

## شبیه‌سازی تصادفی شدت خشکسالی براساس شاخص پالمر

مجتبی شفیع<sup>۱\*</sup>، بیژن قهرمان<sup>۲</sup>، حسین انصاری<sup>۳</sup> و محمد باقر شریفی<sup>۴</sup>

(E-mail: shafiei9@gmail.com)

(تاریخ دریافت: ۸۹/۸/۳ - تاریخ پذیرش: ۹۰/۳/۴)

### چکیده

خشکسالی پدیده‌ای است که به آرامی رخ می‌دهد و باعث بروز تغییرات مهمی در منابع آب، کشاورزی و غیره می‌شود. به سبب وجود رفتارهای تصادفی در عوامل تأثیرگذار بر وقوع و شدت خشکسالی‌ها، این پدیده را می‌توان به عنوان یک فرآیند تصادفی در نظر گرفت. با توجه به اهمیت پیش‌بینی و شناسایی خشکسالی و نقش آن در طراحی مدیریت سیستم‌های منابع آب در این تحقیق، علاوه بر پایش شدت خشکسالی کشاورزی در دوره ۳۴ ساله (۱۹۷۱-۲۰۰۴)، با استفاده از مدل‌سازی سری زمانی ماهیت تصادفی و مدل تصادفی برای پیش‌بینی شدت خشکسالی کشاورزی براساس شاخص شدت خشکسالی پالمر در ایستگاه سینوپتیک مشهد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از پایش خشکسالی با شاخص پالمر نشان داد که در ۳۴ سال مورد بررسی بیش از ۶۴ درصد ماه‌ها خشک بوده‌اند. همچنین نتایج نشان داد که در سال‌های اخیر علاوه بر تداوم، شدت خشکسالی‌ها افزایش یافته به طوری که بیش از ۲۸۵ درصد تغییر قابل مشاهده است. براساس روش مدل‌سازی سری زمانی باکس و جینکینس، نوع مدل تعیین مناسب‌ترین مدل توسط معیارهای AIC و SBC انتخاب و سپس پارامترهای آن محاسبه شدند، در نهایت توسط تجزیه و تحلیل باقیمانده‌ها کفایت مدل مورد اثبات قرار گرفت که منجر به توسعه مدل  $SARIMA(1,0,0)(0,1,1)_2$  شد. در ادامه، با بررسی طول مدت قابل پیش‌بینی توسط مدل، مشخص شد که مدل انتخاب شده در منطقه مورد نظر تنها تا دو ماه آینده را می‌تواند با دقت مناسب پیش‌بینی کند.

**کلمات کلیدی:** خشکسالی کشاورزی، سری زمانی، شاخص پالمر، مشهد

۱ - دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، خراسان رضوی - ایران (نویسنده مسئول مکاتبه\*)

۲ - استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، خراسان رضوی - ایران

۳ - استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، خراسان رضوی - ایران

۴ - دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، خراسان رضوی - ایران

## مقدمه

درک شرایط خشکسالی در زمان و مکان از مهمترین مسائل در مدیریت منابع آب می‌باشد. خشکسالی در تمامی مناطق اقلیمی ممکن است اتفاق افتد، هرچند ویژگی‌های آن به‌طور معنی‌دار از منطقه‌ای به منطقه دیگر تفاوت می‌کند. تعریف دقیق خشکسالی مشکل است و بستگی به تفاوت مناطق، نیازها و اهداف مشترک دارد. در این مورد، تعاریف مختلفی از این پدیده با توجه به اهداف متفاوت ارائه شده است (۱۵). براساس خصوصیات طبیعی کمبود آب، چهار نوع خشکسالی تعریف کرده‌اند: الف) خشکسالی هواشناسی، ب) خشکسالی هیدرولوژی، ج) خشکسالی کشاورزی و د) خشکسالی اجتماعی - اقتصادی. سه تعریف اول مربوط به خشکسالی‌های محیطی است و تعریف آخر به عنوان خشکسالی در سیستم‌های منابع آب شناخته شده است. در این تحقیق خشکسالی کشاورزی موردنظر می‌باشد. شاخص‌های خشکسالی ارائه‌دهنده تصویر مختصر و کلی از خشکسالی‌ها می‌باشند که به کمک مجموعه‌ای از داده‌های اقلیمی و هیدرومتری قابل محاسبه می‌باشند و نقش مهمی در تصمیم‌گیری در مدیریت منابع آب دارند. تعداد زیادی شاخص خشکسالی وجود دارد که دارای تنوع گوناگونی در داده‌های ورودی می‌باشند و تخمین‌های متفاوتی از خشکسالی را ارائه می‌دهند. شاخص خشکسالی متفاوتی در مطالعات گذشته استفاده شده‌اند (۸).

امکان اجتناب از خشکی وجود ندارد، اما سازمان‌دهی خشکسالی (آمادگی در برابر آن) و مدیریت تأثیرات ناشی از آن قابل انجام است و موفقیت به این دو امر بستگی دارد که خشکسالی را چگونه تعریف کنیم و نیز خصوصیات آن را به دست آوریم (۱۴). در تحلیل‌های خشکسالی تعیین دوره شروع یا خاتمه خشکی بسیار مشکل است. یک دوره خشک می‌تواند کوتاه باشد، ممکن است تنها در چند ماه خاتمه یابد یا حتی ممکن است برای چندین سال ادامه یابد. از این رو، پیش‌بینی آن نقش بسیار مهمی در کاهش تأثیرات ناشی از آن در سیستم‌های منابع آب دارد. یکی از اساسی‌ترین کمبودها در

کاهش اثرات این پدیده، عدم توانایی در پیش‌بینی قابل قبول در مقیاس‌های ماهانه و فصلی است (۱۲). بدیهی است خشکسالی یک پدیده خزننده است و نیاز به ارائه تکنیک‌ها و روشهایی برای پیش‌بینی نقطه شروع و خاتمه دوره خشک دارد. یک سیستم پیش‌بینی کارآمد می‌تواند در راهبرد بهینه سیستم‌های آبیاری مؤثر باشد. با توجه به وجود ماهیت تصادفی (استوکستیک) در عوامل تأثیرگذار در وقوع و شدت خشکسالی‌ها، این پدیده را می‌توان به عنوان یک فرآیند تصادفی در نظر گرفت.

