نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۸، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۳۹۳، ص. ۱۳۸-۱۲۷

Journal of Water and Soil
Vol. 28, No. 1, Mar.-Apr. 2014, p. 127-138

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

صابره دربندی[1*]- یعقوب دین پژوه[2]- صبا زینالی[3]

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 برنامه‌ریزی‌های دقیق می‌باشد. به همین دلیل اهمیت مدیریت منابع آب در حوضه‌های آبریز بیش از پیش نمایان شده است. در این تحقیق از دو مدل پویایی سیستم (Vensim) و برنامه ریزی ژنتیک برای شبیه سازی فرایند بارش- رواناب در حوضه آبریز لیقوان استفاده گردید. در مدل برنامه ریزی ژنتیک برای بدست آوردن بهترین ترکیب، وروردی های مختلف برای مدل سازی مورد آزمون قرار گرفت. نتایج حاکی از دقت بالای مدل Vensim در شبیه سازی فرایند بارش- رواناب نسبت به مدل برنامه ریزی ژنتیک می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد 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.

واژه‌های کلیدی: بارش- رواناب، برنامه ریزی ژنتیک، حوضه آبریز لیقوان، پویایی سیستم

مقدمه

در سال‌های اخیر با توجه به رشد روزافزون جمعیت، گسترش شهرها و روند صنعتی شدن آن‌ها نیاز به ارائه مدلی که بتواند بارش- رواناب را پیش‌بنی کند الزامی به نظر می‌رسد. نیاز به الگوهای مناسب تبدیل بارش به رواناب در جوامع پیشرفته امروزی در کشاورزی، آبیاری، شرب، بهره‌برداری از مخازن سدها، پیش‌بینی، کنترل و سیستم‌های هشدار سیلاب برای کاهش آسیب‌های مالی و جانی مشهود است. بنابراین داشتن مدلی جهت پیش‌بینی مقادیر برای آینده در تمامی علوم و از آن جمله در رشته مهندسی آب همواره مد نظر بوده است. لذا یکی از راه‌های مطالعه دقیق فرآیند بارش- رواناب استفاده از روش‌های هوشمند در یافتن رابطه بین داده‌های ورودی و خروجی پدیده بارش- رواناب می‌باشد. رویکرد پویایی سیستم‌ها برگرفته از تفکر سیستمی، ابزاری مفید در مدیریت و برنامه‌ریزی‌ها است. تفکر سیستمیک که اساس و مبنای رویکرد پویایی سیستم‌ها به شمار می‌رود، در مقابل تفکر خطی بکار برده می‌شود. پایمزد (۲) 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. فربودنام و همکاران (۴) به پیش بینی جریان روزانه رودخانه لیقوان 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

۱، ۲ و۳- به ترتیب استادیار، دانشیار و دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز
*- نویسنده مسئول: (Email:sdarbandi.tabrizu@yahoo.com)

می‌باشد. سلطانی و همکاران (۳) به مدل سازی بارش–رواناب روزانه حوضه آبریز لیقوان 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 لیقوان و می‌سی سی پی مورد مطالعه قرار داد و نشان داد که می‌توان با الگوی ورودی جریان تا سه روز قبل برای رودخانه می‌سی‌سی‌پی و یک روز قبل برای رودخانه لیقوان 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 ریوگراند در سد فارناس در برزیل، رودخانه نیل در مصر و رودخانه تایت در ایستگاه کامبیکا با استفاده از EGIPSYS بر مبنای مقادیر رواناب پیشین مدل سازی شدند. نتایج نشان دادند که روش پیشنهادی برای مدل سازی سری زمانی مناسب می‌باشد. قربانی و همکاران (۱۰) با استفاده از برنامه ریزی ژنتیک به پیش بینی سطح آب دریا در غرب استرالیا پرداختند. ترزی (۱۵) با استفاده از برنامه ریزی ژنتیک و نروفازی به برآورد تبخیر روزانه تشت 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 لیقوان می‌باشد.

