

کاربرد روش‌های فراکاوشی در پایش خشکسالی (مطالعه موردی: ایستگاه تبریز)

یوسف حسن زاده¹، امین عبدی کردانی^{2*} و احمد فاخری فرد³

تاریخ دریافت: 89/05/30 تاریخ پذیرش: 89/12/16

- 1- استاد، گروه مهندسی عمران - آب، دانشکده فنی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز
 - 2- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران - آب، دانشکده فنی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز
 - 3- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
- * مسئول مکاتبه: E-mail: amin.abdi@yahoo.com

چکیده

سیستم‌های پایش خشکسالی، از موثرترین عوامل در تدوین طرح‌های مقابله با خشکسالی و مدیریت منطقی آن می‌باشند. چنین سیستم‌هایی با استفاده از شاخص‌های خشکسالی طراحی می‌گردند و هدف آنها ارائه یک ارزیابی ساده و کمی از ویژگی‌های خشکسالی است. از میان شاخص‌های موجود جهت پایش خشکسالی، شاخص بارندگی استاندارد شده بطور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین منظور در این تحقیق جهت تخمین دقیق‌تر شاخص فوق در ایستگاه تبریز برای سال‌های 1965 تا 2004، از روش‌های فراکاوشی همچون الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی استفاده گردیده و در نهایت نشان داده شده که الگوریتم ژنتیک و سپس الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی نسبت به روش حداکثر درست‌نمایی، نتایج مطلوبی را در تحلیل شاخص بارندگی استاندارد شده ارائه می‌دهند. این یافته منجر به پایش دقیق‌تر خشکسالی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی، روش حداکثر درست‌نمایی

Application of Meta-heuristic Methods in Drought Monitoring (Case study: Tabriz station)

Y Hassanzadeh¹, A Abdi Kordani^{2*}, A Fakheri Fard³

Received: 21 August 2010, Accepted: 7 March 2011

¹Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Civil Engin., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

²Ph.D. Stud., Dept. of Water Eng., Faculty of Civil Eng., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

³Prof., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

*Corresponding author E-mail: amin.abdi@yahoo.com

Abstract

Drought monitoring systems are efficient factors in providing methods for drought mitigation and its logic management. These systems are designed by using of drought indices and their goals are presenting a simple and quantitative evaluation of drought characteristics. From the many of drought indices, the standardized precipitation index is used vastly for drought monitoring. For this purpose in the present study, meta-heuristic methods such as genetic algorithm and simulated annealing algorithm were used for accurate estimation of this index in Tabriz station for 1965 to 2004. The results showed that genetic algorithm and then simulated annealing algorithm had better results, respectively, in analyzing standardized precipitation index in comparison with maximum likelihood method which was conducted to precisely monitor drought events.

Keywords: Drought monitoring, Genetic algorithm, Simulated annealing algorithm, Standardized precipitation index

خشکسالی می‌باشد که اطلاعات استخراج شده از آن، تعیین کننده زمان شروع و پایان خشکسالی و نوع عملیات مقابله با آن می‌باشد. چنین سیستم‌هایی با استفاده از شاخص‌های خشکسالی طراحی و ارائه می‌گردند (ویلهایت 2000).

از میان شاخص‌های موجود جهت تحلیل خشکسالی، شاخص بارندگی استاندارد شده¹ (SPI) به علت سادگی محاسبات، استفاده از داده‌های قابل دسترس بارندگی، قابلیت محاسبه برای هر مقیاس زمانی و مکانی دلخواه، به عنوان مناسب‌ترین شاخص جهت بدست آوردن مشخصات خشکسالی شناخته می‌

مقدمه

خشکسالی از ویژگی‌های دائمی یک منطقه محسوب نمی‌شود و ممکن است در هر رژیم آب و هوایی اتفاق بیافتد. این پدیده یکی از پر آسیب‌ترین بلایای وابسته به آب و هوا می‌باشد که بر جوامع مختلف اعم از محیطی و انسانی اثر می‌گذارد. از آنجا که وقوع خشکسالی اجتناب‌ناپذیر است، بنابراین مدیریت منطقی برای مقابله با این بلای طبیعی و ایجاد سیستم مدیریتی ریسک و ارائه اطلاعات صحیح در مقیاس‌های زمانی مختلف، امری لازم و ضروری خواهد بود (ویلهایت 2005). طراحی سیستم‌های پایش خشکسالی، به عنوان یکی از مولفه‌های موثر در سیستم پیش‌آگاهی مدیریت

¹ Standardized precipitation index

های 2005-1861 به پایش خشکسالی هواشناسی در قسمت‌های مرکزی لهستان پرداخته و مشخصات و ویژگی‌های خشکسالی‌های بارز طی سال‌های 2005-1991 را بررسی کرده است. وی به این نتیجه رسیده است که استفاده از شاخص SPI محاسبه شده در بازه‌های یک تا سه ماهه برای پایش خشکسالی‌های کشاورزی و زراعتی موثرتر از شاخص SPI شش ماهه می‌باشد. به منظور تخمین پارامترهای توزیع آماری پایه که جهت استخراج SPI بکار گرفته شده، تاکنون از روش‌های کلاسیکی همچون روش حداکثر درست‌نمایی¹ استفاده شده است، در صورتیکه اخیراً روش‌های فراکاوشی² نیز به عنوان ابزار تخمین پارامتر، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

یکی از این روش‌ها، الگوریتم ژنتیک³ می‌باشد که در بهینه‌سازی و تخمین پارامترهای مدل‌های هیدرولوژیکی کاربرد فراوان دارد و از سال 1990 تاکنون در زمینه‌های مختلفی از مهندسی آب استفاده شده است، که برای نمونه به چند مورد اخیر در اینجا اشاره می‌شود. کاراهان و همکاران (2007) جهت پیش‌بینی شدت بارش به ازای دوره‌های بازگشت مختلف، از الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند و نشان دادند که با کاربرد الگوریتم ژنتیک، دیگر هیچ نیازی به استفاده از تبدیل‌های ریاضی وجود ندارد. همچنین نتایج حاصل از کمترین خطای مربعات نشان داد که روش الگوریتم ژنتیک، بهترین برازش را بر داده‌های اندازه‌گیری شده ارائه می‌دهد. چن و همکاران (2008) برای پیش‌بینی جریان رودخانه‌ای، به تحلیل غیر خطی سری‌های زمانی، با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. با توجه به اینکه پیش‌بینی دقیق‌تر و صحیح‌تر، منجر به تصمیم‌گیری‌های مفید و موثر در منابع آب می‌شود، لذا آنها نتیجه گرفتند که الگوریتم ژنتیک نسبت به روش‌های قدیمی تحلیل سری‌های زمانی عملکرد بسیار مناسبی

شود و در حال حاضر بطور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از شاخص SPI، می‌توان به چند مورد که در سال‌های اخیر انجام شده است اشاره نمود:

وو و همکاران (2005) به منظور بررسی اثر طول دوره آمار بارندگی بر شاخص SPI، به محاسبه این شاخص در هشت ناحیه آب و هوایی متمایز ایالت نبراسکا در ایالات متحده آمریکا پرداختند. بدین منظور آمار بارندگی بلند مدت و کوتاه مدت بارش با طول مشترک زمانی 30 ساله شانزده ایستگاه هواشناسی در نواحی مذکور برای محاسبه شاخص SPI با استفاده از توزیع گاما مورد استفاده قرار گرفت. نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان داد، در صورتیکه برای آمار بارش با طول دوره‌های مختلف، تابع توزیع احتمالاتی گاما استفاده شده باشد، شاخص SPI محاسبه شده با طول دوره‌های متفاوت، با یکدیگر مشابه هستند و هرچه طول دوره آمار بارندگی بیشتری جهت محاسبه شاخص SPI به کار گرفته شود، مقادیر شاخص بدست آمده دقیق‌تر خواهند بود. پتل و همکاران (2007) با مطالعه منطقه گجرات هندوستان از آمار بارش 23 ساله (2003-1981) برای محاسبه شاخص بارندگی استاندارد شده در این منطقه استفاده کردند، و نقشه گستره خشکسالی‌ها را برای سال‌های مختلف تهیه نمودند. این تحقیق کارایی شاخص SPI را در پایش تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی‌های هواشناسی در مناطق خشک و نیمه خشک هندوستان آشکار می‌کند و شاخص SPI سه ماهه در مطالعه و بررسی الگوهای خشکسالی فصلی در ابعاد زمانی و مکانی مختلف موثر شناخته شده است. آنها با پایش خشکسالی این منطقه با استفاده از شاخص SPI به این نتیجه رسیدند که سال 1987 دارای سخت‌ترین رویداد خشکسالی در 20 سال اخیر بوده است. لابدزکی (2007) با محاسبه شاخص بارندگی استاندارد شده در مقیاس‌های 3، 6، 12، 24 و 48 ماهه و با استفاده از آمار طولانی مدت بارش سال-

