شبیه‌سازی رفتار احتمالی سری زمانی شاخص بارش استاندارد (SPI) با مدل زنجیره مارکف برای هشدار خشکسالی‌های استان فارس

منصور رجبی[۱]، حمیدرضا مرادی*[۲]، منوچهر فرج‌زاده[۳] و جواد بذرافشان[۴]
[۱] دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد آبخیزداری، دانشگاه تربیت مدرس، ایران
[۲] عضو هیات علمي، دانشکده منابع طبیعی, دانشگاه تربیت مدرس، ایران
[۳] عضو هیات علمي، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، ایران
[۴] عضو هیات علمی و دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۸۴/۹/۲۱، تاریخ تصویب: ۸۶/۴/۲)

چکیده

شاخص بارش استاندارد (SPI) به عنوان شاخص منتخب به منظور بررسي خشکسالي‌هاي استان فارس, با استفاده از داده‌هاي بارش ۲۶ ایستگاه واقع در داخل و خارج استان با طول دوره آماري مشترک ۳۲ سال (۷۸-۱۳۴۳) در مقیاس زماني ۱۲ ماهه محاسبه شد. در مرحله بعد با ترکیب مقدار شدت خشکسالي بدست آمده از روش SPI و زنجیره مارکف نسبت به ساخت ماتریس احتمال انتقال و ماتریس ایستایي منطقه اقدام شد. در نهایت وضعیت دراز مدت منطقه از نظر دوام خشکسالي‌ها و نیز طول مدت خشکسالي‌ها در ۱۰ سال آینده پیش‌بیني شد. نتایج نشان داد که در ماتریس احتمال انتقال خشکسالي بیشترین احتمالات در بخش قطري ماتریس دیده مي‌شود که بیانگر پایداري شرایط محیطي مي‌باشد در ماتریس احتمال ایستایي خشکسالي درصد دوره‌هایي که منطقه در دراز مدت در آن باقي مي‌ماند با احتمالاتي که شاخص بارش استاندارد ارائه مي‌دهد هم خواني دارد که نشان‌دهنده توانایي مدل زنجیره مارکف براي هشدار خشکسالي‌هاي استان فارس مي‌باشد.

واژه‌هاي کلیدي: زنجیره مارکف, شاخص بارش استاندارد شده (SPI), هشدار خشکسالي, شبیه سازي, استان فارس

---

* نویسنده مسئول: تلفن: ۰۹۱۲-۳۸۷۵۳۱۱ فاکس: ۰۱۲۲-۶۲۵۳۴۹۹ Email: morady5hr@yahoo.com

مقدمه

مدیریت موفق منابع آب, به منظور چیرگي بر کم آبي, نیازمند درک فرایندهاي ویژه حاکم بر این منابع مي‌باشد. کم‌آبي با عامل‌هاي طبیعي مانند خشکي و خشکسالي یا فعالیت هاي انساني تشدید مي‌شود (۱۰). خشکسالي در این پژوهش به عنوان یک ناهنجاري طبیعي اما موقت در آب قابل دسترس تعریف شده است که داراي ویژگي هایي نظیر بارندگي کمتر از معمول و با فراواني, شدت و مدت نا مشخص مي‌باشد. این پدیده غیر قابل پیش‌بیني بوده یا پیش‌بیني آن بسیار مشکل است.

تعریف‌هاي دیگري از خشکسالي وجود دارد که به‌طور عموم به‌این واقعیت اشاره دارند که خشکسالي در اثر کمبود طبیعي رژیم بارشي ایجاد مي‌شود که مناطق وسیعي را تحت تأثیر قرار مي‌دهد و براي دوره‌هاي طولاني ادامه داشته و براي فعالیت هاي کشاورزي و هیدرولوژیکي اثرات سوء به همراه دارد که‌این نتایج به خاطر شدت و مدت کمبود بارش مي‌باشد. این تعاریف با دیگر مفاهیم هیدرولوژیکي مانند خشکي متفاوت است (۱۰).

پذیرش این نکته مهم است که نبود پیش‌بیني دقیق ویژگي‌هاي خشکسالي, آن را به صورت بلا و مخاطره در آورده است. بلا به‌این خاطر که‌این پدیده با کمبود رژیم بارندگي و منابع آبي متعارف منطقه همراه است که باعث اختلال در اکوسیستم‌هاي طبیعي و کشاورزي و همچنین فعالیت هاي انساني مي‌شود و مخاطره به‌این دلیل که یک واقعه طبیعي غیر قابل پیش‌بیني ولي با دوره بازگشت مشخص مي‌باشد. این طبیعت مصیبت بار و مخاطره انگیز خشکسالي, اهمیت روش هاي پیش‌بیني آن به کمک روش هاي مختلف آماري براي آمادگي به موقع و تخفیف خسارات وارده را نشان مي‌دهد (۹).

خشکسالي را پدیده‌اي خزنده مي‌نامند زیرا به آرامي‌آغاز و به‌طور معمول مدت طولاني پس از وقوع آن در منطقه شناسایي مي‌شوند. مقدار کمبود بارندگي که موجب ایجاد خشکسالي مي‌شود بر حسب حساسیت مشاغل, منابع و گروه‌هاي تحت تأثیر, فرق مي‌کند. این امر باعث مي‌شود که خشکسالي بر اساس دیدگاه‌ها و زمینه کاري محققان مختلف و همچنین بر اساس زمان تداوم خشکسالي به انواع خشکسالي هواشناسي, کشاورزي, هیدرولوژیکي و اقتصادي اجتماعي گروه‌بندي شود (۴). بنابراین, پیش‌بیني زمان شروع و پایان آن بي‌نهایت مشکل مي‌باشد. اما به هر حال پیشرفت‌هاي مهمي در ارتباط با امکان استفاده از برخي شاخص‌ها مانند نوسان‌هاي جنوبي الینو (انسو[1]) و تا حدي نوسان‌هاي اطلس شمالي[2] برای پایش و پیش‌بیني خشکسالي‌ها انجام گرفته است که از آن جمله مي‌توان به پژوهش وگت[3] و سما[4] (۲۰۰۰), اشاره نمود (۱۴). براي توصیف بهتر ویژگي‌هاي خشکسالي لازم است که شاخص‌هاي خشکسالي با روش‌هاي پیش‌بیني و پایش مناسب همراه شوند, در این صورت امکان هشدار خشکسالي وجود خواهد داشت (۱۱), (۱۲). در مورد استفاده از زنجیره مارکف براي هشدار خشکسالي‌ها بررسي‌هایي توسط لوهاني[5] و لوگانتان[6] در سال ۱۹۹۷ صورت گرفت (۶). استین من[7] در سال ۲۰۰۳, فرمول زنجیره مارکف را براي تعیین احتمال ایستایي و احتمال انتقال کلاس‌هاي شدت خشکسالي و همچنین براي مدت و تداوم هر یک از کلاس‌ها در آبخیز رودخانه آپالاچیکولا کاتاهوچي فلینت[8] در جنوب ایالات متحده آمریکا به کار برده و با استفاده از نتایج بدست آمده به تدوین طرح آمادگي فعال در مقابله با پدیده خشکسالي پرداخت

