

مجله‌ی جغرافیا و توسعه‌ی ناحیه‌ای، شماره‌ی یازدهم، پاییز و زمستان ۱۳۸۷

دکتر امین علیزاده
دکتر حسین انصاری
سارا ارشادی (نویسنده اصلی)
شادی آشگر طوسی

پایش و پیش‌بینی خشکسالی در استان سیستان و بلوچستان

چکیده

خشکسالی کشاورزی در ایران به عنوان یک فاجعه‌ی طبیعی برای تمام مردم، به ویژه کشاورزان، شناخته شده است. هرچند از وقوع خشکسالی نمی‌توان جلوگیری کرد، اما اگر ماهیت و خصوصیات آن مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد، می‌توان نسبت به پیش‌بینی آن امیدوار بود و با آمادگی از اثرات زیان‌آور آن کاست. در این نوشتار استان سیستان و بلوچستان با توجه به داشتن شرایط خاص اقلیمی، از نظر پدیده‌ی خشکسالی، مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، پایش و پیش‌بینی خشکسالی استان سیستان و بلوچستان، با استفاده از الگویی که بر اساس شاخص SPI و درصد از نرمال و زنجیره‌ی مارکف تهیه شده، انجام گرفته است. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد که منطقه‌ی مورد مطالعه نسبت به خشکسالی‌های میان‌مدت و کوتاه‌مدت حساس است و بیشتر خشکسالی‌هایی که در این منطقه اتفاق افتاده است، خشکسالی ملایم و متوسط است و احتمال وقوع پدیده‌ی خشکسالی در مناطق مرکزی استان بیشتر است. **کلیدواژه‌ها:** خشکسالی، SPI، شاخص درصد از نرمال، زنجیره مارکف، سیستان و بلوچستان

۱. درآمد

یکی از مظاهر طبیعی متأثر از وضعیت آب و هوا، خشکسالی است. به گونه‌ای که کاهش یا افزایش تأثیریک یا چند عامل از عوامل اقلیمی موجب پیدایش این پدیده می‌شود. خشکسالی کشاورزی در ایران به عنوان یک فاجعه‌ی طبیعی برای تمام مردم، به ویژه کشاورزان، شناخته شده است (ارشادی، ۸۶).

تاریخ دریافت: ۸۶/۴/۴ تاریخ تصویب: ۸۷/۳/۲۵

کارهای اولیه در خصوص پایش عمدتاً با تحلیل فراوانی منطقه‌ای خشکسالی در مقیاس کوچک آغاز شد (Whipple, 1966) و سپس توسط سایر محققین برای ایالاتی از آمریکا، که بیشتر در معرض خشکسالی بودند، مانند ایالات غرب و جنوب غربی دنبال شد (Olapido, 1986; Sen, 1980). هیز و همکاران (Hayes et al., 1998) خشکسالی گسترده سال ۱۹۹۶ در سطح آمریکا را با استفاده از شاخص SPI پایش نمودند. نقشه‌ها گونه‌ای تهیه شد که وضعیت عمومی هر کدام از ایالات به طور یکجا تعیین و نهایتاً نقشه‌ی کل کشور تهیه شد. رضیئی و همکاران (۱۳۸۲) نیز پدیده‌ی خشکسالی را در استان‌های اصفهان و یزد با استفاده از شاخص SPI و برای دوره‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه برای سال‌های ۱۹۹۸ و ۱۹۹۹ مورد مطالعه قرار دادند.

پیش‌بینی خشکسالی پر از مشکلات و مسائل خاص است. به طور کلی، روش‌هایی را که توسط آنها می‌توان پیش‌بینی‌هایی برای رخداد‌های آتی خشکسالی نمود، روش‌های آماری، آماری-فیزیکی، سنجش از دور و سینوپتیکی هستند. آنچه در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، کاربرد روش آماری زنجیره مارکف است

گابریل و نیومن (۱۹۶۲)^۱ اولین کسانی بودند که از یک زنجیره مارکف مرتبه‌ی اول برای تعیین احتمال وقوع بارندگی روزانه در تلاویو^۲ استفاده کردند. اوچلا و همکاران (۲۰۰۳)^۳، از الگوی زنجیره مارکف مرتبه‌ی اول برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی دوره‌های خشک و تر روزانه در کنیا استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از الگوی زنجیره مارکف مرتبه‌ی اول و توزیع احتمالاتی پواسون، طول دوره‌های خشکسالی و تر سالی بحرانی را در این منطقه تعیین کردند.