مواد و روش ها

منطقه و داده های مورد استفاده

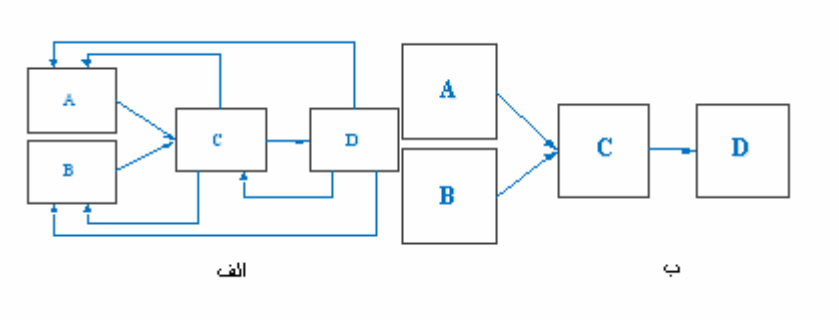
حوضه آبریز لیقوان از زیرحوضه های مهم و معرف حوضه آبریز تلخه رود بوده که با وسعتی معادل ۷۶/۱۹ کیلومتر مربع در استان آذربایجان شرقی در دامنه شمالی سهند ما بین ۴۶ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۲۶ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۵۰ دقیقه عرض شمالی گسترش یافته است. رودخانه لیقوان به عنوان زهکش اصلی حوضه مذکور بوده و جریانات خود را به رودخانه تلخه رود و نهایتاً دریاچه ارومیه تخلیه می‌کند. مهم ترین شاخه های رودخانه عبارتند از بارالله 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 لیقوان می‌باشد. 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 لیقوان ۱۷ کیلومتر با شیب متوسط ۱۱ درصد می‌باشد. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز لیقوان در شکل ۱ نشان داده شده است.

در تحقیق حاضر جهت شبیه‌سازی بارش–رواناب از داده‌های ساعتی شش رویداد رگبار به همراه رواناب ناشی از آن‌ها استفاده گردید. در جدول ۱ مشخصات آماری هرکدام از این سری داده‌ها ارائه شده است.

شکل ۱- موقعیت کلی حوضه آبریز لیقوان در کشور

جدول ۱- مشخصات آماری رویدادهای مورد استفاده

رویداد	مدت زمان بارش (ساعت)	مدت زمان سیلاب (ساعت)	حداکثر بارش (میلی‌متر)	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

پویایی سیستم

رویکرد پویایی سیستم‌ها برگرفته از تفکر سیستمی، ابزاری مفید در مدیریت و برنامه‌ریزی‌ها است. تفکر سیستمی که اساس و مبنای رویکرد پویایی سیستم‌ها به شمارمی‌رود، درمقابل تفکر خطی بکار برده می‌شود. تفکر حاکم بر سیستم خطی در شکل ۲(الف) نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود در تفکر خطی پدیده‌ها یا متغیرهای A و B به صورت خطی بر C تاثیر گذاشته و در نهایت تاثیر C بر متغیر D دیده می‌شود. در حالی که در واقعیت پدیده‌ها 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 آن‌ها در طول زمان می‌گردد. این تفکر سیستمی همان است که در شکل ۲(ب) دیده می‌شود.

اصول پویایی سیستم

از مهم ترین اصولی که رویکرد پویایی سیستم ها برآن استوار است، این است که ساختار سیستم درطول زمان الگوهای رفتاری آن را ایجاد می کند. این موضوع درتحلیل رفتار سیستم موردنظر، اهمیت ویژه‌ای دارد. در واقع در این روش مهم‌ترین اصل پس از درک چگونگی ایجاد پویایی ها، یافتن سیاست‌هایی 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 می‌شوند. اساساً در هر سیستمی دو نوع ساختار بازخوردی بنیادی وجود دارد: بازخوردهای مثبت و منفی. بازخورهای مثبت منجر به تقویت هرآن چه در سیستم رخ می‌دهد، می‌شوند و بازخوردهای منفی در جهت تعادل اتفاقات داخلی سیستم رفتار می‌کنند.

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 علّی شامل حلقه های مثبت و منفی بوده و تاثیر متقابل آنها، سیستم‌های پیچیده را تشکیل می‌دهند. حلقه‌های بازخوردی منفی در جهت تعادل در سیستم و تعدیل تغییرات، نقش ایفا می‌نمایند. همچنین سیستم ها شامل حلقه های بازخوردی مثبت نیز هستندکه 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 علّی است. پویایی سیستم با تاکید برنگرش به درون سیستم، مسائل را به عنوان موضوعاتی که توسط عوامل بیرونی ایجاد شده‌اند، نمی‌بیند، بلکه مسائل به مثابه موضوعاتی تلقی می‌شوند که توسط ساختار درونی سیستم ایجاد می‌شوند.

دیدگاه کل نگر

روش پویایی سیستم نمایی کل نگر از وضعیتی که مسئله درآن رخ داده است، ایجاد می کند. این روش توجه خود را از نشانه‌های مسئله به علل ریشه‌ای آن معطوف می‌سازد 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 می‌شوند.

اصول مدل‌سازی با رویکرد پویایی‌های سیستم

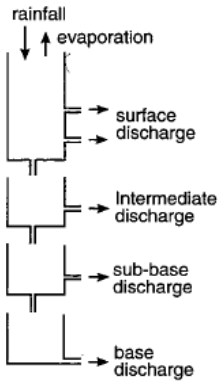
مسائل موجود در پویایی سیستم از دو ویژگی پویایی و ساختار بازخوردی برخوردارند. براساس ویژگی پویایی، ابعاد کمی و کیفی سیستم در طول زمان دستخوش تغییر هستند و در فرآیند تحول

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 پروفسور کروود[1] در دانشگاه ایالتی آریزونا توسعه پیدا کرده‌است 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[2] در نظر گرفته می‌شود. آب خروجی از مخزن سوم رواناب حاصل از جریان زیرسطحی فرض می‌شود. در انتها خروجی مخزن چهارم به رواناب پایه[3] معروف است.