۱- ENSO

۲- NOA:North Atlantic Oscillation

۳- Vogt

۴- Somma

۵- Lohani

۶- Loganthan

۷- Steineman

۸- Apalachicola-Chattahoochee-Flint

(۱۳). پائولوو همکاران[1] در سال ۲۰۰۵ با استفاده از مدل زنجیره مارکف به برآورد کلاس‌هاي متفاوت خشکسالي و مدت زمان لازم براي تغيير مقدار SPI از يک کلاس خشکسالي به کلاس ديگر و تعيين دوره بازگشت براي هر يک از اين کلاس‌ها پرداختند (۹).

استرلينگ[2] (۱۹۸۹) معتقد است که پيش‌بيني بلند مدت خشکسالي بسيار مهم تر از دقت پيش‌بيني است. زيرا در خلال اين فاصله زماني مديران و سياستگزاران مي‌توانند اقدامات و سياست هاي خود را براي تعديل اثرات خشکسالي تکميل کنند. براي مثال در مورد کشاورزي, اگر خشکسالي چند ماه زودتر پيش‌بيني شود کشاورزان اين امکان را مي‌يابند که براي مثال نوع بذر و سامانه کشاورزي خود را براي مقابله با خشکسالي تغيير دهند (۵). هيدرولوژيست ها و هواشناسان مانند يوجوويچ[3] و همکاران (۱۹۸۳), ويلهيت و همکاران[4] (۱۹۸۷) وگت و سما (۲۰۰۰). شاخص‌هايي را توسعه داده اند که وابسته به شاخص‌هاي هيدرو اقليمي يا اعتماد به احتمال وقوع آنها است.

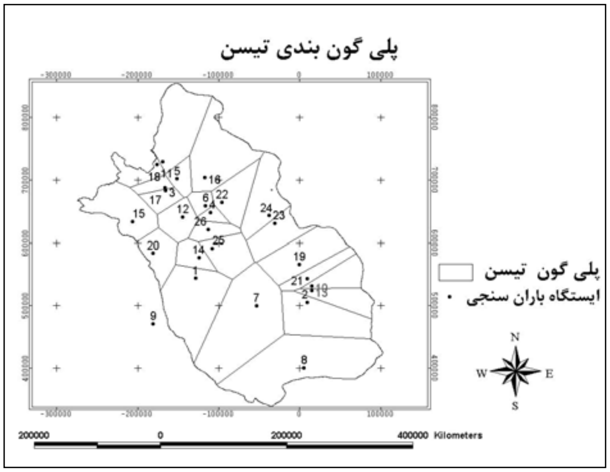
شاخص‌های خشکسالی بر اساس یک یا چند متغییر که به‌طورمعمول برای پایش و ارزیابی خشکسالی‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف استفاده مي‌شود, بنا شده اند. يکي از مهم ترين شاخص‌هاي پايش خشکسالي که توسط مک کي[5] و همکاران (۱۹۹۳) توسعه پيدا کرده و به طور وسيع در کشورهاي مختلف به‌ويژه ايالت متحده آمريکا مورد استفاده قرار مي‌گيرد. شاخص بارش استاندارد (SPI) مي‌باشد (۷). چون در اين شاخص داده‌ها استاندارد مي‌شوند لذا مي‌توان به کمک آن به مقايسه نواحي مختلف اقليمي‌پرداخت (۱).

رفتار احتمالي شمار زماني شاخص بارش استاندارد (SPI) در استان فارس با تأکيد بر انتقال بين حالت‌هاي خشکسالي, ترسالي و معمولي زنجيره مارکف براي هشدار خشکسالي‌هاي استان فارس موضوع اصلي اين پژوهش مي‌باشد.

مواد و روش‌ها

داده‌هاي مورد استفاده

شاخص بارش استاندارد بر اساس داده‌هاي بارندگي ماهانه ۲۶ ايستگاه باران سنجي واقع در داخل و خارج استان با طول دوره آماري مشترک ۳۲ سال (۷۸-۱۳۴۲), در مقياس زماني ۱۲ ماهه محاسبه شد. همچنين درستي و همگني داده‌هاي بارندگي با استفاده از آزمون توالي[6] در کليه ايستگاه‌ها مورد تأييد واقع شد (۳). براي باز سازي داده‌هاي بارندگي ايستگاه‌هايي که همبستگي آنها با ساير ايستگاه‌ها معني‌دار بود از روش همبستگي بين ايستگاه‌ها و براي باز سازي ايستگاه‌هايي که همبستگي معني‌داري با هيچ يک از ايستگاه‌ها نداشته‌اند, از روش نسبت معمولي استفاده شد. موقعيت ايستگاه‌هاي منتخب در شکل ۱ و جدول ۱ آمده است.



شکل ۱- منطقه تحت تأثير هر ايستگاه به روش پلی گون تيسن

۹- Pallou et al.

۱- Easterling

۲- Yevjevich

۳- Wilhite et al.

۴- MacKee

۵- Run Test

موقعیت جغرافیایي منطقه مورد بررسي

استان فارس در جنوب منطقه مرکزي ایران بین مختصات جغرافیایی'۲°۲۷ تا '۴۲°۳۱عرض شمالي و'۴۲°۵۰ تا '۳۶°۵۵ طول شرقی قرار گرفته است (شکل ۱).

وضعیت اقلیمی و رژیم بارشی منطقه مورد بررسي

دو عامل ارتفاع و عرض جغرافیایي در ترکیب با یکدیگر شرایطي را به وجود آورده اند که علاوه بر پیدایش اقلیم هاي متنوع، ریزاقلیم‌هاي ویژه‌اي نیز در فاصله‌هاي بسیار نزدیک به یکدیگر پدید آید.

با وجود اینکه استان فارس در قالب کلي در منطقه نیمه خشک قرار دارد. اما ارتفاعات این استان در تعدیل شرایط آب و هوایي آن نقش به سزایي دارند. بدین لحاظ استان فارس داراي پوشش گیاهي جنگلي و مرتعي قابل ملاحظه‌اي است.