پیش‌بینی براساس تحلیل سری‌های زمانی با کاربرد مفهوم مدل‌های ARIMA در منابع زیادی جهت پیش‌بینی‌های کوتاه مدت مورد استفاده قرار گرفته است (۹ و ۱۲). اغلب شاخص‌هایی که توسط محققین ارائه شده است برای پیش‌بینی شرایط جاری خشکسالی‌ها به کار رفته‌اند، اما برخی از آنها را می‌توان جهت پیش‌بینی احتمال تکامل و شروع دوره خشکی استفاده کرد. در این راستا، محققین یک روش پیش‌بینی برای شاخص PDI براساس زنجیره مارکوف مرتبه اول ارائه کرده‌اند که قادر به پیش‌بینی شرایط خشکسالی در ماه آینده با توجه به شرایط فعلی می‌باشد (۱۰). همچنین در دیگر تحقیقات در حوضه‌ای در ترکیه، با استفاده از مدل‌های خطی تصادفی (ARIMA) دوره‌های خشکسالی کشاورزی را شبیه‌سازی نموده‌اند که در آن روزهایی با بارندگی کمتر از ۶/۴ میلی‌متر و روزهای بدون بارندگی را به عنوان دوره‌های خشک در نظر گرفته‌اند (۱۶). در حوضه رودخانه کانسباتی هندوستان، مطالعه‌ای جهت پیش‌بینی خشکسالی هواشناسی براساس شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی متفاوت با استفاده از مدل‌سازی سری زمانی خطی غیرفصلی (ARIMA) و فصلی (SARIMA) انجام داده شد (۱۱). همچنین، اخیراً در تحقیقی مشابه، پیش‌بینی خشکسالی هواشناسی براساس شاخص SPI توسط مدل‌های ARIMA و SARIMA در حوضه‌ای در کشور ترکیه ارائه شده است (۷). علاوه بر پیش‌بینی خشکسالی توسط سری‌های زمانی در مطالعاتی نیز از روش شبکه عصبی نیز

آنچه که از بررسی منابع به‌دست آمده نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه‌ای در مورد پیش‌بینی خشکسالی کشاورزی توسط شاخص شدت خشکسالی پالمر با کاربرد مفهوم سری‌های زمانی انجام نشده است. با توجه به اهمیت بررسی خشکسالی کشاورزی و لزوم ارزیابی ماهیت تصادفی این پدیده، هدف از این مطالعه، علاوه بر ارزیابی شدت خشکسالی کشاورزی در شهرستان مشهد در دوره ۳۴ ساله، ارائه مدل شبیه‌سازی تصادفی شدت خشکسالی کشاورزی با استفاده از روش باکس و جنکینس و استفاده از الگوی آریما فصلی ضربی (SARIMA) براساس شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI) می‌باشد.

### مواد و روشها

#### معرفی منطقه مورد مطالعه

برای محاسبه شاخص پالمر از اطلاعات هواشناسی (درجه حرارت و بارندگی) ایستگاه سینوپتیک مشهد در دوره ۳۴ ساله (۲۰۰۴-۱۹۷۱) استفاده شده است. در جدول (۱) مشخصات ایستگاه سینوپتیک مشهد به همراه متوسط پارامترهای اقلیمی آن در دوره مذکور آورده شده است.

استفاده شده است، به طوری که در تحقیقی دیگر، برای پیش‌بینی خشکسالی از مدل شبکه عصبی برای اساس شاخص SPI استفاده شد و نتیجه گرفته شد که مدل‌های شبکه عصبی در مقایسه با مدل‌های آماری کارایی بیشتری دارند (۱۱). در این مورد، در تحقیقی دیگر نیز به نتایج مشابهی در حوضه گرگان‌رود رسیده‌اند (۲).

مدل‌های سری زمانی از جمله ARIMA یا SARIMA دارای چندین مزیت نسبت به سایر روشها مانند روش هموارسازی نمایی و شبکه‌های عصبی می‌باشد، قابلیت پیش‌بینی آن و اطلاعات مهمی که در رابطه با تغییرات وابسته به زمان نشان می‌دهد. در بیشتر سری‌های زمانی همبستگی پایایی بین مشاهدات وجود دارد و این یکی از ویژگی‌های بارز مدل ARIMA است. همچنین، این مدل یک الگوریتم منظم جستجو (تشخیص الگو، تخمین پارامترها و بررسی درستی الگو) برای انتخاب مدل مناسب دارد. از ویژگی‌های سری‌های زمانی هیدرولوژیک این است که اغلب دارای مؤلفه‌های دوره‌ای متفاوتی می‌باشند. این نوع از داده‌ها را می‌توان با استفاده از مدل‌های تصادفی خطی که به صورت خودهمبسته - میانگین متحرک تلفیق شده (ARIMA) معرفی می‌شوند، شبیه‌سازی کرد (۹ و ۱۱).

جدول ۱ - مشخصات ایستگاه سینوپتیک مشهد

عرض جغرافیایی (درجه - دقیقه)	طول جغرافیایی (درجه - دقیقه)	ارتفاع (متر)	متوسط بارندگی (میلی‌متر)	متوسط درجه حرارت (سانتی‌گراد)
۳۶ ۱۶	۵۹ ۳۸	۹۹۹/۲	۲۶۷/۵	۱۴/۴

#### شاخص شدت خشکسالی پالمر

(۸). شاخص خشکسالی پالمر ترکیبی از بارندگی رخ داده، ذخیره رطوبتی و نیاز رطوبتی است که براساس محاسبه بیلان آبی معرفی شده است. در محاسبات این شاخص، علاوه بر داده‌های درجه حرارت (برای محاسبه تبخیر و تعرق) و بارندگی نیاز به داده‌های رطوبت خاک می‌باشد، اما به جهت نبود

کاربرد شاخص‌های خشکسالی در خلاصه‌سازی بسیاری از پارامترهای مؤثر در خشکسالی در برنامه‌ریزی‌های منابع آب مفید است و همچنین توسط شاخص‌های خشکسالی می‌توان شدت و وسعت خشکسالی را به کمیت درآورد و ارزیابی کرد

است و رواناب پتانسیل (PRO) تفاوت بین بارندگی پتانسیل و تغذیه پتانسیل است.

گام ۲) محاسبه ضرایب اقلیمی: این بخش از محاسبات با شبیه‌سازی بیلان آبی برای دوره‌ای که داده‌های هواشناسی موجود است، قابل انجام می‌باشد. ضرایب ماهانه از نسبت‌های بین متوسط‌های اقلیمی واقعی در مقابل مقادیر پتانسیلی تبخیر و تعرق، تغذیه، رواناب و هدر رفت به دست می‌آید.

گام ۳) محاسبه مقادیر CAFEC (شرایط مناسب اقلیمی برای شرایط موجود): در این مرحله، ضرایب مذکور برای تعیین مقدار بارندگی (P<sub>C</sub>) مورد نیاز برای شرایط CAFEC محاسبه شد.

