Archive of SID

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و دوم، شماره هفت، مهرماه ۹۹

پیش‌بینی خشک‌سالی با بهره‌گیری از مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی و شاخص SPI (مطالعه موردی: حوضه دریاچه ارومیه-ایران)

مهدی کماسی [1*]
komasi@abru.ac.ir
سروش شرقی [2]

تاریخ دریافت: ۹۶/۶/۱ تاریخ پذیرش:۹۶/۱۰/۶

چکیده

زمینه و هدف: خشک‌سالی تهدیدی جدی برای انسان و محیط‌زیست بوده ازاین‌رو یافتن شاخصی جهت پیش‌بینی این پدیده از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. شاخص بارش استانداردشده (SPI) یک شاخص جامع جهت طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی به‌حساب می‌آید. مدل‌های هوش مصنوعی کلاسیک از متداول‌ترین مدل‌هایی هستند که جهت پیش‌بینی شاخص SPI مورداستفاده قرارگرفته‌اند. ازآن-جایی‌که این مدل‌ها بر پایه‌ی ویژگی خودهم‌بستگی استوار هستند، بنابراین توانایی رصد نمودن سری‌های زمانی درازمدت و فصلی را دارا نمی‌باشند. در این پژوهش برای پیش‌بینی خشک‌سالی از مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی و شاخص SPI استفاده‌شده است.

روش بررسی: برای این منظور سری زمانی شاخص SPI مربوط به حوضه ارومیه توسط آنالیز موجک به چندین زیر سری با مقیاس‌های زمانی مختلف تبدیل‌شده و این زیر سری‌های زمانی به‌عنوان ورودی مدل ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی خشک‌سالی در نظر گرفته می‌شوند.

یافته ها: نتایج حاصل از صحت سنجی مدل‌ها بیان‌گر آن است که بیش‌ترین مقدار ضریب تبیین و کم‌ترین مقدار جذر میانگین مربع خطا برای مدل منفرد ماشین بردار پشتیبان به ترتیب ۰/۸۶۵ و ۰/۲۳۷ و برای مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی به ترتیب ۰/۹۵۴ و ۰/۰۵۶ می‌باشد.

بحث و نتیجه گیری: بنابراین مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی در مقایسه با مدل منفرد ماشین بردار پشتیبان توانایی به-سزایی جهت پیش‌بینی سری زمانی شاخص SPI و نیز رصد نمودن نقاط بیشینه این سری زمانی به سبب در نظر گرفتن تغییرات فصلی دارا می‌باشد. از سویی نشان داده شد که این مدل ترکیبی در مقایسه با سایر مدل‌های خودهم‌بسته کلاسیک هم‌چون شبکه عصبی مصنوعی از دقت و کارایی بالاتری برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: مدل ماشین بردار پشتیبان، تبدیل موجک، شاخص SPI، پیش‌بینی خشک‌سالی، حوضه ارومیه.

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آیت اله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد. *(مسوول مکاتبات)
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آیت اله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد.

www.SID.ir

Archive of SID

J. Env. Sci. Tech., Vol 22, No.7, October, 2020

Drought Forecasting Using Wavelet - Support Vector Machine and Standardized Precipitation Index (Case Study: Urmia Lake-Iran)

Mehdi Komasi[1] *

komasi@abru.ac.ir

Soroush Sharghi[2]

Admission Date:December 27, 2017 Date Received: August 23, 2017

Abstract

Background and Objectives: Drought is regarded as a serious threat for people and environment. As a result, finding some indices to forecast the drought is an important issue that needs to be addressed urgently. The appropriate and flexible index for drought classification is the Standardized Precipitation Index (SPI). Artificial intelligence models were commonly used to forecast SPI time series. These models are based on auto regressive property. So, they are not able to monitor the seasonal and long-term patterns in time series. In this study, the Wavelet-Support Vector Machine (WSVM) approach was used for the drought forecasting through employing SPI.

Method: In this way, the SPI time series of Urmia Lake watershed was decomposed to multiple frequent time series by wavelet transform; then, these time series were imposed as input data to the Support Vector Machine (SVM) model to forecast the drought.

Findings: The results showed that, the maximum value of R^2 and minimum value of RMSE indexes for SVM model are 0.865 and 0.237 and for WSVM model are 0.954 and 0.056 respectively in verification step.

Discussion and Conclusion: So, the propounded hybrid model has superior ability in forecasting SPI time series comparing with the single SVM model and also it can accurately assess the extreme data in SPI time series by considering the seasonality effects. Finally, it was concluded that, the proposed hybrid model is relatively more appropriate than classical autoregressive models such as ANN.

Keywords: SVM Model, Wavelet Transform, SPI, Drought Forecasting, Urmia Lake Watershed.

1- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran. *(Corresponding Author)

2- MS Student, Hydraulic Structures, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

برخلاف سایر مخاطرات و بلایای طبیعی، خشک‌سالی پدیده‌ای است که به‌صورت آرام و کاملا غیر محسوس رخ می‌دهد. بنابراین مدل‌سازی و پیش‌بینی مشخصه‌های مختلف خشک‌سالی مانند شروع، تداوم و شدت آن در یک منطقه نقش به‌سزایی را در مدیریت منابع آب و صنعت کشاورزی ایفا می‌کند. یکی از متداول‌ترین روش‌ها که جهت مشخص نمودن موقعیت و شدت خشک‌سالی در یک منطقه به‌کار می‌رود، استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی است. از معروف‌ترین شاخص‌های خشک‌سالی می‌توان به شاخص شدت خشک‌سالی پالمر (PDSI)[1] و شاخص بارش استانداردشده (SPI)[2] اشاره کرد. لازم به ذکر است که محدودیت‌هایی در استفاده از شاخص PDSI وجود دارد. برای نمونه این شاخص برخلاف شاخص SPI فقط برای حوضه‌هایی با توپوگرافی یکنواخت کاربرد دارد. از سویی یکی از ویژگی‌های مثبت شاخص SPI توانایی توصیف خشک‌سالی در مقیاس‌های زمانی مختلف است (۱و۲و۳). یکی دیگر از برتری‌های شاخص SPI در مقایسه با شاخص PDSI، دارا بودن ساختاری ساده برای بیان موقعیت خشک‌سالی می‌باشد (۲). بنابراین در این پژوهش شاخص SPI مورداستفاده قرار می‌گیرد.

جهت پیش‌بینی سری زمانی داده‌های SPI نیازمند به یک ماشین یادگیری می‌باشد. امروزه مدل‌های هوش مصنوعی (AI)[3] مانند مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN)[4] و سیستم استنتاج فازی عصبی‌تطبیقی (ANFIS)[5] در پژوهش‌های متعددی برای پیش‌بینی فرآیندهای هیدرولوژیکی به‌کار گرفته‌شده‌اند (۶-۳). به‌عنوان مثال اژدری مقدم و همکاران (۴) از مدل ANFIS جهت پیش‌بینی خشک‌سالی در زاهدان استفاده کرند. هم‌چنین این مدل توسط شفیعی و همکاران (۷) برای پیش‌بینی جریان ورودی رود نیل به سد اسوان مورد استفاده قرار گرفت. بنی‌حبیب و همکاران (۸) نیز به شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان ماهانه ورودی به مخزن سد دز با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی استاتیکی و دینامیکی پرداختند. نسل بعدی از روش‌های هوش مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان (SVM)[6] نام دارد که نسبت به روش شبکه عصبی مصنوعی سریع‌تر آموزش دیده و نتایج دقیق‌تری را ارایه می‌دهد. از طرفی این مدل کارایی مناسبی در کار با داده‌های غیرخطی نسبت به سایر مدل‌ها از خود نشان داده است (۱۱-۹). در سال‌های اخیر کاربردهای مدل ماشین بردار پشتیبان در مباحث هیدرولوژیکی و هواشناسی در مقایسه با مدل شبکه عصبی مصنوعی موردسنجش قرارگرفته است(۱۷-۱۲). در این زمینه صحرایی و مشفق (۱۸) به پیش‌بینی جریان رودخانه با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان پرداختند. نتایج حاصل از محاسبه و بررسی شاخص های آماری و مقادیر خطا، حاکی از دقت بالای این مدل در مقایسه با نتایج محققین قبلی بود. نیک‌بخت شهبازی و همکاران (۱۹) با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان، شاخص SPI را در چهار حوضه تامین آب تهران پیش‌بینی کردند. آن‌ها به این نتایج دست یافتند که مدل ماشین بردار پشتیبان در مقایسه با مدل شبکه عصبی مصنوعی دقت بالایی در مدل‌سازی داده‌های زمانی بلندمدت داراست. هم‌چنین زهرایی و ناصری (۲۰) از مدل ماشین بردار پشتیبان جهت پیش‌بینی SPI فصلی استفاده نمودند و به این نتیجه دست یافتند که داده‌های SPI دو تا پنج ماه آینده را می‌توان با دقت بالایی به‌وسیله‌ی این مدل پیش‌بینی کرد، به صورتی که این پیش‌بینی نقش به‌سزایی را در مدیریت منابع آب ایفا می‌کند.

