

کاربرد برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی خشک‌سالی (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک تبریز)

عباس عباسی، کیوان خلیلی، جواد بهمنش و اکبر شیرزاد

دوره ۵، شماره ۱، بهار ۱۳۹۸، صفحات ۱۴-۱

Vol. 5(1), Spring 2019, 1 – 14

DOI: 10.22034/jewe.2019.139707.1271

**Application of Gene Expression Programming in
Drought Prediction (Case Study: Tabriz Synoptic
Station)**

Abbasi A., Khalili K., Behmanesh J. and Shirzad A.



www.jewe.ir

OPEN ACCESS

ارجاع به این مقاله: عباسی ع، خلیلی ک، بهمنش ج، و شیرزاد ا. (۱۳۹۸). کاربرد برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی خشک‌سالی (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک تبریز). مجله محیط‌زیست و مهندسی آب، دوره ۵، شماره ۱، صفحات: ۱۴ - ۱.

Citing this paper: Abbasi A., Khalili K., Behmanesh J. and Shirzad A. (2019). Application of gene expression programming in drought prediction (Case study: Tabriz Synoptic Station). J. Environ. Water Eng., 5(1), 1- 14. DOI: 10.22034/jewe.2019.139707.1271

کاربرد برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی خشک‌سالی (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک تبریز)

عباس عباسی^۱، کیوان خلیلی^{۲*}، جواد بهمنش^۳ و اکبر شیرزاد^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۳ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۴ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

*نویسنده مسئول: khalili2006@gmail.com; k.khalili@urmia.ac.ir

مقاله اصلی

تاریخ دریافت: [۱۳۹۷/۰۴/۱۴]

تاریخ بازنگری: [۱۳۹۷/۱۱/۲۳]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۷/۱۱/۲۴]

چکیده

پیکره آبی دریاچه ارومیه در سال‌های اخیر به دلایل مختلف از قبیل خشک‌سالی‌های متوالی با کاهش شدید سطح و حجم روبرو شده است. بنابراین، در این پژوهش وضعیت خشک‌سالی در ایستگاه سینوپتیک تبریز به‌عنوان یکی از ایستگاه‌های مهم حوزه آبخیز دریاچه ارومیه در مقیاس‌های زمانی مختلف با استفاده از شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) و مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه طی دوره آماری ۵۳ ساله برای پایش وضعیت خشک‌سالی در این ایستگاه استفاده شد. نتایج نشان داد سه دوره طولانی مدت خشک‌سالی مربوط به سال‌های ۱۹۶۳-۱۹۶۱، ۱۹۹۲-۱۹۸۶ و ۲۰۰۹-۱۹۹۷ در طول دوره آماری وجود دارد. سپس با استفاده از سری زمانی مقادیر SPEI در ۵ مدل ورودی با تأخیرهای یک تا ۵ ماهه و مدل GEP نسبت به پیش‌بینی خشک‌سالی اقدام گردید. نتایج نشان داد که دقت پیش‌بینی مدل GEP با افزایش مقیاس محاسبه SPEI رابطه مستقیم دارد و با افزایش مقیاس زمانی SPEI، دقت پیش‌بینی افزایش پیدا می‌کند به نحوی که ضریب همبستگی در مرحله آزمون در مقیاس یک ماهه (SPEI1) از ۰/۲۰۳ به ۰/۹۸۸ در مقیاس ۴۸ ماهه (SPEI48) و دقت کلی مدل نیز در SPEI1 از ۵۷/۱ درصد به ۹۴/۲ درصد در SPEI48 رسید.

واژه‌های کلیدی: پایش؛ پیش‌بینی؛ خشک‌سالی؛ دریاچه ارومیه؛ مدل هوشمند..

۱- مقدمه

خشک‌سالی یکی از پدیده‌های تکرار شونده در تمامی نقاط با اقلیم‌های خشک و مرطوب می‌باشد که جزء رخداد‌های طبیعی قلمداد می‌گردد و آثار آن به کندی نمایان می‌شود. خشک‌سالی به‌عنوان پدیده‌ای بی‌سر و صدا جزء طبیعی هر اقلیمی محسوب می‌شود که ناشی از کاهش مقدار بارش در یک دوره طولانی نسبت به میانگین بارش نرمال منطقه است (Jahangir et al. 2015). از این‌رو، اگر بتوان زمان وقوع آن را زودتر از ظاهر شدن اثرات آن مشخص کرد، می‌توان گام مهمی در مدیریت منابع آب در شرایط بحرانی برداشت. اصولاً برای تحلیل کمی خشک‌سالی، وجود یک شاخص مناسب جهت تعیین دقیق دوره‌های تر و خشک بسیار ضروری است (DaSilva, 2004). شاخص‌های خشک‌سالی متغیرهایی هستند که قادرند مدت، شدت و وسعت مکانی خشک‌سالی را به نمایش گذارند و عموماً بر اساس متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژیکی مشخص می‌گردند (Stinemann, 2003).

برای پایش خشک‌سالی شاخص‌های متنوع هواشناسی و هیدرولوژی ارائه شده‌اند. از مهمترین شاخص‌های خشک‌سالی که در مطالعات مختلفی از آن استفاده شده است، شاخص بارش استاندارد شده (SPI1) است که توسط McKee et al. (1993) ارائه گردید. یکی از نمودهای بارز خشک‌سالی در سطح ایران مسئله مربوط به دریاچه‌ی ارومیه می‌باشد که طی سال‌های اخیر با کاهش شدید ورودی‌های آبی و تراز مواجه شده است که یکی از علل اصلی آن را به خشک‌سالی‌های سال‌های اخیر نسبت می‌دهند. از جمله پژوهش‌هایی که برای ارزیابی خشک‌سالی در حوضه دریاچه ارومیه انجام شده می‌توان به مطالعه Delju et al. (2013) اشاره کرد که با استفاده از شاخص خشک‌سالی پالمر به بررسی وضعیت خشک‌سالی و چگونگی تغییر پارامترهای اقلیمی در حوضه دریاچه ارومیه پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که از سال ۱۹۹۶ این حوضه روند گرم‌تر شدن سریعی را تجربه کرده است. اما کمبود آب در یک حوضه آبخیز علی‌رغم بارش کافی می‌تواند به‌واسطه تبخیر بالا، تغییر در کاهش ذخایر آب سطحی و حتی مصرف بیش از حد رخ دهد. شاخص‌های رایج تعیین خشک‌سالی مانند SPI صرفاً از میزان بارندگی روزانه