¹ Maximum likelihood

² Metaheuristic methods

³ Genetic algorithm

استفاده نمودند و در انتها به این نتیجه رسیدند که روش شبیه‌سازی حرارتی، جواب‌های بهینه و بسیار قابل قبولی را ارائه می‌کند. کنها و سوسا (1999) به طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب با استفاده از روش شبیه‌سازی حرارتی پرداختند. از مقایسه روش فوق با روش جستجوی نیوتنی جهت حل معادلات شبکه‌های هیدرولیکی، چنین نتیجه گرفتند که کاربرد روش شبیه‌سازی حرارتی بسیار آسان بوده و نتایج بدست آمده از آن دارای کیفیت بالایی می‌باشد که در نهایت منجر به کاهش هزینه‌های شبکه‌های توزیع آب می‌شود. چپو و همکاران (2007) برای عملکرد بهینه مخزنی در تایوان، از روش ترکیبی الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی حرارتی استفاده نمودند. آنها نشان دادند که روش ترکیبی فوق، احتمال یافتن جواب بهینه را افزایش می‌دهد در حالیکه باعث کاهش زمان محاسباتی می‌شود. هوآنگ و همکاران (2008) از روش شبیه‌سازی حرارتی جهت تخمین پارامترهای سفره آبهای زیرزمینی با استفاده از آزمایش پمپاژ استفاده کردند. نتایج روش فوق، دقت بهتری را نسبت به روش‌های گرافیکی نشان داد.

در این تحقیق استفاده از روش‌های فراکاووشی همچون الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی جهت پایش خشکسالی مدنظر است که برای انجام این منظور از داده‌های بارندگی ماهانه ایستگاه هواشناسی تبریز استفاده شده است و در نهایت، نتایج حاصل با روش حداکثر درستی مورد مقایسه و ارزیابی قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

تبریز یکی از شهرهای بزرگ ایران و مرکز استان آذربایجان شرقی است. این شهر با مساحتی در حدود 140 کیلومتر مربع، بزرگ‌ترین شهر منطقه شمال غرب کشور می‌باشد که در 46 درجه و 25 دقیقه طول شرقی،

دارد. موهان و ویجیال آکشمی (2008) پارامترهای هیدروگراف واحد لحظه‌ای ناش را با استفاده از روش گشتاورها¹، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم صعود قله² برای دو حوضه با آب و هوای مختلف تخمین زدند. آنها با استفاده از معیار نیکویی برازش³ که نشان دهنده خطای بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی می‌باشد، نتیجه گرفتند که دو روش الگوریتم ژنتیک و الگوریتم صعود قله نتایج بهتر و قابل قبولی را ارائه می‌دهند. حسن‌زاده و همکاران (2011) از روش‌های فراکاووشی همچون الگوریتم ژنتیک و الگوریتم جامعه مورچگان⁴، جهت تخمین پارامترهای توزیع‌های آماری مورد استفاده در تحلیل فراوانی جریان‌های سیلابی از قبیل مقدار حدی تعمیم یافته، پیرسون نوع سوم، لوگ نرمال سه پارامتری، لجستیک تعمیم یافته، پاریتوی تعمیم یافته، کاپا و ویکی در استان آذربایجان شرقی استفاده نمودند و در نهایت نتیجه گرفتند که دو روش فراکاووشی فوق، در قیاس با سایر روش‌های معمول تخمین پارامتر همچون روش حداکثر درستی، گشتاورها و گشتاورهای وزنی احتمال⁵ جواب‌های بهتری را ارائه می‌دهند.

بهینه‌سازی توسط الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی⁶، یکی دیگر از روش‌های فراکاووشی می‌باشد که بر اساس شبیه‌سازی سرد کردن مواد در یک محفظه گرمایش، جهت رسیدن به پائین‌ترین حالت انرژی ممکن ذرات ماده، ابداع شده است. این روش جهت مسائل بهینه‌سازی به صورت موفقیت آمیز بکار برده شده است. در زمینه هیدرولوژی و منابع آب تحقیقات اندکی درباره کاربرد روش شبیه‌سازی حرارتی صورت گرفته است. دوگرتی و ماریوت (1991) از روش شبیه‌سازی حرارتی برای حل مسائل مدیریت آب‌های زیرزمینی

¹ Method of moments

² Hill climbing algorithm

³ Goodness of fit test

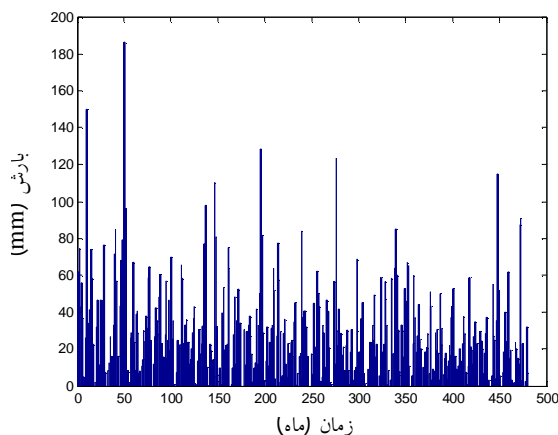
⁴ Ant colony optimization

⁵ Probability weighted moments

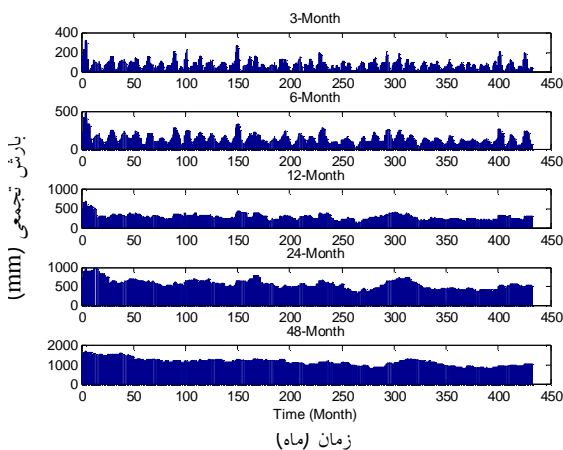
⁶ Simulated annealing algorithm

و 38 درجه و 2 دقیقه عرض شمالی از نصف النهار مبدا واقع شده است.

شهر تبریز از سمت شمال، جنوب و شرق به کوهستان و از سمت غرب به زمین‌های هموار و شوره‌زارهای تلخ‌رود محدود شده و به شکل یک چاله نسبتاً بزرگ و یا یک جلگه بین کوهی درآمد است. ارتفاع این شهر از سطح دریا بین 1350 متر تا 1550 متر در نقاط مختلف آن متغیر بوده و شیب عمومی زمین‌های تبریز به سمت مرکز شهر و سپس به سمت مغرب می‌باشد. در این تحقیق از آمار بارندگی‌های ماهانه 40 ساله، مربوط به سال‌های 1965 تا 2004 از ایستگاه هواشناسی شهر تبریز استفاده گردیده است، که در شکل 1 ارائه شده است.



شکل 1- سری زمانی بارندگی‌های ماهانه



شکل 2- سری زمانی بارندگی‌های تجمعی ماهانه

شکل 2 نشان دهنده سری زمانی بارندگی‌های تجمعی در مقیاس‌های زمانی مختلف (3، 6، 12، 24 و 48 ماه) می‌باشد که جهت محاسبه شاخص بارندگی استاندارد شده، از آنها استفاده می‌شود.

همچنین مشخصات مربوط به بارندگی‌های تجمعی از قبیل میانگین و واریانس، در جدول 1 ارائه شده است.

شاخص بارندگی استاندارد شده

با توجه به بررسی تأثیرات متفاوت بارش بر روی آبهای زیرزمینی، ذخایر و منابع آبهای سطحی، رطوبت خاک، پوشش‌های برفی و جریان آبراهه‌ها، مکی و همکاران (1993) شاخص جدیدی را به نام شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI) به منظور پایش وضعیت خشکسالی توسعه دادند.

شاخص SPI با مقایسه کل بارندگی تجمعی برای ایستگاه یا ناحیه‌ای خاص در یک فاصله زمانی مشخص با میانگین دراز مدت بارندگی برای همان فاصله زمانی، در طول دوره آماری بدست می‌آید.

