کارآیی مدل برنامه‌ریزی ژنتیک در شبیه‌سازی فرآیند بارش- رواناب (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه خرم‌آباد)

حمیدرضا باباعلی[۱]، زهره رامک*[۲] و رضا سپهوند[۳]

۱) دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی عمران، عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم‌آباد، خرم آباد، ایران.
۲) دکتری مهندسی منابع آب، فارغ‌التحصیل دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران.
۳) دانش آموخته کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، منابع آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

* نویسنده مسئول: Z_ramak@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۹/۰۴ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۱۴

چکیده

پیش‌بینی میزان دبی رودخانه یکی از مسایل مهمِ مهندسی منابع آب است؛ این موضوع از نظر برنامه‌ریزی، مدیریت، و سیاست‌گذاری منابع آبی در راستای توسعهٔ اقتصادی و زیست محیطی به‌ویژه در کشوری مثل ایران، با منابع آبی محدود اهمیت بسیار زیادی دارد. آگاهی از چگونگی ارتباط بین بارندگی و رواناب حوضه‌های آبریز بخش جدانشدنی مطالعات طرح‌های آبی می‌باشد. فقدان داده‌های کافی بارش- رواناب به دلیل نبود ایستگاه‌های آبسنجی مناسب، اهمیت به‌کارگیری روش‌های نامستقیم و الگوریتم‌های فراکاوشی را برای برآورد میزان رواناب حوضه‌های آبریز بیش از پیش نمایان می‌سازد. در این تحقیق از مدل برنامه‌ریزی ژنتیک به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب حوضه آبریز رودخانه خرم‌آباد استفاده شده است و برای معرفی الگوها و شناسایی بهترین الگوی حاکم بر ماهیت جریان، با استفاده از توابع برازش و انجام فرآیندهای توسعه‌ای و تکرار به منظور یافتن تعداد تکرار بهینه، همه داده‌های دوره آماری به دو دسته آموزش و آزمایش(۵۲٪ آموزش و ۴۸٪ آزمایش) تقسیم شدند و برنامه برای ۱۰۰۰ تکرار اجرا گردید. همچنین جهت ارزیابی روابط حاصله از مدل شبیه‌ساز، از شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق(MSE) وضریب تعیین (R^2) استفاده شده است. بررسی‌های انجام شده حاکی از آن است که فرمول استفاده شده شماره ۳ بیشترین انطباق را با داده‌های مشاهداتی دارد. بنابراین پیشنهاد میشود جهت مطالعات بارش- رواناب این حوضه از فرمول ذکر شده استفاده گردد. نتیجه این تحقیق مدل برنامه‌ریزی ژنتیک را یک روش صریح و دقیق برای پیش‌بینی جریان رودخانه در حوضه آبریز رودخانه خرم‌آباد پیشنهاد می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، بارش-رواناب، الگوریتم فراکاوشی، برنامه‌ریزی ژنتیک.

مقدمه

یکی از پیچیده‌ترین فرآیندهای هیدرولوژیک، فرآیند تبدیل بارش به رواناب است که از پارامترهای مختلف فیزیکی و هیدرولوژیکی تأثیر می‌پذیرد. مدلسازی فرآیند بارش – رواناب و پیش‌بینی دبی رودخانه یک اقدام مهم در مدیریت و مهار سیلاب‌ها، طراحی سازه‌های آبی در حوضه‌های آبریز و مدیریت خشکسالی می‌باشد (سلاجقه و همکارلن،۱۳۸۸).

از زمانی که شرمن (۱۹۳۲)، مفهوم هیدروگراف واحد را پیشنهاد کرد، مدل‌های هیدرولوژیکی خطی و غیرخطی فراوانی برای شبیه‌سازی فرآیند بارش -رواناب به طور گسترده به‌کار رفته‌اند. این مدل‌ها در طول زمان پیشرفت کرده‌اند و به طور مستمر با معرفی ابزار جدید و بالا رفتن دانش بشری کیفیت مدل‌های پیشنهادی افزایش یافته است. با وجود سابقهٔ طولانی مدل‌های آماری، هیدرولیکی و هیدرولوژیکی، تجارب حاکی از آن است که این مدل‌ها، به رغم نقاط قوت، ضعف‌های بسیار زیادی نیز دارند. جدید بودن بیشتر ایستگاه های هیدرومتری، نواقص موجود در آمار اکثر این ایستگاه‌ها، نیاز به اطلاعات تاریخی طولانی و پارامترهای مختلف هواشناسی، نیاز به پارامترهای گوناگون از قبیل هندسهٔ رودخانه، واسنجی وقت‌گیر مدل‌های فیزیکی و از طرف دیگر خاصیت غیرخطی و عدم قطعیت ذاتی فرآیند بارش -رواناب، محققین را به سوی استفاده از روش‌های هوش مصنوعی و الگوریتم‌های فراکاوشی سوق داده است. روش‌های الهام گرفته شده از طبیعت از جمله برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) که جزو محاسبات نرم معرفی می‌شوند، جزو مدل‌هایی هستند که در تحقیقات پیچیده و دقیق از آنها استفاده می‌شود (فضائیلی و همکاران ۱۳۸۹.، امام قلیزاده و همکاران،۱۳۹۵).