شکل ۳- شکل شماتیک مدل تانک چهار مخزنی

مدل تانک می‌تواند به خاطر ساختار غیرخطی‌اش 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

مدلی که مورد بحث قرار گرفت مدل معروف سوگوآرا 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 هریک از خروجی‌ها از رابطه زیر بدست می آید:

$$Q = A\sqrt{2gh} \qquad (۱)$$

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

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 قرار گیری 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 نظرگرفته می‌شود.

برنامه‌ریزی ژنتیک(GP)

برنامه ریزی 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 می‌باشد. 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 (۱۲) . قبل از مراحل اجرایی برنامه ریزی ژنتیک گام های مقدماتی زیر باید توسط کاربر تعیین شوند.

مجموعه ترمینال ها (متغیّر هـای مـسئله، اعـداد ثابـت تـصادفی)، ۲. مجموعه عملگرهای ریاضی مورد استفاده در فرمـول هـا، ۳. انتخـاب تابع برازش، برای سنجش برازش فرمـول هـا، ۴. تعیـین پارامترهـای کنترل کننده اجرای برنامـه (انـدازه جمعیـت، احتمـال مربـوط بـه بـه کارگیری عمل های ژنتیکی و جزئیات دیگر مربوط به اجرای برنامـه). ۵. معیار پایان و ارائه نتایج اجرای برنامه (مثـل، تعـداد تولیـد جمعیـت 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 اسـت: ۱. تولیـد یک جمعیت اولیه از فرمول ها که این فرمول ها از ترکیـب تـصادفی مجموعه توابع (عملگرهای ریاضـی مـورد اسـتفاده در فرمـول هـا) و ترمینال‌ها (متغیّرهای مسئله و اعداد ثابت) ایجاد می‌شوند، ۲. هر یـک از افراد جمعیت مذکور با استفاده از توابع بـرازش مـورد ارزیـابی قـرار می‌گیرند، ۳. تولید یک جمعیت جدید از فرمول هـا، کـه مراحـل زیـر برای تولید یک جمعیت جدید دنبال می‌شود: الف. یکی از عمل هـای ژنتیکی تلاقی[1]، جهش[2] و تولید مثل[3] انتخاب می‌شود (این سه عمـل ژنتیکی، مهم ترین عمل های ژنتیکی مورد استفاده در برنامـه ریـزی ژنتیک می‌باشند. عمل های دیگری مثل اصـلاح سـاختار و... نیـز بـا احتمال کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.)، ب. تعداد مناسـبی از افـراد جمعیت حاضر انتخاب می‌شوند (انتخـاب فـرد یـا افـرادی از جمعیـت مذکور به صورت احتمالاتی می‌باشد کـه در ایـن انتخـاب احتمـالاتی منفردهای با برازش بهتر به منفردهای نامرغوب ترجیح داده می‌شـوند و این بدان معنی نیست که حتماً منفردهای نامرغوب حذف می‌شوند)، ج. از عمل ژنتیکی انتخاب شـده بـرای تولیـد فرزنـد (فرمـول جدیـد) استفاده می‌شود، د. فرزند (فرمول جدید) تولید شـده در یـک جمعیـت جدید وارد می‌شود، ه. مدل مورد نظر با استفاده از تـابع بـرازش مـورد ارزیابی واقع می‌شود. ۴. گام سوم تا نیل به حداکثر تعداد تولید، تکـرار خواهد شد. طرح کلی گام های اجرایی برنامه ریزی ژنتیک درشکل ۴ نشان داده شده است.

برنامه‌ریزی ژنتیک بین متغیرهای ورودی و خروجـی رابطـه‌ای را برقرار می‌کند، لذا رابطه علت و معلولی فرآیند بارش- رونـاب در ایـن تحقیق به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$Q_{t+\delta\Delta t} = f(R_t, R_{t-\Delta t}, \ldots, R_{t-W\Delta t}, Q_t, Q_{t-\Delta t}, \ldots, Q_{t-W\Delta t}) \qquad (۲)$$

کـه در آن Q رونـاب بـر حـسب $m^3 s^{-1}$، R شـدت بـارش $mmday^{-1}$، δ $(\delta = 1,2,\ldots)$ پارامتری است که نشان می‌دهد تا کجا تخمین رواناب مطلوب می‌باشد پارامتر W $(W = 1,2,\ldots)$ نشان دهنده اینست که تا کجا داده های رواناب و بارش روی تخمین رواناب با فواصل زمانی Δt تأثیر دارد.