هرچند مدل ماشین بردار پشتیبان دارای انعطاف و دقت مناسبی جهت مدل‌سازی سری زمانی ایستا است، اما برای مدل‌سازی سری‌های زمانی نا ایستا که گستره‌ی وسیعی از مقیاس‌های زمانی هم‌چون دهه، سال و ماه را دربر می‌گیرند، دقت مناسبی ندارد. در چنین وضعیتی اگر داده‌های ورودی به مدل ماشین بردار پشتیبان توسط یک تابع تبدیل پیش‌پردازش

1- Palmer Drought Severity Index
2- Standardized Precipitation Index
3- Artificial Intelligence
4- Artificial Neural Network
5- Adaptive Neural-Fuzzy Inference System
6- Support Vector Machine

www.SID.ir

نشوند دقت و کارایی مدل پایین خواهد آمد (۲۱). عمل پیش‌پردازش داده‌ها می‌تواند با استفاده از تابع تبدیل موجک انجام شود به این صورت که سری زمانی داده‌های ورودی به زیرسری‌هایی با درجات تجزیه مختلف، از یک‌دیگر مجزا شده و جداگانه وارد مدل ماشین بردار پشتیبان می‌شوند و مدل شناخت دقیق‌تری را از داده‌های ورودی پیدا می‌کند تا عمل پیش‌بینی درنهایت دقت صورت پذیرد. درنتیجه در این مقاله ایده و نوآوری مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی (WSVM)[1] که از داده‌های با مقیاس زمانی مختلف به‌عنوان ورودی استفاده می‌کند، جهت پیش‌بینی و مدل‌سازی پیشنهاد گردیده است. در این راستا در پژوهش حاضر از مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی و شاخص SPI برای مدل‌سازی خشک‌سالی حوضه دریاچه ارومیه بهره‌گیری شده است. بنابراین هدف، اثبات برتری این روش نسبت به سایر روش های کلاسیک است.

در ادامه این مقاله، در بخش دوم مفاهیم مربوط به شاخص SPI، مدل ماشین بردار پشتیبان، مدل شبکه عصبی مصنوعی و تابع موجک مرور و سپس ساختار مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی ارایه شده است. در بخش سوم، حوضه‌ی موردمطالعه معرفی گردیده و در بخش چهارم کارایی‌های مدل منفرد ماشین بردار پشتیبان و مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی مورد بحث و بررسی قرارگرفته است و درنهایت نتیجه‌گیری و جمع‌بندی در قسمت پایانی ارایه شده است.

مواد و روش‌ها

شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

شاخص SPI یک ابزار قوی در پردازش داده‌های بارندگی می‌باشد و هدف آن اختصاص ارزش عددی به بارندگی است که از این طریق بتوان نواحی با آب‌وهوای متفاوت را بایک‌دیگر مقایسه نمود. از مزیت‌های شاخص SPI استوار بودن محاسبه SPI بر پایه داده‌های بارندگی و عدم وابستگی این شاخص به شرایط رطوبت خاک می‌باشد. هم‌چنین این شاخص از توپوگرافی تاثیر نمی‌پذیرد. مشخصه اصلی SPI انعطاف‌پذیری آن در اندازه‌گیری خشک‌سالی در مقیاس‌های زمانی متفاوت است، زیرا خشک‌سالی ازلحاظ دوره دارای دامنه بسیار گسترده‌ای می‌باشد. بنابراین تشخیص و پایش آن با انواع مقیاس‌های زمانی مهم می‌باشد. محاسبه SPI برای هر منطقه بر پایه آمار بلندمدت بارندگی استوار می‌باشد که این آمار به یک تابع توزیع احتمال، برازش یافته و تابع حاصل می‌تواند برای پیدا کردن احتمال تجمعی بارندگی برای یک ایستگاه و یک مقیاس زمانی مشخص مورد استفاده قرار گیرد. این احتمال سپس به متغیر تصادفی نرمال تبدیل می‌شود و بیان‌گر شاخص SPI است که دامنه تغییرات و طبقه‌بندی آن برای بیان شدت خشک‌سالی در جدول(۱) آورده شده است (۲۲).

بنابراین مقدار SPI انحراف استاندارد یک رویداد مشخص را از شرایط نرمال نشان می‌دهد. به‌طورکلی این شاخص بر اساس توضیحات گفته‌شده برای بیان خشک‌سالی چنین تعریف می‌شود: دوره‌ای که SPI دایماً منفی است و به مقدار ۱- و کم‌تر از آن می‌رسد و زمانی پایان می‌پذیرد که مقدار آن مثبت شود. بنابراین مقادیر مثبت نمایان‌گر بارشی بیش از مقدار متوسط و مقادیر منفی نشان‌گر بارشی کم‌تر از بارش متوسط می‌باشد (۲۳).

محاسبه شاخص SPI

داده‌های اصلی شاخص SPI را داده‌های بارندگی ماهانه ایستگاه‌های باران‌سنجی تشکیل می‌دهند. پس از اطمینان از همگن و تصادفی بودن داده‌های ماهانه، سری زمانی در بازه‌های ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ... ماهه تشکیل می‌شود و سری زمانی آن با توزیع گاما برازش داده می‌شود که تابع دانسیته احتمال یا فراوانی آن به‌صورت رابطه (۱) تعیین می‌گردد.

$$g(x)=\frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)}X^{(\alpha-1)}e^{-x/\beta} \qquad X>0 \qquad (1)$$

1- Wavelet Support Vector Machine

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۱-طبقه‌بندی خشک‌سالی بر اساس شاخص SPI (۲۱)

TABLE 1. Drought classification based on SPI

شدت خشک‌سالی	دامنه SPI	احتمال وقوع
شدیداً مرطوب (مرطوب حدی)	بزرگ‌تر از ۲	۰/۰۲۲۸
خیلی مرطوب	۱/۹۹ ~ ۱/۵	۰/۰۴
مرطوب متوسط	۱/۴۹ ~۱	۰/۰۹۱۹
مرطوب خفیف (تقریباً نرمال)	۰/۹۹ ~۰	۰/۳۴۱۳
خشک خفیف (تقریبا نرمال)	۰ ~ -۰/۹۹	۰/۳۴۱۳
خشک متوسط	-۱ ~ -۱/۴۹	۰/۰۹۱۹
خیلی خشک	-۱/۹۹ ~ -۱/۵	۰/۰۴
شدیداً خشک (خشک حدی)	کوچک‌تر از ۲-	۰/۰۲۲۸

α و β به ترتیب پارامتر شکل و پارامتر مقیاس می‌باشند و $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما بوده که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Gamma(\alpha)=\int_0^{\infty} y^{(\alpha-1)}e^{(-y)}dy \qquad (۲)$$

پارامترهای α وβ مربوط به تابع چگالی گاما برای هر ایستگاه و برای هر مقیاس زمانی و هر ماه از سال برآورد می‌شود. مک کی و همکاران با استفاده از روش حداکثر درست نمایی مقادیر بهینه ضرایب α و β را بر اساس معادلات زیر برآورد نمودند (۲۴).

$$\alpha=\frac{1}{4A}\left[1+\sqrt{1+\frac{4A}{3}}\right] \qquad (۳)$$

$$A=Ln(\overline{X})-\frac{\sum Ln(X)}{n} \qquad (۴)$$

$$\beta=\frac{\overline{X}}{\alpha} \qquad (۵)$$

در روابط بالا n تعداد مشاهدات بارندگی و $\overline{X}$ میانگین بارندگی برای یک دوره چندماهه مشخص می‌باشد. سپس پارامترهای محاسبه‌شده برای یافتن احتمال تجمعی بارندگی برای مقیاس زمانی مشخص برای هر یک از ایستگاه‌ها به‌کار گرفته می‌شود که این احتمال را با فرض $t=X/\beta$ می‌توان بر طبق رابطه (۶) تبدیل به تابع گامای ناقص نمود.

$$G(X)\int_{\circ}^{x} g(x)dx=\frac{1}{\Gamma(\alpha)}\int_{\circ}^{x} t^{(\alpha-1)}e^{(-t)}dt \qquad (۶)$$

از آن‌جایی که تابع گاما برای$X=0$ تعریف‌نشده است، هرگاه توزیع بارندگی دارای مقدار صفر باشد احتمال تجمعی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$H(X)=q+(1-q)G(X) \qquad (۷)$$

در معادله فوق q احتمال بارندگی صفر و m تعداد صفرهای موجود در سری‌های زمانی بارندگی می‌باشد که q را به‌صورت حاصل تقسیم m بر تعداد کل داده‌ها (n) تخمین می‌زند، سپس با داشتن $H(x)$ و روابط (۸) تا (۱۱) SPI محاسبه می‌گردد:

$$SPI=-\left[t-\frac{c_{\circ}+c_1t+c_2t}{1+d_1t+d_2t^2+d_3t^3}\right] \qquad 0<H(X)\le 0.5 \qquad (۸)$$

$$SPI=+\left[t-\frac{c_{\circ}+c_1t+c_2t}{1+d_1t+d_2t^2+d_3t^3}\right] \qquad 0.5<H(X)<1 \qquad (۹)$$

$$t=\sqrt{\ln\left(\frac{1}{H(X)^2}\right)} \qquad 0<H(X)\le 0.5 \qquad (۱۰)$$

www.SID.ir

$$t=\sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(X))^2}\right)} \qquad 0.5<H(X)<1 \qquad (۱۱)$$

ضرایب ثابت $d_3, d_2, d_1, c_2, c_1, c_0$ به این شرح می‌باشند:

d_1=1.432788، d_2=0.189269، d_3=0.001308، c_0=2.515517، c_1 =0.802853 و c_2=0.010328.

