

جغرافیا و توسعه شماره ۴۵ زمستان ۱۳۹۵

وصول مقاله : ۱۳۹۴/۰۶/۲۸

تأیید نهایی : ۱۳۹۵/۰۳/۲۴

صفحات : ۱۴۰-۱۲۱

## مقایسه‌ی روش‌های متداول بر آورد بار رسوب معلق رودخانه‌ی کرخه با روش برنامه‌ریزی بیان ژن

دکتر صمد امامقلی‌زاده\*<sup>۱</sup>، مهندس راضیه کریمی‌دمنه<sup>۲</sup>، دکتر خلیل اژدری<sup>۳</sup>

### چکیده

بر آورد دبی بار رسوبات معلق رودخانه‌ها به دلیل تأثیرگذاری بر طراحی و مدیریت سازه‌های آبی، در مهندسی آب، هیدرولیک و محیط زیست مهم می‌باشد. تاکنون تلاش‌های گوناگونی جهت بر آورد دقیق بار رسوبات معلق توسط پژوهشگران انجام شده است که برای مثال می‌توان به برقراری رابطه بین دبی جریان و دبی رسوب اشاره نمود. مشکل این روش، عدم قطعیت آن می‌باشد. از این رو، شماری از محققان به روش‌های هوشمند و الگوریتم‌های تکاملی، روی آورده‌اند. در پژوهش حاضر به منظور پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه‌های هیدرومتری جلوگیر و پای‌پل واقع در بالادست سد مخزنی کرخه، روش برنامه‌ریزی بیان ژن مورد استفاده قرار گرفت و نتایج به دست آمده با نتایج روش‌های منحنی سنج رسوب و فائو مقایسه گردید. برای انجام این کار داده‌های دبی جریان، دبی رسوب و ارتفاع باران دو ایستگاه بین سال‌های ۱۳۶۵-۱۳۹۰ جمع آوری شد. برای اجرای مدل برنامه‌ریزی بیان ژن دو سناریو تعریف گردید. در سناریوی اول از اطلاعات دبی جریان و دبی رسوب ایستگاه‌ها استفاده شد و در سناریوی دوم از اطلاعات ارتفاع باران حوضه‌ی آبریز نیز استفاده گردید. نتایج نشان داد سناریوی دوم عملکرد بهتری در مقایسه با سناریوی اول داشته است. همچنین، مقایسه‌ی نتایج اجرای این مدل در بخش آزمون سناریوی دوم نشان داد که این روش نسبت به روش منحنی سنج رسوب، میزان خطای RMSE و MAE را به مقدار ۹۱٪ و ۹۴٪ برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر و ۶۰٪ و ۷۱٪ برای ایستگاه هیدرومتری پای‌پل کاهش داده است. مقایسه همین نتایج با روش فائو نیز نشان‌دهنده‌ی کاهش خطای RMSE و MAE به میزان ۹۲٪ و ۹۶٪ برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر و ۸۵٪ و ۹۵٪ برای ایستگاه هیدرومتری پای‌پل می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: ایستگاه هیدرومتری پای‌پل، ایستگاه هیدرومتری جلوگیر، بار رسوب معلق، برنامه‌ریزی بیان ژن، رودخانه‌ی کرخه.

## مقدمه

توسعه و حیات تمدن‌های بشری به آب وابسته است. افزایش روزافزون جمعیت، صنعتی شدن جوامع و روند رو به رشد تولید، نیاز به آب را به عنوان عنصر اصلی پیشرفت و رشد اقتصادی نمایان تر نموده است. بدیهی است با افزایش تقاضا در بخش‌های مختلف کشاورزی، صنعت و شرب، مدیریت منابع تجدید-شونده با بحران روبه‌رو می‌گردد. از دیگر عوامل تأثیرگذار، دخالت‌های مستقیم و غیرمستقیم بشر است که پایداری منابع را با چالش روبه‌رو می‌نماید، یکی از مشکلات ایجاد شده فرسایش خاک است که پس از انتقال و ترسیب در پایاب، فرایند رسوب‌گذاری را به-عنوان یکی از چالش‌های جدی سازه‌های آبی ایجاد می‌نماید (ماکنالی/زاده، ۱۳۸۹: ۲). از جمله مهم‌ترین مشکلات ناشی از فرسایش و رسوب‌گذاری، از بین رفتن اراضی حاصل‌خیز کشاورزی، پر شدن مخازن سدها و کانال‌های آبیاری است (حیدری و همکاران، ۱۳۹۱: ۲). رسوب‌گذاری در مخازن سدها سبب مشکلاتی از جمله کاهش حجم مفید مخزن سد، اختلال در عملکرد دریاچه‌های تخلیه‌کننده تحتانی، عدم اطمینان‌پذیری در کنترل سیلاب، ایجاد نیروی مضاعف هنگام زمین‌لرزه و افزایش کاذب سطح آب مخزن می‌گردد (Palmieri et al, 2003:8). لذا باتوجه به اهمیت مسأله‌ی رسوب‌گذاری در سازه‌های آبی، محققین مختلف مطالعات گسترده‌ای را بر روی بار رسوبی رودخانه‌ها، سرشاخه‌های رودها و مخازن سدها انجام داده‌اند که از آن جمله می‌توان به مطالعات وروانی و خلیقی سیگارودی (۱۳۸۶: ۱۴-۱)، زنگانه و همکاران (۱۳۸۱: ۱-۸)، کالوندی و همکاران (۱۳۸۹: ۷-۱)، کیا و عمادی (۱۳۹۱: ۱-۱۳) و ژانگ و همکاران (۲۰۱۲: ۱۲-۱) اشاره کرد. در این مطالعات، بار رسوب

معلق با استفاده از روش‌های متداول و مرسوم رگرسیونی برآورد و به بررسی رابطه بین دبی جریان و دبی رسوب با استفاده از معادلات مختلف پرداخته شده است. بررسی منابع نشان می‌دهد روابط تجربی و روش‌های رگرسیونی، میزان بار رسوبات را بیشتر یا کمتر از میزان واقعی برآورد می‌کنند. تخمین نادرست حجم رسوبات، منجر به طراحی مخزن سد با حجمی بیشتر یا کمتر از نیاز واقعی آن خواهد شد که خود نیز مشکلاتی را به دنبال خواهد داشت (Aytek & Kisi, 2008: 1).

طی دو دهه‌ی اخیر، تکنیک‌های هوشمند محاسباتی مانند شبکه‌ی عصبی مصنوعی<sup>۱</sup>، سیستم استنتاج تطبیقی-عصبی‌فازی<sup>۲</sup> و ماشین‌بردار پشتیبان<sup>۳</sup> به شکلی موفق پاسخ‌گوی مسایل مهندسی آب و هیدرولیک بوده‌اند (Zakaria et al, 2010: 1-8). از آن جمله می‌توان به مدل‌سازی بارش-رواناب (Riad & Mania, 2004: 1-8; Kumar et al, 2016: 1-14; Azamathulla et al, Bateni et al, 2007: 1-14; 2008: 1-10)، پیش‌بینی بار رسوب معلق و رسوب انتقالی (Kakaei Lafdani et al, 2013: 1-13; Haddadchi et al., 2013: 1-12)، تعیین ضریب زبری کانال‌های روباز (Moharana & Khatua, 2014: 1-12)، پیش‌بینی منحنی‌سنجه رسوب در حوضه‌های فاقد آمار (Atieh et al, 2015: 1-13)، در انقباضات طولانی (Najafzadeh et al, 2016: 1-8) اشاره کرد. در این مطالعات، کاربرد روش‌های مذکور در حل مسایل مهندسی آب مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج، مؤید توانایی این روش‌ها در حل این گونه مسایل می‌باشد. به عنوان مثال، دو روش انفیس و

1-Artificial Neural Network (ANN)

2-Artificial Neural Fuzzy Inference System (ANFIS)

3-Support Vector Machine (SVM)

نتایج پژوهش‌های این محققان، توانایی روش برنامه‌ریزی بیان ژن را در مقایسه با روش‌های متداول رگرسیونی و دیگر روش‌های هوشمند چون شبکه عصبی مصنوعی و سیستم فازی نشان می‌دهد. از آن جمله می‌توان به پیش‌بینی تبخیر تعلق مرجع روزانه در اقلیم خشک به کمک روش‌های برنامه‌ریزی بیان ژن و شبکه‌ی عصبی مصنوعی اشاره نمود. در این پژوهش، متغیرهای هواشناسی روزانه، متعلق به سال‌های آماری ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰، از ۱۳ ایستگاه هواشناسی جمع‌آوری گردیدند. همچنین، رابطه‌ی پنمن مانیتس به‌عنوان تابع هدف، جهت برآورد کمی تبخیر تعلق مرجع روزانه انتخاب گردید. نتایج این پژوهش نشان داد روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی نتایج دقیق‌تری را جهت پیش‌بینی تبخیر تعلق مرجع روزانه، در مقایسه با روش برنامه‌ریزی بیان ژن، ارائه می‌نماید. اگرچه، روش برنامه‌ریزی بیان ژن قادر به ارائه رابطه‌ی صریح جهت تخمین تبخیر تعلق مرجع روزانه می‌باشد (Yassin et al, 2016: 1-15).

