# برآورد رواناب حوضه آبریز کسیلیان با استفاده از روش برنامه‌ریزی بیان ژن

**صمد امامقلی‌زاده[1,*]، راضیه کریمی دمنه[2]، حامد مهدی پناه[3]**

۱- دانشیار گروه آب و خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- مدیرعامل شرکت مهندسی آبدیس سازه شرق

(s_gholizadeh517@yahoo.com)

## چکیده

برآورد صحیح دبی رودخانه از جمله موارد مهم در مدیریت منابع آب، هیدرولوژی، مهندسی رودخانه، حفاظت خاک و هیدرولیک می‌باشد. در این پژوهش، عملکرد روش برنامه‌ریزی بیان ژن، به‌عنوان روشی هوشمند و نوین، جهت برآورد بارش رواناب حوضه آبریز کسیلیان، مورد بررسی قرار گرفته است. به‌این منظور، اطلاعات هواشناسی حوضه شامل متوسط بارش، دما، تبخیر، ساعات آفتابی و رطوبت، به‌صورت ماهانه، متعلق به سال‌های ١٣٧۶ تا ١٣٨٨ از ایستگاه هواشناسی سنگده جمع‌آوری و به‌عنوان ورودی مدل استفاده گردید. هم‌چنین، اطلاعات متناظر دبی جریان نیز، مربوط به ایستگاه هیدرومتری کیاکلا، به‌عنوان خروجی مدل، استفاده شد. مدل برنامه‌ریزی بیان ژن، با ٣ ژن و ٣٠ کروموزوم اجرا شد. ٨٠٪ داده‌ها برای آموزش و ٢٠٪ برای آزمون مدل در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد مدل مذکور با ضریب همبستگی ٠/۶٣۵، جذر میانگین مربعات خطای ٠/٢٣۴ مترمکعب بر ثانیه و متوسط خطای مطلق ٠/١٩٨ مترمکعب بر ثانیه، در بخش آزمون، از توانایی قابل قبولی در برآورد بارش رواناب حوضه آبریز کسیلیان، با استفاده از پارامترهای هواشناسی و هیدرولوژیکی برخوردار است.

**واژگان کلیدی:** بارش رواناب، برنامه‌ریزی بیان ژن، رودخانه تالار، آبدهی رودخانه، حوضه کسیلیان.

## ١- مقدمه

مدل‌سازی بارش رواناب در یک حوضه آبخیز، نقش مهمی در طراحی و بهینه‌سازی مخازن آبی و مدیریت منابع آب در دوره‌های خشکسالی ایفا می‌نماید. برآورد حجم آب خروجی از حوضه، که رواناب حوضه نامیده می‌شود، در طراحی سازه‌های آبی، تعیین حداقل آب در دسترس کشاورزی، صنعت، پروژه‌های برقابی و طراحی شبکه‌های آبیاری و زهکشی، کاربرد گسترده دارد. فرایند بارش رواناب، تابعی غیرخطی وابسته به پارامترهای هیدرولوژیکی متفاوت، شدت بارش، تبخیر، خصوصیات ژئومورفولوژیکی حوضه، نفوذ، نشست ذخایر آبی و تعاملات آب زیرزمینی و آب سطحی می‌باشد و به‌سادگی قابل پیش‌بینی نیست (کیسی و همکاران، ٢٠١٣: ١). به‌جهت اهمیت موضوع، طی دو دهه اخیر، تلاش‌های گسترده‌ای توسط محققین، به‌منظور دستیابی به روشی هرچه دقیق‌تر در برآورد بارش رواناب، اجرا گردیده‌است. به‌طور کلی، روش‌های تعیین بارش رواناب حوضه به دو دسته تقسیم می‌شود: دسته اول، مدل‌سازی مبتنی بر دانش و دسته دوم مدل‌سازی براساس داده می‌باشد. مدل‌های دانش محور، با توصیف یک فرایند هیدرولوژیکی پیچیده در حوضه، بر خصوصیات و قوانین فیزیکی حوضه از جمله شیب، شکل حوضه، شدت و مدت بارش، توپوگرافی، کاربری اراضی، خصوصیات خاک و شرایط اقلیمی حوضه، اتکا دارند. بدیهی است دستیابی به تمام این اطلاعات، به‌سادگی امکان‌پذیر نیست. لذا، استفاده از روش داده محور، طی دهه‌های اخیر در مدل‌سازی بارش رواناب، پیشرفت چشم‌گیری داشته‌است. در این روش،