ماشین بردار پشتیبان (SVM)

ماشین‌های بردار پشتیبان همانند دیگر روش‌های هوش مصنوعی بر مبنای الگوریتم داده‌کاوی عمل می‌کنند. مهم‌ترین وظایف مدل ماشین‌های بردار پشتیبان، طبقه‌بندی و خطی-سازی یا رگرسیون داده‌ها است. خطی‌سازی داده‌ها به‌وسیله‌ی الگوریتم خطی‌سازی ε-SVR و با معرفی تابع ε-sensitive انجام می‌پذیرد. در یک الگوریتم خطی سازی ε-SVR ، با فرض مقادیر ورودی و خروجی x_i و y_i، هدف یافتن تابعی است که کم‌ترین انحراف ε را از y_i ها داشته باشد. اگر داده‌های آموزشی به تعداد K سری به‌صورت $(x_1y_1)..(x_ky_k)$ موردنظر باشند، تابع خطی‌سازی عبارت است از:

$$f(x)=(w,x)+b \quad with \quad (w,x)\in R^N \quad ,b\in R \qquad (۱۲)$$

در تعیین تابع $f(x)$ باید همواره مقادیر خروجی به‌گونه‌ای تعیین شوند که به‌طور هم‌زمان، کم‌ترین میزان انحراف ε تعیین‌شده و تابع مقدار مناسب w را اختیار کند. با حل رابطه‌ی بهینه‌سازی (۱۳) دست‌یابی به چنین شرایطی محقق می‌شود.

$$Minimize\ \frac{1}{2}w^2\ \ subject\ to \begin{cases} y_i-(w,x_i)-b\le\varepsilon \\ (w,x_i)+b-y_i\le\varepsilon \end{cases} \qquad (۱۳)$$

گاهی ممکن است نتوان میزان انحراف ε را لحاظ کرد و باید مقدار انحراف بیش‌تر از ε را نیز قابل‌قبول فرض کرد. این میزان انحراف اضافه با لحاظ کردن متغیرهای (ξ_i, ξ_i') در رابطه‌ی بهینه‌سازی (۱۳) اعمال می‌شود که منجر به رابطه‌ی بهینه-سازی (۱۴) می‌گردد (۲۵).

$$Minimize\ \frac{1}{2}w^2+C\sum_{i=1}(\xi_i+\xi_i')\ subject\ to \begin{cases} y_i-(w,x_i)-b\le\varepsilon+\xi_i \\ (w,x_i)+b-y_i\le\varepsilon+\xi_i \\ \xi_i,\xi_i'\ge 0-\ forall...i=1,2,...K \end{cases} \qquad (۱۴)$$

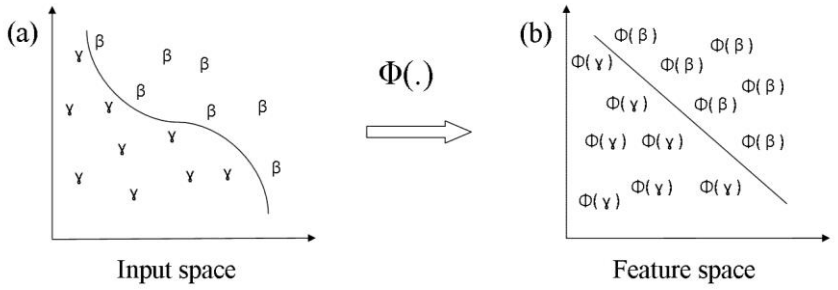
در رابطه‌ی (۱۴)، C خطای تولید نام دارد که درواقع رابطه‌ی جایگزین را برای تابع $f(x)$ مشخص کرده و مقدار آن تا مقدار مجاز انحراف ε افزایش می‌یابد. درنهایت با استفاده از توابع کرنل $k(x_i,x)$ و پارامترهای لاگرانژین λ_i و λ_i' رابطه‌ی تابع خطی سازی، به شکل رابطه‌ی (۱۵) بازنویسی خواهد شد.

$$f(x,b)=\sum_{i=1}^{k}(\lambda_i'-\lambda_i)k(x_i,x)+b \qquad (۱۵)$$

در رابطه با تابع هسته لازم به ذکر است که قبل از خطی‌سازی داده‌ها یا همان تقسیم خطی، جهت توانایی ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی داده‌های با پیچیدگی بالا، داده‌ها به-وسیله‌ی تابع هسته (K یا Φ) به فضای با ابعاد بسیار بالاتر منتقل می‌شوند تا تقسیم بندی خطی داده‌ها میسر شود (شکل۱). بنابراین کافی است در مسایل غیرخطی از هسته یا همان کرنل مقادیر ورودی به‌جای خود تابع استفاده شود.

www.SID.ir

Archive of SID

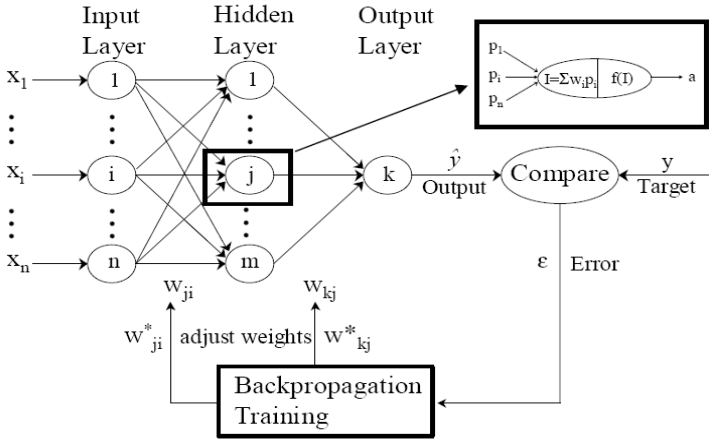


شکل۱- مفهوم تبدیل از فضای ورودی به فضای مشخصه (۱۶)

Figure 1. The converting of the input space to feature space

معماری شبکه عصبی- مصنوعی

یکی از انواع مهم شبکه‌های عصبی، شبکه پرسپترون چندلایه (Multi-Layer Perception) است که شامل یک‌لایه ورودی، یک یا چندلایه مخفی و یک‌لایه خروجی می‌باشد. در این مقاله از یک شبکه سه لایه مطابق شکل(۲) با تابع محرک سیگموید استفاده شده که تعداد نرون‌های لایه اول در شبکه با رویداشت به این نکته که SPI در زمان$t+1$ به SPI در زمان‌های $t-1$, t, $t-3$, 2, ... می‌تواند وابسته شود ۲،۴،۶ و... نرون در نظر گرفته شده است. هم‌چنین تعداد نرون‌های لایه میانی متغیر بوده و برای حالت های مختلف بین ۳ تا ۳۰ نرون بررسی صورت گرفته است. لایه خروجی نیز شامل یک نرون می‌باشدکه مقدار SPI در زمان $t+1$ امی‌باشد.



شکل۲- طرح و آرایش شبکه عصبی مصنوعی

Figure 2. Design and arrangement of artificial neural network

در آرایش معماری شبکه عصبی شکل(۲) ، Xi متغیرهای ورودی، y متغیر خروجی، w ضرایب وزن در شبکه، n، m و k به ترتیب تعداد نرون در لایه ورودی، لایه میانی و لایه خروجی می‌باشد که این آرایش را می‌توان به فرم رابطه (۱۶) بیان داشت.

$$\hat{y}_k = f_0\left[\sum_{j=1}^{M} w_{kj} \cdot f_h\left(\sum_{i=1}^{N} w_{ji} x_i + w_{jo}\right) + w_{ko}\right] \qquad (۱۶)$$

در این تحقیق از الگوریتم LM به منظور شناسایی بهترین روش با بالاترین بازده برای آموزش شبکه استفاده شده است. این الگوریتم تغییر یافته‌ی الگوریتم کلاسیک نیوتن است که

www.SID.ir

برای پیداکردن راه حلی مناسب برای مسایلی که نیاز به کمینه‌سازی دارند با فرمول بندی زیر به‌کار می‌رود.

$$X_{k+1} = X_k - \left[J^T J + \mu I \right]^{-1} J^T + e \qquad (۱۷)$$

دراین رابطه، X وزن های شبکه عصبی، J ژاکوبین ماتریس معیار اجرای شبکه که باید حداقل شود و μ عددیست که فرآیند آموزش را کنترل می‌کند و e بردار خطای باقی‌مانده است (۲۶).

تبدیل موجک

تابع تبدیل موجک (شکل۳) قابلیت تجزیه سری زمانی به چندین زیر سری زمانی با مقیاس‌های مختلف را دارا است و با مطالعه زیر سری‌های زمانی حاصل از سری زمانی کلی، رفتار کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس یک فرایند هیدرولوژیکی را مورد آنالیز قرار می‌دهد.



