

کاربرد شبکه‌های بیزین و برنامه‌ریزی ژنتیک در پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه باراندوزچای)

فرشاد احمدی^{۱*}، فریدون رادمنش^۲ و رسول میرعباسی نجف آبادی^۳

^{۱*} - نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

^۲ - دانشیار گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

^۳ - استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهر کرد.

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۲۹

تاریخ دریافت: ۹۳/۳/۱۷

چکیده

برآورد دقیق آبدهی رودخانه‌ها یکی از موارد مهم در پیش‌بینی خشکسالی، سیلاب، طراحی سازه‌های آبی، بهره‌برداری از مخازن سدها و کنترل رسوب می‌باشد. روش‌های متعددی همچون مدل‌های سری‌زمانی، شبکه‌های عصبی مصنوعی، منطق فازی و برنامه‌ریزی ژنتیک برای پیش‌بینی جریان رودخانه به کار می‌رود. در مطالعه حاضر به منظور پیش‌بینی جریان رودخانه باراندوزچای از دو روش برنامه‌ریزی ژنتیک و شبکه‌های بیزین استفاده شد. داده‌های جریان روزانه این رودخانه در محل ایستگاه آبسنجی دیزج در خلال سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ برای ایجاد مدل استفاده شد که ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد برای صحت‌سنجی مدل به کار رفت. جهت بررسی و ارزیابی نقش حافظه در افزایش یا کاهش دقت، الگوهای ورودی متعددی به مدل‌ها معرفی شد و در نهایت مشخص گردید که با افزایش حافظه، دقت مدل‌سازی نیز افزایش می‌یابد به طوری که بیشترین دقت در الگوی سوم برای هر دو روش به دست می‌آید و سپس با افزایش حافظه از دقت مدل‌سازی کاسته می‌شود. مقایسه نتایج دو مدل نشان داد که دقت روش برنامه‌ریزی ژنتیک با دارا بودن ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۷۸ و جذر میانگین مربعات خطا معادل با $1/66(m^3/s)$ نسبت به روش شبکه‌های بیزین با داشتن ضریب همبستگی معادل با ۰/۹۶۴ و جذر میانگین مربعات خطا برابر با $1/96(m^3/s)$ بیشتر است. همچنین عملکرد روش برنامه‌ریزی ژنتیک در تخمین دبی‌های کمینه و متوسط به مراتب بهتر از روش شبکه‌های بیزین می‌باشد.

کلید واژه‌ها: برنامه‌ریزی ژنتیک، پیش‌بینی جریان روزانه، شبکه بیزین، رودخانه باراندوزچای.

Application of Bayesian Networks and Genetic Programming for Predicting Daily River Flow (Case Study: Barandoozchay River)

F. Ahmadi^{1*}, F. Radmanesh² and R. Mirabbasi Najaf Abadi³

1* - Ph.D Candidate of Water Resources Engineering. Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

2- Associate Professor, Water Engineering Department, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

3- Assistant Professor, Water Engineering Department, Shahre Kord University, Shahre Kord, Iran.

Received: 7 June 2014

Accepted: 19 January 2016

Abstract

Accurate estimation of river discharge is an important issue in forecasting of drought and floods, designing of water structures, dam reservoir operation and sediment control. So far, several methods such as time series models, Artificial Neural Networks, Fuzzy models and Genetic programming have been used for accurate predicting of river flow. In this study, Genetic Programming and Bayesian Networks methods were used to forecast daily discharge of Barandoozchay River. The daily discharge data of Barandoozchay River measured at the Dizaj hydrometric station during 2007 to 2011 was used for modeling, which 80% of the data used for training and remaining 20% used for testing of models. For assessing the role of memory in increasing or reducing of model accuracy, we tested different combinations of input variables.

The results showed that at first, the accuracy of models increase with increasing of memory, as the most accuracy obtained in third combination of input variables in both of methods. After that with increasing of memory the accuracy of models decreased. Comparing the performance of GP and BNs models indicated that the accuracy of the GP method with the $R=0.978$ and $RMSE=1.66$ (m3/s) was slightly more than BNs method with $R=0.964$ and $RMSE=1.96$ (m3/s). In addition, the performance of GP method was better than BNs method in predicting minimum and average discharges.

Keywords: Genetic programming, Daily discharge forecasting, Bayesian networks, Barandoozchay river

مطالعه دیگری که در آن روش‌های خودهمبستگی و فیلتر کالمن استفاده شده بود، مشخص نمود که برنامه‌ریزی ژنتیک ابزار مناسب‌تری برای پیش‌بینی رواناب است. همچنین بر طبق تحقیقات آیتک و آسه^۴ (۲۰۰۸) روش برنامه‌ریزی ژنتیک یک روش مناسب و علمی در پیش‌بینی روابط بارش-رواناب می‌باشد. وانگ و همکاران^۵ (۲۰۰۹) به مقایسه عملکرد مدل خودهمبسته و چندین مدل هوشمند شامل شبکه عصبی مصنوعی^۶، سیستم استنتاج عصبی- تطبیقی فازی^۷، برنامه‌ریزی ژنتیک و ماشین بردار پیش^۸ جهت پیش‌بینی سری زمانی دبی جریان در مقیاس ماهانه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که به ازای داده‌های مورد استفاده در مراحل آموزش و آزمون، بهترین عملکرد با توجه به معیارهای مختلف ارزیابی خطا به مدل‌های سیستم استنتاج عصبی- تطبیقی فازی، برنامه‌ریزی ژنتیک و ماشین بردار پشتیبان اختصاص دارد. گوون^۹ (۲۰۰۹) برای پیش‌بینی دبی جریان روزانه رودخانه شویل کیل در ایالات متحده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک خطی استفاده کرد و نتایج حاصل را با دو الگو از روش‌های شبکه عصبی مورد مقایسه قرارداد. وی نشان داد که هر دو روش نتایج قابل قبولی داشته‌اند، اما روش برنامه‌ریزی ژنتیک خطی از دقت بالاتری نسبت به روش‌های شبکه عصبی برخوردار بود. قربانی و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۰) عملکرد سه روش برنامه‌ریزی ژنتیک، شبکه عصبی مصنوعی و نروفازی^{۱۱} را در روندیابی سیلاب رودخانه قزل ایرماق ترکیه مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مطالعه آنها نشان داد از بین سه روش مذکور، مدل برنامه‌ریزی ژنتیک با دقت بیشتری هیدروگراف خروجی را شبیه‌سازی می‌کند. ظهیری و عظمت‌الله^{۱۲} (۲۰۱۴) برای پیش‌بینی دبی جریان در مقاطع مرکب از دو روش برنامه‌ریزی ژنتیک خطی و مدل درختی M5 استفاده کردند. نتایج نشان داد که هرچند هر دو مدل از دقت بالایی برای پیش‌بینی جریان برخوردار بودند، اما دقت روش برنامه‌ریزی ژنتیک خطی بالاتر از مدل درختی M5 بود.