عدل (۱۳۶۹)، نیز از الگو زنجیره‌ی مارکف مرتبه‌ی اول، برای تعیین احتمالات تأمین آب از دریاچه‌ی سد امیرکبیر استفاده کرد. وی نتیجه گرفت که احتمال کمبود آب دریاچه در درازمدت به کمک آمار ۲۱ ساله، ۲٪ است.

در استان سیستان و بلوچستان، به عنوان منطقه‌ی خشک و نیمه‌خشک ایران، بروز خشکسالی دور از انتظار نیست. این موضوع نشان‌دهنده‌ی آن است که برای انجام تحقیقات در زمینه‌ی خشکسالی باید تأکید

1. Gabriel and Neumann
2. Tel-Aviv
3. Ochola and Kerkides

بیشتری بشود تا نتایج به دست آمده آنها بتواند به عنوان ابزاری در برنامه ریزی‌های توسعه‌ی کشاورزی در این استان مورد استفاده قرار گیرد. این که صبر شود تا خشکسالی به پایان برسد و سپس در مورد عواقب آن برنامه‌ریزی کرد، کاری غیر معقول و غیر علمی است و باید مدیریت ریسک را جایگزین مدیریت بحران نمود. در این مطالعه با استفاده از تحلیل الگویی که جهت پایش و پیش‌بینی خشکسالی تهیه شده است، وضعیت خشکسالی در گذشته و آینده در استان سیستان و بلوچستان را مورد بررسی قرار می‌دهیم تا مدیریت‌ها و برنامه ریزی‌های لازم جهت کاهش اثرات خشکسالی انجام شود.

۲. مواد و روش‌ها

استان سیستان و بلوچستان با وسعتی حدود ۱۷۸۴۳۱ کیلومتر مربع، ۴/۱۱ درصد از مساحت کل کشور را تشکیل داده و از پهناورترین استان‌های کشور است و با قرار گرفتن در بین ۲۵ درجه و ۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی از خط استوا و ۵۸ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۶۳ درجه و ۲۱ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ، از نظر جمعیتی از کم تراکم‌ترین استان‌های کشور است. این استان از شمال به استان خراسان جنوبی و کشور افغانستان، از شرق به کشورهای پاکستان و افغانستان، از جنوب به دریای عمان و از مغرب به استان‌های کرمان و هرمزگان محدود می‌شود. بر اساس تقسیمات کشوری در سال ۱۳۸۱، استان سیستان و بلوچستان دارای ۳۶ بخش، ۳۱ شهر و ۹۸ دهستان می‌باشد (سالنامه آماری کشور، ۱۳۸۱). استان سیستان و بلوچستان به لحاظ نزولات جوی ناچیز و داشتن آب و هوای صحرایی از جمله استان‌های بسیار خشک کشور است.



شکل ۱. پراکنندگی مکانی ایستگاه‌های مورد مطالعه

داده‌های اصلی این تحقیق را اطلاعات بارندگی ۸ ایستگاه سینوپتیک استان سیستان و بلوچستان در طول دوره آماری ۳۰ ساله (۲۰۰۳-۱۹۷۳) تشکیل می‌دهد که از سازمان هواشناسی کشور تهیه شده‌است. مشخصات جغرافیایی این ایستگاه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. نقشه‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌ها در شکل ۱ آمده است.

در نرم‌افزار تهیه شده با عنوان "DROUGHT MONITORING And FORECASTING" که به اختصار DMF نامیده شده است، برای درجه‌بندی خشکسالی از میان روش‌های موجود از دو شاخص SPI و درصد از نرمال که با توجه به داده‌های موجود در استان سیستان و بلوچستان کاربردی‌تر هستند، استفاده شده است و پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از زنجیره‌ی مارکوف صورت گرفته است. در زیر به تشریح روش‌های مورد استفاده می‌پردازیم:

جدول ۱. ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه و مشخصات جغرافیایی آنها