Archive of SID

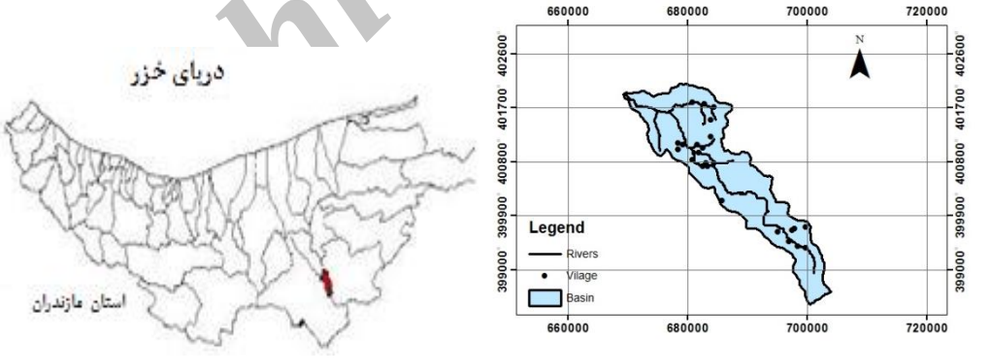
www.SID.ir

اطلاعاتی مورد استفاده قرار می‌گیرند که به‌صورت ضمنی درون داده‌های هیدرولوژیکی وجود دارند. اگرچه این روش توانایی تفسیر دقیق خصوصیات فیزیکی حوضه را ندارد، اما از توانمندی قابل قبولی در برآورد بارش رواناب حوضه برخوردار است (پورنعمت رودسری و همکاران، ۱۳۹۳: ۲). از آن جمله می‌توان به روش‌های هوشمند مانند شبکه عصبی مصنوعی[1]، سیستم استنتاجی تطبیقی عصبی فازی[2] و ماشین بردار پشتیبان[3] اشاره کرد که طی دهه‌های اخیر، به‌طور قابل توجهی پاسخ‌گوی مسایل مهندسی آب، از جمله مدل‌سازی بارش رواناب، بوده‌اند (زکریا و همکاران، ۲۰۱۰: ۸-۱). در این میان می‌توان به پژوهش‌های جهانگیر و همکاران، ۱۳۸۷؛ سروری و همکاران، ۱۳۹۰؛ غوس و همکاران، ۲۰۱۳؛ قربانی و همکاران، ۱۳۹۴، چاندوانی و همکاران، ۲۰۱۵ و کومار و همکاران، ۲۰۱۶؛ اشاره کرد. در این مطالعات، بارش رواناب حوضه به‌شکلی موفق، با استفاده از روش‌های هوشمند، پیش‌بینی و مدل‌سازی گردیده‌است. یکی دیگر از روش‌های هوشمند، روش برنامه‌ریزی بیان ژن[4] می‌باشد که طی دهه اخیر نتایج موفقی را در مدل‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای هیدرولیکی و حل مسایل غیرخطی مهندسی آب ارائه نموده‌است. از آن‌جمله می‌توان به پژوهش‌های عظمت‌الله و همکاران، ۲۰۱۱؛ روشنگر و همکاران، ۲۰۱۴؛ امامقلی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۵ و بیات و همکاران، ۱۳۹۴؛ اشاره کرد که پژوهش‌هایی را در زمینه توسعه منحنی دبی اشل، برآورد بار بستر، تعیین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و تعیین دبی رسوبات معلق ارائه کردند. هم‌چنین، می‌توان به نتایج مطالعات کیسی و همکاران، ۲۰۱۳ در مدل‌سازی بارش رواناب به‌کمک GEP اشاره کرد. پژوهش‌های مذکور، موید توانایی روش برنامه‌ریزی بیان ژن، در حل مسایل هیدرولوژیکی و هیدرولیکی مهندسی آب می‌باشد. در این مقاله، مدل‌سازی بارش رواناب رودخانه تالار واقع در حوضه آبریز کسیلیان به‌کمک روش برنامه‌ریزی بیان ژن، مورد بررسی قرار گرفته‌است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، اطلاعات بارش، دما، تبخیر، ساعات آفتابی و رطوبت از ایستگاه هواشناسی سنگده و اطلاعات دبی جریان مربوط به ایستگاه هیدرومتری کیاکلا، به‌صورت ماهانه و مربوط به سال‌های ۱۳۷۶ تا ۱۳۸۸ جمع‌آوری گردید. ایستگاه‌های مزبور در حوضه آبریز کسیلیان، بر روی رودخانه تالار قرار گرفته اند. حوضه آبریز کسیلیان با مساحت ۱۷۷۶ کیلومترمربع، در استان مازندران (۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۵۸ دقیقه شمالی، ۳۴ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۱۴ دقیقه شرقی) واقع شده‌است (شکل ۱).




**شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز کسیلیان در استان مازندران**

### ۲-۲- روش برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

[1]- Artificial Neural Network (ANN)

[2]- Adaptive Neural Inference Fuzzy System (ANFIS)

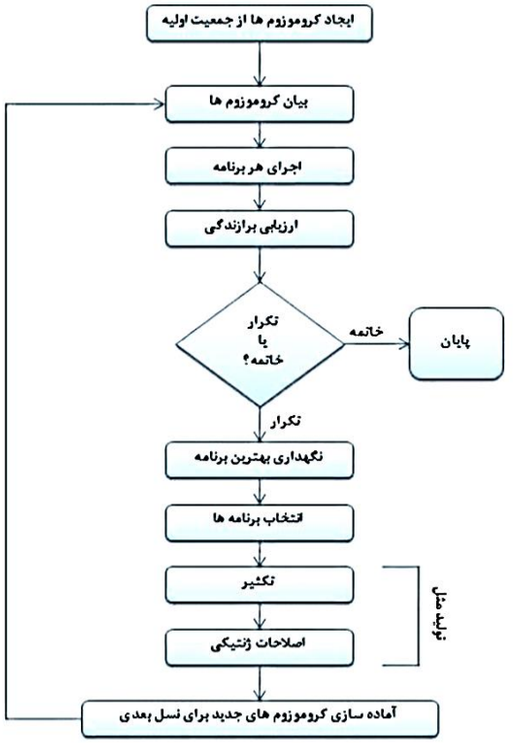
[3]- Support Vector Machine (SVM)

[4]- Gene Expression Programming (GEP)



www.SID.ir

روش برنامه‌ریزی بیان ژن، ترکیب و توسعه یافته دو روش الگوریتم ژنتیک[1] و برنامه‌ریزی ژنتیک[2] است که در سال ١٩٩٩ توسط فریرا ابداع شد (فریرا، ٢٠٠١ب: ١٢٩-٨٧). در این روش، کروموزوم‌های خطی و ساده با طول ثابت، مشابه با الگوریتم ژنتیک و ساختارهای شاخه‌ای با اندازه و اشکال متفاوت، مشابه با درختان تجزیه در برنامه‌ریزی ژنتیک، ترکیب می‌شوند. مرحله نخست در GEP، تشکیل جمعیت اولیه از راه حل‌هاست. سپس کروموزوم‌ها به بیان درختی (ETs) نشان داده می‌شوند. در مرحله بعد، میزان سازگاری هر عضو از جمعیت کروموزوم‌ها توسط تابع برازش تعیین می‌شود. به‌طور خلاصه، مراحل اصلی الگوریتم ذکرشده در شکل ٢، نشان داده شده است:




**شکل١ – الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن (فریرا، ٢٠٠١ ب: ٢)**

جهت ارزیابی توانایی مدل GEP، از سه شاخص آماری ضریب همبستگی[3]، جذر میانگین مربعات خطا[4] و متوسط خطای مطلق[5] استفاده شد. روابط در ادامه ارائه گردیده‌است:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^{N}(P_i - \bar{P})^2}} \quad (١)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i - P_i)^2}{N}} \quad (٢)$$

[1]- Genetic Algorithm (GA)

[2]- Genetic Programming (GP)

[3]- Correlation Coefficient (R2)

[4]- Root of Mean Square Error (RMSE)

[5]- Mean Absolute Error (MAE)



www.SID.ir

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|O_i - P_i| \quad (۳)$$

در روابط فوق، O داده مشاهده‌ای، P داده پیش‌بینی شده، N تعداد کل داده‌ها و نماد بار، بر میانگین دلالت دارد.

