

## بررسی کارایی مدل پویایی سیستم در شبیه سازی فرآیند بارش - رواناب (مطالعه موردی: حوضه آبریز ليقوان)

صابره دربندی<sup>۱\*</sup> - يعقوب دين پژوه<sup>۲</sup> - صبا زینالی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۳/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۱/۱۳

### چکیده

محدودیت منابع آبی و اصل پایداری در مدیریت آن، تامین آب کلیه نیازهای موجود را غیر ممکن ساخته است، لذا به منظور تامین و عرضه آب با اطمینان پذیری بالا نیاز به برنامه ریزی های دقیق می باشد. به همین دلیل اهمیت مدیریت منابع آب در حوضه های آبریز بیش از پیش نمایان شده است. در این تحقیق از دو مدل پویایی سیستم (Vensim) و برنامه ریزی ژنتیک برای شبیه سازی فرآیند بارش - رواناب در حوضه آبریز ليقوان استفاده گردید. در مدل برنامه ریزی ژنتیک برای بدست آوردن بهترین ترکیب، ورودی های مختلف برای مدل سازی مورد آزمون قرار گرفت. نتایج حاکی از دقت بالای مدل Vensim در شبیه سازی فرآیند بارش - رواناب نسبت به مدل برنامه ریزی ژنتیک می باشد. نتایج نشان می دهد که مدل Vensim برای اکثر رویدادها ضریب همبستگی بالایی نسبت به برنامه ریزی ژنتیک داشته همچنین در پیش بینی دبی و زمان اوج کمترین خطای مطلق را دارد.

واژه های کلیدی: بارش - رواناب، برنامه ریزی ژنتیک، حوضه آبریز ليقوان، پویایی سیستم

### مقدمه

تخصیص آب در حوضه قزل اوزن را بین استان های ذینفع با رویکرد پویایی سیستم مورد بررسی قرار داد که بیانگر توانایی این روش در مدل سازی بوده است.

برهانی داریان و جوادیان زاده (۱) از نوعی مدل تانک دو مخزنی برای شبیه سازی بارش - رواناب حوضه آبریز امامه در مقیاس ساعتی استفاده کردند. آن ها از روش پویایی سیستم برای توسعه مدل بهره بردند. نتایج این تحقیق نشان داد که روش پویایی سیستم در رویدادهایی که هیدروگراف خروجی حوضه در آن ها شکل ساده تری دارد عملکرد بهتری دارد. احمد و سیمونویچ (۶) از پویایی سیستم برای شبیه سازی مخزن سدی در کانادا استفاده کردند. و کارایی مدل در تحلیل حساسیت در مقایسه با دیگر مدل های شبیه سازی مخزن در تحقیق خود را مورد توجه قرار دادند. کشتا و همکاران (۱۱) در ادامه مطالعات الشورگابی و همکاران (۹) مدلی عمومی توسط رویکرد پویایی سیستم ارائه دادند و نتایج نشان داد که مدل به خوبی قادر به دریافت پویایی سیستم و شبیه سازی در حوضه های مصنوعی و طبیعی است. فرودنام و همکاران (۴) به پیش بینی جریان روزانه رودخانه ليقوان با استفاده از برنامه ریزی ژنتیک پرداختند. نتایج بدست آمده با یک مدل شبکه عصبی مصنوعی نیز مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که دقت مدل برنامه ریزی ژنتیک بیشتر

در سال های اخیر با توجه به رشد روزافزون جمعیت، گسترش شهرها و روند صنعتی شدن آن ها نیاز به ارائه مدلی که بتواند بارش - رواناب را پیش بینی کند الزامی به نظر می رسد. نیاز به الگوهای مناسب تبدیل بارش به رواناب در جوامع پیشرفته امروزی در کشاورزی، آبیاری، شرب، بهره برداری از مخازن سدها، پیش بینی، کنترل و سیستم های هشدار سیلاب برای کاهش آسیب های مالی و جانی مشهود است. بنابراین داشتن مدلی جهت پیش بینی مقادیر برای آینده در تمامی علوم و از آن جمله در رشته مهندسی آب همواره مد نظر بوده است. لذا یکی از راه های مطالعه دقیق فرآیند بارش - رواناب استفاده از روش های هوشمند در یافتن رابطه بین داده های ورودی و خروجی پدیده بارش - رواناب می باشد. رویکرد پویایی سیستم ها برگرفته از تفکر سیستمی، ابزاری مفید در مدیریت و برنامه ریزی ها است. تفکر سیستمیک که اساس و مبنای رویکرد پویایی سیستم ها به شمار می رود، در مقابل تفکر خطی بکار برده می شود. پایمزد (۲)

۱، ۲ و ۳ - به ترتیب استادیار، دانشیار و دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

\* نویسنده مسئول: (Email: sdarbandi.tabrizu@yahoo.com)

## مواد و روش ها

### منطقه و داده های مورد استفاده

حوضه آبریز ليقوان از زیرحوضه های مهم و معرف حوضه آبریز تلخه رود بوده که با وسعتی معادل ۷۶/۱۹ کیلومتر مربع در استان آذربایجان شرقی در دامنه شمالی سهند ما بین ۴۶ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۲۶ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۵۰ دقیقه عرض شمالی گسترش یافته است. رودخانه ليقوان به عنوان زهکش اصلی حوضه مذکور بوده و جریانات خود را به رودخانه تلخه رود و نهایتاً دریاچه ارومیه تخلیه می کند. مهم ترین شاخه های رودخانه عبارتند از باراله چای، بزکش چای و باغچه دره و بلندترین نقطه حوضه با ارتفاع ۳۶۲۰ متر از سطح دریای آزاد در جنوب شرقی ارتفاعات سهند و پایین ترین نقطه آن با ارتفاع ۲۱۴۰ متر در محل ایستگاه هیدرومتری ليقوان می باشد. شکل حوضه به صورت کشیده و با فرکانس آبراهه ای ۱/۲ و ارتفاعی برابر ۳۶۷۵ متر و طولانی ترین شاخه اصلی حوضه در محل ایستگاه هیدرومتری ليقوان ۱۷ کیلومتر با شیب متوسط ۱۱ درصد می باشد. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز ليقوان در شکل ۱ نشان داده شده است.

در تحقیق حاضر جهت شبیه سازی بارش-رواناب از داده های ساعتی شش رویداد رگبار به همراه رواناب ناشی از آن ها استفاده گردید. در جدول ۱ مشخصات آماری هر کدام از این سری داده ها ارائه شده است.