شکل۳- طرح شماتیک تبدیل موجک

Figure 2. Schematic of the wavele ransform

تابع موجک، تابعی است که دارای دو ویژگی مهم نوسانی و کوتاه‌مدت بودن می‌باشد. ψ(x)، تابع موجک است اگر و فقط اگر تبدیل فوریه آن Ψ (ω) ، شرط زیر را برآورده کند.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|}{|\omega|^2} d\omega \prec +\infty \qquad (۱۸)$$

این شرط با عنوان شرط پذیرفتگی برای موجک ψ(x) شناخته می‌شود. ψ(x) تابع موجک مادر است که در آن توابع مورد استفاده در تحلیل، با دو عمل ریاضی انتقال و مقیاس در طول سیگنال مورد تحلیل، تغییر اندازه و تغییر محل قرار می‌گیرد.

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a} \right) \qquad (۱۹)$$

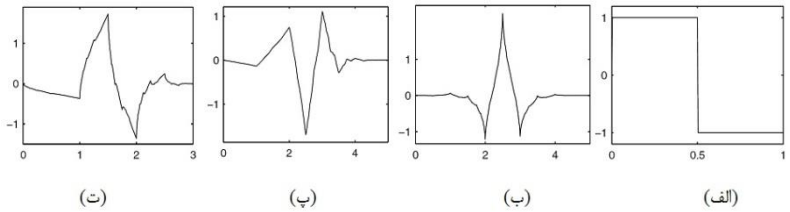
درنهایت ضرایب موجک در هر نقطه از سیگنال (b) و برای هر مقدار از مقیاس (a) با رابطه (۲۰) قابل‌محاسبه است (۲۷):

$$CWT(a,b) = Wf(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a} \right) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi_{a,b}(x) dx \qquad (۲۰)$$

توابع موجک دارای انواع بسیاری هستند که مهم‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها شامل تابع موجک Haar، Daubechies، Symlet، Morle، Mexican hat، Meyer، Coiflet می‌باشند که در شکل(۴) نمودار تابع چهار نمونه از موجک‌ها نشان داده شده است (۲۷).

www.SID.ir

Archive of SID

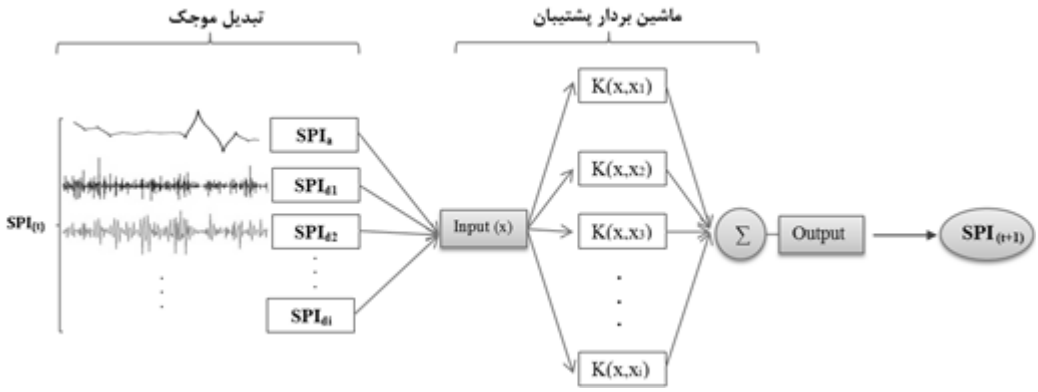


شکل۴-نمودار الف) تابع موجک Haar ب) تابع موجک Coif1 پ) تابع موجک Sym3 و ت) تابع موجک Db2

Figure. 4. (a) Haar wavelet function, (b) Coif1 wavelet function, (c) Sym3 wavelet function, (d) Db2 wavelet function

مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی (WSVM)

معماری مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی از دو بخش تبدیل موجک و ماشین بردار پشتیبان تشکیل‌شده است که تبدیل موجک نقش پیش‌پردازش داده‌های خام و مدل ماشین بردار پشتیبان نقش مدل‌سازی را ایفا می‌کند (شکل۵).



شکل۵- ساختار مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی

Figure 5. The architecture of the hybrid WSVM model

در روش پیشنهاد شده ابتدا سری داده‌های SPI به زیر سری‌هایی با درجه مختلف تجزیه‌شده و در مرحله بعد داده‌های تجزیه‌شده جهت مدل‌سازی به‌عنوان ورودی مدل ماشین بردار پشتیبان به‌کار گرفته می‌شوند. در این پژوهش برای انجام مدل‌سازی از برنامه‌نویسی Matlab استفاده‌شده است. در این مدل‌سازی جهت سنجش میزان صحت و دقت از روابط آماری ضریب تبیین[1] (R^2) و جذر میانگین مربع خطا[2] (RMSE) در مرحله‌ی واسنجی[3] و صحت سنجی[4] به شرح روابط (۲۱) و (۲۲) استفاده می‌شود. برای این منظور داده‌ها به دو گروه تقسیم می‌شوند: ۷۵٪ کل داده‌ها جهت واسنجی و ۲۵٪ باقی‌مانده جهت صحت‌سنجی مدل ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(SPI_{obs_i} - SPI_{com_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(SPI_{obs_i} - \overline{SPI}_{obs}\right)^2} \qquad (۲۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(SPI_{obs_i} - SPI_{com_i})^2}{N}} \qquad (۲۲)$$

به‌طوری‌که R^2، RMSE، N، SPI_{obsi}، SPI_{comi} و $\overline{SPI}_{obs}$ به ترتیب ضریب تبیین، جذر میانگین مربع خطا، تعداد داده های مشاهداتی SPI، داده‌های مشاهداتی SPI، داده‌های پیش‌بینی‌شده(محاسباتی) و میانگین داده‌های مشاهداتی است.

1- Determination Coefficient
2- Root Mean Square Error
3- Calibration
4- Verification

www.SID.ir

هم‌چنین از رابطه (۲۳) جهت ارزیابی قابلیت مدل در پیش‌بینی نقاط بیشینه یا کمینه استفاده می‌شود.

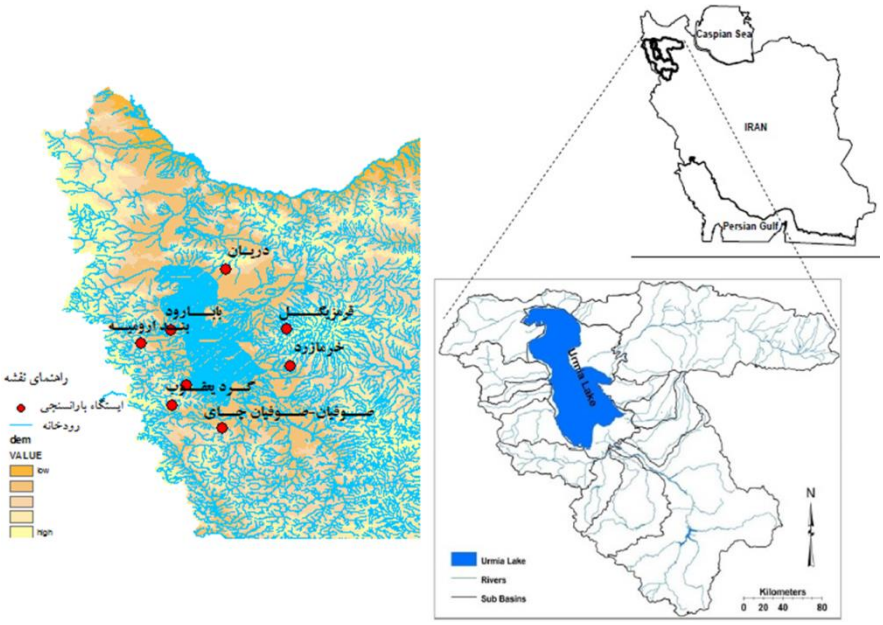
$$R^2_{peack} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(SPI_{PC_i} - SPI_{PO_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(SPI_{PO_i} - \overline{SPI}_{PO}\right)^2} \qquad (۲۳)$$

به‌طوری‌که R^2_{peak} ضریب تبیین برای مقادیر بیشینه و کمینه و نیز N تعداد داده‌های بیشینه و کمینه و SPI_{poi}، SPI_{pci} و $\overline{SPI}_{po}$ به ترتیب داده‌های مشاهداتی، داده‌های محاسباتی و میانگین داده‌های مشاهداتی برای مقادیر بیشینه و کمینه می‌باشد.

مدل ماشین بردار پشتیبان موجکی از پارامترهای ساختاری مختلفی هم‌چون تابع کرنل، تابع موجک و درجه تجزیه تشکیل شده است که باید به‌درستی انتخاب و کالیبره شوند. بنابراین در گام نخست نتایج پژوهش، مدل ماشین بردار پشتیبان منفرد در نظر گرفته شده و کارآمدترین تابع کرنل انتخاب می‌گردد تا در مدل ترکیبی به‌کار گرفته شود. سپس این مدل با آنالیز موجک ترکیب شده و نتایج حاصل از آن ملاک انتخاب بهترین تابع موجک و بهترین درجه تجزیه مورد صحت سنجی قرار می‌گیرد.