رودخانه‌ی کرخه سومین رودخانه‌ی بزرگ کشور از نقطه نظر آبدهی است، سد مخزنی و نیروگاه کرخه با قابلیت ذخیره ۱۶٪ از کل منابع آبی کشور و تولید انرژی، نقش مهمی در مدیریت منابع آبی و برقایی کشور ایفا می‌نمایند (خسروپور و بنی‌هاشمی، ۱۳۸۷: ۲). لذا توجه به مسایل هیدرولوژیکی، اقلیمی، کشاورزی و منابع آب و خاک این حوضه، همواره مورد توجه محققان قرار داشته است که از آن جمله می‌توان به ارزیابی معادلات برآورد بار رسوب در ایستگاه هیدرومتری پای پل (قمشی و ترابی‌پوده، ۱۳۸۱: ۱۷-۱)، برآورد بار رسوبات معلق به کمک پارامترهای فیزیوگرافیک حوضه (ببنا و همکاران، ۱۳۸۸: ۸-۱)، شبیه‌سازی رسوب‌گذاری در مخزن سد (ذرتی‌پور و همکاران، ۱۳۸۹: ۹-۱)، مدل‌سازی عددی انتقال رسوبات

ماشین‌بردار پشتیبان، جهت برآورد عمق آبستگي فشردگی‌های طولانی در کانال‌های مستطیلی، مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفتند. سرعت متوسط جریان، سرعت بحرانی آستانه حرکت رسوبات، عمق جریان، متوسط اندازه ذرات، انحراف معیار هندسی و عرض انبساط و انقباض کانال، به عنوان پارامترهای ورودی مدل انتخاب شدند. نتایج اجرای مراحل آموزش و آزمون هر دو روش، با نتایج حاصل از معادلات تجربی آزمایشگاهی مقایسه گردیدند. یافته‌ها نشان داد روش انفیس با دقت بالای پیش‌بینی عمق آبستگي در مقایسه با یافته‌های آزمایشگاهی، بر روش ماشین بردار پشتیبان و معادلات تجربی برتری دارد (Najafzadeh et al, 2016: 1-8). یکی دیگر از روش‌های هوشمند مورد استفاده در حل مسایل مهندسی آب، روش برنامه‌ریزی بیان ژن<sup>۱</sup> می‌باشد که از جمله روش‌های تکاملی است. اگرچه تعداد مطالعات در زمینه‌ی کاربردهای این روش در مهندسی آب محدود است (Zakaria et al., 2010: 1-18)، اما در این میان می‌توان به نتایج موفق‌ی چون برآورد بار رسوب معلق (Güven and Ersin Talu, 2010: 1-10)، توسعه منحنی دبی اشل (Azamathulla et al, 2011: 1-16)، پیش‌بینی عمق آبستگي (Azamathulla, 2012:1-4; Muzzammil et al., 2015: 1-8)، مدل‌سازی بارش- رواناب (Kisi et al, 2013:1-10)، برآورد ضریب زبری مانینگ (Azamathulla & Jarrett, 2013: 1-15)، برآورد بار مواد بستر (Roushangar et al, 2014:1-9)، پیش‌بینی ضریب دبی در سرریزهای دیواره مستطیلی (Ebtehaj et al., 2015: 1-11)، تخمین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (Emamgholizadeh et al, 2015:1-11)، برآورد تبخیر تعلق مرجع در اقلیم خشک اشاره کرد (Yassin et al., 2016: 1-15).

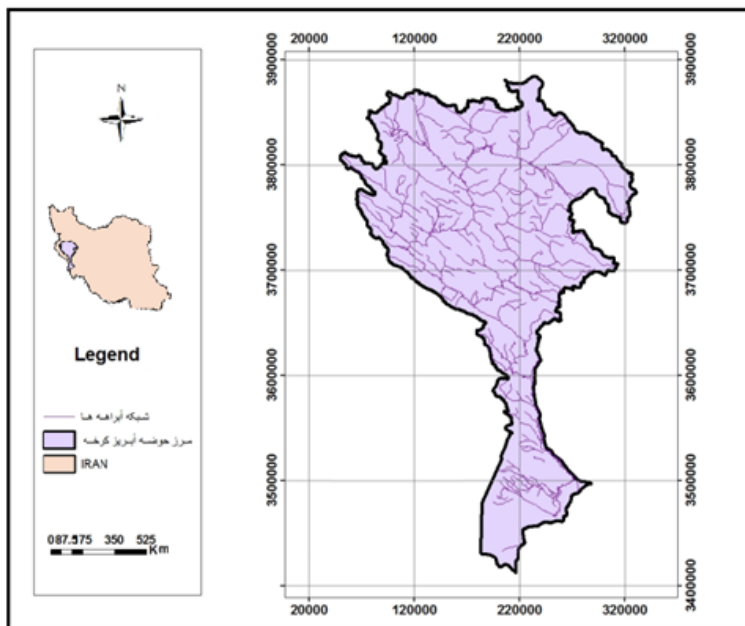
معلق غیرچسبنده (باغبان پور و کاشفی پور، ۱۳۹۱: ۱۳-۱)، ارزیابی روش‌های برآورد بار رسوب معلق در رودخانه‌ی کرخه (بختیاری و همکاران، ۱۳۹۰: ۱-۸)، مطالعه تغییرات کاربری اراضی حوضه‌ی کرخه (سلاجقه و همکاران، ۱۳۹۰: ۱-۶) و تحلیل زمانی-مکانی خشکسالی هواشناسی (بایزیدی و همکاران، ۱۳۹۱: ۱-۱۰) اشاره کرد. در این میان، رسوب‌گذاری مخازن سدهای استان خوزستان، یک موضوع مهم قلمداد می‌شود که علاوه بر کاهش راندمان آبیاری، بر کیفیت آب شرب و کشاورزی تأثیر می‌گذارد (حاجی‌علی‌گل و همکاران، ۱۳۸۷: ۱-۸). بررسی منابع نشان می‌دهد تاکنون پژوهشی در زمینه‌ی کاربرد روش برنامه‌ریزی بیان ژن در برآورد بار رسوب معلق حوضه مذکور صورت نگرفته است. لذا با توجه به نقش و جایگاه این حوضه، رودخانه و سد در تأمین منابع آبی و انرژی و اهمیت برآورد بار رسوبی در مدیریت منابع آب کشور، در پژوهش حاضر از این روش جهت برآورد بار رسوب معلق رودخانه کرخه استفاده شده و نتایج، با نتایج دو روش منحنی سنج رسوب و فائو مقایسه گردیده است.

### مواد و روش‌ها

#### حوضه‌ی آبریز کرخه

رودخانه‌ی کرخه، پس از کارون و دز سومین رودخانه‌ی بزرگ ایران از نقطه نظر آبدهی محسوب

می‌گردد و رودخانه‌ای وحشی با رژیم سیلابی می‌باشد. حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی کرخه بین ۴۶ درجه و ۷ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی، ۳۱ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۵۸ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. این حوضه با وسعتی در حدود ۵۰۰۰۰ کیلومتر مربع، شامل استان‌های همدان، کرمانشاه، لرستان، ایلام، کردستان و خوزستان می‌باشد. شاخه‌های اصلی تشکیل‌دهنده‌ی رودخانه‌ی کرخه، رودخانه‌های گاماسیاب، قره‌سو، سیمره، چرداول و کشکان می‌باشند. سدّ کرخه بزرگ‌ترین سدّ مخزنی در ایران، ششمین سدّ خاکی از نظر طول تاج و یازدهمین سدّ خاکی از نظر حجم بدنه و حجم مخزن در جهان، با هدف مهار حدود ۷۰٪ از جریان‌های سطحی آب رودخانه کرخه در فاصله‌ی ۲۲ کیلومتری شمال غرب اندیمشک در استان خوزستان، بر روی آن احداث گردیده است (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۰: ۳، ۲). سالانه متجاوز از ۶۰ میلیون تن خاک از دامنه‌های ارتفاعات حوضه از بستر اصلی خود جدا شده و تقریباً ۴۰ میلیون تن به تالاب هورالعظیم می‌ریزد. ۲۰ میلیون تن باقی‌مانده در پستی‌های حوضه تجمع کرده و رسوب می‌کند، به این ترتیب، سالانه ۳۰ هزار هکتار از زمین‌های زراعی این حوضه کارایی خود را از دست می‌دهند (درتی پور و همکاران، ۱۳۸۹: ۳)



شکل ۱: نقشه حوضه‌ی آبریز کرخه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۴

به‌منظور پیش‌بینی بار رسوب معلق سد کرخه، اطلاعات روزانه دبی رودخانه، دبی رسوب و ارتفاع باران متناظر از دو ایستگاه هیدرومتری جلوگیر و پای پل واقع در بالادست سد مخزنی کرخه، مربوط به سال‌های ۹۰-۱۳۶۵ از سازمان آب و برق خوزستان جمع‌آوری گردید. در جدول (۱) حداقل و حداکثر مقادیر دبی ( $Q_d$ )، دبی رسوب ( $Q_s$ ) و بارش ( $R$ ) نشان داده شده است:

جدول ۱: بیشینه و کمینه داده‌های جمع‌آوری شده

R (mm)		$Q_s$ (ton/day)		$Q_d$ ( $m^3/s$ )		ایستگاه
حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	
۰/۵	۴۹	۱۶/۸۳۱	۲۹۶۸۹۳۰	۳/۳۴	۱۷۰/۱	جلوگیر
۰/۲	۴۷	۱۱/۳۷	۹۳۱۳۲۵۶	۰/۷۹	۲۰/۳۲	پای پل

مأخذ: سازمان آب و برق خوزستان، ۱۳۹۲

### برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

روش برنامه‌ریزی بیان ژن، ترکیب و توسعه یافته روش‌های GA و GP است که در سال ۱۹۹۹ توسط فریرا ابداع شد (Ferreira, 2001b: 87-129). 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. به‌طور خلاصه می‌توان بیان داشت که در این روش فوتوتیپ و ژنوتیپ از هم جدا شده و سیستم قادر خواهد بود از تمام مزایای تکاملی بهره‌گیرد. با وجود این که فوتوتیپ در GEP مشابه ساختار شاخه‌ای GP می‌باشد، اما ساختار شاخه‌ای در GEP که بیان درختی نیز نامیده می‌شود، بیان‌گر تمام ژنوم‌های مستقل است. اولین مرحله در GEP، تشکیل جمعیت اولیه از راه‌حل‌هاست. سپس کروموزوم‌ها به‌بیان درختی (ETs) نشان داده می‌شوند. در مرحله‌ی بعد باید کارایی یا میزان سازگاری هر عضو از جمعیت کروموزوم‌ها توسط تابع برازش ارزیابی شود. مراحل اصلی الگوریتم‌های تکاملی ذکر شده را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد: فرایند با تولید تصادفی کروموزوم‌ها از جمعیت اولیه آغاز می‌شود. سپس کروموزوم‌های ایجاد شده در GP و GEP به صورت درختی بیان می‌گردند. در ادامه به‌کمک تابع هدف میزان برازندگی و کارایی هر فرد ارزیابی می‌شود، پس از آن اعضای سازگارتر انتخاب و اصلاح شده تا فرزندان جدیدتر ایجاد شوند، فرزندان ایجاد شده نیز تحت فرایند توسعه‌ای قرار می‌گیرند تا پاسخ خوب و مناسب پیدا شود (Ferreira, 2004: 5). در شکل (۲) الگوریتم حل مسأله به‌کمک GEP نشان داده شده است:

در این پژوهش از روش‌های منحنی سنجه رسوب، فائو و برنامه‌ریزی بیان ژن برای پیش‌بینی بار رسوب معلق سد کرخه استفاده شده و نتایج با یکدیگر مقایسه گردیده است.

### روش منحنی سنجه رسوب (USBR)

معادله منحنی سنجه رسوب به شکل زیر تعریف می‌گردد:

$$Q_s = aQ_d^b \quad (1)$$

ضرایب ثابت  $a$  و  $b$  از برازش یک رابطه رگرسیونی بین  $\log Q_s$  و  $\log Q_d$  به دست می‌آید. ضریب  $a$  شاخصی از شدت فرسایش است، مقدار بالای آن نشان‌دهنده فرسایش بالای تشکیلات زمین‌شناسی است که انتقال می‌یابند. ضریب  $b$  توان فرساینده رودخانه را نشان می‌دهد، افزایش اندک دبی جریان، قدرت فرساینده‌گی را به شدت افزایش می‌دهد (داداش‌زاده اصل و همکاران، ۱۳۸۸: ۲). هم‌چنین در این رابطه،  $Q_d$  دبی جریان روزانه و  $Q_s$  دبی رسوب می‌باشد.

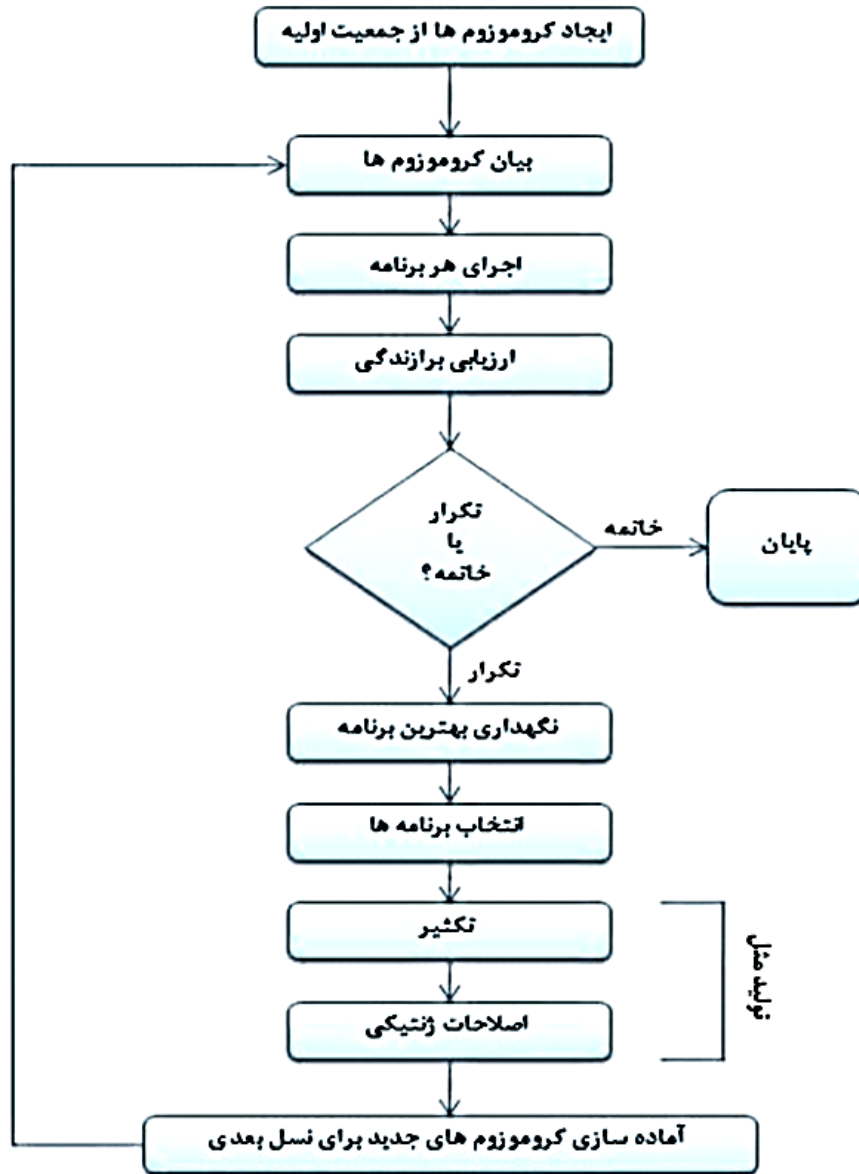
### روش فائو (FAO)

این روش اصلاح شده روش USBR است که در آن شیب خط رگرسیونی منحنی سنجه رسوب ثابت فرض شده و عرض از مبدا افزایش می‌یابد تا به‌نوعی اثر دبی‌های سیلابی لحاظ گردد (ماکنالی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹: ۴). این رابطه به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q_s = a'Q_d^b \quad (2)$$

در رابطه‌ی فائو، عرض از مبدا ( $a'$ ) حاصل تقسیم میانگین دبی رسوب بر دبی رودخانه است (ظهیری و همکاران، ۱۳۸۸: ۳).

$$a' = \frac{\bar{Q}_s}{\bar{Q}_d^b} \quad (3)$$



شکل ۲: الگوریتم برنامه‌ریزی بیان ژن  
 مأخذ: Ferreira, 2001b

## شاخص‌های آماری سنجش مدل‌ها

برای سنجش سه روش منحنی سنجه رسوب، فائو و برنامه‌ریزی بیان ژن از معیارهای آماری ضریب همبستگی ( $R^2$ )، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و متوسط خطای مطلق (MAE) استفاده شد که به ترتیب در روابط (۴) تا (۶) ارائه شده‌اند:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (۴)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (۵)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - P_i| \quad (۶)$$

در روابط فوق،  $N$  تعداد داده‌ها،  $O$  مقدار مشاهده شده و  $P$  مقدار پیش‌بینی شده است. همچنین نماد بار بر میانگین داده‌ها دلالت دارد. بهترین روش، روشی است که ضریب همبستگی بالاتر (نزدیک‌تر به ۱) و خطای کم‌تری را به‌خود اختصاص دهد.

