Archive of SID

مجله دانش آب و خاک/ جلد ۲۰/۱ شماره ۴ / سال ۱۳۸۹

برنامه‌ریزی ژنتیک و کاربرد آن در مدل‌سازی فرآیند بارش - رواناب

علی سلطانی[1]، محمدعلی قربانی[2*]، احمد فاخری‌فرد[3]، صابره دربندی[2] و داود فرسادی‌زاده[3]

تاریخ دریافت : 88/1/29 تاریخ پذیرش : 88/9/9

1-دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
2- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
3- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
مسئول مکاتبه E-mail: cusp2004@yahoo.com

چکیده

نقش و اهمیت فرآیند بارش-رواناب در مطالعات منابع آب موجب شده که این فرآیند از دیر باز مورد توجه متخصصین قرار گیرد. از این رو روش های متعددی همچون شبکه های عصبی مصنوعی، سیستم های فازی و نرو فازی، آنالیز موجک، الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی ژنتیک و معادلات دیفرانسیل تصادفی برای مدلسازی فرآیند بارش-رواناب توسعه یافته است. برنامه ریزی ژنتیک علاوه بر توانایی استخراج رابطه‌ی بین متغیّرهای ورودی و خروجی به طور خودکار و هوشمند، متغیّرهایی که در مدل بیشترین تأثیر را دارند انتخاب می‌کند. در این تحقیق، برنامه ریزی ژنتیک(GP) برای مدلسازی فرآیند بارش-رواناب روزانه در حوضه آبریز لیقوان با مساحت 76/19 کیلومتر مربع استفاده شده است. از آنجایی که GP توان انتخاب بهترین متغیرها را دارد، ابتدا متغیرهای معنی‌دار با 10 بار اجرای GP مشخص و سپس مدلسازی با متغیرهای معنی‌دار و دو مجموعه عملگر ریاضی انجام شد. در مقایسه نتایج دو مدل حاصل از دو مجموعه عملگر ریاضی درحالت بهینه، ضریب همبستگی و میانگین مربعات خطا برای آموزش در دو مدل یکسان و به ترتیب 0/85 و 0/06 و برای تست در مدل حاصل از مجموعه عملگر ریاضی یک، به ترتیب 0/93 و 0/2 و در مدل حاصل از مجموعه عملگر ریاضی دو، به ترتیب 0/97 و 0/08 به دست آمد. بنابراین مدل حاصل از مجموعه عملگر ریاضی دو، به عنوان مدل بارش-رواناب حوضه آبریز لیقوان پیشنهاد گردید.

واژه های کلیدی : بارش-رواناب، برنامه ریزی ژنتیک، حوضه آبریز لیقوان، مدلسازی

www.SID.ir

Archive of SID

Genetic Programming and Its Application in Rainfall-Runoff Modeling

A Soltani[1], MA Gorbani[2], A Fakheri Fard[3], S Darbandi[2] and D Farsadizadeh[3]

Received : 18 April 2009 Accepted : 30 November 2009
[1] Former Msc Student, Dept. of Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[2]Assist. Prof., Dept. of Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[3]Assoc. Prof., Dept. of Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
Correspondent author: E-mail: cusp2004@yahoo.com

Abstract

The role and importance of rainfall-runoff process in water resources studies has led this process to be considered by many researchers. Different methods such as artificial neural networks, fuzzy systems, neurofuzzy, wavelet analysis, genetic algorithm, genetic programming and stochastic differential equations have been developed for rainfall-runoff modeling. Furthermore, genetic programming which involves a mathematical model relating output and input variables, is able to select input variables that effectively contribute to the model. In this research, genetic programming (GP) was applied to modeling of daily basis rainfall-runoff process in Lighvan watershed with area of 76.19 km^2. According to the ability of GP in selecting the best variables, the significant variables were selected after 10 times running of GP. Modeling process was carried out using selected variables as well as two sets of mathematical operators. Comparing the results obtained for both models indicated that correlation coefficients and mean square errors using training data set were equal for both of them i.e. 0.85 and 0.06, respectively. For the test data the coefficients became 0.93, 0.2 for set (1) and 0.97 and 0.08 for set (2), respectively. The model obtained from set (2) of the mathematical operators, was selected as the desirable one for the rainfall-runoff analysis in the watershed.