مطالعه موردی و داده‌های مطالعاتی

دریاچه ارومیه یک دریاچه نمکی محسوب می‌شود و در شمال غرب ایران بین دو استان آذربایجان شرقی و غربی واقع‌شده است. این دریاچه بزرگ‌ترین دریاچه در خاورمیانه به‌حساب می‌آید. طول این دریاچه ۱۴۰ کیلومتر، عرض آن ۴۰ تا ۵۵ کیلومتر و بیش‌ترین عمق آن ۱۶ متر می‌باشد (شکل۶). سطح آب در این دریاچه به حد بحرانی خود رسیده است و ارتفاع آب زیرزمینی در قسمتی از حوضه آن تا ۱۶ متر کاهش‌یافته است. دمای میانگین در اطراف دریاچه و در مناطق کوهستانی آن به ترتیب ۱۱ و ۲/۵ درجه سانتی گراد می‌باشد. بیش‌تر جریان ورودی به دریاچه مربوط به سه رودخانه زرینه، سیمینه و تلخینه می‌باشد. در این پژوهش از میانگین داده‌های بارش سالانه در هشت ایستگاه باران‌سنجی(شکل۶) طی سال‌های ۱۳۴۸ تا ۱۳۸۸ استفاده شده و با استفاده از این داده‌ها مقادیر سری زمانی SPI در بازه‌ی زمانی ۱۲ ماهه محاسبه‌شده‌اند (شکل۷).

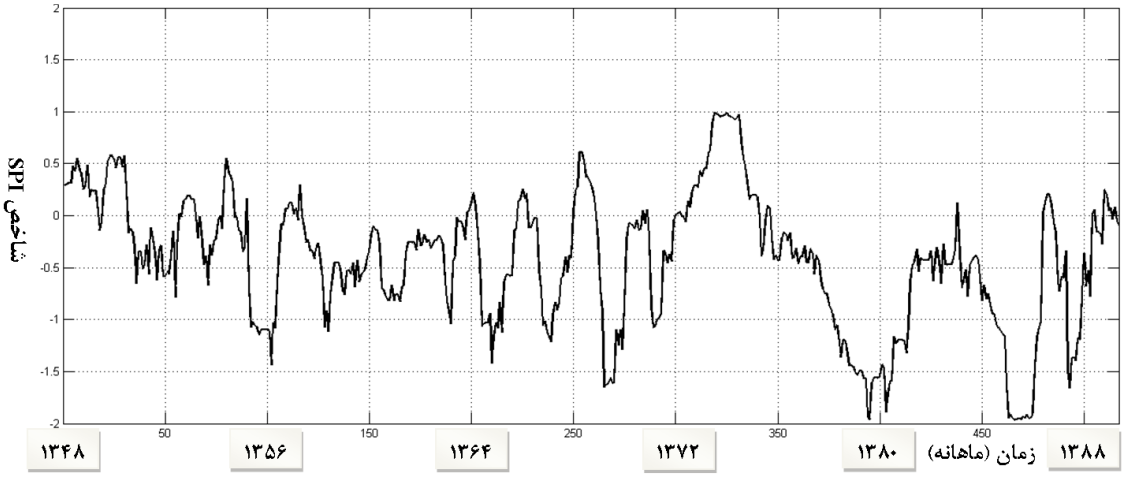


شکل۶- موقعیت جغرافیایی دریاچه ارومیه و ایستگاه‌های باران‌سنجی

Figure 6. Location of Lake Urmia and drainage sub-basins

www.SID.ir

Archive of SID



شکل۷- سری زمانی داده‌های SPI حوضه دریاچه ارومیه

Figure 7. SPI time series of Urmia Lake watershed

مدل منفرد ماشین بردار پشتیبان (SVM)

تابع هسته یا کرنل، ساختاری مهم در الگوریتم ماشین بردار پشتیبان محسوب می‌شود و دارای انواع مختلفی می‌باشد. در این پژوهش چهار نوع تابع هسته مورد ارزیابی قرارگرفته است که شامل RBF-kernel، Poly-kernel، MLP-kernel و Lin-Kernel می‌باشند. در گام نخست هدف انتخاب بهترین تابع هسته ازنظر کارایی در مدل‌سازی در مقایسه با سایر توابع هسته می‌باشد. برای این منظور همان‌گونه که در جدول(۲) نشان داده‌شده، مدل‌سازی ماشین بردار پشتیبان توسط سه نوع تابع هسته بر روی داده‌های SPI در زمان t ($SPI_{(t)}$) برای حوضه‌ی ارومیه انجام‌گرفته و از R^2 و RMSE به‌عنوان معیاری برای تعیین کارایی مدل در واسنجی و صحت سنجی استفاده گردیده است. به دلیل بی‌بعد بودن داده‌های SPI مقادیر RMSE نیز بی بعد می‌باشند.

جدول۲- نتایج مدل‌سازی ماشین بردار پشتیبان جهت انتخاب بهترین تابع هسته

Table 2. Result of SVM model for finding the best kernel function

تابع کرنل	واسنجی		صحت سنجی	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE
RBF-kernel	۰/۸۸۳	۰/۱۵۴	۰/۸۶۵	۰/۲۳۷
Poly-kernel	۰/۷۶۵	۰/۳۰۲	۰/۷۶۱	۰/۳۴۱
MLP-kernel	۰/۷۹۱	۰/۲۱۰	۰/۷۷۱	۰/۳۰۲
Lin-kernel	۰/۷۸۴	۰/۲۹۵	۰/۶۹۸	۰/۳۸۶

در جدول(۲) با توجه به مقادیر R^2 و RMSE در مرحله‌ی صحت سنجی یا شبیه‌سازی، تابع RBF-kernel دقت و کارایی بالاتری را نسبت به سایر توابع از خود نشان داده است. بنابراین تابع RBF-kernel برای مدل‌سازی در سایر گام‌ها به-

www.SID.ir

کار گرفته می‌شود. در مدل ماشین بردار پشتیبان داده‌های SPI با الگوی زمانی مختلف به‌عنوان ورودی وارد الگوریتم ماشین بردار پشتیبان شده تا SPI در زمان t+1 ($SPI_{(t+1)}$) پیش‌بینی شود. به بیانی دیگر الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در مدل‌سازی داده‌های SPI عمل‌کردی خود همبسته[1] دارد، به‌طوری‌که برای پیش‌بینی داده‌های SPI آینده ($SPI_{(t+1)}$) از داده‌های زمان t و t-1 و... ($SPI_{(t)}, SPI_{(t-1)}, \ldots$) استفاده می‌گردد (رابطه (۲۴)).

$$SPI_{(t+1)} = f_{svm}(SPI_{(t)}, SPI_{(t-1)}, SPI_{(t-2)}, \ldots) \quad (۲۴)$$

در این پژوهش از الگوریتم مارکوف برای تعیین وابستگی زمانی داده‌های SPI استفاده‌شده است. بدین ترتیب که برای پیش‌بینی SPI در زمان t+1 ($SPI_{(t+1)}$) از ترکیب ورودی‌های SPI به شرح ترکیب‌های زیر استفاده گردیده است.

Comb. (1): $SPI_{(t)}$
Comb. (2): $SPI_{(t)}, SPI_{(t-1)}$
Comb. (3): $SPI_{(t)}, SPI_{(t-1)}, SPI_{(t-2)}$
Comb. (4): $SPI_{(t)}, SPI_{(t-1)}, SPI_{(t-2)}, SPI_{(t-3)}$
Comb. (5): $SPI_{(t)}, SPI_{(t-1)}, SPI_{(t-2)}, SPI_{(t-3)}, SPI_{(t-4)}$
Comb. (6): $SPI_{(t)}, SPI_{(t-1)}, SPI_{(t-2)}, SPI_{(t-3)}, SPI_{(t-4)}, SPI_{(t-5)}$

مانند گام قبلی هرکدام از ترکیب ورودی‌های SPI توسط مدل ماشین بردار پشتیبان مدل‌سازی شده و دقت آن‌ها با توجه به مقادیر R^2 و RMSE ارزیابی می‌شوند. جدول(۳) نتایج این مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

طبق نتایج به‌دست آمده از جدول(۳) ترکیب ورودی‌های Comb(2) نتایج مطلوب‌تری را در مقایسه با سایر ترکیب ورودی‌ها نشان داده است. این نتیجه در تطابق با نتایج سایر پژوهش‌گران می‌باشد هنگامی‌که از قانون خودهم‌بستگی استفاده می‌کنند (۲۶و۲۸). هم‌چنین درجات بالاتر ترکیب داده‌های ورودی (Comb(6) و Comb(5)) موجب بیش‌برازش[2] در مرحله واسنجی شده و این امر باعث کاهش دقت مدل‌سازی در مرحله صحت سنجی می‌شود. در این راستا شکل(۸) نشان‌دهنده‌ی مقایسه داده‌های مشاهداتی و محاسباتی توسط مدل ماشین بردار پشتیبان با به‌کارگیری تابع هسته RBF-kernel و ترکیب ورودی‌های Comb(2) می‌باشد.

مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی (WSVM)

در این مرحله به‌منظور سنجش اثر آنالیز موجک بر فرآیند مدل‌سازی، داده‌های پیش‌پردازش شده به‌عنوان ورودی‌های مدل ماشین بردار پشتیبان مورداستفاده قرار می‌گیرند. برای این منظور از تبدیل موجک به‌صورت مجزا استفاده می‌گردد. تبدیل موجک داده‌ها را در مقیاس‌های زمانی مختلف (درجه تجزیه) مورد ارزیابی قرار می‌دهد. بنابراین سری‌های زمانی کوتاه و بلند مقیاس طی این فرآیند از هم مجزا می‌گردند. در این پژوهش سعی شده تا اثر استفاده از توابع موجک مختلف با درجه تجزیه مختلف بر روی کارایی مدل مشخص گردد. بنابراین سری‌های زمانی با درجه تجزیه ۱ تا ۷ به‌وسیله‌ی چهار نوع تابع موجک تجزیه می‌شوند. تابع موجک Sym3، تابع موجک Db2، تابع موجک Haar و تابع موجک Coife1 توابع موجکی هستند که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است. در مدل ترکیبی روش کار بدین شرح است که سری‌های تجزیه‌شده SPI توسط تابع موجک وارد مدل ماشین بردار پشتیبان شده و پس از واسنجی، SPI را در یک روز جلوتر ($SPI_{(t+1)}$) به‌عنوان خروجی پیش‌بینی می‌کند و سپس صحت سنجی داده‌های محاسباتی به‌وسیله‌ی داده‌های مشاهداتی صورت می‌گیرد. نتایج حاصل از مدل‌سازی بر اساس بهترین تابع هسته (RBF-kernel) برای انتخاب بهترین تابع موجک و درجه‌ی تجزیه در جدول(۴) آورده شده است.

1- Auto Regressive

2- over-fitting

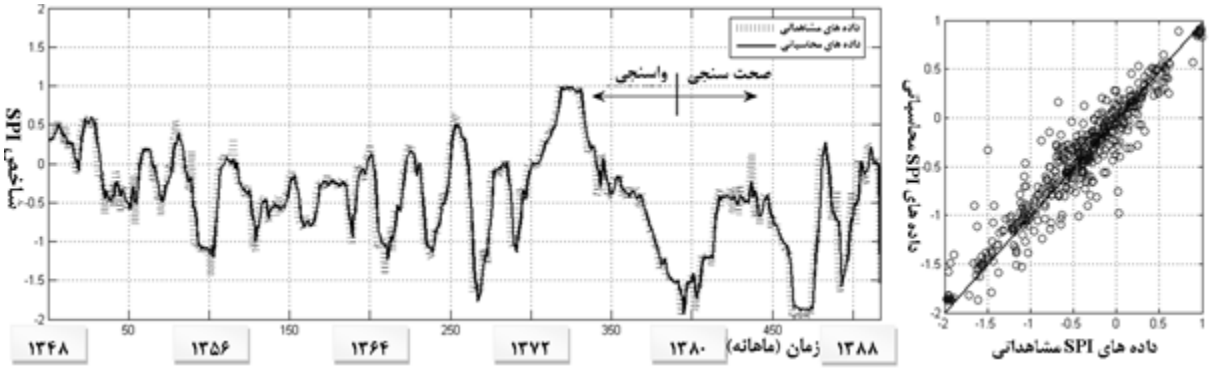
www.SID.ir

Archive of SID

جدول۳- نتایج مدل‌سازی تحت ترکیب ورودی‌های مختلف به‌وسیله‌ی تابع هسته‌ی RBF-kernel

Table 3. Result of SVM model with different combs of input data by RBF-kernel function

الگوی ترکیبی	واسنجی		صحت سنجی	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Comb. (1)	۰/۷۸۱	۰/۳۲۳	۰/۷۶۳	۰/۳۴۱
Comb. (2)	۰/۸۸۳	۰/۱۹۰	۰/۸۶۵	۰/۲۳۷
Comb. (3)	۰/۸۲۰	۰/۲۰۱	۰/۸۵۶	۰/۲۴۱
Comb. (4)	۰/۷۸۶	۰/۳۰۵	۰/۷۶۱	۰/۳۴۵
Comb. (5)	۰/۸۸۷	۰/۱۵۶	۰/۶۷۰	۰/۴۴۷
Comb. (6)	۰/۸۸۸	۰/۱۴۴	۰/۶۴۱	۰/۴۵۵



شکل۸- سری زمانی داده‌های SPI مشاهداتی و محاسباتی توسط ترکیب داده‌های ورودی Comb(2) و تابع هسته RBF-kernel

Figure.8. Simulated and actual SPI time series for comb (2) as input data and RBF-kernel function

جدول۴- نتایج مدل‌سازی مدل ماشین بردار پشتیبان موجکی توسط توابع موجک و درجات تجزیه مختلف

Table 4. Result of the WSVM model by RBF-kernel function with different mother wavelets and decomposition levels

تابع موجک	درجه تجزیه	R^2	RMSE	R^2	RMSE
		واسنجی		صحت سنجی	
Sym3	۱	۰/۹۲۶	۰/۰۵۸	۰/۸۹۰	۰/۰۷۲
Sym3	۲	۰/۹۲۶	۰/۰۵۸	۰/۸۹۰	۰/۰۷۲
Sym3	۳	۰/۹۲۶	۰/۰۵۸	۰/۸۹۲	۰/۰۷۱
Sym3	۴	۰/۹۲۶	۰/۰۵۸	۰/۸۹۲	۰/۰۷۱
Sym3	۵	۰/۹۲۴	۰/۰۵۹	۰/۸۹۰	۰/۰۷۲
Sym3	۶	۰/۹۳۲	۰/۰۵۷	۰/۳۷۷	۰/۱۷۲

www.SID.ir

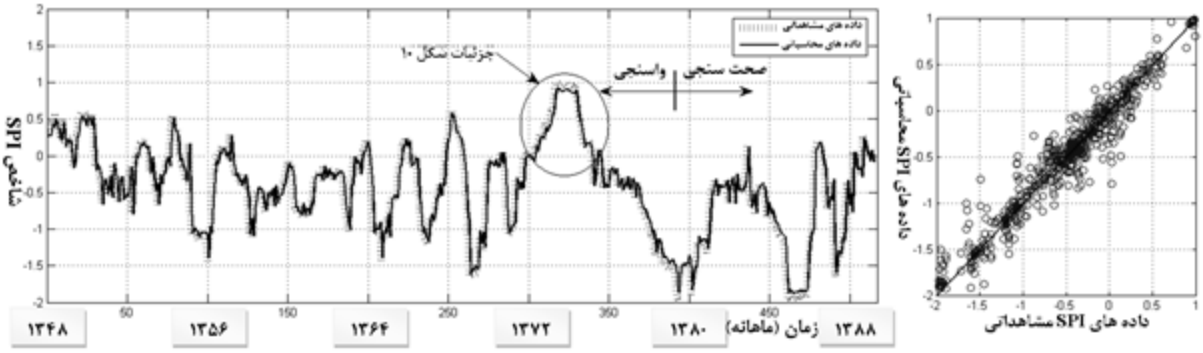
Sym3	۷	۰/۹۳۳	۰/۰۵۷	۰/۳۷۵	۰/۱۷۴
Db2	۱	۰/۹۳۶	۰/۰۵۳	۰/۸۹۰	۰/۰۷۲
Db2	۲	۰/۹۴۰	۰/۰۵۲	۰/۹۰۹	۰/۰۶۵
Db2	۳	۰/۹۴۱	۰/۰۵۲	۰/۹۰۷	۰/۰۶۶
Db2	۴	۰/۹۴۲	۰/۰۵۱	۰/۹۰۹	۰/۰۶۵
Db2	۵	۰/۹۴۲	۰/۰۵۱	۰/۹۱۰	۰/۰۶۵
Db2	۶	۰/۹۵۳	۰/۰۵۱	۰/۰۲۰	۰/۲۱۶
Db2	۷	۰/۹۵۵	۰/۰۵۱	۰/۰۱۹	۰/۲۱۸
Haar	۱	۰/۹۲۶	۰/۰۵۸	۰/۸۹۰	۰/۰۷۲
Haar	۲	۰/۹۲۶	۰/۰۵۸	۰/۸۹۰	۰/۰۷۲
Haar	۳	۰/۹۲۶	۰/۰۵۸	۰/۸۹۲	۰/۰۷۱
Haar	۴	۰/۹۲۶	۰/۰۵۸	۰/۸۹۲	۰/۰۷۱
Haar	۵	۰/۹۲۴	۰/۰۵۹	۰/۸۹۰	۰/۰۷۲
Haar	۶	۰/۹۳۶	۰/۰۵۳	۰/۳۷۷	۰/۱۷۲
Haar	۷	۰/۹۳۸	۰/۰۵۲	۰/۳۷۵	۰/۱۷۳
Coif1	۱	۰/۹۲۸	۰/۰۵۷	۰/۹۲۹	۰/۰۵۸
Coif1	۲	۰/۹۳۱	۰/۰۵۶	۰/۹۳۰	۰/۰۵۷
Coif1	۳	۰/۹۳۲	۰/۰۵۵	۰/۹۳۰	۰/۰۵۷
Coif1	۴	۰/۹۳۲	۰/۰۵۵	۰/۹۳۱	۰/۰۵۷
Coif1	۵	۰/۹۴۳	۰/۰۵۵	۰/۹۵۴	۰/۰۵۶
Coif1	۶	۰/۹۸۳	۰/۰۴۳	۰/۷۸۰	۰/۱۰۲
Coif1	۷	۰/۹۸۴	۰/۰۴۲	۰/۷۷۱	۰/۱۰۱

با توجه به جدول(۴) تابع موجک Coife1 و درجه تجزیه ۵ بهترین نتایج مدل‌سازی را ازنظر دقت شبیه‌سازی نشان می‌دهند. دلیل برتری تابع موجک Coife1 را می‌توان در شباهت سیگنال این تابع موجک با شکل و روند تغییرات سری زمانی SPI به‌خصوص در نقاط بیشینه دانست (شکل۴-ب). از سویی، دلیل کارایی مناسب درجه تجزیه ۵ نسبت به سایر درجات تجزیه موجک این است که سطح تجزیه ۵ شامل الگوی 2^5 روزه است که به الگوی SPI ماهانه بسیار نزدیک می‌باشد.