Zahiri and Azamathulla (2014) برای پیش‌بینی دبی جریان در مقاطع مرکب از دو روش برنامه‌ریزی ژنتیک خطی و مدل درختی M5 استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد هرچند هر دو مدل از دقت بالایی برای پیش‌بینی جریان برخوردار بودند، اما دقت روش برنامه‌ریزی ژنتیک خطی بالاتر از مدل درختی M5 می‌باشد .

Ghorbani et al (2010) با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک و شبکه‌های عصبی مصنوعی نوسانات سطح آب در جزیره Cocos واقع در اقیانوس هند را با داده‌های ۱۲ ساعته، ۲۴ ساعته، ۵ روزه و ۱۰ روزه مدل‌سازی کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در اکثر حالت‌ها نتایج حاصل از برنامه‌ریزی ژنتیک از دقت بیشتری نسبت به شبکه‌های عصبی مصنوعی برخوردار است .

Whigham and Crapper (2001) با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک و مدل قطعی IHACRES فرآیند بارش -رواناب روزانه در دو حوضه Teifi و Namoi را مدل‌سازی کردند که نتایج حاصل از برنامه‌ریزی ژنتیک دقت بهتری نسبت به مدل قطعی نشان داد.

Khu et al (2001) در یک تحقیق در مورد حوضه آبریز Orgeval در کشور فرانسه، از برنامه‌ریزی ژنتیک برای پیش‌بینی رواناب ساعتی بهره برده و نتایج حاصل را با مقادیر مشاهداتی و نیز مقادیر محاسبه شده توسط روش‌های کلاسیک مورد مقایسه قرار دادند. نتایج تحقیق، بیانگر دقت قابل قبول برنامه‌ریزی ژنتیک می‌باشد .

Liong et al (2002) با مطالعه رابطه بارش -رواناب در زمان‌های متفاوت بدین نتیجه دست یافتند که استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک در پیش‌بینی رفتار بارش –رواناب در حوضه‌های آبریز سبب بروز خطای کمتری می‌گردد .

Jayawardena et al (2005) با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک فرآیند بارش- رواناب یک حوضه کوچک در هنگ‌کنگ و دو حوضه نسبتًا بزرگ در چین را مدل‌سازی کردند. برای حوضه با شیب تند و مساحت کم نتایج حاصل از مدل‌سازی با داده - های روزانه مناسب نبود که برای رفع این مشکل پیشنهاد کردند که از داده‌های با فواصل زمانی کوتاه‌تر (۱۵ تا ۳۰ دقیقه) استفاده شود و برای دوحوضه دیگر نتایج حاصل با داده‌های واقعی مطابقت خوبی نشان داده است .

Aytek et al (2008) از شبکه‌های عصبی و برنامه‌ریزی ژنتیک برای مدل‌سازی بارش -رواناب روزانه حوضه رودخانه Juniata در ایالت پنسیلوانیای آمریکا استفاده کرده و نتیجه گرفتند که برنامه‌ریزی ژنتیک با دقت بهتری نسبت به شبکه - های عصبی فرآیند بارش -رواناب را مدل‌سازی می‌کند .

سلطانی و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک فرآیند بارش -رواناب روزانه حوضه لیقوان را مدل‌سازی کردند. در این تحقیق مدل‌سازی فرآیند بارش -رواناب ابتدا با ۱۵ متغیر برای تعیین متغیرهای معنی‌دار و سپس مدل‌سازی نهائی با متغیرهای معنی‌دار و دو مجموعه از عملگرهای ریاضی انجام شده است. مدل حاصل بدلیل سادگی و دقت بیشتر، به عنوان مدل بارش- رواناب حوضه آبریز لیقوان پشنهاد شده است .

امام قلیزاده و همکاران (۱۳۹۵)، عملکرد روش برنامه‌ریزی ژنتیک را به عنوان روشی هوشمند و نوین، جهت برآورد بارش رواناب حوضه آبریز کسیلیان مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد مدل مذکور از توانایی قابل قبولی در برآورد بارش رواناب حوضه آبریز کسیلیان، با استفاده از پارامترهای هواشناسی و هیدرولوژیکی برخوردار است .