گام ۴) محاسبه شاخص آنومالی رطوبت: در هر ماه، تفاوت بین بارندگی واقعی (P) و بارندگی در شرایط CAFEC (پارامتر P<sub>C</sub>) به عنوان یک شاخصی از کمبود یا افزایش رطوبت برای منطقه مورد مطالعه (D = P - P<sub>C</sub>) محاسبه شد. سپس، انحرافات مذکور به شاخص‌هایی از آنومالی رطوبت به صورت  $Z = K_j \cdot D$  تبدیل شوند که K<sub>j</sub> یک فاکتور وزنی برای ماه زام است که تغییرپذیری مکانی انحرافات D را در محاسبات وارد می‌کند.

گام ۵) محاسبه شدت خشکسالی: در گام نهایی، سری‌های زمانی شاخص Z برای ایجاد یک معیار برای تعیین شروع و خاتمه خشکسالی و ارائه یک فرمول برای تعیین شدت آن مورد بررسی قرار گرفت. در این گام، برای تعیین شدت خشکسالی از عبارت تجربی ارائه شده توسط پالمر به صورت زیر استفاده شد:

$$X_j = 0.897 X_{j-1} + \frac{Z_j}{3} \quad (1)$$

در این رابطه، مقادیر  $X_j$  همان مقادیر PDSI برای ماه زام است.

#### مدل سری زمانی غیرفصلی (ARIMA) و فصلی (SARIMA)

مدل‌سازی تصادفی که به مدل‌های سری زمانی مشهورند به‌طور گسترده‌ای در علوم از جمله مهندسی و اقتصاد کاربرد دارند. روش‌های مدل‌سازی سری‌های زمانی، روش‌های تجربی هستند که برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار نامعلوم سیستم‌های هیدرولوژیکی به‌کار می‌روند. سری زمانی به مجموعه‌ای از مشاهدات و یا مقادیر ثبت شده از یک متغیر گفته می‌شود که

داده‌های رطوبت خاک، به کمک مدل بیلان حجمی، داده‌های رطوبت خاک برآورد شدند. از آنجا که شاخص شدت دوره‌های خشک پالمر براساس معادلات بیلان آبی با نگاهی به گذشته به صورتی ارائه شده که بنیان آن بر روابط بین عرضه و تقاضای رطوبت استوار است، لذا می‌توان اظهار داشت که مقادیر محاسبه شده برای این شاخص، یک اندازه کمی واحدی را از شدت دوره‌های خشک به دست می‌دهند.

به جهت حجم بالای معادلات و محاسبات شاخص پالمر و عدم امکان ارائه همه آنها در یک مقاله، مفاهیم و گام‌های اساسی محاسبه PDSI در زیر ارائه شده است (۱).

گام ۱) محاسبات هیدرولوژیکی: در اولین گام محاسباتی این شاخص، بیلان آبی با استفاده از داده‌های طولانی‌مدت درجه حرارت، بارندگی و رطوبت خاک به‌عنوان اطلاعات ورودی مدنظر قرار گرفته است، اما از آنجایی که داده‌های رطوبت خاک برای دوره آماری ۳۴ ساله در اختیار نمی‌باشد، لذا یک روش تجربی برای محاسبه رطوبت ذخیره شده در خاک با تقسیم خاک به دو لایه مشخص استفاده شد. بدین‌صورت که باتوجه به فرضیات پالمر، رطوبت موجود در حالت ظرفیت زراعی در لایه سطحی ۲۵ میلی‌متر درنظر گرفته شده و تغییرات رطوبتی در هر یک از دو لایه نیز متأثر از میزان رطوبت موجود در هر یک از لایه‌ها و تغییرات آنها بوده است. همچنین فرض شده که هدررفت آب از لایه زیرین به حجم رطوبت اولیه که خود نیز به تبخیر و تعرق پتانسیل (PE) و حجم رطوبت در دسترس (AWC) وابسته است، مربوط می‌شود. در محاسبات حاضر، باتوجه به مشخصات خاک منطقه مقادیر AWC معادل ۱۶۰ میلی‌متر فرض شد. همچنین فرض شد که رواناب تنها زمانی به‌وقوع خواهد پیوست که هر دو لایه ظرفیت رطوبتی خود را دریافت دارند. علاوه بر تبخیر و تعرق پتانسیل، سه ترم دیگر پتانسیلی نیز محاسبه شده که عبارتند از: تغذیه پتانسیل (PR)، میزان رطوبت مورد نیاز برای رساندن رطوبت به حد ظرفیت زراعی، هدررفت پتانسیل، مقدار رطوبتی که می‌تواند به وسیله تبخیر و تعرق از خاک از دست برود، زمانی که بارندگی صفر

به‌دست آوردن درجه تفاضلی کردن فصلی و یا غیرفصلی است  
(۴). رابطه تبدیل توانی باکس - کاکس برای ایستا نمودن سری  
به صورت ذیل است:

$$W_i(\lambda) = \frac{Z_i^\lambda - 1}{\lambda} \quad (۶)$$

در این رابطه،  $\lambda$  پارامتر تبدیل،  $Z_i$  مقدار اولیه واقعه در  
زمان  $t$  و  $W_i(\lambda)$  مقدار تبدیل یافته نظیر می‌باشد. در تبدیل توانی  
باکس - کاکس مقدار  $\lambda = 0$  متنظر با تبدیل لگاریتمی است.  
این تبدیل باید قبل از تفاضلی کردن صورت گیرد، همچنین این  
تبدیل فقط جهت پایداری واریانس نیست بلکه تقریب برای  
نرمال بودن بهتر است. سپس به کمک توابع خودهمبستگی  
(ACF) و خودهمبستگی جزئی (PACF) مرتبه فصلی و  
غیرفصلی مدل را می‌توان انتخاب کرد. در این حالت، چندین  
مدل با مرتبه‌های متفاوت می‌توان در نظر گرفت و مناسب‌ترین  
مدل را توسط معیار اطلاعاتی AIC (Akaike Information  
Criterion) و معیار بیزی شوارز SBC (Schwarz Bayesian  
Criterion) انتخاب کرد. مدلی که کمترین مقدار AIC و SBC را  
بدهد به عنوان بهترین مدل انتخاب می‌شود. رابطه ریاضی معیار  
AIC به صورت ذیل است:

$$AIC = n \times (\ln(2 \times \pi \times RSS) / n) + 1 + 2 \times m \quad (۷)$$

در این رابطه،  $m = (p + q + P + Q)$  برابر مجموع تعداد  
پارامترهای مدل است و RSS مجموع مربعات باقیمانده‌ها است  
(۴ و ۵). رابطه ریاضی معیار SBC نیز به صورت ذیل است:

$$SBC = n \times (\ln(2 \times \pi \times RSS) / n) + 1 + m \times \ln(n) \quad (۸)$$

در این رابطه،  $n$  تعداد مشاهدات می‌باشد.