## ۳- بحث و نتایج

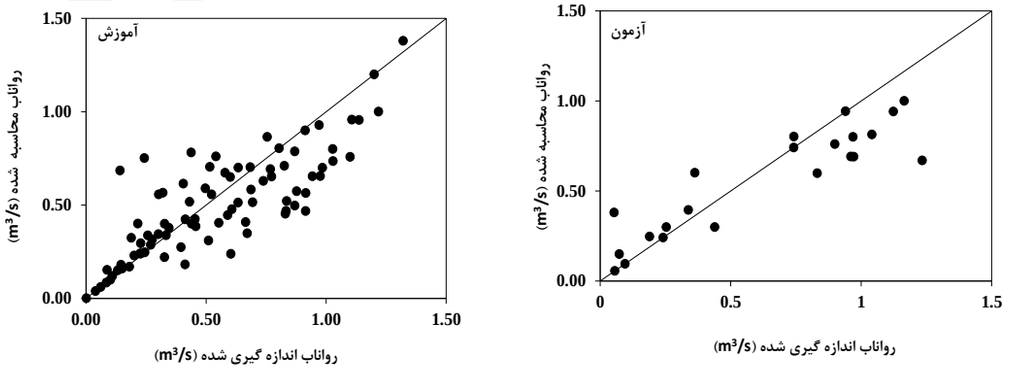
تعداد ژن‌ها و کروموزوم‌ها، به‌منظور اجرای مدل برنامه‌ریزی بیان ژن، بایستی تعیین گردند. با توجه به مطالعات فریرا، پاسخ بهینه با انتخاب ۲ یا ۳ ژن حاصل می‌گردد. هم‌چنین، وی در مطالعاتش نشان داد که بهترین جمعیت، از ۳۰ تا ۵۰ کروموزوم تشکیل می‌شود (فریرا، ۲۰۰۱ب: ۱۳، ۱۲). لذا در پژوهش حاضر، از ۳ ژن و ۳۰ کروموزوم استفاده گردید. هم‌چنین، پارامتر اندازه سر نیز با سعی و خطا ۸ انتخاب شد. مقدار اپراتورهای ژنتیکی مطابق با پیش‌فرض مدل تعیین شد. هم‌چنین، تابع پیوند (+) به‌دلیل برتری بر دیگر توابع، برگزیده شد (امامقلی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۵: ۵).

همان‌طور که اشاره شد، در این پژوهش از اطلاعات بارش (P)، دما (T)، تبخیر (ET)، تعداد ساعات آفتابی (N) و رطوبت (H) ایستگاه هواشناسی سنگده، به‌عنوان ورودی مدل استفاده شد. لازم به‌ذکر است که با توجه به تحقیقات پیشین، تابع برازش RRSE[1] در ارزیابی کارایی مدل GEP، انتخاب گردید (امامقلی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۵: ۳). بیشترین مقدار تابع برازش نیز، ۱۰۰۰ تعیین شد. نتایج اجرای مدل GEP در دو بخش آموزش و آزمون، در جدول ۱ ارائه گردیده‌است.

**جدول ۱- نتایج اجرای مدل برنامه‌ریزی بیان ژن**

| مرحله برازش | $R^2$ | RMSE | MAE | تابع برازش |
|---|---|---|---|---|
| آموزش | ۰/۶۸۸ | ۰/۲۲۷ | ۰/۱۸۷ | ۷۵۱/۲۴۷ |
| آزمون | ۰/۶۳۵ | ۰/۲۳۴ | ۰/۱۹۸ | ۶۳۶/۳۲۴ |

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، روش برنامه‌ریزی بیان ژن، با ضرایب همبستگی ۰/۶۸۸ و ۰/۶۳۵، جذر میانگین مربعات خطای ۰/۲۲۷ و ۰/۲۳۴ متر مکعب بر ثانیه و متوسط خطای مطلق ۰/۱۸۷ و ۰/۱۹۸ مترمکعب بر ثانیه، به‌ترتیب متعلق به دو بخش آموزش و آزمون، روشی توانمند و قابل قبول جهت پیش‌بینی بارش رواناب حوضه آبریز کسیلیان می‌باشد. در ادامه، نمودارهای نقطه‌ای دو بخش آموزش و آزمون، ارائه گردیده‌است:




**شکل ۳- نمودار نقطه‌ای برآورد بارش رواناب در مرحله آموزش و آزمون**

[1]- Root Relative Square Error (RRSE)


www.SID.ir

## ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، بارش رواناب حوضه آبریز کسیلیان، به‌کمک روش برنامه‌ریزی بیان ژن و با استفاده از پارامترهای هواشناسی و هیدرولوژیکی حوضه، مدل‌سازی گردید. نتایج ارائه‌شده در جدول ۱ و شکل ۳، موید توانایی این روش در پیش‌بینی بارش رواناب حوضه مذکور می‌باشد. یکی از توانمندی‌های روش GEP در مقایسه با دیگر روش‌های هوشمند، توانایی برقراری رابطه ضمنی بین پارامترهای ورودی و خروجی مدل می‌باشد. در این پژوهش، رواناب حوضه آبریز کسیلیان (R) به‌عنوان تابعی از پارامترهای هواشناسی بارش، دما، تبخیر، تعداد ساعات آفتابی و رطوبت مدل‌سازی گردیده‌است:

$$R = f\,(P, T, ET, N, H)$$

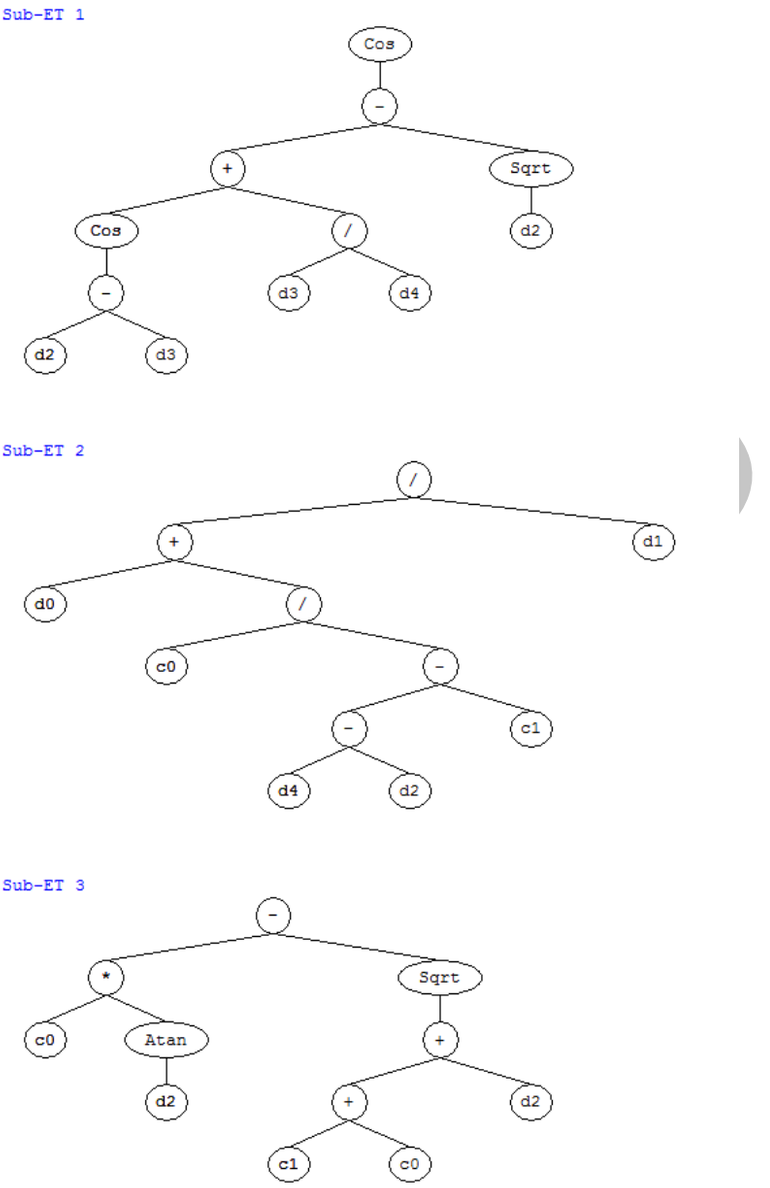
در ادامه، رابطه ریاضی ارائه‌شده توسط GEP و نمودار بیان درختی آن، ارائه گردیده‌است:

$$\begin{aligned} R = {} & [\cos[(\cos(ET - N) + (\frac{N}{H})) - \sqrt{ET}\,]] + \\ & [[(P + (\frac{-9.749817}{(H - ET) + 9.16864})]/P] + \\ & [(8.243408 \times \mathrm{Arctan}(ET)) - (8.554229 + ET)] \end{aligned} \qquad (۴)$$