بر طبق این جدول درجات بالای تفکیک داده‌ها (درجه ۶ و ۷) موجب بیش‌برازش داده‌ها در مرحله‌ی واسنجی شده و دقت مدل‌سازی را در مرحله شبیه‌سازی (صحت سنجی) کاهش می‌دهد. سری زمانی مربوط به داده‌های مشاهداتی و محاسباتی در مدل‌سازی به روش ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی برای بهترین تابع موجک (Coife1) و درجه‌ی تجزیه ۵ در اشکال (۹ و۱۰) نشان داده شده است.

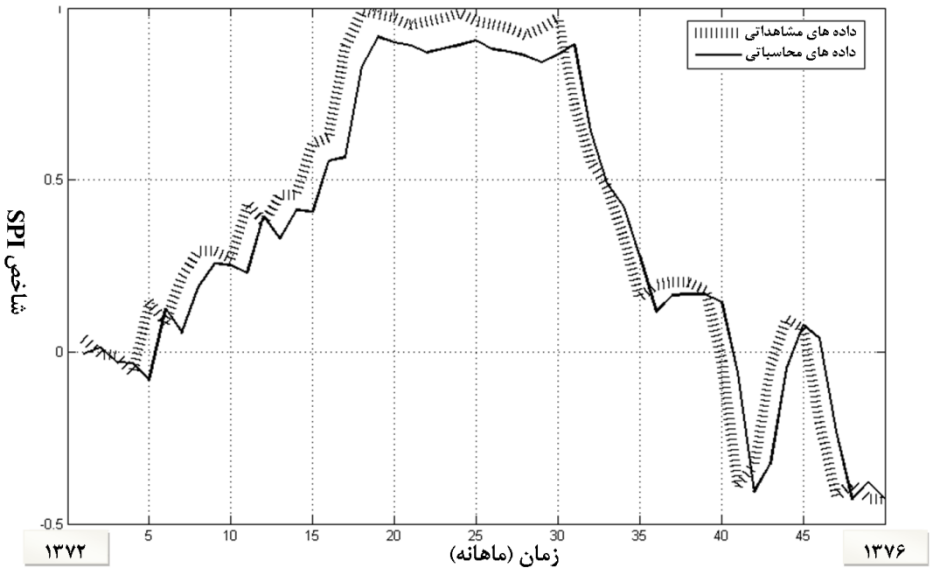
www.SID.ir

Archive of SID



شکل۹- مقایسه‌ی داده‌های محاسباتی و مشاهداتی مربوط به تابع موجک Coife1 و درجه تجزیه ۵

Figure 9. Simulated and actual SPI series by Coif1 wavelet function and five decomposition level



شکل۱۰- مقایسه‌ی داده‌های محاسباتی و مشاهداتی در ناحیه‌ی مشخص شکل ۹

Figure 10. Simulated and actual SPI series specified in Fig. 9

نقاط بیشینه و کمینه در سری زمانی داده‌های SPI نشان‌دهنده‌ی پتانسیل ترسالی یا خشک‌سالی در حوضه می‌باشد و نقش موثری را در مدیریت خشک‌سالی ایفا می‌کند. در این ارتباط نکته‌ی مهمی که از شکل‌های(۸ و ۹) استنباط می‌شود، توانایی بالای مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی در محاسبه‌ی نقاط بیشینه و کمینه‌ی سری زمانی در قیاس با مدل ماشین بردار پشتیبان است، به‌طوری‌که با توجه به رابطه (۲۳) مقادیر R^2_{paek} برای مدل ماشین بردار پشتیبان و ماشین بردار پشتیبان موجکی به ترتیب برابر با ۰/۶۲ و ۰/۹۳ می‌باشد. درنتیجه مدل‌های فصلی[1] مانند مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی نسبت به مدل‌های خود هم‌بسته مانند مدل ماشین بردار پشتیبان توانایی بالاتری در درک و شبیه‌سازی نقاط اکسترممی دارند. هم‌چنین یک نکته‌ی مهم در مدل‌سازی ماشین بردار پشتیبان موجکی عدم نیاز به کنترل ترکیبات مختلف به شیوه‌ی مارکوف می‌باشد، زیرا مدل ترکیبی آنالیز موجک یک تحلیل چند مقایسه‌ای است که الگوها و روندهای حاکم بر پدیده را به‌خوبی رصد می‌نماید. از مقایسه جداول(۲ و ۳) با جدول(۴) این نتیجه حاصل می‌شود که عملیات پیش‌پردازش داده‌ها به‌وسیله تابع موجک باعث افزایش دقت مدل‌سازی و پیش‌بینی در الگوریتم ماشین بردار پشتیبان شده است به‌طوری‌که بیش‌ترین دقت مدل‌سازی در صحت-سنجی بر روی داده‌های خام (پیش‌پردازش نشده) در جداول(۲

1- Seasonal models

www.SID.ir

Arch

و ۳) به‌صورت میانگین ۸۶٪ بوده درحالی‌که پس از انجام عملیات تبدیل موجک بر روی‌داده‌های ورودی و تفکیک و پردازش آن‌ها بیشینه دقت مدل‌سازی در صحت سنجی به ۹۳۴٪ رسیده است. این امر بیان‌گر اثرات مثبت تبدیل موجک بر روی مدل‌سازی داده‌های SPI می‌باشد. شکل(۱۱) به‌صورت شماتیک اثر مثبت تبدیل موجک بر روی داده‌ها را قبل و بعد از پیش‌پردازش و تفکیک سری زمانی داده‌ها به‌وسیله تبدیل موجک نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است پس از انجام عملیات پیش‌پردازش داده‌ها، خطای مدل‌سازی (ε) به‌طور قابل‌توجهی کم‌تر می‌شود.

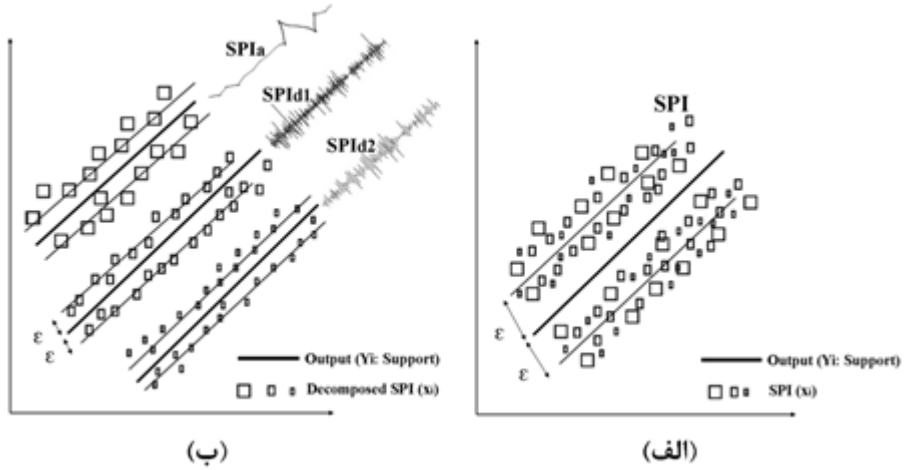
در گام آخر در این پژوهش، مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی با سایر مدل‌های ترکیبی مانند مدل شبکه عصبی مصنوعی موجکی (WANN) [1] مقایسه گردیده است. نتایج به شرح جدول(۵) می‌باشد.

بر طبق مقادیر R^2 و RMSE مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی نتایج دقیق‌ترین را نسبت به مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی از خود نشان داده است. از سویی، ترکیب آنالیز موجک در هرکدام از مدل‌ها موجب بهبود نتایج نسبت به مدل منفرد آن شده است. به عنوان نمونه ار میان کارهای مشابه انجام گرفته در خصوص مدل‌سازی به روش‌های داده کاوی می‌توان به نتایج حاصل از پژوهش نورانی و همکاران (۲۹) اشاره کرد. در این پژوهش مدل‌سازی بارش و رواناب برای مدل‌های ARIMA [2]، ANN، WANN و MMLAN [3] به ترتیب منجر به محاسبه ی ضریب تبیین (R^2) معادل ۰/۶۳، ۰/۷۴، ۰/۹۲ و ۰/۸۷ در مرحله‌ی صحت سنجی گردید. از مقایسه‌ی نتایج این تحقیق با مقاله‌ی حاضر این نتیجه حاصل می‌شود که دقت داده کاوی در روش ماشین بردار پشتیبان منفرد از روش‌های دیگری مانند ARIMA و ANN بیش‌تر است و هم‌چنین مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی نتیجه‌ی مطلوب تری را نسبت به مدل‌های ترکیبی دیگری مانند WANN و MMLAN ارایه می‌دهد. در پژوهش دیگری که توسط نورانی و همکاران (۲۶) صورت گرفت دقت مدل‌سازی برنامه نویسی ژنتیک (GP) در شبیه سازی فرآیند بارش و رواناب روزانه حوضه آقچای با ضریب تبیینی به اندازه ی ۰/۷۱۳ برآورده شد. همانطور که پیداست دقت مدل‌سازی روش مطرح در این مقاله بر روش GP نیز مقدم است.