ب) تخمین پارامترهای مدل: پس از انتخاب مدل آریمای مناسب  
پارامترهای آن باید تخمین زده شود. پارامترها به‌طور هم‌زمان  
برای AR و MA محاسبه می‌شود. تخمین پارامترها در یک  
فرآیند تکرار همراه با حداقل کردن مجموع مربعات باقیمانده‌ها  
صورت می‌گیرد (۴). در اینجا برای برآورد پارامترها از نرم‌افزار  
Minitab 15 استفاده شده است. بعد از یافتن پارامترها،  
معنی‌داری آنها توسط  $-p$  مقدار (p-value) برای آزمون  $t$  در

برحسب زمان مرتب شده باشد. مدل‌های سری زمانی علاوه بر  
قابلیت پیش‌بینی، اطلاعات مهمی را در رابطه با تغییرات وابسته  
به زمان نشان می‌دهد و این مدل‌ها یک الگوریتم منظم جستجو  
(تشخیص الگو، تخمین پارامترها و بررسی درستی الگو) برای  
انتخاب مدل مناسب دارد.

مدل عمومی غیرفصلی ARIMA را می‌توان به صورت  
زیر نوشت:

$$\phi(B) \nabla_{Z_i}^d z_t = \theta(B) a_t \quad (۲)$$

در این رابطه که  $\phi(B)$  و  $\theta(B)$  چندجمله‌ای‌های درجه  
 $p$  و  $q$  هستند،  $z_t$  مشاهدات متوالی سری زمانی و  $a_t$  فرایند  
تصادفی محض (White Noise) می‌باشد. اپراتور AR غیرفصلی  
از درجه  $p$ :

$$\phi(B) = (1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p) \quad (۳)$$

و اپراتور غیرفصلی MA از درجه  $q$ :

$$\theta(B) = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q) \quad (۴)$$

متغیر  $B$  عملگر پسرو می‌باشد که به صورت  $BX_t = X_{t-1}$   
تعریف می‌شود. مدل‌های عمومی فصلی SARIMA توسط  
باکس و همکاران (۱۹۹۴) ارائه شده‌اند. این نوع مدل‌های سری  
زمانی شامل یک مؤلفه فصلی دوره‌ای هستند که هر  $S$  مشاهده  
را تکرار می‌کنند و آنها را به‌طور مختصر می‌توان به صورت  
 $ARIMA(p,d,q)(P,D,Q)_S$  نوشت که  $(p,d,q)$  بخش غیرفصلی  
مدل و  $(P,D,Q)$  مؤلفه فصلی مدل است که به صورت ذیل  
نوشته می‌شود:

$$\phi_p(B) \Phi_P(B^S) \nabla_{Z_i}^d \nabla_{S_i}^D z_t = \theta_q(B) \Theta_Q(B^S) a_t \quad (۵)$$

در این رابطه،  $p$  مرتبه اتورگرسیو غیرفصلی،  $d$  تعداد  
تفاضل‌های غیرفصلی،  $q$  مرتبه غیرفصلی MA،  $P$  مرتبه فصلی  
اتورگرسیو،  $D$  تعداد تفاضل‌های فصلی،  $Q$  مرتبه فصلی  
MA،  $\Phi$  پارامتر AR فصلی با مرتبه  $P$ ،  $\Theta$  پارامتر MA فصلی با  
مرتبه  $Q$  می‌باشد (۴ و ۹).

الف) مرحله تشخیص الگو: این مرحله شامل شناخت الگو و  
شناسایی تبدیل‌های موردنیاز از جمله تبدیل پایداری واریانس و

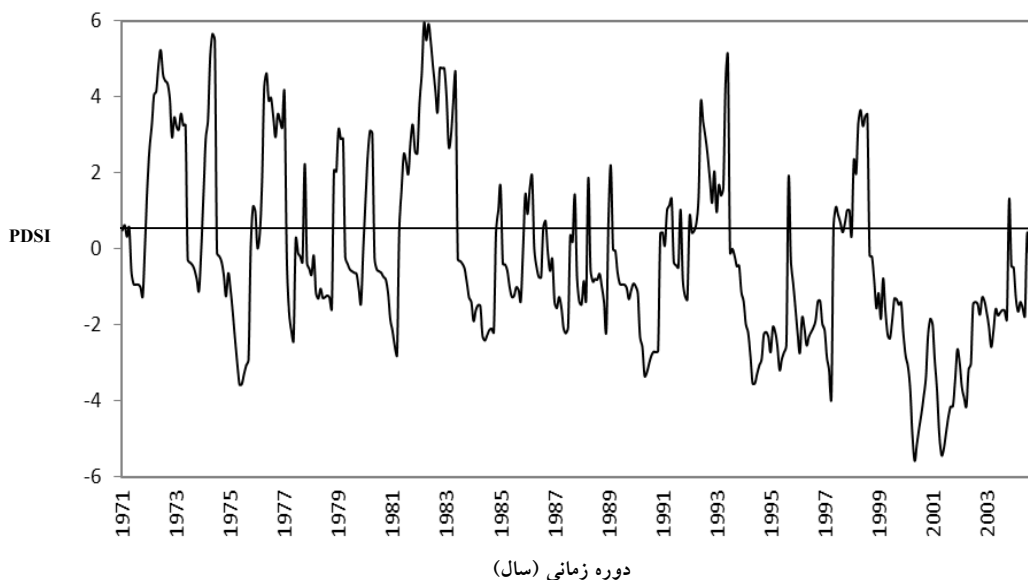
نمودار باید فاقد ساختار باشد. مرحله ۴ - رسم نمودار باقیمانده‌ها در طول زمان برای بررسی این امر که آیا باقیمانده‌ها نشان‌دهنده یک فرآیند تصادفی محض می‌باشد یا خیر که انتظار می‌رود این نمودار در اطراف سطح افقی صفر پراکندگی مستطیلی بدون روندی را نشان دهند. چهار مرحله مذکور به کمک نرم‌افزار Minitab 15 انجام شده است.

### نتایج و بحث

#### بررسی دوره‌های خشک توسط شاخص PDSI

نتایج محاسبه ماهانه شاخص شدت خشکسالی پالم در دوره زمانی ۳۴ ساله (۱۹۷۱-۲۰۰۴) برای ایستگاه سینوپتیک مشهد در نمودار شکل (۱) نشان داده شده است. وجود دوره‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت خشکسالی در ایستگاه موردنظر نشان‌دهنده اهمیت و ضرورت لحاظ نمودن این پدیده در مدیریت کشاورزی منطقه می‌باشد.

