویی، ح؛ بداق جمالی، ج؛ توکلی، م (۱۳۸۲)، «کاربرد برخی از شاخص های آماری هواشناسی جهت ارزیابی شدت خشکسالی در مقیاس کشوری (بین استان ها)»، *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، شماره ۶۰، صص ۱۱۷۸۱-۱۱۷۹۹.
- حجازی زاده، ز؛ شیرخانی، ع (۱۳۸۴)، «تحلیل و پیش بینی آماری خشکسالی و دوره های خشک کوتاه مدت در استان خراسان»، *مجله پژوهش های جغرافیایی*، شماره ۵۲، صص ۱۳-۳۱.
- خزایی، م (۱۳۸۰)، «پیش بینی شدت خشکسالی و کمبود جریان - مطالعه موردی: استان کرمانشاه، رودخانه قره سو»، *پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت*.
- خسروی، م؛ اکبری، م (۱۳۸۷)، «بررسی ویژگی خشکسالی های استان خراسان جنوبی»، *جغرافیا و توسعه*، شماره ۵۱، صص ۶۸-۵۱.
- رضیئی، ط؛ دانش کار آراسته، پ؛ اختری، ر؛ ثقفیان، ب (۱۳۸۶)، «بررسی خشکسالی های هواشناسی در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از نمایه SPI و مدل زنجیره مارکف»، *تحقیقات منابع آب ایران*، شماره ۱، صص ۲۵-۳۵.
- یوسفی، ن؛ حجام، م؛ ایران نژاد، پ (۱۳۸۶)، «برآورد احتمالات خشکسالی و ترسالی با استفاده از مدل مارکف و توزیع نرمال (مطالعه موردی قزوین)»، *پژوهش های جغرافیایی*، شماره ۶۰، صص ۱۲۸-۱۲۱.
- Agnew, C, T., (2000), "Using the SPI to identify drought", *Drought Network News*, 12 (1): 29-42.
- Bonaccorso, B., et al. (2003), "Spatial Variability of Drought": An Analysis of the SPI in Sicily, *Water resource Management*, 17: 273- 296.
- Hayes, M, et al. (1999), "Monitoring the 1996 Drought Using the Standardized Precipitation Index", *Bulletin of American Meteorological Society*, 80 (3): 429-438.
- Komoscu, A. U., (1999), "Using the SPI to analyse spatial and temporal pattern of drought in Turkey", *Drought Network News*, 11 (1) : 7-13.



- Lohani, V. K., and Loghanthan. G. V., (1997), "An early warning management using the Palmer Drought Index". *JAWA*, 33 (8) : 1375-1386.
- Mckee, B, T., Nplan,J., Doesken And Kleist,J., (1993), "The relationship of drought frequency and duration to timescale", 8<sup>th</sup>, Conference on Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, CA, pp: 179-184.
- Paulo,A. A., C. Coelho, and Pereira. L.S., (2003), "Drought class transition analysis through markov and log linear model", Proceeding of the 6th Inter-regional Conference on environmental-water, land and water use planning and management, Albacete, Spain.
- Sung-Eui Moon, Sang-Boom Ryoo and Jae-Gi Kwon, (1993), "A Markov chain model for daily precipitation occurrence in South Korea", *International Journal of climatology*,14: 1009-1016.
- Thompson, s., A., (1990), "A Markov and runs analysis of drought in the central United States", *Physical Geography*, 11 (3) : 191-205.
- Wilks, D. S., (1995), "*Statistical method in the atmospheric sciences*", Academic Press, San Diago, California, USA.pp. 467.

Archive of SID