

## تحلیل روابط حاکم بر بارش، دبی جریان و دبی رسوب حوضه‌ی آبریز ليقوان چاي (با استفاده از برنامه‌ريزي ژنتیک در بازه‌ي زمانی فصلي)

مجید رضایی بنفشه<sup>۱\*</sup>

رضا عابدی<sup>۲</sup>

### چکیده

مطالعه و بررسی فرآیند رسوب‌زایی به‌عنوان یکی از معضلات اساسی و مطرح در مدیریت حوضه‌های آبریز، بدون شناخت ماهیت پیچیده و عوامل مؤثر در وقوع آن امکان‌پذیر نیست. در تحقیق حاضر با هدف بررسی این عوامل در حوضه‌ی آبریز ليقوان چای، ابتدا دبی رسوب معلق، برای روزهایی بدون داده‌برداری با استفاده از مدل‌سازی رابطه‌ی بین دبی جریان و دبی معلق رسوب در برنامه‌ريزي ژنتیک برآورد شد. سپس برازش توابع رگرسیونی بین پارامترهای دبی متوسط جریان و بارش با دبی رسوب معلق در محیط برنامه‌ی SPSS و مدل‌سازی در برنامه‌ريزي ژنتیک در بازه‌ی زمانی فصلی انجام گرفت. نتایج نشان داد که بین متغیر دبی متوسط جریان و دبی رسوب معلق اثر معنی‌دار همراه با همبستگی بالای ۹۰٪ وجود داشته و بین متغیر بارش و دبی رسوب معلق اثر معنی‌دار همراه با همبستگی پایین نسبت به دبی متوسط جریان برقرار است. بالاترین میزان همبستگی بین بارش و دبی رسوب معلق در فصل بهار و پایین‌ترین میزان این همبستگی برای فصول پاییز و زمستان بوده است. در برنامه‌ريزي ژنتیک از ۳ تیپ مدل استفاده شد و با توجه به معیارهای ارزیابی، مدل دوم (دبی متوسط جریان و دبی رسوب معلق) دقیق‌ترین مدل نسبت به مدل‌های اول (بارش و دبی رسوب) و سوم (دبی متوسط جریان و بارش با دبی رسوب معلق) شناسایی شد. در بیشتر موارد وارد کردن متغیر بارش همراه با دبی متوسط جریان در مدل، از دقت آن کاسته است.

**واژه‌های کلیدی:** حوضه‌ی آبریز، دبی رسوب، ليقوان چای، برنامه‌ريزي ژنتیک.

## مقدمه

خصوصیات بارندگی شامل مقدار، شدت، تداوم زمانی، اندازه‌ی قطرات، توزیع اندازه‌ی قطرات، سرعت حد بارندگی، توزیع زمانی، پراکنش مکانی بارندگی و پراکنش شدت حین بارندگی نقش و اهمیت زیادی در میزان فرسایش آبی، تولید رسوب و میزان دبی رسوب حمل شده توسط رودخانه‌ها دارد. قدرت فرسایش باران مهمترین نیروی محرک اکثر فرآیندهای هیدرولوژیکی و فرسایش به حساب می‌آید (بیزونایس و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۱). بارش به عنوان یکی از عناصر مهم آب و هوایی در بیلان آب، ایجاد جریان‌های سطحی، وضعیت سفره‌های آب زیرزمینی و نیز در تغذیه‌ی رودخانه‌ها دارای اهمیت ویژه‌ای است و نقش اساسی در هیدرولوژی رودخانه‌ها که سرچشمه‌ی آنها از نواحی مرتفع می‌باشد، ایفا می‌کند (قلی‌نژاد، ۱۳۸۹). در میان عوامل زمینی و جوی مؤثر در تولید رسوب، عوامل سنگ‌شناسی و بارش از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند و بهتر است کارکرد هر کدام به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرد (همتی و همکاران، ۱۳۸۰).

فرسایش آبی دارای دو پدیده کاملاً متفاوت است، در مرحله‌ی اول ذرات خاک سطحی در اثر برخورد قطرات باران به سطح خاک متلاشی می‌شوند و در مرحله‌ی دوم رواناب سطحی حاصل از باران این ذرات متلاشی شده را با خود حمل می‌کند. بارندگی با ایجاد فرسایش بارانی اولین مرحله‌ی فرسایش آبی است. سپس توسط فرسایش ورقه‌ای، قشر نازکی از خاک شسته شده و با افزایش رواناب سطحی، هرزآبها در داخل شیارها متمرکز گردیده و فرسایش شیاری و به تدریج خندقی را به وجود می‌آورد. در رودخانه‌ها فرسایش کناری و حرکت‌های توده‌ای نیز به آنها اضافه شده و در نهایت بار رسوبی جریان آب را به وجود می‌آورند که در ایستگاه‌های هیدرومتری تحت عنوان دبی رسوب مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرند (احمدی، ۱۳۷۸). حوضه‌ی آبریز ليقوانچاي در شرق دریاچه‌ی ارومیه، یکی از زیرحوضه‌های مهم آجی‌چای است، که در دامنه‌ی شمالی توده‌ی کوهستانی سهند واقع شده است. از رودخانه‌های مهم آن می‌توان به ليقوانچاي اشاره نمود. این حوضه دارای ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی با داده‌های طولانی مدت ليقوان و هروی می‌باشد.

تخریب و فرسایش خاک بر اثر بارش یکی از جدی‌ترین مشکلات زیست محیطی عصر حاضر است. برآورد رسوب رودخانه‌ها از مهم‌ترین و مشکل‌ترین مسائلی است که نقش بسیار مهمی در برنامه‌ریزی، طراحی، عملیات حفاظت خاک، ساماندهی رودخانه، کنترل سیلاب، پروژه‌های آبخیزداری و توسعه‌ی منابع آب و احداث سازه‌های آبی و هیدرولیکی دارد. از آنجا که بروز بارندگی و به تبع آن ایجاد رواناب سطحی در حوضه‌های

آبریز همواره با فرسایش خاک و حمل مواد رسوبی همراه است، یکی از مناسب‌ترین روش‌های اطلاع از میزان رسوب‌خیزی یک حوضه آبریز خصوصاً در حوضه‌های فاقد ایستگاه‌های رسوب‌سنجی، تحلیل منطقه‌ای روابط بارندگی-دبی رسوب است. در این تحقیق سعی بر این است که با فرض وجود رابطه‌ی بین پارامترهای بارندگی متوسط و دبی متوسط جریان با دبی رسوب رودخانه‌ها، روابط حاکم بین بارندگی متوسط و دبی آب با دبی رسوب ایستگاه‌های هیدرومتری، تحلیل منطقه‌ای تأثیر این عوامل اقلیمی و هیدرولوژی بر رسوب‌زایی حوضه آبریز ليقوان چای بررسی شود تا بتوان از نتایج آن جهت پیش‌بینی در طرح‌های مختلف اجرایی در حوضه‌های دارا یا فاقد داده‌های دبی رسوب بهره‌برداری کرد. خلاصه‌ای از مهم‌ترین تحقیقات انجام گرفته مرتبط در ذیل آمده است.

فربودنام و همکاران (۱۳۸۸)، با استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک، جریان روزانه‌ی رودخانه‌ی ليقوان را پیش‌بینی کرده و نتایج را با شبکه‌های عصبی مصنوعی مقایسه نمودند. نتایج نشان داد، روش GP از دقت بسیار بالایی در پیش‌بینی جریان روزانه‌ی رودخانه نسبت به روش شبکه‌های عصبی مصنوعی برخوردار است. سلطانی و همکاران (۱۳۸۹)، در تحقیقات خود با عنوان مدل‌سازی بارش-رواناب در حوضه‌ی اهرچای بیان داشتند که هر دو مدل (برنامه‌ریزی ژنتیک و معادلات دیفرانسیلی تصادفی) فرآیند بارش-رواناب را با دقت قابل قبولی مدل‌سازی می‌کند، اما دقت مدل حاصل از برنامه‌ریزی ژنتیک نسبت به معادلات دیفرانسیلی تصادفی بیشتر است. آیتک<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۸)، دو روش شبکه‌های عصبی مصنوعی و GEP<sup>۲</sup> را برای مدل‌سازی بارش-رواناب در حوضه‌ی رودخانه‌ی یونیا<sup>۳</sup> در ایالت پنسیلوانیای آمریکا به کار برده و جهت مقایسه نتایج از میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) استفاده نمودند. بررسی انجام شده نشان داد که برنامه‌ریزی ژنتیک در مقایسه با شبکه‌های عصبی مصنوعی بهتر عمل نموده و کاملاً کارآمد است. آیتک و کیشی (۲۰۰۸)، برای فرموله نمودن رابطه‌ی رسوبات معلق و دبی روزانه در دو ایستگاه رودخانه تانگو<sup>۴</sup> در مونتانا<sup>۵</sup> روش جدید GEP را به کار گرفتند. مدل‌های به‌دست آمده با استفاده از GEP با دو روش رگرسیون خطی و نمودارهای شدت رسوب در تخمین بار رسوبات معلق مقایسه شد. نتایج نشان داد که فرمول پیشنهادی GEP، در مقایسه با دو روش دیگر به خوبی عمل نموده است و این روش به عنوان ابزاری مفید