و یا ماهانه استفاده می‌نمایند. اما صرفاً در نظرگرفتن عامل بارش در تعیین خشک‌سالی یک منطقه، از جمله انتقاداتی است که بر شاخص‌های خشک‌سالی مبتنی بر بارش به‌ویژه شاخص SPI وارد است. از دسترس خارج شدن ۸۰٪ بارش از راه تبخیر و تعرق بر اهمیت لحاظ کردن دیگر متغیرها از جمله دما و تبخیر و تعرق برای تعیین خشک‌سالی تأکید دارد (Abramopoulos et al., 1988). بر همین اساس می‌توان شاخص خشک‌سالی استاندارد شده بارش و تبخیر - تعرق (SPEI2) معرفی شده توسط Vicente-Serrano (2010) در حکم شاخصی مناسب در تعیین خشک‌سالی مورد استفاده قرار داد. در این شاخص سه متغیر بارش، دما و تبخیر و تعرق پتانسیل (PET3) لحاظ شده است و بر اساس میزان بارندگی و درجه حرارت و محاسبه تبخیر و تعرق و بیلان آب، می‌تواند اثرات تغییرات درجه حرارت را در ارزیابی خشک‌سالی لحاظ نماید. Labudova et al. (2014) شاخص‌های خشک‌سالی SPI و SPEI را با استفاده از داده‌های مدل COSMO در ۲ حوزه آبخیز اسلواکی مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که همبستگی کمی بین شاخص SPI و SPEI در جنوب اسلواکی در مقیاس زمانی ۳ ماهه وجود دارد. همچنین در این پژوهش بر نقش مهم تبخیر و تعرق در خشک‌سالی در منطقه مورد بررسی در فصل تابستان تأکید گردید. Törnros and Menzel (2014) نیز به تحلیل و بررسی شرایط خشک‌سالی حال حاضر و آینده در اردن پرداختند و به این نتیجه رسیدند که شاخص SPEI ۶ ماهه بالاترین ارتباط را با رطوبت خاک برآوردی دارد. Hernandez and Uddameri (2014) جهت ارزیابی خشک‌سالی در مناطق نیمه‌خشک تگزاس از شاخص SPEI و دو مدل گردش عمومی (GCMs) استفاده کردند که نتایج آن نشان داد که خشک‌سالی در نیمه دوم قرن بیست و یکم به علت افزایش دما و کاهش بارش اتفاق خواهد افتاد.

Stagge et al. (2015) نیز به مقایسه توزیع‌های فراوانی شاخص‌های SPI و SPEI در اروپا پرداختند. ایشان توزیع‌های دو پارامتری گاما و مقادیر حد عمومی را به ترتیب برای شاخص‌های SPI و SPEI مناسب تشخیص دادند. در پژوهشی دیگر Potop and Možný (2011) کاربرد شاخص

پیش‌بینی خشک‌سالی در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه از قابلیت بالایی برخوردار است. (Behmanesh and Mehdizade (2017) نیز جهت برآورد دمای خاک در عمق‌های مختلف از روش‌های ANN، GEP و MLR (رگرسیون خطی چند متغیره) استفاده کردند که نتایج نشان داد هر سه مدل قادر به مدل‌سازی مناسب دمای خاک می‌باشند. با توجه به اهمیت خشک‌سالی در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه و وضعیت پیش‌آمده برای آن در سال‌های اخیر، نیاز به پژوهش‌های جامع در این زمینه بسیار محسوس می‌باشد. به همین دلیل در این پژوهش به بررسی و پیش‌بینی خشک‌سالی در ایستگاه تبریز پرداخته شد. به دلیل مزیت‌های ذکر شده برای شاخص SPEI پایش خشک‌سالی در دوره‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت در مقیاس‌های زمانی مختلف ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه انجام گردید. همچنین با توجه به مزیت‌های روش برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی، عملکرد این روش در پیش‌بینی خشک‌سالی در ایستگاه تبریز مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- داده‌ها و منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش به بررسی خشک‌سالی در ایستگاه سینوپتیک تبریز که یکی از ایستگاه‌های شاخص در شرق حوزه آبخیز دریاچه ارومیه می‌باشد، پرداخته شد. بدین منظور از داده‌های بلندمدت بارندگی و دمای ماهانه این ایستگاه در یک دوره آماری ۵۳ ساله مربوط به سال ۲۰۰۹-۱۹۵۶ به‌علت کفایت داده‌ها و کامل بودن آنها استفاده شد. داده‌های موردنیاز از سازمان هواشناسی ایران دریافت شد. این ایستگاه در طول جغرافیایی ۴۶° درجه و ۱۷' شرقی و عرض جغرافیایی ۳۸° و ۵' شمالی واقع شده است. در شکل (۱) موقعیت ایستگاه سینوپتیک تبریز نشان داده شده است.

۲-۲- شاخص SPI

به‌منظور محاسبه این شاخص ابتدا داده‌های بارندگی ماهانه استخراج و سری‌های زمانی آن استخراج شد. سپس تابع توزیع آماری گاما بر روی سری داده‌های بارندگی حاصل از مرحله قبل برازش و احتمالات تجمعی توزیع گاما محاسبه شد. در نهایت تابع تجمعی گاما به تابع نرمال استاندارد Z با

SPEI را به‌عنوان یک شاخص جدید خشک‌سالی در جمهوری چک مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که این شاخص دارای قابلیت تشخیص شدت خشک‌سالی تحت تأثیر افزایش شرایط دمایی در دهه‌های ۱۹۸۰، ۱۹۹۰ و ۲۰۰۰ می‌باشد.

پیش‌بینی خشک‌سالی به‌عنوان یکی از مطرح‌ترین چالش‌های مدیریت منابع آب به‌ویژه در زمینه‌ی برنامه‌ریزی و تخصیص منابع آب در دهه‌های اخیر بوده است که نقش مهمی در کاهش خسارات بر منابع آب دارد طوری‌که پژوهش‌گران روش‌های گوناگونی را برای این امر در مقالات مختلف ارائه نموده و به‌کار گرفته‌اند. این روش‌ها طیف متنوعی از مدل‌های سری زمانی و داده‌محور را شامل می‌شود. یکی از روش‌های پیش‌بینی خشک‌سالی استفاده از تحلیل سری‌های زمانی می‌باشد که از سال ۱۹۷۰ به بعد برای پیش‌بینی و تحلیل به‌سرعت توسعه پیدا کرده است. (Mishra and Desai (2005) و (Durdu (2010) مدل ARIMA را برای پیش‌بینی خشک‌سالی از طریق برآورد مقادیر شاخص SPI توسعه دادند که نتایج پژوهش آنها نشان داد به‌دلیل تأثیرات فصلی بر داده‌ها تنها این مدل می‌تواند شاخص SPI را برای یک ماه آتی پیش‌بینی نماید. (Maca and Pech (2016) با استفاده از ۲ روش شبکه عصبی مصنوعی نسبت به پیش‌بینی شاخص‌های خشک‌سالی SPI و SPEI اقدام نمودند که نتایج این پژوهش نشان داد که روش شبکه عصبی مصنوعی تجمعی نسبت به روش شبکه عصبی چندلایه پیشخور نتایج بهتری را داشته است. تاکنون در مسائل هیدرولوژیکی از برنامه‌ریزی بیان ژن در مدل‌سازی بارش - رواناب (Dorado et al.) 2003، برآورد جریان رودخانه‌ها (Guvén) 2009 و (Khu (2001) et al. پیش‌بینی تراز مخازن و دریاچه‌ها (Kisi et (2012) استفاده شده است. نتایج آن حاکی از دقت مناسب این روش در پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی می‌باشد. (Danande Mehr et al. (2014) با استفاده از مدل تلفیقی برنامه‌ریزی خطی ژنتیک - موجک نسبت به پیش‌بینی بلندمدت خشک‌سالی در ایالت تگزاس آمریکا اقدام نمودند که نتایج این پژوهش نشان داد که مدل برنامه‌ریزی ژنتیک خطی قادر به یادگیری غیرخطی بودن خشک‌سالی در زمان‌های طولانی‌مدت بیش از ۳ ماه نیست ولی مدل تلفیقی برای

مقادیر D ، از رهیافتی همانند شاخص بارش استاندارد (SPI) برای محاسبه SPEI استفاده می‌شود. برای این منظور ابتدا مجموع مقادیر متوالی سری D در پنجره‌های زمانی مختلف محاسبه می‌شود. اگر X سری تجمعی D در پنجره زمانی معین باشد، در مرحله بعد یک توزیع احتمال مناسب بر سری X برازش می‌یابد. طبق بررسی‌های (Vicente- et al. (2010) Serrano توزیع لوگ لجستیک سه پارامتری کارایی مناسبی در مدل‌سازی سری X دارد. فرم تابع چگالی احتمال توزیع مذکور به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود.