براي تعیین میانگین رژیم بارشي منطقه‌اي استان فارس از داده‌هاي ماهانه ۲۶ ایستگاه باران سنجي مورد بررسي استفاده شد به‌این منظور وزن نقطه‌اي ایستگاه‌هاي باران سنجي به وسیله مساحت نسبي منطقه که تحت تأثیر ایستگاه در روش تیسن قرارمي‌گیرد، محاسبه شد (شکل۱).

مدل احتمالي حالت‌هاي مختلف خشکسالي، تر سالي و معمول شاخص بارش استاندارد (SPI)

شاخص خشکسالي بارش استاندارد شده (SPI)

اساس نمایه بارندگي استاندارد شده (SPI) بر محاسبه احتمال وقوع بارندگي براي هر مقیاس زماني استوار است. SPI، فقط از داده‌هاي بارندگي ماهانه استفاده مي‌نماید و براي تشخیص کمبود میزان بارندگي در مقیاس‌هاي زماني چند گانه (۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه) طراحي شده است. محاسبه (SPI) شامل برازش تابع چگالي احتمال گاما بر توزیع فراواني بارندگي براي یك ایستگاه معین مي‌باشد. تابع معرف احتمالات تجمعي گاما است که از رابطه (۱) به دست مي‌آید (۷).

$$G(x)=\frac{1}{\hat{\beta}^{\hat{\alpha}}\,\Gamma(\hat{\alpha})}\int_{0}^{X} x^{\hat{\alpha}-1}e^{-x/\hat{\beta}}\,dx \qquad (۱)$$

در این معادله: $\hat{\alpha}$ و $\hat{\beta}$ مقادیر بهینه (شاخص شکل)، β شاخص مقیاس، x مقدار بارندگی و $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما مي‌باشد. چون تابع گاما براي x=0 (بارندگي صفر میلیمتر) تعریف نشده است و توزیع بارندگي ممکن است داراي مقادیر صفر باشد، احتمال تجمعي کل که در بر گیرنده مقادیر صفر نیز باشد از رابطه (۲) به دست مي‌آید (۷).

$$H(X)=q+pG(x) \qquad (۲)$$

که در آن q احتمال صفر بودن مقدار بارندگي و p= 1-q مي‌باشد. اگر m تعداد داده هاي بارندگي صفر در سري زماني n تایي باشد آن گاه q از رابطه (۳) به دست مي‌آید.

$$q=\frac{m}{n} \qquad (۳)$$

پس ازمحاسبه احتمال تجمعي کل، مقدار متغیر تصادفي معمول استاندارد هم احتمال با احتمال یاد شده که داراي میانگین صفر و انحراف معیار یك است محاسبه مي‌شود. این مقدار همان نمایه SPI است. میزان Z یا SPI را مي‌توان با استفاده از روابط (۴) و (۷) بر اساس مقادیر محاسبه نمود (۷).

براي $0<H(x)\le 0.5$

$$Z=SPI=-\left[t-\frac{C_0+C_1t+C_2t^2}{1+d_1t+d_2t^2+d_3t^3}\right] \qquad (۴)$$

$$t=\sqrt{Ln\left[\frac{1}{(H(x))^2}\right]} \qquad (۵)$$

و براي $0.5<H(x)<1.0$

$$Z=SPI=+\left[t-\frac{C_0+C_1t+C_2t^2}{1+d_1t+d_2t^2+d_3t^3}\right] \qquad (۶)$$

$$t=\sqrt{Ln\left(\frac{1}{1.0-H(x)^2}\right)} \qquad (۷)$$

جدول ۱- مختصات ایستگاه هاي انتخاب شده به منظور بررسي خشكسالي هاي استان فارس

شماره	ایستگاه	عرض جغرافيايي (لامبرت)	طول جغرافيايي (لامبرت)	ارتفاع (متر)
۱	تنکاب	۵۴۳۶۹۴/۵۰	-١٤٠٣٣٧/۹۲	١٤٥٠
۲	تنگ حسنویه	۵۰۵۴۲۰/۶۲	۳۶۹۰۹/۲۳	١٠٥٠
۳	مروزه	۶۸۳۰۲۴/۳۸	-۱۸۸۱۶۴/۷۷	٢٠٥٠
٤	پل خان (سیوند)	۶۴۷۸۹۷/۰۱	-۱۱۶۹۱۲/۶۴	١٦٠٠
۵	منصور آباد (فارس)	۷۰۱۴۰۰/۸۵	-۱۶۹۷۱۴/۳۳	۱۴۹۰
٦	مهر آباد (رامجرد)	۶۵۸۹۷۹/۹۴	-۱۲۴۴۴۷/۹۶	۱۶۰۰
۷	هواشناسي جهرم	۴۹۹۹۴۴/۶۰	-۴۳۷۳۰/۹۰	١٠٥٠
۸	لار (لارستان)	۴۰۰۸۲۶/۶۵	۳۱۳۸۷/۵۴	۹۰۰
۹	قنطره	۴۷۱۰۶۲/۱۲	-۲۰۷۵۸۰/۷۰	۳۳۰
۱۰	گوزون	۵۳۱۸۵۲/۳۸	۴۳۵۹۲/۵۸	۱۳۰۰
۱۱	جمال بیگ شیرین	۲۹۲۷۸/۱۰	-۱۹۲۰۸۶/۹۶	٢١٥٠
۱۲	قلات شیراز	۶۴۰۷۸۵/۵۳	-۱۶۱۱۰۹/۷۲	١٣٤٩
۱۳	بختاجرد (برگان)	۵۲۴۱۵۱/۱۱	۴۳۶۳۱/۲۸	١١٥٠
١٤	بند بهمن	۵۷۶۶۲۸/۳۴	-۱۳۵۰۷۶/۴۲	۱۷۰۰
١٥	بوشيگان	۶۳۳۴۹۴/۱۴	-۲۳۹۹۳۶/۲۷	۸۲۰
١٦	چهار دانگه	۷۰۴۰۷۷/۰۳	-۱۲۵۸۱۸/۲۵	۲۰۰۰
۱۷	چشمه برغان	۶۸۷۴۳۸/۶۷	-۱۸۹۰۴۰/۱۸	٢٤٠٠
۱۸	چوبخله	۷۲۳۹۶۲/۴۰	۲۰۱۷۰۱/۶۳	٢١٥٠
۱۹	کنه ني ریز (هرگان)	۵۶۵۸۹۱/۸۸	۲۴۱۴۴/۰۶	۲۱۰۰
۲۰	پل شکسته	۵۸۳۳۰۱/۳۸	-۲۰۷۳۲۲/۹۵	٦٩٠
۲۱	درب قلعه	۵۴۲۸۲۷/۸۳	۳۶۷۷۹/۲۲	١٤٥٠
۲۲	دشتبال	۸۳۶۶۴۲۰۱	-۹۸۵۵۰/۱۵	١٦٥٠
۲۳	جهان آباد بختگان	۶۳۰۷۶۰/۸۰	-۱۴۳۹۷/۴۳	١٣٥٥
٢٤	آباده طشك	۶۴۲۸۷۳/۸۸	-۲۳۹۶۸/۰۴	١٦٠٠
٢٥	دوبنه	۵۹۰۶۷۵/۱۲	-۱۱۳۶۹۶/۷۲	١٣٤٩
٢٦	چنار راهوار	۶۲۰۴۴۱/۰۴	-۱۲۰۱۰۱/۶۹	١٦٠٠