1- Aytok

3- Juniata River  
4- Tongue River  
5- Montana

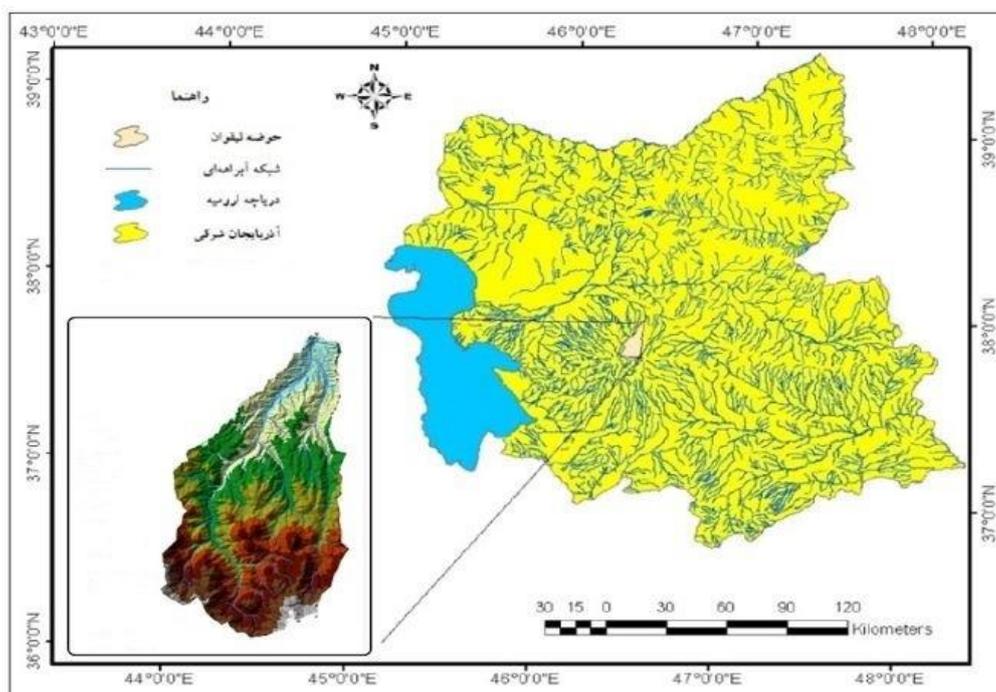
۲- برنامه‌ریزی بیان ژن

در حل مسایل ویژه در هیدرولوژی از قبیل تخمین رسوبات معلق کارآمد است. وانگ و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۹)، عملکرد چندین روش فراکاوشی در پیش‌بینی سری زمانی دبی ماهانه بر مبنای مقادیر پیشین رواناب را در دو محل، سد من وان<sup>۲</sup> روی رودخانه‌ی لنکن جیانگ<sup>۳</sup> در آسیا و سد هنگ جیادو<sup>۴</sup> روی رودخانه‌ی وو جیانگ<sup>۵</sup> در چین مقایسه نمودند. در این مطالعه<sup>۶</sup> ANFIS و GP<sup>۷</sup> با استفاده از مشاهدات طولانی مدت درجه‌ی حرارت حرارت روزانه بررسی شده‌اند. نتایج نشان داد که بهترین عملکرد از ANFIS و GP را می‌توان در شرایط ارزیابی مختلف در طول مراحل آموزش و تست به دست آورد. بوفالو و ناهون<sup>۸</sup> (۱۹۹۲)، به بررسی فرآیند تولید رسوب سه آبکند در مناطق هزاردره‌ای آبریزی در فرانسه پرداختند. آنها میزان فرسایش خاک و بارندگی سالانه را به ترتیب ۱۹۰ تن در هکتار و ۸۴۰ میلی‌متر گزارش داده و به منظور برآورد مقدار تولید رسوب براساس شاخص انرژی جنبشی مؤثر رابطه‌ای را ارائه دادند.

#### معرفی محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز لیقوان چای در ۴۰ کیلومتری جنوب شرقی تبریز در روی شیب‌های شمالی کوه‌های آتشفشانی سهند بین مختصات جغرافیایی جنوب شرقی تبریز در روی شیب‌های شمالی کوه‌های آتشفشانی سهند بین مختصات جغرافیایی طول شرقی "۳۰'۲۰'۴۶" و "۳۰'۲۷'۴۶" و عرض شمالی "۵۵'۴۲'۴۶" و "۳۰'۴۹'۳۷" و بین ارتفاعات ۲۱۴۰ تا ۳۴۲۰ متر (ارتفاع متوسط ۲۶۹۲ متر)، تقریباً مستطیل شکل به طول ۱۳ کیلومتر و عرض ۶ کیلومتر قرار گرفته است. پیرامون حوضه ۳۵ کیلومتر و مساحت آن حدود ۷۶ کیلومتر مربع می‌باشد. شکل (۱) موقعیت حوضه آبریز لیقوان را نشان می‌دهد.

- 
- 1- Wang etal
  - 2- Manwan
  - 3- Lancangjiang River
  - 4- Hongjiadu
  - 5- Wujiang River
  - 6- Adaptive Neure-Fuzzy Inference System
  - 7- Genetic Programming
  - 8- Bufalo & Nahon



شکل (۱) موقعیت حوضه آبریز لیقوان چای

## مواد و روش‌ها

برای تحلیل روابط حاکم بر بارندگی و دبی رسوب، آمار متوسط بارندگی ایستگاه‌های باران‌سنج ثبات لیقوان و معمولی هروی که دارای طول آماری مناسبی بودند و در پایین دست آنها، ایستگاه هیدرومتری لیقوان و هروی با طول آماری مناسب از سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی اخذ گردید. جهت تحلیل‌های آماری داده‌ها، دوره‌ی آماری مشترک مابین سال‌های آبی (۱۳۶۷-۱۳۶۶ تا ۱۳۸۷-۱۳۸۶) به‌عنوان دوره‌ی پایه‌ی ۲۱ ساله در بازه‌ی فصلی انتخاب شد. برای بازسازی داده‌های روزانه‌ی دبی متوسط آب ایستگاه هروی، که تنها دبی متوسط سال آبی (۱۳۷۲-۱۳۷۳) را نداشت، از رابطه‌ی همبستگی و رگرسیونی بین داده‌ها به صورت ماه به ماه از روی داده‌های همان سال ایستگاه شاهد (لیقوان) استفاده گردید. برای برآورد دبی متوسط رسوب، که از داده‌های اصلی تحقیق بود، ابتدا روزهایی که در هر دو ایستگاه هیدرومتری لیقوان و هروی دبی متوسط رسوب اندازه‌گیری شده بود، انتخاب شده و سپس از دو مدل منحنی سنجه و مدل‌سازی در برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده شد. در نهایت به‌منظور انتخاب بهترین مدل از شاخص ریشه‌ی میانگین مربعات خطا استفاده شد که در هر دو ایستگاه هیدرومتری، دبی رسوب برآورد شده توسط (GP) دارای کمترین ریشه‌ی میانگین خطای مربعات نسبت به منحنی سنجه‌ی رسوب بوده و به‌عنوان بهترین مدل در برآورد دبی متوسط رسوب منطقه

انتخاب شده است. مراحل بازسازی دبی‌های جریان و رسوب متوسط با استفاده از نرم‌افزارهای Eexcel و SPSS 16 انجام شد.

برای محاسبه‌ی مقدار دبی رسوب متوسط روزانه در این مطالعه از فرمول توانی منحنی سنجه برآورد رسوب که در آن دبی رسوب به دبی جریان عبوری در هر ایستگاه ارتباط داده می‌شود، استفاده شده است. فرمول توانی از رابطه‌ی (۱) به دست می‌آید (هاریسون<sup>۱</sup>، ۲۰۰۰).

$$Q_s = a \cdot Q_w^b \quad (1) \text{ رابطه}$$

در رابطه‌ی فوق:

$$Q_s = \text{دبی رسوب بر حسب تن در روز؛}$$

$$Q_w = \text{دبی جریان بر حسب متر مکعب در ثانیه؛}$$

$$a = \text{فاصله‌ی محل تقاطع خط با محور قائم از مبدا مختصات؛}$$

$$b = \text{شیب خط.}$$

برای برآورد دبی رسوب ابتدا روزهایی که دبی جریان و دبی رسوب همزمان داده‌برداری شده در یک فایل ایکسل به صورت دو شیت جداگانه -شیت اول به‌عنوان داده‌های آموزش (۸۰ درصد داده‌ها) و شیت دوم به عنوان داده‌های صحت‌سنجی (۲۰ درصد داده‌ها)- ثبت شده، سپس داده‌های آموزشی و صحت‌سنجی وارد برنامه شده و با توجه به توابع برازشی برنامه، فرمولی جهت برآورد دبی رسوب به‌عنوان خروجی اخذ گردید.

برنامه‌ریزی ژنتیک برای اولین بار توسط Koza اریه شده است و جزو روش‌های الگوریتم‌گردشی محسوب می‌شود که مبنای تمامی آنها بر اساس نظریه‌ی تکاملی داروین استوار است. الگوریتم‌های یاد شده اقدام به تعریف یک تابع هدف در قالب معیارهای کیفی نموده و سپس تابع یاد شده را برای اندازه‌گیری و مقایسه‌ی روش‌های مختلف حل کرده و در فرآیند گام به گام تصحیح ساختار داده‌ها به کار گرفته و در نهایت، روش حل مناسب را ارایه می‌نمایند. برنامه‌ریزی ژنتیک جدیدترین شیوه از بین روش‌های الگوریتم‌گردشی است که به دلیل دارا بودن دقت کافی، به عنوان یک روش کاربردی مطرح است. در برنامه‌ریزی ژنتیک ابتدا بلوک‌های موجود که شامل متغیرهای ورودی و هدف و نیز تابع ارتباط‌دهنده‌ی آنها می‌باشند، تعریف گردیده و سپس

ساختار مناسب مدل و ضرایب آن تعیین می‌شود. این روش شامل یک معادله‌ی ارتباط دهنده بین متغیرهای ورودی و خروجی بوده، و قادر به انتخاب خودکار متغیرهای مناسب مدل و حذف متغیرهای غیرمرتبط است؛ که این امر سبب کاهش ابعاد متغیرهای ورودی خواهد شد (الویسی و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۵).