می باشد. سلطانی و همکاران (۳) به مدل سازی بارش-رواناب روزانه حوضه آبریز ليقوان پرداختند و نشان دادند که متغیرهای بارش با تاخیر ۰/۱، ۶ و متغیر رواناب با تاخیر ۱، ۳ و ۵ در روند مدل سازی بارش-رواناب تاثیر دارند. یوسفی (۵) با استفاده از برنامه ریزی ژنتیک بار معلق رسوب را با استفاده از ورودی های دبی جریان رودخانه ليقوان و می سی سی پی مورد مطالعه قرار داد و نشان داد که می توان با الگوی ورودی جریان تا سه روز قبل برای رودخانه می سی سی پی و یک روز قبل برای رودخانه ليقوان بار معلق رسوب انتقالی را شبیه سازی نمود. نخستین بار کوسین و سویک (۸) از برنامه ریزی ژنتیک برای مدل سازی بارش-رواناب استفاده کردند. لوپز و وینرت (۱۳) مدل برنامه ریزی ژنتیک را برای مدل سازی سری های زمانی به کار بردند. در این مطالعه چندین سری زمانی مختلف از جمله جریان رودخانه ریوگراندر در سد فارناس در برزیل، رودخانه نیل در مصر و رودخانه تایت در ایستگاه کامپیکا با استفاده از EGIPSYS بر مبنای مقادیر رواناب پیشین مدل سازی شدند. نتایج نشان دادند که روش پیشنهادی برای مدل سازی سری زمانی مناسب می باشد. قربانی و همکاران (۱۰) با استفاده از برنامه ریزی ژنتیک به پیش بینی سطح آب دریا در غرب استرالیا پرداختند. تریزی (۱۵) با استفاده از برنامه ریزی ژنتیک و نروفازی به برآورد تبخیر روزانه تحت تبخیر در منطقه دریاچه ایدیر در ترکیه پرداخت.

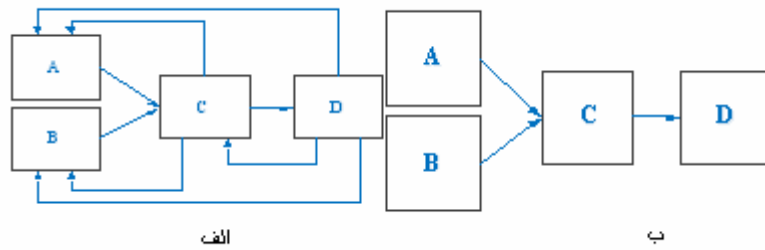
هدف از این تحقیق مدل سازی بارش - رواناب به دو روش پویایی سیستم و برنامه ریزی ژنتیک و بررسی و عملکرد هر دو روش برای اولین بار در حوضه آبریز ليقوان می باشد.



شکل ۱ - موقعیت کلی حوضه آبریز ليقوان در کشور

جدول ۱ - مشخصات آماری رویدادهای مورد استفاده

رویداد	مدت زمان بارش (ساعت)	مدت زمان سیلاب (ساعت)	حداکثر بارش (میلی متر)	میانگین مقدار رواناب (مترمکعب بر ثانیه)	حداکثر مقدار رواناب (مترمکعب بر ثانیه)
۸۲/۳/۲	۳	۵	۱/۶۴	۰/۱۲۹	۰/۲۴۹
۸۲/۳/۳	۴	۲۵	۴/۲۴	۰/۳۵۳	۱/۳۴۰
۸۲/۳/۲۵	۲	۲۲	۲/۹۵	۰/۴۰۰	۱/۳۰۶
۸۲/۱۲/۱۶	۱۳	۳۵	۲/۴۴	۰/۸۱۳	۳/۲۹۱
۸۴/۲/۲۵	۳	۱۸	۳/۲	۰/۱۹۳	۰/۶۳۰
۸۴/۲/۲۶	۲	۲۱	۶	۰/۴۰۸	۱/۴۴۸



شکل ۲- الف) مدل حاکم بر تفکر خطی، ب) مدل حاکم بر تفکر سیستمی

### حلقه های علت و معلولی

در تفکر سیستمیک برای نمایش تعاملات و بازخوردهای میان اجزاء از ابزاری موسوم به حلقه های علت و معلولی استفاده می کنند. حلقه های علی شامل حلقه های مثبت و منفی بوده و تاثیر متقابل آنها، سیستم های پیچیده را تشکیل می دهند. حلقه های بازخوردی منفی در جهت تعادل در سیستم و تعدیل تغییرات، نقش ایفا می نمایند. همچنین سیستم ها شامل حلقه های بازخوردی مثبت نیز هستند که به عنوان بازخوردهای تقویتی برای رشد یک تغییر یا روند معرفی گردیده است.

### ساختار و رفتار درون زا

مجموعه حلقه ها، ساختار سیستم را تشکیل داده و رفتار سازمان، توسط ساختار آن که در برگیرنده بازخوردهای اطلاعاتی و منابع است، ایجاد می گردد. در واقع این ارتباط که رفتار منبعث از ساختار است، اساس فلسفه علی است. پویایی سیستم با تاکید برنگرش به درون سیستم، مسائل را به عنوان موضوعاتی که توسط عوامل بیرونی ایجاد شده اند، نمی بیند، بلکه مسائل به مثابه موضوعاتی تلقی می شوند که توسط ساختار درونی سیستم ایجاد می شوند.

### دیدگاه کل نگر

روش پویایی سیستم نمایی کل نگر از وضعیتی که مسئله در آن رخ داده است، ایجاد می کند. این روش توجه خود را از نشانه های مسئله به علل ریشه ای آن معطوف می سازد و به این وسیله تمرکز بر ابعاد مختلف مسئله را ممکن می سازد. در این روش، مسائل به جای آنکه جزئی شناسایی و تعریف گردند به صورت کلی معرفی می شوند.

### اصول مدل سازی با رویکرد پویایی های سیستم

مسائل موجود در پویایی سیستم از دو ویژگی پویایی و ساختار بازخوردی برخوردارند. براساس ویژگی پویایی، ابعاد کمی و کیفی سیستم در طول زمان دستخوش تغییر هستند و در فرآیند تحول

### پویایی سیستم

رویکرد پویایی سیستم ها برگرفته از تفکر سیستمی، ابزاری مفید در مدیریت و برنامه ریزی ها است. تفکر سیستمی که اساس و مبنای رویکرد پویایی سیستم ها به شمار می رود، در مقابل تفکر خطی بکار برده می شود. تفکر حاکم بر سیستم خطی در شکل ۲(الف) نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می شود در تفکر خطی پدیده ها یا متغیرهای A و B به صورت خطی بر C تاثیر گذاشته و در نهایت تاثیر C بر متغیر D دیده می شود. در حالی که در واقعیت پدیده ها تنها تحت تاثیر روابط خطی و یکطرفه واقع نشده و بازخوردها مقدار اولیه متغیر یا شرایط اولیه آن پدیده را تحت تاثیر قرار داده و سبب تغییرات آن ها در طول زمان می گردد. این تفکر سیستمی همان است که در شکل ۲(ب) دیده می شود.

### اصول پویایی سیستم

از مهم ترین اصولی که رویکرد پویایی سیستم ها بر آن استوار است، این است که ساختار سیستم در طول زمان الگوهای رفتاری آن را ایجاد می کند. این موضوع در تحلیل رفتار سیستم مورد نظر، اهمیت ویژه ای دارد. در واقع در این روش مهم ترین اصل پس از درک چگونگی ایجاد پویایی ها، یافتن سیاست هایی به منظور بهبود عملکرد سیستم است.