ثابت‌هاي معادلات (۴) و (۶) عبارت اند از:

$$d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$$

$$C_0 = 2.515517, C_1 = 0.802853, C_2 = 0.010328$$

طبقه‌هاي مختلف SPI در جدول ۲ نشان داده شده است (۷).

جدول ۲- طبقه‌هاي مختلف شاخص خشكسالي بارش استاندارد

درصد در هر طبقه	طبقه‌هاي	مقادير **SPI**
۱۵/۸۷%	خشكسالي	۱- و كمتر
۶۸/۲۶	معمولي	۱- تا ۱
۱۵/۸۷%	ترسالي	۱ و بيشتر

مدل زنجيره ماركف

زنجيره ماركف فرآيند احتمالي X براي هر زمانt است كه به طور مشروط وابسته به X_0، X_1، X_2 و... X_{t-1}است كه مقـدار X_t را مي‌دهند. احتمال يك مقدار معين (j) است كه وابسته بـه جديد ترين مقدار (X_t) مي‌باشد. كه بيان رياضي آن به شكل رابطه ۸ است (۹).

$$P\{X_{t+1} = j|X_0, X_1, ..., X_t\} = P\{X_{t+1} = j|X_t = i\} \forall i, j \in S, t \in T \quad (8)$$

زنجيره ماركف به وسيله تعدادي از حالت‌هاي (S) و احتمال انتقال بين حالت‌هاي (P_{ij}) مشخص مي‌شود.

احتمال انتقال عبارت اسـت از احتمـال زنجيـره مـاركف در زمان بعدي در حالت j با فرض اين كه در زمان حال در حالت i باشد.

شاخص SPI از مجموع متحرك بارندگي بدست آمـده و هـر مقدار SPI به كلاس خشكسـالي ويـژه‌اي منصـوب مـي‌شـود. كه‌اين امرمطابق ماهيت زنجيره ماركف مي‌باشد (۹).

ماتريس احتمال انتقال $P = [P_{ij}] = P\{X_{t+1} = j|X_t = i\}$ ازنمونه‌ها به وسيله شمارش تعداد زمـان هـايي كـه SPI از حالت i به حالت j، (n_{ij}) تغيير مي‌يابد، مطابق رابطه (۹) تعيين مي‌شود (۱۳).

$$\hat{P} = \frac{n_{ij}}{\sum_j n_{ij}} \quad (9)$$

دقـت بـرآورد مـدل تحـت تـأثير تعـداد نمونـه‌هـا و تعـداد حالت‌هاي قرار مي‌گيرد (۹).

در ايـن پـژوهش بـه منظـور مـدل سـازي از روش تشـكيل ماتريس احتمال انتقال استفاده شده است. بدين ترتيـب اگـر كل حالت هاي در نظر گرفته شده براي يك شاخص محيطي خشكسالي (D)، معمولي (N) و ترسالي (W) باشـد و مـا در حال حاضـر در حالـت خشكسـالي باشـيم، وضـعيت و حالـت محيط در گام بعدي مي‌تواند با در صدي از احتمال هر يك از حالت هاي D، N و W باشد. احتمال ياد شده، احتمال انتقال ناميده مي‌شود و در صورت استفاده از زنجيره ماركف مرتبه ۱ و با توجه به وضعيت موجود به صورت يـك احتمـال شـرطي برآورد مي‌شود. بر اساس مباحث ياد شده، درجـه همبسـتگي ميان حالت‌ها را مي‌توان به كمك احتمـال انتقـال حالـت‌هـا[1] نشان داد.

نكته مهمي‌كه در ساخت اين ماتريس بايد به آن توجه نمود آن است كه مجموع درآيه‌هاي هر سطر بايد معادل يك شـود. درصورتي كه به توان ماتريس انتقال را به تعادل رسانيد يعني احتمال انتقال از همه حالت ها به يك حالت ويژه را به عددي ثابت ميل داد، مي‌توان بـه كمـك ايـن احتمـالات بـه تعـادل رسيده وضعيت سامانه را در دراز مدت پيش بينـي نمـود. بـه ماتريس بدست آمده ماتريس تعادل گفته مي‌شود. تمام سطر هاي ماتريس مزبور يكسـان مـي‌باشـند بـه گونـه‌اي كـه اگـر ماتريس احتمال انتقال يـك مـاتريس ۳ ۳ باشـد، مـاتريس مزبور قابليت تبديل به يك بردار را خواهد داشت. براي بدست آوردن اين ماتريس بايد ماتريس احتمال انتقال را بينهايت بار در خود ضرب نمود (۲). در مورد ايستگاه‌هاي مورد بررسي در اين پژوهش تعداد مراحل ضرب ماتريس احتمال انتقال كمتر از ۳۰ مرتبه بود.

---

[1] State transition probability -

با توجه به نظريه دنباله[١]، اميد رياضي خشكسالي (SPI هاي منفي پايين تر از آستانه) برابر است با حاصل ضرب احتمال رخداد خشكسالى در طول مدت شبيه سازى (٩).

رخداد خشكسالي در طول دوره شبيه سازي

$$E(D) = P_D.t \qquad (١٠)$$

كه در آن: $E(D)$ اميد رياضي خشكسالي و به عبارتي تعداد ميانگين خشكسالي مورد انتظار در دوره شبيه سازي و احتمال رخداد خشكسالي مي‌باشد.