شاخص های تعیین دقت مدل

شاخص های آماری ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا به منظور بررسی و ارزیابی دقت مدل ها مـورد اسـتفاده واقـع شـدند. شاخص های یاد شده به ترتیب با استفاده از روابط زیر قابـل محاسـبه می باشند:

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(Q_i^O - \overline{Q}^O\right)\left(Q_i^E - \overline{Q}^E\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(Q_i^O - \overline{Q}^O\right)^2 \sum_{i=1}^{N} \left(Q_i^E - \overline{Q}^E\right)^2}} \right)^2 \qquad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(Q_i^E - Q_i^O\right)^2}{N}} \qquad (۴)$$

در روابـط بـالا، Q_i^O و Q_i^E بـه ترتیـب مقـادیر دبـی مـشاهداتی و محاسباتی در گام زمانی i ام بوده و $\overline{Q}^O$ و $\overline{Q}^E$ نیز میـانگین مقـادیر مشاهداتی و محاسباتی دبـی مـی باشـد. N نیـز نـشانگر تعـداد داده هاست.

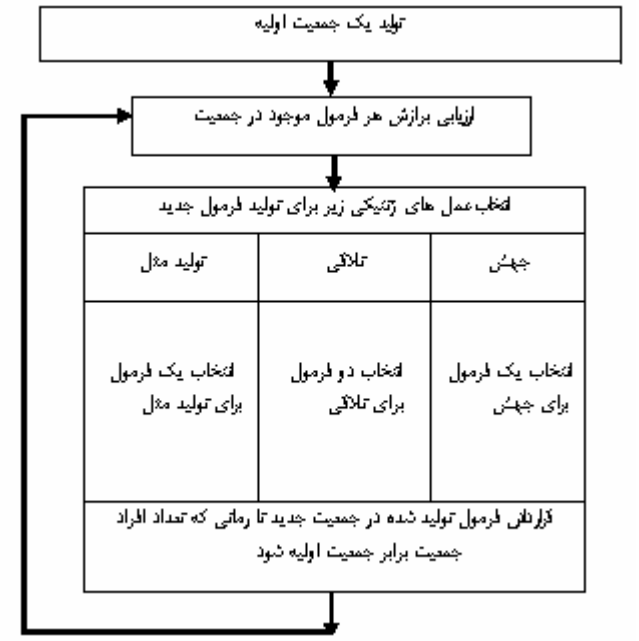
نتایج و بحث

روند مدل‌سازی پویایی فرآیند بارش- رواناب

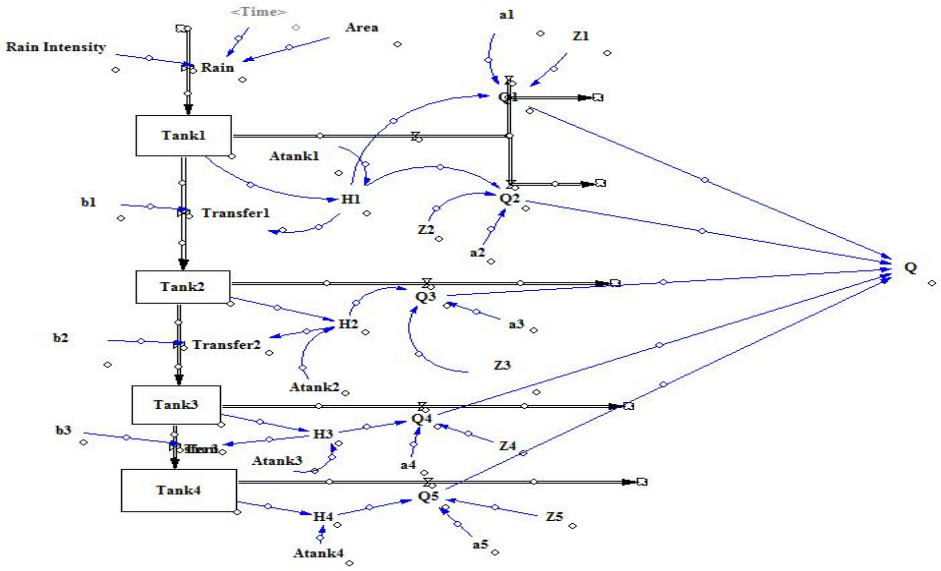
مدل به کار گرفته شده در این تحقیـق بـرای شـناخت پویـایی و توسعه آن به زبان پویایی سیستم مدل تانک چهار مخزنی ساده است. شکل ۵ مـدل توسـعه داده را در فـضای نـرم‌افـزار Vensim نـشان می‌دهد.

