

بهینه‌سازی ضرایب معادله سنجه رسوب با استفاده از الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: ایستگاه‌های قزاقلی و باغ عباسی)

فرزانه ناصری^۱، محمود آذری^{۲*} و محمدتقی دستورانی^۳

تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۰۷/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۲۳

چکیده

برآورد صحیح غلظت رسوبات رودخانه‌ها برای برنامه‌ریزی و مدیریت پروژه‌های منابع آب اهمیت دارد. روش‌های مختلفی برای تعیین ارتباط بین دبی جریان و مقدار رسوب توسعه یافته است. منحنی سنجه رسوب یکی از متداول‌ترین روش‌های برآورد رسوب معلق رودخانه‌ها می‌باشد که با خطای زیادی همراه است. به‌منظور تخمین بهتر میزان رسوب با منحنی سنجه، می‌توان ضرایب این معادله را با روش‌های هوش مصنوعی بهینه کرد. هدف این تحقیق استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی ضرایب معادله سنجه رسوب رودخانه‌های گرگانرود (ایستگاه قزاقلی) و فریمان (ایستگاه باغ عباسی) می‌باشد. بدین منظور، آمار دبی جریان و غلظت رسوب معلق برای سال‌های ۱۳۸۸-۱۳۵۰ برای ایستگاه قزاقلی و سال‌های ۱۳۸۸-۱۳۴۷ برای ایستگاه باغ‌عباسی اخذ شد و منحنی سنجه رسوب با استفاده از ۷۰ درصد داده‌ها به عنوان داده‌های آموزش به‌دست آمد. به منظور بهینه‌سازی ضرایب، مدل الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار MATLAB 2017 برنامه‌نویسی شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مدل الگوریتم ژنتیک برای ایستگاه قزاقلی و باغ‌عباسی به ترتیب با ضریب نش-ساتکلیف ۰/۵، ۰/۷۲ و ضریب تعیین ۰/۵ و ۰/۸۹ عملکرد بهتری نسبت به منحنی سنجه رسوب داشته است. همچنین الگوریتم ژنتیک برای ایستگاه باغ‌عباسی با تعداد نمونه کم از دقت بهتری نسبت به روش منحنی سنجه برخوردار است. نتایج دلالت بر کارایی مناسب الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی رابطه دبی و رسوب به ویژه در ایستگاه‌های با داده کم دارد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم تکاملی، بهینه‌سازی، رسوبدهی، رسوب معلق، منحنی سنجه رسوب.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. ۰۹۳۰۲۳۷۷۰۲۷

fa_na556@um.ac.ir

^{۲*} استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، ۰۵۱۳۸۸۰۵۴۷۳، m.azari@um.ac.ir (نویسنده مسوول)

^۳ استاد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، ۰۵۱۳۸۸۰۵۴۷۲، dastorani@um.ac.ir

مقدمه

رسوبات رودخانه‌ای به‌عنوان یک محرک تنش‌زا، مهم‌ترین تهدید برای اکوسیستم‌های آبی می‌باشد که برای جلوگیری و یا به حداقل رساندن خسارات وارده باید سه فرایند فرسایش، انتقال و ته‌نشینی مواد رسوبی را مورد مطالعه قرار داد (کارگریان، ۱۳۹۱). پدیده انتقال رسوب از جمله فرآیندهای هیدرودینامیکی مهمی است که بسیاری از سازه‌های رودخانه‌ای و تاسیسات عمرانی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مشکلات بهره‌برداری از منابع آب‌های سطحی جهان می‌باشد (دهقانی و همکاران، ۱۳۸۸). طبق بررسی‌های انجام‌شده سالانه به‌طور متوسط ۱۸ میلیارد تن مواد رسوبی از سطح قاره‌ها فرسایش یافته و از طریق رودخانه‌ها به دریاها و اقیانوس تخلیه می‌شود (وزارت نیرو، ۱۳۹۱) که از این میان حدود ۷۵-۹۵ درصد کل رسوب حوضه، رسوبات معلق رودخانه‌ای می‌باشد (طباطبایی و همکاران، ۱۳۹۳). بسیاری از رودخانه‌های کشور ما به دلیل شرایط آب و هوایی، هیدرولوژیکی، زمین‌شناسی و فشار بیش از حد به اراضی حوزه‌های آبخیز، رسوبدهی بالایی دارند (مساعدی و همکاران، ۱۳۸۵). تخمین و پیش‌بینی رسوب در طیف گسترده‌ای از مسائل، نظیر مهندسی رودخانه، طراحی سدها، انتقال آلودگی، تأثیرات زیست‌محیطی و آبخیزداری و بسیاری از مباحث منابع آب کاربرد دارد (رجایی و میرباقری، ۱۳۸۸). با وجود صرف هزینه‌های زیاد در پروژه‌های عمرانی عظیم در بخش آب کشور، مسائل و مشکلاتی مانند فرسایش، رسوب‌گذاری و آلودگی منابع آب که همواره از چالش‌های مهم مدیران بخش آب بوده، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در حالی که برآورد میزان صحیح و دقیق مقدار رسوب می‌تواند کمک زیادی در طراحی سازه‌های مناسب و تصمیم‌گیری‌های مؤثر به همراه داشته باشد (عبدی دهکردی، ۱۳۹۱). رسوبدهی^۱ حوضه شامل رسوباتی است که از طریق خروجی حوضه به خارج از آن منتقل می‌شود (Zhang et al., 2015) و به‌عنوان شاخص مستقیم در اندازه‌گیری فرسایش اراضی بالادست و اولویت‌بندی زیر حوضه‌ها در برنامه‌های حفاظت خاک به شمار می‌آید. به‌منظور اجرای برنامه‌های حفاظت خاک و کنترل رسوب، همچنین محاسبه و طراحی دقیق حجم سدهای مخزنی،

برآورد میزان رسوبدهی حوزه‌آبخیز ضرورت دارد. از این‌رو، برآورد صحیح بار رسوب معلق به‌دلیل اثرات منفی آن در کاهش شاخص‌های کیفی منابع آبی، انتقال آلودگی، کاهش ظرفیت مخازن و کانال‌ها حائز اهمیت است (طباطبایی، ۱۳۹۳؛ کیا و همکاران، ۱۳۹۴). فرآیند به‌دست آوردن یک رابطه برای تخمین میزان رسوب، به‌طور اساسی یک مسأله نگاشت غیرخطی است (روشنگر و همکاران، ۱۳۹۴). برای تحقق این موضوع، روش‌ها و مدل‌های متفاوتی وجود دارد که نیازمند تخمین پارامترهای موثر با آمار و اطلاعات مناسب می‌باشد (اکبرپور و حامدافتخار، ۱۳۸۵). این روش‌ها شامل مدل‌های فیزیکی، مدل‌های فیزیکی تویزیعی ریاضی، مدل‌های یکپارچه مفهومی، مدل‌های هیدرولیکی، مدل‌های عددی انتقال رسوب، مدل‌های آماری و مدل‌های تجربی می‌باشد (Jha and Abrahart et al., 2008). Bezak et al., 2014; Bombardelli., 2011 معادله منحنی‌سنجه رسوب^۲، یکی از روش‌های تجربی است که به دلیل کاربرد آسان بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. اما در عین حال برآورد رسوب از طریق این معادله همواره با مقداری خطا و عدم قطعیت همراه است (Asselman., 2000, Arab Khedri., 2005). از این‌رو، استفاده از روش‌های هوشمند، همچون مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (شیخعلی‌پور و همکاران، ۱۳۹۴؛ یوسفی و پورشرعیاتی، ۱۳۹۳؛ Alp and Cigizoglu., 2007)، ماشینی دهقانی و وفاخواه، ۱۳۹۲، Zhu et al., 2007)، بردار پشتیبان (Talebi et al., 2016)، الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم زنبور عسل، الگوریتم ژنتیک، (Ebrahimi et al., 2013؛ Altunkaynak., 2009)؛ Kisi et al., 2012)، سیستم تطبیقی عصبی- فازی، برنامه‌ریزی ژنتیک و برنامه‌ریزی بیان ژن (Kisi et al., 2012)؛ طباطبایی، ۱۳۹۳؛ روشنگر و همکاران، ۱۳۹۴؛ امام‌قلی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵)، به دلیل عملکرد بهتر نسبت به منحنی‌سنجه رسوب و روابط تجربی دیگر، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روش‌ها که جزء روش‌های هوش مصنوعی می‌باشد به‌عنوان یک جعبه سیاه می‌باشند که کمتر در قید و بند مسائل فیزیکی بوده و قادرند فرآیند غیرخطی و غیر ایستای جریان رودخانه و