مقدمه

نیاز روزافزون به آب سبب گردیده است که برنامه‌ریزی‌های مدیریتی به منظور کنترل مصرف آب در آینده از اهمیت بیشتری برخوردار باشد. با پیش‌بینی نمودن جریان رودخانه‌ها علاوه بر مدیریت بهره‌برداری از منابع آب، می‌توان حوادث طبیعی نظیر سیل و خشکسالی را نیز پیش‌بینی و مهار نمود. همچنین می‌توان از نتایج یک مدل شبیه‌سازی به منظور بررسی صحت داده‌ها و یا اصلاح و تکمیل آن‌ها استفاده کرد. مطابق تقسیم‌بندی گووینداراجو^۱ (۲۰۰۰) مدل‌هایی که امروزه در هیدرولوژی مورد استفاده قرار می‌گیرند، شامل مدل‌های ریاضی-فیزیکی، مدل‌های ژئومورفولوژیکی و مدل‌های تجربی می‌باشند. دسته اول مدل‌ها، براساس خصوصیات فیزیکی سیستم هستند که به صورت معادلات دیفرانسیل بیان می‌شوند. اما دسته دوم بر مبنای خصوصیات ژئومورفولوژیکی سیستم هیدرولوژیکی مورد نظر بیان می‌شوند. مدل‌های تجربی بدون توجه به پارامترها، سعی در ایجاد رابطه‌ای بین داده‌های ورودی و خروجی دارند که این مدل‌ها به مدل‌های جعبه سیاه یا میانگینی نیز معروف هستند. برنامه‌ریزی ژنتیک^۲ شاخه‌ای از الگوریتم‌های تکاملی است که توانایی مدل‌سازی فرایندهای کاملاً غیرخطی و پویا را دارد. تاکنون محققین مختلفی در سراسر جهان با روش‌های مختلف اقدام به پیش‌بینی جریان رودخانه‌ها در مقیاس‌های زمانی ساعتی، روزانه و ماهانه نموده‌اند. فربودنام و همکاران (۱۳۸۸) پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه ليقوان را با استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک انجام داده و نتایج را با شبکه‌های عصبی مصنوعی مقایسه نمودند. نتایج نشان داد، روش برنامه‌ریزی ژنتیک از دقت بسیار بالایی در پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه نسبت به روش شبکه‌های عصبی مصنوعی برخوردار است. خو و همکاران^۳ (۲۰۰۱) رواناب ساعتی حوضه آرگوال فرانسه را با استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک، پیش‌بینی نمودند. بررسی نتایج نشان داد که برنامه‌ریزی ژنتیک توانایی پیش‌بینی دقیق رواناب را در تمام فواصل زمانی مورد بررسی و به ویژه فواصل زمانی کوتاه‌تر از زمان تمرکز حوضه داراست. مقایسه نتایج با

4 - Aytak and Asce

5 - Wang *et al.*

6 - Artificial Neural Network (ANN)

7 - Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)

8 - Support Vector Machine (SVM)

9 - Guven

10 - Ghorbani *et al.*

11 - Neuro-Fuzzy

12 - Zahiri and Azamathulla

1- Govindaraju

2- Genetic Programming

3- Khu *et al.*

هزینه در مدل برای برآورد ارزش اقتصادی ارسال هشدار سیلاب، خسارت ناشی از هر تراز سطح آب پیش‌بینی شده را تعیین کرده و به این نتیجه رسیدند که به کمک این روش، با یک ریسک قابل قبول می‌توان تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت را برای پیش‌بینی جریان رودخانه تسهیل نمود. مددگر و مرادخانی^۷ (۲۰۱۴) در مطالعه‌ای به پیش‌بینی تغییرات مکانی خشکسالی در حوضه آبریز رودخانه گانیسون در آمریکا پرداختند. بدین منظور برای پیش‌بینی رواناب حوضه و محاسبه خشکسالی‌های آتی، از مدل‌های بیزین استفاده شده بود. نتایج حاصل نشان داد که این مدل‌ها در پیش‌بینی جریان رودخانه از توانایی بالایی برخوردار هستند.

با عنایت به موارد فوق می‌توان دریافت که تخمین پارامترهای هیدرولوژیکی هم‌چون پیش‌بینی جریان رودخانه‌ها از دیرباز مورد توجه محققین امر بوده و بدین منظور روش‌های متعددی از جمله مدل‌های تجربی - نیمه تجربی، سری‌های زمانی و مدل‌های هوشمند توسعه یافته‌اند که در این میان مدل‌های هوشمند با الهام گرفتن از طبیعت قادر به تخمین پارامترهای مربوط به پدیده‌های طبیعی با دقت قابل قبول می‌باشند و نیز دقت قابل توجهی نسبت به سایر روش‌ها دارند. همچنین با توجه به بررسی منابع صورت گرفته مشاهده می‌شود که در منابع داخلی از مدل شبکه بیزین به صورت بسیار محدودی در پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی استفاده شده است. لذا در این تحقیق سعی گردیده است که عملکرد دو مدل هوشمند برنامه‌ریزی ژنتیک و شبکه‌های بیزین در پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه باراندوزچای مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه، از داده‌های دبی جریان روزانه ایستگاه هیدرومتری دیزج واقع بر رودخانه باراندوزچای ارومیه در دوره آماری ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ استفاده گردید. مساحت حوضه باراندوزچای در ایستگاه هیدرومتری دیزج ۶۶۰/۷۱ کیلومتر مربع است. این حوضه در شمال غرب کشور بین دریاچه ارومیه و مرز ایران و کشورهای عراق و ترکیه در موقعیت جغرافیایی ۴۴°۴۵' تا ۴۵°۱۴' طول شرقی و ۳۷°۰۶' تا ۳۷°۲۹' عرض شمالی واقع شده است. طول آبراهه اصلی حوضه ۷۵ کیلومتر بوده و حداکثر و حداقل ارتفاع این حوضه به ترتیب ۳۵۰ و ۱۲۵۰ متر از سطح آزاد دریاها می‌باشد. در جدول (۱) مشخصات آماری ایستگاه هیدرومتری دیزج آورده شده است. شکل (۱) نیز حوضه آبریز باراندوزچای و موقعیت ایستگاه هیدرومتری دیزج را نشان می‌دهد.