ردیف	نام ایستگاه	عرض جغرافیایی		طول جغرافیایی		ارتفاع از سطح دریا (متر)
		دقیقه	درجه	دقیقه	درجه	
۱	ایران‌شهر	۱۲	۲۷	۴۲	۶۰	۵۹۱/۱
۲	چابهار	۱۷	۲۵	۳۷	۶۰	۸
۳	خاش	۱۳	۲۸	۱۲	۶۱	۱۳۹۴
۴	زابل	۰۲	۳۱	۲۹	۶۱	۴۸۹/۲
۵	زاهدان	۲۸	۲۹	۵۳	۶۰	۱۳۷۰
۶	زهک	۵۴	۳۰	۴۱	۶۱	۴۹۵
۷	سراوان	۲۰	۲۷	۲۰	۶۲	۱۱۹۵
۸	کنارک چابهار	۲۶	۲۵	۲۲	۶۰	۱۲

الف) شاخص SPI

برای تعیین شاخص استاندارد شده بارش از مقادیر بارندگی ماهانه‌ی هر ایستگاه در طول دوره آماری طولانی مدّت (حداقل ۳۰ سال) استفاده شده‌است. ابتدا مقادیر بارندگی ماهانه‌ی هر ایستگاه برای هر یک از مقیاس‌های زمانی مورد نظر (...، ۲۴، ۱۲، ۶، ۳، ۱) محاسبه و سپس مقادیر بارندگی‌های تجمعی در هر ماه به توزیع گاما برازش داده شده‌است. در نهایت این توزیع به یک توزیع نرمال تبدیل می‌شود. تابع توزیع گاما با استفاده از تابع چگالی احتمالاتی زیر محاسبه می‌شود (Sonmez, 2005):

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

در این رابطه:

$g(x)$ - تابع چگالی احتمالاتی

X - مقادیر بارندگی تجمعی در هر مقیاس زمانی و هر ماه از سال و برای هر ایستگاه هواشناسی مورد نظر (بر

حسب صدم اینچ) می‌باشد.

$\Gamma(\alpha)$ - تابع گاما

α و β نیز پارامتر شکل و پارامتر مقیاس هستند که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

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

که در آن:

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

در روابط بالا:

\bar{x} - میانگین بارندگی‌های تجمعی محاسبه شده در تمام ماههای مشابه در هر ایستگاه و در هر مقیاس زمانی

X - بارندگی تجمعی در هر مقیاس زمانی و در هر ماه

n - تعداد بارندگی‌های مخالف صفر ماههای مشابه در سری زمانی بارندگی‌های تجمعی در هر مقیاس زمانی

توزیع احتمال تجمعی داده‌ها با انتگرال گیری روی توزیع گاما به دست می‌آید.

$$G(x) = \int_0^x g(x)dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad (5)$$

$G(x)$ - احتمال تجمعی توزیع گامای ناقص

با توجه به این که توزیع احتمال تجمعی گاما برای $x = 0$ تعریف نشده‌است و مسلماً در سری داده‌های بارندگی هر ایستگاه، مقادیر بارندگی صفر نیز وجود دارد، لذا احتمال تجمعی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H(x) = q + (1-q)G(x) \quad (6)$$

q - احتمال وقوع بارندگی صفر در هر مقیاس زمانی، برای هر ماه و هر ایستگاه

$H(x)$ - توزیع احتمال تجمعی گاما

پس از محاسبه‌ی احتمال تجمعی گاما در هر مقیاس زمانی و برای هر ماه از سال، این احتمال به یک متغیر تصادفی نرمال استاندارد Z با میانگین صفر و واریانس ۱ تبدیل می‌شود که این متغیر تصادفی در حقیقت همان مقدار SPI مورد نظر است (Abramowitz and Stegun, 1965):

$$Z = SPI = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \quad \text{برای } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (7)$$

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

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} \quad \text{برای } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (9)$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)} \quad \text{برای } 0.5 < H(x) \leq 1 \quad (10)$$

$$c_0 = 2.515517$$

$$c_1=0.802853$$

$$c_2=0.010328$$

$$d_1=1.432788$$

$$d_2=0.189269$$

$$d_3=0.001308$$

مقدار SPI مثبت نمایانگر بارش بیشتر از متوسط و مقدار SPI منفی بیانگر بارش کمتر از مقدار متوسط است. زمانی که مقدار SPI محاسبه شده منفی باشد، نشانه‌ی شروع خشکسالی است و هنگامی که این شاخص مثبت باشد، پایان خشکسالی را نوید می‌دهد. شدت یک دوره‌ی خشکسالی، مجموع مقادیر SPI مثبت برای همه ماهها در همان دوره‌ی خشکسالی است. جهت تعیین درجه‌ی خشکسالی با استفاده از این شاخص از جدول ۲ استفاده می‌شود:

جدول ۲. مقادیر SPI و رطوبت و خشکی متناظر آن (Hayes, 2000)

مقادیر SPI	
$\geq +2$	ترسالی خیلی شدید
۱/۵ تا ۱/۹۹	ترسالی شدید
۱ تا ۱/۴۹	ترسالی متوسط
۰ تا ۰/۹۹	ترسالی کم
۰ تا ۰/۹۹	خشکسالی کم
۱/۴۹ تا -۱	خشکسالی متوسط
۱/۹۹ تا -۱/۵	خشکسالی زیاد
≤ -2	خشکسالی خیلی زیاد

ب) شاخص درصد از نرمال

در تقسیم‌بندی شاخص درصد از نرمال (PN) از توصیه‌های مهندسی مشاور کوانتا (۱۳۵۶) استفاده شده است. بر اساس این تقسیم‌بندی انواع شدت‌های خشکسالی و ترسالی به صورت زیر ارائه گردیده است:

$$PN = (P_i / P) * 100 \quad (11)$$

جدول ۳. درجه بندی شدت خشکسالی بر اساس روش درصد از نرمال (کوانتا، ۱۳۵۶)

مقادیر درصد از نرمال (%)	
>۳۰	ترسالی شدید
۳۰ تا ۱۰/۱	ترسالی خفیف
+۱۰ تا -۱۰	نرمال
-۳۰ تا -۱۰/۱	خشکسالی شدید
< -۳۰	خشکسالی خفیف

پ) زنجیره مارکف

زنجیره‌های مارکف در هیدرولوژی و هواشناسی جهت الگوسازی فرآیندهایی چون: بارندگی، جریان‌های رودخانه، رطوبت خاک و ذخیره‌ی 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، آن‌گاه مقادیر $X(t)$ را به صورت X_t, X_1, \dots, X_0 می‌توان نشان داد و داریم:

$$P[X(t) = x_t | X(0) = x_0, X(1) = x_1, \dots, X(t-1) = x_{t-1}] = P[X(t) = x_t | X(t-1) = x_{t-1}] \quad (12)$$

در رابطه‌ی (۱۲)، P احتمال شرطی است و بیان می‌کند که نتیجه‌ی هر فرآیند در زمان t تنها به شرایط در زمان $t-1$ بستگی دارد. فرآیندهایی که چنین خاصیتی دارند یک زنجیره‌ی مارکوف مرتبه‌ی اول یا زنجیره‌ی مارکوف ساده نامیده می‌شوند (Thompson, 1999).

یک زنجیره‌ی مارکوف ساده با استفاده از ماتریس احتمال انتقال $P(t)$ تعریف می‌شود. این ماتریس، یک ماتریس مربع با عناصر $p_{ij}(t)$ است و به صورت زیر بیان می‌شود:

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

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 یابد، لذا با معلوم بودن وضعیت در زمان $t-1$ احتمالات انتقال متناظر در زمان t با $p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ir}$ نمایش داده می‌شود، و لذا:

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

چنانچه ماتریس احتمال انتقال $P(t)$ وابسته به زمان نباشد، زنجیره‌ی مارکوف را ایستا یا همگن گویند و در این حالت می‌توان از علائم P و p_{ij} به جای $P(t)$ و $p_{ij}(t)$ استفاده نمود (Maidment, 1993). ماتریس احتمال انتقال به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & \dots & r \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ \cdot \\ \cdot \\ r \end{matrix} & \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} & p_{02} & \dots & p_{0r} \\ p_{10} & p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1r} \\ p_{20} & p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2r} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ p_{r0} & p_{r1} & p_{r2} & \dots & p_{rr} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (15)$$

عناصر قطر اصلی ماتریس بیانگر پایداری هر وضعیت می‌باشد.

چنانچه فرض شود زنجیره در حال حاضر در وضعیت \bar{I} قرار دارد و پس از n مرحله‌ی زمانی در حالت J واقع شده است، احتمال گذر از حالت \bar{I} به حالت J در n مرحله را با $p_{i,j}^{(n)}$ نشان داده و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$p_{ij}^{(n)} = \sum_{k=1}^r p_{ik}^{(n-1)} p_{kj} \quad \begin{matrix} i, j = 1, \dots, r \\ n > 1 \end{matrix} \quad (16)$$

چنانچه $n=1$ ، آن گاه $p_{i,j}^{(1)} = p_{i,j}$ همان عناصر احتمال انتقال است. در رابطه‌ی (۱۶)، $p_{ij}^{(n)}$ عناصر ماتریس احتمال انتقال n مرحله‌ای ($P^{(n)}$) هستند که می‌تواند با ضرب کردن n بار ماتریس احتمال انتقال P در خودش به دست آید. (Banik, 2000).