مشخصه اصلی SPI انعطاف‌پذیری در اندازه‌گیری خشکسالی در مقیاس‌های زمانی متفاوت است، زیرا که خشکسالی‌ها از لحاظ مدت بسیار گسترده می‌باشند. بنابراین تشخیص و پیش‌بینی آنها با انواع مقیاس‌های زمانی مهم می‌باشد. مقیاس زمانی، اثرات خشکسالی را بر روی میزان تغییرات منابع آب نشان می‌دهد. کمبود بارش در مقیاس زمانی کوتاه مدت عمدتاً بر روی وضعیت رطوبت خاک اثر می‌گذارد، در صورتیکه کمبود بارش در مقیاس زمانی طولانی مدت اغلب بر آبهای زیرزمینی، جریان رودخانه و ذخایر و منابع آب تأثیرگذار است.

با توجه به این موضوع مکی و همکاران مقیاس-های زمانی 3، 6، 12، 24 و 48 ماهه را برای تحلیل خشکسالی مدنظر قرار دادند (گاتمن 1999).

جدول 1- میانگین و واریانس بارندگی‌های تجمعی ماهانه، در مقیاس‌های زمانی مختلف

ماه میلادی												بارش تجمعی (mm)
12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
73/68	55/55	30/74	15/29	23/79	62/53	107/76	131/13	109/29	79/28	67/54	76/46	3 ماهه
88/98	79/34	93/27	123/06	154/93	171/82	187/04	198/67	185/74	157/08	125/21	108/76	6 ماهه
276/02	278/01	279/01	280/14	280/14	280/58	279/96	281/47	281/30	280/86	281/45	281/41	12 ماهه
557/61	559/36	560/44	561/87	562/10	562/51	561/80	562/97	564/50	563/35	564/39	564/24	24 ماهه
1125/52	1125/85	1125/16	1131/68	1133/52	1133/94	1133/19	1135/31	1136/56	1134/46	1137/86	1139/08	48 ماهه
33/96	31/58	23/89	14/65	16/84	32/12	47/14	54/97	52/13	35/48	29/74	32/30	3 ماهه
35/27	37/02	38/70	46/62	58/70	60/46	62/70	65/65	70/28	62/26	45/03	43/71	6 ماهه
74/42	77/12	77/97	78/95	76/39	75/88	76/10	79/37	92/90	90/57	82/55	83/95	12 ماهه
127/92	125/51	126/25	120/38	116/69	116/00	116/30	117/62	129/57	133/29	132/21	134/26	24 ماهه
196/15	194/32	191/21	198/63	197/36	196/62	196/83	197/69	204/08	209/52	209/97	210/19	48 ماهه

محاسبه نمی‌شود، وجود رطوبت از دوره ترسالی گذشته می‌باشد، ولی در پایان خشکسالی این مقدار SPI نشانگر خشکسالی خفیف است، چون ذخیره رطوبت به پایان رسیده و این مقدار، کمبود رطوبت را بعد از دوره خشکسالی نشان می‌دهد (مکی و همکاران 1993).

جدول 2- طبقه‌بندی خشکسالی بر اساس شاخص SPI

مقادیر شاخص	شدت خشکسالی
2/00 و بیشتر	ترسالی خیلی شدید
1/50 تا 1/99	ترسالی شدید
1/00 تا 1/49	ترسالی ملایم
0/99 تا -0/99	نزدیک به نرمال
-1/00 تا -1/49	خشکسالی ملایم
-1/50 تا -1/99	خشکسالی شدید
-2/00 و کمتر	خشکسالی خیلی شدید

محاسبه SPI بدین ترتیب انجام پذیرفته است که ابتدا سری زمانی داده‌های بارندگی ماهانه در بازه‌های زمانی 3، 6، 12، 24 و 48 ماهه تشکیل داده شده و سپس هر یک از سری‌های فوق با مقیاس زمانی متفاوت، با یک توزیع آماری برآزش داده می‌شوند تا احتمال تجمعی بارندگی برای ماه معین و مقیاس زمانی مشخص، بدست آید.

این احتمال سپس به متغیر نرمال (Z)، تبدیل گردیده است که یک مقدار نرمال شده با میانگین صفر و انحراف معیار یک می‌باشد. از اینرو در حقیقت SPI مقدار انحرافات استاندارد است که یک رویداد مشخص از شرایط نرمال منحرف می‌شود. بدین ترتیب طبقه‌بندی خشکسالی بر اساس مقادیر SPI در جدول 2 ارائه می‌شود (میشرا و همکاران 2009).

بر اساس شاخص SPI یک رویداد خشکسالی دوره-ای است که SPI دائماً منفی باشد و به مقدار کمتر از -1 برسد و زمانی پایان می‌پذیرد که SPI مثبت شود. علت اینکه در بازه صفر تا -0/99 در شروع خشکسالی

توزیع دو پارامتری گاما

همان‌طوریکه قبلاً نیز اشاره شد، محاسبه شاخص SPI مستلزم برازش مناسب‌ترین توزیع احتمالاتی به سری‌های زمانی طولانی مدت داده‌های بارندگی در هر ایستگاه می‌باشد.

مکی و همکاران (1993) از توزیع دو پارامتری گاما، جهت برازش توزیع آماری بر سری‌های زمانی بارندگی استفاده نمودند و آنرا طرح شاخص SPI قرار دادند.

تابع چگالی احتمال¹ توزیع گاما به صورت زیر می‌باشد (میشرا و دسای 2005):

$$f(x) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} x^{a-1} e^{-x/b} \quad [1]$$

در رابطه فوق $x \geq 0$ مقدار بارندگی، $a > 0$ پارامتر شکل² و $b > 0$ پارامتر مقیاس³ می‌باشند و $\Gamma(a)$ تابع گاما بوده که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} x^{a-1} e^{-x} dx \quad [2]$$

با استفاده از روش حداکثر درست‌نمایی، مقادیر a و b را بر اساس معادلات زیر می‌توان برآورد نمود:

$$A = \ln(\bar{x}) - \left[\sum_{i=1}^n \ln(x_i) \right] / n \quad [3]$$

$$a = \left[1 + \sqrt{1 + 4A/3} \right] / 4A \quad [4]$$

$$b = \bar{x} / a \quad [5]$$

که در آن \bar{x} میانگین بارندگی برای یک ماه مشخص و n تعداد مشاهدات بارندگی می‌باشد. پارامترهای محاسبه شده از توزیع فوق، جهت بدست آوردن احتمال تجمعی بارندگی برای ماه و مقیاس زمانی مشخص، برای هر یک از ایستگاه‌ها بکار گرفته می‌شود (وو و همکاران 2005).

توزیع چهار پارامتری کاپا⁴

گاتمن (1999) به این نتیجه رسید که اگر از توزیع-های آماری مختلفی جهت برازش بر داده‌های بارندگی به جای توزیع گاما استفاده شود، مقادیر SPI متفاوتی بدست می‌آید. از روش‌های تحلیل آماری، استفاده از توزیع چهار پارامتری کاپا می‌باشد که توسط هاسکینگ (1994) ارائه شده است. توزیع چهار پارامتری کاپا به دلیل در برداشتن تعداد پارامتر بیشتر نسبت به سایر توزیع‌های دو و سه پارامتری، خصوصیات بیشتری از سری را بیان می‌کند (حسن‌زاده و همکاران 2009). لذا در این تحقیق سعی شده است که علاوه بر معرفی توزیع چهار پارامتری کاپا و روش‌های تخمین پارامترهای آن، به کارایی این توزیع جهت محاسبه شاخص SPI پرداخته شود. تابع چگالی احتمال توزیع کاپا بصورت زیر ارائه شده است (هاسکینگ 1994):

$$f(x) = \frac{1}{a} \left[1 - k \left(\frac{x-x}{a} \right) \right]^{1/k-1} \times \left\{ 1 - h \left[1 - k \left(\frac{x-x}{a} \right) \right]^{1/k} \right\}^{1/h-1} \quad [6]$$

تابع توزیع تجمعی⁵ کاپا در زیر آورده شده است:

$$F(x) = \left\{ 1 - h \left[1 - k \left(\frac{x-x}{a} \right) \right]^{1/k} \right\}^{1/h} \quad [7]$$

همچنین تابع چندک⁶ (معکوس تابع توزیع تجمعی)

برای توزیع کاپا بصورت زیر بیان می‌شود:

$$x(F) = x + a/k [1 - \{(1-F^h)/h\}^k] \quad [8]$$

که در روابط فوق x مقدار متغیر تصادفی و x, a, k, h پارامترهای توزیع می‌باشند، که از چهار پارامتر فوق x پارامتر موقعیت⁷، a پارامتر مقیاس، k مقیاس، k و h پارامترهای شکل می‌باشند.