شکل ۶ نتایج مـدل‌سـازی بـارش - رونـاب بـه وسـیله رویکـرد پویایی‌های سیستم را نشان می‌دهد. همانطوری که در شـکل مـذکور دیده می‌شود به جز رویـداد ۸۲/۰۳/۲۵ مـدل توانـسته اسـت بـارش- رواناب را به خوبی شبیه‌سازی کند. همچنین دیده می‌شود که مدل به غیر از رویدادهای ۸۲/۰۳/۲۵ و ۸۲/۱۲/۱۶ توانسته اسـت بـه خـوبی زمان و مقدار اوج وقوع سـیلاب را پـیش‌بینـی کنـد. بـرای مطالعـه و مقایسه عملکرد مدل‌ها شاخص های آماری ضریب همبستگی و جـذر میانگین مربعات خطا به منظور بررسی و ارزیابی دقت مدل هـا مـورد استفاده واقع شـدند. جـدول۲ مقـادیر معیارهـای ارزیـابی مـدل را در شبیه‌سازی بارش- رواناب برای هر رویداد نشان می‌دهد.

1- Crossover
2- Mutation
3- Reproduction

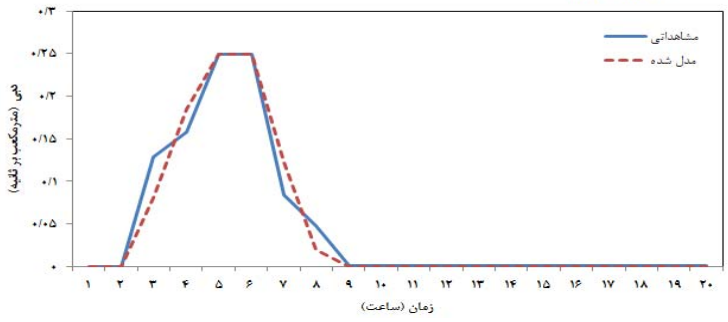


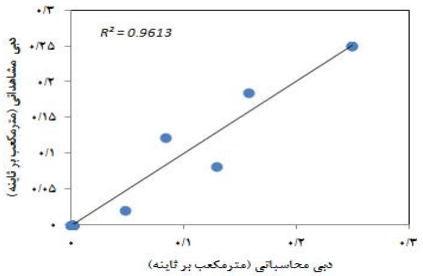
شکل ٤- مروری بر شکل کلی گام های اجرایی برنامه ریزی ژنتیک



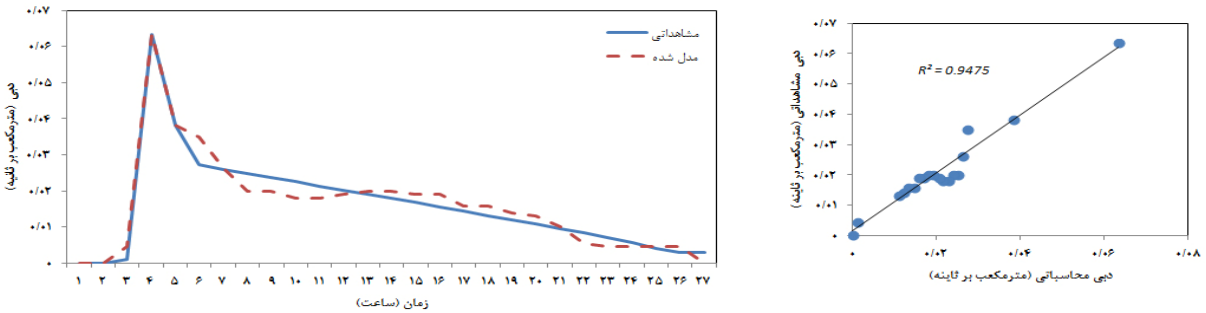
شکل ٥- مدل تانک چهار مخزنی توسعه داده شده در فضای Vensim