سطح اعتماد ۹۵ درصد بررسی می‌گردد. (ج) تشخیص درستی الگو: بعد از انتخاب مدل و برآورد پارامترهای آن برای بررسی کفایت مدل از تجزیه و تحلیل باقیمانده‌های مدل استفاده می‌کنند. برای یک مدل پیش‌بینی مناسب باقیمانده‌های آن بایستی تقریباً دارای خواص متغیرهای تصادفی نرمال مستقل هم‌توزیع با میانگین‌های صفر و واریانس ثابت باشند. تحلیل باقیمانده‌ها را به‌طور خلاصه می‌توان در چهار مرحله بررسی کرد (۳). مرحله ۱ - بررسی فرض نرمال بودن باقیمانده‌ها با رسم هیستوگرام و یا نمودار احتمال نرمال آنها. مرحله ۲ - بررسی فرض استقلال باقیمانده‌ها با ترسیم ACF و PACF به‌طوری‌که اگر این نمودارها روندی را نشان ندهند و از حدود مجاز خود تجاوز نکنند می‌توان استقلال باقیمانده‌ها را پذیرفت. مرحله ۳ - بررسی فرض ثابت بودن واریانس باقیمانده‌ها با ترسیم نمودار باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر برازش داده شده می‌باشد که در صورت ثابت بودن واریانس این



شکل ۱ - شاخص شدت خشکسالی پالم ایستگاه سینوپتیک مشهد در دوره زمانی ۳۴ ساله (۱۹۷۱-۲۰۰۴)

عبارتی، کمبود رطوبت نسبت به نرمال در این ماه‌ها مشهود بوده است. بیشترین شدت خشکسالی به وقوع پیوسته این دوره در سال ۲۰۰۰ می‌باشد. همچنین، تحلیل و بررسی روند تغییرات

نتایج حاصل از پایش خشکسالی براساس شاخص پالم در ایستگاه مشهد نشان می‌دهد که در طی ۳۴ دوره آماری در اکثر سال‌ها، ماه‌هایی از سال با خشکسالی مواجه بوده‌اند و به

برای  $\lambda$  (پارامتر تبدیل) عدد یک باشد، نشان‌دهنده این است که واریانس داده‌ها ثابت است (۳). در این مطالعه، برای بررسی سری زمانی شاخص پالمر با دوره ۳۲ ساله (۲۰۰۲-۱۹۷۱ میلادی) در ایستگاه سینوپتیک مشهد بهترین مقدار  $\lambda = 0.5$  به کمک نرم‌افزار Minitab 15 به دست آمد. لازم به ذکر است که در اینجا مقدار ثابت شش به کلیه داده‌های سری اضافه گردید تا از مشکل صفر یا منفی بودن داده‌ها در استفاده از تبدیل باکس - کاکس پرهیز شود. برای تشخیص مدل مناسب سری زمانی، باتوجه به وجود مؤلفه فصلی در سری زمانی شاخص PDSI، ابتدا تفاضل‌گیری فصلی با مرتبه ۱۲ ( $D=1$ ) برای حذف حالت فصلی انجام شده است. سپس تابع ACF و PACF برای سری تبدیل‌یافته ترسیم گردید (شکل‌های ۲ و ۳). ACF به صورت ترکیبی از منحنی نمایی و سینوسی می‌باشد و PACF در سطح فصلی دارای پیک‌های معنی‌داری در نزدیکی تأخیرهای ۱۲، ۲۴ و ۳۶ می‌باشد و به صورت نزولی کاهش می‌یابد و این امر می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که بخشی از مدل در سطح فصلی دارای مدل میانگین متحرک است (شکل ۲). در PACF پیک معنی‌داری در تأخیر یک مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده اتورگرسیو غیرفصلی  $AR(1)$  در مدل می‌باشد. این نتایج مشابه نتایج دیگر محققان برای شاخص SPI-12 (شاخص بارندگی استاندارد شد با دوره زمانی ۱۲ ماهه) می‌باشد (۷ و ۱۱). به‌طوری‌که ACF در آنها نیز به صورت سینوسی و نمایی تغییر می‌کند و PACF نیز نشان‌دهنده AR غیرفصلی است. این امر می‌تواند نشان‌دهنده وجود مشابهت شاخص SPI-12 با PDSI باشد، همان‌طور که نتایج برخی تحقیقات در اروپا نشان داده‌اند که SPI-12 با شاخص PDSI مطابقت بسیار نزدیکی دارند (۷). در نهایت، جهت انتخاب مدل نهایی SARIMA حالت‌های مختلفی از ترکیب مرتبه‌های متفاوت توسط معیار AIC و SBC مورد بررسی قرار گرفته‌اند، مدلی که کمترین مقادیر را داشته باشد انتخاب می‌شود که در اینجا مدل  $SARIMA(1,0,0)(0,1,1)_{12}$  انتخاب شده است (جدول ۲).

خشکسالی‌ها در طول دوره آماری نشان داد که در بعضی از مواقع دوره‌های خشک با تداوم بیشتر از چند سال نیز به وقوع پیوسته است، در صورتی‌که بارندگی‌های مناسبی در بعضی از ماه‌های این سال‌ها اتفاق افتاده است. از جمله می‌توان به خشکسالی‌های سال‌های ۱۹۹۳ تا ۱۹۹۸ اشاره کرد. به نظر می‌رسد یکی از عواملی که از تغییر شاخص از مقادیر منفی به مثبت در ماه‌های با بارندگی مناسب جلوگیری می‌کند، تخلیه بیش از حد رطوبت از خاک در ماه‌های قبل این دوره‌های خشک می‌باشد.

علاوه بر موارد فوق، نتایج حاصل از پایش خشکسالی نشان داد که در ۳۴ سال مورد بررسی مجموعاً در ۲۶۹ ماه مقدار شاخص کمتر از صفر بوده یعنی بیش از ۶۴ درصد ماه‌ها خشک بوده‌اند. در دوره آماری موردنظر ۲۶ دوره خشک مجزا به وقوع پیوسته است. در بین این خشکسالی‌ها طولانی‌ترین دوره، دوره خشکی بوده که در تاریخ سپتامبر ۱۹۹۸ شروع شده و در تاریخ نوامبر ۲۰۰۳ با ۶۲ ماه یعنی بیش از پنج سال تداوم به پایان رسیده است. متأسفانه بررسی نتایج نشان می‌دهد که در دهه‌های اخیر تداوم خشکسالی‌ها به شدت افزایش یافته است و این امر بسیار نگران‌کننده است. علاوه بر این، نتایج نشان دادند که در طول دوره آماری در اکثر موارد دوره‌های خشک با شدت‌های متفاوت با هم ترکیب شده و یک دوره خشک کلی را شامل شده است. بررسی شدت خشکسالی‌های بروز کرده نیز نشان داد که در سال‌های اخیر علاوه بر تداوم، شدت خشکسالی‌ها افزایش یافته به‌طوری‌که در ۵۰ درصد داده‌ها اولیه داده‌ها (ژانویه ۱۹۷۱ تا ژوئن ۱۹۸۸) مجموع مقادیر شاخص پالمر  $129/81$  و در ۵۰ درصد دیگر مجموع مقادیر شاخص پالمر  $241/07$  - بوده است یعنی بیش از ۲۸۵ درصد تغییر قابل مشاهده است.