⁴ 4-parameter Kappa distribution

⁵ Cumulative distribution function (cdf)

⁶ Quantile function

⁷ Location parameter

¹ Probability density function (pdf)

² Shape parameter

³ Scale parameter

ارائه می‌کند و از اینرو چندک‌های برآورد شده آن قابل اعتماد می‌باشند (رائو و حامد 2000). همچنین با توجه به اینکه در این تحقیق جهت محاسبه پارامترهای توزیع دو پارامتری گاما از روش حداکثر درستنمایی استفاده شده است، لذا از این روش کلاسیک در تعیین پارامترهای توزیع چهار پارامتری کاپا استفاده می‌شود.

جدول 4- حدود متغیر x به ازای مقادیر مختلف h و k

حدود x	حدود h و k
$x + [a(1-1/h^k)]/k \leq x \leq x + a/k$	$h > 0$ $k > 0$
$x + a \log h \leq x < \infty$	$h > 0$ $k = 0$
$x + [a(1-1/h^k)]/k \leq x < \infty$	$h > 0$ $k < 0$
$-\infty < x \leq x + a/k$	$h \leq 0$ $k > 0$
$-\infty < x < \infty$	$h \leq 0$ $k = 0$
$x + a/k \leq x < \infty$	$h \leq 0$ $k < 0$

تابع درستنمایی برای یک نمونه با اندازه n از یک توزیع کاپا در معادله زیر آورده شده است:

$$L = \prod_{i=1}^n \left[\frac{1}{a} \left[1 - k \left(\frac{x_i - X}{a} \right) \right]^{1/k - 1} \times \left\{ 1 - h \left[1 - k \left(\frac{x_i - X}{a} \right) \right]^{1/k} \right\}^{1/h - 1} \right] \quad [9]$$

تابع درستنمایی لگاریتمی بصورت زیر بیان می‌شود:

$$L^* = \ln L = -n \ln a + \left(\frac{1-k}{k} \right) \sum_{i=1}^n \ln \left[1 - k \left(\frac{x_i - X}{a} \right) \right] + \left(\frac{1}{h} - 1 \right) \sum_{i=1}^n \ln \left[1 - h \left\{ 1 - k \left(\frac{x_i - X}{a} \right) \right\}^{1/k} \right] \quad [10]$$

با مشتق جزئی گرفتن از لگاریتم L نسبت به هر یک از پارامترهای x, a, k, h و مساوی صفر قرار دادن

خانواده توزیع‌هایی که از توزیع کاپا و به ازای مقادیر مختلف h و k بدست می‌آیند، در جدول 3 نشان داده شده است (عبدی و فاخری فرد 1387).

جدول 3- حالت‌های خاص توزیع کاپا

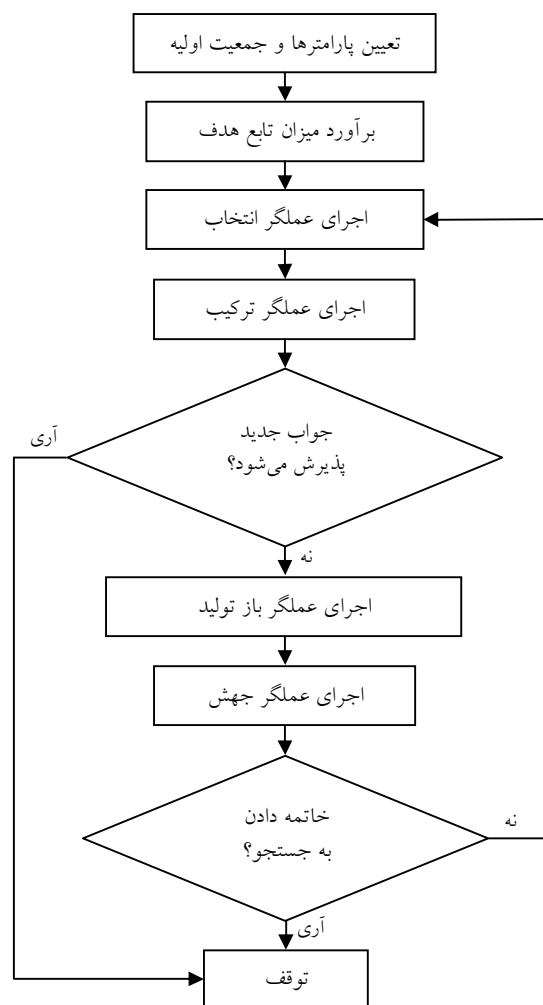
h	k	توزیع احتمالاتی
		پاریتوی تعمیم یافته
1	$\neq 0$	$F(x) = 1 - \left[1 - \frac{k}{a}(x - X) \right]^{1/k}$
		مقدار حدی تعمیم یافته
0	$\neq 0$	$F(x) = \exp \left(- \left[1 - \frac{k}{a}(x - X) \right]^{1/k} \right)$
		لجستیک تعمیم یافته
-1	$\neq 0$	$F(x) = 1 / \left(1 + \left[1 - \frac{k}{a}(x - X) \right]^{1/k} \right)$
		نمایی
1	0	$F(x) = 1 - \exp \left[- \frac{(x - X)}{a} \right]$
		گامبل
0	0	$F(x) = \exp \left(- \exp \left[- \frac{(x - X)}{a} \right] \right)$
		لجستیک
-1	0	$F(x) = 1 / \left(1 + \exp \left[- \frac{(x - X)}{a} \right] \right)$
		یکنواخت
1	1	$F(x) = \frac{(x - X)}{a}$

مرزهای پایینی و بالایی برای متغیر تصادفی x بستگی به مقادیر پارامترهای توزیع دارد که در جدول 4 ارائه شده است (پریدا 1999 و سینگ و دنگ 2003). از میان روش‌های کلاسیک تخمین پارامترهای یک توزیع آماری، روش حداکثر درستنمایی به نظر می‌رسد که یکی از کارآمدترین روش‌ها باشد، چون کمترین واریانس نمونه گیری از پارامترهای برآورد شده را

مکانیسمی است که در اثر آن یک تغییر غیر سازمان یافته و کاملاً تصادفی به یک رشته داده می‌شود.

پس از مراحل فوق، جمعیت جدیدی جایگزین جمعیت پیشین می‌شود و این چرخه ادامه می‌یابد. در نهایت هنگامی جستجو نتیجه بخش خواهد بود که کمترین خطای ممکن حاصل شود (سیواناندام و دیپا 2008).

شکل 3 ساختار پایه‌ای الگوریتم ژنتیک را در یک نمای کلی نشان می‌دهد.



شکل 3- ساختار پایه‌ای الگوریتم ژنتیک

نتایج با صفر، چهار معادله چهار مجهولی بدست می‌آید، که جهت حل چهار معادله فوق از روش تکراری نیوتن-رافسون استفاده می‌شود.

الگوریتم ژنتیک

تفکر اصلی الگوریتم ژنتیک از نظریه تکامل داروین گرفته شده است. نظریه داروین بیانگر این نکته است که آن دسته از خصوصیات و صفاتی در طبیعت پایدار می‌مانند که با قانون طبیعت سازگاری بیشتری داشته باشند و هر چه این سازگاری بیشتر باشد شانس ادامه حیات آن بیشتر است.

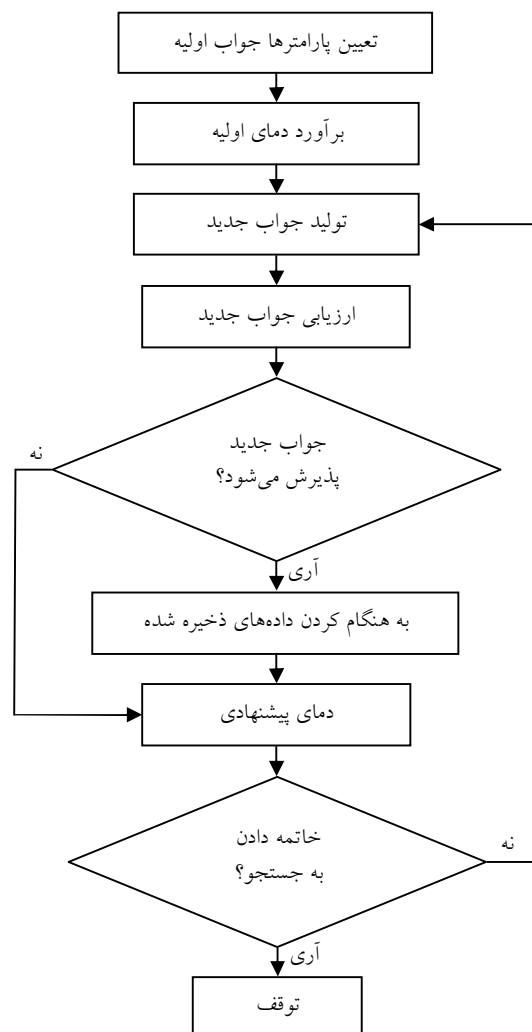
بدین ترتیب می‌توان دید که طبیعت با بهره‌گیری از یک روش بسیار ساده (حذف تدریجی گونه‌های نامناسب و در عین حال تکثیر بالاتر گونه‌های بهینه) توانسته است، دائماً هر نسل را از لحاظ خصوصیات مختلف ارتقاء بخشد (سیواناندام و دیپا 2008).

