

تحلیل خشکسالی‌های استان تهران با استفاده از شاخص SPI و پیش‌بینی آن براساس

مدل زنجیره مارکوف

علی حنفی* - دانشجوی دکترای اقلیم‌شناسی دانشگاه اصفهان و عضو هیئت علمی دانشگاه امام علی (ع)

فرامرز خوش‌اخلاق - استادیار اقلیم‌شناسی دانشکده جغرافیا دانشگاه تهران

محسن سلطانی - کارشناس ارشد اقلیم‌شناسی دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۸/۱۲ تأیید نهایی: ۱۳۹۱/۰۱/۲۰

چکیده

خشکسالی، پدیده‌ای خزننده است که در اثر کمبود رطوبت محیطی ناشی از کاهش میزان بارش به‌وقوع می‌پیوندد. در بررسی وضعیت خشکسالی‌های استان تهران از داده‌های بارش ماهانه چهارده ایستگاه در دوره آماری (۲۰۰۷-۱۹۷۶) و روش شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، در مقیاس زمانی یک، شش و دوازده ماهه استفاده شد. شدت و تداوم دوره‌های خشک برای هر سه مقیاس تعیین و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتیجه این بررسی نشان داد، با افزایش تداوم از تعداد رخداد‌های خشکسالی کاسته می‌شود و فراوان‌ترین وقایع خشکسالی در تداوم‌های یک تا شش ماهه رخ می‌دهد. همچنین مشخص شد، شدیدترین خشکسالی استان تهران در سال ۱۹۹۵، با ضریب SPI بیش از ۳- بوده، درحالی‌که شدیدترین ترسالی آن در سال ۱۹۸۲، با ضریب SPI بیش از ۲+ رخ داده است. در ادامه از مدل زنجیره مارکوف برای محاسبه احتمالات تعادل دوره‌های مرطوب، خشک و نرمال در SPI سالانه استفاده شد؛ نتایج نشان داد که احتمال تعادل دوره‌های خشک، مرطوب و نرمال در ایستگاه‌های استان به ترتیب ۲۹، ۳۰ و ۴۱ درصد است که این بدین معنی است که در بیشتر مواقع منطقه از نظر اقلیمی در شرایط نرمال قرار دارد؛ درحالی‌که احتمال وقوع شرایط خشک و مرطوب بسیار به هم نزدیک است.

کلیدواژه‌ها: خشکسالی، نمایه SPI، زنجیره مارکوف، پهنه‌بندی، استان تهران.

مقدمه

خشکسالی از پرخسارت‌ترین پدیده‌های محیطی است که در تمام نواحی اقلیمی اعم از مناطق خشک، نیمه‌خشک و مناطق نیمه‌مرطوب رخ می‌دهد؛ درحالی‌که خشکی پدیده‌ای دائمی است که از کاهش غیرمنتظره رطوبت (چه به شکل بارش، رطوبت یا جریان رودخانه‌ای) به‌وجود می‌آید (تامپسون^۱، ۱۹۹۹: ۳۶۲). خشکسالی کمبود رطوبت مبتنی بر کاهش میزان بارش است (خوش‌اخلاق، ۱۳۷۷: ۱۲۰). همه مناطق دنیا به‌طور موقت، اما نامنظم از تکرار شرایط خشکسالی رنج می‌برند، اما این وضعیت در مناطقی که از نظر اقلیمی به‌طور نامنظم توسط سامانه‌های مختلف آب‌وهوایی تحت‌تأثیر قرار می‌گیرند، بیشتر مشاهده می‌شود (رضیئی و همکاران، ۱۳۸۲: ۲۹۲-۳۱۰). خشکی و خشکسالی از ویژگی‌های اجتناب‌ناپذیر و زینبار آب‌وهوایی کشور ایران محسوب می‌شود (شاه‌محمدی و دیگران، ۱۳۸۰: ۶۳). زمان آغاز تا پایان خشکسالی به‌منزله‌ی دوره تداوم خشکسالی خوانده می‌شود که از ویژگی‌های اساسی خشکسالی محسوب می‌شود. برای کاهش اثرات خشکسالی شناخت خصوصیات متعدد خشکسالی مانند زمان شروع، وسعت و شدت خشکسالی ضروری است (دالسیوس^۲ و همکاران، ۱۹۹۱: ۷۵-۸۸).

شاخص SPI^۳ به‌علت سادگی محاسبات، استفاده از داده‌های قابل‌دسترس بارش، قابلیت محاسبه برای هر مقیاس زمانی و قابلیت بسیار زیاد در کمی کردن نتایج، می‌تواند به‌منزله‌ی یکی از مناسب‌ترین شاخص‌ها برای تحلیل خشکسالی به‌ویژه تحلیل مکانی شناخته شود (هایز و همکاران^۴، ۱۹۹۹: ۴۳۷-۴۲۹). ویژگی‌های SPI، این امکان را می‌دهد تا وضعیت منابع آب را برای دهه‌ها و تداوم‌های کوتاه‌مدت که در کشاورزی و مطالعه رطوبت قابل‌دسترسی گیاه مناسب است و نیز مقیاس‌های زمانی بلندمدت که در مطالعه جریان‌های رودخانه‌ای و مخازن آب زیرزمینی دارای اهمیت است مورد مطالعه قرار داد (لوید هوگس^۵ و ساندرس^۶، ۲۰۰۲: ۱۵۹۲-۱۵۷۱). مک‌کی و همکاران^۷ (۱۹۹۳)، برای تعریف و پایش خشکسالی‌ها، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) را معرفی و برای اولین بار آن را در ایالت کلرادو استفاده کردند. خورشیددوست و قویدل‌رحیمی (۱۳۸۴)، فصول خشک و مرطوب بهاره استان آذربایجان شرقی را با استفاده از مدل SPI در مقطع زمانی سه ماهه (فصلی) و سری زمانی مورد واکاوی قرار دادند. بررسی‌های آماری به روش‌های مختلف مانند تحلیل سری‌های زمانی، همبستگی خطی، غیرخطی، مدل‌های ARIMA و استفاده از توزیع‌های آماری شناخته شده مانند توزیع نرمال، گمبل و پیرسون انجام می‌شود. واکاوی سری‌های زمانی معمولاً دو هدف را دنبال می‌کند،