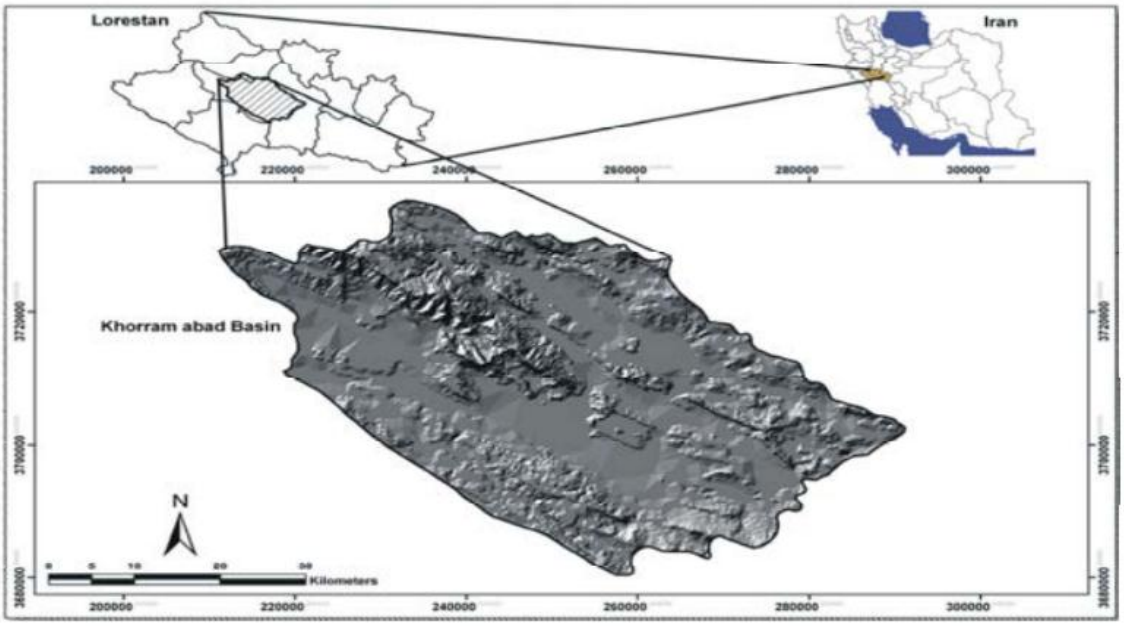
داننده مهر و مجدزاده (۱۳۸۹) در تحقیقی ضمن معرفی روش برنامه‌ریزی ژنتیک به عنوان یک روش صریح برای پیش‌بینی جریان رودخانه‌ها، از این روش به منظور بررسی تأثیر توالی دبی روزانه در پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه آبسرده واقع در استان لرستان، استفاده کردند و دقت نتایج حاصله با روش شبکه عصبی مصنوعی مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج این تحقیق حاکی از کارایی مناسب و دقت بالای برنامه‌ریزی ژنتیک در مقایسه با شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی جریان رودخانه‌ها است.

فربودنام و همکاران (۱۳۸۸) جریان روزانه رودخانه لیقوان را با استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک پیش‌بینی کردند و نتایج را با شبکه‌های عصبی مصنوعی مقایسه نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که روش برنامه‌ریزی ژنتیک از دقت بسیار بالایی در پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه نسبت به روش شبکه‌های عصبی مصنوعی برخوردار است .

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه خرم‌آباد با مساحت ۱۶۴۰ کیلومترمربع در جنوب‌غربی ایران، در استان لرستان، با موقعیت جغرافیایی ۳۳ درجه و ۲۶ دقیقه و ۷۶ ثانیه عرض شمالی تا ۴۸ درجه و ۱۴ دقیقه و ۷۷ ثانیه طول شرقی واقع شده است. این حوضه حدود ۱۶ درصد وسعت حوضه آبریز رودخانه کشکان را دربرگرفته است. حداکثر ارتفاع حوضه مورد مطالعه ۲۸۷۶ متر و حداقل ارتفاع حوضه ۱۱۱۲ متر می‌باشد. شکل(۱) موقعیت حوضه آبریز مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل۱: موقعیت جغرافیایی حوضه مورد مطالعه

داده‌های مورد نیاز برای انجام این تحقیق شامل داده‌های باران‌سنجی و هیدرومتری در مقیاس روزانه مربوط به سالهای ۱۳۷۰-۱۳۹۲، داده‌های مربوط به فیزیوگرافی حوضه و نیز داده‌های مربوط به مقدار CN یا شماره منحنی می‌باشد. ایستگاه باران‌سنجی و ایستگاه هیدرومتری مورد استفاده در این تحقیق ایستگاه چم انجیر بوده است. دلیل انتخاب این ایستگاه ها کامل‌تر بودن داده‌ها در این ایستگاه‌ها می‌باشد. جدول زیر مشخصات ایستگاه‌های بارانسنجی و هیدرومتری مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری مورد استفاده