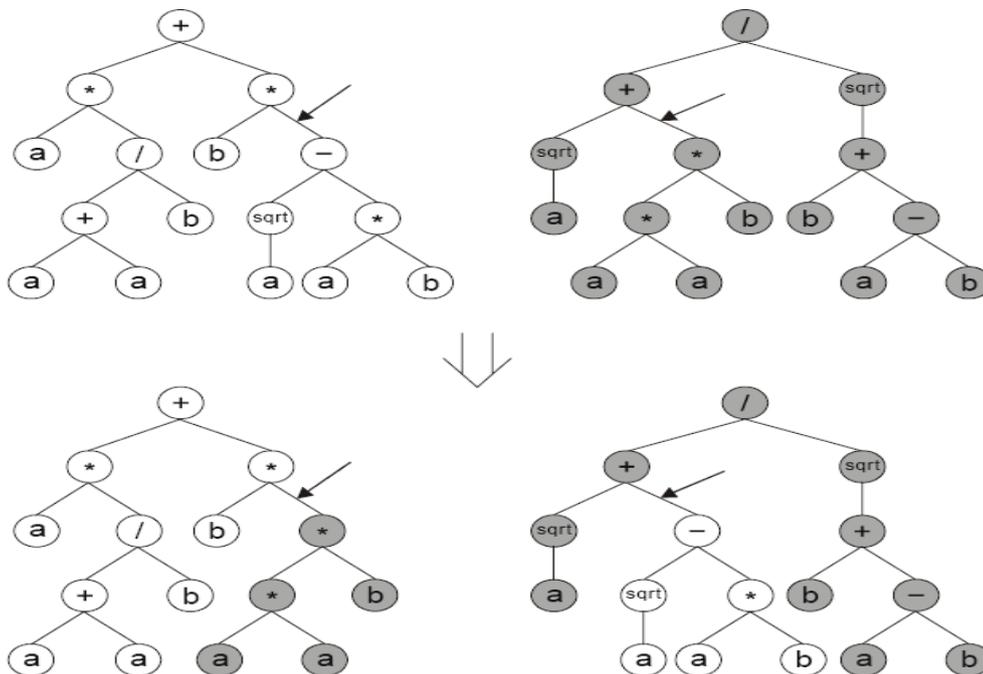
برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) در سال ۱۹۸۵ توسط کرامر (کرامر، ۱۹۸۵) ابداع و سپس توسط کوزا (کوزا، ۱۹۹۲) گسترش بیشتری یافت. برنامه‌ریزی ژنتیک تناوبی از راه‌حل‌های با طول ثابت را از طریق ابداع ساختارهای غیرخطی (نمودار درخت) با اندازه‌ها و اشکال متفاوت ارایه می‌کند. الفبای مورد استفاده در ایجاد چنین ساختارهایی متنوع‌تر از ۰ و ۱ افراد GA است و سیستم نمایش تطبیق‌پذیرتر و غنی‌تری را ایجاد می‌کند. به رغم فقدان ژنوم ساده و مستقل، ساختارهای غیرخطی از افراد GP نیز مانند کروموزوم‌های خطی GA، تکثیرکننده‌های عادی با نقش دوگانه‌ی ژنوتیپ- فنوتیپ هستند. قابل توجه است که نمودار درختی GP، به مولکول‌های پروتیین در استفاده از الفبای غنی و نمایش مرتبه‌ای بی‌نظیر و پیچیده‌شان شباهت دارند. در حقیقت نمودار درختی قادر به نمایش عوامل متنوع زیادی هستند. مشکل چنین تکثیرکننده‌های پیچیده این است که در آنها تولیدمثل با اصلاحات، به شدت در ضوابط تکاملی محبوس شده است. چون بهسازی‌ها واقعاً باید روی خود نمودار درختی رخ دهد و در نتیجه تنها دامنه‌ی محدودی از بهسازی‌ها امکان‌پذیر است. این عملگرهای ژنتیکی GP در سطح درختی هستند که بهسازی‌ها یا تبادلات شاخه‌های خاص بین درختان را اداره می‌کنند (فریرا، ۲۰۰۶).

در GP عملگرها مستقیماً روی نمودار درختی عمل می‌کنند و اگرچه این موضوع به ظاهر دارای مزایایی است، اما تکنیک GP را به مقدار زیادی محدود می‌کند (همانطوری که در طبیعت نیز محدودیت‌هایی برای پیوند و هرس وجود دارد). در ادامه خلاصه‌ای از چند عملگر ژنتیکی ارایه شده است.

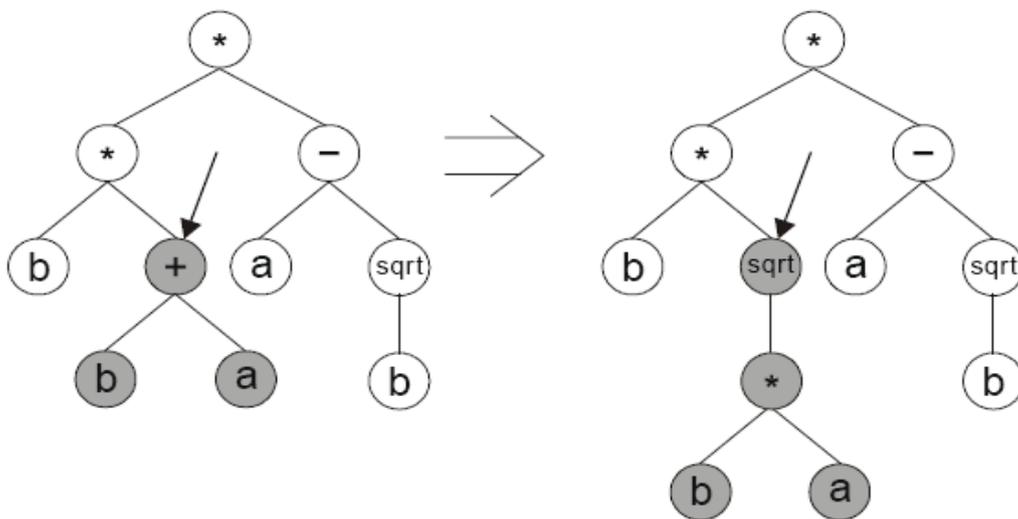
عملگر ترکیب، بیشترین و در اغلب موارد، تنها عملگر کاوشی مورد استفاده در GP است (شکل ۲). پیکان‌ها نشان‌دهنده‌ی نقاط ترکیب هستند. در این مورد شاخه‌هایی که به طور تصادفی انتخاب شده‌اند، بین دو نمودار درختی والد، معاوضه می‌شوند تا فرزند جدیدی را به وجود آورند. هدف از اجرای آن، معاوضه‌ی راه‌حل‌های مرتبه‌ای کوچک‌تر، تشکیل شده از واحدهای ساختمانی ساده‌تر (از لحاظ ریاضی بلوک‌های مختصر) برای استنتاج انواع راه‌حل‌های پیچیده‌تر است که در عین حال ساختارهای صحیحی را نیز از نظر قواعد داشته باشند (فریرا<sup>۲</sup>، ۲۰۰۶).

1- Alvisi et al.,

2- Ferreira



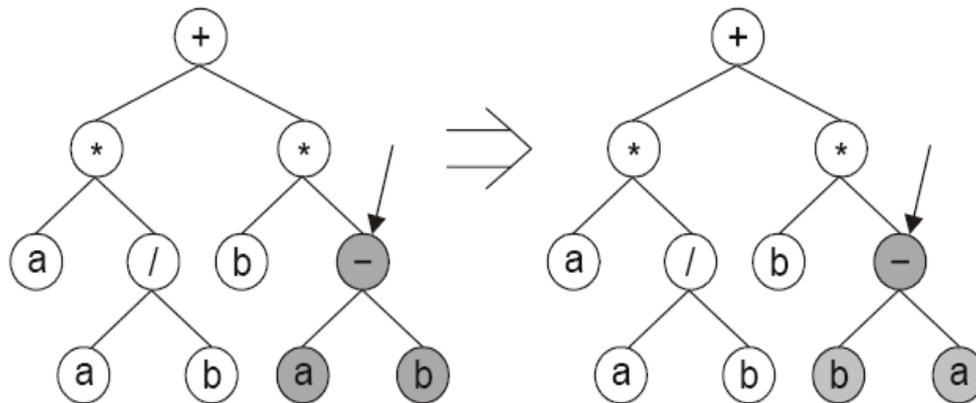
شکل (۲) نمودار درختی در برنامه‌ریزی ژنتیک



شکل (۳) نمودار درختی در برنامه‌ریزی ژنتیک

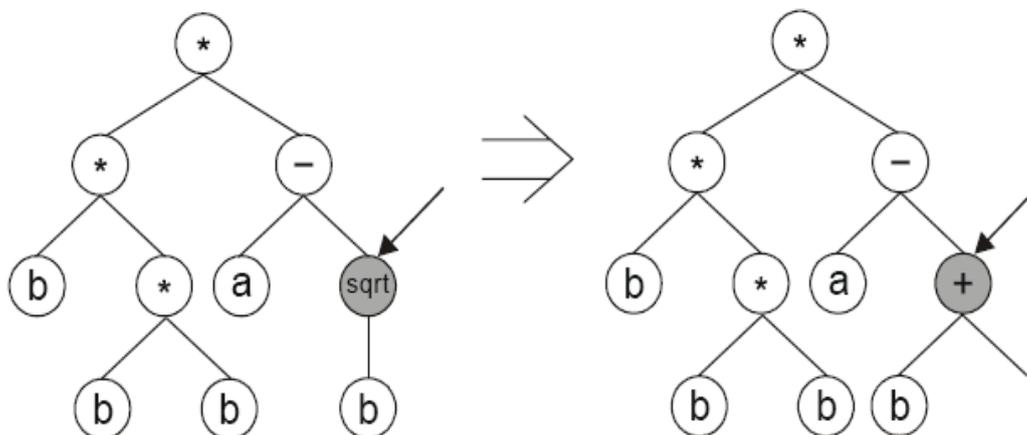
عملگر جهش، در GP نیز خیلی متفاوت از جهش نقطه‌ای طبیعی است. این عملگر، یک گره<sup>۱۳</sup> در نمودار درختی را انتخاب می‌کند و شاخه‌ی زیرین آن را با یک شاخه‌ی جدید تولید شده به صورت تصادفی عوض می‌کند (شکل ۳). قابل توجه است که با این نوع جهش شکل کلی درخت چندان تغییر نمی‌کند، به خصوص اگر گره‌های پایین‌تر به عنوان هدف جهش انتخاب شوند (فریرا، ۲۰۰۶).