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (2)$$

که در رابطه (۲)، α ، β و γ به ترتیب پارامترهای مقیاس، شکل و مبدأ و X سری تجمعی مقادیر D در پنجره زمانی معین است. پارامترهای این تابع با استفاده از روش L -گشتاور (Hosking, 1990) از رابطه‌های (۳)، (۴) و (۵) به دست می‌آیند.

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)} \quad (4)$$

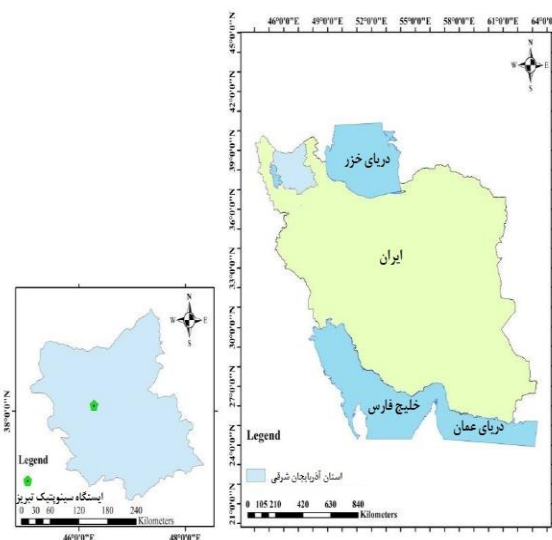
$$\gamma = w_0 - \alpha\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \quad (5)$$

که در این روابط، $\Gamma(\cdot)$ تابع گاما و w_0 ، w_1 و w_2 گشتاورهای وزنی احتمال هستند. بدین ترتیب پس از محاسبه تابع توزیع تجمعی لوگ - لوجستیک مطابق رابطه (۶) و تبدیل آن به توزیع نرمال استاندارد با استفاده از تقریب and Stegun (Abramowitz (1965) شاخص SPEI مطابق رابطه (۷) استخراج می‌شود.

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma} \right)^{\beta} \right]^{-1} \quad (6)$$

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (7)$$

میانگین صفر و واریانس ۱ تبدیل شد (Edwards and McKee, 1997). مقادیر مثبت این شاخص بیانگر بیش‌تر بودن بارندگی از میانه و مقادیر منفی آن بیانگر کمتر بودن بارندگی از میانه است. شروع و خاتمه خشک‌سالی و طبقه‌بندی آن همانند شاخص SPEI می‌باشد و می‌تواند در مقیاس‌های زمانی مختلف محاسبه گردد.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه سینوپتیک تبریز
Fig.1 Location of Tabriz synoptic station

۲-۳- شاخص SPEI

این شاخص مبتنی بر محاسبه ترازمندی آب اقلیمی است و برای محاسبه آن به داده‌های ماهانه بارندگی و دمای هوا نیاز است. معادله ترازمندی آب اقلیمی به صورت رابطه (۱) تعریف شده است:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$

که در رابطه (۱)، P و PET به ترتیب بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل، D اختلاف آنها و i شماره ماه مورد نظر است. معادلات مختلفی برای محاسبه PET وجود دارد که در استفاده از هر یک از آنها محدودیتی برای SPEI وجود ندارد. در نسخه نخست SPEI از روش ساده Thornthwaite (1948) استفاده شد ولی در نسخه دوم آن (در صورت عدم محدودیت داده) توصیه شده است که از روش پنمن - مانتیث فائو (Allen et al. (1998) استفاده شود. پس از محاسبه

- معیار پایان و ارائه نتایج برنامه (تعداد تولید جمعیت جدید، تعیین مقدار برازش مدل‌ها جهت جلوگیری از برازش اضافی (Soltani et al. 2011))

پس از تعیین موارد مطرح شده در بالا نحوه مدل‌سازی به روش بیان ژن به صورت زیر می‌باشد:

- با استفاده از ترکیب مجموعه توابع و ترمینال‌ها یک جمعیت اولیه ایجاد می‌شود.

- هر یک از افراد جمعیت مذکور با استفاده از توابع برازش مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

تولید یک جمعیت جدید از فرمول‌ها که در این بخش از سه عمل ژنتیکی اصلی تلاقی، جهش و تولید مثل یکی انتخاب می‌شود و سپس تعداد مناسبی از افراد جمعیت حاضر انتخاب می‌شوند و از عمل ژنتیکی انتخاب شده برای تولید فرزند (فرمول جدید) استفاده می‌شود و این فرمول جدید در یک جمعیت جدید وارد می‌شود و مدل مورد نظر با استفاده از تابع برازش مورد ارزیابی واقع می‌شود. این امر تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که معیار پایان ارضاء شود (Soltani et al. 2011). در این پژوهش از نرم‌افزار GeneXproTools 4.0 به منظور اعمال روش برنامه‌ریزی بیان ژن بر روی داده‌ها استفاده شده است.

۲-۵- معیارهای ارزیابی

در این پژوهش به منظور ارزیابی مدل‌های مورد نظر از معیارهای ضریب همبستگی، میانگین قدرمطلق خطا و جذر میانگین مربعات خطا استفاده شد که روابط آنها به صورت رابطه‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) می‌باشد.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)(\hat{Q}_i - \bar{\hat{Q}}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2 \sum_{i=1}^n (\hat{Q}_i - \bar{\hat{Q}}_i)^2}} \quad (9)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_i - \hat{Q}_i| \quad (10)$$

$$OE = \frac{\sum \forall i \sum \forall j X_{ij}}{N} \quad i > j \quad (11)$$

در این روابط Q_i مقدار داده‌های مشاهده‌ای در گام زمانی i ام، \hat{Q}_i مقدار داده پیش‌بینی شده در همان زمان، n تعداد داده‌ها، \bar{Q}_i

که در این رابطه C_0, C_1, C_2, d_1, d_2 و d_3 مقادیر ثابت معادله SPEI می‌باشد و W از رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$W = \sqrt{-2 \ln(P)} \quad \text{For } P \leq 0 \quad (8)$$