Keywords: Genetic programming, Lighvan watershed, Modeling, Rainfall-runoff

مقدمه

فرآیند بارش-رواناب پدیده ای کاملاً غیر خطی است و استخراج روابط بین بارش در سطح حوضه و جریان ناشی از آن که به صورت رواناب و سیلاب آشکار می‌گردد، از دیرباز جزو مهمترین مسائل مورد توجه کارشناسان مرتبط با مسائل آب و بویژه هیدرولوژیست‌ها بوده است. تعیین رواناب ناشی از بارندگی نه تنها برای پیش‌بینی سیلاب، بلکه برای شناخت اثرات ناشی از تغییرات مورد نظر در حوضه آبریز یا بطور کلی در مدیریت منابع آب مهم می‌باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

از زمانی که شرمن (1932) مفهوم هیدروگراف واحد را پیشنهاد کرد، مدل‌های بارش-رواناب برای شبیه‌سازی فرآیند مذکور به طور گسترده به کار رفته اند. خاصیت غیرخطی، عدم قطعیت ذاتی فرآیند بارش-رواناب، نیاز به اطلاعات وسیع و پیچیده بودن مدل‌های فیزیکی از دلایلی بوده است که باعث شده محققان به سوی روش-های الهام گرفته شده از طبیعت همچون برنامه ریزی ژنتیک (GP[1]) رو آورند. سیل خیز بودن اکثر حوضه‌های کشور، گسترش طرح‌های توسعه منابع آب در حوضه‌ها و پیشرفت فناوری‌های کامپیوتری ضرورت مدیریت سیلاب از طریق مدلسازی را دو چندان کرده است. روش‌های الهام گرفته شده از طبیعت از جمله برنامه‌ریزی ژنتیک، جزو مدل‌هایی هستند که در تحقیقات پیچیده و دقیق از آن‌ها استفاده می‌شود. برنامه‌ریزی ژنتیک یک تکنیک برنامه‌ریزی خودکار می‌باشد که راه حل مسئله را با استفاده از برنامه‌نویسی کامپیوتری ارائه می‌کند. الگوریتم‌های تکاملی که بر اساس تئوری داروین پایه ریزی شده‌اند توانایی مدلسازی فرآیندهای کاملاً غیرخطی را دارند که برنامه‌ریزی ژنتیک نیز عضوی از خانواده الگوریتم‌های تکاملی می‌باشد. مزیت GP نسبت به مدل‌های دیگر از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی این است که در GP ابتدا ساختار بلوک ها (متغیرهای ورودی، هدف و مجموع توابع) تعریف شده و سپس ساختار بهینه مدل و ضرایب طی فرآیند آموزش تعیین می‌شوند در حالی که در شبکه‌های عصبی ابتدا باید ساختار تعیین شده و سپس ضرایب طی فرآیند آموزش حاصل می‌شوند. همچنین GP به طور خودکار می‌تواند متغیرهای ورودی که در مدل بیشترین تأثیر را دارند، انتخاب کند و این در حالی است که در سایر روش‌ها این امر امکان‌پذیر نیست.

ویگهام و کراپر(2001) با استفاده از برنامه ریزی ژنتیک و مدل قطعی ایهاکرس[2] فرآیند بارش-رواناب روزانه را در دو حوضه تیفی[3] و نامی[4] مدلسازی کردند. نتایج حاصل از برنامه‌ریزی ژنتیک دقت بهتری نسبت به مدل قطعی نشان داد. خو و همکاران (2001) در یک تحقیق در مورد حوضه آبریز اورگوال[5] در کشور فرانسه، از برنامه‌ریزی ژنتیک برای پیش بینی رواناب ساعتی بهره برده و نتایج حاصل را با مقادیر مشاهداتی و نیز مقادیر محاسبه شده توسط روش‌های کلاسیک مقایسه کردند. حاصل تحقیق، بیانگر دقت قابل قبول برنامه ریزی ژنتیک بود. لی یونگ و همکاران (2002) با مطالعه رابطه بارش- رواناب در زمان های متفاوت بدین نتیجه دست یافتند که استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک در پیش بینی رفتار بارش– رواناب در حوضه‌های آبریز سبب بروز خطای کمتری می‌گردد. جایاواردنا و همکاران (2005) با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک فرآیند بارش-رواناب را با داده‌های روزانه در دو حوضه نسبتاً بزرگ چین مدلسازی کردند که نتایج حاصل از GP با داده‌های واقعی مطابقت خوبی نشان داد. آیتک و کیسی (2008) با استفاده از برنامه-ریزی ژنتیک پدیده حمل رسوب رودخانه تانگو[6] در مونتانا[7] را با دادهای روزانه مدلسازی کردند که نتایج حاصل از GP با نمودارهای شدت رسوب و مدل‌های رگرسیون چند خطی مطابقت خوبی نشان داد. آیتک و همکاران (2008) از شبکه‌های عصبی و برنامه‌ریزی ژنتیک برای مدلسازی بارش-رواناب روزانه حوضه رودخانه جونیاتا[8] در ایالت پنسیلوانیای آمریکا استفاده کرده و نتیجه گرفتند که برنامه‌ریزی ژنتیک با دقت بهتری نسبت به شبکه‌های عصبی مصنوعی فرآیند