۳. روش تحقیق

نرم افزار DMF برای محاسبات فوری^۱ پایش و پیش‌بینی خشکسالی تهیه شده است. ارائه‌ی این نرم‌افزار به دلیل گستردگی موضوع در مقاله ارائه نشده و علاقمندان برای دریافت آن می‌توانند با نگارندگان مکاتبه نمایند. با استفاده از نرم افزار DMF، شاخص حساسیت به خشکسالی SPI در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه برای تمام سال‌های آماری موجود محاسبه گردید و مقادیر سال ۲۰۰۳ آن برای مقیاس‌های زمانی مختلف استخراج شد. با توجه به مقادیر SPI محاسبه شده برای سال‌های گذشته، درصد وقوع هر یک از انواع خشکسالی‌ها در مقیاس زمانی سه ماهه و برای هر یک از ایستگاه‌ها با توجه به فراوانی وقوع آنها در سی سال گذشته محاسبه شد (جدول ۴). همچنین ماتریس‌های احتمال انتقال برای هشت ایستگاه استان سیستان و بلوچستان بر اساس شاخص SPI (به صورت ماهانه) و شاخص درصد از میانگین (به صورت سالانه) در یک دوره‌ی آماری سی ساله محاسبه شد. با مشخص بودن درجه‌ی خشکسالی یا ترسالی در هر ماه یا سال، می‌توان احتمال وقوع هر یک از شدت‌های خشکسالی یا ترسالی در ماه یا سال آتی را تعیین نمود (جدول ۵ الی ۸). این عمل با ضرب کردن مکرر ماتریس، احتمال انتقال به دفعات مختلف در خودش به دست می‌آید که در نرم‌افزار DMF نیز وجود دارد. نقشه‌های پهنه‌بندی SPI (برای ماه اول هر فصل، اشکال ۲ الی ۴) و پیش‌بینی خشکسالی (به

1. real time

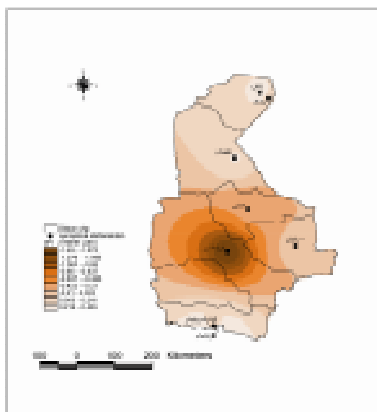
عنوان نمونه ماه ژانویه، اشکال ۵ الی ۸) برای منطقه‌ی مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار GIS و با استفاده از روش IDW تهیه شده است.

۴. نتیجه‌گیری:

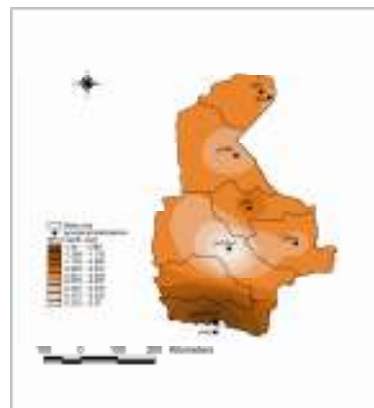
باتوجه به نتایج به دست آمده از وضعیت خشکسالی در سال‌های گذشته در منطقه‌ی مورد مطالعه چنین می‌توان نتیجه‌گیری نمود که، به طور کلی در یک مقیاس زمانی مشخص هر چه شدت خشکسالی بیشتر می‌شود، فراوانی حتمال وقوع آن نیز کاهش می‌یابد. در مقیاس‌های زمانی بلند مدت (۹، ۱۲ و ...) به دلیل افزایش تعداد دفعات ضرب شدن ماتریس فراوانی درخودش، درصد فراوانی انواع خشکسالی‌ها مقداری ثابت می‌شود، در واقع ماتریس تعادل منطقه به دست می‌آید. به طور کلی، منطقه‌ی مورد بررسی نسبت به خشکسالی‌های ملایم میان مدت و کوتاه مدت حساس تر است، لذا می‌توان گفت که شاخص SPI دارای یک روند منفی است و خشکسالی‌های اخیر باعث کاهش منابع آبی استان شده است. بنابراین شناخت همه جانبه‌ی خصوصیات و ویژگی‌های خشکسالی ضرورت دارد تا بتوان به موفقیت برنامه‌ریزی در مدیریت منابع آب کشاورزی امیدوار بود. با توجه به پیش‌بینی که با استفاده از زنجیره‌ی مارکف انجام شده است، مشخص شد که در ماه ژانویه سال ۲۰۰۴، احتمال وقوع خشکسالی کم در استان سیستان و بلوچستان به خصوص در مناطق مرکزی استان وجود دارد. احتمال وقوع خشکسالی در شهرستان‌های سراوان و خاش بیشتر است و مدیریت منابع آب باید با دقت بیشتری انجام گرفته و از توسعه‌ی منابع مصرف‌کننده در آن جلوگیری شود.