مفاهیم پایه در اصول پویایی سیستم عبارتند از :

### بازخوردها

بازخوردها توسط ابزارهای نموداری بازنمایی و در قالب معادلات شبیه سازی سیستم، به صورت ریاضی نمادسازی می شوند. اساساً در هر سیستمی دو نوع ساختار بازخوردی بنیادی وجود دارد: بازخوردهای مثبت و منفی. بازخوردهای مثبت منجر به تقویت هرآن چه در سیستم رخ می دهد، می شوند و بازخوردهای منفی در جهت تعادل اتفاقات داخلی سیستم رفتار می کنند.

مدلی که مورد بحث قرار گرفت مدل معروف سوگوارا است. با تغییر تعداد تانک‌ها و خروجی‌ها و یا حتی وارد کردن روابط و مفاهیم فیزیکی می‌توان مدل‌های بی شمار تانک توسعه داد. یکی از مزایای مدل تانک این است که نیازی به وارد کردن مباحث تلفات اولیه ندارد و ساختار غیر خطی مدل آن را در خود حل می‌کند. در زیر متغیرهایی که برای مدل‌سازی تانک چهار مخزنی مورد استفاده قرار گرفته است مورد بررسی قرار می‌گیرد (۱۴).

این متغیرهای عبارت‌اند از:

۱. سطح مقطع مخازن: فرض می‌شود که مخازن استوانه‌ای هستند. با توجه به اینکه در طول شبیه‌سازی حجم آب ورودی و خروجی از مخزن مشخص است برای به دست آوردن ارتفاع آب در مخزن نیاز به دانستن مساحت کف مخزن است. ارتفاع آب در مخزن بر روی خروجی‌های کناری و تحتانی اثر دارد.

۲. سطح مقطع خروجی‌های کناری و تحتانی: دبی خروجی هر یک از خروجی‌ها از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Q = A\sqrt{2gh} \quad (1)$$

در رابطه بالا  $A$  سطح مقطع خروجی،  $h$  ارتفاع آب در مخزن بالاتر از محل قرارگیری خروجی و  $g$  شتاب ثقل می‌باشد.

۳. ارتفاع خروجی کناری از کف مخزن: همانطور که توضیح داده شد برای محاسبه خروجی نیاز به ارتفاع آب بالای مخزن است. از این رو ارتفاع محل قرارگیری هر خروجی تحتانی از کف مخزن لازم است. چون رویکرد این تحقیق مدل‌سازی بارش-رواناب به صورت رویدادی است، حجم مخازن در شرایط اولیه صفر در نظر گرفته می‌شود.

### برنامه‌ریزی ژنتیک (GP)

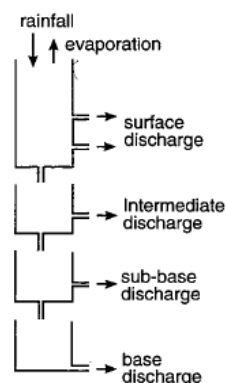
برنامه‌ریزی ژنتیک تعمیم یافته الگوریتم ژنتیک می‌باشد که برای اولین بار بر اساس تئوری داروین ارائه شد. به این ترتیب که جمعیتی در جهت تکامل به صورت انتخابی، جمعیت نامناسب را رها کرده و فرزندی اصلاح شده ایجاد می‌کنند. برنامه‌ریزی ژنتیک یک تکنیک برنامه‌ریزی خودکار می‌باشد که راه حل مسئله را با استفاده از برنامه کامپیوتری ارائه می‌کند. در این روش در ابتدای فرآیند هیچگونه رابطه تابعی در نظر گرفته نشده و این روش قادر به بهینه‌سازی ساختار مدل و مؤلفه‌های آن می‌باشد. برنامه‌ریزی ژنتیک برخلاف الگوریتم ژنتیک روی ساختار درختی فرمول‌ها به جای سلسله ارقام دودویی عمل می‌کند. ساختارهای درختی از مجموعه توابع (عملگرهای ریاضی مورد استفاده در فرمول‌ها) و ترمینال‌ها (متغیرهای مسئله و اعداد ثابت) ایجاد می‌شوند (۱۲). قبل از مراحل اجرایی برنامه‌ریزی ژنتیک گام‌های مقدماتی زیر باید توسط کاربر تعیین شوند.

سیستم در هر مرحله به مرحله قبل و بعد خود اطلاعاتی ارائه می‌دهند. با توسعه نرم‌افزارها در طول دهه گذشته، مدل‌های شبیه‌سازی پویایی سیستم بسیار ساده شده‌اند. هدف اصلی توسعه نرم‌افزارهای پویایی سیستم کمک به حل مسائلی است که حل تحلیلی آن‌ها به صورت ریاضی و بدون کمک گرفتن از شبیه‌سازی کامپیوتری مشکل است. نرم‌افزار Vensim که توسط پروفیسور کروود<sup>۱</sup> در دانشگاه ایالتی آریزونا توسعه پیدا کرده است جزو بهترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی پویایی سیستم است.

### مدل بارش-رواناب تانک

مدل تانک مدل ساده‌ای است که از چهار مخزن که به صورت قائم روی هم قرار گرفته‌اند تشکیل شده است. شکل شماتیک این مدل در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود بارش ورودی مخزن بالایی است و تبخیر از مخزن بالا کم می‌شود. اگر آبی در مخزن بالا نباشد تبخیر از مخزن دوم کم می‌شود. اگر مخزن دوم نیز خالی باشد تبخیر از مخزن سوم کم می‌شود و به همین ترتیب ادامه دارد (۱۴).

مجموع خروجی‌ها از خروجی‌های کناری مخازن رواناب را تشکیل می‌دهند. خروجی مخزن بالایی به عنوان رواناب سطحی شناخته می‌شود. خروجی کناری مخزن دوم رواناب میانی<sup>۲</sup> در نظر گرفته می‌شود. آب خروجی از مخزن سوم رواناب حاصل از جریان زیرسطحی فرض می‌شود. در انتها خروجی مخزن چهارم به رواناب پایه<sup>۳</sup> معروف است.



شکل ۳- شکل شماتیک مدل تانک چهار مخزنی

مدل تانک می‌تواند به خاطر ساختار غیرخطی اش انواع مختلفی از هیدروگراف‌ها را ارائه دهد. ساختار غیرخطی این مدل ناشی از رابطه خروجی‌های کناری و پایینی است. مدل مخزن انواع مختلفی دارد.

- 1- Kirwood
- 2- Intermediate
- 3- base

نشان دهنده اینست که تا کجا داده های رواناب و بارش روی تخمین رواناب با فواصل زمانی  $\Delta t$  تأثیر دارد.