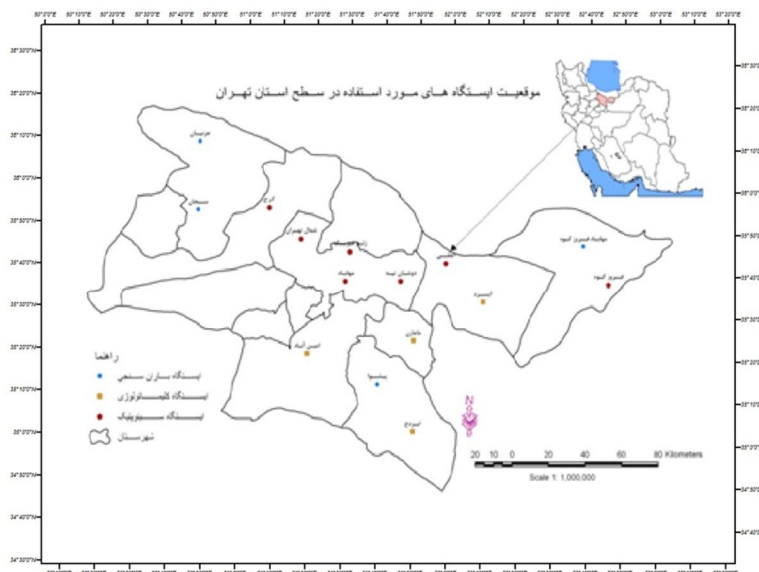
1. Tompson
2. Dalezios
3. Standardized Precipitation Index
4. Hayes et al
5. Loyd – Haghes
6. Saunders
7. Mckee et al

درک و مدل کردن سازوکار تصادفی که منجر به مشاهده سری می‌شود، پیش‌بینی مقادیر آینده سری که برمبنای گذشته آن صورت می‌گیرد (جانانان^۱، ۱۳۷۸: ۹۱). در میان روش‌های آماری، زنجیره مارکف در علوم جوی در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. زنجیره مارکف با روش‌های ساده ریاضی (مانند ضرب ماتریس‌ها) حل احتمالات مربوطه فرآیندهای وابسته را بسیار آسان کرده است. مدل زنجیره مارکف در علوم مختلفی مانند هواشناسی، اقلیم‌شناسی، اقتصاد و صنعت کاربرد وسیعی دارد. آزام و همکاران^۲ (۱۹۹۰)، در برآورد بازده مراتع با استراتژی‌های مختلف بهره‌برداری، از مدل زنجیره مارکف بهره جستند و اثرات بارندگی، تعداد دام و چگونگی چرا را روی محصول مرتعی بررسی کردند. جین و گراوال^۳ (۱۹۹۲)، برای پیش‌بینی محصول نیشکر از مدل زنجیره مارکف استفاده کردند. همچنین الفکی و افرینک^۴ (۱۹۹۶)، برای پیش‌بینی عمق آبهای زیرزمینی در ماه‌های مختلف سال از مدل زنجیره مارکف استفاده کردند. استفاده از مدل‌های سری زمانی برای تحلیل و پیش‌بینی، یکی از روش‌های مناسب به حساب می‌آید. خوش‌اخلاق (۱۳۷۷)، با بررسی‌های الگوهای ماهانه خشکسالی و ترسالی در ایران به روش سینوپتیکی با استفاده از شاخص استاندارد z، به شناسایی دوره‌های خشک و تر پرداخته است. پیش‌بینی خشکسالی‌ها و ترسالی‌های استان مازندران با استفاده از مدل باکس-جنکینز، کاری است که علیجانی و رضانی (۱۳۸۱) انجام داده، نتیجه می‌گیرند که در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۳، در ایستگاه‌های قائم‌شهر و بابل‌سر دوره‌های ترسالی و رامسر و نوشهر دوره خشکسالی رخ می‌دهد. عزیزی و روشن (۱۳۸۱)، با استفاده از مدل سری زمانی هالت-وینترز، به بررسی تغییرات زمانی بارش، تعیین خشکسالی‌ها و امکان پیش‌بینی آنها در استان هرمزگان پرداخته است. ایالات متحده آمریکا از دسته کشورهای است که یک دوره طولانی خشکسالی (۱۹۹۶-۱۹۸۵) را تجربه کرده، در برخی مناطق این کشور خشکسالی در حدود ۶ تا ۷ سال تداوم داشته و خسارت‌های قابل توجه‌ای را به‌وجود آورده است (ویل هایت، ۱۹۹۷: ۶۵۲).

موقعیت جغرافیایی منطقه

استان تهران بین ۳۵ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۶ دقیقه طول شرقی قرار دارد. این استان از شمال به رشته کوه‌های البرز با جهت شرقی-غربی همانند دیواری بلند آن را از همسایگان شمالی آن یعنی گیلان و مازندران جدا می‌کند. شکل شماره (۱)، موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی استفاده شده را نشان می‌دهد.

1. Jonathan
2. Azzam et al
3. Jain and Grawal
4. Elfeki and Uffrink



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان تهران و ایستگاه‌های مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

با توجه به طبقه‌بندی اقلیمی، آب‌وهوای تهران نیمه‌گرم و نیمه‌خشک است؛ به طوری که میانگین بارش سالانه این منطقه حدود ۲۳۰ میلی‌متر و دمای آن حدود ۱۶ درجه سلسیوس است. به‌طور کلی، آب‌وهوای استان تهران تحت تأثیر سامانه‌های جوی مختلف قرار دارد که از مهم‌ترین آنها کم‌فشارهای مدیترانه‌ای و سودانی است. هر قدر فراوانی این سامانه‌ها روی منطقه کمتر باشد، از میزان بارش سالانه کاسته شده، در نتیجه منجر به خشکسالی و کم‌آبی می‌شود (مقدسی و همکاران، ۱۳۸۳: ۲۰۳). مشخصات ایستگاه‌های استفاده‌شده در این پژوهش در جدول شماره (۱) آمده است. برای بررسی و مطالعه دقیق وضعیت پراسنجهای اقلیمی در یک منطقه و شناسایی دوره‌های غیرعادی خشک و مرطوب، شبکه کامل و متراکمی از ایستگاه‌های هواشناسی که دارای آمارهای طولانی‌مدت (حداقل سی‌ساله برای پایش دوره‌های خشک) باشند، نیاز است؛ از این رو، چهارده ایستگاه (۷ ایستگاه سینوپتیک، ۴ ایستگاه کلیماتولوژی و ۳ ایستگاه باران‌سنجی) که دارای سی‌سال آمار بودند از بین ایستگاه‌های مطالعه‌شده انتخاب شدند. بعد از تعیین ایستگاه‌ها، آزمون همگنی داده‌ها از آزمون روان^۱ برای اطمینان از کیفیت داده‌ها و همچنین همگن بودن سری داده‌های ثبت‌شده انجام شد و در موارد نیاز با استفاده از روش وایزی، داده‌ها بازسازی و اصلاح شدند (اقتباس از علیزاده، ۱۳۸۶: ۶۸۲). برای بررسی پدیده خشکسالی در استان تهران سری زمانی شاخص استاندارد شده بارش (SPI) یک، شش و دوازده ماهه و بر مبنای دوره‌ی آماری ۲۰۰۵-۱۹۷۶ بررسی شد.