منابع و مأخذ

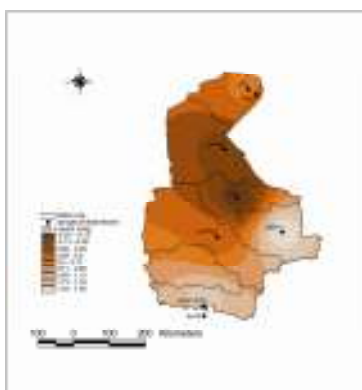
۱. ارشادی، س، (۱۳۸۶)، "مدل دینامیک پایش و پیش‌بینی خشکسالی در ایران و تحلیل آن برای مناطق شرقی کشور"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه فردوسی مشهد.
۲. رضیعی، ط، شکوهی، ع، تقیان، ب، دانش آراسته، پ. (۱۳۸۲)، "پایش پدیده خشکسالی در ایران مرکزی با استفاده از شاخص SPI"، مجموعه مقالات سومین کنفرانس منطقه‌ای و اولین کنفرانس ملی تغییر اقلیم.
۳. سالنامه‌ی آماری کشور (۱۳۸۱). مرکز آمار و انفورماتیک.
۴. عدل، ا (۱۳۶۹). "کاربرد مدل زنجیره مارکوف در بررسی احتمالات تأمین آب از دریاچه سد امیرکبیر"، نشریه علمی و فنی آب کشور، شماره ۹، صفحات ۷-۱۰.
5. Abramowitz, M. and I.A. Stegun, (1965). *Handbook of mathematical function*. Dover, p.1046
6. Banik, P., A. Mandal and M.S. Rahman, (2000). *Markov Chain Analysis of Weekly Rainfall Data in Determining Drought-proneness*. Discrete Dynamics in Nature and Society, Vol. 7, pp. 231-239.
7. Gabriel K.R. and I. Neuman, (1962). *Markov chain model for daily rainfall occurrence at Tel Aviv*, Q. J. Roy. Met. Soc, 88, 90-95.
8. Hayes, M.J. (2000). *What is drought?* National Drought Mitigation Center, URL: www.drought.unl.edu/whatis/indhces.htm
9. Hayes, M.J., Svoboda M. D., White D. A. and O.V. Vanyarkho, (1998). *Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index*. Bulletin of American Meteorological Society, 80: 429-438
10. 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, pp: 19.1-19.39
11. Ochola, W.O. and P. Kerkides, (2003). *A markov chain simulation model for predicating critical wet and dry spells Kenya*, J. Irrigation and Drainage, Vol. 52, Issue.4, pp. 327-342.
12. Oladipo, E. O. (1986). *Spatial pattern of drought in interior plains of North America*, Journal of Climatology, 6: 495-513.
13. Sonmez, F., (2005), *An Analysis of Spatial and Temporal Dimension of Drought Vulnerability in Turkey using the Standardized Precipitation Index*, Natural Hazards, Vol.35, No.2, pp:243-264(22).
14. Thompson, S. A. (1999). *Hydrology for water management*. Rotterdam. Netherlands.
15. Whipple, W. (1966). *Regional drought analysis*, ASCE. Journal of Irrigation and Drainage division, 92: 11-31.