احتمال مورد استفاده در معادله ١١, عبارت از احتمال رفتن از حالت هاي غير خشكسالي به خشكسالي است. بر اين اساس, اگر به عنوان مثال حالت‌هاي مورد بررسي D، N وW و احتمال ايستايي آنها P_D^*، P^{*N} و P_W^* ، واحتمال رفتن از W به D و نيز از حالت N به D در ماتريس احتمال انتقال به ترتيب $P_{W,D}$ و $P_{N,D}$ باشند، به شكل رابطه (١١) بدست مي‌آيد (٢).

$$P_D = P_N{}^*.P_{N,D} + P_W{}^*.P_{W,D} \qquad (١١)$$

حال اگر بخواهيم مدت تداوم خشكسالي را به‌طور ميانگين در آينده پيش‌بيني نماييم، كافي است كه احتمال ايستايي خشكسالي را بر احتمال رخداد خشكسالي حاصل از معادله (١١), تقسيم نمائيم:

$$E(L) = P^*{}_D \,/\, P_D \qquad (١٢)$$

علاوه بر دو مورد ياد شده نتايج ديگري از ماتريس احتمال انتقال و ماتريس احتمال ايستا قابل بر داشت است كه عبارت اند از (٩):

١- قطر ماتريس احتمال انتقال نشان‌دهنده پايداري شرايط محيطي است.

٢- هر كدام از درآيه‌هاي ماتريس تعادل معرف درصد دوره‌هايي است كه منطقه در دراز مدت در آن حالت باقي مي‌ماند.

در نهايت با استفاه از رابطه (١٢), وضعيت دراز مدت منطقه از نظر تعداد دوره‌هاي خشكسالي و مدت تداوم هر دوره در ايستگاه‌هاي مورد بررسي در ١٠ سال آينده پيش‌بيني شد.

نتايج

نتايج بررسي درستي و همگني داده‌ها نشان داد كه داده‌هاي كليه‌ايستگاه‌هاي مورد بررسي در داخل و خارج استان درست و همگن مي‌باشند.

رژيم بارندگي منطقه‌اي استان فارس

با توجه به شكل (٢) بيشترين مقدار بارندگي در طول فصل پاييز و زمستان مي‌بارد. ولي مقدار بارندگي در طول فصل تابستان به شدت كم مي‌شود كه‌اين ويژگي نشان‌دهنده رژيم بارندگي منطقه‌اي استان از نوع مديترانه‌اي مي‌باشد.

ماتريس احتمال انتقال ايستگاه‌هاي باران سنجي

با توجه به روش پژوهش مبادرت به محاسبه ماتريس احتمال انتقال براي ايستگاه‌هاي باران سنجي استان فارس شد كه نتايج آن در جدول (۴) آمده است. همان طور كه در اين جدول مشاهده مي‌شود. بيشترين مقادير احتمال انتقال در قطر ماتريس احتمال انتقال ديده مي‌شود كه اين نشان‌دهنده احتمال باقي ماندن حالت فعلي خشكسالي و پايداري شرايط محيطي مي‌باشد.

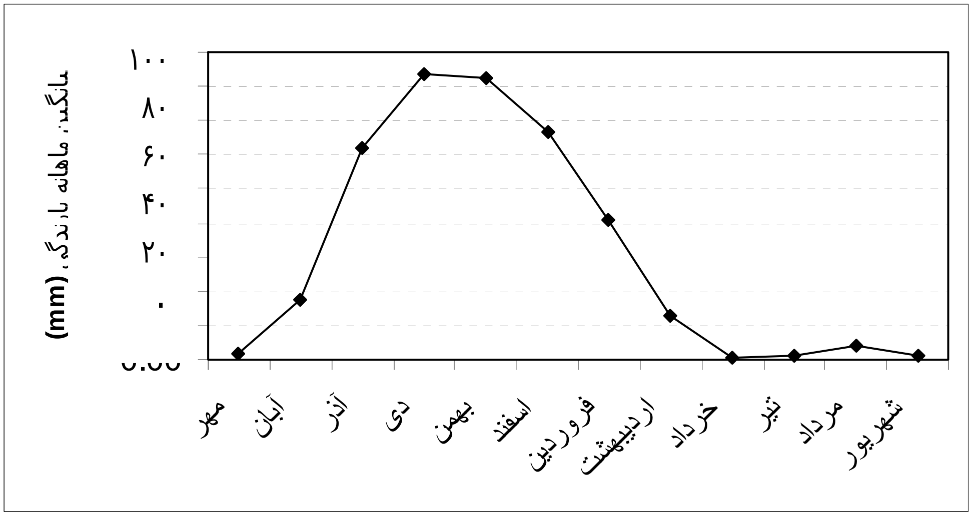
به عنوان نمونه $p_{D,D}$ در ماتريس احتمال انتقال ايستگاه چنار راهوار معادل ٨٢/٧ درصد مي‌باشد. اين امر بدان مفهوم است كه اگر منطقه دچار خشكسالي شد، با احتمال مزبور در حالت خشكسالي باقي خواهد ماند. حال آن كه براي وضعيت ترسالي، شانس باقي ماندن در همان وضعيت $(P_{w,w})$ نيز ٨١/۶ درصد مي‌باشد.

ماتريس احتمال ايستايي ايستگاه‌هاي باران سنجي استان فارس

نتايج ماتريس احتمال ايستايي ايستگاه‌هاي باران سنجي استان فارس در جدول ٣ نشان داده شده است.

٢- RUN

نتایج آزمون t غیر جفتي نشان داد که مقایسه احتمالات ماتریس ایستایي با احتمالات شاخص بارش استاندارد (۷) برای هر سه حالت خشکسالی, ترسالی و معمولي تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارد (جدول ۵).