در سال‌های اخیر سیستم‌های پشتیبانی تصمیم^۱ جهت جمع‌آوری و یکپارچه‌سازی بهترین دانش و اطلاعات برای اتخاذ مناسب‌ترین تصمیم‌گیری، در سطح وسیعی از علوم گسترش یافته است که مدل شبکه تصمیم‌گیری بیزین یکی از انواع مختلف سیستم‌های پشتیبانی تصمیم است. شبکه تصمیم‌گیری بیزین^۲، روشی سودمند است که می‌تواند اطلاعات و داده‌های کمی را به خوبی با دانش کیفی کارشناسی همسو نماید (باران و جانتانن^۳، ۲۰۰۴)، از طرف دیگر این شبکه‌ها را می‌توان به عنوان هوش مصنوعی نیز قلمداد کرد. تکنیک‌های مدل‌سازی بیزین دارای ویژگی‌هایی هستند که آنها را برای پرسش‌های تحلیلی و مدیریتی داده‌های جهان واقعی، کاربردی و مفید ساخته‌اند (یوسیتالو^۴، ۲۰۰۷). امروزه این مدل‌های احتمالاتی کاربرد وسیعی در علوم مربوط به محیط زیست و منابع آب پیدا کرده‌اند. برای مدل بیزین می‌توان مزیت‌های زیر را بیان کرد:

۱) در شبکه‌های بیزین جهت انجام تحلیل، چیزی به عنوان اندازه حداقل برای داده‌های نمونه وجود ندارد و این شبکه‌ها در محاسبات خود از تمامی داده‌های موجود استفاده می‌کنند و حتی با وجود نمونه‌هایی با اندازه‌های نسبتاً کوچک می‌توان به پیش‌بینی‌هایی با دقت خوب دست یافت.

۲) به کارگیری و ترکیب منابع مختلف داده‌ها: از مهمترین ویژگی‌های شبکه بیزین، استفاده از اطلاعات پیشین و اولیه راجع به موضوع مورد نظر می‌باشد. سپس جهت کسب ترکیبی از دانش اولیه و داده‌های جدید، این اطلاعات به وسیله داده‌ها به روز می‌شوند. این تلفیق بدست آمده نیز می‌تواند به عنوان اطلاعات اولیه در یک مطالعه جدید مورد استفاده قرار گیرد. از دیگر امتیازات شبکه‌های بیزین این است که براحتی در یک مسیر ریاضی، می‌تواند اطلاعات بدست آمده با درجه دقت و منابع مختلف را با هم ترکیب کرده و مورد استفاده قرار دهد. در این صورت دانش کارشناسی می‌تواند در خصوص متغیرهایی که داده لازم در مورد آنها موجود نیست، با سایر اطلاعات در دسترس ترکیب شود (مهارجانی و همکاران، ۱۳۸۹).

۳) توان بالای شبکه‌های بیزین در نمایش تصویری متغیرها و روابط بین آنها در یک سیستم منجر به شناخت و درک بالاتری از سامانه می‌گردد (سعدالدین و همکاران^۵، ۲۰۰۵).

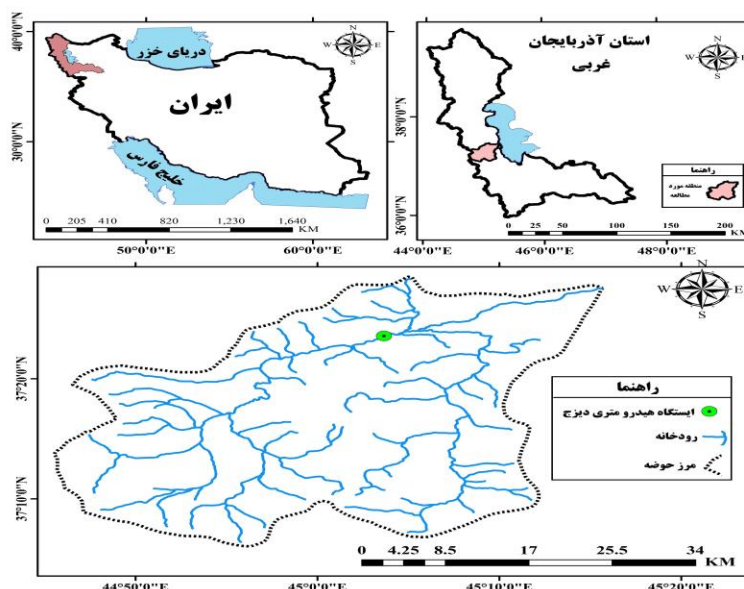
در ادامه به برخی از مطالعات صورت گرفته در ارتباط با شبکه بیزین اشاره می‌شود:

رجانی و ویرتز^۶ (۲۰۰۸) با کاربرد مدل‌های بیزین و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود به پیش‌بینی تراز سطح آب در سیستم پیش‌بینی جریان رود راین پرداختند. با ترکیب یک تابع

- 1 - Decision Support System (DSS)
- 2 - Bayesian Decision Network (BDN)
- 3 - Baran and Jantunen
- 4 - Uusitalo
- 5 - Sadoddin *et al.*
- 6 - Reggiani and Weerts

جدول ۱- مشخصات آماری سری جریان روزانه رودخانه باراندوزچای در محل ایستگاه دیزج

متر مکعب بر ثانیه	مشخصات آماری دبی روزانه
۵/۹۲	میانگین
۵۷/۹۸	واریانس
۷/۶۱	انحراف معیار
۹۲/۶۰	حداکثر
۰/۰۰	حداقل



شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز باراندوزچای در استان آذربایجان غربی و ایران

استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک متشکل از پنج مرحله به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- انتخاب مجموعه ترمینال: که همان متغیرهای مستقل مسئله و متغیرهای حالت سامانه می‌باشند.
 - ۲- انتخاب مجموعه توابع: که شامل عملگرهای حسابی، توابع آزمون و توابع بولی^۳ می‌باشد.
 - ۳- شاخص اندازه‌گیری دقت مدل که بر مبنای آن می‌توان مشخص نمود که توانایی مدل در حل یک مسئله خاص تا چه اندازه می‌باشد.
 - ۴- مولفه‌های کنترل: مقادیر مولفه‌های عددی و متغیرهای کیفی که برای کنترل اجرای برنامه‌ها استفاده می‌شوند.
 - ۵- شرط توقف اجرای برنامه: که معیاری برای حصول نتیجه و توقف اجرای برنامه می‌باشد.
- در مطالعه حاضر از برنامه GeneXpro Tools (فریرا^۴، ۲۰۰۱) برای توسعه و اجرای مدل‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده شد. فرآیند مدل‌سازی جریان رودخانه باراندوزچای در تحقیق حاضر به شکل زیر صورت گرفت:

برنامه‌ریزی ژنتیک

روش برنامه‌ریزی ژنتیک اولین بار توسط کوزا^۱ (۱۹۹۲) توسعه داده شد. این روش جزو روش‌های الگوریتم تکاملی محسوب می‌شود که مبنای آنها بر اساس نظریه تکامل داروین استوار است. الگوریتم‌های یاد شده اقدام به تعریف یک تابع هدف در قالب معیارهای کیفی نموده و سپس تابع یاد شده را برای مقایسه جواب‌های مختلف حل مسئله در یک فرآیند گام به گام تصحیح ساختار داده‌ها به کار می‌گیرند و در نهایت، جواب مناسب را ارائه می‌نمایند. روش برنامه‌ریزی ژنتیک جدیدترین شیوه از بین روش‌های الگوریتم تکاملی می‌باشد که به دلیل دارا بودن دقت کافی، از کاربرد بیشتری برخوردار است (آلویسی و همکاران^۲، ۲۰۰۵). تفاوت اساسی موجود بین الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی ژنتیک به طبیعت هر یک از افراد بر می‌گردد، به نحوی که افراد در الگوریتم ژنتیک، ردیف‌های خطی با طول ثابت می‌باشند (کروموزم‌ها) ولی در برنامه‌ریزی ژنتیک، همانند شاخه‌های مجزا هستند. همچنین در برنامه‌ریزی ژنتیک بر ساختار درختی مجموعه‌ها تاکید می‌شود ولی الگوریتم ژنتیک، بر اساس سیستم ارقام دودویی عمل می‌نماید. فرآیند گام به گام حل یک مسئله با

3 - Boolean functions
4 - Ferreira

1 - Koza
2 - Alvisi et al.

ارائه می‌شوند، بر اساس حداکثر سود پیش‌بینی شده است (مهارجانی و همکاران، ۱۳۸۹). هر شبکه بیزین از سه جزء اصلی تشکیل شده است:

- مجموعه‌ای از گره‌ها که در واقع متغیرهای سیستم مدیریتی هستند. این گره‌ها می‌توانند متغیرهای پیوسته یا ناپیوسته، اعداد ثابت و یا توابع پیوسته باشند. هر گره به چند طبقه یا کلاس تقسیم می‌شود. در حالت کلی گره‌ها یا والد هستند یا ولد (فرزند). یک گره ولد می‌تواند از چندین والد تولید شده باشد (مک کان و همکاران، ۲۰۰۶).

- مجموعه‌ای از بندها: روابط سببی بین متغیرها به وسیله بندها به وجود می‌آیند (سعدالدین و همکاران، ۲۰۰۵) این روابط به وسیله پیکان نمایش داده می‌شوند. گره‌ها به وسیله پیکان‌ها به هم مربوط می‌شوند. عدم وجود پیکان بین گره‌ها، بیانگر استقلال متغیرها می‌باشد (پالینو و هارت، ۲۰۰۶). گره‌هایی که هیچ پیکانی به آنها وارد نشده است، گره‌های والد ورودی هستند. گرهی که پیکان به آن وارد و از آن خارج می‌شود، بیانگر گره ولد وضعیت می‌باشند و گره‌هایی که از آنها هیچ پیکانی خارج نمی‌شود، نشان دهنده گره‌های ولد خروجی می‌باشند (پالینو و هارت، ۲۰۰۶). منظور منطقی پیکانی که از سمت متغیر X به سمت متغیر Y می‌رود، این است که متغیر X اثر مستقیمی بر متغیر Y دارد. مثلاً دما اثر مستقیم بر تبخیر و تعرق می‌گذارد (پالینو و هارت، ۲۰۰۶).

- مجموعه‌ای از احتمالات: هر کدام برای متغیر حالت تصمیمی را مشخص کرده و از طریق متغیرهایی که مستقیماً آن را تحت تاثیر قرار می‌دهند (والدین آن)، به آن نسبت داده می‌شوند (کین، ۲۰۰۱). گره‌هایی که قبل از آن‌ها گره دیگری در نمودار وجود دارد با توزیع احتمالی شرطی تعریف می‌شوند و در غیر این صورت، با احتمال آغازین (اولیه) بیان می‌شوند. احتمال شرطی، احتمال میزان تأثیر یک گره ورودی به یک گره مفروض در شبکه را به دست می‌دهد و احتمال آغازین بیانگر میزان احتمال قرارگیری یک متغیر ورودی در یک کلاس معین می‌باشد و از طریق اطلاعات اولیه موجود راجع به متغیرها به دست می‌آید. احتمالات مربوط به پایین‌ترین بخش در شبکه بیزین از طریق قانون احتمال کل به دست می‌آید و احتمالات مرتبط با بخش‌های بالایی شبکه، براساس قانون بیز هستند. در حالت کلی، اگر گره X دارای والد نباشد گره غیرمشروط و در غیر این صورت گره مشروط می‌باشد (کویکا و واریس، ۱۹۹۷).

معیارهای ارزیابی مدل

در این تحقیق، برای ارزیابی مدل‌های موردنظر از معیارهای ضریب همستگی (R) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد:

گام اول، انتخاب تابع برازش مناسب می‌باشد که در این مطالعه تابع جذر میانگین مربعات خطا به عنوان تابع برازش انتخاب گردید. گام دوم، انتخاب مجموعه متغیرهای ورودی و مجموعه توابع به منظور تولید کروموزوم‌ها می‌باشد. در مسئله حاضر مجموعه ترمینال‌ها متشکل از مقادیر جریان رودخانه با تاخیرهای زمانی می‌باشد. در این مطالعه، از چهار عملگر اصلی شامل $\{+, -, \times, \div\}$ استفاده شد. گام سوم، شامل انتخاب ساختار و معماری کروموزوم‌ها می‌باشد. گام چهارم انتخاب تابع پیوندی است که در این مطالعه عمل جمع برای ایجاد پیوند بین زیرشاخه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت، در گام پنجم عملگرهای ژنتیک و نرخ هریک از آنها انتخاب می‌شود.

شبکه‌های بیزین

شبکه بیزین یک مدل نموداری احتمالاتی است که مجموعه‌ای از متغیرها و احتمالات مربوط به هر کدام را نشان می‌دهد. این شبکه یک نمودار مستقیم و غیرچرخه‌ای است که در آن گره‌ها در حکم متغیرهای مسئله هستند. شبکه‌های بیزین محدودیتی در نمایاندن متغیرهای تصادفی ندارند. ساختار یک شبکه بیزین در واقع یک نمایش نموداری از اثرات متقابل متغیرهایی است که باید مدل شوند و علاوه بر این که کیفیت رابطه بین متغیرهای مسئله را نشان می‌دهد، کمیت ارتباط بین این متغیرها را نیز به نمایش می‌گذارد که به صورت عددی از توزیع احتمال مشترک آنها استفاده می‌کند (دیویس، ۲۰۰۷). این روش بر مبنای محاسبات احتمالات وابسته یا قانون بیز می‌باشد (رابطه ۱). یک شبکه بیزی را می‌توان این‌گونه تعریف کرد: تعدادی گره که نشان دهنده آن دسته از متغیرهای تصادفی هستند که با یکدیگر در تعامل می‌باشند. این برهم‌کنش، به وسیله ایجاد ارتباط بین گره‌ها ایجاد می‌شود (کین، ۲۰۰۱):

$$P(b|a) = P(a|b) \times \frac{P(b)}{P(a)} \quad (1)$$

که در رابطه فوق $P(a)$: احتمال وقوع پیشامد a ، $P(b)$: احتمال وقوع پیشامد b ، $P(b|a)$: احتمال وقوع پیشامد b به شرطی که a اتفاق افتاده باشد و $P(a|b)$: احتمال وقوع پیشامد a به شرطی که b اتفاق افتاده باشد، هستند.