#### مدل‌سازی سری زمانی

**الف) مرحله تشخیص:** این مرحله، یک روش تقریبی برای شناخت ساختار مدل‌های مناسب براساس داده‌های مشاهده شده می‌باشد. جهت بررسی پایداری واریانس از تبدیل باکس - کاکس استفاده شده است، در صورتی‌که بهترین مقدار پیشنهادی

b نشان‌دهنده این است که باقیمانده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند: نمودار ACF و PACF (c و d) چون از حدود خود تجاوز نکرده‌اند، لذا فرض استقلال باقیمانده‌ها برقرار است، همچنین نمودارهای e و f نشان‌دهنده ثابت بودن واریانس و تصادفی بودن باقیمانده‌ها می‌باشد.

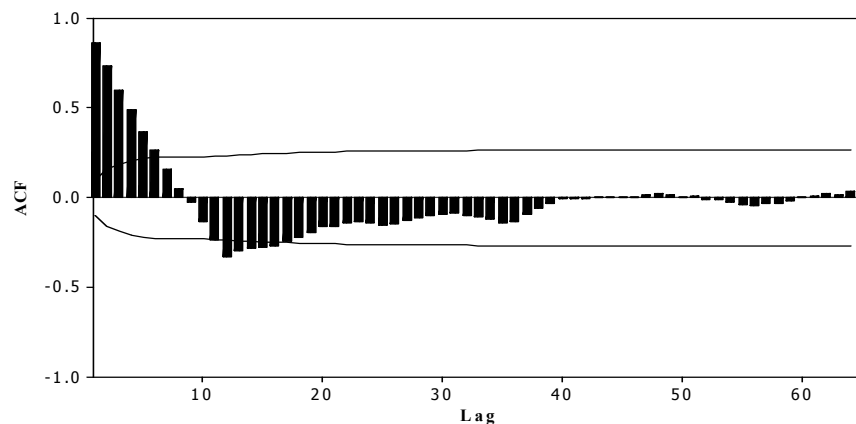
ب) تخمین پارامترهای مدل: پارامترهای مدل منتخب با روش تکرار باکس - جینکینس به کمک نرم‌افزار Minitab 15 برآورد گردیده و مقادیر p- مقدار نشان‌دهنده این است که پارامترهای مدل در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار می‌باشند (جدول ۳).  
ج) تشخیص درستی الگو: ارزیابی مدل با تحلیل باقیمانده‌های آن و با ترسیم نمودارهای ارائه شده است (شکل ۴). نمودار a و

جدول ۲ - مقایسه مقادیر AIC و SBC جهت انتخاب مدل مناسب سری زمانی

نوع مدل	AIC	SBC
SARIMA(1,0,0)(2,1,0) <sub>12</sub>	-۲۰۵۳/۳۵	-۲۰۴۱/۷۰
SARIMA(1,0,0)(3,1,0) <sub>12</sub>	-۲۰۹۸/۰۱	-۲۰۸۲/۴۷
SARIMA(1,0,0)(0,1,1) <sub>12</sub>	-۲۱۶۶/۱۱	-۲۱۵۸/۳۴
SARIMA(2,0,0)(1,1,1) <sub>12</sub>	-۲۱۶۱/۴۰	-۲۱۴۵/۸۶
SARIMA(2,0,0)(2,1,1) <sub>12</sub>	-۲۱۲۸/۹۰	-۲۱۰۹/۴۷

جدول ۳ - نتایج برآورد پارامترهای مدل

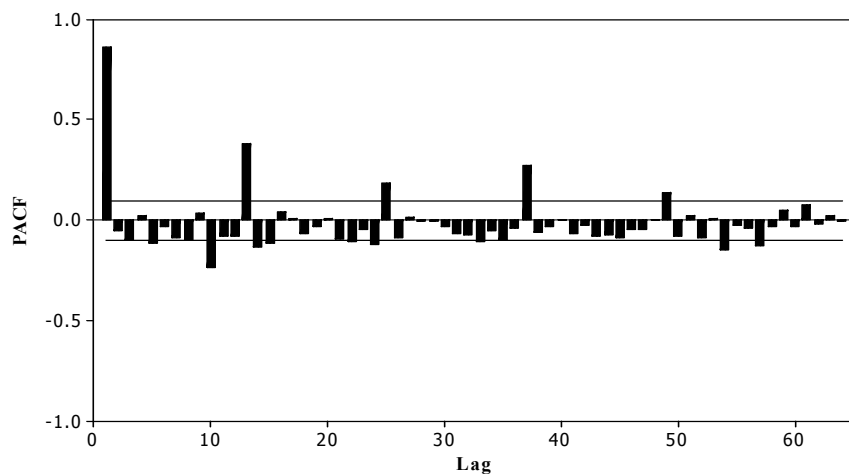
پارامترهای مدل	مقدار برآورد شده	p- مقدار برای آزمون t ( $p < ۰/۰۵$ )
$\phi_1$	۰/۸۷۷	۰/۰۰۰
$\Theta_1$	۰/۹۵۱	۰/۰۰۰



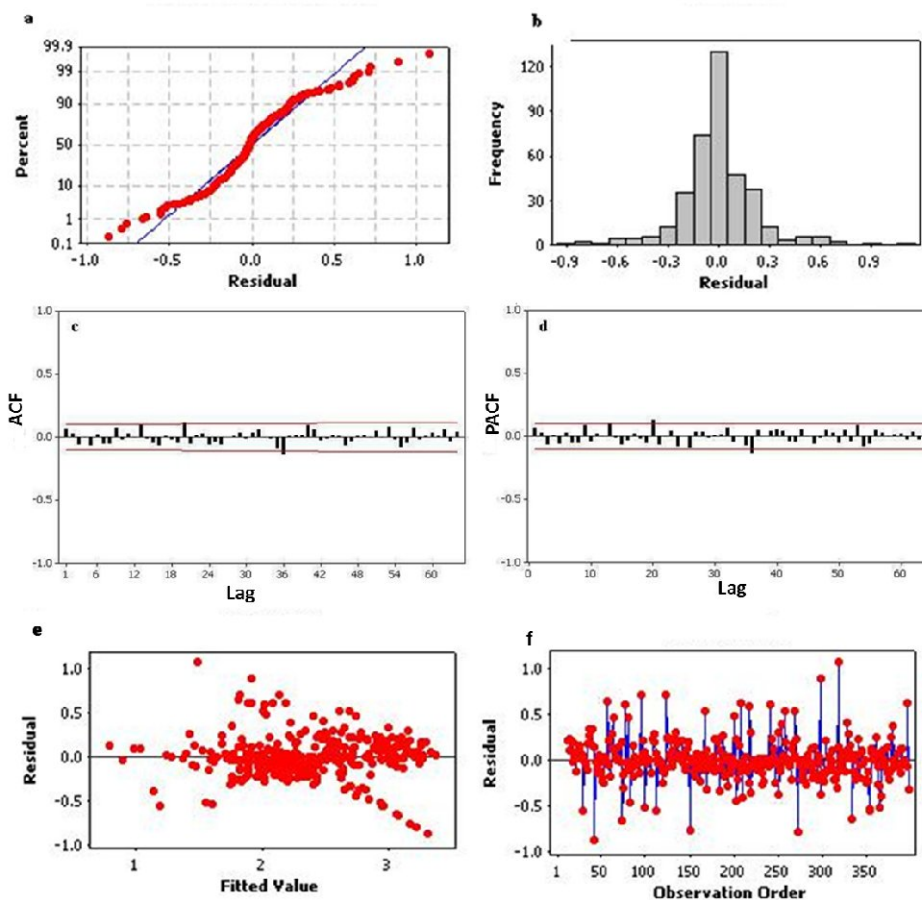
شکل ۲ - نمودار ACF برای سری زمانی شاخص PDSI