### شاخص های تعیین دقت مدل

شاخص های آماری ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا به منظور بررسی و ارزیابی دقت مدل ها مورد استفاده واقع شدند. شاخص های یاد شده به ترتیب با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه می باشند:

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i^O - \bar{Q}^O)(Q_i^E - \bar{Q}^E)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_i^O - \bar{Q}^O)^2 \sum_{i=1}^N (Q_i^E - \bar{Q}^E)^2}} \right)^2 \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i^E - Q_i^O)^2}{N}} \quad (4)$$

در روابط بالا،  $Q_i^O$  و  $Q_i^E$  به ترتیب مقادیر دبی مشاهداتی و محاسباتی در گام زمانی  $i$  ام بوده و  $\bar{Q}^O$  و  $\bar{Q}^E$  نیز میانگین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی دبی می باشد.  $N$  نیز نشانگر تعداد داده هاست.

### نتایج و بحث

#### روند مدل سازی پویایی فرآیند بارش- رواناب

مدل به کار گرفته شده در این تحقیق برای شناخت پویایی و توسعه آن به زبان پویایی سیستم مدل تانک چهار مخزنی ساده است. شکل ۵ مدل توسعه داده را در فضای نرم افزار Vensim نشان می دهد.

شکل ۶ نتایج مدل سازی بارش - رواناب به وسیله رویکرد پویایی های سیستم را نشان می دهد. همانطوری که در شکل مذکور دیده می شود به جز رویداد ۸۲/۰۳/۲۵ مدل توانسته است بارش- رواناب را به خوبی شبیه سازی کند. همچنین دیده می شود که مدل به غیر از رویدادهای ۸۲/۰۳/۲۵ و ۸۲/۱۲/۱۶ توانسته است به خوبی زمان و مقدار اوج وقوع سیلاب را پیش بینی کند. برای مطالعه و مقایسه عملکرد مدل ها شاخص های آماری ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا به منظور بررسی و ارزیابی دقت مدل ها مورد استفاده واقع شدند. جدول ۲ مقادیر معیارهای ارزیابی مدل را در شبیه سازی بارش- رواناب برای هر رویداد نشان می دهد.

مجموعه ترمینال ها (متغیر های مسئله، اعداد ثابت تصادفی)، ۲. مجموعه عملگرهای ریاضی مورد استفاده در فرمول ها، ۳. انتخاب تابع برازش، برای سنجش برازش فرمول ها، ۴. تعیین پارامترهای کنترل کننده اجرای برنامه (اندازه جمعیت، احتمال مربوط به به کارگیری عمل های ژنتیکی و جزئیات دیگر مربوط به اجرای برنامه). ۵. معیار پایان و ارائه نتایج اجرای برنامه (مثل، تعداد تولید جمعیت جدید، تعیین یک مقدار مشخص برای برازش فرمول ها 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: ۱. تولید یک جمعیت اولیه از فرمول ها که این فرمول ها از ترکیب تصادفی مجموعه توابع (عملگرهای ریاضی مورد استفاده در فرمول ها) و ترمینال ها (متغیرهای مسئله و اعداد ثابت) ایجاد می شوند، ۲. هر یک از افراد جمعیت مذکور با استفاده از توابع برازش مورد ارزیابی قرار می گیرند، ۳. تولید یک جمعیت جدید از فرمول ها، که مراحل زیر برای تولید یک جمعیت جدید دنبال می شود: الف. یکی از عمل های ژنتیکی تلافی<sup>۱</sup>، جهش<sup>۲</sup> و تولید مثل<sup>۳</sup> انتخاب می شود (این سه عمل ژنتیکی، مهم ترین عمل های ژنتیکی مورد استفاده در برنامه ریزی ژنتیک می باشند. عمل های دیگری مثل اصلاح ساختار و... نیز با احتمال کمتر مورد استفاده قرار می گیرند). ب. تعداد مناسبی از افراد جمعیت حاضر انتخاب می شوند (انتخاب فرد یا افرادی از جمعیت مذکور به صورت احتمالاتی می باشد که در این انتخاب احتمالاتی منفردهای با برازش بهتر به منفردهای نامرغوب ترجیح داده می شوند) و این بدان معنی نیست که حتماً منفردهای نامرغوب حذف می شوند). ج. از عمل ژنتیکی انتخاب شده برای تولید فرزند (فرمول جدید) استفاده می شود. د. فرزند (فرمول جدید) تولید شده در یک جمعیت جدید وارد می شود. ه. مدل مورد نظر با استفاده از تابع برازش مورد ارزیابی واقع می شود. ۴. گام سوم تا نیل به حداکثر تعداد تولید، تکرار خواهد شد. طرح کلی گام های اجرایی برنامه ریزی ژنتیک در شکل ۴ نشان داده شده است.

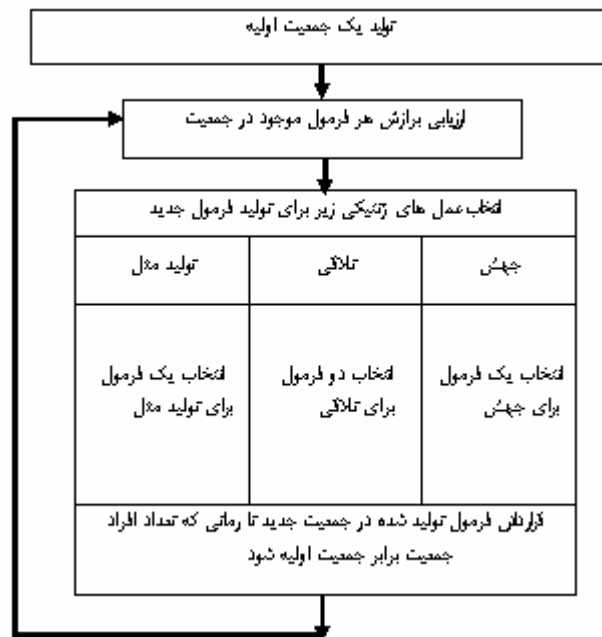
برنامه ریزی ژنتیک بین متغیرهای ورودی و خروجی رابطه ای را برقرار می کند، لذا رابطه علت و معلولی فرآیند بارش- رواناب در این تحقیق به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$Q_{t+\Delta t} = f(R_t, R_{t-\Delta t}, \dots, R_{t-W\Delta t}, Q_t, Q_{t-\Delta t}, \dots, Q_{t-W\Delta t}) \quad (2)$$