## تجزیه و تحلیل یافته‌ها

در پژوهش حاضر از روش‌های منحنی سنجه رسوب، فائو و برنامه‌ریزی بیان ژن برای پیش‌بینی بار رسوب معلق سد کرخه استفاده گردیده‌است. در مدل ارائه شده توسط GEP، علاوه بر داده‌های متناظر دبی جریان و دبی رسوب، از اطلاعات متناظر باران دو ایستگاه باران‌سنجی جلوگیر و پای پل نیز بهره گرفته شده است. این در حالی است که بیشتر مدل‌های مشابه، تنها از اطلاعات دبی جریان و دبی رسوب استفاده می‌نمایند و تأثیر ارتفاع باران را در میزان رسوب-گذاری، نادیده می‌گیرند. لذا در این تحقیق از دو سناریو در پیش‌بینی بار رسوب معلق بهره گرفته شده است. نخست، تنها از داده‌های متناظر دبی جریان و دبی رسوب برای پیش‌بینی استفاده می‌گردد، در این سناریو از ترکیب دبی جریان و دبی رسوب، به‌طور ساده و با تأخیر زمانی به‌عنوان ورودی مدل استفاده گردید و در سناریوی دوم از ترکیب آمار دبی جریان، ارتفاع باران و دبی رسوب، به‌طور ساده و با تأخیر زمانی، به‌عنوان ورودی مدل بهره گرفته شد. در نهایت توانایی مدل GEP با به‌کار بردن هر دو سناریو ذکر شده، نسبت به روش‌های رگرسیونی مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۲: ترکیب پارامترهای ورودی در سناریوی اول برنامه‌ریزی بیان ژن

ترکیب	۱	۲	۳	۴	۵	۶
پارامتر ورودی	$Q_d$	$Q_d, Q_{s-1}$	$Q_d, Q_{d-1}$	$Q_d, Q_{s-1}, Q_{s-2}$	$Q_d, Q_{d-1}, Q_{s-1}$	$Q_d, Q_{d-1}, Q_{d-2}, Q_{s-1}, Q_{s-2}$

مأخذ: مطالعات نگارندگان، ۱۳۹۳



گردیدند. ترکیب‌های فوق با توجه به مطالعات محققانی چون آیتک و کیسی (۲۰۰۸: ۵)، گوون و ارسین تالو (۲۰۱۰: ۵) و گوون و کیسی (۲۰۱۱: ۶) انتخاب شده‌اند.

در جدول فوق،  $Q_d$ ،  $Q_{d-1}$  و  $Q_{d-2}$  به ترتیب دبی جریان روزانه، دبی جریان یک‌روز قبل و دبی جریان دو روز قبل می‌باشد. همچنین،  $Q_{s-1}$  و  $Q_{s-2}$  به ترتیب دبی رسوب با یک‌گام تأخیر زمانی و دبی رسوب با دو گام تأخیر زمانی می‌باشد که به‌عنوان ورودی مدل تعیین

جدول ۳: ترکیب پارامترهای ورودی در سناریوی دوم برنامه‌ریزی بیان ژن

ترکیب	۱	۲	۳	۴	۵
پارامتر ورودی	$Q_d, R$	$Q_d, Q_{d-1}, R$	$Q_d, R, R_{-1}$	$Q_d, Q_{d-1}, R, R_{-1}$	$Q_d, Q_{d-1}, R, R_{-1}, Q_{s-1}$

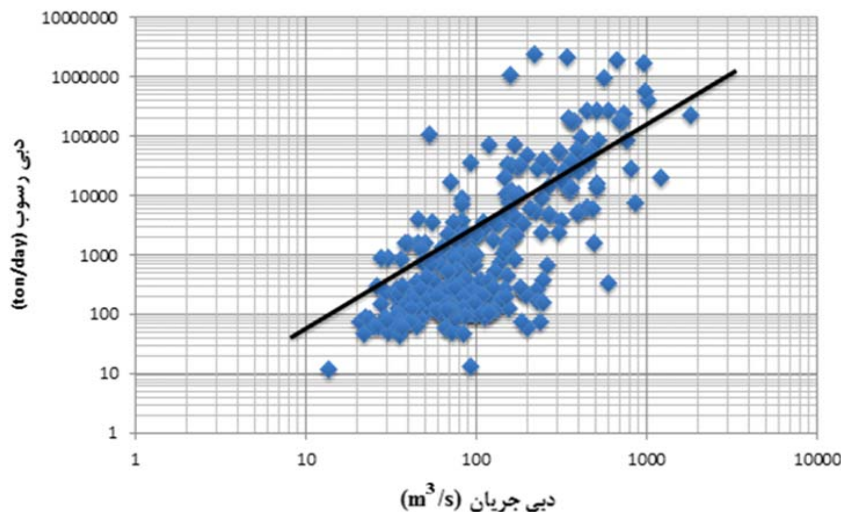
مأخذ: مطالعات نگارندگان، ۱۳۹۳

و ارتفاع باران متناظر مربوط به سال‌های ۹۰-۱۳۶۵ و حذف آمار مشکوک، ۴۵۹ سری داده مورد بررسی قرار گرفت. ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد برای آزمون در نظر گرفته شدند. شکل (۳) رابطه بین دبی جریان روزانه و دبی رسوب این ایستگاه را نشان می‌دهد. پراکندگی داده‌ها، تراکم نمونه‌برداری را در دبی‌های پایین و نمونه‌برداری معدود از دبی‌های سیلابی را نشان می‌دهد.

در جداول فوق،  $Q_d$ ،  $Q_s$  و  $R$  به ترتیب دبی جریان روزانه، دبی رسوب و ارتفاع باران متناظر است و  $Q_{d-1}$ ،  $Q_{s-1}$  و  $R_{-1}$  نیز به معنی دبی جریان یک‌روز قبل، دبی رسوب یک‌روز قبل و ارتفاع باران یک‌روز قبل می‌باشد. شایان ذکر است که بررسی تأثیر ارتفاع باران در برآورد بار رسوب، برای نخستین بار در مقاله‌ی مذکور مورد مطالعه قرار گرفته است.

### نتایج ایستگاه هیدرومتری جلوگیر

پس از جمع‌آوری اطلاعات دبی جریان، دبی رسوب



شکل ۳: نمودار دبی - دبی رسوب ایستگاه هیدرومتری جلوگیر

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۳

همچنین، مطالعات فریرا نشان داده‌است که انتخاب ۳۰ تا ۵۰ کروموزوم در اندازه جمعیت، بهترین پاسخ را موجب می‌گردد (Ferreira, 2001b: 12). سعی و خطا نشان داد بهترین پاسخ با تشکیل جمعیت اولیه از ۳۰ کروموزوم حاصل می‌گردد. اندازه سر نیز به-کمک سعی و خطا، برابر با ۸ تعیین گردید. پارامترهای عملیات بهسازی ژنتیکی نیز مطابق با پیش‌فرض مدل در نظر گرفته شدند. همچنین، با توجه به مطالعات امامقلی‌زاده و همکاران، تابع پیوند (+)، به‌دلیل برتری بر دیگر توابع عملیاتی { $\times$ ,  $\div$ , -}، برگزیده‌شد (Emamgholizadeh et al., 2015: 5).

در جدول (۴) برخی پارامترهای مورد استفاده و مقادیر آن‌ها، در برآورد بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیر به‌کمک روش برنامه‌ریزی بیان ژن، نشان داده شده است. با هدف یکسان‌سازی فضای مقایسه، مقادیر و نوع این پارامترها برای هر دو سناریو یکسان تعریف شدند. کروموزوم‌ها در GEP از بیش از یک ژن با طول یکسان تشکیل گردیده‌اند. تعداد ژن‌ها اختیاری است (Ferreira, 2001a: 5). با توجه به مطالعات فریرا، پاسخ بهینه با انتخاب ۲ یا ۳ ژن به-دست می‌آید (Ferreira, 2001b: 13). لذا، این پژوهش، با انتخاب ۳ ژن مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۴: مقادیر پارامترهای برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیر

پارامتر	اندازه سر	تعداد کروموزوم‌ها	تعداد ژن‌ها	معیار خطای تابع برازش	تابع پیوند
مقدار	۸	۳۰	۳	RRSE <sup>۱</sup>	جمع (+)

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۳

ترکیب اول سناریوی دوم با ورودی دبی جریان روزانه و ارتفاع باران متناظر، بیشترین ضرایب همبستگی و کم‌ترین خطا را به‌خود اختصاص دادند و به‌عنوان بهترین ترکیب انتخاب شدند.