شکل ۲- نمودار میانگین ماهانه رژیم بارش منطقه ای استان فارس

جدول ۳- ماتریس احتمال ایستایي منطقه مورد بررسي در مقیاس ۱۲ ماهه

ایستگاه	W	N	D	ایستگاه	W	N	D
تنکاب	۰/۱۷۷	۰/۶۶۰	۰/۱۶۳	درب	۰/۱۴۰	۰/۶۸۸	۰/۱۷۲
تنگ حسنویه	۰/۱۴۵	۰/۶۹۶	۰/۱۵۹	دشتبال	۰/۱۷۴	۰/۶۸۸	۰/۱۳۸
پل خان	۰/۱۵۹	۰/۶۶۱	۰/۱۸۰	درب قلعه	۰/۱۴۰	۰/۶۸۸	۰/۱۷۲
مروزه	۰/۱۶۶	۰/۶۴۱	۰/۱۹۳	دوبنه	۰/۱۴۸	۰/۶۹۶	۰/۱۵۶
مهر آباد	۰/۱۸۰	۰/۶۳۸	۰/۱۸۲	کنه	۰/۱۶۴	۰/۶۹۹	۰/۱۳۷
منصور آباد	۰/۱۳۵	۰/۶۹۲	۰/۱۷۳	چوبخله	۰/۲۱۹	۰/۵۸۵	۰/۱۹۶
لار	۰/۱۲۱	۰/۷۲۸	۰/۱۵۱	چنار راهوار	۰/۱۳۲	۰/۷۲۸	۰/۱۴۰
هواشناسي جهرم	۰/۱۲۹	۰/۶۹۵	۰/۱۷۶	چشمه برغان	۰/۱۹۲	۰/۶۱۴	۰/۱۹۳
گوزون	۰/۱۵۳	۰/۶۵۸	۰/۱۸۹	چهار دانگه	۰/۱۱۱	۰/۷۱۴	۰/۱۷۵
قنطره	۰/۱۵۶	۰/۶۷۷	۰/۱۶۷	بوشیگان	۰/۱۴۰	۰/۶۷۴	۰/۱۸۶
قلات شیراز	۰/۱۴۶	۰/۶۹۱	۰/۱۶۳	بند بهمن	۰/۱۰۱	۰/۶۸۲	۰/۲۱۷
جمال بیگ	۰/۱۵۹	۰/۶۲۲	۰/۲۱۹	بختاجرد	۰/۱۷۳	۰/۶۷۹	۰/۱۴۷
جهان آباد	۰/۱۷۲	۰/۶۵۸	۰/۱۷۰	آباده طشک	۰/۱۶۰	۰/۷۳۲	۰/۱۰۸

جدول ۴- ماتریس احتمال انتقال ایستگاه‌هاي منطقه مورد بررسي در مقیاس ۱۲ ماهه

W	N	D			W	N	D		
۰/۰۰۱	۰/۱۵۵	۰/۸۴۵	D	جهان آباد	۰/۰۰۱	۰/۱۰۲	۰/۸۹۸	D	آباده طشک
۰/۰۴۴	۰/۹۱۶	۰/۰۴۰	N		۰/۰۳۰	۰/۹۵۸	۰/۰۱۱	N	
۰/۸۳۱	۰/۱۶۹	۰/۰۰۱	W		۰/۸۶۲	۰/۱۲۱	۰/۰۱۷	W	
۰/۰۰۱	۰/۱۶۹	۰/۸۳۱	D	جمال بیگ	۰/۰۰۱	۰/۱۴۶	۰/۸۵۴	D	بختاجرد
۰/۰۵۱	۰/۸۹۴	۰/۰۵۵	N		۰/۰۴۰	۰/۹۲۹	۰/۰۳۲	N	
۰/۸۰۰	۰/۸۸۳	۰/۰۱۷	W		۰/۸۴۵	۰/۱۵۵	۰/۰۰۱	W	
۰/۰۰۱	۰/۱۷۹	۰/۸۲۱	D	قلات شیراز	۰/۰۰۱	۰/۱۳۶	۰/۸۶۴	D	بند بهمن
۰/۰۵۴	۰/۹۰۴	۰/۰۴۲	N		۰/۰۳۸	۰/۹۱۹	۰/۰۴۳	N	
۰/۷۴۵	۰/۲۵۵	۰/۰۰۱	W		۰/۷۴۲	۰/۲۵۸	۰/۰۰۱	W	
۰/۰۰۱	۰/۱۹۴	۰/۸۰۶	D	قنطره	۰/۰۰۱	۰/۱۵۶	۰/۸۴۴	D	بوشیگان
۰/۰۳۲	۰/۹۲۱	۰/۰۴۸	N		۰/۰۳۱	۰/۹۲۵	۰/۰۴۳	N	
۰/۸۶۲	۰/۱۳۸	۰/۰۰۱	W		۰/۸۴۹	۰/۱۵۱	۰/۰۰۱	W	
۰/۰۰۱	۰/۱۵۴	۰/۸۴۶	D	گوزون	۰/۰۰۱	۰/۱۶۷	۰/۸۳۳	D	چهار دانگه
۰/۰۳۶	۰/۹۲۴	۰/۰۴۰	N		۰/۰۳۰	۰/۹۳۰	۰/۰۴۱	N	
۰/۸۴۵	۰/۱۳۸	۰/۰۱۷	W		۰/۸۱۰	۰/۱۹۰	۰/۰۰۱	W	
۰/۰۰۱	۰/۱۵۰	۰/۸۵۰	D	هواشناسي جهرم	۰/۰۰۱	۰/۱۳۶	۰/۸۶۴	D	چشمه برغان
۰/۰۲۷	۰/۹۳۵	۰/۰۳۸	N		۰/۰۴۷	۰/۹۱۰	۰/۱۴۳	N	
۰/۸۵۷	۰/۱۴۳	۰/۰۰۱	W		۰/۸۴۹	۰/۱۵۱	۰/۰۰۱	W	
۰/۰۰۱	۰/۱۴۰	۰/۸۶۰	D	لار	۰/۰۰۱	۰/۱۷۳	۰/۸۲۷	D	چنار راهوار
۰/۰۲۵	۰/۹۴۹	۰/۰۲۵	N		۰/۰۳۳	۰/۹۳۴	۰/۰۳۳	N	
۰/۸۴۸	۰/۱۳۰	۰/۰۲۲	W		۰/۸۱۶	۰/۱۸۴	۰/۰۰۱	W	
۰/۰۰۱	۰/۱۵۳	۰/۸۴۷	D	منصور آباد	۰/۰۰۱	۰/۱۳۴	۰/۸۶۶	D	چوبخله
۰/۰۳۴	۰/۹۲۷	۰/۰۳۸	N		۰/۰۴۵	۰/۹۱۰	۰/۰۴۵	N	
۰/۸۲۴	۰/۱۷۶	۰/۰۰۱	W		۰/۸۸۰	۰/۱۲۰	۰/۰۰۱	W	
۰/۰۰۱	۰/۱۷۵	۰/۸۲۵	D	مهر آباد	۰/۰۰۱	۰/۱۹۶	۰/۸۴۰	D	کنه
۰/۰۴۱	۰/۹۰۹	۰/۰۵۰	N		۰/۰۳۱	۰/۹۳۴	۰/۰۳۵	N	
۰/۸۵۳	۰/۱۷۴	۰/۰۰۱	W		۰/۸۶۸	۰/۱۱۸	۰/۰۱۵	W	