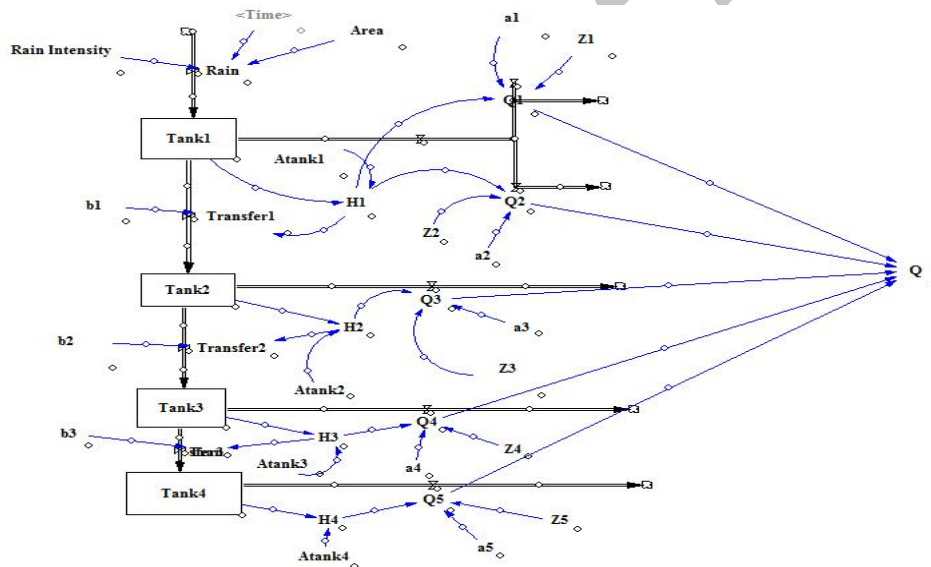
که در آن  $Q$  رواناب بر حسب  $m^3 s^{-1}$ ،  $R$  شدت بارش  $mmday^{-1}$ ،  $\delta$  ( $\delta = 1, 2, \dots$ ) پارامتری است که نشان می دهد

تا کجا تخمین رواناب مطلوب می باشد پارامتر  $W$  ( $W = 1, 2, \dots$ )

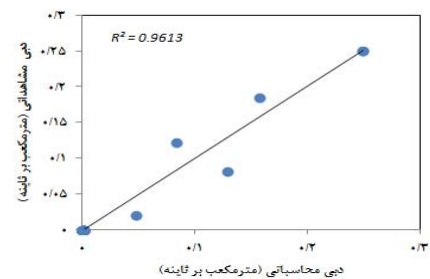
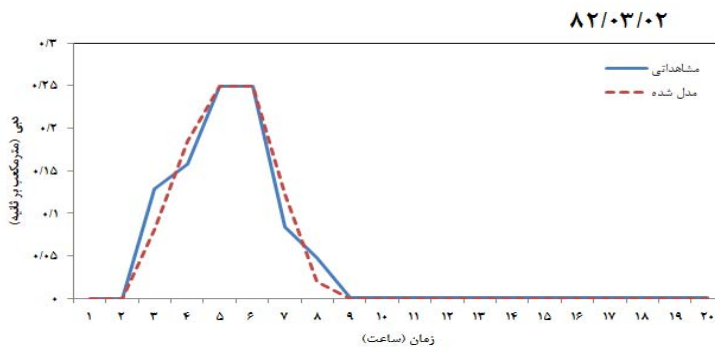
- 1- Crossover
- 2- Mutation
- 3- Reproduction



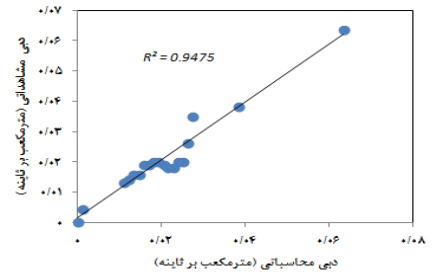
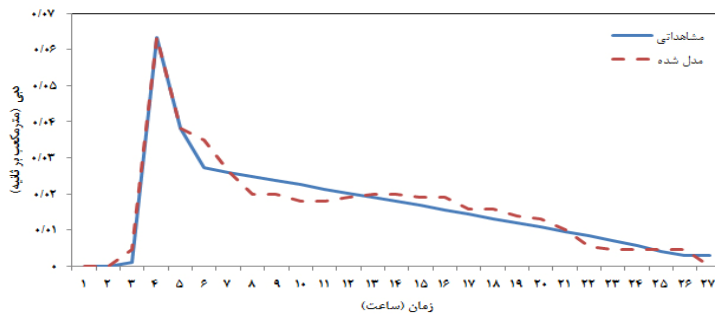
شکل ۴- مروری بر شکل کلی گام های اجرایی برنامه ریزی ژنتیک



شکل ۵- مدل تانک چهار مخزنی توسعه داده شده در فضای Vensim

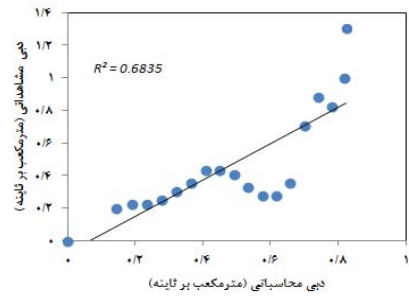
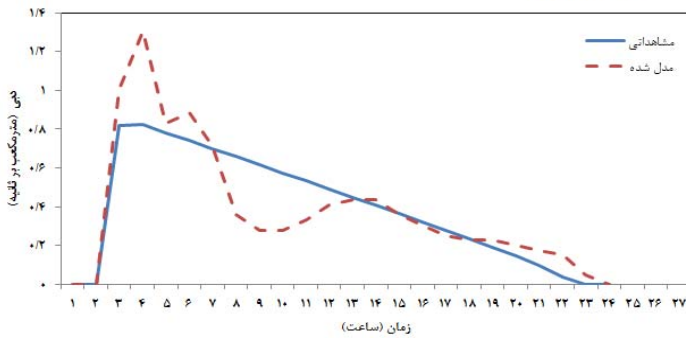


۸۲/۰۳/۰۳

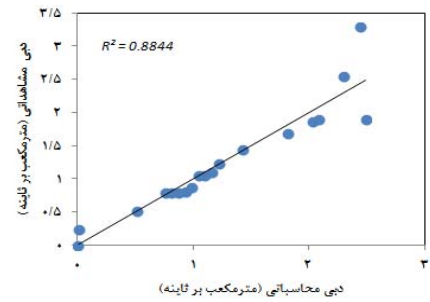
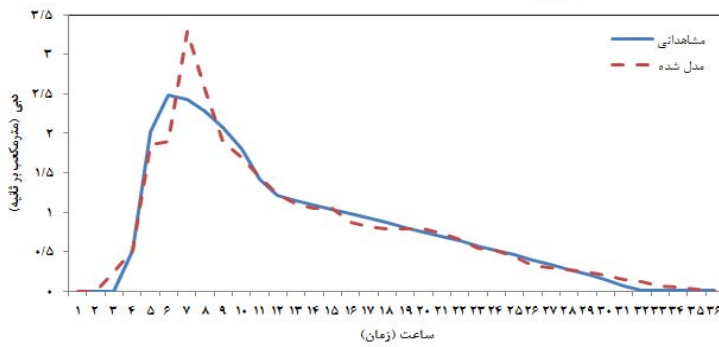


شکل ۶ - مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی دبی (متر مکعب بر ثانیه)