جایگشت<sup>۱۴</sup>، سومین عملگر مورد استفاده در GP و محافظه‌کارترین نوع، از میان سه عملگر است. در طی این فرآیند، جای متغیرهای یک تابع که به طور تصادفی انتخاب شده است، به صورت اتفاقی با هم عوض می‌شود (شکل ۴). در این مورد شکل کلی درخت بدون تغییر باقی می‌ماند (فریرا، ۲۰۰۶)



شکل (۴) جایگشت در برنامه‌ریزی ژنتیک

به طور خلاصه، عملگرها در برنامه‌ریزی ژنتیک بیشتر به یک ریاضیدان هوشیار شباهت دارند تا به یک روش کور طبیعی. اما در سیستم‌های انطباقی، روش کور طبیعی مؤثرتر است؛ چون سیستم‌هایی مانند GP در ضوابط تکاملی به شدت محدود می‌شوند. برای مثال اجرای سایر عملگرها در GP، از قبیل جهش نقطه‌ای ساده در عین حال با تکرار زیاد بی‌حاصل است. به دلیل این که جهش‌های بیشتر، ساختارهای نامعتبر و نادرستی را با توجه به قواعد نتیجه می‌دهد. شکل (۵) نمونه‌ای از جهش نقطه‌ای در برنامه‌ریزی ژنتیک را نشان می‌دهد که طی آن، نمودار درختی ایجاد شده، ساختار صحیح و معتبری از نظر قواعد ندارد. بدیهی است که اجرای سایر عملگرها از قبیل ترانزیشن یا وارون‌سازی نیز مشکلات مشابهی را تولید می‌کند و فضای تحقیقی در GP به طور وسیعی کشف نشده باقی می‌ماند (فریرا، ۲۰۰۶).



شکل (۵) مثالی از یک واقعه‌ی فرضی در جهش نقطه‌ای در برنامه‌ریزی ژنتیک (نمودار درختی ایجاد شده ساختار نامعتبر دارد)

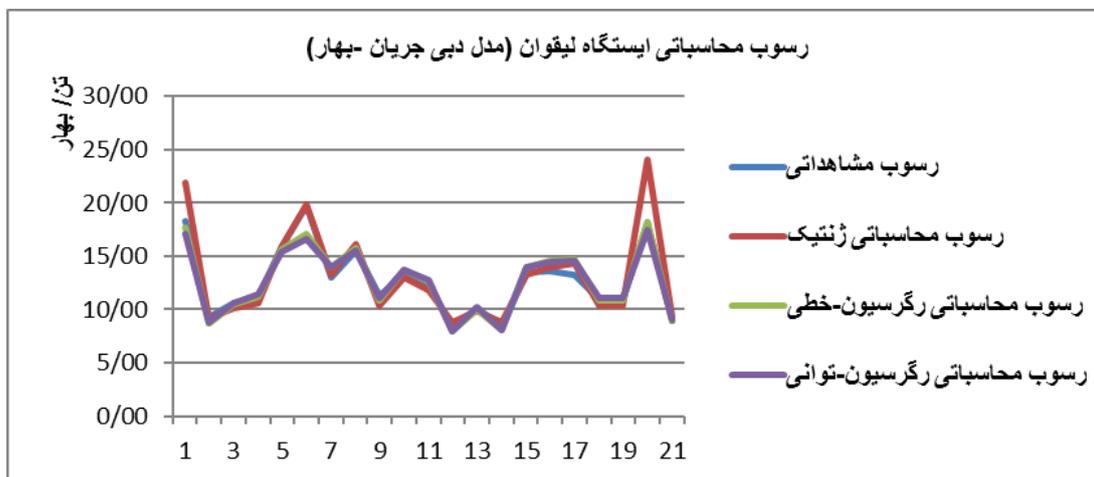
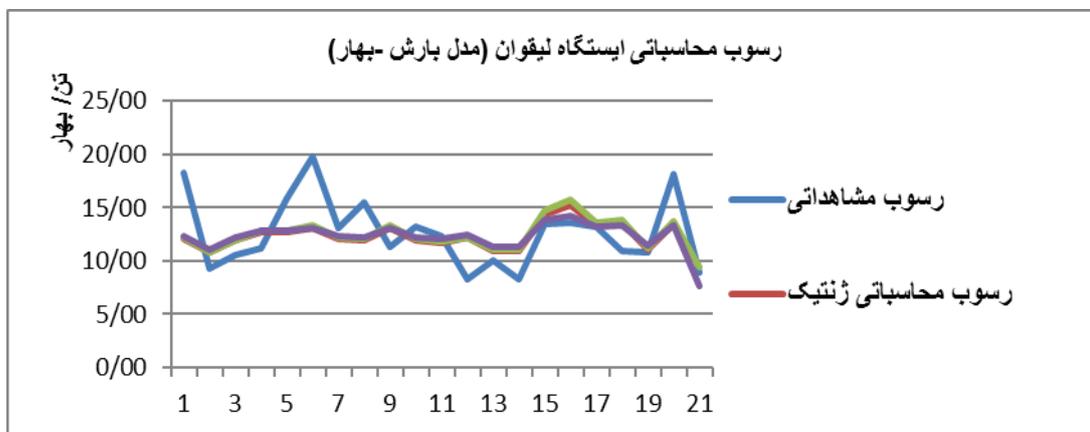
اگرچه کوزا این سه عملگر را به‌عنوان عملگرهای اصلی GP شرح داد، اما عملگر ترکیب، تنها عملگر مورد استفاده در بیشتر کاربردهای GP است و در نتیجه مواد ژنتیکی جدیدی در منبع ژنتیکی افراد GP وارد نمی‌شود. در حقیقت جمعیت بزرگی از نمودار درختی باید به منظور آماده‌سازی جمعیت اولیه (با تمام بلوک‌های ساختمانی لازم) استفاده شود؛ به طوری که راه‌حل‌های مناسب تنها با حرکت این بلوک‌های ساختمانی در اطراف، می‌تواند کشف شود. در آخر می‌توان گفت به سبب نقش دوگانه نمودار درختی (ژنوتیپ و فنوتیپ)، برنامه‌ریزی ژنتیک نیز همانند الگوریتم ژنتیک برای بیان ساده و اولیه ناتوان است. در همه‌ی موارد تمام نمودار درختی به عنوان راه‌حل است نه بیشتر و نه کمتر (فریرا، ۲۰۰۴).

## بحث و نتایج

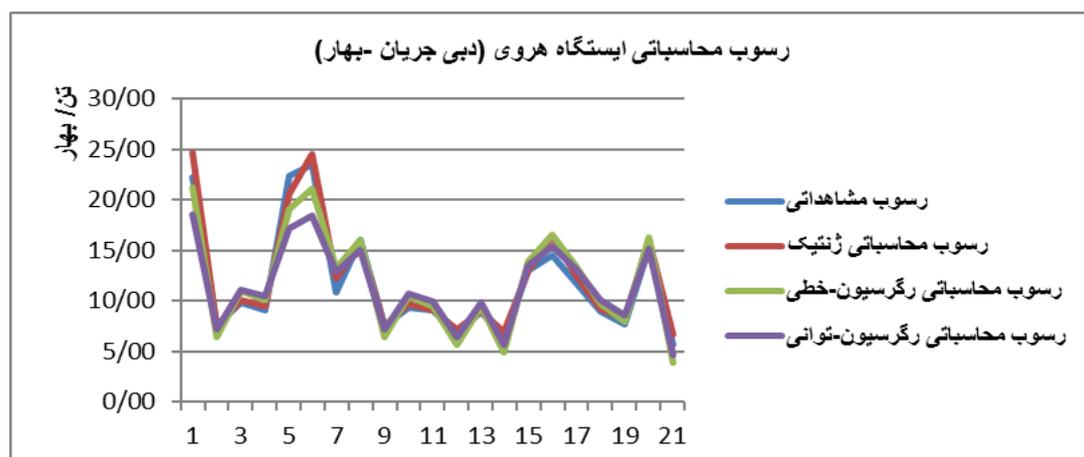
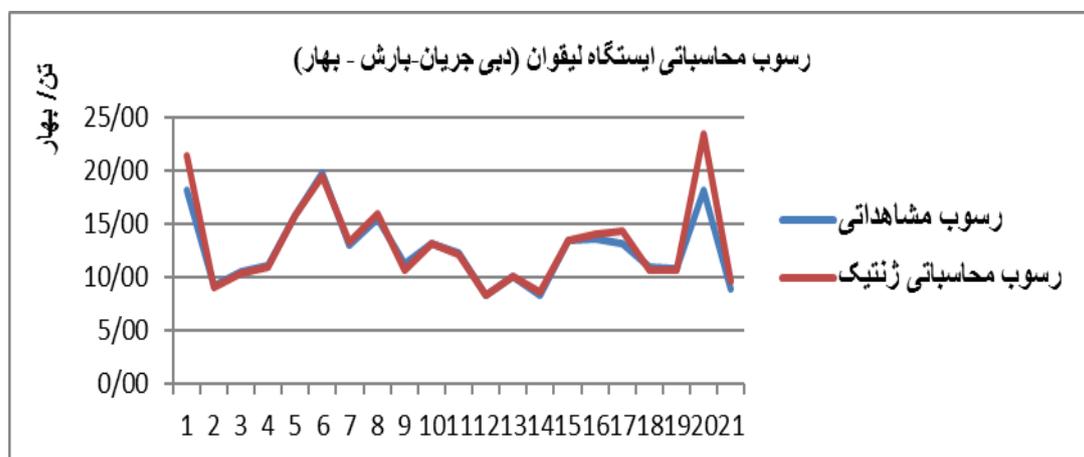
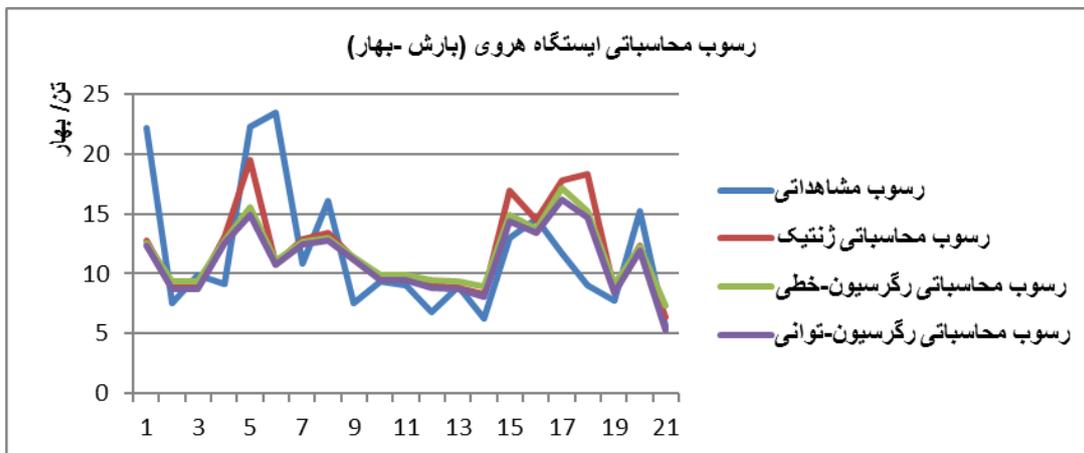
در برنامه‌ریزی ژنتیک معیارهای ارزیابی شامل ضریب همبستگی، میانگین مربعات خطا و خطای جذر میانگین مربعات برای داده‌های ایستگاه ليقوان و هروی در بازه‌های فصلی بهار، تابستان، پاییز و زمستان در سه تیپ ورودی مدل انجام گرفت که نتایج هر کدام از فصول به صورت جدول (۱) آمده است. سپس دبی رسوب محاسباتی نسبت به دبی رسوب مشاهداتی به وسیله‌ی روش‌های برازش یافته‌ی رگرسیونی و برنامه‌ریزی ژنتیک انجام گرفت و نتایج به صورت نمودار برای تک تک فصول ترسیم شد.