در جدول (۵)، نتایج برازش روش‌های منحنی سنج رسوب، فائو و نتایج برتر سناریوی اول و دوم GEP بر روی داده‌های رسوب این ایستگاه ارائه گردیده‌است. نتایج نشان داد ترکیب سوم سناریوی اول با ورودی دبی جریان و دبی جریان با یک گام تأخیر زمانی و

جدول ۵: نتایج حاصل از برازش روش‌های USBR، FAO و GEP بر روی داده‌های رسوب ایستگاه جلوگیر

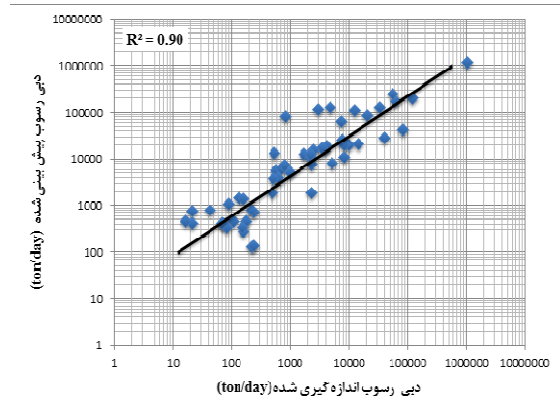
مدل	USBR		FAO		سناریوی اول GEP		سناریوی دوم GEP	
مرحله اجرا	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون
R <sup>2</sup>	۰/۵۴۳۳	۰/۵۱۲۲	۰/۵۴۳۳	۰/۵۱۲۲	۰/۹۱	۰/۸۷	۰/۹۳	۰/۹۰
RMSE (ton/day)	۲۴۱۱۱۲	۴۸۱۳۵۴	۲۵۶۸۸۵	۵۸۲۷۶۳	۶۷۸۰۰	۵۱۲۰۰	۶۲۴۰۰	۴۲۵۰۰
MAE (ton/day)	۷۵۴۱۰	۲۹۷۰۰۲	۱۰۶۰۹۰	۴۵۲۶۱۲	۲۴۴۰۰	۱۹۵۰۰	۲۴۲۰۰	۱۷۹۰۰

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۳

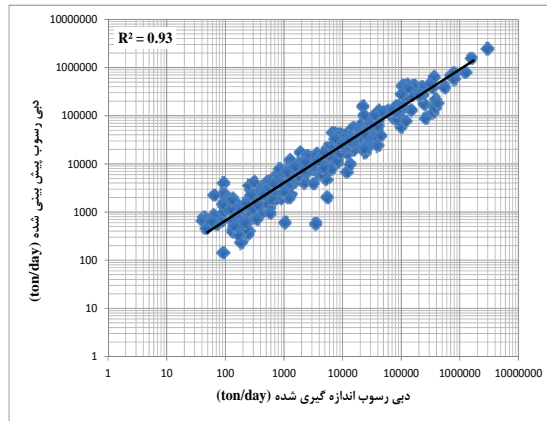
به ترتیب در مراحل آموزش و آزمون، دقت بالاتر و خطای کمتری از سناریوی اول، در پیش‌بینی بار رسوب معلق دارد. در شکل‌های (۴) و (۵) نمودارهای

نتایج جدول (۵)، بیان‌گر برتری سناریوی دوم در برآورد بار رسوب معلق این ایستگاه می‌باشد. این سناریو، با دارا بودن بیشترین ضرایب همبستگی برابر با ۰/۹۳ و ۰/۹۰ و کمترین خطا برابر با (ton/day)

اجرای این الگو، برای ایستگاه هیدرومتری جلوگیر نشان داده شده است.



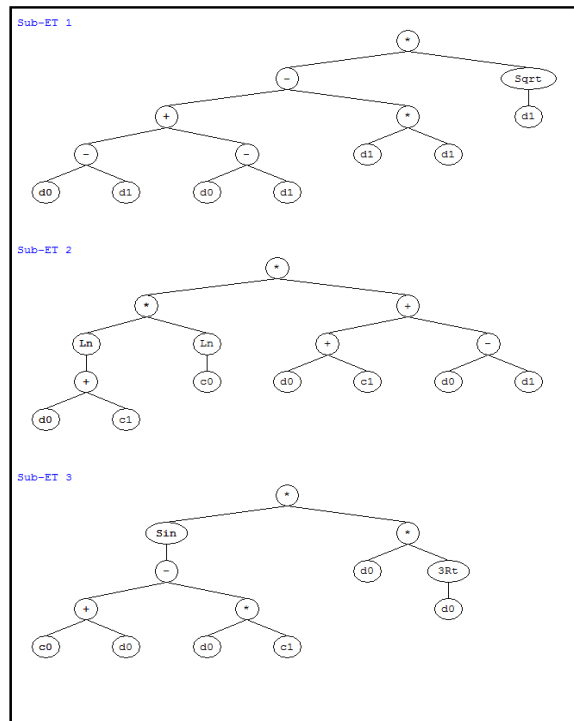
شکل ۵: نمودار ترکیب اول سناریوی دوم GEP، آزمون تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۳



شکل ۴: نمودار ترکیب اول سناریوی دوم GEP، آموزش تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۳

برابر با  $Q_d$  و  $R$  می‌باشند.

در شکل (۶) ساختار درختی برنامه‌ریزی بیان ژن نشان داده شده است، پارامترهای  $d_0$  و  $d_1$  به‌ترتیب



شکل ۶: بیان درختی ژن‌های ۱، ۲ و ۳ در سناریوی دوم پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری جلوگیر تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۳

با توجه به نمودار درختی فوق، رابطه ریاضی GEP  
برای پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری  
جلوگیر به صورت زیر می‌باشد

$$Q_s = (((Q_d - R) + (Q_d - R)) - ((R^2) \times \sqrt{R})) + \quad (7)$$

$$((\log((Q_d - 9.15039)) \times \log \sqrt{7.069671}) \times ((Q_d - 9.15039) + (Q_d - R))) +$$

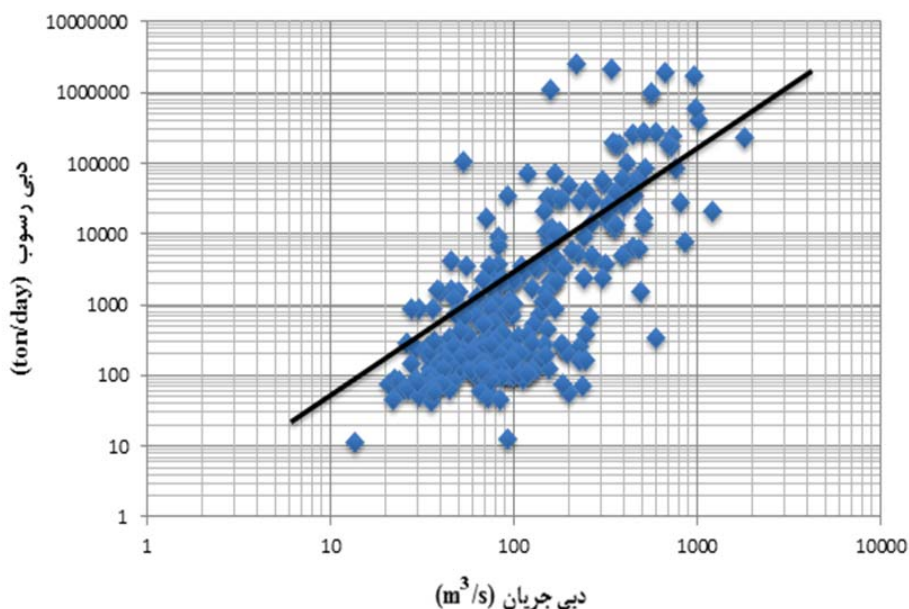
$$((\sin((-8.576782) + Q_d) - (Q_d \times (-1.23056))) \times (Q_d \times Q_d^{\frac{1}{2}}))$$

سال‌های آماری ۱۳۸۴-۱۳۶۵ برای آموزش و مابقی اطلاعات برای بخش آزمون در نظر گرفته شد. شکل (۷) رابطه دبی و دبی رسوب این ایستگاه را نشان می‌دهد. شکل، تراکم بالای نمونه‌برداری را در دبی‌های پایین و پراکندگی نمونه‌برداری را در دبی‌های سیلابی نشان می‌دهد. پارامترهای مورد استفاده در مدل GEP این ایستگاه نیز تعیین و در جدول (۶) ارائه شده است.

همان‌طور که ذکر شد، در این رابطه  $Q_d$  دبی جریان روزانه و  $R$  ارتفاع باران متناظر است.

#### نتایج ایستگاه هیدرومتری پای پل

به منظور برآورد بار رسوب معلق این ایستگاه، مشابه با ایستگاه هیدرومتری جلوگیر، اطلاعات متناظر دبی جریان روزانه، دبی رسوب و ارتفاع باران متعلق به سال‌های آماری ۱۳۹۰-۱۳۶۵ مورد استفاده قرار گرفت. در این میان، ۸۰ درصد اطلاعات مربوط به



شکل ۷: رابطه دبی - دبی رسوب ایستگاه هیدرومتری پای پل

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۳

جدول ۶: مقادیر پارامترهای برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای پل

پارامتر	اندازه سر	تعداد کروموزوم‌ها	تعداد ژن‌ها	معیار خطای تابع برازش	تابع پیوند
مقدار	۱۰	۳۰	۳	RRSE	جمع (+)

مأخذ: مطالعات نگارندگان، ۱۳۹۳

دبی جریان روزانه، دبی جریان روزانه با یک گام تأخیر زمانی، ارتفاع باران متناظر و ارتفاع باران با یک مرحله تأخیر زمانی، بیشترین ضرایب همبستگی و کم‌ترین خطا را به‌خود اختصاص دادند و لذا به‌عنوان الگوی برتر انتخاب شدند.