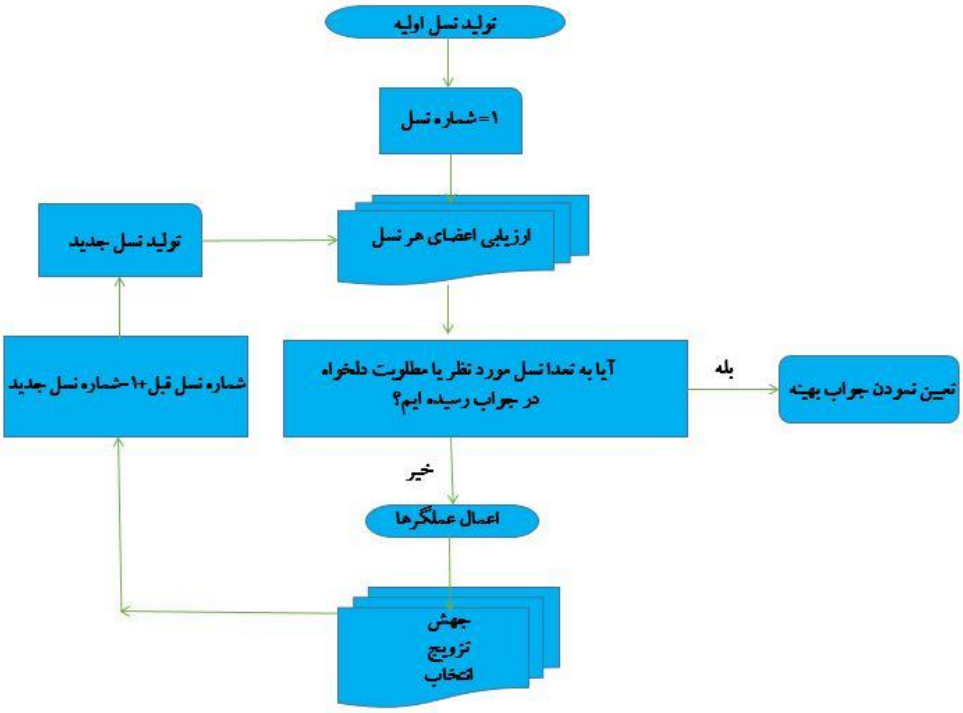
نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع
چم انجیر	هیدرومتری	۴۸°-۱۴‘	۳۳°-۲۶‘	۱۱۴۰
چم انجیر	بارانسنجی	۴۸°-۱۳‘	۳۳°- ۲۵‘	۱۱۶۶

برنامه‌ریزی ژنتیک

برنامه‌ریزی ژنتیک که برای اولین بار توسط (۱۹۸۵) Cramer ابداع و سپس توسط (۱۹۹۲) Koza گسترش و بسط داده شده است، روشی از الگوریتم‌های تکاملی است که در واقع تعمیم و توسعه‌یافته الگوریتم ژنتیک (GA) می‌باشد. فرآیند گام به گام برنامه‌ریزی ژنتیک به صورت مراحل زیر است:

۱- یک جمعیت اولیه از توابع مرکب نشان‌دهنده الگوهای پیش‌بینی، به صورت تصادفی در نظر گرفته می‌شود (ایجاد کروموزوم‌ها). ۲ -معرفی جمعیت اولیه (کروموزوم‌ها) به رایانه و ارزیابی هر یک از افراد (ژن) جمعیت مذکور با استفاده از توابع برازش (شناسایی مؤثرترین افراد در ماهیت پدیده). ۳ -انتخاب ژن‌های مؤثر به منظور تکثیر، جهش، جفت-گیری و تولیدمثل افراد جدید با صفات اصلاح شده (فرزندان). ۴ -اعمال فرآیند توسعه‌ای تکراری بر روی فرزندان در هر تولید. گام چهارم به تعداد معین و تا حصول بهترین پاسخ تکرار خواهد شد (۱۷).