جدول (۱) نتایج مدل برنامه‌ریزی ژنتیک (بهار)

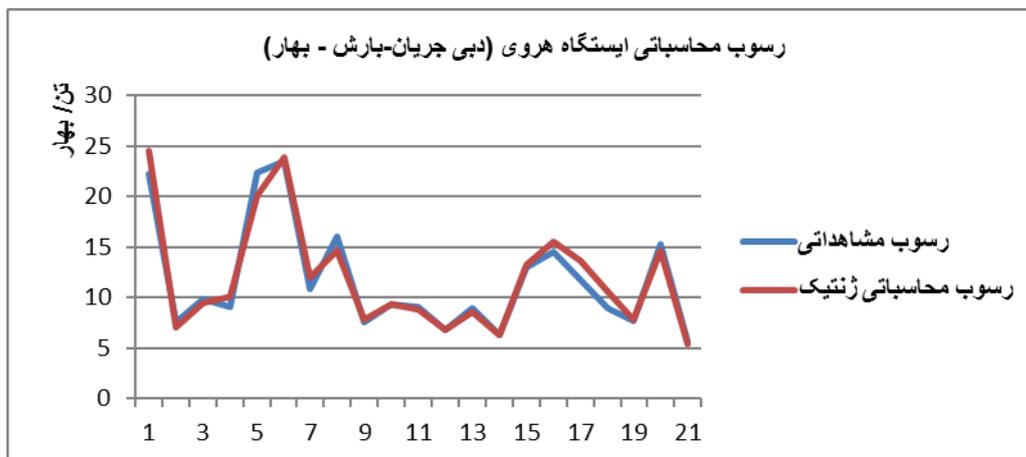
ایستگاه	بهار	مدل	کالیبراسیون			صحت‌سنجی		
			R	RMSE	MSE	R	RMSE	MSE
لیقوان		$Q_s = (P)$	۴۶/۰	۶۵/۲	۰۵/۷	۵۴/۰	۹۹/۹۷	۶/۹
		$Q_s = (Q_t)$	۹۸/۰	۴۴/۰	۱۹/۰	۹۸/۰	۹۸/۲	۸۹/۸
		$Q_s = F(Q_{t,p})$	۹۹/۰	۲۹/۰	۰۸/۰	۹۸/۰	۷۲/۲	۴۰/۷
هروی		$Q_s = F(P)$	۶۴/۰	۹۶/۳	۶۸/۱۵	۴۰/۰	۹۶/۴	۲۵/۲۴
		$Q_s = F(Q_t)$	۹۹/۰	۸۴/۰	۷۱/۰	۹۹/۰	۶۷/۰	۴۵/۰
		$Q_s = F(Q_{t,p})$	۹۸/۰	۸۴/۰	۷۱/۰	۹۷/۰	۸۷/۰	۷۵/۰



شکل (۱-۶) رسوب محاسباتی و رسوب مشاهداتی بهار



شکل (۲-۶) رسوب محاسباتی و رسوب مشاهداتی بهار

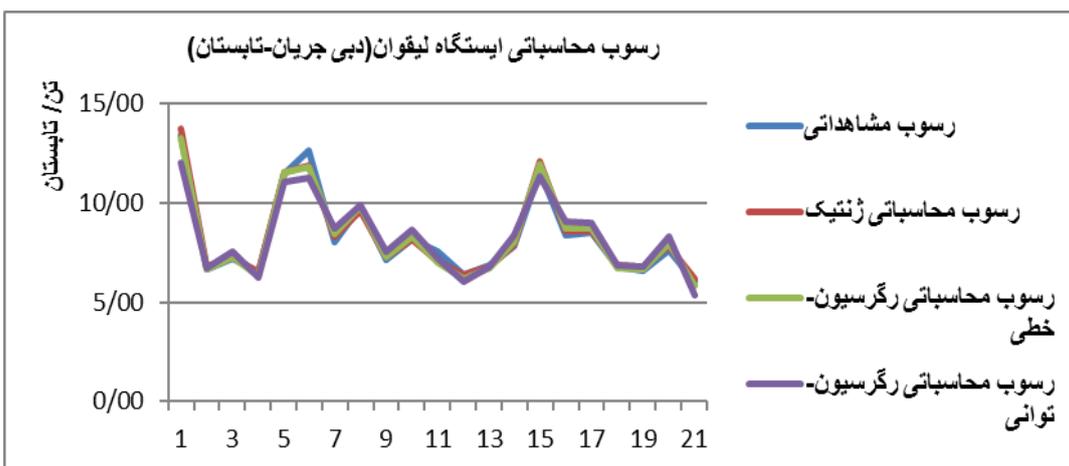
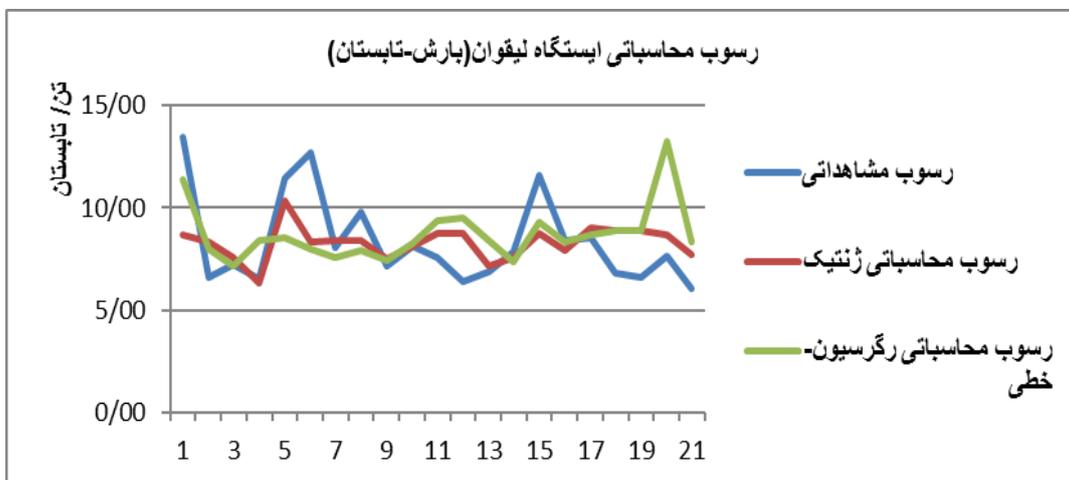
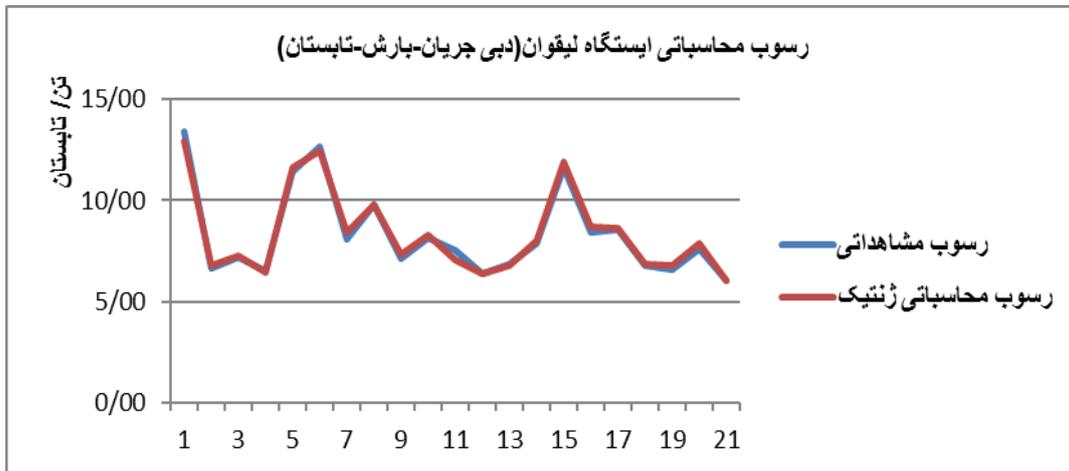