۸۲/۰۳/۰۲



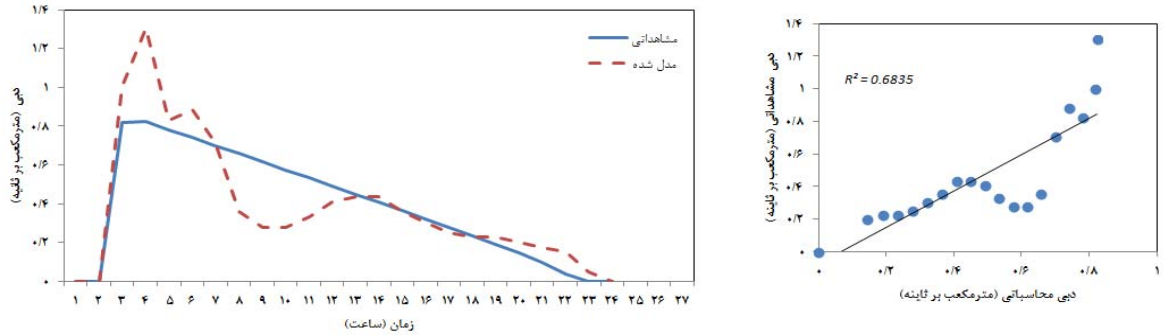


۸۲/۰۳/۰۳

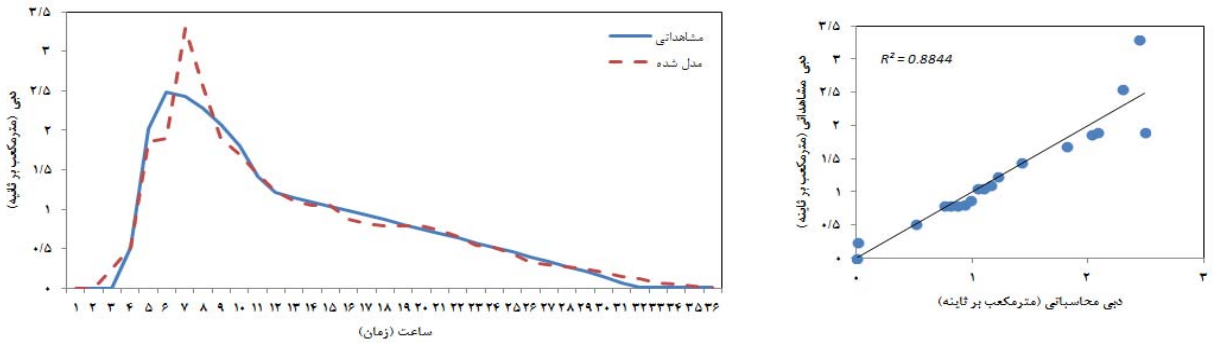


شکل ٦ - مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی دبی (متر مکعب بر ثانیه)

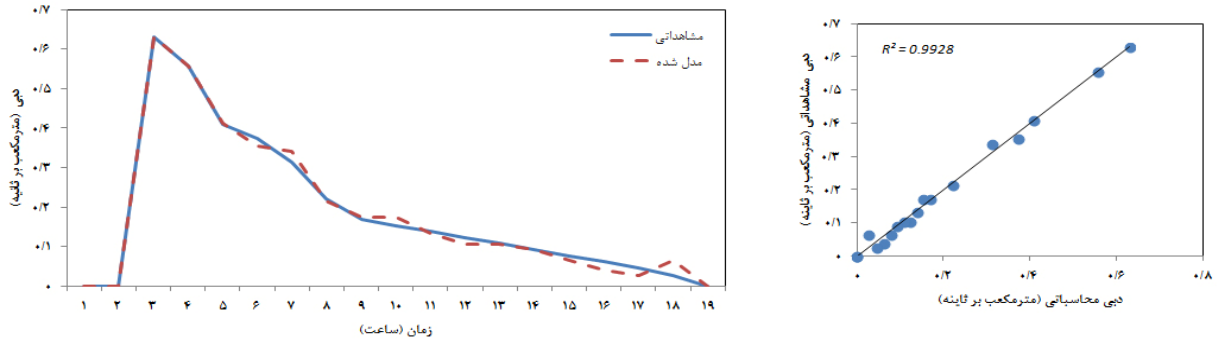
۸۲/۰۳/۲۵

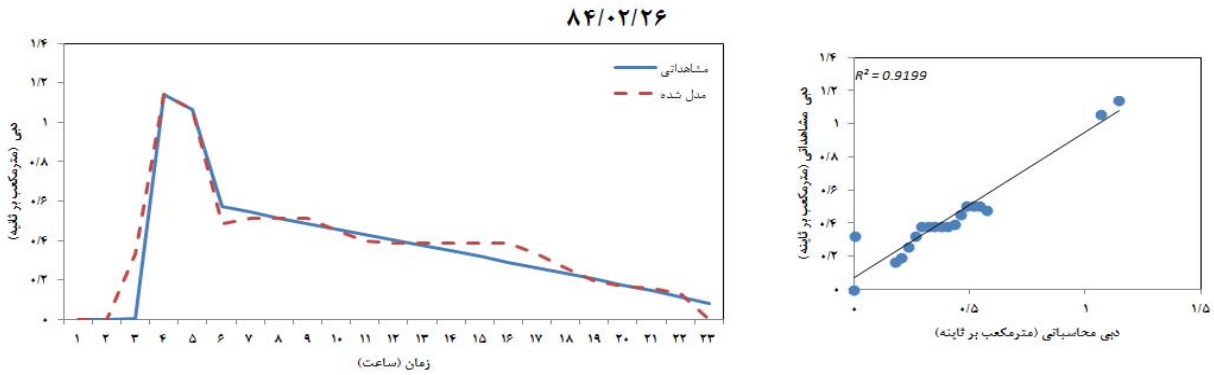


۸۲/۱۲/۱۶



۸۴/۰۲/۲۵





ادامه شکل ٦

جدول۲- پارامترهای آماری دقت مدل Vensim

رویداد	R^2	RMSE(m^3/s)	E_p(hr)	Q_p(%)
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

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.