² Sediment Rating Curve (SRC)¹ Sediment Yield

معیارهای ارزیابی مدل‌ها نشان داد که در میان روش‌های پیش‌بینی، روش برنامه‌ریزی ژنتیک با دارا بودن جذر میانگین مربعات خطای کمتر از ۰/۰۶۷ دقت بالاتری نسبت به دیگر روش‌ها دارد. پس از آن روش منحنی سنج بهینه شده با الگوریتم ژنتیک دارای نتایج نزدیک‌تری به مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. طهمورث و همکاران (۱۳۸۸)، با استفاده از داده‌های دبی آب و دبی رسوب ایستگاه گلینک در رودخانه طالقان و پارامترهای ژئومورفولوژیک حوضه، به مدل‌سازی رسوب معلق روزانه با مدل شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. نتایج نشان داد مدل شبکه عصبی مصنوعی^۹ کارایی و قابلیت بالاتری نسبت به مدل رگرسیونی در برآورد رسوب رودخانه دارد و استفاده از پارامترهای ژئومورفولوژی موثر در تولید رسوب، سبب افزایش دقت تخمین آورد رسوب رودخانه می‌شود. امیدواری‌نیا (۱۳۸۸)، با تلفیق شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک، روشی بهینه جهت برآورد میزان رسوبات معلق در بازه‌ای از رودخانه کارون ارائه نمود. مقایسه روش تلفیقی شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک با روش‌های تجربی موجود نشان داد که این مدل از خطای کمتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار می‌باشد. محمدرضا پور و همکاران (۱۳۹۴)، در تحقیقی به مقایسه الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات برای بهینه کردن رابطه بین دبی جریان و دبی رسوب برای ایستگاه کهک در رودخانه سیستان پرداختند. ارزیابی نتایج نشان داد که الگوریتم ژنتیک از دقت بالاتری نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات و منحنی‌سنج رسوب برخوردار می‌باشد. در خارج از کشور نیز Altunkaynak (2009)، از الگوریتم ژنتیک جهت برآورد مقدار رسوب رودخانه می‌سی‌سی‌پی در میسوری، استفاده کرد. نتایج نشان داد که میانگین نسبی خطای الگوریتم ژنتیک به مراتب بهتر از مدل‌های رگرسیونی می‌باشد. در تحقیق دیگر Kisi et al (2012)، روش برنامه‌ریزی ژنتیک را برای برآورد بار رسوب معلق روزانه در دو ایستگاه در رودخانه کامبرلند در ایالات متحده به کار گرفتند. مقایسه نتایج برآورد GP با سیستم تطبیقی عصبی- فازی^{۱۰}، شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان^{۱۱} نشان داد که

رسوب را بدون نیاز به مدل‌سازی عامل‌های محیطی و ژئومتری مدل‌سازی کنند.

در دهه اخیر روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک^۱ و الگوریتم ژنتیک^۲ به عنوان یک روش تناوبی موثر در پیش‌بینی داده‌ها در زمینه مهندسی آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. امامقلی‌زاده و همکاران (۱۳۹۵)، به منظور پیش‌بینی بار رسوب معلق ایستگاه‌های جلوگیری و پای‌پل واقع در بالادست سد مخزنی کرخه، روش برنامه‌ریزی بیان ژن^۳ با دو سناریو را مورد استفاده قرار دادند و نتایج با روش‌های منحنی سنج رسوب و فائو مقایسه شد. در سناریوی اول از اطلاعات دبی جریان و دبی رسوب ایستگاه‌ها و در سناریوی دوم از مقدار باران حوزه‌آبخیز نیز استفاده گردید. نتایج هر دو سناریو نشان داد، روش برنامه‌ریزی بیان ژن در دو ایستگاه مطالعاتی دارای مجذور میانگین مربعات خطا^۴ و میانگین قدر مطلق خطای^۵ کمتری نسبت به روش منحنی سنج رسوب و روش فائو می‌باشد. در مطالعه‌ای دیگر حیات‌زاده و همکاران (۱۳۹۴)، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و روش‌های رگرسیونی سنج رسوب بر اساس داده‌های ۱۳۶ واقعه دبی جریان و رسوب متناظر و همچنین پارامترهای مورفولوژیکی به پیش‌بینی بار معلق رسوب در حوزه باغ-عباس پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که روش شبکه عصبی مصنوعی همراه با داده‌های مورفولوژیکی حوزه به مراتب دقت بیشتری نسبت به روش منحنی-سنج رسوب دارد. با هدف مقایسه مدل‌های سری زمانی ARMA^۶، AR^۷، ARIMA^۸ و شبکه عصبی در پیش‌بینی رسوب معلق، برزگری و دستورانی (۱۳۹۱)، از داده‌های روزانه ایستگاه قزاقلی واقع در گرگانرود استفاده نمودند. نتایج حاصل از ارزیابی با شاخص‌های اندازه‌گیری خطا، نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی در مقایسه با مدل‌های سری زمانی توانایی بهتری در پیش‌بینی و مدل‌سازی رسوب ماهانه دارد. در پژوهش دیگر روشنگر و همکاران (۱۳۹۴)، با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک، الگوریتم ژنتیک، مدل‌های نیمه‌تجربی تعیین بار کل رسوب و منحنی سنج به پیش‌بینی بار رسوب رودخانه قطورچای واقع در شمال غرب حوزه‌آبخیز ارس پرداختند. مقایسه

⁷ Auto Regressive

⁸ Auto Regressive Integrated Moving Average

⁹ Artificial Neural Network (ANN)

¹⁰ Adaptive Neuro-fuzzy Inference System (ANFIS)

¹¹ Support Vector Machine (SVM)

¹ Genetic Programming (GP)

² Genetic Algorithm(GA)

³ Gene Expression Programming (GEP)

⁴ Root Mean Square Error (RMSE)

⁵ Mean Absolute Error (MAE)

⁶ Autoregressive-Moving Average

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

این تحقیق در حوضه‌های گرگانرود در استان گلستان و حوضه سد فریمان در استان خراسان رضوی انجام شده است. حوزه آبخیز گرگانرود به مساحت ۱۰۱۹۷ کیلومتر مربع یکی از حوضه‌های شمال کشور است که در بین طول‌های جغرافیایی $54^{\circ}10'$ تا $56^{\circ}26'$ و عرض‌های شمالی $36^{\circ}35'$ تا $38^{\circ}15'$ قرار دارد. ارتفاع متوسط حوضه ۱۰۰۲ متر، شیب متوسط حوضه ۲/۲ درصد و طول آبراهه اصلی ۷۵/۱ کیلومتر می‌باشد (مساعدی و همکاران، ۱۳۸۹). اقلیم حوضه براساس روش دومارتن از نیمه‌خشک در شرق تا مرطوب در بخش‌های غربی حوضه متغیر می‌باشد. کاربری‌های کشاورزی، مرتع و جنگل کاربری‌های اصلی حوضه می‌باشند. میانگین بارندگی گرگانرود از ۲۰۲ میلی‌متر در ایستگاه رباط قره‌بیل تا ۹۰۳ میلی‌متر در ایستگاه پس-پشته متغیر است. وقوع بارش‌های شدید به‌همراه تشکیلات زمین‌شناسی حساس به فرسایش و تغییر شدید کاربری اراضی از جنگل به اراضی دیم سبب فراهم آمدن پتانسیل لازم برای تشکیل رواناب و در نتیجه فرسایش و رسوب در حوضه شده است (مساعدی و همکاران، ۱۳۸۵).

حوزه آبخیز سد فریمان به وسعت ۲۷۸/۴۴ کیلومتر مربع در محدوده عرض شمالی $35^{\circ}33'$ تا $35^{\circ}43'$ و محدوده طول شرقی $59^{\circ}34'$ تا $59^{\circ}44'$ گسترده شده است. ارتفاع متوسط حوزه ۱۹۹۳ متر با شیب متوسط ۱۶/۳ درصد و طول آبراهه اصلی ۲۳/۵ کیلومتر می‌باشد (حیات زاده و همکاران، ۱۳۹۴). اقلیم حوزه بر اساس روش دومارتن، سرد و نیمه‌خشک می‌باشد. کاربری اصلی حوضه، زراعت دیم و آبی می‌باشد و شدت فرسایش‌پذیری حوضه متوسط تا زیاد است. شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های قزاقلی و باغ-عباسی در حوضه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

GP نسبت به مدل‌های دیگر، در برآورد بار رسوب معلق روزانه عملکرد بهتری داشته است (Alp and Cigizoglu, 2007)، به‌منظور برآورد بار رسوب معلق روزانه از شبکه‌های عصبی مصنوعی $FFBP^1$ و RBF^2 استفاده نمودند. نتایج نشان داد، هیدروگراف بار رسوب شبیه‌سازی شده دو روش ANN، از رگرسیون چندخطی به داده‌های مشاهده‌ای نزدیک‌تر است. (Talebi et al (2016). با استفاده از درختان رگرسیونی (RTs^3) و درختان مدل (MTs^4) بار رسوب معلق حوضه حیدرآباد در غرب ایران را برآورد کردند و با روش شبکه عصبی مصنوعی و منحنی‌سنجه رسوب مقایسه کردند. نتایج نشان داد، روش منحنی‌سنجه رسوب برای رسوب روزانه و مدل‌های RTs و MTs برای مقادیر بالای رسوب از دقت بالاتری برخوردار است. (Güven and Kişi (2011). از برنامه‌ریزی ژنتیک خطی و شبکه عصبی مصنوعی برای برآورد میزان بار معلق روزانه در رودخانه تونگوا در ایالت مونتانا آمریکا استفاده نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که برنامه‌ریزی ژنتیک خطی عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها در برآورد میزان بار معلق روزانه ایستگاه‌های مورد مطالعه دارد.