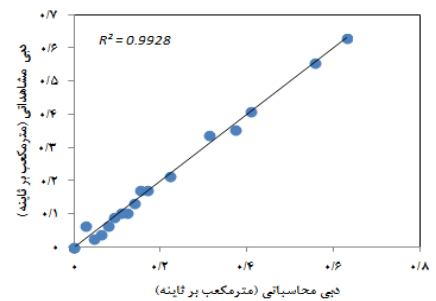
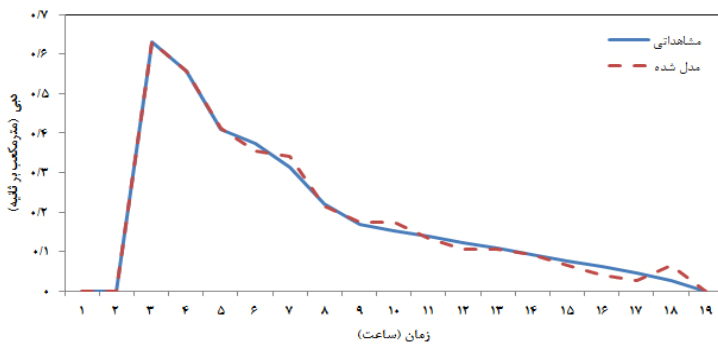
۸۲/۰۳/۲۵

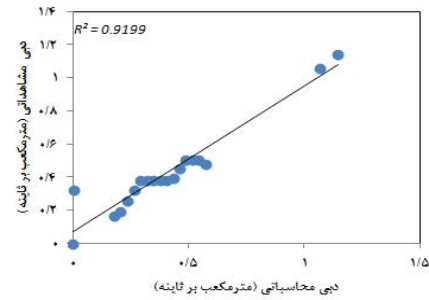
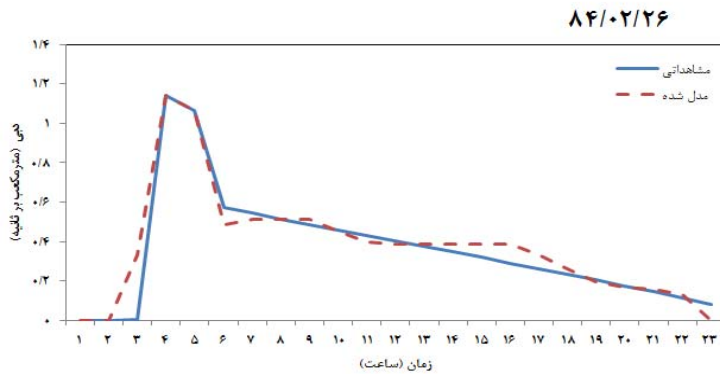


۸۲/۱۲/۱۶



۸۴/۰۲/۲۵





ادامه شکل ۶

جدول ۲- پارامترهای آماری دقت مدل Vensim

رویداد	R <sup>2</sup>	RMSE(m <sup>3</sup> /s)	E <sub>p</sub> (hr)	Q <sub>p</sub> (%)
۸۲/۳/۰۲	۰/۹۶	۰/۰۱۶۳	۰	۰
۸۲/۳/۳۰	۰/۹۴	۰/۰۰۲۷	۰	۰
۸۲/۳/۲۵	۰/۶۸	۰/۱۶۵۴	۱	۵۸
۸۲/۱۲/۱۶	۰/۸۸	۰/۱۹۴۷	۱	۳۲
۸۴/۲/۲۵	۰/۹۹	۰/۰۱۵۱	۰	۰
۸۴/۲/۲۶	۰/۹۱	۰/۰۷۹۲	۰	۰

رابطه بین دبی در زمان  $t$  و بارش و دبی در بازه‌های قبلی در جدول ۴ ارائه شده است. برای یافتن بهترین ترکیب از ورودی‌ها، متغیرهای بارش و دبی با تاخیرهای زمانی متفاوت مورد آزمون قرار گرفتند.

### روند مدل سازی برنامه ریزی ژنتیک

پارامترهای مورد استفاده و نرخ آن‌ها در استخراج مدل شبیه‌سازی بارش - رواناب با استفاده از GP در جدول ۳ به صورت خلاصه ارائه شده است.

جدول ۴- ترکیب‌های مختلف ورودی‌های مدل برنامه ریزی ژنتیک

ترکیب	معادله
یک	$Q_t=f(P_t)$
دو	$Q_t=f(P_t, P_{t-1})$
سه	$Q_t=f(P_t, P_{t-1}, P_{t-2})$
چهار	$Q_t=f(P_t, P_{t-1}, P_{t-2}, P_{t-3})$
پنج	$Q_t=f(P_t, P_{t-1}, P_{t-2}, P_{t-3}, P_{t-4})$
شش	$Q_t=f(P_t, Q_{t-1})$
هفت	$Q_t=f(P_t, P_{t-1}, Q_{t-1})$
هشت	$Q_t=f(P_t, P_{t-1}, P_{t-2}, Q_{t-1})$
نه	$Q_t=f(P_t, P_{t-1}, P_{t-2}, P_{t-3}, Q_{t-1})$
ده	$Q_t=f(P_t, Q_{t-1}, Q_{t-2})$
یازده	$Q_t=f(P_t, P_{t-1}, Q_{t-1}, Q_{t-2})$
دوازده	$Q_t=f(P_t, P_{t-1}, P_{t-2}, Q_{t-1}, Q_{t-2})$
سیزده	$Q_t=f(P_t, P_{t-1}, P_{t-2}, P_{t-3}, Q_{t-1}, Q_{t-2})$

جدول ۳- مقدار پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی بارش - رواناب با استفاده از GP

پارامتر	مقدار
اندازه سر	۸
تعداد کروموزوم	۳
تعداد ژن‌ها	۳۰
نرخ جهش	۰/۰۴۴
نرخ وارون‌سازی	۰/۱
نرخ ترکیب تک نقطه‌ای	۰/۳
نرخ ترکیب دو نقطه‌ای	۰/۳
نرخ ترکیب ژن	۰/۱
نرخ ترانسپوز متوالی	۰/۱
نرخ ترانسپوز ریشه درج متوالی	۰/۱
نرخ ترانسپوز ژن	۰/۱
معیار خطای برازش	RMSE
تابع پیوند	+

در این تحقیق، نرم‌افزار GenXproTools به منظور مدل‌سازی بارش - رواناب حوضه آبریز ليقوان در مقياس زمانی ساعتی به کار



جدول ۵- پارامترهای آماری دقت مدل‌های حاصل از برنامه‌ریزی ژنتیک با ترکیبات مختلف برای رویداد ۸۲/۰۳/۰۲