جدول ۱. مشخصات چهارده ایستگاه منتخب استان تهران

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی (E)	عرض جغرافیایی (N)	سال تأسیس	نوع ایستگاه	ارتفاع (متر)
۱	مهرآباد	۵۱ ۱۹	۳۵ ۴۱	۱۹۵۱	سینوپتیک	۱۱۹۰
۲	کرج	۵۰ ۵۴	۳۵ ۵۵	۱۹۸۵	سینوپتیک	۱۳۱۲
۳	آبعلی	۵۱ ۵۳	۳۵ ۴۵	۱۹۸۳	سینوپتیک	۲۴۶۵
۴	دوشان‌تپه	۵۱ ۵۰	۳۵ ۴۲	۱۹۷۲	سینوپتیک	۱۲۰۹
۵	شمال تهران	۵۱ ۳۷	۳۵ ۴۷	۱۹۸۸	سینوپتیک	۱۵۴۸
۶	ژئوفیزیک	۵۱ ۲۳	۳۵ ۴۴	۱۹۹۱	سینوپتیک	۱۴۱۸
۷	فیروز کوه	۵۲ ۵۰	۳۵ ۵۵	۱۹۹۳	سینوپتیک	۱۹۷۵
۸	آبسد	۵۲ ۰۵	۳۵ ۳۹	۱۹۶۲	کلیماتولوژی	۱۸۰۰
۹	مامازن	۵۱ ۴۱	۳۵ ۲۸	۱۹۶۴	کلیماتولوژی	۱۰۲۱
۱۰	امین‌آباد	۵۱ ۲۸	۳۵ ۳۵	۱۹۶۳	کلیماتولوژی	۱۰۰۰
۱۱	ابردج	۵۱ ۴۸	۳۵ ۱۳	۱۹۸۹	کلیماتولوژی	۹۰۰
۱۲	جزنجان	۵۰ ۴۷	۳۶ ۱۵	۱۹۷۲	باران سنجی	۱۶۵۰
۱۳	سیجان	۵۱ ۰۷	۳۵ ۵۷	۱۹۷۰	باران سنجی	۲۱۰۰
۱۴	پیشوا	۵۱ ۵۱	۳۵ ۲۵	۱۹۶۶	باران سنجی	۹۵۰

یافته‌های پژوهش

پایش خشکسالی با استفاده از نمایه (SPI)

شاخص (SPI)، نمایه‌ای است که از اختلاف بین مقادیر بارش و میانگین آن برای یک بازه زمانی مشخص و سپس تقسیم این مقدار بر انحراف‌معیار بارش به‌دست می‌آید (آسیایی، ۱۳۸۵: ۳۲). مک‌کی و همکارانش (۱۹۹۳)، شاخص بارش استاندارد (SPI) را برای تعریف و نشان دادن خشکسالی به‌وجود آورده‌اند. از نظر ریاضی، SPI براساس احتمالات تجمعی بارش‌های یک ایستگاه استوار است. با توجه به خصوصیات SPI، این نمایه در سراسر دنیا برای پایش دوره‌های خشکی استفاده شده است. شاخص SPI برای کمی کردن کمبود بارش در مقیاس‌های زمانی گوناگون طراحی شده است (آسیایی، ۱۳۸۵: ۴۹). با تجزیه و تحلیل سری زمانی ماهانه داده‌های بارش برای یک مکان، می‌توان SPI را برای هر ماهی نسبت به ماه‌های قبلی مشخص و i هر ماه ۱، ۲، ۳، ...، ۱۲، ...، ۲۴، ...، ۴۸، را با توجه به مقیاس زمانی دلخواه، محاسبه کرد. برای محاسبه این نمایه از تابع توزیع گاما برای برازش داده‌های بلندمدت بارش استفاده می‌شود که پس از انجام محاسبه‌های لازم و تعیین پراسنجهای مربوطه، نمایه SPI به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (آسیایی، ۱۳۸۵: ۵۲):

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

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

که در آن:

$$d_1 = 3.432788 \quad C_0 = 2.535537$$

$$d_2 = 0.189269 \quad C_1 = 0.802852$$

$$d_3 = 0.003208 \quad C_2 = 0.030328$$

در این روابط $C_0, C_1, C_2, d_1, d_2, d_3$ مقادیر ثابت و x احتمال تجمعی است.

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{1+(x)^2} \right]} \quad 0 < H(x) \leq 1 \quad (2)$$