[1] Genetic programming

[2] IHACRES
[3] Teifi
[4] Namoi
[5] Orgeval
[6] Tongue
[7] Montana
[8] Juniata

www.SID.ir

Archive of SID

بارش-رواناب را مدلسازی می‌کند. اوستوریکار و دئو (2008) با بکار گیری برنامه ریزی ژنتیک در تخمین داده های ناقص مربوط به ارتفاع امواج در خلیج مکزیک دریافتند که این روش از دقت بسیار مطلوبی در پیش‌بینی داده‌های مربوط به سری‌های زمانی برخوردار است. باتوجه به نوآوری روش GP، تنها تحقیقی که در ایران انجام گرفته توسط فربودفام و همکاران در سال 1388 بر روی پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه لیقوان بوده است و نتایج تحقیق نشان داده است که روش GP از دقت بسیار بالایی نسبت به روش شبکه های عصبی مصنوعی و مدل‌های سری زمانی برخوردار می‌باشد.

لذا با توجه به موارد فوق هدف این تحقیق، کاربرد برنامه‌ریزی ژنتیک برای مدل‌سازی فرآیند بارش-رواناب روزانه حوضه آبریز لیقوان، از زیر حوضه‌های معرف حوضه دریاچه ارومیه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

برنامه ریزی ژنتیک

برنامه‌ریزی ژنتیک تعمیم یافته الگوریتم ژنتیک می‌باشد که برای اولین بار بر اساس تئوری داروین ارائه شد. به این ترتیب که جمعیتی در جهت تکامل به صورت انتخابی، جمعیت نامناسب را رها کرده و فرزندانی اصلاح شده ایجاد می‌کنند. برنامه ریزی ژنتیک یک تکنیک برنامه‌ریزی خودکار می‌باشد که راه حل مسئله را با استفاده از برنامه کامپیوتری ارائه می‌کند. در این روش در ابتدای فرآیند هیچگونه رابطه تابعی در نظر گرفته نشده و این روش قادر به بهینه سازی ساختار مدل و مؤلفه های آن می باشد. برنامه‌ریزی ژنتیک بر خلاف الگوریتم ژنتیک روی ساختار درختی فرمول ها به جای سلسله ارقامِ دودوئی عمل می‌کند. ساختارهای درختی از مجموعه توابع (عملگرهای ریاضی مورد استفاده در فرمول ها) و ترمینال‌ها (متغیّرهای مسئله و اعداد ثابت) ایجاد می‌شوند (کزا 1992) .

قبل از مراحل اجرایی برنامه ریزی ژنتیک گام های مقدماتی زیر باید توسط کاربر تعیین شوند.

1. مجموعه ترمینال ها (متغیّر های مسئله، اعداد ثابت تصادفی)، 2. مجموعه عملگرهای ریاضی مورد استفاده در فرمول ها، 3. انتخاب تابع برازش، برای سنجش برازش فرمول ها، 4. تعیین پارامترهای کنترل کننده اجرای برنامه (اندازه جمعیت، احتمال مربوط به به کارگیری عمل های ژنتیکی و جزئیات دیگر مربوط به اجرای برنامه) , 5. معیار پایان و ارائه نتایج اجرای برنامه (مثل، تعداد تولید جمعیت جدید، تعیین یک مقدار مشخص برای برازش فرمول‌ها که اگر میزان برازش برابر یا بیشتر از آن مقدار شد، اجرا متوقف شود) فرآیند اجرایی گام به گام برنامه ریزی ژنتیک به صورت مراحل زیر است: 1. تولید یک جمعیت اولیه از فرمول‌ها که این فرمول‌ها از ترکیب تصادفی مجموعه توابع (عملگرهای ریاضی مورد استفاده در فرمول‌ها) و ترمینال‌ها (متغیّرهای مسئله و اعداد ثابت) ایجاد می‌شوند، 2. هر یک از افراد جمعیت مذکور با استفاده از توابع برازش مورد ارزیابی قرار می گیرند، 3. تولید یک جمعیت جدید از فرمول‌ها، که مراحل زیر برای تولید یک جمعیت جدید دنبال می‌شود:

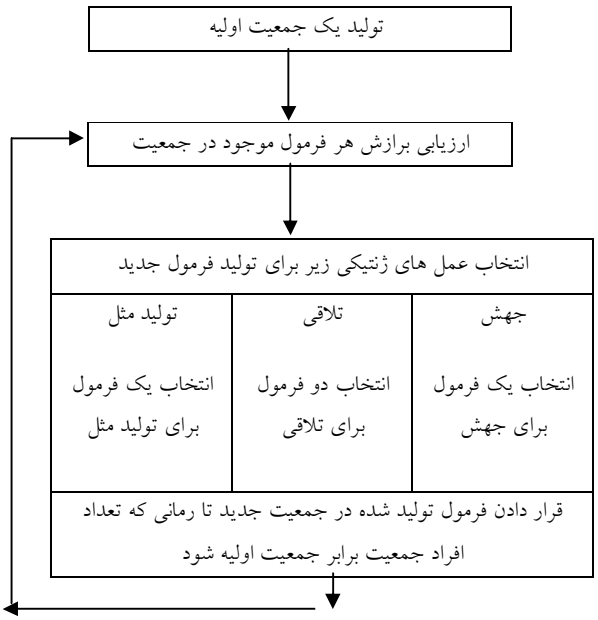
الف. یکی از عمل های ژنتیکی تلاقی[1]، جهش[2] و تولید مثل[3] انتخاب می شود (این سه عمل ژنتیکی، مهمترین عمل‌های ژنتیکی مورد استفاده در برنامه‌ریزی ژنتیک می‌باشند. عمل‌های دیگری مثل اصلاح ساختار و... نیز با احتمال کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.)، ب. تعداد مناسبی از افراد جمعیت حاضر انتخاب می-شوند (انتخاب فرد یا افرادی از جمعیت مذکور به صورت احتمالاتی می‌باشد که در این انتخاب احتمالاتی

[1] Crossover
[2] Mutation
[3] Reproduction

www.SID.ir

Archive of SID

منفردهای با برازش بهتر به منفردهای نامرغوب ترجیح داده می‌شوند و این بدان معنی نیست که حتماً منفردهای نامرغوب حذف می‌شوند)، ج. از عمل ژنتیکی انتخاب شده برای تولید فرزند (فرمول جدید) استفاده می‌شود، د. فرزند (فرمول جدید) تولید شده در یک جمعیت جدید وارد می‌شود , ه. مدل مورد نظر با استفاده از تابع برازش مورد ارزیابی واقع می‌شود.
4. گام سوم تا نیل به حداکثر تعداد تولید، تکرار خواهد شد.
طرح کلی گام‌های اجرایی برنامه ریزی ژنتیک درشکل 1 نشان داده شده است.



شکل 1- مروری بر شکل کلی گام‌های اجرایی برنامه‌ریزی ژنتیک (ست و بولارت 2001)

برنامه‌ریزی ژنتیک بین متغیرهای ورودی و خروجی رابطه‌ای را برقرار می‌کند، لذا رابطه علت و معلولی فرآیند بارش-رواناب در این تحقیق به صورت زیر در نظر گرفته شده است (جایاواردنا و همکاران 2005).

$$Q_{t+dt} = f(R_t, R_{t-\Delta t}, \ldots, R_{t-W\Delta t}, Q_t, Q_{t-\Delta t}, \ldots, Q_{t-W\Delta t}) \quad [1]$$

که در آن Q رواناب بر حسب $m^3 s^{-1}$، R شدت بارش $mmday^{-1}$، d $(d = 1,2,\ldots)$ پارامتری است که نشان می‌دهد تا کجا تخمین رواناب مطلوب می‌باشد.

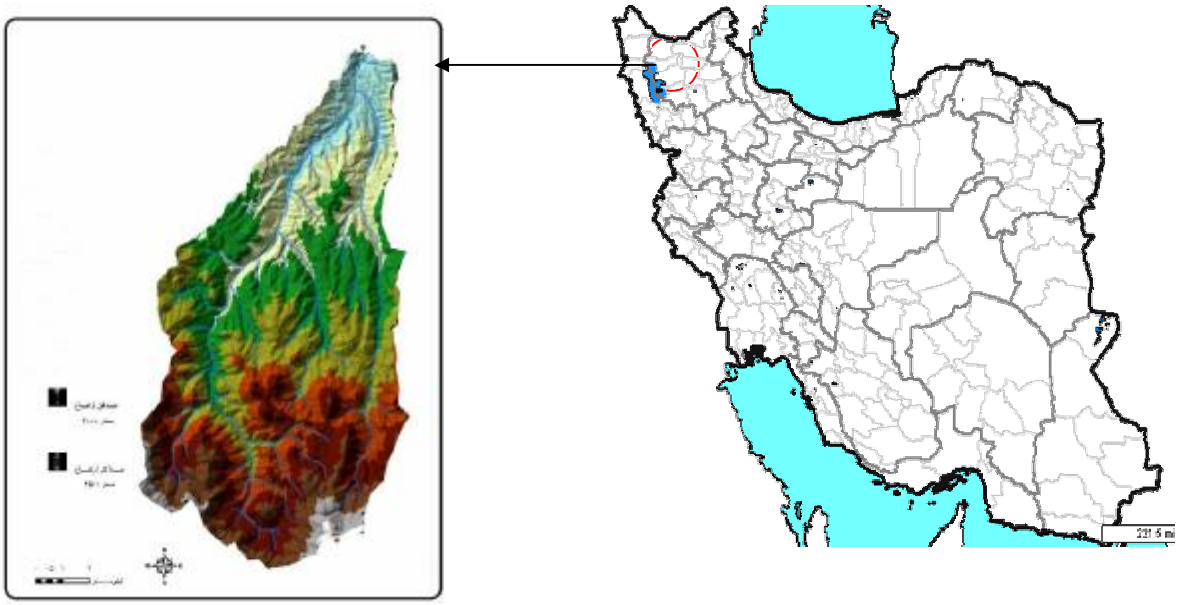
پارامتر W $(W = 1,2,\ldots)$ نشان دهنده اینست که تا کجا داده‌های رواناب و بارش روی تخمین رواناب با فواصل زمانی Δt تأثیر دارد.