شکل (۳-۶) رسوب محاسباتی و رسوب مشاهداتی بهار

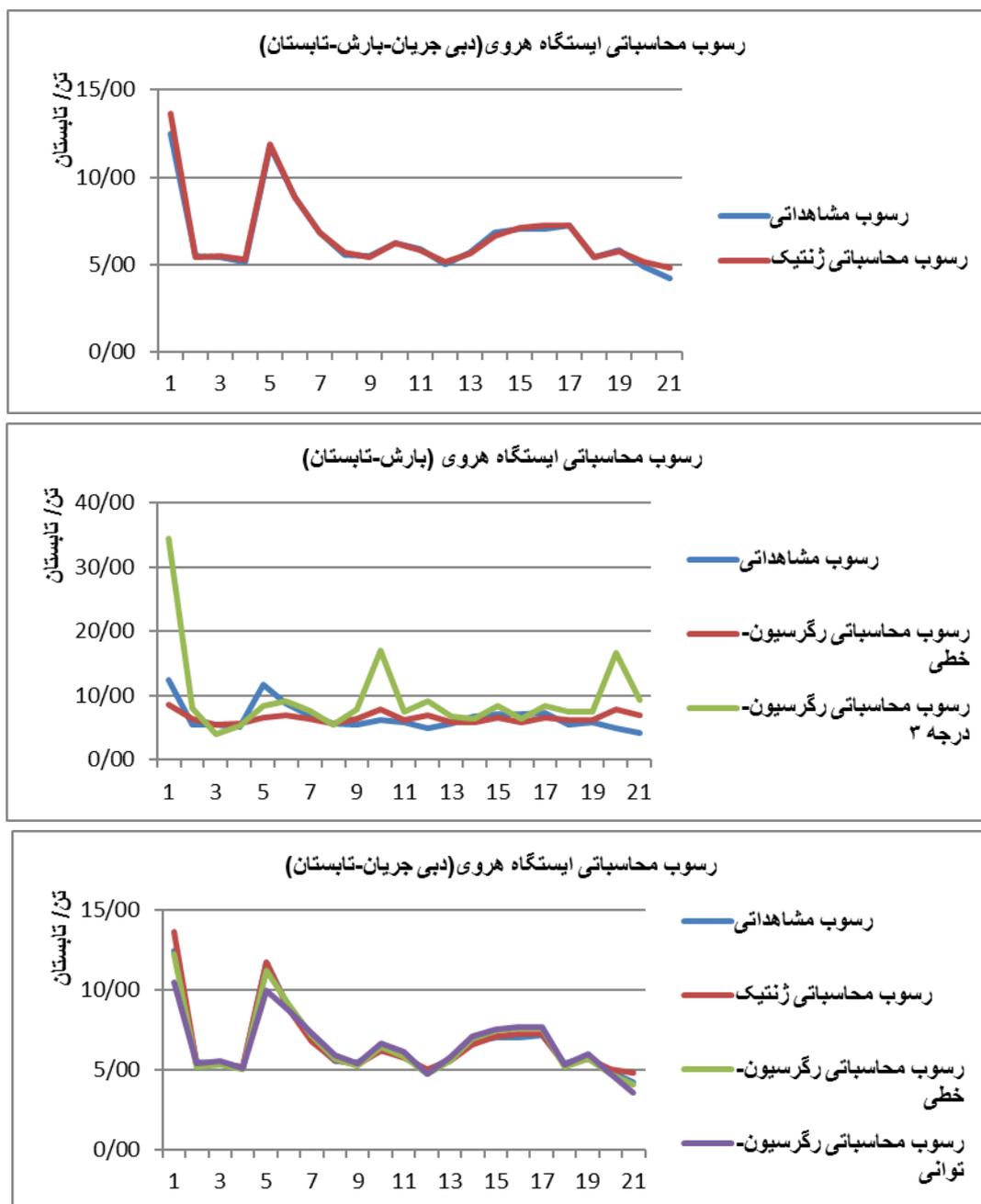
بهترین مدل در برنامه‌ریزی ژنتیک در ایستگاه ليقوان با توجه به معیارهای ارزیابی مدلی است که متغیرهای دبی جریان و بارش بهار، ورودی مدل می‌باشند. ضریب همبستگی در این مدل ۰/۹۹ درصد و مقدار جذر میانگین مربعات برای داده‌های کالیبراسیون ۰/۲ و برای داده‌های صحت سنجی ۲/۷ می‌باشد. برای ایستگاه هروی مدل دوم (دبی جریان)، بهترین مدل تشخیص داده شد. همانطور که مشاهده می‌شود میزان حداکثر مربع خطا در هر دو ایستگاه در مدل بارش به مراتب خیلی بالاتر از ورودی‌های دیگر در مدل سوم (دبی جریان - بارش) می‌باشد.

جدول (۲) نتایج مدل برنامه‌ریزی ژنتیک (تابستان)

ایستگاه	تابستان مدل	کالیبراسیون			صحت‌سنجی		
		R	RMSE	MSE	R	RMSE	MSE
لیقوان	$Q_s = F(p)$	۰/۵۶	۱/۶۹	۲/۸۸	۰/۶۶	۱/۶۵	۲/۷۲
	$Q_s = F(Q_t)$	۰/۹۸	۰/۲۹	۰/۰۸	۰/۹۹	۰/۱۴	۰/۰۲
	$Q_s = F(Q_t, p)$	۰/۹۹	۰/۲۲	۰/۰۴	۰/۹۹	۰/۱۵	۰/۰۲
هروی	$Q_s = F(P)$	۰/۷۶	۱/۱۶	۰/۳۶	۰/۵۰	۱/۸۸	۳/۵۵
	$Q_s = F(Q_t)$	۰/۹۹	۰/۱۱	۰/۰۱	۰/۹۸	۰/۳۵	۰/۱۲
	$Q_s = F(Q_t, p)$	۰/۹۹	۰/۱۱	۰/۰۱	۰/۹۹	۰/۳۲	۰/۱۰



شکل (۷-۲) رسوب محاسباتی و مشاهداتی تابستان



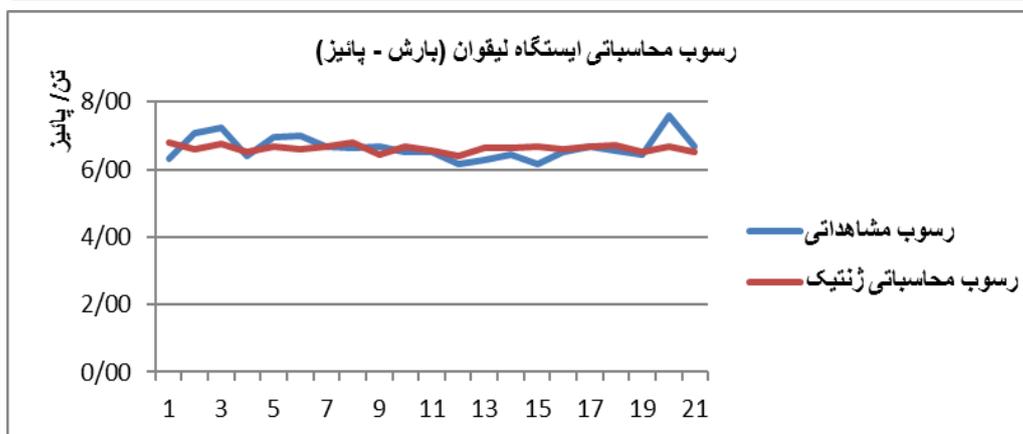
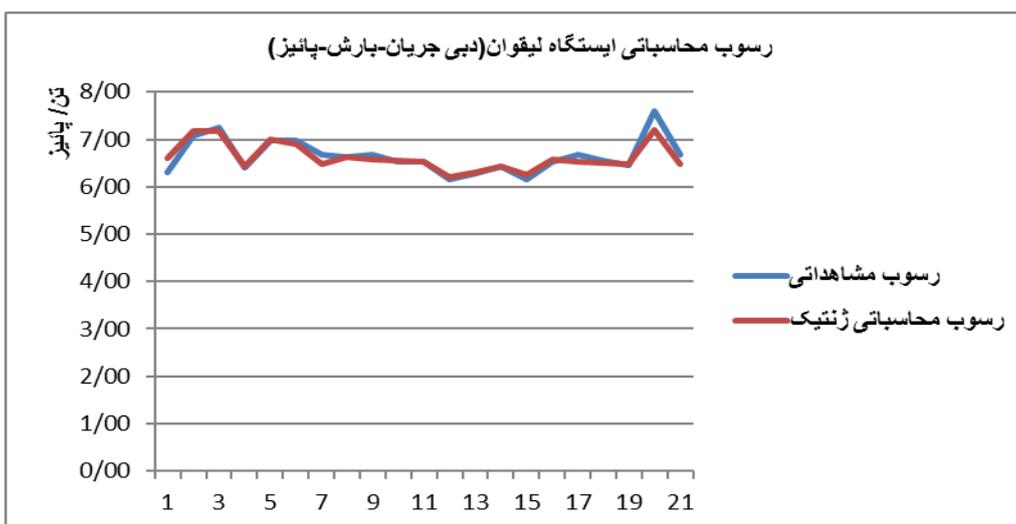
شکل (۷-۲) رسوب محاسباتی و مشاهداتی تابستان

بهترین مدل در برنامه‌ریزی ژنتیک در ایستگاه ليقوان برای فصل تابستان با توجه به معیارهای ارزیابی مدلی است که متغیر دبی جریان ورودی مدل می‌باشد. ضریب همبستگی در این مدل ۰/۹۹ درصد و مقدار جذر میانگین مربعات برای داده‌های کالیبراسیون ۰/۲ و برای داده‌های صحت‌سنجی ۰/۳ است. برای ایستگاه هروی نیز، مدل دوم (دبی جریان) بهترین مدل تشخیص داده شد. در ایستگاه هروی (مدل بارش) داده‌های