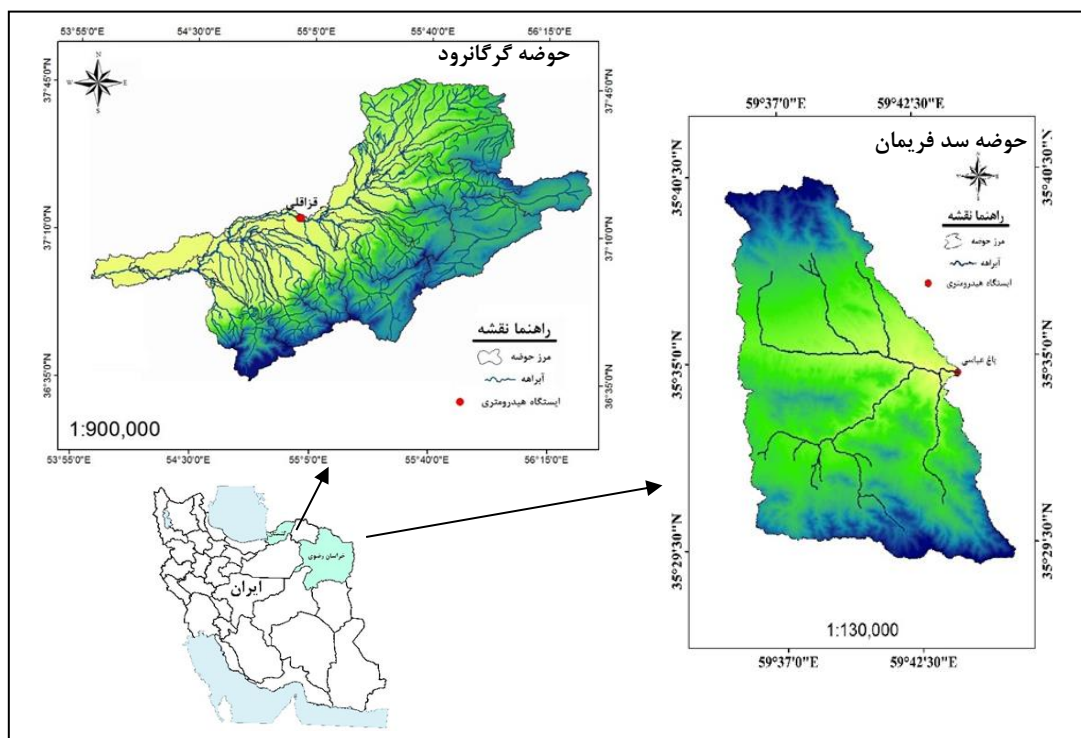
با وجود دقت قابل قبول روش‌های برآورد رسوب معلق مبتنی بر هوش مصنوعی، به‌دلیل پیچیدگی در ایجاد ساختار و غیرصریح بودن این الگوها در عمل به طور مناسبی توسعه نیافته است. لذا توسعه یک الگوی صریح و آسان برای پیش‌بینی رسوب ضروری می‌باشد. با توجه به پژوهش‌های انجام شده، روش منحنی‌سنجه رسوب همواره با خطا و عدم قطعیت زیادی همراه است ولی با استفاده از روش‌های نوین و الگوریتم‌های تکاملی دستیابی به روابط بهتر دبی و رسوب امکان‌پذیر می‌باشد. لذا این تحقیق به دنبال استفاده از الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک تکنیک جستجوی هوشمند برای بهینه‌سازی روابط دبی و رسوب معلق و مقایسه آن با منحنی‌سنجه رسوب در دو رودخانه گرگانرود در استان گلستان و رودخانه فریمان در استان خراسان رضوی می‌باشد. بدین ترتیب ضمن ارزیابی الگوریتم ژنتیک امکان بررسی تفاوت‌های اقلیمی در نتایج تحقیق نیز ممکن می‌باشد.

⁴ Model Trees

¹ Fast Factorized Back Projection

² Radial Basis Function

³ Regression Trees



شکل (۱): موقعیت ایستگاه‌های قزاقلی و باغ عباسی در حوضه‌های مورد مطالعه

جمع‌آوری داده‌ها

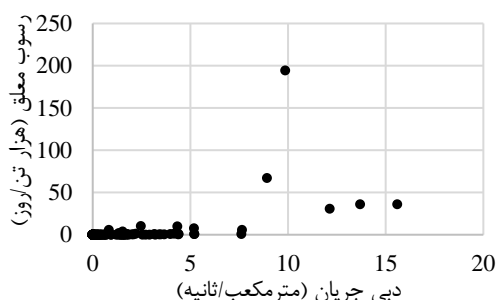
برای محاسبه رسوب معلق، ابتدا آمار و اطلاعات لازم از قبیل آمار غلظت رسوب معلق و دبی جریان متناظر با آن، برای ایستگاه قزاقلی (دوره ۱۳۸۸-۱۳۵۰) در حوضه گرگانرود و ایستگاه باغ عباسی در حوضه سد فریمان (دوره ۱۳۸۸-۱۳۴۷) از شرکت‌های آب منطقه‌ای استان گلستان و خراسان رضوی اخذ گردید. وجود داده‌های پرت با آزمون گروپز-بک ($G-B^1$) و همگن بودن داده‌ها با آزمون ران تست^۲ بررسی شد (ادهمی، ۱۳۹۱؛ دهقانی و همکاران، ۱۳۸۸)، پس از بررسی داده‌ها از نظر همگنی و حذف داده‌های پرت، ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش مدل-ها و ۳۰ درصد برای آزمون مدل‌ها تفکیک شد (حیات‌زاده و همکاران، ۱۳۹۴). جدول ۱ خصوصیات آماری داده‌های دبی و رسوب ایستگاه‌های مطالعاتی را نشان می‌دهد. شکل ۲ و ۳ پراکندگی داده‌ها در ایستگاه قزاقلی و باغ-عباسی را نشان می‌دهد.

² Run Test

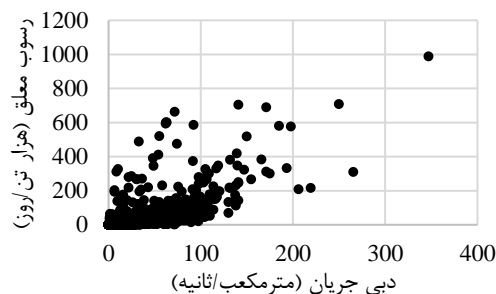
¹ Grubz Test

جدول (۱): خصوصیات آماری داده‌های دبی و رسوب ایستگاه‌های مطالعاتی

نام ایستگاه	تعداد داده		تعداد کل		میانگین داده‌ها		کمینه داده‌ها		بیشینه داده‌ها	
	آزمون	آموزش	داده‌ها	داده‌ها	دبی	رسوب	دبی	رسوب	دبی	رسوب
قزاقلی	۱۱۱۸	۲۶۱۰	۳۷۲۸		۲۰/۰۷	۱۴۹۴۹/۴۴	۰/۰۰۴	۰/۰۱۲	۳۴۷	۹۸۸۴۱۷
باغ عباسی	۴۴	۱۰۴	۱۴۸		۱/۲۳	۲۸۴۷/۳۳۷	۰/۰۱	۰/۰۱۳	۱۵/۶	۱۹۴۵۱۷/۲



شکل (۳): نمودار پراکندگی داده‌های ایستگاه باغ عباسی



شکل (۲): نمودار پراکندگی داده‌های ایستگاه قزاقلی

منحنی سنجه رسوب:

منحنی سنجه رسوب، یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای برآورد رسوب معلق رودخانه‌ها می‌باشد. این معادله را Fleming (1979) با بررسی آمار رسوب معلق ۲۵۰ رودخانه دنیا، برای حوضه‌های فاقد آمار ارائه داد. منحنی - سنجه رسوب، یک رابطه تجربی و جزء برآوردکننده‌های رگرسیونی می‌باشد که بر اساس روابط به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌های مستقیم دبی جریان - غلظت رسوب ایجاد می‌شود. در این پژوهش، به منظور برآورد بار معلق رسوب، از روش اداره عمران اراضی ایالات متحده^۱ و بدون دسته بندی داده‌ها استفاده شد. در این روش، داده‌های دبی رسوب و دبی جریان متناظر آن‌ها به یک محور مختصات لگاریتمی منتقل شده و بهترین خط برازش ترسیم می‌شود. منحنی سنجه رسوب دارای معادله‌ای به صورت رابطه ۱ می‌باشد.

$$Q_s = a Q_w^b \quad (1)$$

در این معادله، Q_s غلظت رسوب بر حسب میلی گرم در لیتر یا تن در روز، Q_w دبی جریان بر حسب مترمکعب بر ثانیه و a و b به ترتیب ضریب و نمای معادله می‌باشد (Fleming, 1979; مساعدی و همکاران، ۱۳۸۹). ضرایب ثابت a و b از برازش یک رابطه رگرسیونی بین $\log Q_s$ و $\log Q_w$ 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 فرساینده‌گی رودخانه را نشان می‌دهد. افزایش اندک دبی جریان، قدرت فرساینده‌گی را به شدت افزایش می‌دهد (امامقلی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵). به‌منظور برآورد رسوب معلق با این روش، مقادیر a و b معادله برای داده‌های آموزش در نرم افزار EXCEL به دست آمد، سپس، با استفاده از رابطه به دست آمده مقدار رسوب برای داده‌های آزمون، محاسبه گردید.