روند کلی حل مسائل توسط الگوریتم ژنتیک بدین گونه است که ابتدا تعدادی از جواب‌های شدنی مسأله مورد نظر را به صورت تصادفی و یا گاهی به صورت از قبل تعیین شده، به عنوان جمعیت اولیه انتخاب می‌کند و سپس هر یک از جواب‌ها به صورت رشته‌هایی که کروموزوم نامیده می‌شوند کدگذاری می‌شوند.

برای تولید نسل بعدی از روی نسل فعلی، از عملگر-های ژنتیکی شامل انتخاب، ترکیب، باز تولید، جهش و دیگر عملگرهای احتمالی استفاده می‌شود.

انتخاب روندی است که اگر کروموزومی دارای شایستگی بالاتری باشد، شانس خود را برای بقاء در سیستم افزایش می‌دهد. در عملگر انتخاب والدین به صورت زوج درآمده، به این ترتیب که هر کروموزوم با یک کروموزوم دیگری که به صورت تصادفی انتخاب می‌شود، ترکیب می‌گردد تا نسل جدید را ایجاد کند. در عملگر باز تولید، کروموزومی از نسل فعلی، مستقیماً و بدون تغییر به نسل بعدی منتقل می‌شود. عملگر جهش

الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی



شکل 4- ساختار پایه‌ای الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی

معیار نیکویی برازش

جهت بررسی صحت نتایج خروجی که در واقع بیان‌کننده اختلاف بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی می‌باشد، از معیارهای متفاوتی استفاده می‌گردد. معیارهای نیکویی برازش به دو صورت گرافیکی¹ و آماری² می‌باشند که هر کدام از آنها ویژگی‌های منحصر به خود را داشته و به منظور خاصی بکار می‌روند.

ایده اصلی در روش شبیه‌سازی حرارتی نخستین بار توسط متروپلیس و همکاران (1953) مطرح شد. آن‌ها الگوریتم ساده‌ای را طراحی کردند تا مجموعه اتم‌ها را در یک درجه حرارت خاص شبیه‌سازی نماید. در هر مرحله به یک اتم حرکت تصادفی اعمال می‌شود و تغییر انرژی حاصل از آن (ΔE) محاسبه می‌گردد. اگر $\Delta E < 0$ باشد تغییر حاصل پذیرفته می‌شود، اما اگر $\Delta E > 0$ باشد، تغییر با تابع احتمال $P(\Delta E)$ پذیرفته می‌گردد.

$$P(\Delta E) = \exp\left(\frac{-\Delta E}{K T}\right) \quad [11]$$

که در آن K ثابت بولتزمن، T دما، ΔE افزایش انرژی می‌باشد. احتمال پذیرش حرکت اشتباه، تابعی از دمای سیستم و تغییرات در تابع هدف می‌باشد. هنگامی که دمای سیستم کاهش می‌یابد، احتمال پذیرش حرکت اشتباه نیز کاهش می‌یابد و هنگامی که دما به صفر می‌رسد، تنها بهترین حرکت‌ها پذیرفته خواهند بود. در شبیه‌سازی ارائه شده، یک آشفتگی ایجاد شده و سپس تغییر انرژی حاصل از آن اندازه‌گیری می‌شود.

اگر انرژی کاهش یافته باشد، سیستم به حالت جدید می‌رود. اگر انرژی افزایش یافته باشد، حالت جدید با احتمال داده شده در رابطه بالا پذیرفته می‌شود. فرآیند فوق در هر دما به تعداد از قبل تعیین شده‌ای تکرار می‌گردد و بعد از آن، دما کاهش می‌یابد تا اینکه سرانجام سیستم در این حالت پایدار منجمد شود (کرک پاتریک و همکاران 1983).

کرک پاتریک و همکاران نشان دادند که این نوع شبیه‌سازی می‌تواند برای جستجوی جواب‌های موجه یک مسئله بهینه‌سازی، با هدف همگرایی به یک جواب بهینه بکار رود. شکل 4 ساختار پایه‌ای الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی را در یک نمای کلی نشان می‌دهد.

¹ Graphical display² Statistical test criteria

بطور خلاصه از چهار مدل جهت بدست آوردن شاخص SPI استفاده گردیده که مشخصات آنها در جدول 5 آورده شده است.

جدول 5- مدل‌های مورد استفاده جهت پایش خشکسالی

شماره مدل	توزیع آماری	روش تخمین پارامترها
مدل 1	توزیع گاما	حداکثر درستی
مدل 2	توزیع کاپا	حداکثر درستی
مدل 3	توزیع کاپا	الگوریتم ژنتیک
مدل 4	توزیع کاپا	الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی

قابل توجه اینکه، تابع هدف مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی بصورت زیر بیان می‌شود، که متغیرهای مورد استفاده در آن در معادله 12 آورده شده است (حسن‌زاده و همکاران 2011). همچنین جهت بدست آوردن پارامترهای توزیع کاپا با GA و SA از جعبه ابزار مربوط به همین روش در نرم افزار MATLAB نسخه 7.6 استفاده شده است.

$$\text{Minimize} \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_{oi} - X_{ci})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{oi} - \bar{X}_o)^2} \right) \quad [13]$$

روند تغییرات شاخص بارندگی استاندارد شده با مقیاس‌های زمانی مختلف، که بر اساس چهار مدل پایش خشکسالی بدست آمده‌اند، در شکل 5 ارائه شده‌اند. جهت تحلیل خشکسالی، هر یک از مشخصه‌های خشکسالی اعم از تداوم، شدت و بزرگی، بصورت جداگانه می‌توانند ملاک عمل قرار بگیرند و بر اساس بحرانی‌ترین حالت، برنامه‌ریزی صورت پذیرد.

از آنجا که روش گرافیکی روش دقیقی نمی‌باشد و بسته به نظر اشخاص نتایج متفاوتی بدست می‌آید، بنابراین از معیارهای آماری استفاده می‌شود. معیارهای آماری با استفاده از روابط آماری جهت تعیین خطای بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی انجام می‌گیرد، که در این تحقیق از ضریب راندمان (بازده)¹ استفاده شده است (ناش و ساتکلیف 1970، حسن‌زاده و همکاران 2011).

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{oi} - X_{ci})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{oi} - \bar{X}_o)^2}, \quad -\infty < E \leq 1 \quad [12]$$

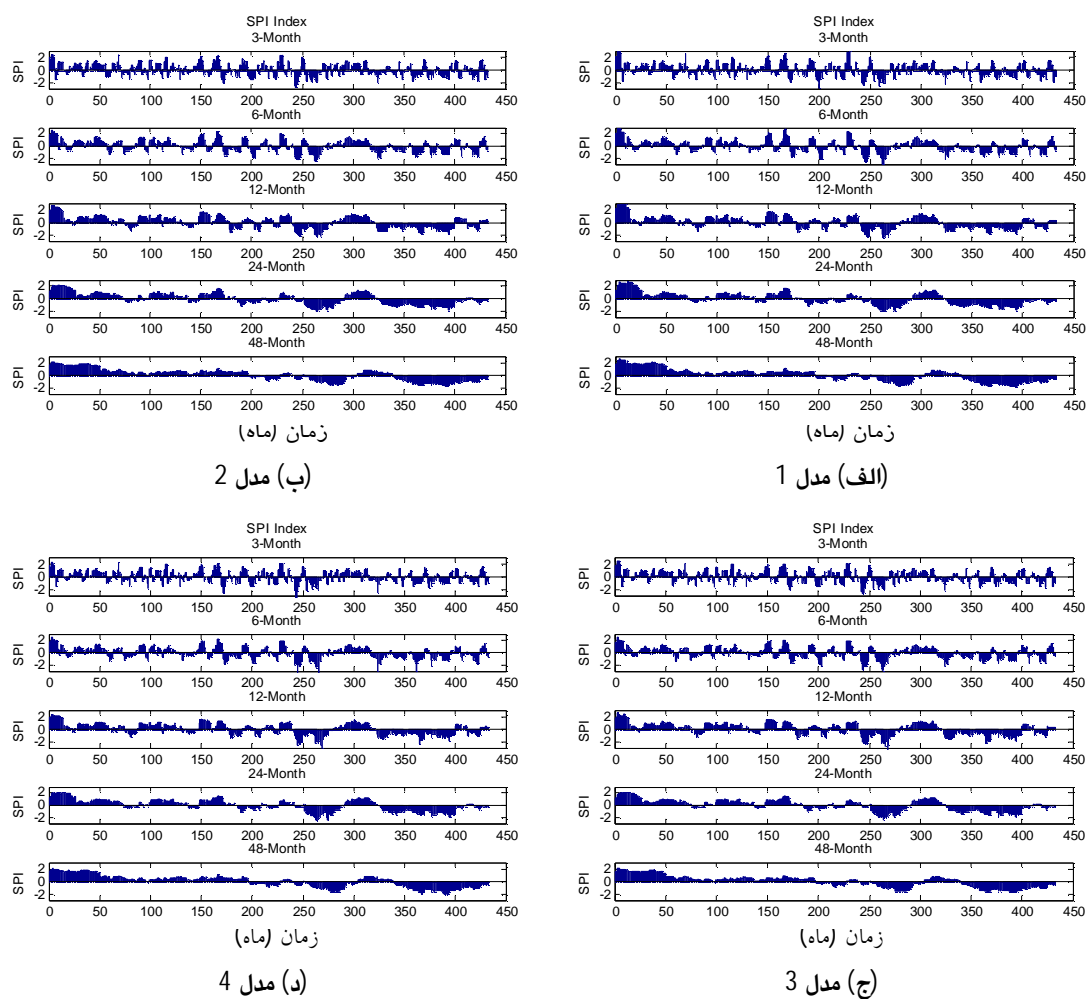
در رابطه فوق n تعداد کل داده‌ها، X_{oi} داده‌های مشاهداتی، X_{ci} داده‌های محاسباتی و \bar{X}_o میانگین داده‌های مشاهداتی می‌باشد.