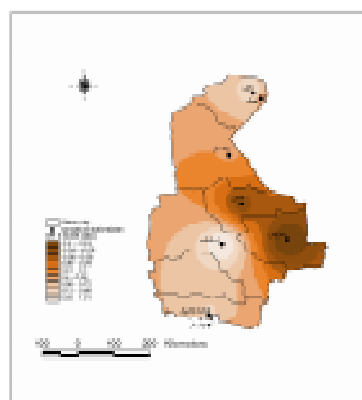
شکل ۲- SPI سه ماهه برای ماه ژانویه سال ۲۰۰۳



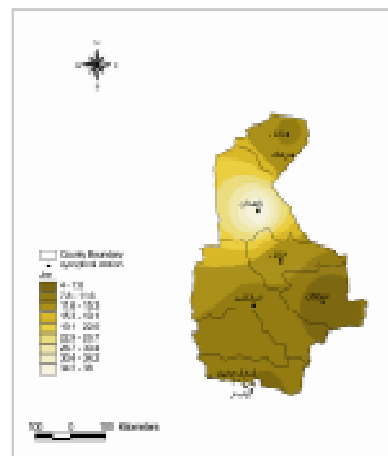
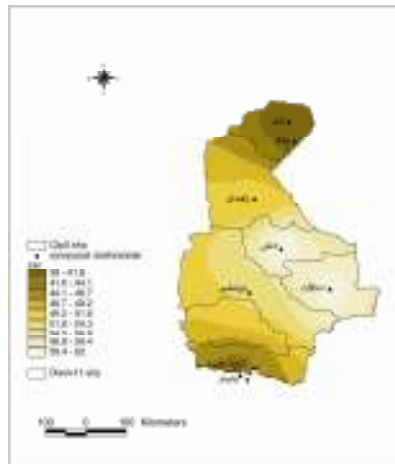
شکل ۳- SPI سه ماهه برای ماه آوریل سال ۲۰۰۳



شکل ۴- SPI سه ماهه برای ماه ژوئیه سال ۲۰۰۳

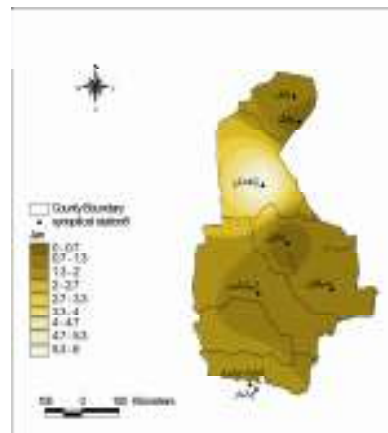
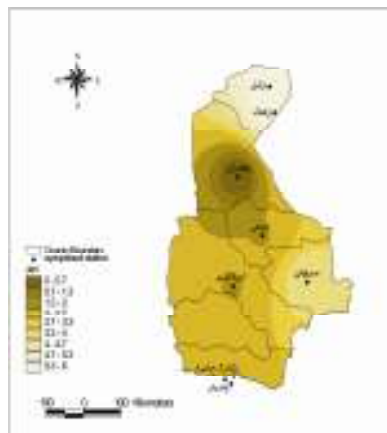