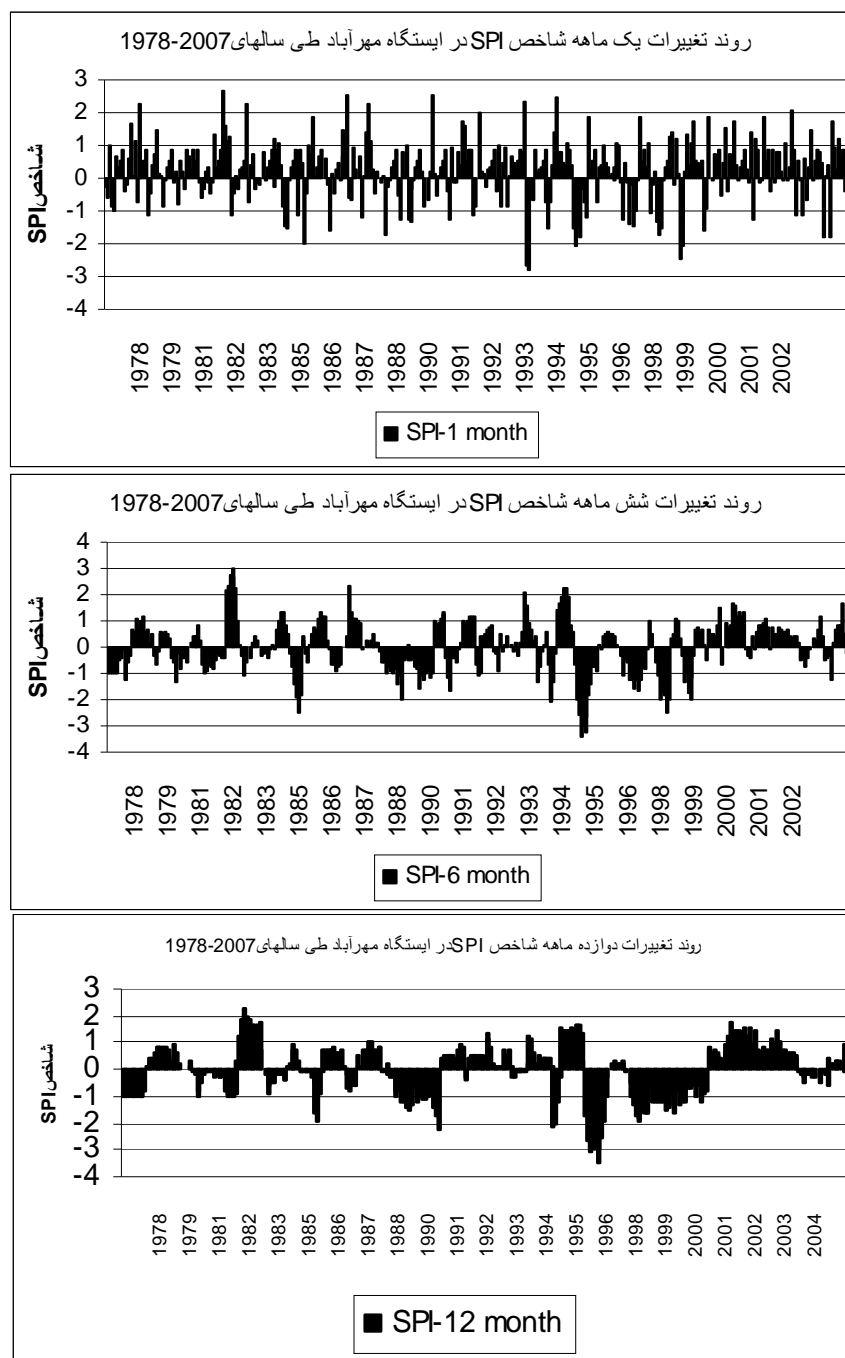
$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{1-(x)^2} \right]} \quad 0.5 < H(x) \leq 1$$

برای طبقه‌بندی خشکسالی و ترسالی براساس شاخص SPI، مطابق جدول شماره (۲)، هرگاه مقادیر SPI به‌طور مداوم منفی باشند و مقدار آن به -۱ یا کمتر برسد، معرف وقوع خشکسالی است و مقادیر مثبت آن نشان‌دهنده خاتمه خشکسالی است (آسیایی، ۱۳۸۵: ۳۲).

جدول ۲. طبقه‌بندی خشکسالی براساس شاخص SPI

طبقه‌بندی شاخص SPI	
ترسالی بسیار شدید	۲ و بیشتر
خیلی مرطوب	۱/۵ تا ۱/۹۹
ترسالی متوسط	۱ تا ۱/۴۹
تقریباً نرمال	۰/۹۹ - ۰/۹۹
خشکسالی متوسط	-۱ تا -۱/۴۹
خشکسالی شدید	-۱/۵ تا -۱/۹۹
خشکسالی بسیار شدید	-۲ و کمتر

SPI استان تهران برای دوره‌های ۱، ۶، و ۱۲ ماهه با اطلاعات بارندگی چهارده ایستگاه منتخب استان محاسبه شد. برای نمونه، تحلیل نقطه‌ای خشکسالی ایستگاه مهرآباد، که دارای حداقل سی سال آماری بوده است، انتخاب و تغییرات شاخص بارش استاندارد (SPI) در این ایستگاه محاسبه شده است که در شکل شماره (۲) تغییرات این شاخص از سال ۱۹۷۸ تا ۲۰۰۷، نشان داده شده است.



شکل ۲. نمودار روند تغییرات نمایه SPI در ایستگاه مهرآباد طی سال‌های ۱۹۷۸ تا ۲۰۰۷

تجزیه و تحلیل خشکسالی تهران

با توجه به آمارهای موجود، متوسط بارش سالانه تهران ۲۴۵ میلی‌متر، با حداکثر ۳۶۸ میلی‌متر در سال ۱۹۸۲ و حداقل ۱۳۹ میلی‌متر در سال ۱۹۹۵ بوده است. همچنین در طی این مدت، دوازده سال بارش کمتر

از میانگین بلندمدت ایستگاه رخ داده است. افزون بر این، میزان استمرار حالت خشکسالی در یک منطقه نیز گویای شدت خشکسالی در همان منطقه است (فرج‌زاده، ۱۳۸۴: ۱۶)؛ بنابراین، مطابق شکل شماره (۲)، شدیدترین خشکسالی استان تهران در سال ۱۹۹۵، با ضریب SPI بیش از ۳- بوده؛ در حالی که بیشترین ترسالی آن در سال ۱۹۸۲، با ضریب SPI بیش از ۲ رخ داده است. از نظر استمرار و توالی خشکسالی، بیشترین تکرار آن در سال‌های (۲۰۰۱، ۲۰۰۰، ۱۹۹۹، ۱۹۹۸) بوده است. از نظر وسعت منطقه‌ای خشکسالی، رخداد خشکسالی می‌تواند بر منطقه‌ای با وسعت چندصد کیلومتر اتفاق افتد ولی به‌صورت مکانی شدت‌ها و دوره تداوم آن می‌تواند در سراسر منطقه یکسان نباشد (فرج‌زاده، ۱۳۸۴: ۱۷). در رابطه با وسعت خشکسالی اتفاق افتاده، سابرامانیام (۱۹۶۷: ۵۱) طبقه‌بندی زیر را از نظر شدت خشکسالی عنوان می‌کند (جدول شماره ۳).