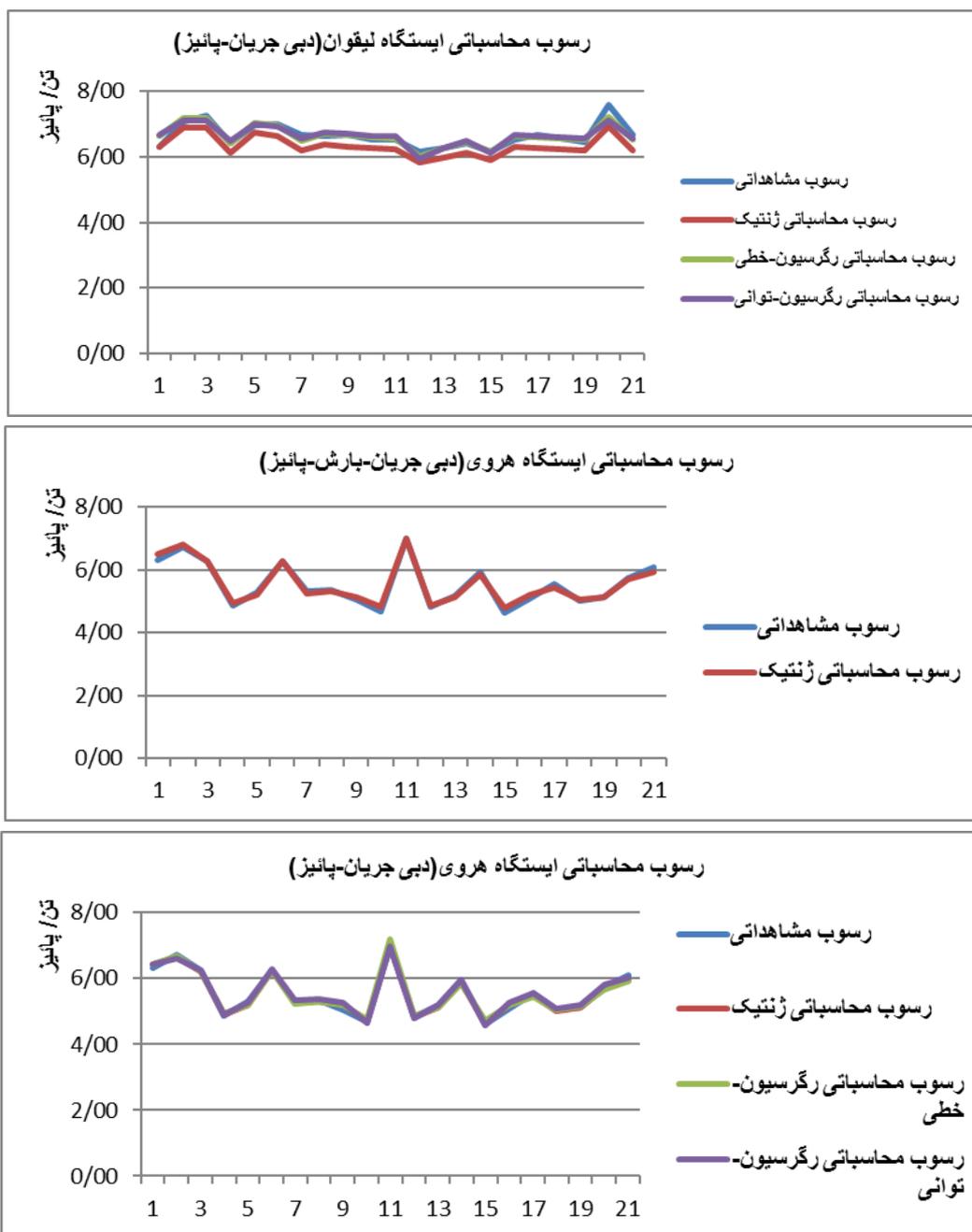
کالیبراسیون و صحت‌سنجی همبستگی لازم را نداشته، بنابراین مدل بارش به تنهایی قادر به برآورد دبی رسوب در بازه‌ی زمانی تابستان نبوده است.

جدول (۳) نتایج مدل برنامه‌ریزی ژنتیک (پاییز)

ایستگاه	پاییز مدل	کالیبراسیون			صحت‌سنجی		
		R	RMSE	MSE	R	RMSE	MSE
لیقوان	$Q_s = F(P)$	۰/۳۸	۰/۲۹	۰/۰۸	۰/۵۲	۰/۴۶	۰/۲۱
	$Q_s = F(Q_t)$	۰/۹۷	۰/۰۷	۰	۰/۹۸	۰/۲۱	۰/۰۴
	$Q_s = F(Q_t, p)$	۰/۹۶	۰/۰۷	۰	۰/۹۸	۰/۲۲	۰/۰۵
هروی	$Q_s = F(P)$	۰/۴۵	۰/۶۵	۰/۴۲	۰/۱۸	۰/۴۶	۰/۲۱
	$Q_s = F(Q_t)$	۰/۹۹	۰/۰۶	۰	۰/۹۹	۰/۰۶	۰
	$Q_s = F(Q_t, p)$	۰/۹۹	۰/۰۸	۰	۰/۹۹	۰/۰۷	۰



شکل (۸-۱) رسوب محاسباتی و مشاهداتی پاییز



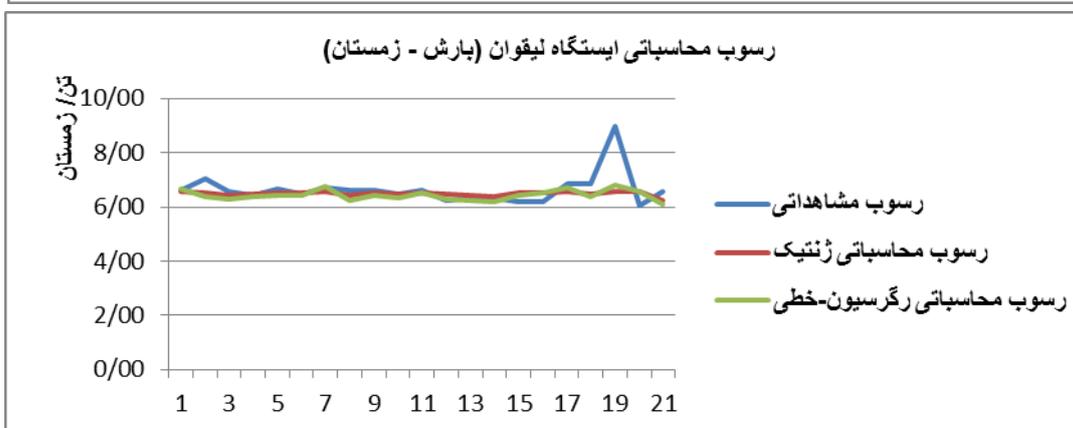
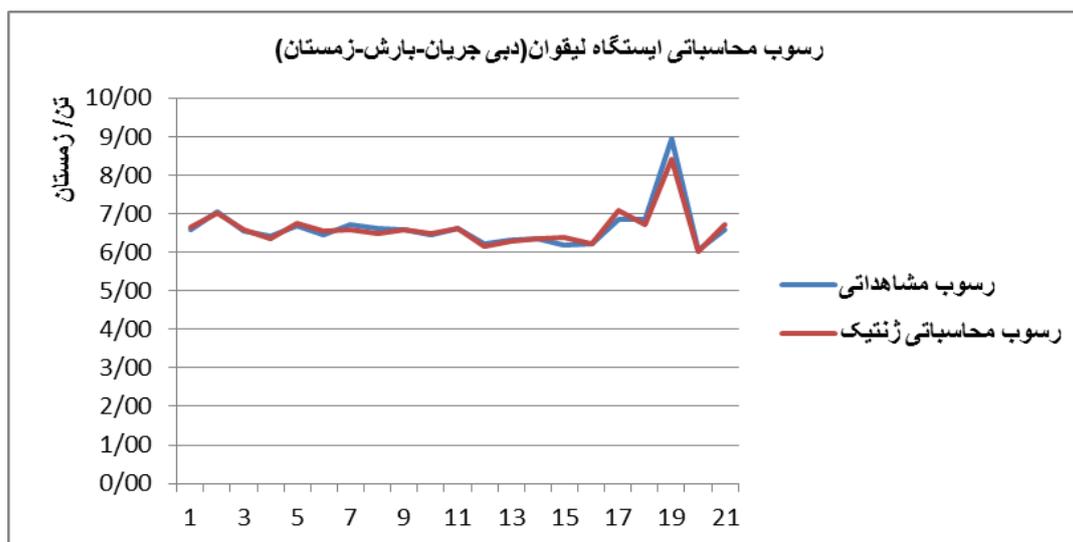
شکل (۲-۸) رسوب محاسباتی و مشاهداتی پاییز

بهترین مدل در برنامه‌ریزی ژنتیک در ایستگاه ليقوان با توجه به معیارهای ارزیابی مدلی است که متغیر دبی جریان در پاییز ورودی مدل می‌باشد. ضریب همبستگی در این مدل ۰/۹۷ درصد و مقدار جذر میانگین مربعات برای داده‌های کالیبراسیون ۰/۰۷ برای داده‌های صحت‌سنجی ۰/۲۱ است. برای ایستگاه هروی نیز، مدل دوم (دبی جریان) بهترین مدل تشخیص داده شد. در ایستگاه هروی (مدل بارش) داده‌های کالیبراسیون