جدول۳- مقدار پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی بارش- رواناب با استفاده از GP

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

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.

جدول٤- 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	$Q_t=f(P_t, P_{t-1}, P_{t-2}, P_{t-3}, Q_{t-1}, Q_{t-2})$

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

گرفته شد. ۸۰ درصد تعداد داده‌های بارش- رواناب جهت آموزش و ۲۰ درصد باقی‌مانده جهت صحت‌سنجی انتخاب گردید. ضریب همبستگی (R^2) 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.

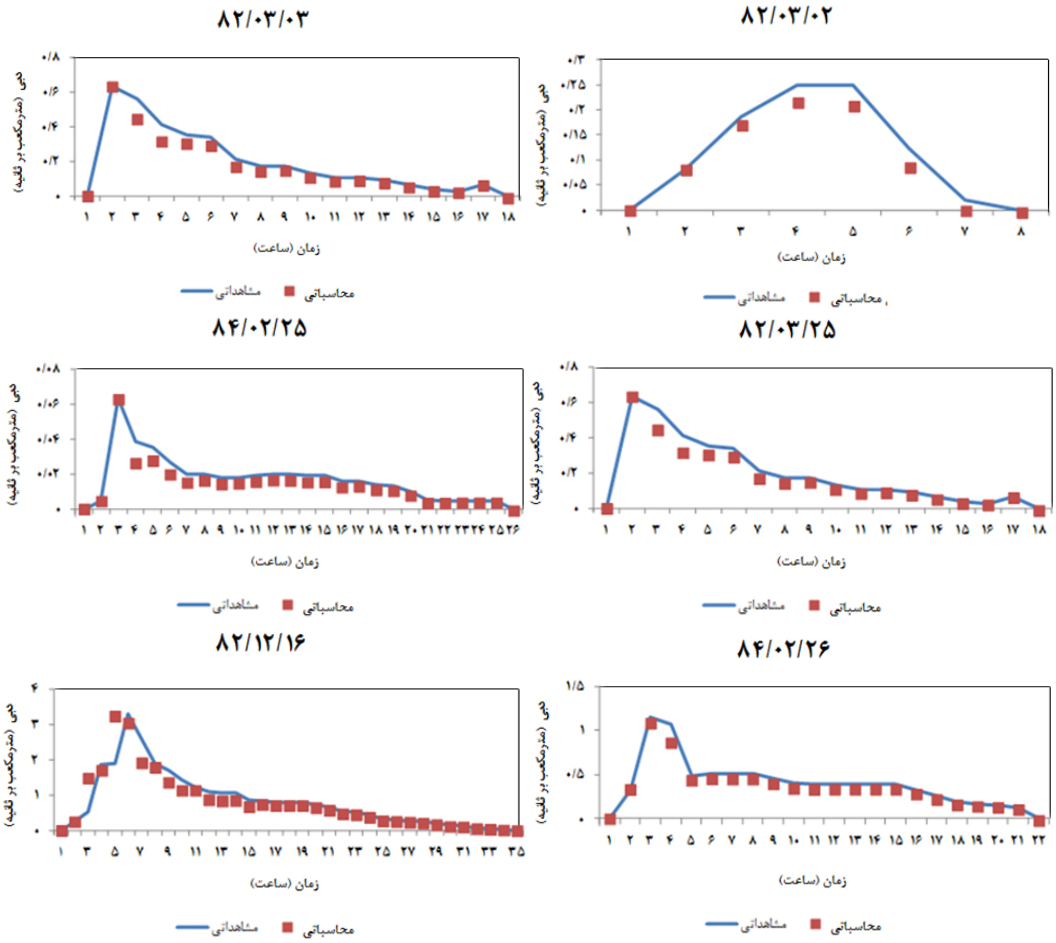
شکل ۷ هیدروگراف های مقادیر مشاهداتی و محاسباتی دبی برای رویدادهای مختلف را در دوره آموزش نشان می‌دهد. همان طوری که در اشکال مزبور مشاهده می‌گردد داده‌ها پراکنش مناسبی دارند و مقدار ضریب همبستگی آن‌ها برابر ۰/۹۱ است که مقبولیت مدل‌سازی توسط برنامه‌ریزی بیان ژنتیک را نشان می‌دهد.