الگوریتم ژنتیک:

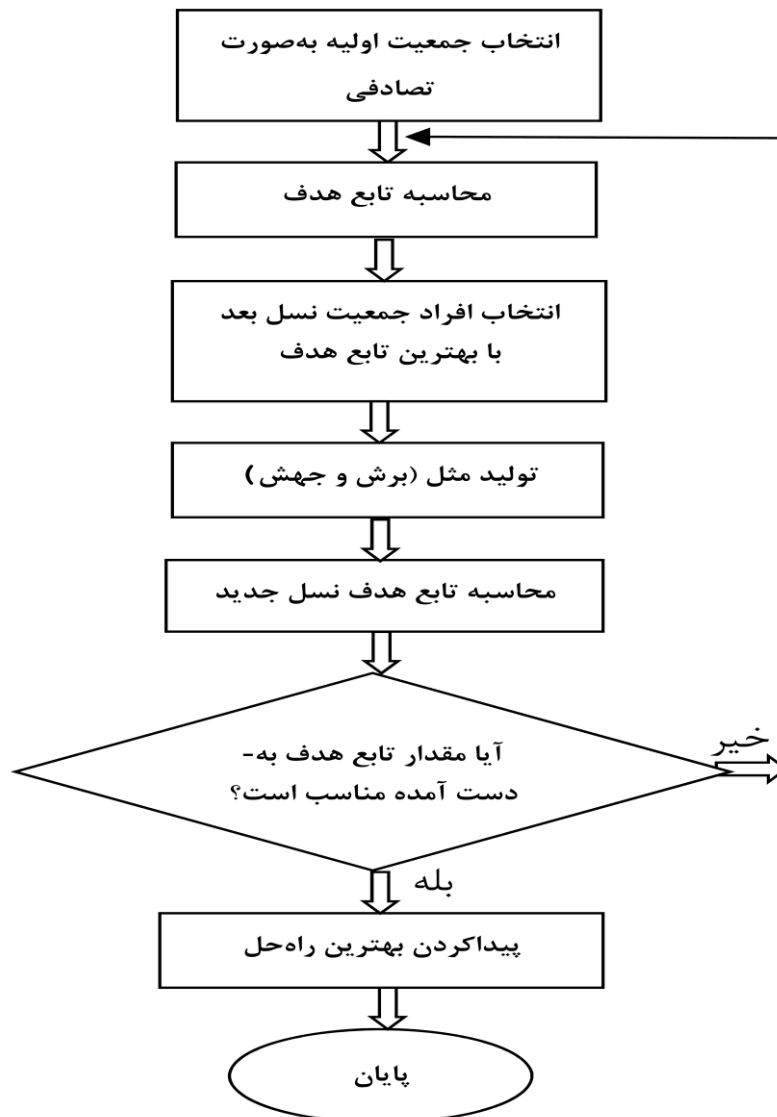
الگوریتم‌های تکاملی روش‌هایی بر مبنای جستجوی تصادفی‌اند که از مدل‌سازی تکامل بیولوژیکی طبیعی الگوبرداری شده‌اند. در این الگوریتم‌ها پاسخ‌های ممکن که از ویژگی برتری برخوردارند و نیز بقای نسل بیشتری دارند، انتخاب می‌شوند. از این‌رو، تخمین نزدیک‌تری از پاسخ بهینه به دست می‌دهند. الگوریتم ژنتیک یکی از الگوریتم‌های تکاملی پرکاربرد است که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.

الگوریتم ژنتیک به‌وسیله هالند در دهه ۱۹۷۰ معرفی شد. اصول اولیه الگوریتم ژنتیک از علم ژنتیک اقتباس شده است. این الگوریتم مبتنی بر تکرار است و هرچه

ژنتیک را قادر می‌سازد تا به راه‌حل بهینه نزدیک شود (Goldberg., 1989؛ Zhang et al., 2010)؛ شکل ۴ نمودار جریان‌ی الگوریتم ژنتیک (Holland., 1975). شکل ۴ نمودار جریان‌ی الگوریتم ژنتیک (Altunkaynak., 2009) و جدول ۲ مقادیر پارامترهای به‌کاربرده شده در الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد.

در این تحقیق، داده‌های آموزش به منظور یافتن بهترین مقادیر a و b رابطه ۱ در نظر گرفته شد و با داده‌های آزمون، عملکرد GA مورد ارزیابی قرار گرفت. ابتدا مسئله بهینه‌سازی به صورت یک فضای جستجو از مقادیر پیوسته a و b در نرم افزار MATLAB 2017 برنامه‌نویسی شد، سپس جمعیت اولیه در این فضا تعیین و تابع هدف، برای هر کروموزوم (a و b) محاسبه گردید.

مشخصات فردی هر راه‌حل قوی‌تر باشد، انتخاب برتری ایجاد خواهد شد. مهم‌ترین عملگرهای الگوریتم ژنتیک، برش و جهش می‌باشد. در این الگوریتم، ابتدا به طور تصادفی جامعه‌ای از کروموزوم‌ها ایجاد و سپس برازندگی آن‌ها محاسبه و تعیین می‌گردد. در ادامه، به وسیله عملگرهای برش و جهش جامعه‌ای جدید با مقادیر برازندگی بالاتر تولید می‌شود. عمل برش بر روی کروموزوم‌های افرادی که به‌عنوان والد انتخاب شده‌اند اعمال می‌شود و پس از اعمال برش، ژن‌های دو والد از محل برش از هم جدا شده و با هم جابجا می‌شوند. در عمل جهش یک ژن می‌تواند با ژنی دیگر در طول کروموزوم تعویض شود یا مقدار عددی یک یا چند ژن به طور تصادفی تغییر کند. در واقع، عملگر جهش الگوریتم



شکل (۴): نمودار جریان‌ی الگوریتم ژنتیک

عملکرد الگوریتم می‌گردد و در سرعت همگرایی و مرغوبیت جواب‌ها تأثیرگذار خواهد بود، به‌دست آوردن بهترین پارامترها با سعی و خطا و یا استناد به مرور منابع انجام گرفت. لذا به منظور بهتر شدن کارایی الگوریتم ژنتیک سعی و خطاهایی برای به‌دست آوردن بهترین مقدار برای هر پارامتر انجام شده است. جدول ۲ پارامترهای به‌کار برده شده در الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد.

شکل ۵ نمودار جریانی تعریف مسئله و محاسبه تابع هدف را نشان می‌دهد. در این تحقیق تابع هدف به صورت رابطه ۲ تعریف شده است:

$$g(u) = \sum_{i=1}^l \sqrt{(Q_{mi} - Q_{oi})^2} \quad (2)$$

در رابطه ۲، Q_{mi} مقادیر اندازه‌گیری شده رسوب و Q_{oi} مقادیر محاسبه شده رسوب می‌باشد.