معرفی منطقه و داده‌های مورد استفاده

حوضه آبریز لیقوان از زیرحوضه های مهم و معرف حوضه آبریز تلخه رود بوده که با وسعتی معادل 76/19 کیلومتر مربع در استان آذربایجان شرقی در دامنه شمالی سهند ما بین 46 درجه و 25 دقیقه تا 26 دقیقه طول شرقی و 37 درجه و 45 دقیقه تا 37 درجه و 50 دقیقه عرض شمالی گسترش یافته است. رودخانه لیقوان به عنوان زهکش اصلی حوضه مذکور بوده و جریانات خود را به رودخانه تلخه رود و نهایتاً دریاچه ارومیه تخلیه می‌کند. مهمترین شاخه های رودخانه عبارتند از باراله چای, بزکش چای و باغچه دره و بلندترین نقطه حوضه با ارتفاع 3620 متر از سطح دریای آزاد در جنوب شرقی ارتفاعات سهند و پایین ترین نقطه آن با ارتفاع 2140 متر در محل ایستگاه هیدرومتری لیقوان می باشد. شکل حوضه به صورت کشیده و با فرکانس آبراهه ای 1/2 و ارتفاعی برابر 3675 متر و طولانی ترین شاخه اصلی حوضه در محل ایستگاه هیدرومتری لیقوان 17 کیلومتر با شیب متوسط 11 درصد می باشد. حوضه آبریز لیقوان در شکل 2 نشان داده شده است

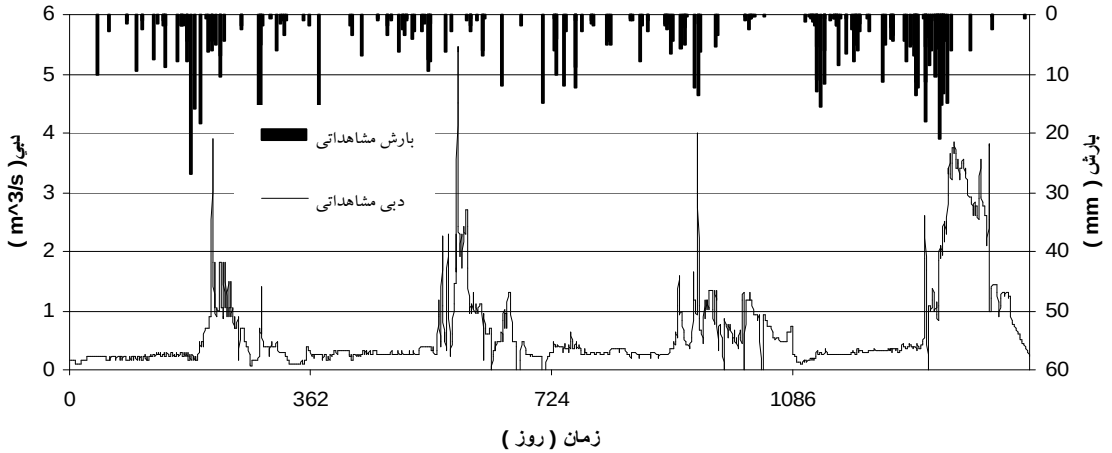
www.SID.ir

Archive of SID



شکل 2- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز لیقوان

داده‌های روزانه بارش و رواناب حوضه آبریز لیقوان از سال 1377 تا 1381 جهت مطالعه انتخاب و مورد استفاده قرار گرفته است. نمودار تغییرات بارش و رواناب در طول دوره آماری مورد استفاده، در شکل 3 نشان داده شده است.



شکل 3- مقادیر مشاهداتی بارش و رواناب روزانه حوضه آبریز لیقوان (1381-1377)

www.SID.ir

Archive of SID

خصوصیات آماری مقادیر بارش-رواناب مورد استفاده در این تحقیق برای بازه زمانی 1381-1377 محاسبه و در جدول 1 نشان داده شده است.