جدول ۳. طبقه‌بندی وسعت خشکسالی از نظر سابرامانیام (۱۹۶۷، ۵۱)

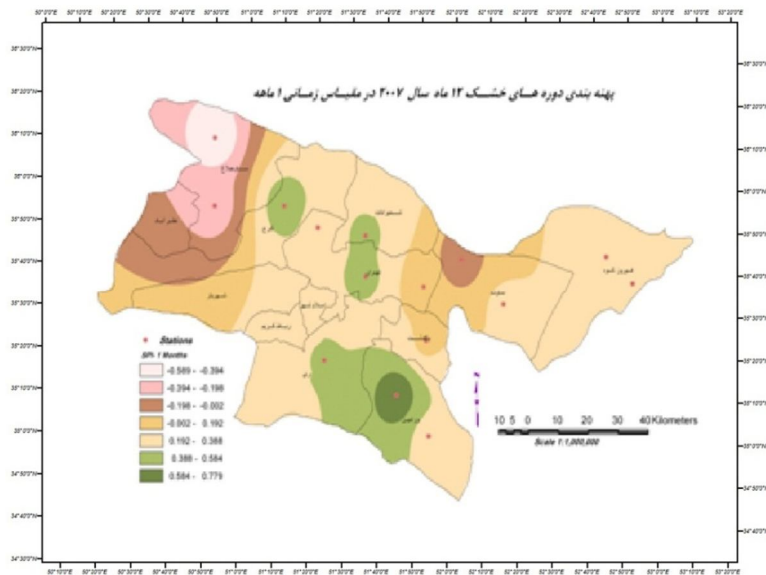
گروه خشکسالی	درصد منطقه تحت تأثیر واقع شده
محلی	کمتر از ۱۰٪
وسیع	۱۱-۲۰٪
بسیار وسیع	۲۱-۳۰٪
فوق العاده	۳۱-۵۰٪
مصیبت بار	بیشتر از ۵۰٪

بنابراین با توجه به طبقه‌بندی سابرامانیام، ۲۱-۳۰٪ از استان تهران در سال ۲۰۰۷، تحت تأثیر خشکسالی قرار داشته که نسبتاً خشکسالی بسیار وسیعی بوده است. شکل شماره (۴) نشان می‌دهد که بیشترین شدت خشکسالی، در نواحی شمال غرب و در عین حال بیشترین ترسالی آن در بخش‌های جنوبی رخ داده است. بعد از محاسبه SPI، برای پهنه‌بندی دوره‌های خشک در استان تهران از شاخص یادشده استفاده شد؛ بنابراین، برای پهنه‌بندی دوره‌های خشک در این پژوهش سعی شد، از روش‌های موجود برای درون‌یابی فضایی و تحلیل فضایی داده‌های مکانی، از مدل میان‌یابی IDW^۱ استفاده شود. در این مدل در یک سطح میان‌یابی اثر یک پارامتر بر نقاط اطراف یکسان نبوده، نقاط نزدیک بیشتر و نقاط دور کمتر تحت تأثیرند و هرچه فاصله از مبدأ افزایش یابد، اثر کمتر خواهد شد (مک‌کوی^۲، جانستون^۳، ۱۳۸۵: ۱۱۰). در این روش پس از مشخص کردن مقادیر شاخص SPI در هر یک از مقیاس‌های زمانی و برای سال ۲۰۰۷، در ایستگاه مهرآباد، مقادیر ارائه‌شده به نقشه وصل و مدل بالا با استفاده از نرم‌افزار ArcMap روی نقشه اعمال شد و نقشه‌های پهنه‌بندی تولید شد، شکل شماره (۳ و ۴).

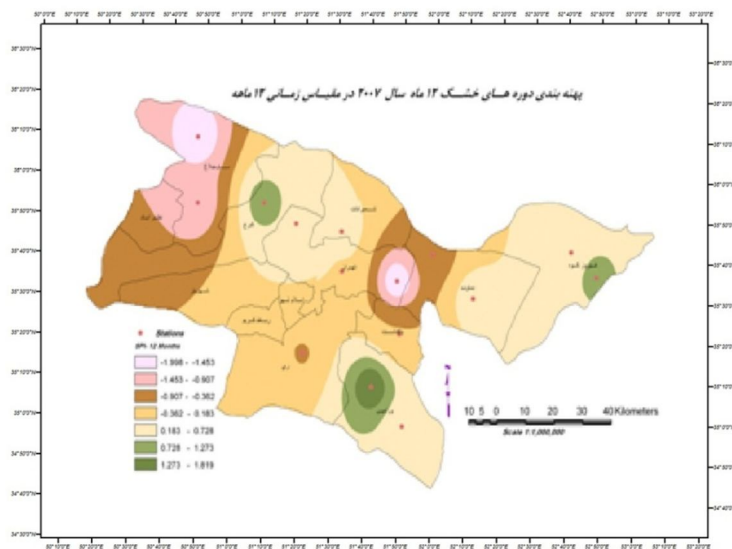
1. Inverse Distance Weighted.

2. McCoy

3. Johnstone



شکل ۳. پهنه‌بندی دوره‌های خشک SPI یک ماهه سال ۲۰۰۷ در استان تهران



شکل ۴. پهنه‌بندی دوره‌های خشک SPI، ۱۲ ماهه سال ۲۰۰۷ در استان تهران

مدل زنجیره مارکف

زنجیره مارکف شکل خاصی از مدل‌هایی است که در آنها حالت فعلی یک سیستم به حالت‌های قبلی آن بستگی دارد و نیز فرایندی تصادفی است با این ویژگی که حالت فعلی سیستم تنها به آخرین حالت قبلی سیستم وابسته است. در تعیین حالت سیستم با استفاده از مدل مارکف باید دو عامل را مشخص کرد. این دو عامل عبارتند از حالت سیستم در زمان مشخص و احتمالات تغییر حالت خاص به حالت‌های ممکن دیگر که اصطلاحاً احتمالات‌گذار نامیده می‌شوند (مؤمنی، ۱۳۷۴: ۱۳۶). اگر مجموعه حالات ممکن در یک زنجیره

مارکف محدود باشد، می‌توان ماتریس مربع P را تشکیل داد که عناصر آن P_{ij} عموماً معرف ماتریس احتمال گذار است.