شفیعی و همکاران: شبیه‌سازی تصادفی شدت خشکسالی براساس شاخص پالمر



شکل ۳ - نمودار PACF برای سری زمانی شاخص PDSI



شکل ۴ - تشخیص درستی مدل انتخاب شده

## نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه، علاوه بر پایش شدت خشکسالی کشاورزی، بررسی ماهیت تصادفی و پیش‌بینی آن بر پایه شاخص PDSI برای ایستگاه سینوپتیک مشهد بود. نتایج حاصل از پایش خشکسالی با شاخص پالمر نشان داد که در ۳۴ سال مورد بررسی مجموعاً در ۲۶۹ ماه مقدار شاخص کمتر از صفر بوده، یعنی بیش از ۶۴ درصد ماه‌ها خشک بوده‌اند و همچنین در دوره موردنظر ۲۶ دوره خشک مجزا به‌وقوع پیوسته است. در بین این خشکسالی‌ها، طولانی‌ترین دوره خشک ۶۲ ماه (از تاریخ سپتامبر ۱۹۹۸ تا نوامبر ۲۰۰۳) یعنی بیش از پنج سال تداوم داشته است.

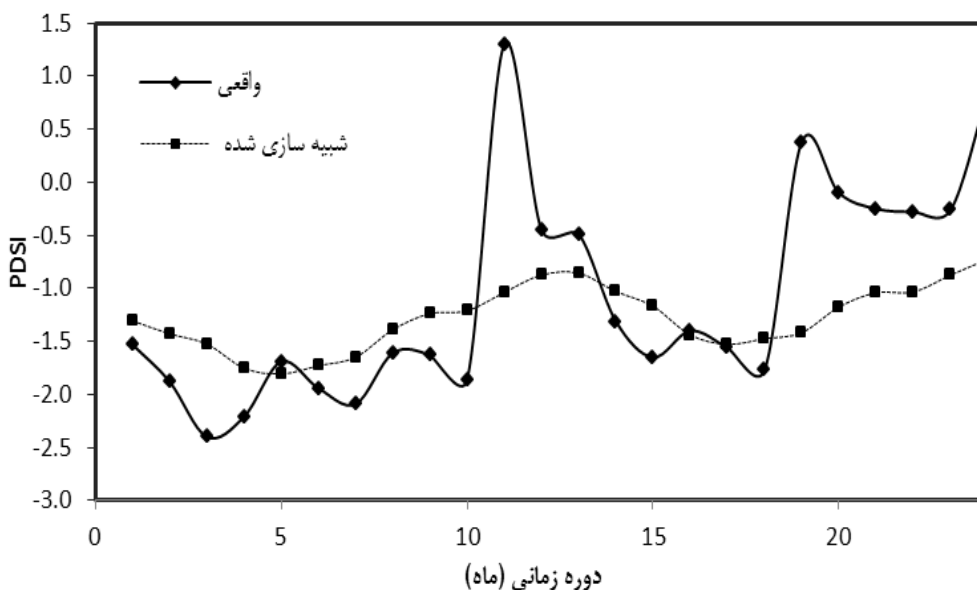
پیش‌بینی شدت خشکسالی براساس روش مدل‌سازی سری زمانی باکس و جینکینس صورت گرفت که بر این اساس نوع مدل تعیین، مناسب‌ترین مدل توسط معیارهای AIC و SBC انتخاب و سپس پارامترهای آن محاسبه شدند که در نهایت توسط تجزیه و تحلیل باقیمانده‌ها کفایت مدل مورد اثبات قرار گرفت. برای داده‌های ماهانه شاخص PDSI در ایستگاه سینوپتیک مشهد، مدل  $SARIMA(1,0,0)(0,1,1)_{12}$  به‌دست آمد که دارای یک مؤلفه اتورگرسیو غیرفصلی و یک مؤلفه میانگین متحرک فصلی می‌باشد. در ادامه جهت بررسی طول مدت قابل پیش‌بینی شاخص PDSI برای ایستگاه مشهد مشخص شد که با استفاده از مدل انتخاب شده برای منطقه موردنظر تنها تا دو ماه بعد را می‌توان پیش‌بینی کرد. مقایسه نتایج این تحقیق با تحقیقات مشابه پیشین که مدل‌سازی سری زمانی شاخص SPI را مورد بررسی قرار داده بودند، نشان داد که شاخص PDSI نسبت به SPI امکان پیش‌بینی کوتاه مدت‌تری را دارد (۷ و ۱۱).