جدول 1- خصوصیات آماری مقادیر بارش-رواناب مورد استفاده برای بازه زمانی (1381-1377)

مشخصه های آماری	بارش روزانه ($mmday^{-1}$)	دبی روزانه (m^3s^{-1})
تعداد داده‌ها	1442	1442
میانگین	0/681	0/610
واریانس	5/921	0/517
حداکثر	27	5/38
حداقل	0	0

معیارهای ارزیابی

در این تحقیق برای ارزیابی توانایی و دقت مدل برنامه ریزی ژنتیک در شبیه سازی فرآیند بارش-رواناب بر اساس داده‌های دوره آماری از نمایه های ضریب همبستگی (r) و میانگین مربعات خطا (MSE)استفاده شده است، که به ترتیب با استفاده از روابط 2 و 3 قابل محاسبه است.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y})^2} \qquad [2]$$

در روابط اخیر، r ضریب همبستگی، MSE میانگین مربعات خطا بر حسب $(m^3s^{-1})^2$ ، x_i و y_i به ترتیب مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در گام زمانی i ام، N تعداد گام های زمانی، $\bar{x}$ و $\bar{y}$ نیز به ترتیب میانگین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی می‌باشد. علاوه بر معیارهای فوق از نمودارهای مشاهداتی- محاسباتی نیز جهت ارزیابی مدل ها استفاده گردید.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - x_i)^2}{N} \qquad [3]$$

نتایج و بحث

در این تحقیق برای مدلسازی فرآیند بارش-رواناب با استفاده از برنامه ریزی ژنتیک، داده های 3 سال، از مهر77 تا شهریور 80 به عنوان داده های آموزش و 1 سال، از مهر 80 تا شهریور 81 به عنوان داده های تست انتخاب شدند (بی نام 1381). از آنجایی که GP دارای توان انتخاب متغیّر های مؤثر در مدل و حذف متغیّر هایی که تأثیر کمتری دارند، می‌باشد. لذا در این تحقیق 15 متغیّر به شرح زیر برای تعیین متغیر های معنی‌ار استفاده گردید.

$$Q_t = f\ (Q_{t-1}, Q_{t-2}, Q_{t-3}, Q_{t-4}, Q_{t-5}, Q_{t-6}, Q_{t-7}) \qquad [4]$$
$$(R_t, R_{t-1}, R_{t-2}, R_{t-3}, R_{t-4}, R_{t-5}, R_{t-6}, R_{t-7},$$

که در آن $R_{t-7}, R_{t-6}, R_{t-5}, R_{t-4}, R_{t-3}, R_{t-2}, R_{t-1}, R_t$ و $Q_{t-7}, Q_{t-6}, Q_{t-5}, Q_{t-4}, Q_{t-3}, Q_{t-2}, Q_{t-1}, Q_t$ به ترتیب بارش و رواناب در زمان های t، t-1، t-2، t-3، t-4، t-5، t-6 و t-7 می‌باشد. در این تحقیق برای مدلسازی فرآیند بارش-رواناب بر اساس برنامه‌ریزی ژنتیک از نرم افزار GeneXproTools 4.0 استفاده شد. چون مدلسازی با GP به صورت تصادفی است و در هر مدل امکان انتخاب متغیرهای معنی دار متفاوت وجود دارد لذا در این تحقیق مدلسازی با 15 متغیّر

www.SID.ir

Archive of SID

مذکور 10 بار انجام گردید، که نتایج انتخاب متغیّرها و همچنین متغیرهایی که تأثیر بیشتری در مدل دارند به صورت هاشور خورده در جدول 2 نشان داده شده است.

جدول 2– تعداد انتخاب متغیّرهای ورودی طی 10 بار مدلسازی

متغیّرهای ورودی	R_t	R_{t-1}	R_{t-2}	R_{t-3}	R_{t-4}	R_{t-5}	R_{t-6}	R_{t-7}	Q_{t-1}	Q_{t-2}	Q_{t-3}	Q_{t-4}	Q_{t-5}	Q_{t-6}	Q_{t-7}
تعداد انتخاب	14	4	2	1	0	3	9	10	29	2	5	2	5	3	10

برای مدلسازی فرآیند بارش-رواناب با متغیّر های معنی دار، دو مجموعه از عملگرهای ریاضی به صورت زیر استفاده شده است که مجموعه یک، عملگرهای پیش فرض نرم افزار و مجموعه دو، چهار عمل اصلی می‌باشد.

مجموعه یک = $\{+,-,*,/,\sqrt{},Exp,Ln,^2,^3,\sqrt[3]{},Sin,Cos,Atan\}$

مجموعه دو = $\{+,-,*,/\}$

پارامترهای لازم جهت تجزیه و تحلیل در این تحقیق که جزء گام های اولیه برنامه ریزی ژنتیک می‌باشند به صورت جدول 3 انتخاب شده است.