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2j} & \dots & P_{2m} \\ \vdots & & & & & \\ P_{i1} & P_{i2} & \dots & P_{ij} & \dots & P_{im} \\ \vdots & & & & & \\ P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mj} & \dots & P_{mm} \end{bmatrix}$$

ماتریس احتمال گذار دارای خواص زیر است (میامی، ۱۳۶۴: ۲۷۸-۲۷۷):

الف) برای تمام عناصر ماتریس احتمال گذار داریم:

$$\forall_i, j \quad 0 \leq P_u \leq 1$$

ب) جمع احتمالات گذار از یک حالت به تمام حالت‌های ممکن دوره زمانی بعدی باید برابر یک باشد، یعنی:

$$\sum_{j=1}^k P_u = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, k)$$

ج) اگر P ماتریس احتمال گذار یک زنجیره مارکف باشد، خواهیم داشت:

$$P^{(n)} = P^{(0)} P^{(n)}$$

P^0 ، توزیع آغازین یا توزیع احتمالات اولیه و P^n ، ماتریس احتمال گذار n مرحله‌ای است.

د) در حالت ایستا ضرب بردار حالت در ماتریس گذار برابر بردار حالت خواهد شد که به آن بردار تثبیتی منحصر به فرد گویند (ارشقی، ۱۳۶۷: ۲۲۸-۲۲۵).

$$\pi p = \pi$$

$$\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$$

برای تحلیل زنجیره مارکف، فرض بر این است که مقدار بارش در یک سال معین تنها بستگی به مقدار بارش‌های قبل دارد. با توجه به وضعیت بارش سالانه ایستگاه‌های استان، مقدار آن به سه قسمت خشک، نرمال و مرطوب تقسیم شده است و آستانه‌های هر یک از این سه بخش بر پایه میانگین بارش (\bar{P}) و انحراف معیار (σ) تعیین شد. سپس یک ماتریس 3×3 به نام ماتریس احتمال گذار تشکیل شد که درآیه‌های آن هر یک مربوط به احتمال تغییر وضعیت از حالتی به حالت دیگر است. جدول شماره (۴) ماتریس احتمال منظم گذار زنجیره مارکف را برای SPI سالانه در ایستگاه‌های مختلف استان را نشان می‌دهد که از طریق بررسی‌های عینی و شمارش حالات متناظر معین شده است، به‌منزله‌ی نمونه در ماتریس احتمال منظم گذار زنجیره مارکف در ایستگاه مهرآباد دیده می‌شود که احتمال گذار از حالت خشک به مرطوب بیشتر از بقیه

حالت‌ها و ۴۴٪ است؛ درحالی‌که احتمال گذر از حالت خشک به خشک و خشک به نرمال به ترتیب ۳۳٪ و ۲۲٪ است.

جدول ۴. ماتریس احتمال گذار مقادیر بارش سالانه ایستگاه‌های استان تهران

ایستگاه	مرطوب	نرمال	خشک	حالت	ایستگاه	مرطوب	نرمال	خشک	حالت
مهرآباد	۰/۴۴	۰/۲۲	۰/۳۳	خشک	جزنجان	۰/۳۴	۰/۲۹	۰/۳۷	خشک
	۰/۳۶	۰/۴۵	۰/۱۸	نرمال		۰/۳۰	۰/۳۹	۰/۳۱	نرمال
	۰/۳۳	۰/۴۴	۰/۲۲	مرطوب		۰/۲۵	۰/۴۲	۰/۳۳	مرطوب
کرج	۰/۳۷	۰/۳۴	۰/۲۹	خشک	آبسر	۰/۴۳	۰/۲۶	۰/۳۱	خشک
	۰/۳۳	۰/۴۱	۰/۲۶	نرمال		۰/۳۴	۰/۴۱	۰/۲۵	نرمال
	۰/۲۹	۰/۳۸	۰/۳۳	مرطوب		۰/۳۱	۰/۴۳	۰/۲۶	مرطوب
آبعلی	۰/۳۳	۰/۴۰	۰/۲۷	خشک	مامازون	۰/۳۲	۰/۴۴	۰/۲۴	خشک
	۰/۴۱	۰/۳۰	۰/۲۹	نرمال		۰/۳۶	۰/۳۵	۰/۲۹	نرمال
	۰/۴۳	۰/۳۴	۰/۲۳	مرطوب		۰/۳۹	۰/۲۸	۰/۳۳	مرطوب
دوشان تپه	۰/۳۷	۰/۳۳	۰/۳۰	خشک	امین آباد	۰/۲۳	۰/۳۲	۰/۴۵	خشک
	۰/۲۹	۰/۳۳	۰/۳۸	نرمال		۰/۳۱	۰/۴۱	۰/۲۸	نرمال
	۰/۲۵	۰/۳۱	۰/۴۴	مرطوب		۰/۳۵	۰/۴۳	۰/۲۲	مرطوب
شمال تهران	۰/۳۲	۰/۴۲	۰/۲۶	خشک	ایردج	۰/۳۶	۰/۳۹	۰/۲۵	خشک
	۰/۲۷	۰/۴۱	۰/۳۲	نرمال		۰/۳۸	۰/۴۴	۰/۱۸	نرمال
	۰/۲۴	۰/۳۹	۰/۳۷	مرطوب		۰/۳۱	۰/۴۱	۰/۲۸	مرطوب
ژئوفیزیک	۰/۳۹	۰/۲۴	۰/۳۷	خشک	سیجان	۰/۴۶	۰/۳۱	۰/۳۳	خشک
	۰/۳۱	۰/۲۸	۰/۴۱	نرمال		۰/۳۸	۰/۳۷	۰/۲۵	نرمال
	۰/۲۸	۰/۳۳	۰/۳۹	مرطوب		۰/۳۱	۰/۴۰	۰/۲۹	مرطوب
فیروزکوه	۰/۴۵	۰/۳۱	۰/۲۴	خشک	پیشوا	۰/۳۳	۰/۲۴	۰/۴۳	خشک
	۰/۴۰	۰/۲۸	۰/۳۲	نرمال		۰/۲۵	۰/۳۵	۰/۴۰	نرمال
	۰/۳۶	۰/۲۳	۰/۴۱	مرطوب		۰/۳۴	۰/۳۱	۰/۳۵	مرطوب