نتایج و بحث

ابتدا به بررسی و تحلیل نتایج حاصل پایش خشکسالی با استفاده از شاخص SPI (در مقیاس‌های زمانی مختلف) در ایستگاه شهر تبریز پرداخته می‌شود. همان طوریکه قبلاً ذکر شد، جهت محاسبه شاخص بارندگی استاندارد شده از برآزش دو توزیع احتمال گاما و کاپا بطور جداگانه بر داده‌های دراز مدت بارندگی ماهانه استفاده می‌شود، که تابع حاصل جهت بدست آوردن احتمال جمعی بارندگی در مقیاس زمانی مشخص بکار می‌رود.

همچنین با توجه به انتخاب روش تخمین پارامترهای توزیع‌های آماری، می‌توان نتایج متفاوتی را بدست آورد، که در تحقیق فوق از سه روش حداکثر درستی (ML)، الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی (SA) جهت تخمین پارامترها استفاده شده است.

¹ Efficiency coefficient



شکل 5- روند تغییرات شاخص بارندگی استاندارد شده در مقیاس‌های زمانی مختلف، بر اساس مدل پایش خشکسالی

مختلف، از خشکسالی ملایم به طرف خشکسالی حاد، روند کاهشی داشته است. یعنی احتمال وقوع خشکسالی شدید و حاد، نسبت به دیگر خشکسالی‌ها کمتر است و این نتیجه‌ای است که تحقیق اسدی و همکاران (1388) در ایستگاه تبریز را تأیید می‌نماید.

جهت بررسی صحت نتایج بدست آمده از چهار مدل مورد استفاده در پایش شاخص SPI از ضریب راندمان استفاده شده که در شکل 6 نشان داده شده است.

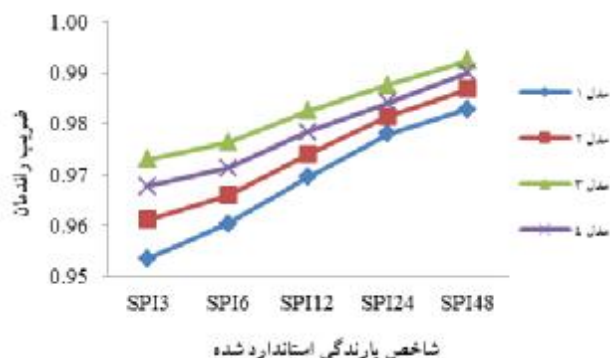
از شکل 6 می‌توان چنین نتیجه گرفت که اولاً مدل 3 و سپس مدل 4 که به ترتیب از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی استفاده نموده‌اند، در

هرگاه در بررسی‌های به عمل آمده هر سه خصوصیت از مقادیر نسبتاً بالایی برخوردار باشند، در این صورت شرایط واقعاً بحرانی بوده که جبران آن به راحتی و به سرعت ممکن نخواهد بود. بنابراین با توجه به شکل 5، سال‌های آماری 1990-1991 بر اساس شاخص SPI کوتاه مدت (3 و 6 ماهه) و سال‌های 1998-2002 بر اساس شاخص SPI بلند مدت (12، 24 و 48 ماهه) به عنوان سال‌های بحرانی شناخته می‌شوند. همچنین فراوانی‌های رخداد خشکسالی بدست آمده از چهار مدل، نشان می‌دهند که تعداد رویدادهای خشکسالی بر اساس شاخص SPI با بازه‌های زمانی

ثانیاً با افزایش بازه زمانی، ضرایب راندمان بدست آمده از شاخص SPI، افزایش می‌یابد و همچنین اختلاف ضرایب راندمان بین دو روش کاهش پیدا می‌کند. یعنی اختلاف بین مدل 3 (بهترین برازش) و مدل 1 (بدترین برازش) در حدود 1 تا 2 درصد تغییر می‌کند. علت را می‌توان چنین بیان نمود که SPI با بازه زمانی کمتر، نسبت به تغییرات بارش حساس می‌باشد و در طول زمان وقوع، از پراکندگی بیشتری در منطقه برخوردار است، در حالیکه با افزایش بازه زمانی، تغییرات بارش و بالطبع پراکندگی شاخص خشکسالی، کمتر بوده و از یکنواختی بهتری برخوردار می‌باشد. بنابراین هرچه تغییرات بارش بیشتر باشد، خطای بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی نیز بیشتر می‌شود.

مقادیر پارامترهای توزیع گاما که توسط مدل 1 و همچنین توزیع کاپا که توسط مدل 2 (روش حداکثر درستنمایی)، مدل 3 (الگوریتم ژنتیک) و مدل 4 (الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی) در مقیاس‌های زمانی مختلف بدست آمده‌اند، در جداول 6 تا 9 آورده شده‌اند.

مقایسه با مدل 2 و 1 که از روش حداکثر درستنمایی استفاده کرده‌اند، جواب‌های بهتری را نتیجه می‌دهند. علت را می‌توان به کاربرد موفقیت آمیز الگوریتم‌های فراکوشی فوق در تخمین پارامترها نسبت داد، که با استفاده از راهکارهای مختلف تعیین شایستگی، از گیر افتادن در نقطه‌های بهینه محلی که بهینه واقعی مورد نظر نیستند، رهایی یافته و در نهایت به بهینه‌ترین جواب ممکن دست می‌یابند.



شکل 6- مقدار ضرایب راندمان بدست آمده از چهار مدل

جدول 6- مقادیر پارامترهای توزیع گاما بدست آمده بر اساس مدل 1

ماه میلادی												پارامتر	شاخص
12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
5/08	3/38	1/63	1/23	1/35	3/40	5/61	6/91	5/37	6/50	6/17	6/14	α	SPI 3
14/50	16/42	18/84	13/16	17/59	18/42	19/19	18/98	20/36	12/20	10/94	12/44	β	
6/77	4/65	5/55	6/96	7/57	8/29	9/26	9/96	8/80	8/31	8/55	6/73	α	SPI 6
13/14	17/08	16/81	17/69	20/46	20/72	20/21	19/94	21/10	18/90	14/65	16/16	β	
14/68	13/43	14/35	14/05	14/52	15/32	15/28	15/11	11/29	11/60	12/76	12/11	α	SPI 12
18/81	20/70	19/44	19/93	19/30	18/31	18/32	18/63	24/91	24/20	22/06	23/23	β	
21/00	20/96	20/86	23/37	24/65	25/37	25/20	25/10	21/78	20/09	19/96	19/17	α	SPI 24
26/55	26/68	26/86	24/04	22/80	22/17	22/29	22/43	25/92	28/04	28/28	29/43	β	
34/56	35/14	35/84	34/26	34/979	35/30	35/25	35/16	33/39	31/02	30/73	30/64	α	SPI 48
32/57	32/04	31/39	33/03	32/42	32/13	32/15	32/29	34/04	36/57	37/03	37/18	β	