متغیرهایی که در مسائل زیست محیطی و منابع آب به کار می‌روند، می‌توانند کیفی یا کمی باشند. تعیین تعداد مناسبی از متغیرها در یک مسئله مدل‌سازی از مسائل چالش‌برانگیزی است که باید با دقت به آن پرداخته شود. قانون احتمالات اعمال شده نیز باید بر مبنای بهترین یافته‌های موجود یا اطلاعات کمی و کیفی بین متغیرها باشد. پیشنهادها و تصمیم‌هایی که برای اجرا

3 - McCann et al.

4 - Pollino and Hart

5 - Kuikka and Varis

1 - Davies

2 - Cain

احمدی و همکاران: کاربرد شبکه‌های بیزین و برنامه‌ریزی ژنتیک...

شد. در جدول (۲) الگوهای مختلف ورودی مدل برنامه ریزی ژنتیک ارائه شده است. این الگوها شامل دبی یک روز قبل $Q(t-1)$ تا دبی پنج روز قبل ($Q(t-5)$) می‌باشند. جدول (۳) مشخصات مدل برنامه‌ریزی ژنتیک به کار رفته برای پیش‌بینی سری جریان روزانه رودخانه باراندوزچای را نشان می‌دهد. جدول (۴) نتایج ارزیابی الگوهای مختلف ورودی برنامه‌ریزی ژنتیک برای مدل‌سازی جریان روزانه رودخانه در مراحل آموزش و صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول می‌توان نتیجه گرفت که مدل شامل دبی سه روز قبل به ترتیب با دارا بودن ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطای معادل با 0.978 و $1/66 (m^3/s)$ بیشترین دقت را در مرحله صحت‌سنجی به خود اختصاص داده و به عنوان بهترین الگو برای مدل برنامه‌ریزی ژنتیک انتخاب گردید. شکل (۲ الف و ب) نمودار مقادیر مشاهداتی و مقادیر پیش‌بینی شده حاصل از بهترین مدل برنامه‌ریزی ژنتیک (الگوی سه) برای سری روزانه جریان رودخانه باراندوزچای، در مرحله صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که برنامه‌ریزی ژنتیک در بهترین حالت خود به خوبی توانسته دبی جریان روزانه رودخانه مورد مطالعه را پیش‌بینی کند. همان‌گونه که در شکل (۲ الف) مشاهده می‌شود، دقت نتایج مدل برنامه ریزی ژنتیک در پیش‌بینی دبی‌های کمتر، بیش از دبی‌های بزرگ‌تر می‌باشد.

یکی از قابلیت‌های مهم روش برنامه‌ریزی ژنتیک، ارائه رابطه ریاضی برای متغیرهای هیدرولوژیکی مورد بررسی می‌باشد. در این مطالعه نیز رابطه ریاضی به دست آمده از برنامه‌ریزی ژنتیک به همراه ساختار آن ارائه شده است. شکل (۳) ساختار درختی هر یک از ژن‌ها را نشان می‌دهد. در این ساختار $C0$ و $C1$ ضرایب برنامه‌ریزی ژنتیک و $d1$ ، $d2$ و $d0$ به ترتیب معادل دبی یک، دو و سه روز قبل می‌باشند. با استفاده از این ساختار درختی می‌توان شکل ریاضی جریان روزانه رودخانه باراندوزچای را به صورت رابطه (۴) ارائه نمود.

$$Q_t = 0.35 + 0.425Q_{t-2} - 0.425Q_{t-3} - 0.026Q_{t-1}Q_{t-2} + 0.026Q_{t-2}Q_{t-3} + Q_{t-1} \quad (4)$$

$$R = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \right)^{0.5} \quad (2)$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{n} \right)^{0.5} \quad (3)$$

که در روابط فوق Q_i : مقدار مشاهده شده در گام زمانی i ام، \hat{Q}_i : مقدار محاسبه شده در همان زمان، n : تعداد داده‌ها و \bar{Q} : میانگین مقادیر مشاهداتی می‌باشد. هر چه مقدار ضریب همبستگی بالاتر و جذر میانگین مربعات خطا کمتر باشد، نتایج دقیق‌تر و قابل اعتمادتر خواهند بود.

نتایج

نتایج مدل‌سازی جریان روزانه رودخانه باراندوزچای با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک

در مطالعه حاضر، برای مدل‌سازی جریان روزانه رودخانه باراندوزچای با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک، داده‌های چهار سال (از یک مهر ۱۳۸۵ تا سی و یک شهریور ۱۳۸۸) برای آموزش و یک سال (از یک مهر ۱۳۸۸ تا سی و یک شهریور ۱۳۸۹) به عنوان داده‌های صحت‌سنجی انتخاب شدند (به طور کلی ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد برای صحت‌سنجی در نظر گرفته شد). در برنامه‌ریزی ژنتیک انتخاب جمعیت‌های اولیه تصادفی مختلف و تاثیرگذار در پدیده (که در برنامه ریزی ژنتیک به عنوان داده‌های آموزشی از آن‌ها یاد می‌شود) به منظور آموزش ماهیت ساز و کار حاکم بر پدیده نه تنها سبب پیچیدگی الگو و افزایش حافظه درگیر خواهد شد، بلکه سبب کاهش دقت مدل نیز می‌شود. لذا در الگوسازی جریان رودخانه نیز بایستی سعی نمود مؤثرترین داده‌های مشاهداتی را به عنوان داده‌های آموزشی انتخاب کرد (داننده‌مهر و مجدزاده طباطبائی، ۱۳۸۹). نکته مهم دیگر در برنامه‌ریزی ژنتیک، انتخاب عملگرهای مدل برای انجام محاسبات می‌باشد. در این مطالعه عملگر ترکیب به دلیل دارا بودن دقت بالا، برای مدل‌سازی جریان روزانه انتخاب