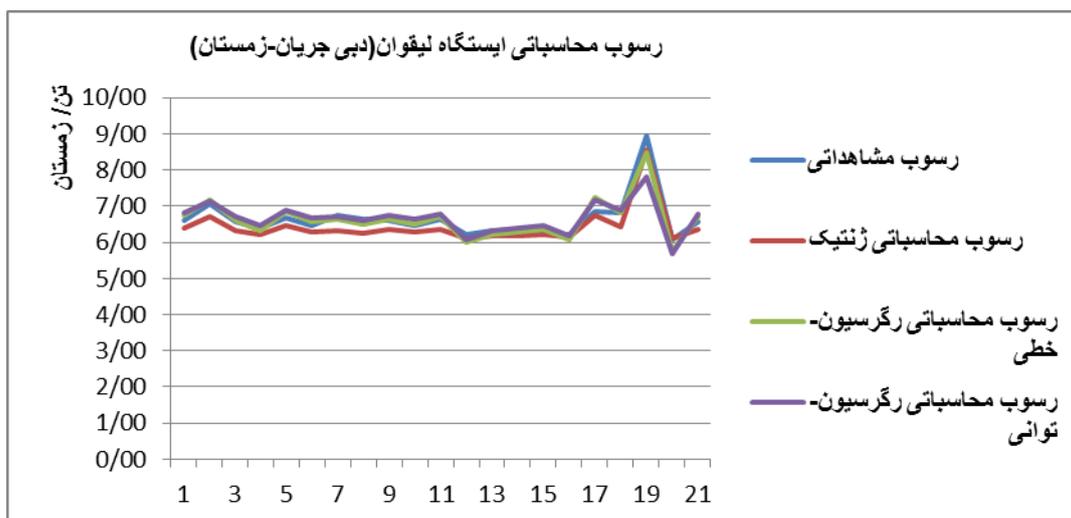
و صحت‌سنجی همانند داده‌های تابستان همبستگی لازم را نداشته، بنابراین مدل قادر به برآورد دبی رسوب با متغیر بارندگی در بازه‌ی زمانی پاییز نیست.

جدول (۴) نتایج مدل برنامه‌ریزی ژنتیک (زمستان)

ایستگاه	زمستان مدل	کالیبراسیون			صحت‌سنجی		
		R	RMSE	MSE	R	RMSE	MSE
لیقوان	$Q_s = F(P)$	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۰۴	۰/۳۹	۱/۲۳	۱/۵۲
	$Q_s = F(Q_t)$	۰/۹۳	۰/۰۸	۰	۰/۹۹	۰/۱۳	۰/۰۱
	$Q_s = F(Q_t, p)$	۰/۹۳	۰/۰۸	۰	۰/۹۹	۰/۲۸	۰/۰۸
هروی	$Q_s = F(P)$	۰/۵۳	۰/۵۰	۰/۲۵	۰/۹۱	۰/۷۵	۰/۵۷
	$Q_s = F(Q_t)$	۰/۹۹	۰/۰۸	۰	۰/۷۷	۰/۰۵	۰
	$Q_s = F(Q_t, p)$	۰/۹۸	۰/۱۱	۰/۰۱	۰/۷۷	۰/۰۶	۰



شکل (۹-۱) رسوب محاسباتی و مشاهده‌ای زمستان



شکل (۲-۹) رسوب محاسباتی و مشاهداتی زمستان

بهترین مدل در برنامه‌ریزی ژنتیک برای ایستگاه ليقوان (زمستان) با توجه به معیارهای ارزیابی مدلی است که متغیر دبی جریان در زمستان ورودی مدل می‌باشد. ضریب همبستگی در این مدل ۰/۹۳ درصد و مقدار جذر میانگین مربعات برای داده‌های کالیبراسیون ۰/۰۸ برای داده‌های صحت‌سنجی ۰/۱۳ است. در ایستگاه هروی نیز، مدل دوم (دبی جریان) بهترین مدل تشخیص داده شد. ضریب همبستگی برای مدل اول (بارش) در ایستگاه هروی بیشتر از ایستگاه ليقوان می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

تاکنون روش جامع و دقیق برای برآورد دبی رسوب معلق حوضه‌ها ارایه نشده است. مشکلات اساسی طرح‌های آبی در تخمین میزان دبی رسوب معلق خروجی حوضه، وجود روش‌های دقیق مدل‌سازی در برآورد میزان دبی خروجی حوضه را الزامی می‌نماید. در این تحقیق از تکنیک برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده شد، که با ساختار ریاضی غیرخطی خود، می‌تواند فرآیندهای غیرخطی پیچیده‌ای را که میان ورودی و خروجی هر سیستمی ارتباط برقرار می‌سازند، توصیف نمایند. محاسبات انجام یافته در تخمین میزان دبی رسوب معلق حوضه رودخانه ليقوان‌چای بر پایه‌ی بارش و دبی متوسط، نشان داد دبی متوسط جریان، نقش اصلی را در انتقال دبی رسوب معلق ایفا می‌کند و مدل‌سازی صرفاً با پارامتر هواشناسی بارندگی با نادیده گرفتن سایر پارامترهای مؤثر در انتقال رسوبات حوضه، کارایی و دقت مدل را در تخمین مقدار رسوبات معلق کاهش می‌دهد. علیرغم اینکه وارد کردن متغیر بارندگی از دقت مدل کاسته است، اما در بیشتر موارد میزان همبستگی در مدل بارش-رسوب برای ایستگاه ليقوان نسبتاً بیشتر از ایستگاه هروی بوده و می‌توان گفت ایستگاه ليقوان نسبت به هروی، همبستگی زیادی در برآورد رسوب با متغیر بارندگی داشته است، به عنوان

نمونه در فصول تابستان و پاییز برای داده‌های ایستگاه هروی، در مدل بارش-رسوب به علت عدم همبستگی بین داده‌های صحت‌سنجی و کالیبراسیون، برنامه قادر به مدل‌سازی با متغیر بارندگی نبوده است؛ در حالی که برای ایستگاه لیقوان در فصول تابستان و پاییز علی‌رغم کاهش چشمگیر همبستگی بارش-دبی رسوب نسبت به دبی جریان-دبی رسوب، برنامه قادر به پیش‌بینی دبی رسوب محاسباتی هر چند با خطای بیشتر بوده است.

در یک حوضه‌ی آبریز، رابطه‌ی بین دبی رسوب معلق و بارندگی، متأثر از اثرات متقابل عوامل درون حوضه و ویژگی‌های بارندگی است. تخمین فرسایش و رسوب صرفاً با متغیر بارندگی متوسط نمی‌تواند ارزیابی درستی از میزان فرسایش در حوضه را نشان دهد. بنابراین تخمین بار رسوب معلق ناشی از بارندگی‌های منفرد و رگباری ضرورت دارد. در این مطالعه از برنامه‌ریزی ژنتیک برای مدل‌سازی روابط حاکم بر بارندگی و دبی متوسط جریان با دبی رسوب استفاده شده است. می‌توان از سایر مدل‌های هوشمند چون شبکه‌ی عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج عصبی فازی نیز بهره برد. همچنین در تحقیق حاضر از داده‌های روزانه به عنوان ورودی سیستم در برآورد دبی رسوب معلق استفاده شده است. در تحقیقات آتی می‌توان از داده‌های ماهانه نیز استفاده کرد.

## منابع

- احمدی، حسن (۱۳۷۸)، ژئومورفولوژی کاربردی، جلد اول، چاپ سوم، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح (۱۳۸۱)، فرهنگ جغرافیایی رودهای کشور حوضه آبریز دریاچه ارومیه، جلد اول.
- سلطانی، علی (۱۳۸۹)، مدل سازی بارش رواناب با استفاده از برنامه ریزی ژنتیک (GP) و معادلات دیفرانسیل تصادفی (SDF) در حوضه لیقوان، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز.
- فریودنام؛ قربانی و اعلمی (۱۳۸۸)، پیش بینی جریان رودخانه با استفاده از برنامه ریزی ژنتیک مطالعه موردی: حوضه آبریز لیقوان چای، آب و خاک دانش کشاورزی.
- قلی نژاد، ناهید (۱۳۸۹)، مدل سازی توزیع بارش های شدید منطقه سهند با استفاده از تصاویر ماهواره ای، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم انسانی دانشگاه تبریز.
- همتی، محمد؛ مهدوی، محمد و محمود عرب خدری (۱۳۸۰)، بررسی رابطه رسوبدهی حوضه های آبریز با لیتولوژی و عامل بارش مؤثر، همایش ملی مدیریت اراضی، فرسایش خاک و توسعه پایدار.
- Alvisi, S.; Mascellani, G.; Franchini, M.; & Bardossy. A., (2005), **Water level Forecasting through Fuzzy Logic and Artificial Neural Network Approaches**, Hydrol. Earth Sys. Sci. Discuss., Vol. 2, PP 1107-1145.
- Aytek, A. & Kisi, O., (2008), **A Genetic Programming Approach to Suspended Sediment Modeling**, J. Hydrol, Vol. 351, PP 288-298.
- Aytek, A.; Asce, M. & Alp, M., (2008), **An Application of Artificial Intelligence for Rainfall-runoff Modeling**, J. Earth System Science. Vol.117, PP 145-155.
- Bissonnais, Y.L.; Monitor, C.; Jamagne, M.; Daroussin, J. & King, D., (2001), **Mapping Erosion Risk for Cultivated Soil in France**, Catena Vol. 46, PP 207-220.
- Bufalo, M.; & Nahon, D. (1992), **Erosion Processes of Mediterranean Badlands: A New Erosion Index for Predicting Sediment Yield from Gully Erosion**, Geoderma, Vol. 52, No. 1-2, PP 133-147.
- Ghorbani, M.A. (2010), **Sea Water Level Forecasting Using Genetic Programming and Comparing the Performance with Artificial Neural Networks**, Accepted for Publication in Computers & Geosciences.
- Harrison, C.G.A. (2000), **What Factor Control Mechanical Erosion Rates**, Int. j. Earth Sci. Vol. 531, PP 78-92.
- Koza, J.R. (1992), **Genetic Programming: on the Programming of Computers by Means of Natural Selection**, Cambridge, MA: MIT Press.