شکل ۵- SPI سه ماهه برای ماه دسامبر سال ۲۰۰۳



شکل ۶- پیش بینی وقوع خشکسالی کم در ماه ژانویه

شکل ۷- پیش بینی وقوع خشکسالی متوسط در ماه ژانویه



شکل ۸- پیش بینی وقوع خشکسالی شدید در ماه ژانویه

شکل ۹- پیش بینی وقوع خشکسالی خیلی شدید در ماه ژانویه

جدول شماره ۴- مقادیر SPI سه ماهه سال ۲۰۰۳ در ایستگاه‌های مورد مطالعه

نام ایستگاه	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUNE	JULY	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
ایران شهر	-۱/۴۹	-۱/۸۵	-۱/۴۸	-۱/۰۷	۰/۱۰	-۱/۱۰	۰/۳۹	۰/۷۵	۰/۸۱	۱/۰۴	۰/۰۶	-۱/۸۲
چابهار	۰/۸۰	-۱/۰۹	-۱/۰۲	-۱/۳۶	-۱/۷۸	۰/۱۳	۰/۷۹	۰/۶۲	۰/۶۴	۰/۳۲	۰/۱۵	-۱/۶۰
خاش	-۱/۳۵	-۱/۹۰	-۱/۰۱	-۱/۹۲	-۱/۵۹	-۱/۶۸	-۱/۳۴	-۱/۱۶	-۱/۱۴	-۱/۱۴	-۱/۵۹	-۱/۹۳
زابل	۰/۲۶	۰/۱۲	-۰/۴	-۱/۹۸	-۱/۶۱	-۱/۵۵	۰/۴۸	۱/۴۷	۱/۴۷	۰/۷۹	۰/۴۹	-۱/۲۹
زاهدان	-۱/۲۳	-۱/۸۷	-۱/۷۷	-۱/۶۳	-۱/۱۶	-۱/۳۸	-۱/۱۱	۰/۷۶	۰/۸۵	۰/۴۱	-۱/۵۷	-۱/۵۷
زهک	۰/۲۰	۰/۲۵	-۱/۲۰	-۱/۵۷	-۱/۱۹	-۱/۳۲	۰/۴۳	۱/۳۸	۱/۳۸	۰/۴۳	-۱/۳۵	-۱/۸۷
سراوان	-۱/۱۱	-۱/۵۶	-۱/۵۶	-۱/۶۷	۰/۰۶	۰/۲۹	-۱/۵۵	۱/۱۵	۱/۳۲	-۱/۴۰	-۱/۳۳	-۱/۷۸
کنارک چابهار	۰/۰۹	-۱/۳۰	-۱/۴۸	-۱/۴۴	-۱/۶۵	۰/۲۵	۱/۴۶	۱/۴۵	۱/۴۶	۰/۸۳	-۱/۳۸	-۱/۸۰
گلمکان	۰/۷۹	۰/۶۶	۰/۶۶	۰/۸۶	۱/۳۸	۱/۵۱	۱/۴۵	-۱/۲۶	-۱/۷۶	-۱/۶۲	۰/۵۴	۰/۸۶

جدول شماره ۵- احتمال وقوع خشکسالی کم در سال ۲۰۰۴ بر اساس شاخص SPI سه ماهه (%)

نام ایستگاه	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUNE	JULY	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
ایران شهر	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۸	۴۴	۵۲
چابهار	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۳۵	۳۹	۴۸
خاش	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۴۸	۵۳	۶۲
زابل	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۵	۲۸	۳۵	۳۹
زاهدان	۲۹	۲۹	۲۹	۲۹	۲۹	۲۹	۲۹	۲۹	۳۰	۳۴	۴۱	۵۰
زهک	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۷	۳۳	۴۱
سراوان	۳۶	۳۶	۳۶	۳۶	۳۶	۳۶	۳۶	۳۶	۳۶	۳۸	۴۶	۶۱
کنارک چابهار	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۵	۲۶	۲۹	۳۹
گلمکان	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۸	۴۴	۵۲

جدول شماره ۶- احتمال وقوع خشکسالی متوسط در سال ۲۰۰۴ بر اساس شاخص SPI سه ماهه (//)

ایستگاه	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUNE	JULY	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
ایران شهر	۱۰	۷	۶	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
چابهار	۴	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
خاش	۱۲	۱۲	۱۰	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹
زابل	۱۱	۸	۶	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
زاهدان	۳۸	۱۵	۹	۷	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶
زهنک	۱۲	۸	۷	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
سراوان	۴	۶	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷
کنارک چابهار	۱۱	۱۱	۸	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶

جدول شماره ۷- احتمال وقوع خشکسالی شدید در سال ۲۰۰۴ بر اساس شاخص SPI سه ماهه (//)

ایستگاه	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUNE	JULY	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
ایران شهر	۲	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
چابهار	۳	۴	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
خاش	۲	۳	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
زابل	۶	۵	۴	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
زاهدان	۰	۹	۴	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
زهنک	۶	۶	۴	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
سراوان	۴	۴	۴	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
کنارک چابهار	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

جدول شماره ۸- احتمال وقوع خشکسالی خیلی شدید در سال ۲۰۰۴ بر اساس شاخص SPI سه ماهه (%)

ایستگاه	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUNE	JULY	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
ایران شهر	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
چابهار	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
خاش	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
زابل	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
زاهدان	۶	۳	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
زهک	۰	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
سراوان	۱	۲	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
کنارک چابهار	۲	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

مشخصات نویسندگان

دکتر امین علیزاده، استاد گروه آبیاری دانشگاه فردوسی مشهد
 دکتر حسین انصاری، استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد
 سارا ارشادی، کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه فردوسی مشهد
 شادی آشگر طوسی، کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی، مهندسین مشاور طوس آب مشهد