جدول ۲- الگوهای ورودی مورد استفاده در مقیاس زمانی روزانه رودخانه باراندوزچای

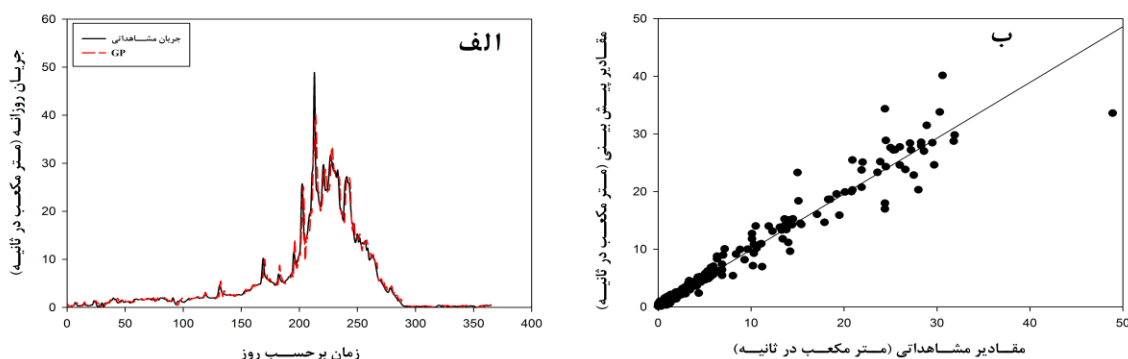
الگوی ورودی روزانه	ردیف
$Q(t)=f\{Q(t-1)\}$	۱
$Q(t)=f\{Q(t-1), Q(t-2)\}$	۲
$Q(t)=f\{Q(t-1), Q(t-2), Q(t-3)\}$	۳
$Q(t)=f\{Q(t-1), Q(t-2), Q(t-3), Q(t-4)\}$	۴
$Q(t)=f\{Q(t-1), Q(t-2), Q(t-3), Q(t-4), Q(t-5)\}$	۵

جدول ۳- مشخصات برنامه ریزی ژنتیک به کار رفته در مطالعه حاضر

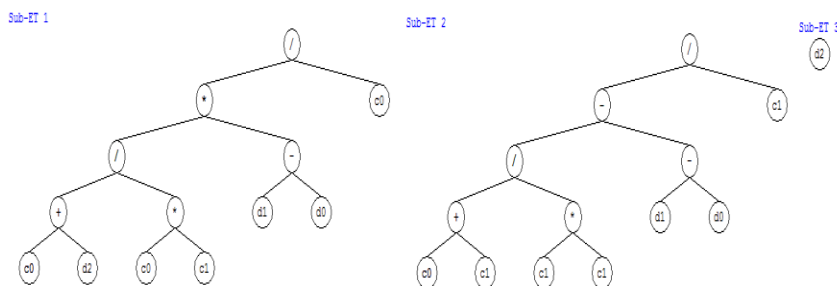
ردیف	معیار مورد نظر	مقدار عددی
۱	تعداد ژن	۳
۲	تولید بدون بهبود	۱۵۰
۳	تولید از زمان شروع	۲۰۰
۴	حداکثر مقدار اجرا	۱۵۰
۵	اندازه حداکثر برنامه	۵۱۲

جدول ۴- تحلیل های آماری نتایج برنامه ریزی ژنتیک برای الگوهای ورودی جریان روزانه

شماره الگو	آموزش		صحت سنجی	
	جذر میانگین مربعات خطا (متر مکعب بر ثانیه)	ضریب همبستگی	جذر میانگین مربعات خطا (متر مکعب بر ثانیه)	ضریب همبستگی
۱	۳/۱۸	۰/۹۰۴	۱/۹۳	۰/۹۷۴
۲	۲/۶۶	۰/۹۳۴	۱/۷۸	۰/۹۷۵
۳	۲/۵۶	۰/۹۳۹	۱/۶۶	۰/۹۷۸
۴	۲/۷۳	۰/۹۳۰	۱/۸۲	۰/۹۷۴
۵	۲/۱۶	۰/۹۰۹	۱/۸۸	۰/۹۷۳



شکل ۲- نمودارهای الف) گرافیکی و ب) پراکندگی مقادیر مشاهداتی و پیش بینی شده حاصل از بهترین مدل برنامه ریزی ژنتیک در مرحله صحت سنجی



شکل ۳- ساختار درختی برنامه ریزی ژنتیک برای بهترین مدل جریان روزانه رودخانه باراندوزچای

آموزش و ۲۰ درصد برای صحت سنجی در نظر گرفته شد. الگوهای ورودی برای شبکه بیزین نیز به مانند روش برنامه ریزی ژنتیک انتخاب شد تا هر دو روش به کار رفته از شرایط یکسانی

نتایج مدل سازی جریان روزانه رودخانه باراندوزچای با استفاده از شبکه بیزین در مطالعه حاضر برای مدل سازی جریان روزانه رودخانه باراندوزچای با استفاده از شبکه بیزین، ۸۰ درصد داده ها برای

طریق داده‌ها و معیارهای ارزیابی موجود در روش‌ها صورت گیرد.

جدول (۵) نتایج ارزیابی الگوهای مختلف ورودی شبکه بیزین برای مدل‌سازی جریان روزانه رودخانه در مراحل آموزش و صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول می‌توان نتیجه گرفت که مدل شامل دبی سه روز قبل به ترتیب با دارا بودن ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطای معادل با 0.964 و $1/96(m^3/s)$ بیشترین دقت را در مرحله صحت‌سنجی به خود اختصاص داده و به عنوان بهترین الگو برای مدل بیزین انتخاب می‌شود. همچنین رابطه ریاضی حاصل از الگوی سوم به صورت رابطه (۵) ارائه گردیده است:

$$Q_t = 0.265818Q_{t-3} - 0.0417711Q_{t-2} + 0.717615Q_{t-1} \quad (5)$$

شکل ۵ نمودار مقادیر مشاهداتی و مقادیر پیش‌بینی شده الگوی بهینه (الگوی سه) برای سری روزانه جریان رودخانه باراندوزچای، در مرحله صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. با دقت در این شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد برنامه‌ریزی ژنتیک در تخمین دبی پیک به مراتب بهتر از مدل شبکه بیزین می‌باشد.

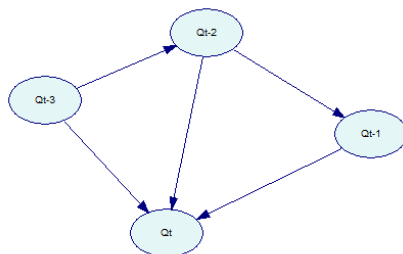
در اطلاعات دریافتی برخوردار باشند. مراحل ساخت و توسعه مدل شبکه بیزین در مطالعه حاضر به صورت زیر بوده است:

- تشکیل چارچوب مدل: که شامل تعریف متغیرها و روابط موجود بین آنها در سیستم است و معمولاً براساس یک مدل مفهومی از سیستمی که قرار است مدل‌سازی و مدیریت شود، شکل می‌گیرد. بنابراین ساخت مدل مفهومی، اولین قدم در ساختن مدل بیزین است. در این مطالعه، مدل مفهومی بیزین از طریق الگوهای ورودی ساخته شد (شکل ۴).