جدول 7- مقادیر پارامترهای توزیع کاپا بدست آمده بر اساس مدل 2

		ماه میلادی												پارامتر	شاخص
		12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
SPI 3	66/29	46/98	21/11	10/27	19/15	57/31	93/01	109/75	99/17	75/00	58/56	68/30	ξ		
	18/88	16/78	12/61	7/10	9/93	17/77	26/62	28/23	23/65	14/73	15/41	17/56	α		
	-0/15	-0/24	-0/42	-0/44	-0/28	-0/20	-0/32	-0/29	-0/20	-0/25	-0/30	-0/28	k		
	-0/69	-0/68	-0/52	-0/48	-0/75	-0/98	-0/71	-0/39	-0/91	-1/38	-0/67	-0/83	h		
	82/18	76/99	79/45	116/63	138/25	164/25	185/44	186/96	167/55	161/93	114/22	100/64	ξ		
	19/23	16/74	27/17	26/73	33/12	33/03	30/99	36/62	34/90	20/91	25/05	22/40	α		
SPI 6	-0/17	-0/17	-0/17	-0/16	-0/29	-0/16	-0/20	-0/15	-0/26	-0/23	-0/19	-0/22	k		
	-0/82	-1/35	-1/25	-0/95	-0/75	-1/00	-1/51	-0/80	-0/73	-2/81	-0/70	-0/98	h		
	262/75	270/27	264/97	268/10	270/19	268/64	266/92	266/30	263/98	263/99	259/94	267/14	ξ		
	41/64	42/76	42/15	43/18	41/61	40/54	41/07	40/61	46/24	47/00	45/40	44/72	α		
	-0/20	-0/14	-0/19	-0/13	-0/11	-0/15	-0/16	-0/17	-0/14	-0/17	-0/28	-0/21	k		
	-0/89	-1/01	-0/85	-0/82	-0/86	-0/84	-0/81	-0/75	-0/73	-0/76	-0/79	-0/98	h		
SPI 12	534/85	544/57	545/54	545/68	548/32	545/27	542/80	544/94	537/59	535/99	538/07	541/23	ξ		
	68/99	69/70	70/67	67/53	65/63	65/22	66/08	65/67	69/32	72/56	73/52	74/09	α		
	-0/19	-0/11	-0/10	-0/13	-0/12	-0/15	-0/17	-0/13	-0/20	-0/20	-0/21	-0/19	k		
	-0/87	-0/90	-0/87	-0/87	-0/89	-0/85	-0/84	-0/80	-0/74	-0/77	-0/82	-0/88	h		
	1106/02	1101/02	1112/42	1108/74	1108/96	1108/84	1106/63	1109/77	1107/55	1110/56	1114/61	1118/48	ξ		
	113/28	114/20	110/03	112/72	111/75	111/25	111/70	111/99	114/96	119/84	121/62	121/75	α		
SPI 48	-0/10	-0/15	-0/09	-0/11	-0/11	-0/11	-0/13	-0/11	-0/11	-0/10	-0/12	-0/11	k		
	-0/91	-0/90	-0/96	-0/88	-0/86	-0/86	-0/86	-0/83	-0/81	-0/86	-0/91	-0/92	h		

جدول 8- مقادیر پارامترهای توزیع کاپا بدست آمده بر اساس مدل 3

پارامتر	ماه میلادی												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
شاخص SPI 3	61/85	57/94	63/15	82/30	96/86	83/73	49/02	15/94	6/47	13/96	43/28	64/97	ξ
	25/09	16/77	16/98	29/44	43/12	41/85	28/44	15/76	10/37	20/96	20/11	19/88	α
	-0/09	-0/29	-0/43	-0/34	-0/15	-0/24	-0/05	-0/08	-0/23	-0/09	-0/22	-0/24	k
	-0/07	-0/57	-0/16	-0/01	-0/28	-0/18	-0/06	-0/05	-0/44	-0/41	-0/32	-0/72	h
	92/06	106/15	129/04	157/13	177/79	170/81	149/98	121/65	96/46	87/77	68/69	76/04	ξ
	31/37	33/90	27/77	38/51	45/06	43/36	47/43	54/61	50/48	22/28	20/88	25/08	α
	-0/12	-0/10	-0/48	-0/33	-0/12	-0/09	-0/03	-0/02	-0/16	-0/19	-0/27	-0/13	k
	-0/24	-0/14	-0/23	-0/29	-0/38	-0/50	-0/23	-0/18	-0/21	-0/31	-0/65	-0/30	h
	252/48	222/70	255/18	242/09	249/88	254/15	261/19	257/47	257/50	243/92	254/80	258/49	ξ
	62/07	88/82	47/92	62/08	44/27	46/99	45/35	50/84	47/80	57/72	59/38	50/29	α
	-0/08	-0/08	-0/30	-0/18	-0/31	-0/21	-0/21	-0/14	-0/21	-0/13	-0/01	-0/10	k
	-0/29	-0/41	-0/72	-0/34	-0/35	-0/44	-0/65	-0/49	-0/60	-0/11	-0/32	-0/58	h
556/69	505/11	512/81	525/07	521/69	521/91	500/69	553/00	526/15	534/70	520/31	505/54	ξ	
72/92	107/53	88/95	77/56	84/72	86/69	111/62	67/33	86/60	82/61	93/77	94/63	α	
-0/21	-0/04	-0/18	-0/23	-0/09	-0/06	-0/06	-0/15	-0/07	-0/11	-0/05	-0/11	k	
-0/32	-0/06	-0/32	-0/55	-0/30	-0/28	-0/14	-0/20	-0/41	-0/68	-0/35	-0/18	h	
1065/26	1056/75	1071/26	1068/33	1077/09	1063/99	1071/82	1080/95	1078/29	1068/90	1018/49	1076/16	ξ	
179/48	188/76	157/63	151/68	145/28	145/87	151/05	142/36	146/91	160/06	214/72	143/98	α	
-0/07	-0/07	-0/03	-0/06	-0/05	-0/01	-0/02	-0/05	-0/03	-0/06	-0/03	-0/02	k	
-0/16	-0/37	-0/33	-0/28	-0/37	-0/22	-0/30	-0/45	-0/40	-0/24	-0/21	-0/43	h	

SPI 48

SPI 24

SPI 12

SPI 6

جدول 9- مقادیر پارامترهای توزیع کاپا بدست آمده بر اساس مدل 4

		ماه میلادی												پارامتر	شاخص
		12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
SPI 3	73/28	56/57	24/00	16/33	26/36	63/18	101/10	122/68	97/07	76/38	58/75	77/72	ξ		
	15/83	14/74	13/14	6/47	8/14	14/02	30/13	26/84	27/93	17/33	15/38	15/47	α		
	-0/28	-0/28	-0/32	-0/34	-0/19	-0/19	-0/14	-0/34	-0/33	-0/30	-0/33	-0/27	k		
	-2/17	-2/41	-1/04	-2/27	-2/02	-2/17	-0/74	-1/30	-0/54	-1/52	-0/67	-2/18	h		
	86/28	79/13	93/72	118/95	161/09	178/62	191/93	205/00	178/19	152/29	121/01	103/55	ξ		
	16/82	18/49	22/97	26/37	27/81	28/34	32/31	30/70	37/57	36/46	19/04	20/83	α		
SPI 6	-0/28	-0/22	-0/13	-0/17	-0/24	-0/20	-0/18	-0/28	-0/26	-0/24	-0/31	-0/31	k		
	-1/65	-1/71	-1/41	-1/17	-2/26	-2/10	-1/96	-2/43	-1/05	-1/23	-1/66	-1/54	h		
	268/86	269/78	276/48	277/14	284/24	285/63	260/05	273/36	273/21	275/14	275/62	272/86	ξ		
	46/30	54/49	38/75	41/71	44/85	37/70	46/53	37/69	48/92	49/15	42/53	42/78	α		
	-0/19	-0/09	-0/29	-0/22	-0/20	-0/25	-0/19	-0/33	-0/24	-0/25	-0/19	-0/19	k		
	-1/04	-0/70	-2/05	-1/35	-1/43	-2/03	-0/53	-1/20	-1/00	-1/39	-1/38	-1/24	h		
SPI 12	548/43	554/64	557/90	565/25	564/63	550/92	548/22	565/04	577/35	568/25	556/25	570/99	ξ		
	67/17	64/52	73/88	59/98	59/76	70/33	61/17	56/27	67/96	62/02	67/42	65/90	α		
	-0/27	-0/22	-0/15	-0/18	-0/18	-0/14	-0/21	-0/24	-0/18	-0/24	-0/21	-0/24	k		
	-1/31	-1/28	-1/03	-1/66	-1/71	-1/02	-1/16	-1/99	-1/91	-1/89	-1/24	-1/13	h		
	1133/60	1124/11	1130/87	1131/19	1142/34	1132/40	1135/10	1132/07	1135/36	1133/12	1139/12	1139/04	ξ		
	102/35	99/34	102/85	106/00	92/57	92/52	107/14	98/60	102/01	116/41	102/52	109/94	α		
SPI 48	-0/16	-0/14	-0/12	-0/21	-0/18	-0/23	-0/14	-0/20	-0/19	-0/17	-0/19	-0/16	k		
	-1/67	-1/49	-1/36	-1/45	-1/67	-1/86	-1/32	-1/48	-1/65	-1/35	-1/82	-1/50	h		

(3) جهت محاسبه شاخص بارندگی استاندارد شده در مقیاس‌های زمانی مختلف، استفاده از توزیع چهار پارامتری کاپا به جای توزیع دو پارامتری گاما، بدلیل دربر داشتن بیشتر پارامترها، خصوصیات بیشتری از سری را بیان می‌کند و در نتیجه به نتایج بهتر و با خطای کمتر می‌توان رسید.