نتایج حاصل از برازش روش‌های منحنی سنجه رسوب، فائو و ترکیب‌های برتر دو سناریوی GEP، بر روی داده‌های رسوب این ایستگاه در جدول (۷) ارائه گردیده است. نتایج نشان داد در سناریوی اول، الگوی دوم با ترکیب ورودی دبی جریان روزانه و دبی رسوب یک‌گام قبل و در سناریوی دوم الگوی چهارم با ورودی

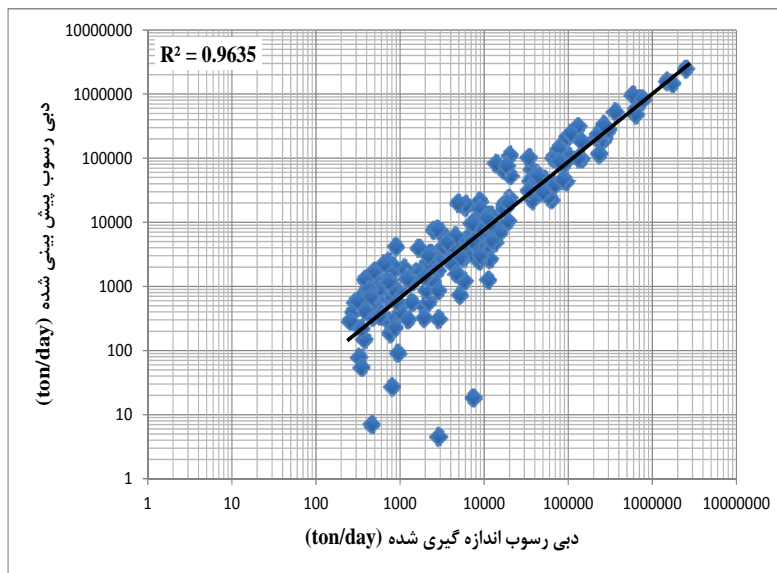
جدول ۷: نتایج حاصل از برازش روش‌های FAO، USBR و GEP بر روی داده‌های رسوب ایستگاه پای پل

سناریوی دوم GEP		سناریوی اول GEP		FAO		USBR		مدل
آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	مرحله اجرا
۰/۹۰	۰/۹۶۳۵	۰/۸۴۷۳	۰/۹۳۳۴	۰/۴۱۱	۰/۵۹۸۲	۰/۴۱۱	۰/۵۹۸۲	R <sup>2</sup>
۱۱۲۰۰۰	۴۶۳۰۰	۱۳۸۹۸۷	۶۳۵۰۰	۷۴۳۵۱۷	۳۵۹۵۴۲	۵۹۳۲۵۰	۲۷۹۳۰۶	RMSE (ton/day)
۳۵۴۰۰	۱۶۵۰۰	۳۷۰۰۰	۲۲۹۰۰	۷۲۹۶۲۱	۱۷۵۴۳۶	۴۹۰۳۳۶	۱۲۰۵۳۷	MAE (ton/day)

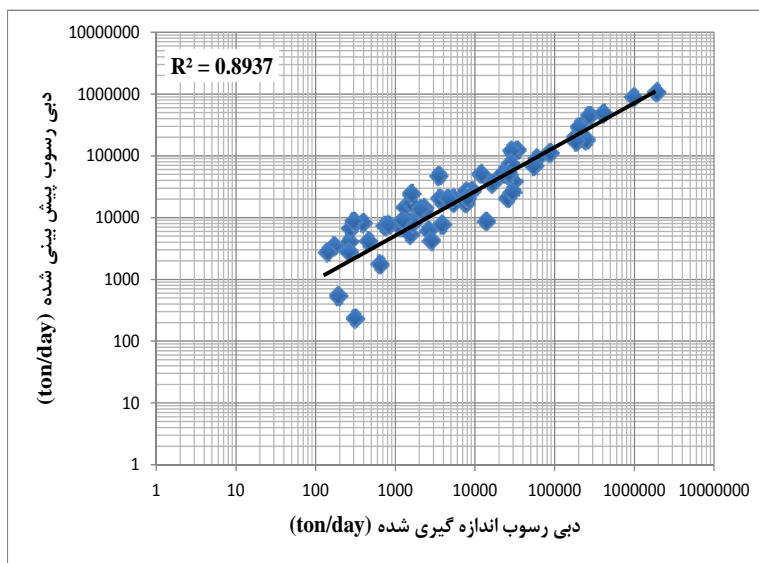
مأخذ: مطالعات نگارندگان، ۱۳۹۳

برآورد بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای پل، برتری دارد. در ادامه، نمودارهای ترکیب فوق در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده و بیان درختی ترکیب در شکل (۱۰) ارائه گردیده است. معادله (۸) نیز رابطه‌ی ریاضی الگوی مورد نظر را بر اساس بیان درختی آن نشان می‌دهد:

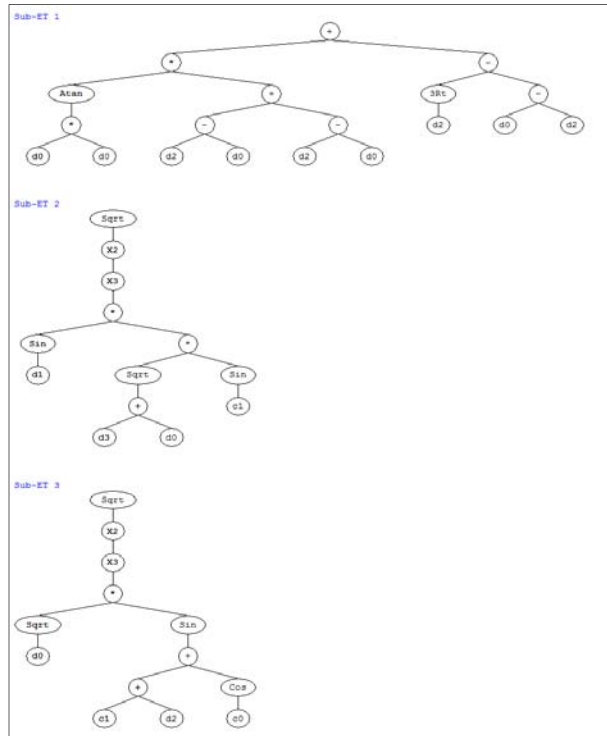
نتایج جدول (۷) نشان می‌دهد سناریوی دوم GEP با دربرگرفتن ترکیب دبی جریان روزانه و ارتفاع باران متناظر، با بیشترین ضرایب همبستگی برابر با ۰/۹۶۳۵ و ۰/۹۰ و کم‌ترین خطای RMSE برابر با ۴۶۳۰۰ (ton/day) و ۱۱۲۰۰۰ (ton/day) بر سناریوی اول و نیز روش‌های منحنی سنجه رسوب و فائو، در



شکل ۸: نمودار ترکیب چهارم سناریوی دوم GEP، آموزش  
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۳



شکل ۹: نمودار ترکیب چهارم سناریوی دوم GEP، آزمون  
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۳



شکل ۱۰: بیان درختی زن‌های ۱، ۲ و ۳ در سناریوی دوم پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه هیدرومتری پای پل

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۳

$$Q_s = ((\text{Arc tan}(Q_d \times Q_d) \times (R - Q_d) + (R - Q_d))) + \quad (۸)$$

$$((R^{\frac{1}{3}}) - (Q_d - R)) +$$

$$\sqrt{((\sin(Q_d - 1) \times \sqrt{(R - 1) + Q_d}) \times ((\sin(-2.076751))^3)^2 +$$

$$\sqrt{((\sqrt{Q_d}) \times ((\sin(2.32315 + (R - 1) + \cos(2.35202)))^2)^3}$$

نتایج به‌دست آمده در تطابق با نتایج پژوهش میرزایی (۱۳۰-۱۳۱۰) بوده است. وی در مطالعات خود به این نتیجه رسید که روش‌های مختلف برآورد بار رسوب از جمله منحنی سنج رسوب و فائو، تا ۱۳ برابر با یکدیگر اختلاف دارند. همچنین این نتیجه با نتیجه پژوهش پوراغنیایی و همکاران (۳-۱۳۱۶) که روش فائو را روش موفق‌تری معرفی نمود، مغایرت دارد. با توجه به اهمیت ویژه رویدادهای سیل و نمونه‌برداری از غلظت و دبی رسوب سیلابی در تعیین بار رسوب

همان‌طوری که اشاره شد،  $Q_d$  دبی جریان روزانه و  $R$  ارتفاع باران متناظر است، ۱- نیز به یک گام تأخیر زمانی اشاره دارد. نتایج برازش رابطه‌ی فائو بر روی داده‌های رسوب هر دو ایستگاه هیدرومتری جلوگیر و پای‌پل، وجود خطای چشم‌گیر در برآورد بار رسوب معلق، با استفاده از این روش را تأیید می‌نماید. نتایج نشان می‌دهند روش فائو با افزایش میزان خطا در برآورد بار رسوب معلق، از توانایی کمتری نسبت به روش منحنی سنج رسوب برخوردار است.

ترکیب این دو پارامتر با تأخیرهای زمانی به عنوان ورودی مدل استفاده شد.