و $P=1-F(x)$. اگر $P > 0.5$ آنگاه عبارت $1-P$ در معادله (۸) جایگزین P می‌شود. این شاخص می‌تواند برای پیش‌دوره‌های خشک و مرطوب مورد استفاده قرار گیرد. خشک-سالی زمانی شروع می‌شود که مقادیر شاخص به منفی یک برسد و با مثبت شدن آن خاتمه می‌یابد. طبقه بندی این شاخص در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- طبقه بندی شاخص SPEI

Table 1 Classification of SPEI index

توصیف وضعیت	طبقات شاخص
رطوبت بسیار شدید	>2
رطوبت شدید	1.99-1.5
رطوبت متوسط	1-1.49
نرمال	-0.99-0.99
خشک‌سالی متوسط	(-1) - (-1.49)
خشک‌سالی شدید	(-1.5) - (-1.99)
خشک‌سالی بسیار شدید	<-2

۲-۴- برنامه‌ریزی بیان ژن

برنامه‌ریزی بیان ژن تعمیم یافته روش الگوریتم ژنتیک می‌باشد که نخستین بار توسط Koza (2005) ارائه شد و بر مبنای نظریه تکامل داروین بنا نهاده شده است. در این روش در ابتدای فرآیند، رابطه تابعی بین متغیرها در نظر گرفته نمی‌شود و این روش قادر به بهینه‌سازی ساختار مدل و مؤلفه‌های آن می‌باشد. ساختارهای درختی از مجموعه توابع (عملگرهای ریاضی مورد استفاده در فرمول‌ها) و ترمینال‌ها (متغیرهای مسئله و اعداد ثابت) تشکیل می‌شوند. قبل از اجرای مدل برنامه‌ریزی بیان ژن گام‌های زیر توسط کاربر می‌بایست تعیین شود:

- مجموعه ترمینال‌ها (متغیرهای مسئله و اعداد ثابت تصادفی)
- مجموعه عملگرهای ریاضی مورد استفاده در فرمول‌ها
- انتخاب تابع برازش مناسب برای ارزیابی برازش فرمول‌ها
- تعیین پارامترهای کنترل کننده اجرای برنامه

$$OE = \frac{\sum \forall i \sum \forall j X_{ij}}{N} \quad i > j \quad (16)$$

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- پایش خشک‌سالی

به‌منظور پایش خشک‌سالی در ایستگاه تبریز، شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی ۴۸، ۲۴، ۱۲، ۶، ۳، و ۱ ماهه محاسبه شد. شکل (۲) نمودار تغییرات این شاخص را در دوره آماری مورد بررسی نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار، شاخص SPEI در مقیاس زمانی کوتاه‌مدت دارای تغییرات و نوسانات زیادی است که با افزایش گام زمانی محاسبه SPEI از میزان این نوسانات کاسته می‌شود. با افزایش مقیاس زمانی محاسبه SPEI تعداد وقوع خشک‌سالی‌ها کاهش یافته اما تداوم آنها افزایش داشته است. بر اساس شکل (۳) و مقیاس زمانی ۲۴ و ۴۸ ماهه می‌توان ۳ دوره طولانی‌مدت خشک‌سالی مربوط به سال‌های ۱۹۶۳-۱۹۶۱، ۱۹۹۲-۱۹۸۶ و ۲۰۰۹-۱۹۹۷ را تشخیص داد که با خشک‌سالی‌های تاریخی به‌وقوع پیوسته در سطح منطقه همخوانی دارد. همچنین با لحاظ‌شدن عامل دما در تعیین خشک‌سالی با استفاده از شاخص SPEI و لحاظ‌نمودن اثرات متقابل بارش و دما در این شاخص، شدت خشک‌سالی افزایش یافته است. به‌عبارت دیگر، علاوه بر کاهش بارش در این منطقه، افزایش دما نیز بر وقوع پدیده خشک‌سالی مزید بر علت شده است که این نتایج با پژوهش‌های (Zareabyaneh et al., Tajbakhsh et al. (2015) و (Mostafazadeh et al. (2016) مبنی بر لزوم استفاده از سایر عوامل اقلیمی علاوه بر بارش در تعیین خشک‌سالی مطابقت دارد. تعیین همبستگی بین شاخص‌های SPI و SPEI می‌تواند امکان‌پذیری استفاده از شاخص SPI در مناطق فاقد داده‌های دمایی و به تبع آن استفاده نکردن از شاخص SPEI را با توجه به معنی‌داری و ضریب همبستگی، فراهم کند. به‌عبارت دیگر، می‌توان در صورت وجود همبستگی معنی‌دار بین شاخص‌های اشاره شده، از شاخص SPI در مناطق فاقد داده دمایی و با دقت شاخص SPEI استفاده کرد.

میانگین مقادیر مشاهداتی و \bar{Q}_1 میانگین مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشد. هر چه مقادیر R به یک نزدیکتر باشد و RMSE و MAE به صفر نزدیکتر باشد، نتایج دقیق‌تر و قابل اعتمادتر می‌باشد.

۲-۶- تحلیل خطای پیش‌بینی

به‌منظور ارزیابی مدل و تحلیل خطای پیش‌بینی آن در این مطالعه از سه معیار ارزیابی شامل: دقت کلی (OA)، i امین دقت استفاده‌کننده (UA_i)^۲ و i امین دقت تولید شده (PA_j)^۳ استفاده گردید که این معیارها به‌ترتیب به‌صورت روابط (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) محاسبه می‌شوند.

$$OA = \frac{\sum_{i=0}^4 X_{ii}}{N} \quad (12)$$

$$UA_i = \frac{X_{ii}}{\sum_{i=0}^4 X_{ij}} \quad j=1, \dots, 8 \quad (13)$$

$$PA_i = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=0}^4 X_{ij}} \quad i=1, \dots, 8 \quad (14)$$