ادامه جدول ۴- ماتريس احتمال انتقال ايستگاه‌هاي منطقه مورد بررسي در مقياس ۱۲ ماهه

		W	N	D			W	N	D
مروزه	D	۰/۰۰۱	۰/۱۳۶	۰/۸۶۴	درب	D	۰/۰۰۱	۰/۱۳۸	۰/۸۶۲
	N	۰/۰۴۵	۰/۹۱۴	۰/۰۴۱		N	۰/۰۴۲	۰/۹۲۷	۰/۰۳۱
	W	۰/۸۲۵	۰/۱۷۵	۰/۰۰۱		W	۰/۷۹۲	۰/۱۸۹	۰/۰۱۹
پل خان	D	۰/۰۰۱	۰/۰۹۰	۰/۹۱۰	درب قلعه	D	۰/۰۰۱	۰/۱۳۷	۰/۸۶۲
	N	۰/۰۴۵	۰/۹۳۱	۰/۰۲۴		N	۰/۰۴۲	۰/۹۲۷	۰/۰۳۱
	W	۰/۸۱۴	۰/۱۸۶	۰/۰۰۰		W	۰/۷۹۲	۰/۱۸۹	۰/۰۱۹
تنگ حسنويه	D	۰/۰۰۱	۰/۱۶۷	۰/۸۳۳	دشتبال	D	۰/۰۰۱	۰/۱۳۳	۰/۸۶۷
	N	۰/۰۲۳	۰/۹۳۹	۰/۰۳۸		N	۰/۰۴۶	۰/۹۳۱	۰/۰۲۳
	W	۰/۸۹۱	۰/۱۰۹	۰/۰۰۱		W	۰/۸۱۸	۰/۱۶۷	۰/۰۱۵
تنکاب	D	۰/۰۰۱	۰/۱۴۵	۰/۸۵۵	دوبنه	D	۰/۰۰۱	۰/۱۷۰	۰/۸۳۰
	N	۰/۰۳۲	۰/۹۳۲	۰/۰۳۶		N	۰/۰۳۰	۰/۹۳۵	۰/۰۳۴
	W	۰/۸۸۱	۰/۱۱۹	۰/۰۰۱		W	۰/۸۵۷	۰/۱۲۵	۰/۰۱۸

جدول ۵- آناليز واريانس مقايسه احتمالات ماتريس ايستايي با احتمالات شاخص بارش استاندارد

حالت‌هاي مورد مقايسه	t	F	P_{Sig}
ترسالي (W)	-۰/۰۷	۴/۵	۰/۹۴ ^{ns}
معمولي (N)	-۰/۴۹	۵/۴	۰/۶۳ ^{ns}
خشکسالي (D)	۰/۸۱	۴/۵	۰/۴۶ ^{ns}

ns: معني‌دار نبودن مقايسه احتمالات

برآورد تعداد دوره و دوام خشکسالي‌ها در منطقه مورد بررسي

با استفاده از رابطه ۴ تعداد دوره‌هاي خشکسالي و مدت دوام هر دوره در ايستگاه‌هاي مورد بررسي در ۱۰ سال آينده به شرح جدول ۶ بر آورد شده است, همان‌طور که ديده مي‌شود, بيشترين فراواني خشکسالي‌ها در ايستگاه بند بهمن و کمترين آنها در ايستگاه آباده طشك ديده مي‌شود. از نظر تداوم خشکسالي‌ها, بيشترين آنها در ايستگاه پل خان و کمترين آنها در ايستگاه کنه ني ريز ديده مي‌شود.

جدول ۶- برآورد تعداد دوره و دوام خشکسالي‌ها در منطقه مورد بررسي در مقیاس ۱۲ ماهه

ایستگاه	تعداد دوره‌هاي خشکسالي	تداوم	ایستگاه	تعداد دوره‌هاي خشکسالي	تداوم
تنکاب	۱۹/۵۶	۶/۸۸	درب	۲۰/۶۴	۷/۲۵
تنگ حسنویه	۱۹/۰۸	۶/۰۰	دشتبال	۱۶/۵۶	۷/۵۰
پل خان	۲۱/۶۰	۱۱/۱۸	درب قلعه	۲۰/۶۴	۷/۲۵
مروزه	۲۳/۱۶	۷/۳۴	دوبنه	۱۸/۷۲	۵/۸۹
مهر آباد	۲۱/۸۴	۵/۷۳	کنه ني ریز	۱۶/۴۴	۵/۱۱
منصور آباد	۲۰/۷۶	۶/۵۶	چوبخله	۲۸/۲۰	۷/۴۵
لار	۱۸/۱۲	۷/۱۶	چنار راهوار	۱۶/۸۰	۵/۷۸
هواشناسي جهرم	۲۱/۱۲	۶/۶۷	چشمه برغان	۲۳/۱۶	۷/۳۳
گوزون	۲۲/۶۸	۶/۵۰	چهار دانگه	۲۱/۰۰	۶/۰۰
قنطره	۲۰/۰۴	۵/۱۷	بوشیگان	۲۲/۳۲	۶/۴۰
قلات شیراز	۱۹/۵۶	۵/۶۰	بند بهمن	۲۶/۰۴	۷/۳۸
جمال بیگ	۲۶/۲۸	۵/۹۲	بختاجرد	۱۷/۶۴	۶/۸۶
جهان آباد	۲۰/۴۰	۶/۴۵	آباده طشک	۱۲/۹۶	۹/۸۱

بحث

در ماتریس احتمال ایستایي خشکسالي, درصد دوره‌هایي که منطقه در دراز مدت در آن باقي مي‌ماند در بیشتر ایستگاه‌ها با احتمالاتي که شاخص بارش استاندارد ارائه مي‌دهد هم خواني دارد که نشان‌دهنده توانایي مدل زنجیره مارکف براي هشدار خشکسالي‌ها مي‌باشد پا ئولو و همکاران (۲۰۰۵) نیز در بررسي‌هاي خود در مکان‌هاي مختلف النتجو[1] در جنوب پرتقال به چنین نتایجي دست یافتند (۹).

بیشترین احتمال انتقال خشکسالي در بخش قطري ماتریس احتمال دیده مي‌شود که‌این نشان‌دهنده پایداري شرایط محیطي مي‌باشد که این مطلب در بررسي‌هاي استین من در آبخیز رودخانه آپالاچیکولا کاتاهوچي فلینت در جنوب آمریکا (۲۰۰۳) نیز به اثبات رسید (۱۳).