در سناریوی دوم، تأثیر ارتفاع باران در پیش‌بینی و برآورد بار رسوب معلق مورد بررسی قرار گرفت. برای هر یک از ایستگاه‌ها، مقادیر پارامترهای برنامه‌ریزی بیان ژن تعیین شدند. لذا در ایستگاه هیدرومتری جلوگیر، مدل GEP با ۳ ژن، ۳۰ کروموزوم و اندازه سر برابر با ۸ اجرا شد. همین مقادیر با اندازه سر برابر با ۱۰ در ایستگاه هیدرومتری پای‌پل مورد استفاده قرار گرفتند. در نهایت، نتایج نشان داد:

۱- روش‌های منحنی سنجه رسوب و فائو، با ضرایب همبستگی برابر با ۰/۵۱۲۲ و ۰/۴۱۱ به ترتیب برای ایستگاه‌های هیدرومتری جلوگیر و پای‌پل در بخش آزمون از دقت کمی در برآورد بار رسوب معلق برخوردارند.

۲- روش برنامه‌ریزی بیان ژن برای هر دو ایستگاه و در هر دو سناریو، نتایج قابل قبول و موفقی را از خود نشان داد. ضرایب همبستگی بخش آزمون سناریوی اول برابر با ۰/۸۷ و ۰/۸۴۷۳ و سناریوی دوم برابر با ۰/۹۰ و ۰/۸۹۳۷ به ترتیب برای ایستگاه‌های هیدرومتری جلوگیر و پای‌پل، موید توانایی این روش در برآورد بار رسوب معلق می‌باشد.

۳- سناریوی دوم با افزایش ۳/۵ درصدی ضریب همبستگی و کاهش ۱۷ درصدی خطای RMSE مربوط به ایستگاه هیدرومتری جلوگیر و همچنین افزایش ۵/۵ درصدی ضریب همبستگی و کاهش ۱۹/۵ درصدی خطای RMSE متعلق به ایستگاه هیدرومتری پای‌پل مربوط به بخش آزمون، سبب افزایش دقت و کاهش خطای پیش‌بینی بار رسوب معلق شده و بر سناریوی اول برتری دارد. از دیگر برتری‌های آن،

معلق، علت این مغایرت را می‌توان در ضعف آمار مربوط به هر دو ایستگاه و عدم وجود اطلاعات دبی و دبی رسوب در مواقع سیلابی دانست. این امر در شکل‌های (۳) و (۷) به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های هیدرومتری جلوگیر و پای‌پل مشاهده می‌شود.

همچنین، نتایج نهایی هر دو ایستگاه در جداول (۵) و (۷)، نشان داد که روش برنامه‌ریزی بیان ژن در برآورد بار رسوب معلق از برتری چشم‌گیری در مقایسه با روش‌های متداول منحنی‌سنجه رسوب و فائو برخوردار است. نتایج موفق این روش در بخش آزمون، موید توانایی GEP در تعمیم و مدل‌سازی مسایل غیرخطی مهندسی رودخانه از جمله تعیین بار رسوبی می‌باشد. این نتیجه با نتایج پژوهش محققانی از جمله آیتک و کیسی (۲۰۰۸: ۱-۱۱)، زکریا و همکاران (۲۰۱۰: ۱-۸)، گوون و ارسین‌تالو (۲۰۱۰: ۱-۱۰)، عظمت‌الله و همکاران (۲۰۱۱: ۱-۱۶) و کیسی و همکاران (۲۰۱۲: ۱-۱۱) مطابقت دارد.

### نتیجه

در پژوهش حاضر از روش‌های منحنی سنجه رسوب و فائو در برآورد بار رسوب معلق دو ایستگاه هیدرومتری جلوگیر و پای‌پل واقع در بالادست سد مخزنی کرخه استفاده شد و نتایج با نتایج روش برنامه‌ریزی بیان ژن، به عنوان روشی تکاملی و نوین در مسایل مهندسی آب، مقایسه گردید. به این منظور اطلاعات دبی جریان روزانه، دبی رسوب و ارتفاع باران متناظر، مربوط به سال‌های ۹۰-۱۳۶۵ از سازمان آب و برق خوزستان جمع‌آوری گردید. ۸۰ درصد داده‌ها برای بخش آموزش و ۲۰ درصد باقی‌مانده برای بخش آزمون و صحت‌سنجی در نظر گرفته شدند. در روش برنامه‌ریزی بیان ژن، دو سناریو تعریف شد. نخست، تنها از اطلاعات دبی جریان روزانه و دبی رسوب و



- بینا، محمود؛ لاله رنجبران؛ سیدحبيب موسوی جهرمی (۱۳۸۸). برآورد رسوبات معلق با استفاده از پارامترهای فیزیوگرافیک در بالادست سد کرخه، هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران اهواز.

- پوراغنیایی، محمدجواد؛ مسعود گنجی؛ امیر یوسف‌پور؛ باقر قرمزچشمه (۱۳۸۶). مروری بر روش‌های برآورد بار معلق (مطالعه موردی: حوضه آبریز صیدون)، مجله تحقیقات منابع آب ایران. سال ۳. شماره ۳. صفحات ۷۳-۷۵.

- حاجی‌علی‌گل، زهرا؛ سیدمحمود کاشفی‌پور؛ ایمان بیت‌الله‌پور چهارمحالی (۱۳۸۷). استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورد دبی رسوب ورودی به سد مخزنی کرخه، هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور.

- حیدری، خلیل؛ عباس منصوری؛ آرش رزم‌خواه (۱۳۹۱). ارزیابی آورد رسوب بار معلق حوضه‌ی آبریز کرخه با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی دومین همایش ملی عمران و توسعه پایدار، مؤسسه آموزش عالی آزاد خاوران. مشهد.

- خسروپور، حسین؛ محمدعلی بنی‌هاشمی (۱۳۸۷). بررسی رسوب‌گذاری در مخزن سد کرخه با استفاده از مدل عددی و ارائه راهکارهایی برای مدیریت رسوب-گذاری در مخزن، دومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه-های برقابی. تهران.

- داداش‌زاده اصل فاطمه، محسنی ساروی محسن، احمدی حسن و وروانی جواد، (۱۳۸۸). ارزیابی و توسعه منحنی‌های سنج رسوب در برآورد بار رسوبی وقایع سیلابی (منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز قره‌چای)، پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی). شماره ۸۴. صفحات ۳۵-۲۸.

استفاده هم‌زمان از دو پارامتر هیدرولیکی دبی جریان روزانه و پارامتر هیدرولوژیکی ارتفاع باران است.

## پیشنهادات

با توجه به نتایج مذکور پیشنهاد می‌گردد:

۱- به منظور افزایش دقت در تعیین بار رسوب معلق، روش‌های هوشمند از جمله برنامه‌ریزی بیان‌ژن جایگزین روش‌های متداول رگرسیونی گردند.

۲- تأثیر دیگر پارامترهای هواشناسی از جمله دما، ساعات آفتابی و سرعت باد نیز در پیش‌بینی بار رسوب معلق به‌کار گرفته شود.

۳- به دلیل تأثیر دبی‌های سیلابی در برآورد بار رسوب معلق، پیشنهاد می‌شود تعداد نمونه‌برداری‌ها به‌هنگام جریان سیلابی رودخانه افزایش یابد.

۴- سازمان‌های متولی نمونه‌برداری از دبی جریان روزانه، دبی رسوب و ثبت ارتفاع باران، عملیات ثبت داده‌ها را بطور هم‌زمان انجام دهند.

## منابع

- باغبان‌پور، شقایق؛ سیدمحمود کاشفی‌پور (۱۳۹۱).

مدل‌سازی عددی انتقال رسوب غیرچسبیده در رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه کرخه)، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی علوم آب و خاک. شماره ۶۱. دوره ۱۶. صفحات ۴۵-۵۷.

- بختیاری، علیرضا؛ مصطفی رحمانشاهی‌زهایی؛ باقر یوسفی؛ رضا شیراوند عمرویی (۱۳۹۰). ارزیابی روش‌های برآورد بار رسوب کل در رودخانه کرخه، دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه گیلان.

- بایزیدی، مطلب؛ بهرام تفتیان؛ سی و سه مرده معروف، (۱۳۹۱). شبیه‌سازی و تحلیل زمانی-مکانی خشکسالی هواشناسی در حوزه‌های آبریز کارون، کرخه و دز، پژوهش‌های آبخیزداری. شماره ۹۵. صفحات ۶۴-۵۵.