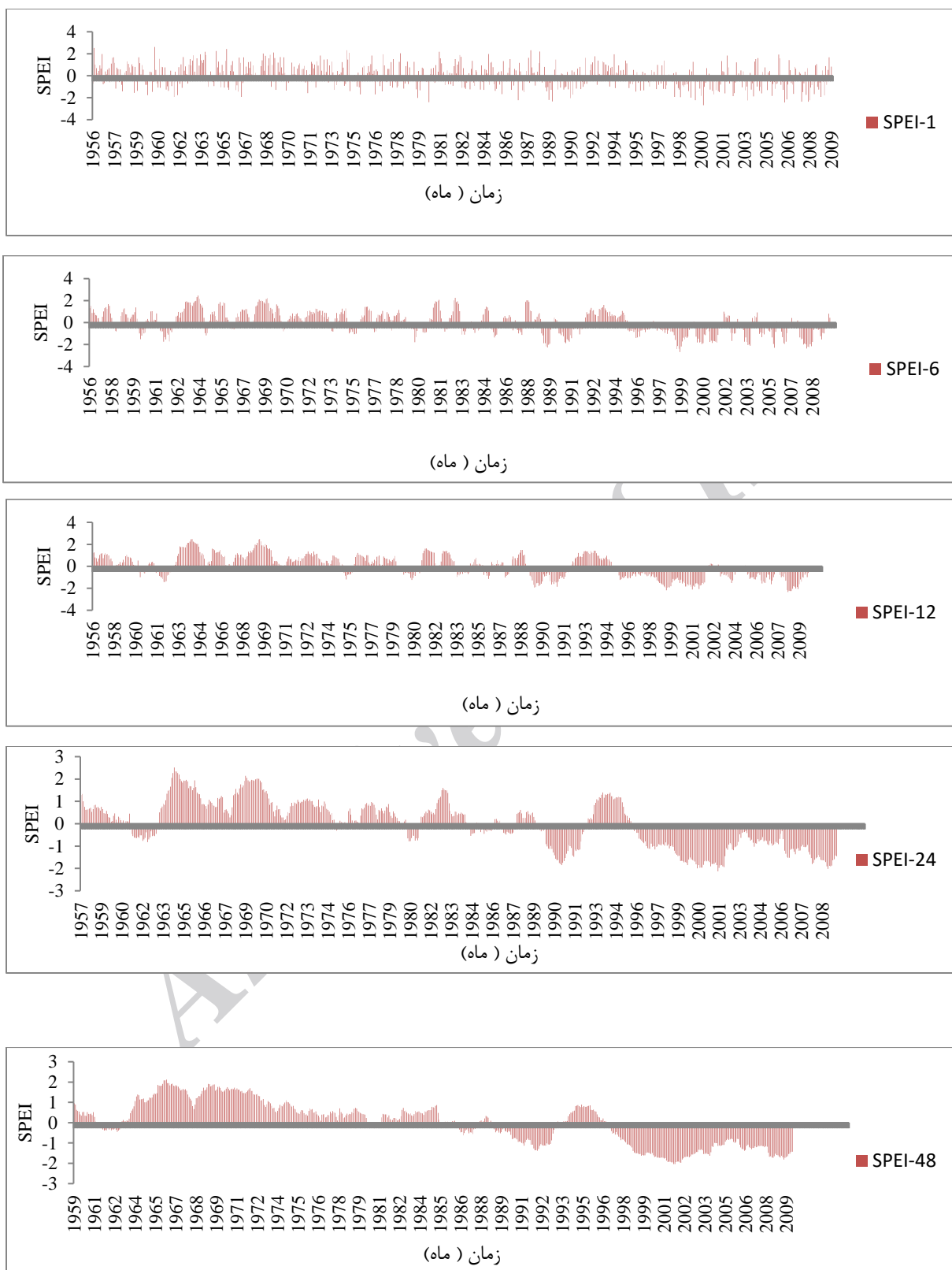
در این روابط N تعداد کل مشاهدات در طول دوره آماری می‌باشد. X_{ii} یعنی تعداد دفعاتی که کلاس خشک‌سالی در وضعیت واقعی i قرار داشته و مدل پیش‌بینی نیز به‌درستی آن را i اعلام کرده است. X_{ij} یعنی تعداد دفعاتی که کلاس خشک‌سالی در سطح i قرار داشته ولی وضعیت j که مربوط به کلاس دیگری است را اعلام کرده است. در واقع اگر $i=j$ پیش‌بینی کلاس درست بوده است. در اینجا دقت استفاده‌کننده (UA) از نظر مفهوم برابر با دقت پیش‌بینی مدل می‌باشد. دقت تولیدکننده (PA) دقتی است که بر اساس هشدار واقعی از داده‌های تاریخی به‌دست می‌آید. همچنین خطای برآورد دست پایین (UE) و خطای برآورد دست بالا (OE) با توجه به رابطه‌های (۱۵) و (۱۶) تعیین می‌شود (Gholamzade et al. 2011).

$$UE = \frac{\sum \forall i \sum \forall j X_{ij}}{N} \quad i < j \quad (15)$$

³ Producer's Accuracy

¹ Overall Accuracy

² User's Accuracy



شکل ۲- سری زمانی شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف برای ایستگاه تبریز
 Fig. 2 Time series of SPEI index at different time scales for Tabriz station

گرفته شوند. از بین الگوهای مختلف، الگویی که بهترین کارایی را ایجاد می‌کند به‌عنوان مناسب‌ترین الگوی ورودی در نظر گرفته می‌شود. به‌منظور پیش‌بینی خشک‌سالی، ۵ مدل مختلف مورد استفاده قرار گرفت. سپس بر اساس معیارهای ارزیابی بهینه‌ترین مدل در پیش‌بینی شاخص خشک‌سالی در مقیاس‌های زمانی مختلف انتخاب گردید. در مدل ۱، برای پیش‌بینی شاخص SPEI در ماه بعد از سری زمانی SPEI در ماه جاری استفاده گردید. در مدل ۲ پیش‌بینی شاخص در ماه بعد بر اساس مقادیر شاخص تا یک ماه قبل صورت پذیرفت و به‌طور مشابه در مدل ۳، ۴ و ۵ پیش‌بینی بر اساس مقادیر شاخص تا دو، سه و چهار ماه قبل انجام شد.

مدل ۱: رابطه (۱۷)

$$SPEI_{(t+1)} = f(SPEI_{(t)}) \quad (17)$$

مدل ۲: رابطه (۱۸)

$$SPEI_{(t+1)} = f(SPEI_{(t)}, SPEI_{(t-1)}) \quad (18)$$

مدل ۳: رابطه (۱۹)

$$SPEI_{(t+1)} = f(SPEI_{(t)}, SPEI_{(t-1)}, SPEI_{(t-2)}) \quad (19)$$

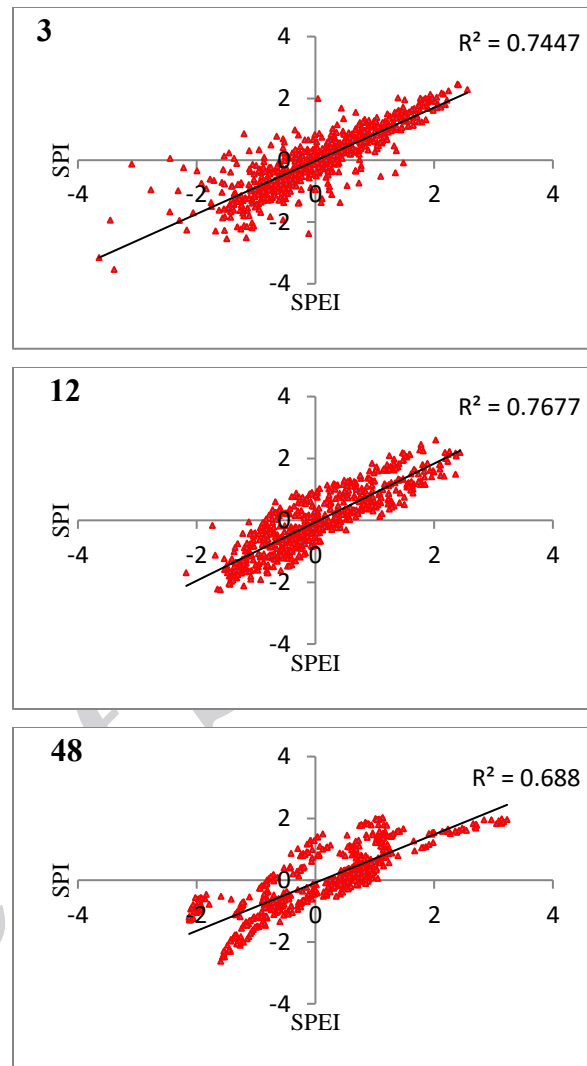
مدل ۴: رابطه (۲۰)

$$SPEI_{(t+1)} = f(SPEI_{(t)}, SPEI_{(t-1)}, SPEI_{(t-2)}, SPEI_{(t-3)}) \quad (20)$$