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.

$$Q_t=0.71Q_{t-2}+Q_{t-2}/(Q_{t-2}{}^{1.32P}{}_t-P_{t-3}+3.69)) \quad (۵)$$

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

ترکیب	R^2	RMSE(m^3/s)	Q_p(%)	t_p(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	۰
سیزده	۰/۵۷	۰/۰۶	−۱۳	۰

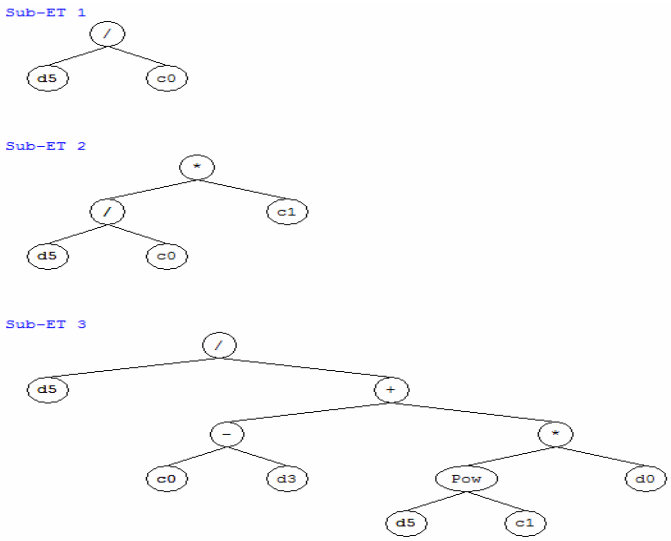


شکل ۷- مقادیر مشاهداتی و محاسباتی دبی در دوره آموزش(مترمکعب بر ثانیه)

همانطوری که در رابطه بالا دیده می‌شود دبی سیلاب رابطه غیرخطی با بارش و رواناب در بازه‌های زمانی قبلی دارد. همچنین می‌توان از این رابطه نتیجه گرفت که وارد کردن متغیرهای P_t، P_{t-1}، P_{t-2}، P_{t-3} و Q_{t-2} در پیش‌بینی سیلاب در زمان t بیشترین تاثیر را دارند. شکل ۸ نمودار درختی بهترین ترکیب را نشان می‌دهد. 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 $d_0=P_{t-3}$ ، $d_1=P_{t-2}$، $d2=P_{t-1}$، $d3=P_t$، $d4=Q_{t-2}$ ، $d5=Q_{t-1}$ و مقادیر ثابت به صورت G1C1 = -6.028503، G1C0 = -2.487549، G2C1 = -6.028503، G2C0 = 4.898896، G3C0 = -5.838379و G3C1 = -6.028503 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 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 شبیه‌سازی کند. این روش در شبیه‌سازی سیلاب‌هایی با هیدروگراف ساده‌تر خیلی موفق‌تر عمل می‌کند و در سیلاب‌هایی با هیدروگراف پیچیده ضعیف‌تر عمل می‌کند. مدل چهار مخزنی تانک توسعه داده شده در این تحقیق توانسته است روند بارش–رواناب را در مقیاس ساعتی به خوبی مدل‌سازی کند. در روش پویایی سیستم با اینکه که ضریب همبستگی مدل‌سازی سیلاب برای یکی از رویدادها حدود ۰/۶۸ به دست آمده، برای باقی سیلاب‌ها بین ۰/۸۸ تا ۰/۹۹ می‌باشد.



شکل ۸- نمودار درختی بهترین ترکیب

منابع

۱- برهانی داریان ع.، و جوادیان‌زاده م.م. ۱۳۸۹. تهیه مدل بارش- رواناب به روش تحلیل پویایی سیستم و مقایسه آن با الگوریتم جفت‌گیری 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 حوضه‌های مشترک با رویکرد دینامیک، مطالعه موردی: حوضه قزل اوزن. رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.

۳- سلطانی ع.، قربانی م.ع.، فاخری‌فرد ا.، دربندی ص. و فرسادی‌زاده د. ۱۳۸۹. برنامه‌ریزی ژنتیک و کاربرد آن در مدل‌سازی بارش- رواناب، مجله دانش آب و خاک. جلد۲۰/۱، شماره ۴، ۷۱-۶۲.

۴- فربودنام ن.، قربانی م.ع. و اعلمی م.ت. ۱۳۸۸. پیش‌بینی جریان رودخانه با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه

لیقوان)، مجله دانش کشاورزی. جلد ۱۹، شماره ۴، ۱۲۳- ۱۰۷.
۵- یوسفی پ. ۱۳۹۰. گسسته‌سازی زمانی بار رسوب معلق با استفاده از مدل آبشاری (مطالعه موردی: رودخانه لیقوان). پایان‌نامه 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 geneticprogramming. 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 onreconstructed watersheds using system dynamics, Hydrological Sciences Journal, 52(3): 538-562.
10-Ghorbani M.A., Khatibi R., Aytek A., Makarynskyy 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 thehydrological 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.

Journal of Water and Soil
Vol. 28, No. 1, Mar.-Apr. 2014, p. 127-138

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۸، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۳۹۳، ص. ۱۳۸-۱۲۷

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

S. Darbandi[1*]-Y. Dinpajouh[2]-S. Zeinali[3]

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

1 ,2,3- Assistant Professor, MSc Student and Associate Professor of Water Engineering Depatment, University of Tabriz, Respectively
(*-Corresponding Author Email: sdarbandi.tabrizu@yahoo.com)