در دراز مدت بیشترین فراواني خشکسالي‌ها در ایستگاه بند بهمن و کمترین آنها در ایستگاه آباده طشك دیده مي‌شود از نظر تداوم خشکسالي‌ها بیشترین آنها در ایستگاه پل خان و کمترین آنها در ایستگاه کنه ني‌ریز دیده مي‌شود.

با توجه به نتایج بدست آمده در این پژوهش پیشنهاد مي‌شود که از نتایج این پژوهش در برنامه‌ریزي‌هاي آتي این

---

[1] ۱- Alentejo

استان و مناطق مشابه استفاده شود. همچنین اگر نتایج بدست آمده از مدل زنجیره مارکف با داده‌هاي واقعي يا تاريخي رطوبت خاک, سطوح ذخیره‌اي و جریان‌هاي رودخانه‌اي ترکیب شود روش خوبي براي پايش و هشدار خشکسالي‌ها خواهد بود و نتایج بدست آمده از آن کمک خوبي براي مديران و سياستگزاران در مديريت منابع آب خواهد بود.

منابع

۱- رجبي, منصور, حميد رضا مرادي و منوچهر فرج زاده, ۱۳۸۴. بررسي ارتباط بين شدت, مدت و فراواني خشکسالي‌هاي هواشناسي در استان فارس. کنفرانس بين المللي مخاطرات زمين بلاياي طبيعي و راهکار هاي مقابله با آنها. دانشگاه تبريز. ۵ تا ۷ مهر ماه ۱۳۸۴.

۲- رضيئي, طيب, عليرضا شکوهي, بهرام ثقفيان, ۱۳۸۲ پيش‌بيني شدت, تداوم و فراواني خشکسالي با استفاده از روشهاي احتمالاتي و سري هاي زماني (بررسي موردي استان سيستان و بلوچستان). مجله بيابان ۸ (۲): ۳۲۷-۳۳۹.

۳- مهدوي, محمد, ۱۳۸۰. هيدرولوژي عمومي. موسسه فرهنگي و انتشاراتي آيه, ص ۲۵۲.

4- Cordery, I & McCall, M, 2000. A model for forecasting drought from teleconnections. Water Resour. Res. 36: 763-768.

5- Easterling, W.E, 1989. Coping with drought hazard: recent progress and research priorities. In: Siccardi, F., Bras, R.L. (Eds.), Natural Disasters in European Mediterranean Countries. US National Science Foundation/ National Research Council of Italy, Perugia, 231-270.

6- Lohani, V.K., Loganathan, G.V, 1997. An early warning system for drought management using the Palmer drought index. J. Am. Water Res. Assoc. 33 (6): 1375-1386.

7- Mckee, T.B., Doesken, N.J & Kleist, J, 1993. The relationship of Drought frequency and duration to time scale. In: Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Boston, 179-184.

8- Mckee, T.B., Doesken, N.J & Kleist, J, 1995. Drought monitoring with multiple time scales. In: Ninth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Boston, 233-236.

9- Paulo, A.A., Ferreira, E., Coelho, C. & Pereira, L.S, 2005. Drought class transition analysis through Markov and Log linear models, an approach to early warning. Agriculter Water management. (77): 59-81.

10- Pereira, L.S., Cordery, I & Iacovides, I, 2002. Coping with Water Scarcity. UNESCO IHP VI, Technical Documents in Hydrology no. 58, UNESCO, Paris, 267 pp

11- Rossi, G, 2003. Requisites for a drought Watch system. In: Rossi, G., Cancelliere, A., Pereira, L.S., Oweis, T., Shatanawi, M., Zairi, A. (Eds.), Tools for Drought Mitigation Mediterraean Regions. Kluwer, Dordrecht, 147- 157.

12- Sivakumar, M. V. K & Wilhite, D.A, 2002. Drought preparedness and drought management. In: Drought Mitigation and Prevention of Land Desertification (Proc. Intern. Conf., Bled, Slovenia). UNESCO/Slov. Nat. Com. ICID, Ljubljana (CD-ROM paper 2).

13- Steinemann, A., 2003. Drought indicator and triggers: a stochastic approach to evaluation. J. Am. Water Res. Assoc. 39 (5): 1217-1233.

14- Vogt, J.V & Somma, F. (Eds.), 2000. Drought and Drought Mitigation in Europe. Kluwer, Dordrecht.

15- Wilhite, D.A., Easterling, W.E & Wood, D.A, 1987. planning for Drought. Toward a Reduction of Societal Vulnerability. West Press, Boulder, London.

16- Wilhite, D.A & Glantz, M.H, 1987. Understanding the drought phenomenon: the role of definition. In: Wilhite, D.A., Easterling, W. E., Wood, D.A. (Eds.), Planning for Drought. Vestview Press, Boulder, CO, 11-27.

17- Yevjevich, V, 1967. An Objective Approach to Definitions and Investigations of Continental Hydrologic Drought, Hydrology Paper no. 23, Colorado State University, Fort Collins, CO.

18- yevjevich, V., Cunha , L.V & Vlachos, E (Eds.), 1983. Copping with Drought. Water Resources Publication, Littleton, Co.

Simulation of SPI Time Series Stochastic Behavior by Using Markov Chain Model for Early Warning of Fars Province Drought

M. Rajabi*[1], H. R. Moradi[2], M. Farajzadeh[2], J. Bazrafshan[3]
[1] M. Sc. Graduate, Tarbiat Modares University, I. R. Iran
[2] Faculty Member, Tarbiat Modares University, I. R. Iran
[3] Faculty Member, University of Tehran, I. R. Iran
(Received 12 December 2005, Accepted 23 June 2007)

Abstract

The standard precipitation index (SPI) as a selected index was computed based on the same period in 32 years (1343-78) in the time scale of 12 months for 26 stations located inside and outside of Fars Province. In the next stage, drought severity data resulting from SPI method was combined with Markov chain, and a probability transition matrix and steady matrix of region were developed. Ultimately, region long term condition in terms of drought duration and severity was predicted for coming 10 years. The result showed that in probability transition matrix of drought, highest probability was observed in diagonal part of matrix indicating the stability of environmental condition. In probability steady matrix of drought, the percentage of the periods persisting fr long term is similar to the probabily shown by SPI, indicating Markov chine model capability of predicting draoughts and disemminating warnings in advance in Fars Province.

Keywords: Makov chain, Standardized Precipitation Index (SPI), Early warning, Simulation, Fars province

---

* Corresponding author: Tel: 0912-3875311 , Fax: 0122-6253499 E-mail: morady5hr@yahoo.com