- تعیین نوع ارتباط بین ورودی‌های مختلف مدل در ساختار مفهومی: در مطالعه حاضر از حافظه سری روزانه جریان به عنوان ورودی‌های اصلی استفاده شد. حال در تعریف مفهومی برای مدل بیزین این گونه در نظر گرفته شد که، دبی فردا متأثر از توالی‌های گذشته خود می‌باشد (شکل ۴).

- آموزش شبکه و به دست آوردن رابطه بین داده‌ها: پس از تشکیل چارچوب و تعریف مدل، نوبت به آموزش شبکه ساخته شده می‌رسد. در این مرحله با استفاده از الگوهای مختلف ورودی، مدل سعی در ایجاد ارتباط بین داده‌ها داشته و شکل ریاضی این ارتباط را به دست می‌آورد. حال با رابطه ریاضی موجود می‌توان داده‌ی مصنوعی تولید کرده و عملکرد مدل را مورد ارزیابی قرار داد.

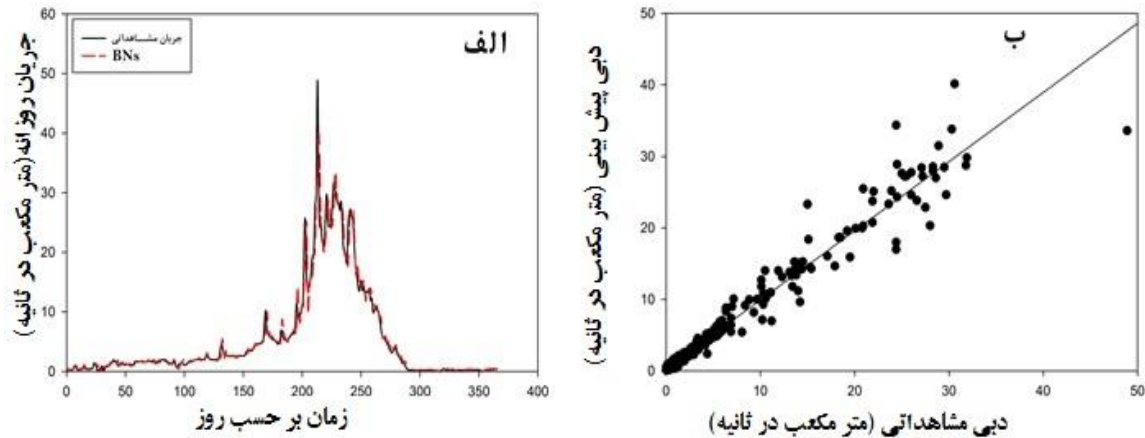
- ارزیابی مدل: مجموعه‌ای از ابزار اعتبار سنجی می‌تواند در مورد ارزیابی شبکه به کار برده شود که این ارزیابی‌ها می‌توانند از



شکل ۴- مدل مفهومی ساخته شده برای شبکه بیزین

جدول ۴- تحلیل‌های آماری نتایج مدل بیزین برای الگوهای ورودی جریان روزانه

شماره الگو	آموزش		صحت‌سنجی	
	ضریب همبستگی	جذر میانگین مربعات خطا (متر مکعب بر ثانیه)	ضریب همبستگی	جذر میانگین مربعات خطا (متر مکعب بر ثانیه)
۱	۰/۹۰۸	۳/۲۳	۰/۹۵۷	۲/۱۲
۲	۰/۹۱۰	۳/۱۷	۰/۹۵۹	۲/۰۷
۳	۰/۹۱۴	۲/۵۶	۰/۹۶۴	۱/۹۶
۴	۰/۹۰۹	۲/۹۸	۰/۹۵۵	۲/۱۰
۵	۰/۹۰۰	۳/۴۵	۰/۹۴۹	۲/۱۹



شکل ۵- نمودارهای الف) گرافیکی و ب) پراکندگی مقادیر مشاهداتی و پیش بینی شده حاصل از بهترین مدل شبکه های بیزین در مرحله صحت سنجی

۱۳۹۰). بنابراین، در این مطالعه جریان روزانه رودخانه باراندوزچای در دوره آماری ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ با استفاده از روش های برنامه ریزی ژنتیک و شبکه های بیزین مدل سازی شد. به طور کلی نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر ارائه می شود:

- برای سری روزانه بهترین عملکرد برنامه ریزی ژنتیک با سه تاخیر زمانی در ورودی های مدل به دست آمد و ضریب همبستگی و میانگین مربعات مجذور خطا برای این الگو به ترتیب 0.978 و $1/66$ متر مکعب بر ثانیه محاسبه گردید.
- ارزیابی عملکرد مدل شبکه بیزین بر مبنای دو آماره ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا نشان می دهد که دقت مدل سازی تا تاخیر سوم رو به بهبود بوده و از آن به بعد کاهش می یابد. به طوری که ضریب همبستگی و میانگین مربعات مجذور خطا در بهترین حالت مدل بیزین به ترتیب معادل 0.964 و $1/96$ متر مکعب بر ثانیه به دست آمد.
- با دقت بیشتر به شکل های ارائه شده برای هر دو روش، می توان نتیجه گرفت که عملکرد دو روش از نظر تحلیل های آماری نزدیک به هم می باشد، اما از نقطه نظر نموداری و تخمین دبی های کمینه و بیشینه، مشخص است که هر دو مدل در پیش بینی دبی بیشینه خطای بیشتری دارند اما در پیش بینی دبی متوسط و کمینه عملکرد مدل برنامه ریزی ژنتیک به مراتب بهتر از مدل شبکه بیزین می باشد.

نتایج مطالعه حاضر در مجموع روش برنامه ریزی ژنتیک را به عنوان یک روش صریح و دقیق برای پیش بینی جریان رودخانه ها پیشنهاد می کند. این پیشنهاد با نتایج حاصل از مطالعات گوون (۲۰۰۹) که به پیش بینی جریان روزانه رودخانه به کمک برنامه ریزی ژنتیک پرداخته است، مطابقت کامل دارد. خو و همکاران (۲۰۰۱) از برنامه ریزی ژنتیک برای پیش بینی رواناب بهره برده و نتایج حاصل را با مقادیر مشاهداتی و نیز مقادیر محاسبه شده توسط روش های کلاسیک مقایسه نمودند. نتایج به دست آمده حاکی از دقت بالای برنامه ریزی ژنتیک بود. در تحقیقی که آیتک و کیسی^۱ (۲۰۰۸) در مدل سازی رسوب معلق انجام دادند، برنامه ریزی ژنتیک دقت فوق العاده بالایی نسبت به مدل رگرسیون از خود نشان داد. فربودنام و همکاران (۱۳۸۸) و داندنمههر و مجدزاده طباطبائی (۱۳۸۹) و قبادیان و همکاران (۱۳۹۲) نیز در تحقیقات خود نشان دادند که برنامه ریزی ژنتیک از دقت بسیار بالایی در مدل سازی فرآیندهای مختلف هیدرولوژیکی برخوردار است و نتیجه این تحقیق نیز برتری روش برنامه ریزی ژنتیک را نسبت به مدل بیزین نشان می دهد.