1- Wavelet Artificial Neural Network
2- Auto Regressive Integrated Moving Average
3- Modified Multi-Layer Artificial Network

www.SID.ir

Archive of SID



شکل۱۱–مدل‌سازی توسط ماشین بردار پشتیبان قبل (الف) و بعد (ب) از پیش‌پردازش داده‌ها تحت تبدیل موجک

Figure 11. Support vector machine modeling before (A) and after (B) of the data processing by wavelet transform

جدول۵- مقایسه نتایج مدل‌سازی SVM، WSVM، ANN و WANN

Table 5. Comparison of SVM, WSVM, ANN and WANN modeling

مدل	نوع مدل	واسنجی R^2	صحت سنجی R^2
ANN	منفرد	۰/۵۳۵	۰/۵۵۸
WAAN	ترکیبی	۰/۸۹۶	۰/۸۹۸
SVM	منفرد	۰/۸۸۳	۰/۸۶۵
WSVM	ترکیبی	۰/۹۴۳	۰/۹۵۴
توجه: در این جدول بهترین نتایج از هر مدل نمایش داده‌شده است.			

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی (WSVM) به‌منظور مدل‌سازی سری زمانی داده‌های شاخص SPI ارایه گردید. برای این منظور سری زمانی داده‌های SPI مربوط به حوضه‌ی دریاچه ارومیه به‌وسیله‌ی تبدیل موجک به زیر سری‌هایی تجزیه شد و سپس این زیر سری‌های تجزیه‌شده به‌عنوان داده‌های ورودی در مدل ماشین بردار پشتیبان جهت پیش‌بینی SPI در یک گام زمانی جلوتر مورداستفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که تابع هسته RBF-Kernel نسبت به سایر توابع از دقت و کارایی بالاتری برخوردار می‌باشد. نکته‌ی مهم این پژوهش بهره‌گیری از توابع تبدیل موجک جهت رفع مشکل استفاده از ترکیب متعدد و ویژگی خودهم‌بستگی مدل ماشین بردار پشتیبان است. بدین منظور از چهار نوع تابع موجک (Sym3، Db2، Haar و Coife1) با مدل موردنظر و درجات آزادی ۱ تا ۷ جهت مدل‌سازی استفاده گردید. نتایج مدل‌سازی نشان داد که تابع موجک Coife1 و درجه تجزیه ۵ به‌عنوان مناسب‌ترین گزینه‌ها ازلحاظ کارایی در مدل ترکیبی می‌باشند. هم‌چنین نشان داده شد که یکی از توانایی‌های ویژه مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی نسبت به مدل منفرد، محاسبه‌ی نقاط بیشینه و کمینه‌ی سری زمانی SPI است. درنهایت دقت بالای این مدل در مقایسه با مدل ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی موجکی (WANN) به اثبات رسید. به دلیل قابلیت ویژه مدل ترکیبی پیشنهاد می‌گردد که از این مدل جهت مدل‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی مانند رسوب-گذاری نیز استفاده شود.

www.SID.ir

Autoregressive Static and Artificial Dynamic Neural Network for the Forecasting of Monthly Inflow of Dez Reservoir. *Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 13(4), pp. 1-14.

9. Lin G., Chen G., Huang P., Chou Y., 2009. Support vector machine-based models for hourly reservoir inflow forecasting during typhoon-warning periods. *Journal of hydrology*. Vol. 372, pp.17–29.
10. Han, D., Chan, L., Zhu, N., 2007. Flood forecasting using support vector machines. *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 9(4), pp. 267-276.
11. Tripathi, S.h., Srinivas, V.V., Nanjundiah R.S., 2006. Downscaling of precipitation for climate change scenarios: A support vector machine approach, *Journal of Hydrology*, Vol. 330, pp. 621– 640.
12. Wang, W., Men, C., Lu, W., 2008. Online prediction model based on support vector machine. *Neuro Computing*, Vol. 71, pp. 550-558.
13. Behzad, M.K., Asghari, M., Eazi, M., Palhang M., 2009. Generalization performance of support vector machines and neural networks runoff modeling. *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, pp. 7624-7629.
14. Asefa, T., Kemblowski, M.W., Urroz, G., McKee, M. Khalil, A., 2004. Support vectors-based groundwater head observation networks design. *Water Resources Research*, Vol. 40 (11).
15. Asefa, T., Kemblowski, M.W., McKee, M., Khalil A., 2006. Multi-time scale stream flow prediction: The support vector machines approach.

Reference

1. Cacciamani, C., Morgillo, A., Marchesi, S., Pavan, V.,2007. Monitoring and forecasting drought on a regional scale: Emilia-Romagna Region. *Water Science and Technology*. Lib, Vol. 62, pp. 29–48.
2. Tsakiris, G., Vangelis, H.,2004. Towards a drought watch system based on spatial SPI. *Water Resources Management*, Vol. 18. pp. 11–12.
3. Mishra, A.K., Desai, V.R.,2006. Drought forecasting using feed-forward recursive neural network. *Ecological Modelling*, Vol. 198(1-2), pp. 127-138.
4. Azhdari Moghadam, M., Khosravi, M., Hosseinpour Niknam, H., Jafari Nodoshan, E.,2012. Drought forecasting using neuro-fuzzy model. Climate indices and time series of precipitation and drought. *Applied Geography and. Development*, Vol. 26, pp. 17–20.
5. Marj, A.F., Meijerink, A.M.J.,2011. Agricultural drought forecasting using satellite images, climate indices and artificial neural network. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 32(24), pp. 9707–9719.
6. Ebrahimpour, R., 2014. Using Artificial Neural Networks to Estimate the Return Sludge Rate, A Case Study of Torbat Heydarieh Wastewater Treatment Plant. *Journal of Water and Wastewater*, Vol. 25(4), pp. 99-107. (In Persian)
7. Shafie, A., Taha, M.R., Noureldin, A., 2007. A neuro-fuzzy model for inflow forecasting of the Nile river at Aswan high dam. *Journal of Water Resources Management*, Vol. 21, pp. 533–556.
8. Banihabib, M., Valipoor, M., Behbahani, S. 2011. Comparison of

www.SID.ir

Archive of SID

Journal of Hydrology, Vol. 318, pp. 7–16.

16. Dibike, Y.B., Velickov, S., Solomatine, D., Abbott, M.B., 2001. Model induction with support vector machines: introduction and applications. *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 15 (3), pp. 208–216.
17. Liong, S.Y., Sivapragasam, C., 2002. Flood stage forecasting with support vector machines. *The Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 38 (1), pp. 173–196.
18. Sahraie, S., Zaker Moshfegh, M., 2013, River Flow Prediction Using Case Study Support Vector Machine, 7th National Congress of Civil Engineering, Zahedan, Sistan and Baluchestan University. (In Persian)
19. Nikbakht Shahbazi, A., Zahraei, B., Sadghi, H., Manshouri, M., Nasseri, M., 2011. Seasonality meteorological drought prediction using support vector machine. *World Applied Sciences Journal*, Vol. 13(6), pp. 1387-1397.
20. Zahraei, B., Nasseri, M., 2014. Basin scale meteorological drought forecasting using support vector machine. International Conference on Drought Management Strategies in Arid and Semi-Arid Regions.
21. Cannas, B., Fanni, A., See, L., Sias, G., 2006. Data preprocessing for river flow forecasting using neural networks: wavelet transforms and data partitioning. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 31(18), pp. 1164–1171.
22. Kim, T., Valdes, J.B., 2003. Nonlinear model for drought forecasting based on a conjunction of wavelet transforms and neural networks. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 6, pp. 319–328.
23. Vermes, L., 2001. How to work out a Drought mitigation strategy. European Regional conference of ICID.
24. McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. in Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, Calif, USA.
25. Vapnik, V.N., Cortes, C., 1995. Support Vector Networks. *Machine Learning*, Vol. 20, pp. 273–297.
26. Nourani, V., Komasi, M., Taghi Alami, M., 2012. Hybrid wavelet–genetic programming approach to optimize artificial neural network modeling of rainfall–runoff process, *Journal of Hydrology Engineering*, Vol. 17(6), pp. 724–741.
27. Mallat, S.G., 1998. A Wavelet Tour of Signal Processing. Second ed. Academic Press. San Diego.
28. Nourani V., Kisi Ö., Komasi M., 2011. Two hybrid artificial intelligence approaches for modeling rainfall–runoff process. *Journal of Hydrology*, Vol. 402, pp. 41–59.
29. Nourani V., Komasi M., Mano A., 2009. A multivariate ANN-wavelet approach for rainfall–runoff modeling. *Water Resources Management*, Vol. 23, pp. 2877–2894.

www.SID.ir