Archive of SID



www.SID.ir




**شکل ۵- نمودار درختی برنامه‌ریزی بیان ژن**

نتایج این پژوهش، بیان‌گر توانایی و کارایی روش برنامه‌ریزی بیان ژن، در برآورد بارش رواناب حوضه آبریز کسیلیان می‌باشد. این یافته، با نتایج پژوهش کیسی و همکاران، ۲۰۱۳ مطابقت دارد (کیسی و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۰-۱). لذا، استفاده از این روش، در مدل‌سازی بارش رواناب حوضه‌های آبریز، به‌علت دقت قابل قبول و نیز توانمندی در در نظر گرفتن تاثیر پارامترهای هواشناسی حوضه بر رواناب خروجی از آن، پیشنهاد می‌گردد.


www.SID.ir

## منابع


١. بیات، وحید، طهماسبی‌پور، ناصر، حقی‌زاده، علی، زینی‌وند، حسین (١٣٩۴): "مقایسه کارایی مدل‌های رگرسیون چند متغیره و GEP در برآورد دبی رسوب معلق رودخانه (مطالعه موردی: حوزه آبخیز چم انجیر – خرم‌آباد)"، اولین کنفرانس ملی کشاورزی پایدار، محیط زیست و توسعه روستایی.

٢. پورنعمت رودسری، عادل، قادری، کوروش، کریمی گوغری، شهرام (١٣٩٣): "مدل‌سازی فرایند بارش – رواناب با استفاده از روش کنترل گروهی داده‌ها (GMDH) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) در حوزه آبخیز پلرود"، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، سال پنجم، شماره ١٠، ٨۴-۶٨.

٣. جهانگیر، علیرضا، رائینی، محمود، ضیا احمدی، میرخالق (١٣٨٧): "شبیه‌سازی فرایند بارش – رواناب با شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و مقایسه با مدل HEC-HMS در حوزه معرف کارده"، مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ٢٢، شماره ٢، ٨۴-٧٢.

۴. سروری، سهراب، قادری، سیدجمیل، عبقری، هیراد، زارع نقده، سعید (١٣٩٠): "مدل‌سازی بارش رواناب رودخانه با استفاده از سیستم فازی انفیس و مقایسه با تابع بنیادی شعاعی"، چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

۵. قربانی، محمدعلی، ازانی، عاطفه، محمودی وانعلیا، سمیه (١٣٩۴): "مدل‌سازی بارش – رواناب با استفاده از مدل‌های هوشمند هیبریدی"، تحقیقات منابع آب ایران، سال یازدهم، شماره ٢، ١۵٠-١۴۶.

6. Azamathulla, H.Md., Ab.Ghani, A., Leow, Ch.S., Chang, Ch.K., Zakaria, N.A. (2011): "Gene-Expression programming for the development of a stage-discharge curve of the Pahang River", Water Resour Manage, 25, 2901-2916.
7. Chandwani, V., Kumar Vyas, S., Agrawal, V., Sharma, G. (2015): "Soft computing approach for rainfall-runoff modelling: A review", International conference on water resources, coastal and ocean engineering (ICWRCOE 2015).
8. Emamgholizadeh, S., Bateni, S.M., Shahsavani, D., Ashrafi, T., Ghorbani, H., (2015): "Estimation of soil cation exchange capacity using Genetic Expression Programming (GEP) and Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS)", Journal of Hydrology, 529, 1590-1600.
9. Ferreira, C. (2001b): "Gene Expression Programming: A New Adaptive Algorithm for Solving Problems", Complex Systems, 13:2, 87-129.
10. Ghose, D.K., Panda,S.S., Swain,P.C. (2013): "Prediction and optimization of runoff via ANFIS and GA", Alexandria Engineering Journal, 52, 209-220.
11. Kisi, O., Shiri, J., Tombul, M. (2013): "Modeling rainfall runoff process using soft computing techniques", Computers & Geosciences, 51, 108-117.
12. Kumar, D., Pandey, A., Sharma, N., Flugel, W.A. (2016): "Daily suspended sediment simulation using machine learning approach", Catena, 138, 77-90.
13. Roushangar, K., Vojoudi Mehrabani, F., Shiri, J. (2014): "Modeling river total bed material load discharge using artificial intelligence approaches (based on conceptual inputs)", Journal of Hydrology, 514, 114-122.
14. Zakaria, N.A., Azamathulla, H.Md., Chang, Ch.K., Ab.Ghani, A. (2010): "Gene Expression Programming for Total Bed Material Load estimation-a case study", Science of the Total Environment, 408, 5078-5085.


Archive of SID



www.SID.ir