جدول 3 – مقادیر پارامترهای لازم جهت تجزیه و تحلیل

کروموزوم‌ها (Chromosomes)	30
تعداد ژن‌ها (Number of genes)	3
عملگر ریاضی بین ژن‌ها (Linking function)	جمع
سرعت جهش (Mutation rate)	0/044
سرعت وارونگی (Inversion rate)	0/1
سرعت تلاقی با یک نقطه (One-point recombination rate)	0/3
سرعت تلاقی با دو نقطه (Two-point recombination rate)	0/3
سرعت تلاقی ژن (Gene recombination rate)	0/1
سرعت جابجایی (Gene transposition rate)	0/1

نتایج حاصل از مدلسازی بارش-رواناب با مجموعه عملگرهای ریاضی یک و دو

پس از تعیین متغیرهای معنی دار و انجام مدلسازی با این متغیرها و مجموعه عملگرهای ریاضی یک و دو، روابط بارش-رواناب حاصل از GP به شرح زیر بدست آمد.

الف) معادله بارش- رواناب حاصل از مجموعه عملگرهای ریاضی یک:

$$Q_t = \sin[e^{-7.77} * [\{(R_{t-7} * R_t) - (R_{t-6} * R_t) - R_t + R_{t-7}\}^2 - \{Q_{t-1} * (R_{t-6} - R_t)\}^2]] + Q_{t-1} + e^{-5.13} * [Q_{t-5} - Q_{t-1}^3 * (Q_{t-7} + R_{t-1})] \quad [5]$$

www.SID.ir

Archive of SID

که رواناب در زمان t تابعی از متغیرهای معنی‌دار $Q_{t-7}, Q_{t-5}, Q_{t-1}$ $R_{t-7}, R_{t-6}, R_{t-1}, R_t$ می‌باشد.

ب) معادله بارش-رواناب حاصل از مجموعه عملگرهای ریاضی دو

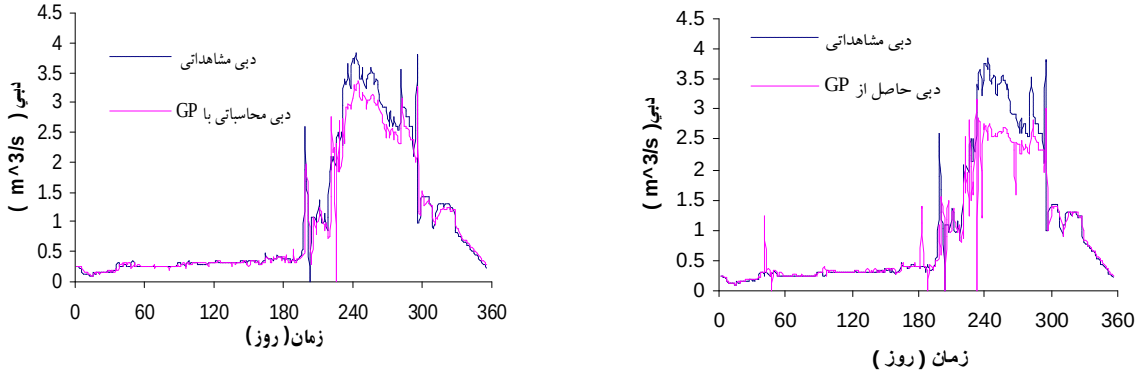
$$Q_t = Q_{t-1} + \frac{Q_{t-5}}{R_{t-1} + Q_{t-5} + 3.43} + \frac{Q_{t-1}}{-3.88 - R_t * [R_{t-6} - R_{t-6} * (0.2025 + Q_{t-3})]} \quad [6]$$

که در این رابطه نیز Q_t (رواناب) بر حسب تابعی از $Q_{t-5}, Q_{t-3}, Q_{t-1}$, R_{t-6}, R_{t-1}, R_t نشان داده شده است.

نتایج معیارهای ارزیابی مدل‌های حاصل از عملگرهای ریاضی یک و دو، در جدول 4 (مقادیر r و MSE تا دو رقم اعشار گرد شده اند)، و نمودارهای تست مشاهداتی و محاسباتی، در شکل 4 نشان داده شده است.