مدل ۵: رابطه (۲۱)

$$SPEI_{(t+1)} = f(SPEI_{(t)}, SPEI_{(t-1)}, SPEI_{(t-2)}, SPEI_{(t-3)}, SPEI_{(t-4)}) \quad (21)$$

از میان داده‌های شاخص SPEI با بازه‌های زمانی مختلف در طی دوره آماری ۵۳ ساله، ۸۰٪ داده‌ها برای واسنجی مدل و ۲۰٪ بقیه برای صحت‌سنجی مدل استفاده شد. با توجه به این‌که واردکردن داده‌ها به‌صورت خام سبب کاهش سرعت مدل می‌شود، ابتدا برای هر بازه زمانی، داده‌های شاخص مطابق رابطه‌های (۲۲) و (۲۳) نرمال شده و سپس شاخص‌های ماه‌های گذشته به‌عنوان ورودی و شاخص ماه آتی به‌عنوان خروجی در مدل برنامه‌ریزی بیان ژن مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۳- پراکنش مقادیر دو شاخص SPI و SPEI در سه گام زمانی ۳، ۱۲ و ۴۸ ماهه

Fig. 3 Distribution of SPI and SPEI indices at three-time steps of 3, 12, and 48 months

شکل (۳) نمودار پراکنش مقادیر دو شاخص SPEI و SPI را برای نمونه در گام زمانی ۳، ۱۲ و ۴۸ ماهه نشان می‌دهد که ضریب همبستگی آنها به ترتیب برابر ۰/۸۶، ۰/۸۸ و ۰/۸۳ می‌باشد و مقادیر همبستگی بین این دو شاخص در کلیه مقیاس‌های زمانی از نوع همبستگی مثبت می‌باشد.

۲-۳- پیش‌بینی خشک‌سالی

در مدل برنامه‌ریزی بیان ژن ابتدا باید بهترین الگوی ورودی به مدل مشخص گردد. برای تعیین بهترین الگوی ورودی باید عوامل مختلفی که ممکن است در پدیده مؤثر باشند، در نظر

قیاس با ماتریس ضرایب وزنی شبکه عصبی یا عصبی - فازی برشمرده. به دلیل این که روند تکاملی در این مدل دارای یک فرآیند از پیش تعیین شده و مشخص نمی‌باشد، با یک بار اجرای برنامه نمی‌توان به جواب مطلوب و بهینه دست یافت. به همین دلیل جهت تنظیم بهینه و دقیق پارامترهای مدل باید از روش سعی و خطا با تکرارهای مختلف استفاده کرد. در این پژوهش از حداقل ۳۰ بار اجرای برنامه برای یافتن مقادیر پارامترها و تنظیمات مختلف استفاده گردید که نتایج بهترین ساختارها و تنظیمات آن در استخراج مدل پیش‌بینی خشک-سالی در جدول (۲) نشان داده شده است.

$$Y_i = \frac{X_{oi}}{X_{o \max}}, X_{oi} \geq 0 \quad (22)$$

$$Y_i = \frac{X_{oi}}{|X_{o \min}|}, X_{oi} < 0 \quad (23)$$

که در این روابط Y_i مقادیر استاندارد شده شاخص X_{oi} مقادیر شاخص مشاهداتی، $X_{o \max}$ حداکثر مقدار شاخص مشاهداتی و $X_{o \min}$ حداقل مقدار شاخص مشاهداتی می‌باشد. در ادامه با در دست بودن سری زمانی شاخص SPEI اقدام به پیش‌بینی خشک‌سالی با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن شد. برتری مدل برنامه‌ریزی بیان ژن نسبت به مدل‌های دیگر را می‌توان در خروجی صریح آن به صورت فرمول جبری در

جدول ۲- مشخصات مدل برنامه‌ریزی بیان ژن

Table 2 Characteristics of the gene expression planning model

عملگرهای ژنتیکی		تنظیمات کلی	
30	تعداد کروموزوم ها	30	تعداد کروموزوم ها
7	اندازه رأس	7	اندازه رأس
3	تعداد ژن‌ها در هر کروموزوم	3	تعداد ژن‌ها در هر کروموزوم
100	تعداد جمعیت تولیدی	100	تعداد جمعیت تولیدی
جمع (+)	تابع پیوند	جمع (+)	تابع پیوند
0.1	نرخ ترکیب ژنی	0.041	نرخ جهش
RMSE	تابع برازش معیار خطا	RMSE	تابع برازش معیار خطا

پیش‌بینی خشک‌سالی ندارد. علت این موضوع را می‌توان در پراکندگی و تغییرات شدید شاخص SPEI در مقیاس یک ماهه جستجو کرد. بهبود عملکرد روش برنامه‌ریزی بیان ژن با افزایش مقیاس زمانی محاسبه SPEI رابطه مستقیمی دارد. بدین معنی که با افزایش مقیاس محاسبه SPEI، مقادیر معیارهای ارزیابی مورد استفاده بهبود می‌یابد. در این خصوص نتایج مشابهی توسط Hejabi and Bazrafshan (2012) و Mishra and Desai (2005,2006) and Araghinejad و Hosseini-Moghari (2016) برای پیش‌بینی شاخص SPI ارائه شده است.

یکی از قابلیت‌های مهم مدل GEP ارائه روابط ریاضی برای متغیرهای هیدرولوژیکی می‌باشد. با استفاده از ساختار درختی این مدل روابط نهایی برای ترکیب منتخب شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف در جدول (۴) نشان داده شده است.

در این پژوهش از ترکیب ۴ عملگر اصلی ریاضی شامل جمع، تفریق، ضرب و تقسیم برای ایجاد رابطه بین متغیرها استفاده شده است. مدل مناسب پیش‌بینی بر اساس معیارهای ارزیابی R ، $RMSE$ و MAE برای تمامی مقیاس‌های زمانی استخراج شد. بر اساس آماره‌های ارزیابی ارائه شده در جدول (۳) در مرحله صحت‌سنجی بهترین الگوی ورودی برای پیش‌بینی شاخص SPEI در گام زمانی ۱ تا ۴۸ ماهه به ترتیب ترکیب ۱، ۲، ۳، ۳ و ۳ می‌باشد. بر اساس جدول (۳) روش برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی SPEI1 کم‌ترین دقت و در پیش‌بینی SPEI48 بیش‌ترین دقت را داشته‌است. به نحوی که ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده در مرحله آموزش از ۰/۲۲۲ به ۰/۹۸۶ و در مرحله آزمون از ۰/۲۰۳ به ۰/۹۸۸ افزایش می‌یابد. در خصوص شاخص SPEI1 روش برنامه‌ریزی بیان ژن توانایی قابل‌قبولی در

جدول ۳- معیارهای ارزیابی برای مدل‌های مختلف در پیش‌بینی خشک‌سالی
Table 3 Assessment criteria for different models in drought prediction