با توجه به اینکه در الگوریتم‌های بهینه‌سازی پارامترهایی وجود دارد که تغییرات آن‌ها باعث تغییر

جدول (۲): مقادیر پارامترهای الگوریتم ژنتیک

۱۵۰	تعداد جمعیت اولیه
۲۰۰	تعداد نسل
۰/۲	درصد جهش
۰/۸	درصد برش
۰/۵	نرخ جهش
انتخاب رقابتی (TS)	نوع انتخاب والدین و انتخاب برش

ارزیابی کارایی مدل

به منظور ارزیابی مدل‌ها در تخمین بار رسوب معلق، از شاخص‌های آماری مجذور میانگین مربعات خطا^۲، معیار نش-ساتکلیف^۳ و ضریب تعیین^۴ به شرح روابط ۳ تا ۵ استفاده گردید. هرچه مقدار مجذور میانگین مربعات خطا کوچک‌تر باشد، صحت پیش‌بینی رابطه بیشتر می‌شود و مدل از دقت بیشتری برخوردار است (Zounemat-Kermani et al., 2016). مقدار ضریب نش-ساتکلیف، از منفی بی نهایت تا یک متغیر است. هر چه مقدار این معیار به یک نزدیک‌تر باشد، مدل از کارایی بالاتری برخوردار است. (Nash and Sutcliffe., 1970). ضریب تعیین هم نشان‌دهنده همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده می‌باشد. مقدار بهینه این شاخص آماری یک است (Shamaei and Kaedi., 2016).

$$(3) RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}$$

$$NSE = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (4)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (5)$$

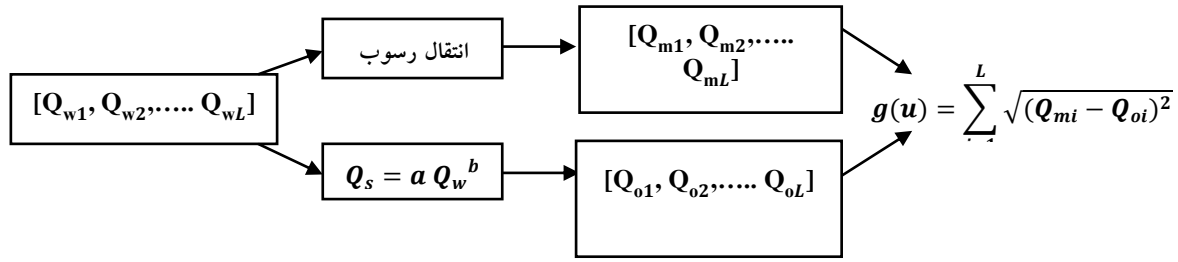
در روابط ۳ تا ۵، n : تعداد داده‌ها، O_i : دبی رسوب بار معلق مشاهده شده، P_i : دبی رسوب بار معلق تخمین زده شد، \bar{O} : میانگین مقادیر رسوب معلق مشاهده شده، \bar{P} : میانگین مقادیر رسوب معلق برآورد شده می‌باشد. بر این اساس میزان کارایی هر یک از روش‌ها با توجه به مقادیر شاخص‌های ارزیابی، بررسی گردید

¹ Tournament Selection

² Root Mean Squer Error (RMSE)

³ Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient (NSE)

⁴ Coefficient of Determination (R^2)

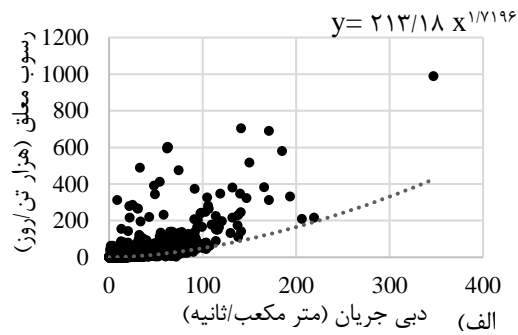
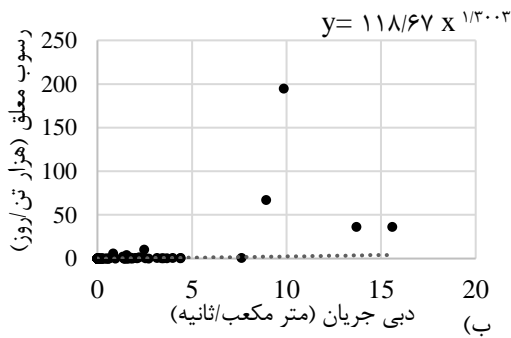


شکل (۵): نمودار جریانی تعریف مسئله و محاسبه تابع هدف

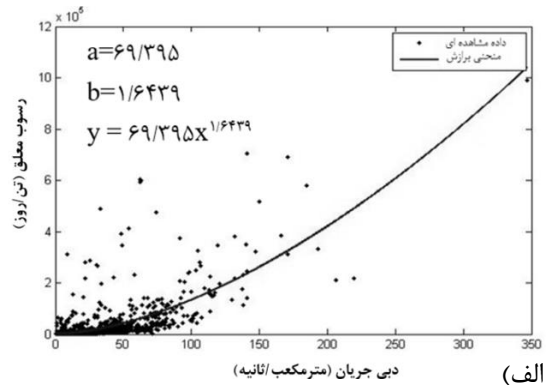
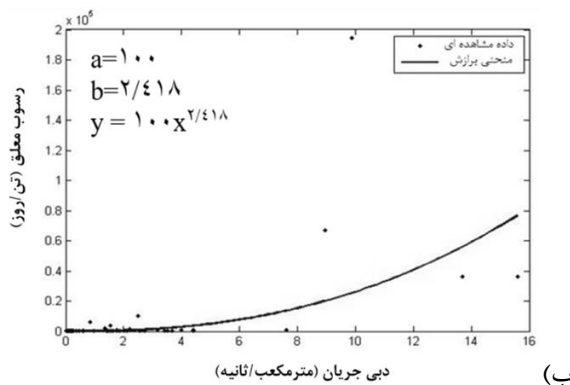
نتایج و بحث

در این تحقیق، با داده‌های آموزش مدل، ضرایب معادله منحنی سنج رسوب به دست آمد. شکل ۶ معادله و منحنی سنج رسوب برای داده‌های آموزش ایستگاه قزاقلی و باغ‌عباسی را نشان می‌دهد که در آن ضرایب a و b به ترتیب برای ایستگاه قزاقلی $۲۱۳/۱۸$ و $۱/۷۱۹۶$ و برای ایستگاه باغ‌عباسی $۱۱۸/۶۷$ و $۱/۳۰۰۳$ می‌باشد.

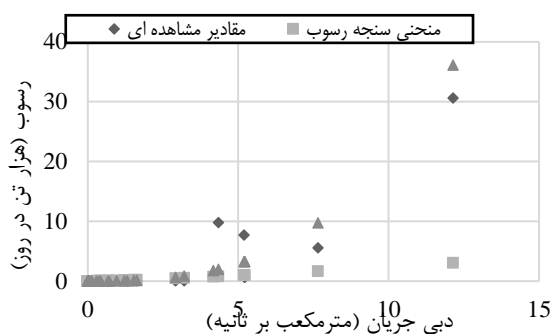
شکل ۷ معادله و منحنی سنج رسوب بهینه شده با الگوریتم ژنتیک برای داده‌های آموزش ایستگاه قزاقلی و باغ‌عباسی را نشان می‌دهد. در نتیجه این نمودار مقادیر بهینه ضرایب a و b به ترتیب برای ایستگاه قزاقلی $۶۹/۳۹۵$ و $۱/۶۴۳۹$ و برای ایستگاه باغ‌عباسی ۱۰۰ و $۲/۴۱۸$ به دست آمد. پس از آموزش مدل‌ها، با استفاده از ضرایب به دست آمده، آزمون مدل‌ها با ۳۰ درصد باقی‌مانده داده‌ها انجام گردید.



شکل (۶): معادله و منحنی سنج رسوب برای داده‌های آموزش ایستگاه قزاقلی (الف) و باغ‌عباسی (ب)



شکل (۷): منحنی سنج رسوب بهینه شده با الگوریتم ژنتیک برای داده‌های آموزش ایستگاه قزاقلی (الف) و باغ‌عباسی (ب)

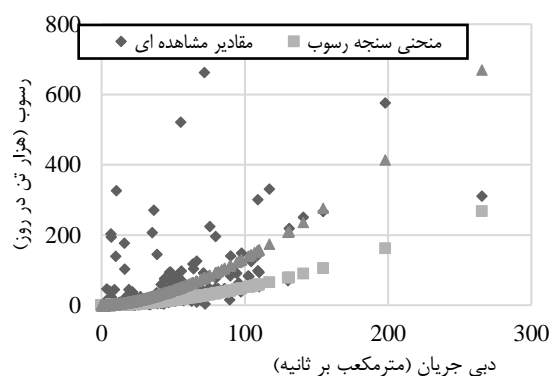


شکل (۹): مقایسه مدل بهینه شده با الگوریتم ژنتیک و منحنی سنجه رسوب در برآورد رسوب معلق دوره آزمون ایستگاه باغ عباسی