GPهمانند GA با مجموعه‌های اولیه از راه حل‌های تصادفی که جمعیت نامیده می‌شود کار خود را آغاز می‌کند. هر فرد در این جمعیت، کروموزوم نامیده می‌شود که نماینده راه‌حلی برای مسئله مورد نظر است. سپس کروموزوم‌ها که به صورت درختی(ET) نشان داده شده‌اند، با یک تابع برازش ارزیابی می‌گردد تا میزان مناسب بودن یک راه حل در حیطه مسئله تعیین گردد. این جمعیت به کمک عملگرهای ژنتیکی، طی نسل‌های متمادی تکامل می‌یابد. هدف از این کار، دقیقاً همانند سازش‌پذیری طبیعی ژنتیکی، ایجاد جمعیت‌ها یـــا نسل‌هـــایی از جمعیت قبلی است کـــه نسبت به آنها بـــا محیط تطابق بهتری دارند (۱۸). شکل (۲) ساختار الگوریتم برنامه‌ریزی ژنتیک را نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر جهت استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک از برنامه GP-LAB استفاده شده است که در ادامه توضیح داده خواهد شد.



شکل ۲: چرخه و ساختار برنامه ریزی ژنتیکی

برنامه GP-LAB

نرم افزار GP-LAB یک برنامه ساده و قابل فهم به زبان متلب[1] می باشد که بصورت دسته‌ای از کدها و توابع برنامه-نویسی تنظیم شده است. یکی از مهم‌ترین مزایای این روش، امکان تغییر و تنظیم برنامه برای حالت‌های مختلف، یا توسعه کدهای آن بصورت دلخواه می‌باشد. این برنامه همانند سایر نرم‌افزارهای جعبه سیاه از دیدگاه مهندسی معکوس به عنوان یک راهکار جهت رسیدن به راه حل مناسب قابل استفاده می‌باشد. همچنین این نرم‌افزار قابلیت بکارگیری هرگونه تابع، عبارت و پارامتر را در سیستم و فرآیند حل دارا می‌باشد.

این برنامه دارای یک ساختار پارامتری می‌باشد که بصورت درختی نمایش داده می‌شود و در بردارنده سه الگوی اساسی می‌باشد که عبارتند از: دسته متغیرها،[2] جمعیت ژنی[3] و نسل.[4] هر الگو دارای یک دسته زیرساختار می‌باشد که بسته به نوع مسئله کار خاصی را انجام می‌دهند. همچنین هریک از الگوها، بسته به شرایط می‌توانند از یک تا چندین پارامتر و تابع را مورد استفاده قرار دهند.

---

1 - Matlab
2 SET VARE
3 GEN POP
4 Generation

جدول ۲: مشخصات آماری داده های مورد استفاده ایستگاه آبسنجی چم انجیر

مشخصه آماری	دبی (m^3 /s)
تعداد داده‌ها	۳۶۵۲
مقدار حداکثر	۱۸۶/۳۵
مقدار حداقل	۰
میانگین	۱۱/۰۳
واریانس	۱۴۱/۴۱
انحراف معیار	۱۱/۸۹

الگوسازی جریان به روش برنامه ریزی ژنتیک

در این بخش از پژوهش، در راستای ساخت و تولید مدلی که قادر به پیش‌بینی و تخمین مقدار دبی رودخانه خرم‌آباد به ازای مقادیر بارش رخ داده شده باشد، از روش برنامه‌ریزی ژنتیکی استفاده شده است. در این روش به منظور داشتن پیش‌بینی‌هایی نزدیک به واقعییت از پارامترهای زیر به عنوان ورودی‌های مدل شبیه‌سازی استفاده شده است:

۱- بارش در روز t (P_t).

۲- بارش در روز t-1 (P_{t-1}).

۳- بارش در روز t-2 (P_{t-2}).

۴-دبی در روز t-1 (Q_{t-1}).

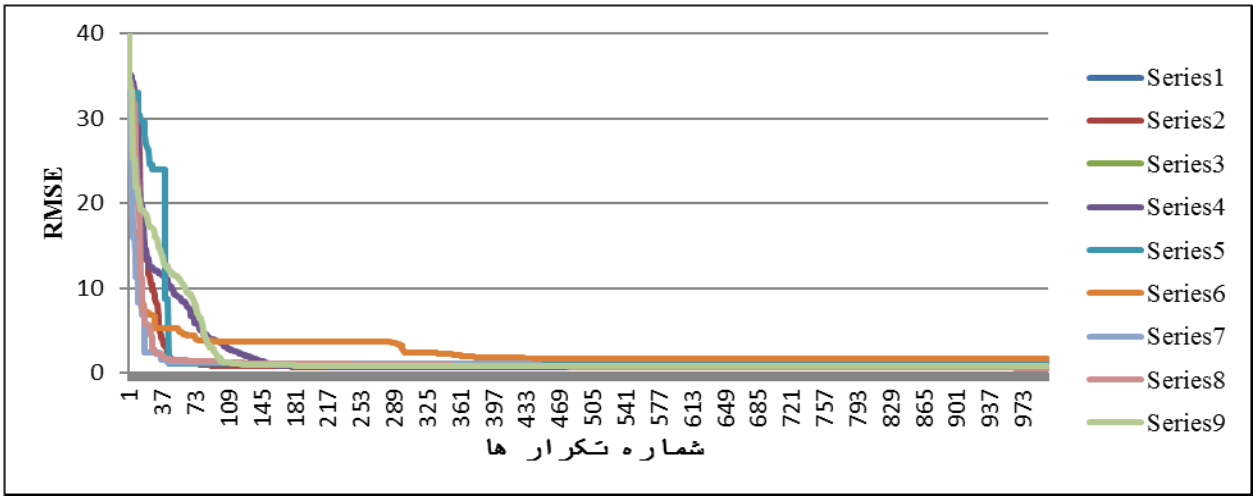
در تحقیق حاضر سعی شده است که با استفاده از پارامترهای ذکر شده فرمولی جهت شبیه‌سازی دبی رودخانه ارائه گردد که بیشترین انطباق را در هر گام زمانی پیش‌بینی با داده‌های مشاهداتی داشته باشد. جدول شماره ۳ تنظیمات اولیه مدل شبیه‌ساز را برای انجام این هدف نشان می‌دهد.