نتیجه گیری و بحث

تعیین جریان رودخانه ها یکی از مؤلفه های مهم و تأثیرگذار در مدیریت منابع آب حوضه آبریز می باشد. مطالعه این پدیده هیدرولوژیکی کاربردهای فراوانی از جمله در زمینه پیش بینی سیلاب دارد. از طرفی به نظر می رسد فرآیند جریان رودخانه در مقطع زمانی کوتاه مدت به ویژه روزانه غیرخطی باشد. منبع اصلی غیرخطی بودن فرآیند جریان های کوتاه مدت روزانه از غیرخطی بودن فرآیندهای کوتاه مدت اقلیمی نظیر بارش و درجه حرارت منشعب شده و غیرخطی بودن واکنش بارش-رواناب نیز باعث پیچیده تر شدن فرآیند رودخانه می گردد (خلیلی و همکاران،

منابع

- ۱- خلیلی، ک.، فاخری فرد، ا.، دین پژوه، ی.، و م.ع.، قربانی. ۱۳۹۰. بررسی غیرخطی بودن فرآیند جریان رودخانه با استفاده از آزمون BDS. مجله دانش آب و خاک (دانشگاه تبریز)، ۲۱ (۲): ۳۷-۲۵.
- ۲- داندن مهر، ع.، و م.ر.، مجدزاده طباطبائی. ۱۳۸۹. بررسی تأثیر توالی دبی روزانه در پیش‌بینی جریان رودخانه‌ها با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک. نشریه آب و خاک دانشگاه فردوسی مشهد، ۲۴ (۲): ۳۲۵-۳۳۳.
- ۳- فرودنام، ن.، قربانی، م. ع. و م. ت.، اعلمی. ۱۳۸۸. پیش‌بینی جریان رودخانه با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک (مطالعه موردی: رودخانه ليقوان). مجله دانش آب و خاک (دانشگاه تبریز)، ۱۹ (۴): ۱۲۳-۱۰۷.
- ۴- قبادیان، ر.، قربانی، م.ع.، م.، خلیج. ۱۳۹۲. بررسی عملکرد روش برنامه‌ریزی بیان ژن در روندیابی سیلاب رودخانه زنگمار در مقایسه با روش موج دینامیکی. نشریه آب و خاک، ۲۷ (۳): ۶۰۲-۵۹۲.
- ۵- مهاجرانی، ح.، مساعدی، ا.، خلقی، م.، مفتاح هلقی، م.، ا.، سعدالدین. ۱۳۸۹. معرفی شبکه‌های تصمیم‌گیری بیزین و کاربرد آنها در مدیریت منابع آب. اولین همایش ملی مدیریت منابع آب اراضی ساحلی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری.
- 6- Alvisi, S., Mascellani G., Franchini M. and A., Bardossy. 2005. Water level forecasting through fuzzy logic and artificial neural network approaches. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences*, 2: 1107-1145.
- 7- Aytek, A. and M., Asce. 2008. An application of artificial intelligence for rainfall runoff modeling. *Journal of Earth System Science*, 117(2): 145-155.
- 8- Aytek, A. and O., Kisi. 2008. A genetic programming approach to suspended sediment modeling. *Journal of Hydrology*, 351: 288-298.
- 9- Baran, E. and T., Jantunen. 2004. Stakeholder consultation for Bayesian decision support systems in environmental management. *Forest*, 27(35): 1-37.
- 10- Cain, J. 2001. Planning improvement in natural resource management: guideline for using Bayesian networks to support the planning and management of development program in the water sector and beyond. Centre for Ecology and Hydrology (CEH). Wallingford, UK.
- 11- Davies, P. 2007. Bayesian decision networks for management of high conservation. Report to the Conservation of Freshwater Ecosystem Values Project, Department of Primary Industries and Water, Hobart, Tasmania.
- 12- Ferreira, C. 2001. Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems. *Complex Systems*, 13: 87-129.
- 13- Ghorbani, M. A., Kisi, O. and M., Aalinezhad. 2010. A probe into the chaotic nature of daily streamflow time series by correlation dimension and largest Lyapunov methods. *Applied Mathematical Modelling*, 34: 4050-4057.
- 14- Govindaraju, R. S. 2000. Artificial neural network in hydrology. *Journal of hydrologic Engineering*, 5 (2): 115-123.
- 15- Guven, A. 2009. Linear genetic programming for time-series modeling of daily flow rate. *Journal of Earth System Science*, 118 (2): 157-173.
- 16- Khu, S. T., Liong, S. Y., Babovic, V., Madsen, H. and N., Muttill 2001. Genetic programming and its application in real-time runoff forming. *Journal of American Water Resources Association*, 37 (2): 439-451.

- 17- Koza, J. R. 1992. Genetic Programming: on the programming of computers by means of natural selection. Cambridge, MA: MIT Press.
- 18- Kuikka S. and O., Varis 1997. Uncertainties of climate change impacts in Finnish watersheds: a Bayesian network analysis of expert knowledge, Boreal Environment Research.
- 19- Madadgar, S. and H., Moradkhani. 2014. Spatio-temporal drought forecasting within Bayesian networks. Journal of Hydrology, 512: 134–146.
- 20- McCann, R., Marcot, B. and R., Ellis. 2006. Bayesian Belief Networks: application in ecology and natural resource management, NRC Research Press.
- 21- Pollino, C. and B., Hart 2006. Bayesian network models in natural resource management. Integrated catchment assessment and management (ICAM) Centre of the Australian.
- 22- Reggiani, P. and A., Weerts. 2008. Bayesian approach to decision-making under uncertainty: An application to real time forecasting in the river Rhine. Journal of Hydrology, 356: 56-69.
- 23- Sadoddin, A., Letcher, R. A., Jackeman, A. J. and L. T. H. A., Newham. 2005. Bayesian decision network approach for assessing the ecological impact of salinity management. Mathematics and Computer in Simulation, 69: 162-176.
- 24- Uusitalo, L. 2007. Advantages and challenges of Bayesian networks in environmental modelling. Ecological modelling, 203(3): 312-318.
- 25- Wang, W. C., Chau, K. W., Cheng, C. T. and L., Qiu. 2009. A comparison of performance of several artificial intelligence methods for forecasting monthly discharge time series. Journal of Hydrology, 374: 294-306.
- 26- Zahiri A. and H. M., Azamathulla. 2014. Comparison between linear genetic programming and M5 tree models to predict flow discharge in compound channels Neural Computing and Applications, 24:413–420.