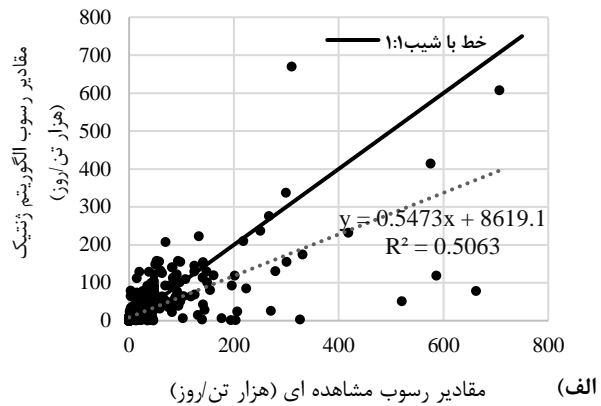
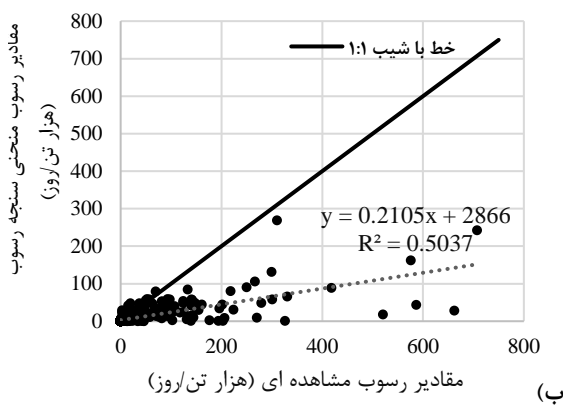
در شکل ۱۰ پراکنش مقادیر مشاهده ای و پیش بینی شده رسوب معلق حول خطی شیب ۱:۱ برای مدل های مختلف در ایستگاه قزاقلی نشان داده شده است. مقایسه این دو شکل نشان می دهد که مدل الگوریتم ژنتیک نسبت به منحنی سنجه رسوب پراکنش بهتری حول خط ۴۵ درجه دارد که این پراکنش برای مقادیر کم رسوب بهتر می باشد. در ایستگاه باغ عباسی (شکل ۱۱) مقادیر رسوب در مدل الگوریتم ژنتیک حول خط ۴۵ درجه به خوبی پراکنده شده اند اما در مورد منحنی سنجه رسوب، پراکنش نقاط با فاصله زیادی از این خط قرار گرفته اند.

از نتایج این تحقیق می توان چنین استنباط نمود که روش های مختلف در شرایط اقلیمی مختلف و تعداد داده، دارای عملکردهای متفاوتی می باشد. در خصوص تعداد داده ها همانطور که در ایستگاه باغ عباسی مشاهده می شود محدودیت داده ها موجب عملکرد ضعیف منحنی سنجه رسوب شده است در حالی که این محدودیت تأثیری بر روش الگوریتم ژنتیک نداشته است. عملکرد و دقت روش های رگرسیونی به شدت از حجم نمونه تبعیت می کند و حجم کم نمونه ها می تواند عامل محدودیت مدل های آماری گردد در حالی که روش های هوشمند قابلیت تخمین و پیش بینی برای تقریب غیرخطی با حجم کم نمونه ها را دارا می باشند.

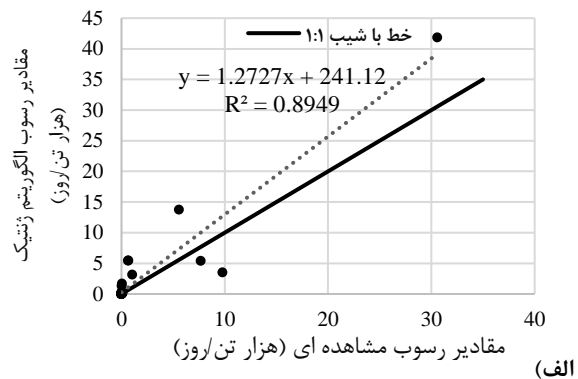
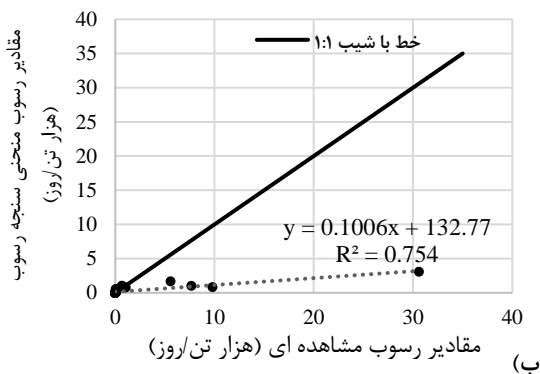
شکل ۸ و ۹ نشان دهنده مقایسه مدل بهینه شده با الگوریتم ژنتیک و منحنی سنجه رسوب در برآورد رسوب معلق دوره آزمون ایستگاه های قزاقلی و باغ عباسی می باشد. مقایسه این شکل ها نشان دهنده این واقعیت است که مقادیر برآورد شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک دارای روند بهتری در شبیه سازی داده های رسوب نسبت به منحنی سنجه رسوب می باشد. همچنین، نشان دهنده اختلاف کمتر مقادیر حاصل از مدل الگوریتم ژنتیک با مقادیر مشاهده ای رسوب می باشد. علاوه بر این، مدل الگوریتم ژنتیک برای دی های اوج، عملکرد بهتری داشته است (محمد رضا پور و همکاران ۱۳۹۴؛ Altunkaynak., 2009). به طور مثال همان گونه که در شکل ۸ مشاهده می شود، برای دبی ۱۹۸ مترمکعب بر ثانیه در ایستگاه قزاقلی، الگوریتم ژنتیک توانسته مقدار نزدیک تری از رسوب (۴۱۳۸۲۴ تن در روز) به داده مشاهده ای (۵۷۶۰۳۹ تن در روز) پیش بینی کند در صورتی که برای همین مقدار دبی، منحنی سنجه با (۱۶۲۰۷۹ تن در روز) قادر به پیش بینی دقیقی از مقدار رسوب به داده مشاهده ای نبوده است.



شکل (۸): مقایسه مدل بهینه شده با الگوریتم ژنتیک و منحنی سنجه رسوب در برآورد رسوب معلق دوره آزمون ایستگاه قزاقلی



شکل (۱۰): مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی مدل برای مدل‌های الگوریتم ژنتیک (الف) و منحنی سنجه رسوب (ب) برای داده‌های آزمون ایستگاه قزاقلی



شکل (۱۱): مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی مدل برای مدل‌های الگوریتم ژنتیک (الف) و منحنی سنجه رسوب (ب) برای داده‌های آزمون ایستگاه باغ‌عباسی

در جدول ۴، نیز مقدار این ضریب با استفاده از الگوریتم ژنتیک ۰/۷۲ است در حالی که مقدار حاصل از منحنی سنجه منفی می‌باشد و این می‌تواند به دلیل محدودیت در تعداد نمونه‌ها و تاثیر آن در عملکرد منحنی سنجه رسوب باشد (حیات‌زاده و همکاران، ۱۳۹۴). ضریب تعیین داده‌ها در ایستگاه قزاقلی با هر دو روش الگوریتم ژنتیک و منحنی-سنجه یک مقدار بوده است اما در ایستگاه باغ‌عباسی با اندکی تفاوت الگوریتم ژنتیک با ضریب تعیین ۰/۸۹ در مقابل ۰/۷۵ تا حدودی بهتر عمل کرده است. یکی از دلایلی که الگوریتم ژنتیک قادر به پیش‌بینی دقیق‌تری از میزان رسوب است، بررسی مقادیر مختلف زیادی از بازه تعریف شده برای ضرایب a و b به منظور دستیابی به رابطه بهینه دبی-رسوب می‌باشد در حالی که منحنی سنجه فقط با توجه به پراکنش نقاط نزدیک‌ترین خط برازش را انتخاب می‌کند و امکان بررسی مقادیر مختلف برای ضرایب معادله وجود ندارد.

صحت‌سنجی مدل‌ها با استفاده از معیارهای ارزیابی ضریب تعیین (R^2)، ضریب نش-ساتکلیف (NSE) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۳ و ۴ مقادیر معیارهای ارزیابی مدل‌های الگوریتم ژنتیک و منحنی‌سنجه رسوب در ایستگاه قزاقلی و باغ-عباسی را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج در جدول ۳ و ۴ نشان می‌دهد که مدل الگوریتم ژنتیک در ایستگاه قزاقلی با مجذور میانگین مربعات خطا ۳۹۷۶۰، در مقابل ۴۷۰۳۴ به‌دست آمده با منحنی سنجه رسوب دقت بیشتری در پیش‌بینی بار رسوب داشته است. همچنین برای ایستگاه باغ‌عباسی نیز این معیار با ۲۵۸۲ در مقابل ۵۰۳۶ به‌دست آمده با روش منحنی سنجه عملکرد بهتر الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. در دو معیار دیگر نیز این برتری قابل مشاهده است، به‌گونه‌ای که در رابطه با ضریب نش-ساتکلیف در جدول ۳، ایستگاه قزاقلی برای الگوریتم ژنتیک بیشتر از منحنی سنجه می‌باشد. برای ایستگاه باغ‌عباسی

جدول (۳): معیارهای ارزیابی مدل‌های الگوریتم ژنتیک و منحنی‌سنجه رسوب در ایستگاه قزاقلی