جدول۳: تنظیمات اولیه بکارگرفته شده در مدل شبیه ساز برنامه ریزی ژنتیکی

تعداد درختان هر نسل	عمق هر درخت	تعداد تکرار	احتمال جهش	احتمال تزویج
250	3	450	0.5	0.6

در این تحقیق برای معرفی الگوها و شناسایی بهترین الگوی حاکم بر ماهیت جریان، با استفاده از توابع برازش و انجام فرآیندهای توسعه‌ای و تکرار به منظور یافتن تعداد تکرار بهینه، ابتدا بعد از تفکیک نمودن همه داده‌های دوره آماری به دو دسته آموزش و آزمایش(۵۲٪ آموزش و ۴۸٪ آزمایش) برنامه برای ۱۰۰۰ تکرار اجرا و مشاهده گردید که بعد از ۴۵۰

تکرار، مقدار RMSE تقریبا ثابت شده و دارای شیب تغییرات صفر می‌گردد. این تعداد تکرار همان تعداد بهینه برای تکرارهای مدل شبیه‌ساز می‌باشد. شکل ۳ نتیجه حاصل از تعداد تکرار بهینه برای استفاده در مدل شبیه‌ساز برنامه‌ریزی ژنتیکی را نشان می‌دهد.



شکل ۳: تعیین تعداد تکرار بهینه برای استفاده در مدل شبیه ساز برنامه ریزی ژنتیکی

پس از مشخص نمودن تنظیمات اولیه مدل شبیه‌ساز و نیز تعیین تعداد تکرار بهینه برای استفاده در مدل برنامه‌ریزی ژنتیک اقدام به تعیین فرمول‌های بهینه حاصل از مدل شبیه‌ساز گردید. در جدول شماره ۴ فرمول‌های بهینه حاصله از مدل شبیه‌ساز ارائه شده است.

جدول۴: سه فرمول بهینه بدست آمده در مدل شبیه ساز برنامه ریزی ژنتیکی

روابط حاصله از مدل شبیه ساز
1) 0.36 Q(t-1) Plus 0.366P(t) Plus COS(P(t)) Plus(0.8)
2) Tan(Q(t-1) Plus $P(t)^3$) Plus (SQRT(SQRT(P(t-2) Plus (P(t))) + SQRT(Sin(P(t-1))
3) Plus(Plus(Plus(Plus(Plus(P(t),cos(Mysqrt(Plus(P(t),Minus(Mysqrt(Q(t-1),Q(t-1))))))

برای ارزیابی روابط حاصله از مدل شبیه‌ساز، از شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق(MSE) وضریب تعیین(R^2) استفاده شده است که به ترتیب با استفاده از روابط ۱، ۲ و ۳ قابل محاسبه‌اند:

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}))^2}{(\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2(Y_i - \bar{Y})^2)} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (2)$$

