دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

مقایسه برآورد بار رسوب معلق رودخانه با استفاده از روش‌های رگرسیون‌گیری و الگوریتم ژنتیک

جواد بهمنش[1]، مریم محمدپور[2] و محمدمهدی باطنی[2]

۱- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، (نویسنده مسوول: j.behmanesh@urmia.ac.ir)
۲- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، دانشگاه ارومیه
تاریخ دریافت: ۹۳/۶/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۴

چکیده

معمولا بار رسوب رودخانه‌ها توسط یکی از روش‌های هیدرولوژیک برآورد می‌گردد. در این روش‌های آماری، با اندازه‌گیری آورد رودخانه و سنجش غلظت مواد معلق جریان، طی یک دوره آماری بلند مدت به استخراج روابط بین دبی و رسوب معلق رودخانه پرداخته می‌شود. هدف از انجام این تحقیق، مقایسه روش‌های مختلف برآورد بار معلق رودخانه‌ها و انتخاب مناسب‌ترین رابطه جهت برآورد میزان رسوب معلق و در نتیجه تعیین میزان دقیق‌تر رسوب عبوری در رودخانه‌های مورد مطالعه می‌باشد. با استفاده از آمار متناظر دبی جریان و رسوب به صورت روزانه برای چهار ایستگاه هیدرومتری در استان آذربایجان غربی، از معادله‌ی توانی منحنی سنجه برای مقادیر حد وسط داده‌ها استفاده شد. ضرائب بهینه رابطه مذکور با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک و رگرسیون‌گیری معمولی در محیط نرم‌افزار Matlab به دست آمد. از آنجا که روش الگوریتم ژنتیک برخلاف روش رگرسیون‌گیری معمولی نیازی به فرضیات محدودکننده در مورد داده‌های اولیه ندارد، نتایج بهتری را در اعتبارسنجی نشان داد. این بهبود در ضرائب معادله منحنی سنجه رسوب باعث شد ریشه دوم میانگین مربع خطاها (RMSE)[1] تا ۲۵٪ کاهش یابد. بنابراین استفاده از الگوریتم ژنتیک به عنوان روشی مناسب برای برآورد منحنی سنجه رسوب در ایستگاه‌های مورد مطالعه پیشنهاد گردید.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، برآورد بار رسوب معلق، روش رگرسیون‌گیری، منحنی سنجه، نرم‌افزار Matlab

مقدمه

اندازه‌گیری و برآورد بار رسوب معلق رودخانه‌ها همواره در طول سالیان زیادی به منظور مدیریت حوزه‌های آبخیز مورد توجه بوده است. فرسایش، انتقال رسوب و رسوب‌گذاری از مسائل مهم مدیریت حوزه‌های آبخیز هستند که همواره رابطه تنگاتنگی با توسعه روش‌های اندازه‌گیری و برآورد رسوب معلق رودخانه‌ها دارند (۱). رسوبات معلق قسمت عمده بار کل رسوبات رودخانه‌ای را تشکیل می‌دهند که ممکن است دستخوش تغییرات زمانی زیادی در طول سالیان متمادی شوند (۲). بررسی‌های علمی در مورد انتقال رسوب رودخانه‌ها در حدود ۱۰۰ سال در جهان قدمت دارد (۳). به‌طوری‌که اولین نمونه‌برداری بار معلق در رودخانه می سی سی پی در سال ۱۸۶۳ انجام شده، سپس در کل جهان توسعه یافته است. اندازه‌گیری رسوب معلق رودخانه‌ها در ایران نیز به طور تقریبی از دهه ۴۰ شروع و هم اکنون در حدود ۵۰۰ ایستگاه رسوب سنجی در کشور وجود دارد (۴).

به طور کلی برای برآورد میزان رسوب معلق رودخانه‌ها روش‌های زیادی وجود دارد که به دو دسته عمده مبتنی بر قوانین هیدرولیکی-دینامیکی و روش‌های هیدرولوژیک دسته‌بندی می‌شوند. از میان این روش‌ها، روش‌های هیدرولوژیک خود مبتنی بر اندازه‌گیری‌های مستقیم و تحلیل‌های آماری هستند. در این روش‌ها برای اندازه‌گیری میزان غلظت مواد انتقالی توسط جریان‌های رودخانه‌ای شیوه‌های مختلفی از جمله روش نمونه‌بردار ی تجمعی از تمام عمق‌ها، روش برآورد بار معلق مس تقیم، روش نمونه‌برداری تلمبه‌ای، کدورت سنج‌ها در ایستگاه‌های رسوب سنجی مورد استفاده قرار می‌گیرند. عمدتا در این روش‌ها با اندازه‌گیری میزان آورد رودخانه و سنجش میزان غلظت مواد معلق جریان، طی یک دوره آماری بلند مدت به استخراج روابط بین دبی و رسوب رودخانه پرداخته می‌شود (۵).