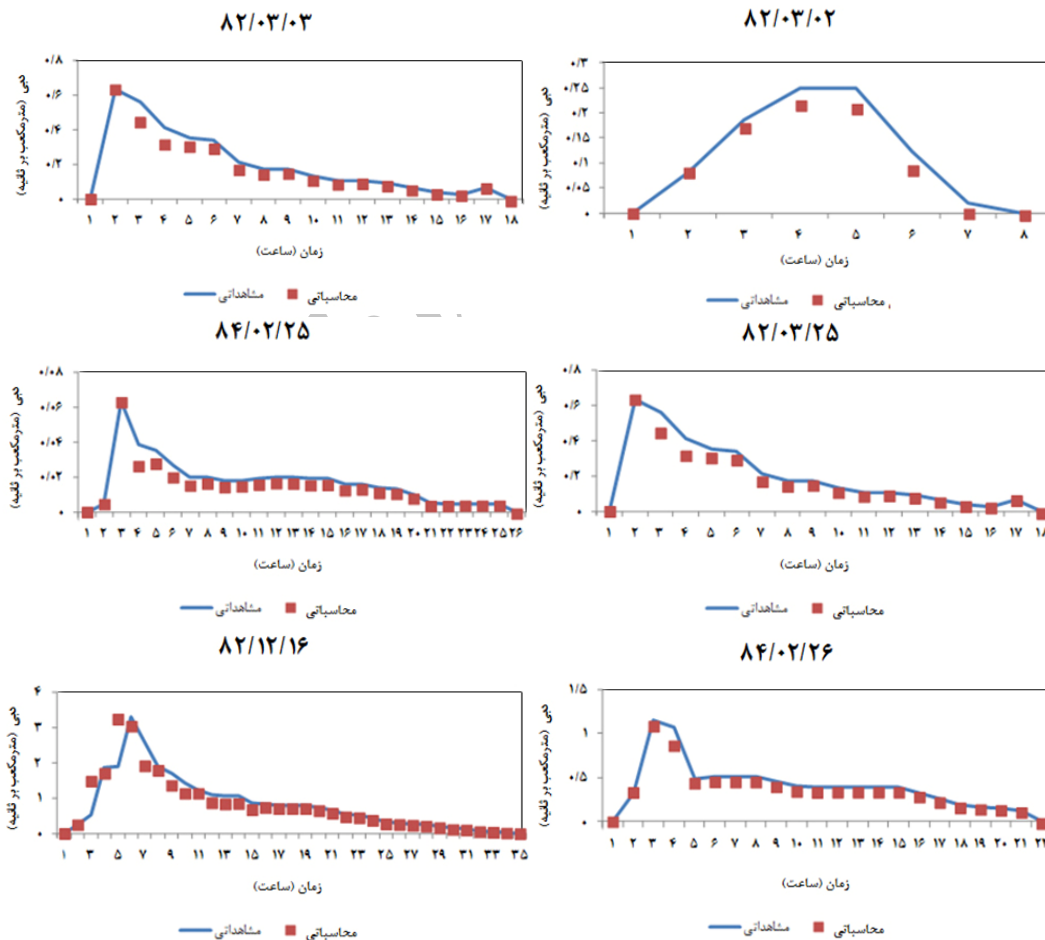
ترکیب	R <sup>2</sup>	RMSE(m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>p</sub> (%)	t <sub>p</sub> (hr)
یک	۰/۲	۰/۲۷	۲۱۳	+۲
دو	۰/۴۳	۰/۴۳	۳۲۲	+۳
سه	۰/۴۳	۰/۲۱	۲۰۱	+۲
چهار	۰/۴۹	۰/۴۱	۳۷۲	+۱
پنج	۰/۰۲	۰/۴۵	۲۲۶	-۱
شش	۰/۵۸	۰/۰۶	-۱	-۱
هفت	۰/۵۱	۰/۰۷	-۱۷	-۱
هشت	۰/۴۰	۰/۱۳	۶۱	+۱
نه	۰/۶۴	۰/۱۹	۲۰۴	+۲
ده	۰/۳۱	۰/۱۱	-۶	+۲
یازده	۰/۶۴	۰/۱۷	۱۱۷	+۱
دوازده	۰/۴۷	۰/۰۷	-۹	.
سیزده	۰/۵۷	۰/۰۶	-۱۳	.

گرفته شد. ۸۰ درصد تعداد داده‌های بارش- رواناب جهت آموزش و ۲۰ درصد باقی‌مانده جهت صحت‌سنجی انتخاب گردید. ضریب همبستگی (R<sup>2</sup>) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) به منظور ارزیابی الگوهای مشارکت ورودی جهت مدل‌سازی بارش- رواناب محاسبه شده و نتایج حاصل از آنها در رویداد تست در جدول ۵ ارائه گردیده است.

شکل ۷ هیدروگراف های مقادیر مشاهداتی و محاسباتی دبی برای رویدادهای مختلف را در دوره آموزش نشان می‌دهد. همان طوری که در اشکال مزبور مشاهده می‌گردد داده‌ها پراکنش مناسبی دارند و مقدار ضریب همبستگی آن‌ها برابر ۰/۹۱ است که مقبولیت مدل‌سازی توسط برنامه‌ریزی بیان ژنتیک را نشان می‌دهد.

از آنجایی که در این روش ترکیب سیزده بهترین ترکیب شناخته شده است، رابطه ریاضی معرفی شده در برنامه‌ریزی ژنتیک به صورت رابطه زیر می‌باشد.

$$Q_t = 0.71Q_{t-2} + Q_{t-2} / (Q_{t-2}^{1.32P_t} - P_{t-3} + 3.69) \quad (5)$$



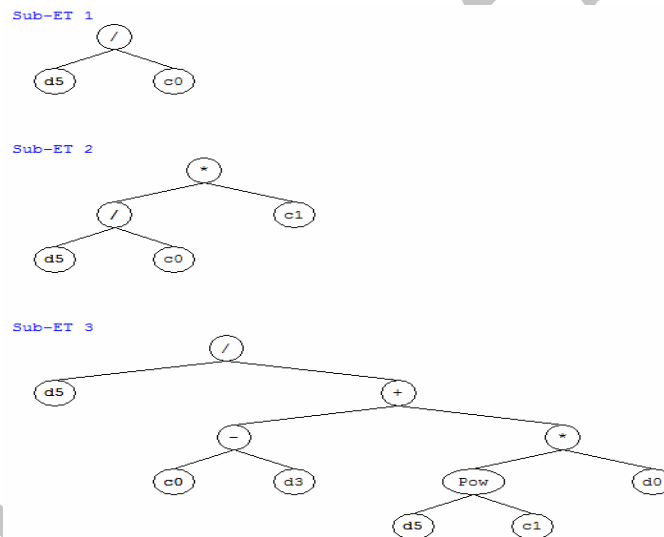
شکل ۷- مقادیر مشاهداتی و محاسباتی دبی در دوره آموزش (مترمکعب بر ثانیه)

ریزی بیان ژن برای شبیه سازی فرایند بارش-رواناب می باشد. روش پویایی سیستم توانایی خوبی در شبیه سازی هیدرولوژیکی دارد و به خوبی قادر است پویایی سیستم ها را درک و آن ها را شبیه سازی و یا پیش بینی کند. نتایج نشان داد که روش پویایی سیستم قادر است وقایع بارش-رواناب ساعتی را به صورت قابل قبولی شبیه سازی کند. این روش در شبیه سازی سیلاب هایی با هیدروگراف ساده تر خیلی موفق تر عمل می کند و در سیلاب هایی با هیدروگراف پیچیده ضعیف تر عمل می کند. مدل چهار مخزنی تنگ توسعه داده شده در این تحقیق توانسته است روند بارش-رواناب را در مقیاس ساعتی به خوبی مدل سازی کند. در روش پویایی سیستم با اینکه که ضریب همبستگی مدل سازی سیلاب برای یکی از رویدادها حدود ۰/۶۸ به دست آمده، برای باقی سیلاب ها بین ۰/۸۸ تا ۰/۹۹ می باشد.