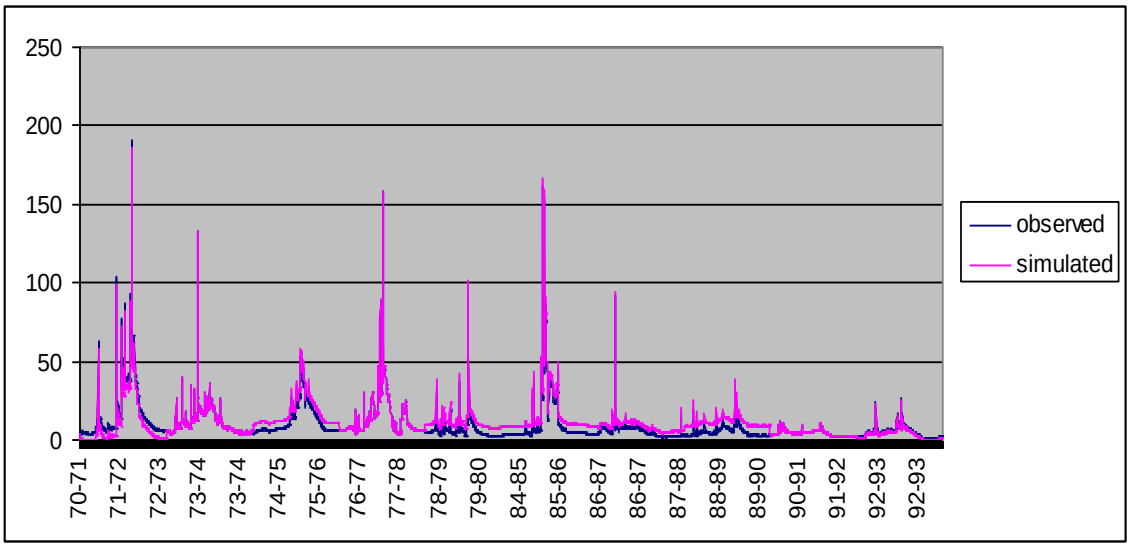
$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|X_i - Y_i|}{n} \quad (3)$$

در این روابط X_i و Y_i ، i امین داده واقعی و برآورد شده، $\bar{X}$ میانگین داده‌های واقعی، $\bar{Y}$ میانگین داده‌های برآورد شده و n تعداد نمونه‌های ارزیابی هستند. پایین بودن مقادیر RMSE و MAE و نیز بالا بودن مقدار R^2 می‌تواند دقت هر الگو را در مقایسه با سایر الگوهای رقیب نشان دهد. نتایج حاصل از ارزیابی روابط ذکر شده در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول۵: نتایج ارزیابی فرمول های بهینه بدست آمده در مدل شبیه ساز برنامه ریزی ژنتیکی

فرمول	آموزش			آزمایش		
	RMSE	MSE	R^2	RMSE	MSE	R^2
1	0.75	0.65	0.92	1.01	1.33	0.89
2	0.77	0.5	0.94	0.98	1.2	0.92
3	0.65	0.433	0.97	0.9	1.02	0.96

مطابق جداول شماره ۴ و ۵، استفاده از رابطه شماره سوم در جدول ۴، بیشترین انطباق را با داده‌های مشاهداتی داشته است. بنابراین با استفاده از این رابطه نسبت به شبیه‌سازی دبی متناظر با بارش‌های مختلف اقدام شده است. شکل شماره ۴ دبی شبیه‌سازی شده با استفاده از این رابطه بوسیله برنامه‌ریزی ژنتیک را در مقایسه با دبی واقعی نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، تطابق بالایی بین داده‌های واقعی و داده‌های شبیه‌سازی شده برقرار می‌باشد.



شکل ۴: نتایج مدل شبیه ساز برنامه ریزی ژنتیکی

نتیجه‌گیری

در این تحقیق از مدل برنامه‌ریزی ژنتیک برای شبیه‌سازی فرآیند بارش- رواناب استفاده گردیده است. شاخص‌های آماری مربوط به بکارگیری فرمول‌های شماره ۱ تا ۳ در جدول شماره ۵ نشان می‌دهد که فرمول شماره ۳ با کمترین مقدار جذر میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق و نیز بیشترین مقدار ضریب تعیین، بهترین کارایی و تطابق را در شبیه-سازی این فرآیند دارد. نتیجه این تحقیق بطور کلی مدل برنامه‌ریزی ژنتیک را یک روش صریح و دقیق برای پیش‌بینی جریان رودخانه در حوضه آبریز رودخانه خرم‌آباد پیشنهاد می‌نماید. همچنین نتایج این تحقیق با نتایج تحقیقات گون(۲۰۰۹) برای پیش‌بینی جریان رودخانه شویل کیل و نیز تحقیق داننده مهر و مجدزاده طباطبایی در زمینه پیش‌بینی جریان رودخانه آبسرده با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک تطابق دارد. بنابراین می‌توان برنامه‌ریزی ژنتیک را جزو دقیق‌ترین روش‌های موجود در پیش‌بینی جریان رودخانه دانست.

منابع

امام قلیزاده، ص.، کریمی دمنه، ر و مهدی پناه، ح. (۱۳۹۵). برآورد رواناب حوضه آبریز کسیلیان با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن، مطالعات منابع طبیعی، محیط زیست و کشاورزی، جلد ۳، سال دوم -شماره ۴ و ۵پیاپی (۱۱ و ۱۲)، ص۷-۱.