مدل	NSE	RMSE (ton/day)	R^2
منحنی‌سنجه رسوب	۰/۳	۴۷۰۳۴	۰/۵
الگوریتم ژنتیک	۰/۵	۳۹۷۶۰	۰/۵

جدول (۴): معیارهای ارزیابی مدل‌های الگوریتم ژنتیک و منحنی‌سنجه رسوب در ایستگاه باغ‌عباسی

مدل	NSE	RMSE (ton/day)	R^2
منحنی‌سنجه رسوب	-۰/۰۶	۵۰۳۶	۰/۷۵
الگوریتم ژنتیک	۰/۷۲	۲۵۸۲	۰/۸۹

پیش‌بینی با برنامه‌ریزی ژنتیک می‌تواند به دلیل توانایی بیشتر این روش در استخراج روابط بسیار متنوع و پیچیده و ارائه آن‌ها در قالب فرمول‌های شهودی باشد (روشنگر و همکاران، ۱۳۹۴)، در حالی که الگوریتم ژنتیک نیازمند یک رابطه تعریف شده می‌باشد و صرفاً به بهینه‌سازی پارامترهای آن می‌پردازد. از این‌رو، استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک و در نظر گرفتن سایر پارامترهای موثر (بارش، دما و ...) برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از الگوریتم ژنتیک اقدام به بهینه‌سازی ضرایب معادله سنجه رسوب در دو ایستگاه قزاقلی در حوضه گرگانرود و ایستگاه باغ‌عباسی در حوضه سد فریمان گردید. نتایج حاصل نشان داد که از میان روش‌های مورد مطالعه، روش الگوریتم ژنتیک با دارا بودن مقادیر ضریب نش-ساتکلیف و ضریب تعیین بیشتر و مجذور میانگین مربعات خطای کمتر، در مقایسه با منحنی‌سنجه رسوب از دقت بالاتری برخوردار است به طوری که ضریب نش-ساتکلیف برای مدل الگوریتم ژنتیک در ایستگاه قزاقلی و باغ‌عباسی به ترتیب ۰/۵ و ۰/۷۲ و ضریب تعیین ۰/۵ و ۰/۸۹ می‌باشد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که مدل الگوریتم ژنتیک مقادیر بالای رسوب را بهتر از منحنی‌سنجه رسوب برآورد می‌کند. همچنین روش الگوریتم ژنتیک نسبت به منحنی‌سنجه رسوب کمتر تحت تاثیر تعداد داده قرار دارد به همین دلیل برای ایستگاه‌هایی که تعداد نمونه‌برداری رسوب کمتری دارند می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. به این ترتیب روش‌های الگوریتم تکاملی

نتایج تحقیق دلالت بر توانمندی الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی ضرایب معادله منحنی سنجه رسوب دارد به طوری که در هر دو ایستگاه قزاقلی و باغ‌عباسی نتایج بهتری ارائه کرده است که همسو با تحقیقات Altunkaynak (2009)، محمدرضاپور و همکاران (۱۳۹۴) در ایستگاه کهک رودخانه سیستان و عبدی دهکردی و همکاران (۱۳۹۰)، در حوزه‌آبخیز کسلیان در جنوب استان مازندران، می‌باشد که برتری الگوریتم ژنتیک نسبت به منحنی‌سنجه را در برآورد بار رسوب معلق عنوان کردند. بر اساس جدول ۳ و ۴ نتایج نشان می‌دهد که بهینه‌سازی ضرایب با استفاده از الگوریتم ژنتیک دقت پیش‌بینی رسوب در ایستگاه باغ‌عباسی را به مراتب بیشتر از ایستگاه قزاقلی ارتقاء داده است که این می‌تواند به دلیل نقش سایر عوامل محیطی نظیر پوشش گیاهی، خاک و عوامل ژئومورفولوژی در تولید رسوب گرگانرود باشد. به عبارتی نقش عوامل محیطی در تولید رسوب در شرایط اقلیمی گرگانرود به مراتب بیشتر از مناطق خشک با پوشش گیاهی کمتر می‌باشد که این سبب پیچیدگی روابط و رفتار غیرخطی می‌گردد. در مطالعه حیات زاده و همکاران (۱۳۹۴) با اضافه شدن پارامترهای مورفولوژیکی حوزه نتایج پیش‌بینی ارتقاء یافته است که موید این موضوع می‌باشد. تاکنون نتایج نشان داده است که با استفاده از روش‌های جستجوی هوشمند می‌توان عملکرد روش مرسوم منحنی‌سنجه را به میزان قابل توجهی بهبود بخشید. در مطالعات مشابه که به مقایسه الگوریتم ژنتیک در مقایسه با دیگر روش‌های برآورد رسوب مانند برنامه‌ریزی ژنتیک که تکامل یافته الگوریتم ژنتیک است نتایج متفاوتی را نشان داده شده است. این دقت در

را می‌توان به‌عنوان یک روش دقیق و عملی برای پیش‌بینی میزان رسوب رودخانه‌ها پیشنهاد کرد.

منابع:

- امام‌قلی‌زاده، ص.، ر. کریمی‌دمنه و خ. اژدری. ۱۳۹۵. مقایسه روش‌های متداول برآورد بار رسوب معلق رودخانه‌ی کرخه با روش برنامه‌ریزی بیان ژن. فصلنامه جغرافیا و توسعه، شماره ۴۵، ص ۱۴۰-۱۲۱.
- اکبرپور، ا. و خ. حامد افتخار. ۱۳۸۵. مقایسه مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون در پیش‌بینی آورد رسوب درحوزه اهرچای آذربایجان شرقی، اولین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی. ص ۹.
- ادهمی، م. ۱۳۹۱. تجزیه و تحلیل منطقه‌ای برآورد رسوب معلق با استفاده از خصوصیات حوضه‌ی ودخانه‌های گرگانرود و قره‌سو. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. دانشکده مرتع و آبخیزداری. ۱۱۸ص.
- امیدواری‌نیا، م. ۱۳۸۸. کاربرد الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی پارامترهای ورودی بی‌بعد به مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت پیش‌بینی انتقال بار معلق رودخانه‌های آبرفتی (مطالعه موردی رودخانه کارون). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی علوم آب. دانشگاه شهید چمران اهواز. ۱۳۸ص.
- برزگری، ف. و م. ت. دستورانی. ۱۳۹۱. پیش‌بینی بار معلق رودخانه با استفاده از مدل‌های سری زمانی و شبکه عصبی مصنوعی. نهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران، اهواز.
- حیات زاده، م.، ج. چزگی و م. ت. دستورانی. ۱۳۹۴. ارزیابی برآورد رسوب با استفاده از روش‌های منحنی سنج و شبکه عصبی با تلفیق پارامترهای مورفولوژیکی حوزه (مطالعه موردی حوزه باغ‌عباس). مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. علوم آب و خاک. سال نوزدهم، شماره ۷۲، ص ۲۲۷-۲۱۷.
- دهقانی، ن. و م. وفاخواه. ۱۳۹۲. مقایسه روش‌های تخمین رسوب معلق روزانه با استفاده از روش‌های منحنی سنج رسوب و شبکه عصبی (مطالعه موردی: ایستگاه قزاقلی، استان گلستان). مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ص ۲۳۰-۲۲۱.
- دهقانی، ا.، م. ا. زنگنه، ا. مساعدی و ن. کوهستانی، ۱۳۸۸. مقایسه تخمین بار معلق به دو روش منحنی سنج رسوب و شبکه عصبی (مطالعه موردی: رودخانه دوغ استان گلستان). مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. سال ششم، شماره ۱۶، ص ۲۶۶-۲۷۶.
- رجایی، ط و ا. میرباقری، ۱۳۸۸. مدل بار معلق رودخانه‌ها با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی. نشریه مهندسی عمران، سال بیست و یکم، شماره ۱، ص ۴۳-۲۷.
- روشنگر، ک. اعلمی، م. ت. و ف. وجودی‌مهربانی. ۱۳۹۴. افزایش دقت پیش‌بینی بار کل رسوبی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی (مطالعه موردی: رودخانه قطورچای). نشریه آب و خاک، شماره ۶، ص ۱۴۲۶-۱۴۱۶.
- شیخعلی‌پور، ز. ف. حسن‌پور، و و. عظیمی. ۱۳۹۴. مقایسه روش‌های هوش مصنوعی در برآورد بار معلق رسوب (مطالعه موردی: رودخانه سیستان). نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. شماره ۲، ص ۶۰-۴۱.

طهمورث، م.، ح. احمدی، ن. تقوی، و ح. م. عسگری. ۱۳۸۸. مقایسه دقت مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی ژئومورفولوژی (GANNs) و رگرسیون (RM) در برآورد رسوب طالقان. نشریه پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی). شماره ۸۴، ص ۲۷-۲۰.