معیار ارزیابی	مدل	آموزش					آزمون						
		SPEI 1	SPEI3	SPEI6	SPEI 12	SPEI 24	SPEI 48	SPEI1	SPEI3	SPEI6	SPEI 12	SPEI 24	SPEI 48
RMSE	1	0.291	0.238	0.171	0.124	0.058	0.024	0.308	0.237	0.24	0.189	0.141	0.046
	2	0.296	0.223	0.169	0.121	0.059	0.023	0.341	0.228	0.195	0.191	0.145	0.045
	3	0.296	0.228	0.173	0.121	0.056	0.022	0.337	0.291	0.207	0.182	0.131	0.04
	4	0.301	0.227	0.172	0.123	0.057	0.023	0.345	0.284	0.211	0.188	0.138	0.042
	5	0.304	0.228	0.173	0.121	0.057	0.025	0.339	0.322	0.227	0.187	0.144	0.042
MAE	1	0.214	0.176	0.128	0.087	0.038	0.029	0.229	0.218	0.158	0.109	0.067	0.029
	2	0.223	0.172	0.123	0.086	0.039	0.023	0.259	0.201	0.141	0.122	0.068	0.031
	3	0.223	0.186	0.127	0.087	0.036	0.022	0.248	0.207	0.157	0.117	0.061	0.022
	4	0.227	0.185	0.127	0.088	0.037	0.022	0.268	0.208	0.151	0.121	0.064	0.026
	5	0.229	0.174	0.123	0.086	0.047	0.023	0.271	0.219	0.162	0.121	0.062	0.027
R	1	0.222	0.725	0.872	0.946	0.947	0.983	0.203	0.62	0.863	0.883	0.896	0.981
	2	0.218	0.729	0.881	0.944	0.982	0.983	0.084	0.68	0.873	0.883	0.906	0.981
	3	0.214	0.749	0.875	0.947	0.986	0.986	0.148	0.615	0.872	0.883	0.912	0.988
	4	0.206	0.748	0.873	0.947	0.985	0.986	0.048	0.603	0.873	0.879	0.905	0.984
	5	0.163	0.743	0.877	0.947	0.986	0.986	0.062	0.519	0.866	0.873	0.908	0.984

دقت استفاده کننده (UA) و دقت تولید کننده (PA) برای کلاس‌های مختلف خشک‌سالی محاسبه شده است.

برای اعتبار سنجی و ارزیابی مدل برتر برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی سطوح خشک‌سالی بر اساس مقیاس‌های مختلف شاخص SPEI، از یک ماتریس خطا استفاده گردید که در آن

جدول ۴- روابط ریاضی به دست آمده با استفاده از مدل GEP
Table 4 Mathematical relationship obtained using GEP model

گام زمانی SPEI	بهترین مدل	معادله ریاضی
SPEI1	۱	$SPEI(t+1) = 0.68 + 0.228 \times SPEI(t)^2 - 0.203 \times SPEI(t)$
SPEI3	۲	$SPEI(t+1) = 0.0451 + 4SPEI(t) - \frac{SPEI(t-1)}{5.589 - SPEI(t)} - \frac{SPEI(t)}{3.48 - SPEI(t)}$
SPEI6	۲	$SPEI(t+1) = SPEI(t) - SPEI(t-1)^2 + SPEI(t-1) - \frac{SPEI(t)^3 \times SPEI(t-1)}{2.331}$
SPEI12	۳	$SPEI(t+1) = SPEI(t) - \frac{SPEI(t)^3 \times 2SPEI(t-1) - SPEI(t-1)^2}{3.044}$
SPEI24	۳	$SPEI(t+1) = SPEI(t) + \frac{SPEI(t-1)^2 - SPEI(t) \times SPEI(t-1)}{SPEI(t) - 7.44}$
SPEI48	۳	$SPEI(t+1) = \frac{SPEI(t) \times SPEI(t-2) - SPEI(t-2)^2 - 2.15 SPEI(t) - 0.12 SPEI(t-2)}{-2.341 - SPEI(t-1)}$

از اطلاعات بارش و دمای ایستگاه تبریز در یک دوره ۵۳ ساله مربوط به سال‌های ۲۰۰۹-۱۹۵۶ استفاده شد. سپس با در دست بودن سری زمانی شاخص SPEI با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن و ۵ حالت ورودی به مدل، اقدام به پیش-بینی خشک‌سالی گردید. بر این اساس نتایج زیر از این پژوهش قابل ارائه می‌باشد.

۱- بر اساس شاخص SPEI در دو گام زمانی ۲۴ و ۴۸ ماهه، سه دوره طولانی مدت خشک‌سالی مربوط به سال‌های ۱۹۶۳-۱۹۶۱، ۱۹۹۲-۱۹۸۶ و ۲۰۰۹-۱۹۹۷ تشخیص داده شد. مقایسه مقادیر شاخص SPEI و SPI حاکی از همبستگی مناسب این دو شاخص بوده و هر دو شاخص در تعیین طبقات خشک‌سالی مقادیر تقریباً یکسانی را نشان دادند.

۲- پیش‌بینی SPEI۱ با دقت بسیار پایینی انجام می‌گیرد، به نحوی که در بهترین حالت، روش برنامه‌ریزی بیان ژن در مدل یک در مرحله آزمون به ترتیب با MAE، RMSE و برابر ۰/۲۰۳، ۰/۲۲۹ و ۰/۳۰۸ بهترین عملکرد را داشته است.

۳- با افزایش مقیاس محاسبه SPEI دقت پیش‌بینی مدل برنامه‌ریزی بیان ژن افزایش می‌یابد به نحوی که در SPEI۱ عملکرد نامناسب و در SPEI۴۸ بهترین عملکرد را نشان داد.

۴- اساس ماتریس خطای مدل مشخص شد که با افزایش مقیاس زمانی شاخص SPEI میزان دقت پیش‌بینی کلاس خشک‌سالی افزایش می‌یابد. به نحوی که دقت مدل در SPEI۱ از ۵۷/۱ درصد به ۹۴/۲ درصد در SPEI۴۸ افزایش پیدا می‌کند.

دقت کلی (OA) پیش‌بینی خشک‌سالی و خطای برآورد دست بالا و دست پایین برای مقیاس‌های مختلف شاخص SPEI در جدول (۵) ارائه شده است که بر اساس آن مشخص شد با افزایش مقیاس زمانی شاخص SPEI دقت کلی که بیانگر تشخیص دقیق کلاس خشک‌سالی می‌باشد، از ۵۷/۱٪ در SPEI۱ به ۹۴/۲٪ در SPEI۴۸ افزایش پیدا می‌کند. میزان خطای دست پایین که نشان‌دهنده قرارگیری سطح پیش-بینی شده در سطح پایین‌تر نسبت به سطح واقعی و خطای دست بالا که نشان‌دهنده سطح پیش‌بینی شده بالاتر از سطح واقعی است نیز به ترتیب از ۱۹/۶٪ و ۲۳/۳٪ به مقدار ۳/۳ و ۲/۵٪ کاهش می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده دقت بالای پیش‌بینی کلاس خشک‌سالی در مقیاس‌های زمانی بلندمدت با استفاده از روش GEP می‌باشد.