امیدی، ر. (۱۳۹۳). مقایسه پیش بینی آبدهی جریان رودخانه خرم آباد با استفاده از سریهای زمانی و شبکه عصبی مصنوعی ،گروه هیدرولوژی و منابع آب پایان نامه کارشناسی ارشد ، دانشگاه شهید چمران اهواز دانشکده مهندسی علوم آب.

داننده مهر، ع و مجدزاده طباطبایی، م. (۱۳۸۹). بررسی تأثیر توالی دبی روزانه در پیش بینی جریان رودخانه ها با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۴، شماره۲، ص ۳۲۵-۳۳۳.

سلاجقه،ع.، فتحآبادی، ا ومهدوی،م. (۱۳۸۸). بررسی کارایی روشهای عصبی -فازی و مدلهای آماری در شبیه سازی فرآیند بارش -رواناب .مجله‌ی منابع طبیعی ایران، نشریه مرتع و آبخیزداری ، دوره ۶۲، شماره۱، ص ۶۵-۸۰.

سلطانی، ع. (۱۳۸۹). مدلسازی بارش -رواناب با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) و معادلات دیفرانسیل تصادفی(SDE) در حوضه آبریز لیقوان، پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته منابع آب،گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز.

فربودنام، ن.، قربانی، م .ع .و اعلمی، م. (۱۳۸۸). پیش‌بینی جریان رودخانه با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک (مطالعه موردی : رودخانه لیقوان) مجله دانش آب و خاک ، دانشگاه تبریز، دوره ۱۹، ص۱۲۳ -۱۰۷ .

فضائیلی، ح. (۱۳۸۹). استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک در مدل‌سازی بارش- روناب، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز .

محمد صالحی، پ، رائینی سرجاز، م و ضیاء طبار احمدی، م. (۱۳۸۶). شبیه‌سازی بارش - رواناب با مدل ریاضی مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی برای حوزه آبریز امامه، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد پانزدهم، شماره اول، ویژه نامه منابع طبیعی، ص ۱-۱۱.

Aytek, A. and M., Asce. (2008). An application of artificial intelligence for rainfall runoff modeling. Journal of Earth System Science, 117(2), pp: 145-155.

Aytek, A. and Kisi, O.,"A. (2007). genetic programming approach to suspended sediment modelling", Journal of Hydrology, 351, pp: 288-298.

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, pp: 4050–4057.

Guven, A. (2009). Linear genetic programming for time-series modeling of daily flow rate. Journal of Earth System Science, 118 (2), pp: 157-173.

Harun, S., Ahmat Nor, N.I. and Kassim, A.H.M. (2002). Artificial Neural Network Model for Rainfall-Runoff Relationship, Journal Technology, Vol. 37, pp: 1–12.

Huo, Z., Feng, S., Kang, S., Huang, G., Wang, F and Guo, P. (2012). Integrated Neural Networks for Monthly River Flow Estimation in Arid Inland Basin of Northwest China, Journal of Hydrology, 420-421, pp: 159-170.

Jayawardena, A.W., Muttil, N and Fernando, T.M.K.G.(2005). Rainfall-Runoff Modeling Using Genetic Programming. International Congress on Modeling and Simulation Society of Australia and New Zealand December, pp: 1841-1847.

Khu, S.T., Liong,S.Y., Babovic,V, Madsen,H, Muttil,N. (2001). Genetic Programming and its application in real-time runoff forecasting, Journal of the American Water Resources Association, 37(2), pp: 439-451.

Koza,J.R. (1992). Genetic Programming: on the programming of computers by means of natural selection. Cambridge, MA: MIT Press, pp: 35-80.

Liong, S. Y., Gautam, T. R., Khu, S. T., Babovic, V., and Muttil, N. (2002). Genetic Programming: A New Paradigm in Rainfall- Runoff Modelling, Journal of American Water Resources Association 38(3), pp: 705-718.

Lopes, HS and Weinert, WR .(2004). EGIPSYS: an enhanced gene expression programming approach for symbolic regression problems. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science 14(3), pp: 375-384.

Whigham,P.A and Crapper,P.F.(2001). Modelling Rainfall-Runoff using Genetic Programming ,CSIRO Land and Water, P.O. Box 1666, Canberra, A.C.T. 2601, Australia, Mathematical and Computer Modellhrg 33 (2001) ,pp:707-721.

Zahiri , A and Azamathulla, H.(2014). Comparison between linear genetic programming and M5 tree models to predict flow discharge in compound channels. Neural Computing and Applications, 24, pp: 413-420.