همچنین احتمال تعادل ایستگاه‌های مورد مطالعه برای حالت‌های سه‌گانه محاسبه و در جدول شماره (۵) ارائه شده است. بدین منظور، ماتریس احتمال گذار را در عناصر یک بردار فرضی ضرب و برابر بردار بالا قرار می‌دهیم تا عناصر بردار فرضی پیش‌گفته که آنها را بردار منحصربه‌فرد تشبیتی می‌نامند، مشخص شود. این جدول بیانگر آن است که هر ایستگاه در درازمدت، به‌طور متوسط چند درصد از زمان را در یک حالت معین باقی می‌ماند. برای مثال، ایستگاه مهرآباد براساس SPI سالانه، در درازمدت به ترتیب ۲۲، ۴۴ و ۳۴ درصد از زمان را در حالت‌های خشک، نرمال و مرطوب خواهد بود. مجموع سه حالت برابر با یک (۱۰۰٪) است. جدول شماره (۵)، احتمالات وضعیت‌های مختلف اقلیمی در ایستگاه‌های استان تهران را در دوره درازمدت نشان می‌دهد. برای مثال، در ایستگاه سینوپتیک مهرآباد احتمال وقوع شرایط خشک ۲۲٪، شرایط

نرمال ۴۴٪ و شرایط مرطوب ۳۴٪ است. این جدول نشان می‌دهد که به‌طور میانگین، احتمال تعادل دوره‌های خشک، مرطوب و نرمال در ایستگاه‌های منطقه به ترتیب ۲۹، ۳۰ و ۴۱ درصد است که این بدین معنی است که در بیشتر مواقع منطقه از نظر اقلیمی در شرایط نرمال قرار دارد در حالی که احتمال وقوع شرایط خشک و مرطوب بسیار به هم نزدیک است. جدول (۶) تعداد رویدادهای خشک، تر و نرمال مورد انتظار را در ایستگاههای مورد مطالعه نشان می‌دهد. این جدول نشان دهنده این است که در بیشتر ایستگاهها تعداد دوره‌های نرمال، بیشتر از دوره‌های تر و خشک می‌باشد. دوره‌های خشک، مرطوب و نرمال رخ داده در ایستگاههای منطقه دارای تداوم مختلف می‌باشد. برخی از این دوره‌ها کوتاه مدت و برخی بلند مدت می‌باشند که با بررسی سری زمانی نمایه مورد بررسی می‌توان پی برد که در کدامیک از ایستگاهها طول دوره‌های خشک، مرطوب و نرمال بیشتر است.

جدول ۵. احتمالات تعادل دوره‌های مرطوب، خشک و نرمال در SPI سالانه استان

ایستگاه	مهرآباد	کرج	آبعلی	دوشان تپه	شمال تهران	ژئوفیزیک	فیروزکوه
خشک	۲۲٪	۳۶٪	۲۰٪	۳۷٪	۲۷٪	۳۵٪	۱۷٪
نرمال	۴۴٪	۴۰٪	۴۲٪	۳۸٪	۴۱٪	۳۴٪	۴۰٪
مرطوب	۳۴٪	۲۴٪	۳۸٪	۲۵٪	۳۲٪	۳۱٪	۴۳٪
ایستگاه	جزنجان	آبسرده	مامازون	امین آباد	ایرودج	سیجان	پیشوا
خشک	۲۹٪	۳۳٪	۲۶٪	۳۴٪	۳۴٪	۲۹٪	۳۷٪
نرمال	۴۳٪	۳۹٪	۳۷٪	۴۳٪	۳۶٪	۳۵٪	۴۱٪
مرطوب	۲۸٪	۲۸٪	۳۹٪	۲۳٪	۳۰٪	۳۶٪	۲۲٪

جدول ۶. تعداد رویدادهای موردانتظار در SPI سالانه برای ایستگاههای استان

ایستگاه	مهرآباد	کرج	آبعلی	دوشان تپه	شمال تهران	ژئوفیزیک	فیروزکوه
خشک	۱۰	۱۴	۹	۱۶	۹	۱۶	۸
نرمال	۲۵	۲۱	۲۴	۱۹	۲۰	۱۷	۲۳
مرطوب	۱۳	۱۱	۱۵	۱۲	۱۴	۱۳	۲۴
ایستگاه	جزنجان	آبسرده	مامازون	امین آباد	ایرودج	سیجان	پیشوا
خشک	۱۳	۱۴	۹	۱۶	۱۵	۱۲	۱۵
نرمال	۲۲	۱۸	۱۷	۲۶	۱۶	۱۵	۱۹
مرطوب	۱۲	۸	۱۶	۱۲	۱۳	۱۸	۷

بحث و نتیجه‌گیری

از آنجا که وقوع خشکسالی اجتناب‌ناپذیر است، مدیریتی صحیح برای مقابله با این بلای طبیعی و ایجاد یک

سامانه مدیریت ریسک، امری لازم و ضروری خواهد بود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، نمایه SPI ابزاری مناسب برای پایش شرایط خشکسالی در استان تهران قابل‌استفاده است، به طوری که مشخص شد، شدیدترین خشکسالی استان تهران در سال ۱۹۹۵، با ضریب SPI بیش از ۳- بوده؛ در حالی که بیشترین ترسالی آن در سال ۱۹۸۲، با ضریب SPI بیش از ۲ رخ داده است. از نظر استمرار و توالی خشکسالی، بیشترین تکرار آن در سال‌های (۲۰۰۱، ۲۰۰۰، ۱۹۹۹، ۱۹۹۸) بوده است. مطالعه، شناسایی و پیش‌بینی این‌گونه خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها، برای جلوگیری از بروز خسارات و برنامه‌ریزی مناسب امری ضروری به نظر می‌رسد. بدین‌منظور از مدل زنجیره مارکف برای پیش‌بینی استفاده شد. از آنجا که زنجیره مارکف مدلی است که حالت فعلی یک سیستم به حالت‌های قبلی آن وابسته است و با توجه به حالت‌های (خشک و مرطوب) تکرار شده طی دوره آماری سی‌ساله، به نظر می‌رسد، این مدل از دقت و صحت خوبی برخوردار باشد. در ادامه احتمال تعادل ایستگاه‌های مورد مطالعه برای حالت‌های سه‌گانه محاسبه شد و نتایج نشان داد، به طور میانگین، احتمال تعادل دوره‌های خشک، مرطوب و نرمال در ایستگاه‌های منطقه به ترتیب ۲۹، ۳۰ و ۴۱ درصد است که این بدین معنی است که در بیشتر مواقع منطقه از نظر اقلیمی در شرایط نرمال قرار دارد؛ در حالی که احتمال وقوع شرایط خشک و مرطوب بسیار به هم نزدیک است.