طباطبایی، م.، ر. سلیمانی، ک. حبیب‌نژاد، م. روشن، و ع. کاویان. ۱۳۹۳. برآورد غلظت رسوب معلق روزانه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و خوشه‌بندی داده‌ها به روش نگاشت خود سازمان ده (مطالعه موردی: ایستگاه هیدرومتری سیرا- رودخانه کرج). پژوهشنامه مدیریت حوزه‌آبخیز. سال پنجم-شماره ۱۰. ۹۸-۱۱۶.

طباطبایی، م. ر. ۱۳۹۳. برآورد بار رسوب معلق روزانه با استفاده از روش‌های محاسبات نرم (شبکه عصبی، نروفازی و الگوریتم ژنتیک) و داده‌های آب و هواشناسی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری - دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی. پایان‌نامه دکتری رشته علوم و مهندسی آبخیزداری. ۱۸۲ ص.

عبدی دهکردی، م. ۱۳۹۱. تخمین هوشمند دبی رسوب بار معلق با استفاده از فن‌آوری‌های نوین. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. دانشکده مهندسی آب و خاک. ۹۱ ص.

عبدی دهکردی، م.، م. مفتاح هلقی، ا. ا. دهقانی و م. حسام. ۱۳۹۰. کاربرد الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی ضرایب معادله سنج رسوب. پنجمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک. کرمان.

کارگریان، س. ۱۳۹۱. بهینه‌سازی روابط دبی-رسوب با استفاده از روش‌های اصلاح منحنی سنج رسوب (مطالعه موردی حوزه‌آبخیز سد دز) پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه یزد. دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی. ۸۹ ص.

کیا، ع.، ع. عمادی و ر. فضل‌اولی. ۱۳۹۴. بررسی امکان کاربرد سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) در برآورد بار رسوب معلق بابلرود. پژوهشنامه مدیریت حوزه‌آبخیز. سال ششم. شماره ۱۱. ص ۲۳-۱۵.

محمدرضاپور، ا.، پ. حقیقت‌جو و م. ج. زینلی. ۱۳۹۴. مقایسه الگوریتم ازدحام ذرات و ژنتیک در بهینه‌سازی ضرایب معادله منحنی سنج رسوب در برآورد دبی رسوب معلق رودخانه سیستان (مطالعه موردی: ایستگاه کهک). فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. سال ششم. شماره ۲۲. ص ۸۹-۷۶.

مساعدی، ا.، ا. سعدالدین، م. ا. زنگنه و ح. فرازجو. ۱۳۸۹. برآورد دبی رسوبات معلق بر اساس معادله سنج رسوب و عوامل موثر بر ضرایب آن در حوضه آبریز گرگانرود. مجموعه مقالات نخستین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران. شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمانشاه، ص ۱۲.

مساعدی، ا.، ا. محمدی، ع. نجفی‌نژاد، و ف. یغمایی. ۱۳۸۵. بهینه‌سازی روابط دبی جریان و دبی رسوب معلق در ایستگاه‌های منتخب حوضه گرگانرود. مجله منابع طبیعی ایران. شماره ۵۹. ص ۳۴۲-۳۳۱.

وزارت نیرو. ۱۳۹۱. راهنمای محاسبه بار رسوب معلق و بستر رودخانه، نشریه شماره ۵۹۰.

یوسفی، م. و ر. پورشرعیانی. ۱۳۹۳. برآورد رسوب معلق با استفاده از شبکه عصبی و ارزیابی توابع آموزشی (مطالعه موردی: استان لرستان). پژوهشنامه مدیریت حوزه‌آبخیز. سال پنجم. شماره ۱۰. ص ۹۶-۸۵.

- Alp, M., & Cigizoglu, H. K. 2007. Suspended sediment load simulation by two artificial neural network methods using hydrometeorological data. *Environmental Modelling & Software*, 22 (1), 2-13.
- Altunkaynak, A. 2009. Sediment load prediction by genetic algorithms. *Advances in Engineering Software*, 40 (9):928-934.
- Arab Khedri. M. 2005. A study on the suspended sediment yield in river basins of Iran. *Iran-Water Resources Research*. 1 (2): 51-60
- Asselman, N.E.M. 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology* . 23: 4. 228-248.
- Abrahart, R.J., See, L.M., Solomatine, D.P., 2008. *Practical Hydroinformatics, Computational Intelligence and Technological Developments in Water Applications*, Springer.
- Bezak, N., Mikoš, M., Šraj, M. 2014. Trivariate Frequency Analyses of Peak Discharge, Hydrograph Volume and Suspended Sediment Concentration Data Using Copulas, *Water Resour. Manag.* 28(8), 2195-2212.
- Ebrahimi, H., E. Jabbari and M. Ghasemi. 2013. Application of Honey-Bees Mating Optimization on Estimation of Suspended Sediment Concentration. *World Applied Sciences Journal*. 22 (11): 1630-1638.
- Fleming, G. 1979. *Deterministic model in hydrology*. IRRIGATION and Drainage paper.32 FAO. Rome, 80p.
- Goldberg, D. 1989. Genetic algorithms in search optimization and machine learning. *Journal of Hydrology Research*, 8(1):354-361.
- Güven, A., & Ö. Kişi, (2011). Daily pan evaporation modeling using linear genetic programming technique. *Irrigation science*, 29 (2), 135-145.
- Holland, J. H. 1975. *Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.
- Jha, S. K. and F. A., Bombardelli. 2011. Theoretical/numerical model for the transport of nonuniform suspended sediment in open channels. *Adv. Water Resour.* 34(5), 577–591.
- Kisi, O., A. H. Dailr, M. Cimen, & J. Shiri. 2012. Suspended sediment modeling using genetic programming and soft computing techniques. *Journal of Hydrology*, 450, 48-58.
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe .1970. River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10: 282–290.
- Shamaei, E., and M. Kaedi. 2016. Suspended sediment concentration estimation by stacking the genetic programming and neuro-fuzzy predictions. *Applied Soft Computing*, 45: 187-196.
- Talebi, A., J. Mahjoobi, M. T. Dastorani, & V. Moosavi. 2016. Estimation of suspended sediment load using regression trees and model trees approaches (Case study: Hyderabad drainage basin in Iran). *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 1-8
- Zhang, F. X., O. W. Wai, & Y. W. Jiang. 2010. Prediction of sediment transportation in deep bay (Hong Kong) using genetic algorithm. *Journal of Hydrodynamics*, 22(5), 599-604.

- Zhu, Y.M., X.X. Lu and Y. Zhou. 2007. Suspended sediment flux modeling with artificial neural network: An example of the Longchuanjiang River in the Upper Yangtze Catchment, China. *Geomorphology*, 84(1): 111-125.
- Zounemat-Kermani, M., Ö. Kişi, J. Adamowski, & A. Ramezani-Charmahineh. 2016. Evaluation of data driven models for river suspended sediment concentration modeling. *Journal of Hydrology*, 535, 457-472.

Optimizing Coefficients of Sediment Rating Curve Equation Using Genetic Algorithm (Case study: Ghazaghli and Bagh abbasi stations)

Farzaneh Naseri¹, Mahmood Azari^{2*} and Mohammad Taghi Dastorani³

Abstract:

The proper estimation of sediment yield of rivers is important for planning and managing water resources. Various methods have been developed to determine the relationship between discharge and sediment concentration. Sediment rating curve is one of the most common methods for estimating the suspended sediment yield in rivers, which is always associated with a large error. In order to improve estimation of sediment yield using sediment rating curve, the equation coefficients can be optimized using artificial intelligence methods. The purpose of this research is to use a genetic algorithm to optimize the sediment rating equation coefficients for Gorganroud river (Ghazaghli station) and Fariman river (Bagh Abbasi station). With this aim in mind, discharge and suspended sediment concentration data have been acquired for the stations. Sediment rating curve equation was calculated for each station with training data. Then an optimal coefficient of equation was achieved using genetic algorithm model defined in MATLAB 2017 software. The study results showed that the genetic algorithm model for Ghazaghli and Bagh Abbasi stations had a better performance than the sediment rating curve with the Nash-Sutcliffe coefficient of 0.5 and 0.72 and coefficient of determination of 0.5 and 0.89, respectively. Also, the genetic algorithm for Bagh Abbasi station with the limited samples has better accuracy than the sediment rating curve method. The study results indicate a high performance of the genetic algorithm in optimizing the coefficients of sediment rating curve equation, especially in low data stations.

Keywords: Evolutionary Algorithm, Optimization, Sediment Yield, Suspended Sediment, Sediment Rating Curve.

¹ MSc Student, Range and Watershed Department, Ferdowsi University of Mashhad; E-Mail: fa_na556@um.ac.ir

^{2*} Assistant professor, Range and Watershed Department, Ferdowsi University of Mashhad; E-Mail: m.azari@um.ac.ir
(corresponding author)

³ Professor, Range and Watershed Department, Ferdowsi University of Mashhad; E-Mail: dastorani@um.ac.ir