همچنین برآورد بار رسوبی برای انجام کارهای مهندسی همواره امر ضروری بوده و تخمین صحیح آن، سبب ممانعت از صرف هزینه‌های گزاف خواهد شد. برآورد نه چندان دقیق روابط منحنی‌های سنجه رسوب در روش‌های آماری و همچنین به علت نبودن امکان بررسی تغییرات زمانی رسوبات حمل شده در روش‌های آماری، امروزه روش‌های فراکاوشی[2] از جمله الگوریتم ژنتیک به عنوان روش‌های برتر و با برآورد دقیق‌تر مورد توجه محققان قرار گرفته است (۱۷).

مروری بر پژوهش‌های گذشته

طی سال‌های اخیر مطالعات زیادی در نقاط مختلف جهان و ایران در خصوص برآورد بار رسوبی رودخانه‌ها با استفاده از منحنی‌های سنجه‌ی رسوب و یا سایر روش‌های آماری صورت گرفته است، اما به دلیل مشکلات متعدد از قبیل نحوه نمونه‌برداری، تعداد کم نمونه‌ها، عدم نمونه‌برداری در زمان‌های سیلابی و استفاده از روش‌های مختلف آماری نتایج بدست آمده با یکدیگر تفاوت بسیار زیادی دارند. به طوری که میرزایی و همکاران (۵) روش‌های مختلف برآورد بار رسوب را در حوزه آبخیز گرگان مورد مقایسه قرار داده و نشان دادند که روش برآورد تلفیق دبی متوسط روزانه با منحنی سنجه حد وسط دسته‌ها، دقیق‌تر از سایر روش‌ها می‌باشد. داداش‌زاده اصل و همکاران (۶) به منظور بررسی میزان خطای حاصل از کاربرد منحنی‌های سنجه رسوب در برآورد بار رسوبی وقایع

1- Root Mean Squared Error
2- Meta-heuristic

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-07-03]
[DOI: 10.29252/jwmr.8.16.132]