## پیش‌بینی شدت خشکسالی و بررسی طول مدت قابل

### پیش‌بینی

برای اعتبارسنجی مدل از مقادیر محاسبه شده PDSI در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۴ استفاده شده است. شکل (۵) مقادیر پیش‌بینی شده را در مقابل مقادیر واقعی در طول مدت ۲۴ ماه نشان می‌دهد که باتوجه به نمودار نتایج ضعیف می‌باشد. جهت بررسی طول مدت قابل پیش‌بینی شاخص PDSI پیش‌بینی به صورت یک ماه به یک ماه توسط مدل تا شش ماه انجام شده است، بدین‌صورت که با افزودن مقدار شاخص در یک ماه، توسط مدل مقدار شاخص در یک ماه، دو ماه و الی شش ماه بعد پیش‌بینی شده است و این روال تا شش ماه تکرار شده است. سپس ضریب همبستگی (R) بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی محاسبه گردید در جدول (۴) ارائه شده است. نتایج بیان‌گر آن است که با افزایش طول مدت پیش‌بینی، دقت پیش‌بینی کاهش می‌یابد و بر این اساس طولانی‌ترین مدت قابل پیش‌بینی را می‌توان دو ماه در نظر گرفت. در این مورد، نتایج به‌دست آمده که پیش‌بینی خشکسالی را توسط مدل‌های تصادفی برای شاخص‌های SPI-9، SPI-12 و SPI-24 انجام دادند به این نتیجه رسیدند که پیش‌بینی تا سه ماه آینده را براساس شاخص‌های مذکور به‌طور معقول می‌توان پیش‌بینی کرد (۷ و ۱۲). مقایسه نتایج با نتایج تحقیقات قبلی نشان می‌دهد پیش‌بینی شاخص خشکسالی پالمر نسبت به SPI با روش سری‌های زمانی امکان پیش‌بینی کوتاه مدت‌تری را دارد. به‌نظر می‌رسد این تفاوت به دلیل بیشتر بودن پارامترهای تأثیرگذار در محاسبه شاخص پالمر باشد، زیرا شاخص SPI تنها به بارندگی وابسته است. علاوه بر این، در منطقه‌ای که در این مطالعه شاخص پالمر محاسبه شده منطقه‌ای نیمه خشک و دارای نوسانات شدید آب و هوایی می‌باشد، این امر نیز بر کاملاً تصادفی بودن نتایج محاسبه این شاخص در این مطالعه می‌افزاید.

شفیعی و همکاران: شبیه‌سازی تصادفی شدت خشکسالی براساس شاخص پالمر



شکل ۵ - مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی و مشاهده شده شاخص PDSI در مقیاس ماهانه (سال ۲۰۰۳-۰۴)

جدول ۴ - مقادیر ضریب همبستگی (R) محاسبه شده بین مقادیر پیش‌بینی و مشاهده شده شاخص PDSI در فاصله زمانی‌های مختلف

فاصله زمانی (ماه)	۱	۲	۳	۴
R	۰/۸۷	۰/۷۱	۰/۱۴	۰/۱۰

### منابع مورد استفاده

- انصاری م، ثنائی‌نژاد س. ح. و داوری ک (۱۳۸۷) پایش دوره‌های خشک با شاخص شدت خشکسالی پالمر براساس داده‌های رطوبت خاک تخمین زده شده از مدل بیلان آبی: مطالعه موردی استان خراسان. علوم خاک و آب ۲۲(۲): ۲۲۵-۲۳۳.
- عیوضی م، مساعدی ا. و دهقانی ا (۱۳۸۸) مقایسه روشهای مختلف پیش‌بینی شاخص خشکسالی SPI. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک ۱۶(۲): ۱۴۵-۱۶۷.
- نیرومند ح. و بزرگ‌نیا ا (۱۳۷۲) مقدمه‌ای بر تحلیل سری‌های زمانی، تألیف سی‌چتفیلد (ترجمه) مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد.

4 . Box GEP, Jenkins GM and Reinsel GC (1994) Time Series Analysis, Forecasting and Control (3rd edn). Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

5 . Bozdogan H (2000) Akaike's information criterion and recent developments in information complexity. Math. Psychol. 44(2): 62-91.

- 6 . Dracup JA, Lee KS and Paulson ED (1980) On the Definition of Droughts. *Water Resour. Res.* 16(2): 297-302.
- 7 . Durdu F (2010) Application of linear stochastic models for drought forecasting in the Bu"yu"k Menderes river basin, Western Turkey. *Stoch Environ Res. Risk Assess* 24(4): 366-383.
- 8 . Heim RR (2000) Drought indices: a review. In: Wilhite DA (ed) *Drought: a global assessment*. Routledge, London. 120 p.
- 9 . Hipel K and McLeod AI (1994) *Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems*. Elsevier Science B.V., Amsterdam, The Netherlands. 792 p.
- 10 . Lohani VK, Loganathan GV and Mostaghimi S (1998) Long term analysis and short-term forecasting of dry spells by Palmer drought severity index. *Nord. Hydrol.* 29(1): 21-40.
- 11 . Mishra AK and Desai VR (2005) Drought forecasting using stochastic models. *Stoch Environ Res Risk Assess* 19(2): 326-339.
- 12 . Mishra AK and Desai VR (2006) Drought forecasting using feed-forward recursive neural network. *Ecological Modeling* 98(1): 127-138.
- 13 . Panu US and Sharma TC (2002) Challenges in drought research: some perspectives and future directions. *Hydrol. Sci.* 47(S): 19-30.
- 14 . Smakhtin VU and Hughes DA (2004) Review, automated estimation and analysis of drought indices in South Asia. Working Paper 83, Colombo, Sri Lanka, IWMI.
- 15 . Wilhite DA and Glantz MH (1985) Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water Int.* 10: 111-120.
- 16 . Yurekli K, Kurunc A and Cevik O (2004) Simulation of drought periods using stochastic models. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 28(3): 181-190.

## Stochastic Simulation of Drought Severity Based on Palmer Index

M. Shafiei\*<sup>1</sup>, B. Ghahraman<sup>2</sup>, H. Ansari<sup>3</sup> and M. B. Sharifi<sup>4</sup>

(E-mail: shafiei9@gmail.com)

### Abstract

Drought is a gradual phenomenon and cause important changes in water resources, agriculture and so on. Due to the stochastic behavior of factors that influence the occurrence and intense of drought, one can consider this phenomenon as a stochastic process. With respect to the importance of predicted drought severity and its vital influence in designing and operating water resources systems, this article includes agricultural drought monitoring in 34 years (1971-2004) and use stochastic modeling to predict agricultural drought based on Palmer Drought Severity Index (PDSI) in the synoptic station of Mashhad. Results of drought monitoring in 34 years show that more than 64% of months were drought and also in the recent years, duration and severity of drought are increased that in the 50% of preliminary of data (1971-1988), sum of palmer index was 129.81 and in the residual years it was -241.07, it means that more than 285 percent change has been observed. Using Time series modeling based on Box and Jenkins approach, with three stages; model identification, parameter estimation and diagnostic checking, finally the SARIMA(1,0,0)(0,1,1)<sub>12</sub> was developed. Also, the stochastic model developed to predict drought was found to give reasonably good results up to 2-month lead time.

**Keywords:** Agricultural drought, Mashhad, Palmer index, Time series

---

1 - Ph.D. Student, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Khorasan-Razavi – Iran

**(Corresponding Author \*)**

2 - Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Khorasan-Razavi - Iran

3 - Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Khorasan-Razavi - Iran

4 - Associate Professor, Department of Civil Engineering, College of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Khorasan-Razavi - Iran