منابع

- آذر، ع. و مؤمنی، م. (۱۳۸۵)، **آمار و کاربرد آن در مدیریت**، انتشارات سمت، چاپ دهم، صص ۳۴۶-۳۵۰.
- آسیایی، م. (۱۳۸۵). **شاخص‌های خشکسالی**، انتشارات سخن گستر، چاپ اول.
- ارشقی، ع. (۱۳۶۷). **تئوری و مسائل احتمالات**، تهران: انتشارات نی.
- جاناناتان دی. ک. (۱۳۸۴)، **تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی**، ترجمه حسینعلی نیرومند انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، چاپ سوم.
- چانک ک. ل. (۱۳۶۴)، **نظریه مقدماتی احتمال و فرایندهای تصادفی**، ترجمه ابوالقاسم میامی و محمدقاسم وحیدی اصل، مرکز نشر دانشگاهی، صص. ۲۷۷-۲۷۸.
- خورشیددوست، ع. و قویدل رحیمی، ی. (۱۳۸۴). **مطالعه نوسانات بارش و تعیین و پیش‌بینی فصول مرطوب و خشک بهاره در ایستگاه‌های آذربایجان شرقی**، فضای جغرافیایی، شماره ۱۳، صص ۲۵-۴۷.
- خوش‌اخلاق، ف. (۱۳۷۷). **تحقیق در خشکسالی‌های فراگیر ایران با استفاده از تحلیل‌های سینوپتیکی**، پایان‌نامه دکترای جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تبریز.
- رضیعی، ط؛ ثقفیان، ب. و شکوهی، ع. ر. (۱۳۸۲)، **پیش‌بینی شدت تداوم - فراوانی خشکسالی با استفاده از روش‌های احتمالاتی و سری‌های زمانی (مطالعه موردی استان سیستان و بلوچستان)**، مجله بیابان، جلد ۸، شماره ۲، صص. ۲۹۲-۳۱۰.

- شاه‌محمدی و دیگران. (۱۳۸۰)، تعیین خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها براساس آمار بلندمدت بارندگی‌های سالانه ایران، سی‌دی مقالات همایش بررسی راهکارهای مقابله با بحران آب زابل، صص. ۶۳-۷۰.
- عزیزی، ق. و روشن ع. ا. (۱۳۸۱). بررسی خشکسالی‌ها - ترسالی‌ها و امکان پیش‌بینی آنها با استفاده از مدل سری زمانی هالت - وینترز در استان هرمزگان، پایگاه اطلاعات علمی SID، شماره مقاله ۶۶۱.
- علیجانی، ب. و رضانی ن. ا. (۱۳۸۱) پیش‌بینی خشکسالی‌ها و ترسالی‌های استان مازندران با استفاده از مدل باکس - جنکینز، مجله پژوهش‌های جغرافیایی. ضمیمه اسفند ۱۳۸۱، صص ۱۵۵-۱۶۹.
- علیزاده، ا. (۱۳۸۶)، اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات آستان قدس رضوی، چاپ بیست و دوم، صص. ۶۸۳-۶۸۲.
- فرج‌زاده، م. (۱۳۸۴). خشکسالی از مفهوم تا راهکار، انتشارات سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، چاپ اول، صص. ۱۶-۱۷.
- مؤمنی، م. ۱۳۷۴، پژوهش عملیاتی، چاپ دوم، انتشارات سمت، صص. ۱۳۷-۱۳۵.
- مقدسی م. پایمزد ش. و مرید س. (۱۳۸۳). پایش مکانی خشکسالی سال‌های ۱۳۷۸-۱۳۷۷ تا ۱۳۸۰-۱۳۷۹ استان تهران با استفاده از شاخص‌های DI، SPI، EDI و سیستم اطلاعات جغرافیایی، پایگاه اطلاعات علمی SID، فصلنامه مدرس علوم انسانی، شماره ۱، صص. ۲۲۰ - ۱۹۷.
- مکوی ج. و جانستون ک. ۱۳۸۵، آموزش نرم‌افزار ArcGis، ترجمه محمد میرمحمد صادقی، چاپ اول، تهران: انتشارات فرات.
- Azzam S. A. and nielsen M. 1990. **Markou Chain as shortcut method to stimate age distributions in herds of beff cattle**. Journal of Animal science, No. 68, PP. 5-14
- Dalezios N. R. Papazafiriou Z.G. Papamichail D. M. & Karakostas T. S. 1991, **Drought assessment for the potential of precipitation enhancement in northern Greece**. Theoret. and Applied Climatology, No.44, PP. 75-88.
- Elfeki A. and Uffrink G. 1996, **Stochastic simulation of heterogeneous geological formations using soft info**. Groundwater Quality, Remediation and Protection-Proceeding of an international coference, Prague, Czech Republic 15-18 May.
- Hayes M. J. Svoboda M. D. Wilhite D. A. And Vanyarkho O. V. 1999, **Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index**, Bulletin of the American Meteorologica Society, Vol. 80, No. 3, PP.429-437.
- Jain R. and Grawal R. A., 1992, **Probability model for crop yield forecasting**, Biomet, J, No 34, PP. 501-511.
- Loyd-Haghes B. and Saunders M. 2002, **A drought climatology for Europe**, International Journal of Climatology, No.22, PP.1571-1592.
- Mckee T. B. Doesken N. J. and Kleist I. 1993, **the Relationship of drought frequency and duration to time scales. preprints**, 8th conference on Applied Climatology, 17-22. January, Anaheim, CA, PP. 179-184.
- Subrahamanyam V. p. 1967. **Incidence and spread of cotinental drought**, W.M.O/IHD. Project, Report, No. 2, PP. 1-51.
- Thompson S. A. 1999, **Hydrological for water management**, Ed. Balkema, Rotterdam.
- Wilhite D. A. 1997, **Response to Drought**, Common threads from the past, vision for the future American Water Resources Association. Vol. 33. No. 4. PP. 651-659.