همانطوری که در رابطه بالا دیده می شود دبی سیلاب رابطه غیرخطی با بارش و رواناب در بازه های زمانی قبلی دارد. همچنین می توان از این رابطه نتیجه گرفت که وارد کردن متغیرهای  $P_{t-1}$ ،  $P_{t-2}$ ،  $P_{t-3}$ ،  $P_{t-2}$  و  $Q_{t-2}$  در پیش بینی سیلاب در زمان  $t$  بیشترین تاثیر را دارند. شکل ۸ نمودار درختی بهترین ترکیب را نشان می دهد. در شکل ۸ Sub-ET1، Sub-ET2 و Sub-ET3 به ترتیب ژن ۱، ۲ و ۳ می باشد. در این شکل پارامترهای مربوط به ژن ها به صورت  $d_5=Q_{t-1}$ ،  $d_4=Q_{t-2}$ ،  $d_3=P_t$ ،  $d_2=P_{t-1}$ ،  $d_1=P_{t-2}$ ،  $d_0=P_{t-3}$  مقادیر ثابت به صورت  $G1C1 = -$ ،  $G1C0 = -2.487549$ ،  $G2C1 = -6.028503$ ،  $G2C0 = 4.898896$ ،  $6.028503$ ،  $G3C1 = -6.028503$  و  $G3C0 = -5.838379$  می باشند که  $G1$ ،  $G2$  و  $G3$  بیانگر زیردرخت ۱، ۲ و ۳ است.

## نتیجه گیری

تحقیق حاضر تلاشی برای بررسی روش پویایی سیستم و برنامه



شکل ۸- نمودار درختی بهترین ترکیب

## منابع

- ۱- برهانی داریان ع.، و جوادیان زاده م.م. ۱۳۸۹. تهیه مدل بارش-رواناب به روش تحلیل پویایی سیستم و مقایسه آن با الگوریتم جفت گیری زنبور عسل. همایش ملی یافته های نوین در مهندسی عمران. دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، نجف آباد. ۵-۴ اسفند.
- ۲- پایمزد ش.، ۱۳۸۸. تخصیص بین استانی در حوضه های مشترک با رویکرد دینامیک، مطالعه موردی: حوضه قزل اوزن. رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۳- سلطانی ع.، قربانی م.ع.، فاخری فردا، دربندی ص. و فرسادی زاده د. ۱۳۸۹. برنامه ریزی ژنتیک و کاربرد آن در مدل سازی بارش-رواناب، مجله دانش آب و خاک. جلد ۲۰/۱، شماره ۴، ۷۱-۶۲.
- ۴- فریودنام ن.، قربانی م.ع. و اعلمی م.ت. ۱۳۸۸. پیش بینی جریان رودخانه با استفاده از برنامه ریزی ژنتیک (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه

- لیقوان)، مجله دانش کشاورزی. جلد ۱۹، شماره ۴، ۱۲۳-۱۰۷.
- ۵- یوسفی پ. ۱۳۹۰. گسسته سازی زمانی بار رسوب معلق با استفاده از مدل آبشاری (مطالعه موردی: رودخانه لیقوان). پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز.
- 6-Ahmad S. and Simonovic S.P. 2000. Modeling reservoir operations using system dynamics, *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering*, 14(3), 190-198.
- 7-Babovic V., and Keijzer M. 2002. Rainfall-runoff modeling based on genetic programming, *Nordic Hydrology*, 33(5): 331-346.
- 8-Cousin N., and Savic D.A. 1997. A rainfall-runoff model using genetic programming. Centre for Systems and Control Engineering, Report No. 97/03, School of Engineering, University of Exeter, Exeter, United Kingdom.
- 9-Elshorbagy A., Jutla A., and Kells J. 2007. Simulation of the hydrological processes on reconstructed watersheds using system dynamics, *Hydrological Sciences Journal*, 52(3): 538-562.
- 10-Ghorbani M.A., Khatibi R., Aytak A., Makarynsky O., and Shiri J. 2010. Sea water level forecasting using genetic programming and comparing the performance with Artificial Neural Networks, *Computers & Geosciences*, 36(5): 620-627.
- 11-Keshta N., Elshorbagy A., and Carey S. 2009. A generic system dynamics model for simulating and evaluating the hydrological performance of reconstructed watersheds, *Hydrology and Earth system Science*, 13(6): 865-881.
- 12-Koza J.R. 1992. *Genetic Programming: on the programming of computers by means of natural selection*, Cambridge, MA: MIT Press.
- 13-Lopes H.S. and Weinert W.R. 2004. "EGIPSYS: An enhanced gene expression programming approach for symbolic regression problems". *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 14(3): 375-384.
- 14-Sugawara M. 1995. Tank model In: V.P. Singh (Editor), *Computer models of watershed hydrology*, Chapter 7. Water Resources Publication, 165-214.
- 15-Terzi O. 2012. Daily pan evaporation estimation using gene expression programming and adaptive neural-based fuzzy inference system, *Neural Computing & Applications*, DOI: 10.1007/s00521-012-1027.

Archive of SID

## Efficiency Study of the System Dynamics Model to Simulate The Rainfall – Runoff (Case Study:Lighvan Watershed)

S. Darbandi<sup>1\*</sup>-Y. Dinpajouh<sup>2</sup>-S. Zeinali<sup>3</sup>

Received: 08-06-2013

Accepted: 02-02-2014

### Abstract

Limited of water resources and the sustainable management, has made it impossible water supply of all needs, therefore, in order to supply water are required careful planning with high reliability. For this reason, is more than ever before the importance of water management in the catchment basin. In this study used dynamics model (Vensim) and genetic programming to simulate the process of rainfall - runoff in Lighvan Watershd. The genetic programming model was tested to get the best combination of input model. The results show high accuracy Vensim model in the simulation of rainfall - runoff process than genetic programming. The results indicate that Vensim model for most events have a highly significant correlation of genetic programming, also is predicted peak flow and minimum absolute error.

**Keywords:** Rainfall - Runoff, Genetic programming, Lighvan watershed, System dynamics

Archive of SID

1 ,2,3- Assistant Professor, MSc Student and Associate Professor of Water Engineering Department, University of Tabriz, Respectively

(\*-Corresponding Author Email: sdarbandi.tabrizu@yahoo.com)