سیلابی، مقادیر برآوردی ۱۰ نوع منحنی سنجه در ایستگاه هیدرومتری پل دوآب (رودخانه قره‌چای استان مرکزی) را مورد مقایسه قرار دادند. ایشان با استفاده از شاخص‌های مختلف به این نتیجه رسیدند که روش فائو نسبت به بقیه روش‌ها عملکرد بهتری داشته و برآورده نسبتا نزدیک‌تری به مقدار واقعی بدست می‌دهد. زنگانه و همکاران در یک پژوهش به بررسی تعیین مناسب‌ترین روش برآورد دبی انتقال رسوبات معلق در ایستگاه ارازکوسه حوزه گرگان‌رود پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که در ایستگاه ارازکوسه روش حد وسط دسته‌ها مناسب‌ترین روش در برآورد بار معلق بوده است (۷). برزگری در بررسی مقایسه بین چند روش برآورد بار معلق در حوزه آبخیز قزل اوزن به این نتیجه رسید که روش‌های متداول برآورد رسوب شامل USBR[1]، جاماب و منحنی سنجه رسوب به ترتیب مقدار رسوب معلق را ۴۱/۴۷ و ۴۳ درصد کمتر برآورد می‌نماید. لذا به منظور برآورد رسوب معلق باید در روش‌های متداول تجدیدنظر صورت گرفته و یا در صورت استفاده از روش‌های موجود باید در سیستم نمونه‌گیری از رسوب اصلاحاتی صورت گیرد (۸). از سوی دیگر در پژوهشی میرابولقاسمی و مرید نشان دادند که برای رودخانه کرخه استفاده از روش حد وسط داده‌ها نسبت به روش‌های دیگر مبتنی بر رگرسیون که از تابع توانی انتقال رسوب استفاده می‌کنند ارجحیت دارد (۹). آچیت و سیلوین با مقایسه روش‌های برآورد رسوب نشان دادند که روش USBR برای دوره‌های بلند مدت برآوردهای دقیق‌تری را انجام می‌دهد (۱۰). از سایر پژوهش‌ها می‌توان به عرب خدری و همکاران (۱۱)، فرخ زاده و همکاران (۱۲)، وروانی و همکاران (۱۳)، سیوتسکی و همکاران (۱۴)، هورورویتز (۱۵)، ایدانزا و ناپولیتانو (۱۶) اشاره نمود. تمامی روش‌های استفاده شده در این پژوهش‌ها از آنجا که مبتنی بر روش رگرسیون (RM) هستند بر پایه برخی مفروضات محدودکننده مثل نرمال و خطی بودن و واریانس ثابت استوار می‌باشند. در بسیاری موارد بدون توجه به چنین فرضیاتی از روش رگرسیون استفاده می‌شود؛ الگوریتم ژنتیک بدون نیاز به هیچ فرض اولیه‌ای در مورد داده‌های مورد استفاده جایگزین مناسبی به نظر می‌رسد (۱۷). داننده‌مهر و همکاران در یک پژوهش به بررسی پیش‌بینی بار معلق رودخانه‌ها بر مبنای دبی جریان با استفاده از الگوریتم ژنتیک در رودخانه لیقوان چای واقع در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه پرداختند (۱۸). نتایج حاصل، حاکی از دقت بالای الگوریتم ژنتیک در پیش‌بینی بار معلق رودخانه‌ها می‌باشد. رضاپور و همکاران (۱۹) به مرور کلی کاربرد مدل الگوریتم ژنتیک برای تخمین بار معلق رسوب پرداخته و آن را یک رهیافت قوی و سودمند برای برآورد بار رسوب رودخانه‌ها دانسته‌اند. آیتک و کیسی (۲۰) با بررسی مدل‌سازی پدیده حمل رسوب روی دو ایستگاه روی رودخانه تانگ ایالت مونتانا در آمریکا به روش الگوریتم ژنتیک و مقایسه نتایج حاصله با منحنی سنجه رسوب و روش‌های رگرسیونی پرداختند. این محققان در نتیجه‌گیری نهایی روش الگوریتم ژنتیک را به عنوان یک روش مناسب جهت مدل‌سازی رسوبات معلق رودخانه‌ها معرفی نمودند. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده از پژوهش‌های ذکر شده در بالا، روش الگوریتم ژنتیک به عنوان یک روش مناسب و برتر برای انجام این پژوهش انتخاب و نتایج آن با روش رگرسیون‌گیری مقایسه خواهد شد. از آنجا که در بسیاری از پژوهش‌هایی که در منطقه و در سایر نقاط ایران انجام شده روش حد وسط داده‌ها به عنوان بهترین روش هیدرولوژیک برآورد رسوب شناخته شده است (۹،۲۱)، در این پژوهش مناسب‌ترین رابطه میزان رسوب معلق رودخانه‌ها با استفاده از روش حد وسط داده‌ها از مقایسه دو رویکرد رگرسیون‌گیری معمولی و الگوریتم ژنتیک به دست آمده است. این پژوهش با الگو گرفتن از مطالعات قبلی انجام شده در زمینه برآورد رسوبات و با مقایسه روش‌های سنتی و نوین سعی در توسعه مطالعات و بهبود آن‌ها به خصوص در منطقه مورد مطالعه دارد. امید است نتایج به دست آمده از این پژوهش در این منطقه مفید فایده واقع شود.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از روش‌های برون‌یابی یا منحنی سنجه رسوب استفاده گردید. در این روش‌ها تعداد محدودی از اندازه‌گیری‌های غلظت رسوب با برقراری رابطه بین غلظت یا دبی رسوب و دبی جریان آب و استفاده از آمار دبی جریان برای دوره زمانی مورد نظر برون‌یابی می‌شود.

حوزه مورد مطالعه، ایستگاه‌های موجود و ایستگاه‌های انتخابی

با توجه به این‌که مناسب‌ترین روش برون‌یابی برآورد بار معلق براساس طول دوره آماری (۲۲،۲۳) و تعداد نمونه‌ها (۲۴) انتخاب می‌شود، لذا در این پژوهش ۳ ایستگاه هیدرومتری واقع بر روی سه رودخانه قطور، زنگمار و باراندوز چای از حوزه‌های آبخیز ارس و دریاچه ارومیه که حداقل دارای ۳۰ سال آمار رسوب قابل اتکا بوده و در بالا دست سد قرار گرفته‌اند، انتخاب و مورد بررسی قرار گرفتند. داده‌های مورد استفاده در این ایستگاه‌ها در محدوده زمانی سال‌های ۱۳۴۳ تا ۱۳۸۸ خورشیدی است. لازم به ذکر است که کلیه آمار و اطلاعات لازم برای این پژوهش از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان‌غربی به دست آمده است (جدول ۱). موقعیت این ایستگاه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. در این پژوهش میزان بار معلق جریان رودخانه‌ها (Q_s برحسب تن در روز) با توجه به میزان غلظت رسوب اندازه‌گیری شده در این رودخانه‌ها (C برحسب میلی‌گرم در لیتر) و دبی عبوری جریان (Q_w برحسب مترمکعب در ثانیه) از رابطه (۱)، معادله توانی سنجه رسوب، محاسبه شده‌ا است (۹):