جدول 4– مقادیر آماری دقت مدل‌های حاصل از GP

معیار ارزیابی	مجموعه عملگر ریاضی یک		مجموعه عملگر ریاضی دو	
	آموزش	تست	آموزش	تست
r	0/85	0/93	0/85	0/97
MSE	0/06	0/2	0/06	0/08



(الف) (ب)

شکل 4 – الف – نمودار تست رواناب مشاهداتی و محاسباتی حاصل از (الف) مجموعه عملگرهای ریاضی یک (ب) مجموعه عملگرهای ریاضی دو

نتایج جدول 2 نشان می دهد که رواناب هر روز به رواناب روز قبل و بارش آن روز وابستگی بیشتری دارد. نتایج تحقیق جایاواردنا و همکاران (2005) آن را تایید می کند. همچنین از جدول 4 و نمودارهای شکل 4 نتیجه می‌شود که مدل حاصل از مجموعه عملگرهای ریاضی دو از دقت بالاتری برخوردار بوده و در قسمت‌های پیک هیدروگراف مطابقت خوبی با داده‌های واقعی نشان می‌دهد. چون معادله حاصل از برنامه‌ریزی ژنتیک، از ترکیب تصادفی مجموعه ترمینال‌ها و توابع به دست می آید. به عنوان مثال اگر رابطه بین ورودی‌ها و خروجی خطی باشد ولی عملگرهای sin، cos و... در مجموعه توابع انتخاب شود، برنامه‌ریزی ژنتیک در استخراج رابطه از آن عملگرهای انتخابی استفاده می‌کند که این امر باعث کاهش دقت مدل می‌شود. نتایج این

www.SID.ir

Archive of SID

تحقیق نشان می‌دهد که در رابطه بارش و رواناب عملگرهای ریاضیsin ،cos و... کاربرد ندارند. با توجه به دقت و سادگی مدل حاصل از چهار عمل اصلی، این مدل به عنوان مدل بارش- رواناب حوضه لیقوان پیشنهاد می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدلسازی فرآیند بارش- رواناب با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک ابتدا با 15 متغیر برای تعیین متغیرهای معنی‌دار و سپس مدلسازی نهائی با متغیرهای معنی دار و دو مجموعه از عملگرهای ریاضی انجام شد که با توجه به دقت و سادگی مدل حاصل از مجموعه عملگرهای ریاضی {/,*,-,+} ، این مدل به عنوان مدل بارش-رواناب حوضه آبریز لیقوان پشنهاد شد. با توجه به دقت قابل قبول مدل حاصل از متغیرها ی R_t, R_{t-1}, R_{t-6} , $Q_{t-1}, Q_{t-3}, Q_{t-5}$ نتیجه می‌شود که این متغیرها به عنوان معنی‌دارترین متغیرها برای مدلسازی فرآیند بارش-رواناب حوضه آبریز لیقوان می‌باشد. تحقیقات جایاواردنا و همکاران (2005) در دو حوضه کشور چین و آیتک و همکاران (2008) در حوضه جونیاتا در ایالت پنسیلوانیای آمریکا بر روی مدلسازی فرآیند بارش-رواناب با استفاده از برنامه-ریزی ژنتیک، این نتیجه را تأیید می‌کند. همچنین نتایج تحقیق فربودنام و همکاران (1388) بر روی پیش‌بینی جریان از روی دبی روزهای قبل و این تحقیق نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی ژنتیک می‌تواند در زمینه پیش-بینی جریان و نیز مدلسازی بارش-رواناب کاربرد داشته باشد.

منابع مورد استفاده

بی نام، 1381. گزارش‌های آماری هواشناسی و هیدرولوژی سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی.

فربودفام ن، قربانی م ع، اعلمی م ت، 1388. پیش بینی جریان رودخانه با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه لیقوان). مجله دانش کشاورزی. جلد 19. شماره 4 صفحه‌های 107-123.

Aytek A and Kisi O, 2008. A genetic programming approach to suspended sediment modeling. J Hydrol 351: 288-298.

Aytek A, Asce M and Alp M. 2008. An application of artificial intelligence for rainfall–runoff modeling. J Earth System Science 117: 145-155.

Jay awardena AW, Muttil N and Fernando TMKG, 2005. Rainfall-Runoff Modelling using Genetic Programming.Pp.1841-1847. International Congress on Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand December 2005, New Zealand.

Khu ST, Liong SY, Babovic V, Madsen H and Muttil N, 2001. Genetic programming and its application in real- time runoff forecasting. J Am Water Res Assoc 37: 439-451.

Koza JR, 1992. Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection. Cambridge, MA: MIT Press.

Liong SY, Gautam TR, Khu ST, Babovic V, Keijzer M and Muttil N, 2002. Genetic programming: A new paradigm in rainfall runoff modeling. J Am Water Res Assoc 38: 705-718.

www.SID.ir

Archive of SID

Sette S, Boullart L, 2001. Genetic programming: principles and applications. Engineering Applications of Artificial Intelligence 14: 727–736.

Sherman LK 1932. Streamflow from rainfall by the unit-graph method. Engineering News Record 108: 501-505.

Ustoorikar K and Deo MC, 2008. Filling up gaps in wave data with genetic programming. Marine Structures 21: 177-195.

Whigham PA and Crapper PF, 2001. Modeling rainfall–runoff using genetic programming. Mathematical and Computer Modeling 33: 707–721.

www.SID.ir