جدول ۵- مقایسه دقت کلی و خطای مدل GEP در مقیاس‌های زمانی مختلف شاخص SPEI

Table 5 Comparison of overall accuracy and error of GEP model in different time scales of SPEI index

مقیاس زمانی	دقت	خطای	خطای دست
SPEI شاخص	کلی	دست بالا	پایین
1	57.1	19.6	23.3
3	62.5	18.2	19.3
6	73.8	15.6	10.6
12	82.8	9.1	8.1
24	88.4	6.5	5.1
48	94.2	3.3	2.5

۴- نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق پایش و پیش‌بینی خشک‌سالی بر مبنای شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف بود. بدین منظور

Irrigation and drainage paper. 56 FAO, Rome 300:D05109.

Behmanesh J. and Mehdizadeh S. (2017). Estimation of soil temperature using gene expression programming and artificial neural networks in a semiarid region. Environ. Earth Sci., 76(2), 76.

Dasilva V. D. P. R. (2004). On climate variability in northeast of Brazil. J. Arid Environ., 58, 575-596.

References

- Abramopoulos F., Rosenzweig C. and Choudhury B. (1988). Improved ground hydrology calculations for global climate models (GCMs): Soil water movement and evapotranspiration. Climate., 1, 921-941.
- Abramovitz M. and Stegun I. (1965). Handbook of mathematical functions. Dover Publications, New York.
- Allen R. G., Pereira L. S., Raes D. and Smith M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. FAO

- Danande Mehr A., Kahya E. and Ozger M. (2014). A gene-wavelet model for long lead time drought forecasting. *J. Hydrol.*, 517, 691-699.
- Delju A., Ceylan A., Piguet E. and Rebetz M. (2013). Observed climate variability and change in Urmia Lake Basin, Iran. *Theor. Appl. Climat.*, 111, 285-296
- Edwards D. C. and McKee T. B. (1997). Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Atm. Sci. Paper*, 634, 1-30.
- Gholamzadeh M., Morid S. and Delavar M. (2011). Application of drought early warning system for operation of Zayandehrud Dam. *J. Water Soil Sci.*, 15, 35-48 [In Persian].
- Hernandez E. A. and Uddameri V. (2014). Standardized precipitation evaporation index (SPEI)-based drought assessment in semi-arid south Texas. *J. Environ. Earth Sci.*, 71, 2491-2501.
- Hosking, J. R. M. (1990). L-Moments: analysis and estimation of distribution using linear combinations of order statistics. *J. Royal Stat. Soc. Series B.*, 52(1), 105-124.
- Hosseini-Moghari S. M. and Araghinejad S. (2016). Application of statistical, fuzzy and perceptron neural networks in drought forecasting (Case study: Gonbad-e Kavous Station). *Water Soil (Agri. Sci. Technol.)*, 30, 247-259 [In Persian].
- Jahangir M. H., Khoshmashraban M. and Yousefi H. (2015). Drought monitoring with Standard Precipitation Index (SPI) and drought forecasting with multi-layers perceptron (Case study: Tehran and Alborz Provinces). *Iran. J. Ecohydrol.*, 2, 417-428 [In Persian].
- Koza J.R. and Poli R. (2005). Genetic programming. In: *Search Methodologies*. Springer, pp 127-164.
- Labudova L., Schefczyk L. and Heinemann G. (2014). The comparison of the SPI and the SPEI using COSMO model data in two selected Slovakian river basins. In: *EGU General Assembly Conference Abstracts*.
- Maca P. and Pech P. (2016). Forecasting SPEI and SPI drought indices using the integrated artificial neural networks. *Comput. Intell. Neurosci.*, Article 2016.
- Mishra A. and Desai V. (2006). Drought forecasting using feed-forward recursive neural network. *Ecol. Model.*, 198, 127-138.
- Mostafazadeh R., Shahabi M. and Zabihi M. (2015). Analysis of meteorological drought using triple diagram model in the Kurdistan Province, Iran. *J. Geogr. Plan. Space Quart.*, 17, 129-140 [In Persian].
- Potop V. and Možný M. (2011). Examination of the effect of evatranspiration as an output parameter in SPEI drought index. *Microclimate and Mesoclima of Landscape Structures and Anthropogenic Environments: Collection of Abstracts from the International Conference: Rock Mill 2.-4.2.*
- Soltani A., Gorbani M., Fakhri Fard A., Darbandi S. and Farsadizadeh D. (2011). Genetic programming and its application in rainfall-runoff modeling. *Water Soil Sci.*, 20, 62-71 [In Persian].
- Stage J. H., Tallaksen L. M., Gudmundsson L., Van Loon A. F. and Stahl K. (2015). Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *Int. J. Climat.*, 35, 4027-4040.
- Tajbakhsh S., Eisakhani N. and Fazl Kazemi A. (2015). Assessment of meteorological drought in Iran using standardized precipitation and evapotranspiration index (SPEI). *Earth Space Phys.*, 41, 313-321 [In Persian].
- Thorntwaite C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 38, 55-94.
- Törnros T. and Menzel L. (2014). Addressing drought conditions under current and future climates in the Jordan River region. *Hydrol. Earth Sys. Sci.*, 18, 305-318.
- Vicente-Serrano S. M, Beguería S. and López-Moreno J. I. (2010) A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized

precipitation evapotranspiration index. *Climate* 23, 1696-1718

Zareabyaneh H., Ghobaeisough M. and Mosaedi A. (2016) Drought monitoring based on standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) under the effect of climate change. *Water Soil (Agri. Sci. Technol.)* 29, 374-392 [In Persian].

Archive of SID

Application of Gene Expression programming in Drought Prediction (Case Study: Tabriz Synoptic Station)

Abbas Abbasi¹, Keivan Khalili^{2*}, Javad Behmanesh³ and Akbar Shirzad⁴

¹PhD Scholar, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

²Assist. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

³Assoc. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

⁴Assist. Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

*Corresponding author: k.khalili@urmia.ac.ir

Original Paper

Received: July 05, 2018

Revised: February 12, 2019

Accepted: February 13, 2019

Abstract

The water body of Urmia Lake in recent years has been faced with a significant reduction in surface area and volume due to various reasons such as successive droughts. Therefore, in this study, the situation of drought was evaluated at the synoptic station of Tabriz as one of the important stations of Urmia Lake basin in different time scales using the standardized precipitation-evapotranspiration index (SPEI) and the gene expression programming (GEP) model. For this purpose, the SPEI index was used for drought monitoring at 1, 3, 6, 12, 24, and 48 months during the 53-year statistical period. The results showed that three long periods of drought related to the years 1961-1963, 1986-1992, and 1997-2009 are available during the statistical period. According to the results, the prediction accuracy is directly related to increasing the scale of SPEI and increased by increasing the scale of SPEI, so that the correlation coefficient in the test stage in the one-month scale (SPEI1) increased from 0.203 to 0.988 at 48-month scale (SPEI48) and the overall accuracy of the model increased from 57.1 in SPEI1 to 94.2 % in SPEI48.

Keywords: Monitoring; Prediction; Drought; Urmia Lake; Intelligent Model.