- زنگانه، محمدابراهیم؛ ابوالفضل مساعدی؛ مهدی فتاح‌هلقی؛ امیراحمد دهقانی (۱۳۸۸). مناسب‌ترین روش برآورد دبی انتقال رسوبات معلق (مطالعه موردی ایستگاه ارازکوسه واقع در حوضه گرگان‌رود، ICWR. ذرتی‌پور، محمد؛ بهروز دهان‌زاده؛ عبدالرضا ظهیری؛ محمد هوشمندزاده (۱۳۸۹). شبیه‌سازی رسوب‌گذاری در مخزن سد کرخه با استفاده از مدل کامپیوتری GSTARS-3. پیام مهندس. شماره ۵۳. سال ۱۱. صفحات ۹-۱۷.
- سلاجقه، علی؛ سمانه رضوی‌زاده؛ نعمت‌الله خراسانی ن؛ مینا حمیدی‌فر؛ سوسن سلاجقه (۱۳۹۰). تغییرات کاربری اراضی و آثار آن بر کیفیت آب رودخانه (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کرخه). محیط‌شناسی. شماره ۵۸. سال ۳۷. صفحات ۸۶-۸۱.
- شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران (۱۳۸۰). خلاصه مطالعات مرحله اول طرح کرخه، وزارت نیرو. چاپ اول. انتشارات اکسیر. تهران.
- ظهیری، عبدالرضا؛ هاشم ماکنالی‌زاده؛ بهروز دهان‌زاده؛ صادق طرفی (۱۳۸۸). برآورد حجم رسوب معلق ورودی به مخزن سد کرخه، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران. دانشگاه شیراز.
- قمشی، مهدی؛ حسن ترابی‌پوده (۱۳۸۱). ارزیابی کاربرد معادله‌های برآورد بار رسوبی در رودخانه‌های خوزستان، علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. شماره ۱. جلد ۶. صفحات ۲۹-۱۳.
- کالوندی، سیدمحمد؛ سعیدرضا خدانشناس؛ بیژن قهرمان؛ رمضان طهماسبی؛ آرمین بوستانی (۱۳۸۹). آنالیز روش‌های مختلف منحنی سنجه در برآورد رسوب ورودی به سدها (مطالعه موردی سد دوستی)، فصلنامه علمی پژوهشی آبیاری و آب. شماره ۱. سال ۱. صفحات ۲۰-۱۰.
- کیا، عیسی؛ علیرضا عمادی (۱۳۹۱). مقایسه روش‌های مختلف رگرسیون آماری در برآورد بار رسوب معلق دراز مدت سالانه (مطالعه موردی: بابل‌رود)، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز. شماره ۷. سال ۴. صفحات ۲۷-۱۵.
- ماکنالی‌زاده، هاشم؛ عبدالجلیل طرفی؛ صادق طرفی؛ مهدی اسروش (۱۳۸۹). بررسی آورد رسوب کل سرشاخه‌های اصلی رودخانه کرخه به سد مخزنی کرخه بر اساس روش‌های USBR و FAO" مجموعه مقالات نخستین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران. شرکت آب منطقه‌ای کرمانشاه.
- میرزایی، محمد (۱۳۸۰). مقایسه روش‌های آماری برآورد بار رسوب در رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه گرگان‌رود)، پایان‌نامه ارشد. دانشگاه تهران.
- وروانی، جواد؛ شهرام خلیقی‌سیگارودی (۱۳۸۶). بررسی میزان خطای منحنی‌های سنجه رسوب برای برآورد بار رسوبی وقایع سیلابی در رودخانه قره‌چای، یافته‌های نوین کشاورزی. شماره ۳. دوره ۱. صفحات ۲۱۴-۲۰۱.
- Yassin, Mohamed., Alazba, A.A., and A.Mattar, Mohamed (2016). Artificial neural networks versus gene expression programming for estimating reference evapotranspiration in arid climate. *Agricultural Water Management*. 163. 110-124.
- Atieh, M., Mehlretter, S.L., Gharabaghi, B., and Rudra, R (2015). Integrative neural networks model for prediction of sediment rating curve parameters for ungauged basins. *Journal of Hydrology*, 531. 1095-1107.
- Ayttek, Ali., and Kisi, Ozgur (2008). A genetic programming approach to suspended sediment modeling. *Journal of Hydrology*, 351:3-4. 288-298.
- Azamathulla, H.Md, Deo, M.C., and Deolalikar, P.B (2008). Alternative neural networks to estimate the scour below spillways. *Advances in Engineering Software*. 39: 8. 689-698.
- Azamathulla, Hazi Mohammad., Ab.Ghani, Aminuddin., Leow, Cheng Siang., Chang, Chun Kiat., and Zakaria, Nor Azazi (2011). Gene-Expression programming for the development of a stage-discharge curve of the Pahang River. *Water Resour Manage*, 25. 2901-2916.
- Azamathulla, Hazi Mohammad (2012). Gene expression programming for prediction of scour depth downstream of sills. *Journal of Hydrology*, Vol. 460-461. 156-159.

- Kakaei Lafdani, E., Moghaddam Nia, A., and Ahmadi, A (2013). Daily suspended sediment load prediction using artificial neural networks and support vector machines. *Journal of Hydrology*, 478. 50-62.
- Kisi, O., Hosseinzadeh Dalir, Ali., Cimen, Mesut., and Shiri Jalal (2012). Suspended sediment modeling using genetic programming and soft computing techniques. *Journal of Hydrology*, 450-451, 48-58.
- Kisi, Ozgur., Shiri, Jalal., and Tombul, Mustafa (2013). Modeling rainfall-runoff process using soft computing techniques. *Computers & Geosciences*, 51. 108-117.
- Kumar, Dheeraj., Pandey. Ashish., Sharma, Nayan., and Flugel, Wolfgang-Albert (2016). Daily suspended sediment simulation using machine learning approach. *Catena*, 138. 77-90.
- Moharana, S., and Khatua, K.K (2014). Prediction of roughness coefficient of a meandering open channel flow using Neuro-Fuzzy Inference System. *Measurement*, 51. 112-123.
- Muzzammil, Mohammad., Alama, Javed., and Danish, Mohammad (2015). Scour prediction at bridge piers in cohesive bed using Gene Expression Programming. *Aquatic Procedia*, 4. 789-796.
- Najafzadeh, Mohammad., Etemad-Shahidi, Amir., and Yong Lim, Siow (2016). Scour prediction in long contractions using ANFIS and SVM. *Ocean Engineering*, 111. 128-135.
- Palmieri, A., Shah, F., W. Annandale G. and Danier A (2003). *Reservoir Conservation*, Vol. 1, the Rescon Approach. 101p.
- Riad, S., and Mania, J (2004). Rainfall-Runoff model using an artificial neural network approach. *Mathematical & Computer Modeling*, 40. 839-846.
- Roushangar, Kiyoumars., Vojoudi Mehrabani, Fatemeh., and Shiri, Jalal (2014). Modeling river total bed material load discharge using artificial intelligence approaches (based on conceptual inputs). *Journal of Hydrology*, 514. 114-122.
- Zakaria, Nor Azazi., Azamathulla, Hazi Mohammad., Chang, Chun Kiat., and Ab.Ghani, Aminuddin(2010). Gene Expression Programming for Total Bed Material Load estimation- a case study. *Science of the Total Environment*, 408. 5078-5085.
- Zhang, Wei., Wei, Xiaoyan., Zheng, Jinhai., Zhu, Yuliang., and Zhang, Yanjing (2012). Estimating suspended sediment load in the Peral River Delta region using sediment rating curves. *Continental Shelf Research*, 38. 35-46.
- Azamathulla, H.Md., and Jarrett, R.D (2013). Use of Gene-Expression Programming to Estimate Manning's Roughness Coefficient for High Gradient Streams. *Water Resour Manage*, 27.715-729.
- Bateni, S.M., Borghei, S.M., and Jeng, D.-S. (2007). Neural network and neuro fuzzy assessments for scour depth around bridge piers. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 20:3. 401-414.
- Ebtehaj, Isa., Bonakdari, Hossein., Zaji, Amir Hossein., Azimi, Hamed., and Sharifi, Ali (2015). Gene expression programming to predict the discharge coefficient in rectangular side weirs. *Applied Soft Computing*, 35. 618-628.
- Emamgholizadeh, S., Kashi, H., Marofpoor, I., and Zalaghi, E (2014). Prediction of water quality parameters of Karoon River (Iran) by artificial intelligence-based models. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 3:11. 645-656.
- Emamgholizadeh, S., Bateni, S.M., Shahsavani, D., Ashrafi, T., and 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.
- Ferreira, Candida (2001a). Gene Expression Programming in Problem Solving. In: 6<sup>th</sup> online world conference on Soft Computing in Industrial Applications (Invited tutorial), 1-22.
- Ferreira, Candida (2001b). Gene Expression Programming: A New Adaptive Algorithm for Solving Problems. *Complex Systems*, 13:2. 87-129.
- Ferreira, Candida (2004). Gene expression programming and the evolution of computer programs. *Recent Developments in Biologically Inspired Computing*, 82-103.
- Guven, Aytek., and Ersin Talu, Necip (2010). Gene expression programming for estimating suspended sediment yield in middle Uuphrates basin. *Clean-Soil, Air, Water*, 38:12. 1159-1168.
- Guven, Aytek., and Kisi, Ozgur (2011). Estimation of suspended sediment yield in natural rivers using Machine-Coded linear genetic programming. *Water Resour Manage*, 25. 691-704.
- Haddadchi, Arman., Movahedi, Neshat., Vahidi, Elham., and Dehghani, Amir Ahmad (2013). Evaluation of suspended load transport rate using formulas and artificial neural network models (Case study: Chelchay Catchment). *Journal of Hydrodynamics*, 25:3. 459-470.