(4) جهت یافتن پارامترهای توزیع کاپا به کمک روش حداکثر درستنمایی، نیاز به استفاده از تکنیک‌های ریاضی مختلف از قبیل مشتق‌گیری و حل دستگاه معادلات غیرخطی می‌باشد. در صورتیکه با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بدون نیاز به تکنیک‌های پیچیده، می‌توان به بهترین جواب دست یافت.

(5) در روش‌های فراکاوشی، تعداد پارامترهای توزیع آماری مشکلی برای حل مساله ایجاد نمی‌کند، و این روش قادر به یافتن مناسب‌ترین جواب می‌باشد، در صورتیکه در روش حداکثر درستنمایی با افزایش تعداد پارامتر، محاسبات مشکل‌تر می‌شود و نیاز به زمان بیشتری جهت حل مساله می‌باشد.

(6) در صورتیکه محدوده جواب مورد نظر، برای هر یک از پارامترهای توزیع آماری مشخص باشد، تخمین پارامتر با استفاده از روش‌های فراکاوشی دقیق‌تر و سریع‌تر انجام می‌گیرد. بنابراین در این تحقیق، مقدار پارامتر ξ در محدوده میانگین و پارامتر α در محدوده نصف واریانس داده‌ها می‌باشد. همچنین مقادیر دو پارامتر h و k در محدوده -1 ، به عنوان نقطه شروع در نظر گرفته می‌شود.

از جداول فوق، چنین استنباط می‌شود که مقادیر پارامتر ξ در محدوده میانگین و پارامتر α در محدوده نصف واریانس داده‌ها می‌باشد که در جدول 1 ارائه شده است. همچنین مقادیر دو پارامتر k و h در محدوده -1 می‌باشد. بنابراین یک روش جدید و ساده برای تعیین نقطه شروع پارامترهای توزیع کاپا، استفاده از میانگین و واریانس داده‌های مشاهداتی می‌باشد که به راحتی قابل محاسبه هستند. روش فوق در تخمین پارامترهای توزیع کاپا، نشان می‌دهد که کارایی این روش در دو مدل 3 و 4 که از الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی حرارتی استفاده می‌کنند بیشتر است، چون همانطوریکه قبلاً ذکر شده روش‌های فراکاوشی، راهکارهای جستجوی پیشرفته‌ای هستند که با استفاده از روش‌های مختلف، در نهایت می‌توانند به بهینه‌ترین جواب ممکن برسند.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل در این تحقیق، می‌توان جمع‌بندی‌های زیر را ارائه نمود:

(1) شاخص SPI به عنوان یک ابزار مناسب جهت پایش شرایط خشکسالی قابل استفاده می‌باشد، زیرا از خصوصیات مهم این شاخص، چند کاره بودن آن است که می‌تواند برای هر مقیاس زمانی محاسبه شود و خصوصیات خشکسالی را نشان دهد.

(2) جهت پایش خشکسالی، استفاده از الگوریتم ژنتیک و سپس الگوریتم شبیه‌سازی حرارتی، جواب‌های بهتری را نسبت به روش حداکثر درستنمایی ارائه می‌نماید.

منابع مورد استفاده

اسدی، ا.، مجنونی هریس، ا.، فاخری‌فرد، ا.، صدرالدینی ع. و دین‌پژوه ی.، 1388. بررسی خشکسالی استان آذربایجان شرقی با استفاده از شاخص SPI. دومین همایش ملی اثرات خشکسالی و راهکارهای مدیریت آن. مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان و ستاد حوادث غیرمترقبه استانداری اصفهان، اصفهان.

عبدی ا. و فاخری‌فرد، ا.، 1387. برآورد پارامترهای توزیع چهار پارامتری کاپا با استفاده از روش‌های حداکثر درستنمایی و گشتاورهای وزنی احتمال. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه تهران، تهران.

- Chen CS, Liu CH and Su HC, 2008. A nonlinear time series analysis using two-stage genetic algorithms for streamflow forecasting. *Hydrological Processes* 22: 3697-3711.
- Chiu YC, Chang LC and Chang FJ, 2007. Using a hybrid genetic algorithm-simulated annealing algorithm for fuzzy programming of reservoir operation. *Hydrological Processes* 21: 3162-3172.
- Cunha MC and Sousa J, 1999. Water distribution network design optimization: simulated annealing approach. *Journal of Water Resources Planning and Management* 125(4): 215-221.
- Dougherty DE and Marryott RA, 1991. Optimal groundwater management 1. Simulated annealing. *Water Resources Research* 27: 2493-2508.
- Guttman NB, 1999. Comparing the drought index and the standardized precipitation index. *Journal of American Water Resources Association* 35(2): 311-322.
- Hassanzadeh Y, Abdi A, Talatahari S and Singh VP, 2011. Meta-Heuristic algorithms for hydrologic frequency analysis. *Water Resources Management* 25(7): 1855-1879.
- Hassanzadeh Y, Nourani V and Abdi A, 2009. Genetic algorithm and its application in statistical analysis of flood flows. Pp. 403-410. 2nd International Conference on Water Economics, Statistics and Finance, 3-5 July, Alexandroupolis, Greece.
- Hosking JRM, 1994. The four-parameter kappa distribution. *IBM Journal of Research and Development* 38(3): 251-258.
- Huang YC, Yeh HD and Lin YC, 2008. A computer method based on simulated annealing to identify aquifer parameters using pumping-test data. *International Journal for Numerical and Analysis Methods in Geomechanics* 32: 235-249.
- Karahan H, Ceylan H and Ayvaz MT, 2007. Predicting rainfall intensity using a genetic algorithm approach. *Hydrological Processes* 21: 470-475.
- Kirkpatrick S, Gellat L and Vecchi M, 1983. Optimization by simulated annealing. *Science* 220: 671-680.
- Labeledzki L, 2007. Estimation of local drought frequency in central Poland using the standardized precipitation index. *Irrigation and Drainage* 56: 67-77.
- McKee TB, Doesken NJ and Kleist J, 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Pp. 179-184. 8th Conference on Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, CA, USA.
- Metropolis N, Rosenbluth A, Rosenbluth M, Teller A and Teller E, 1953. Equation of state calculations by fast computing machines. *Journal of Chemical Physics* 21: 1087-1092.
- Mishra, AK and Desai VR, 2005. Drought forecasting using stochastic models. *Journal of Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 19: 326-339.
- Mishra AK, Singh VP and Desai VR, 2009. Drought characterization: a probabilistic approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 23: 41-55.
- Mohan S and Vijayalakshmi DP, 2008. Estimation of Nash's IUH parameters using stochastic search algorithms. *Hydrological Processes* 22: 3507-3522.
- Nash JE and Sutcliffe JV, 1970. River flow forecasting through conceptual models I: a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3): 282-290.
- Parida BP, 1999. Modeling of Indian summer monsoon rainfall using a four-parameter kappa distribution. *International Journal of Climatology* 19: 1389-1398.
- Patel NR, Chopra P and Dadhwala VK, 2007. Analyzing spatial patterns of meteorological drought using standardized precipitation index. *Meteorological Applications* 14: 329-336.
- Rao AR and Hamed KH, 2000. *Flood Frequency Analysis*. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida.
- Singh VP and Deng ZQ, 2003. Entropy-based parameter estimation for kappa distribution. *Journal of Hydrologic Engineering* 8: 81-92.
- Sivanandam SN and Deepa SN, 2008. *Introduction to Genetic Algorithm*. Springer-Verlag, Berlin.
- Wilhite DA, 2000. Drought as a natural hazard: Concepts and definitions (Chapter 1). In: Wilhite DA (ed). *Drought: A Global Assessment, Natural Hazards and Disasters Series*, Routledge Publishers, United Kingdom.
- Wilhite DA, 2005. *Drought and Water Crisis: Science, Technology, and Management Issues*. CRC Press. Boca Raton, Florida.
- Wu H, Hayes J, Wilhite DA and Svoboda MD, 2005. The effect of the length of record on the standardized precipitation index calculation. *International Journal of Climatology* 25: 505-520.