$$Q_s=0.0864\ C\ Q_w \qquad (۱)$$

1- United States Bureau of Reclamation

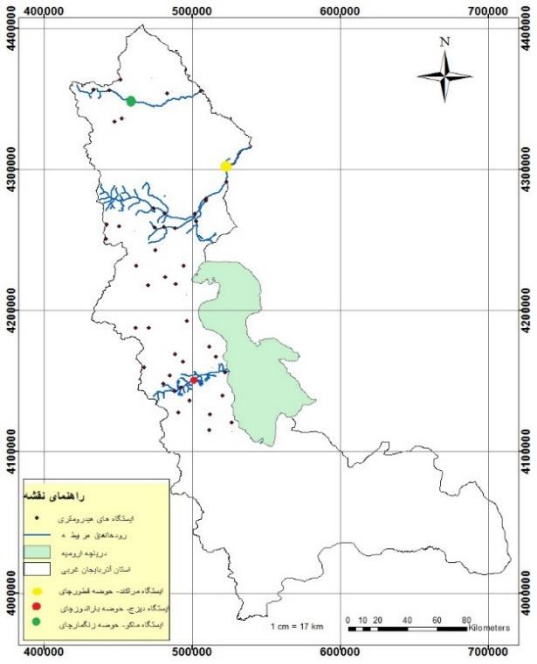
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-07-03]

[DOI: 10.29252/jwmr.8.16.132]

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری-رسوب سنجی انتخاب شده

Table 1. Characteristics for hydrometric-sediment stations

حوزه -ایستگاه	مختصات جغرافیایی		دوره نمونه‌برداری (سال)		تعداد نمونه
	عرض	طول	شروع	انتها	
ماکو-زنگمار	۳۹ ۱۸	۴۴ ۳۲	۱۳۴۳	۱۳۸۸	۱۷۷۴
مراکند-قطورچای	۳۸ ۵۲	۴۵ ۱۷	۱۳۴۳	۱۳۸۸	۱۰۲۵
دیزج-باراندوز	۳۷ ۲۳	۴۵ ۴	۱۳۴۳	۱۳۸۸	۷۷۳



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری-رسوب سنجی انتخاب شده

Figure 1. The position of the selected hydrometric-sedimentation stations

در حالت کلی معادله توانی سنجه رسوب در یک سطح مقطع مشخص رودخانه از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌شود (۹).

$$C = aQ^b \quad (۲)$$

که در آن a و b ضرایبی هستند که می‌بایست آن چنان انتخاب شوند که بهترین رابطه را بین دبی جریان (Q) و بار رسوب (C) مشخص کنند.

برای انجام هرگونه تجزیه و تحلیل آماری لازم است داده‌های آماری از نظر کیفیت و همگنی در طول دوره آماری مورد بررسی قرار گیرند. در این پژوهش نیز ابتدا نمونه‌های ایستگاه‌های انتخابی از نظر کیفیت آماری داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به این که نواقص آماری در داده‌ها مشاهده نشد در مرحله اول داده‌های مشکوک و پرت[1] از داده‌های اولیه حذف شدند. برای این منظور ابتدا مشاهداتی که اندازه آن‌ها فاصله زیادی با مشاهدات سری زمانی نمونه دارد و یک و نیم برابر فاصله میان چارکی به ترتیب بیشتر و کمتر از چارک سوم و اول هستند با ترسیم نمودار جعبه‌ای برای ایستگاه‌های مورد مطالعه شناسایی و حذف شدند (۲۵). براساس این نمودارها بیش از چند مورد محدود داده‌های پرت در نمونه‌ها مشاهده نشد. سپس به منظور اطمینان از همگنی داده‌ها از آزمون من-ویتنی استفاده شد. در مرحله بعد با استفاده از آزمون گردش‌ها[2] و آزمون اسپیرمن به ترتیب از تصادفی بودن و عدم وجود روند در داده‌ها اطمینان حاصل شد. از آنجا که نرمال بودن داده‌ها از فرضیات روش رگرسیون‌گیری (براساس معیار حداقل مربعات) است، این داده‌ها توسط کاغذ احتمالی نرمال مورد آزمون نرمال بودن قرار گرفت. بدیهی است از آنجا که بررسی فرض نرمال بودن بر عملکرد صحیح روش رگرسیون یکی از اهداف این پژوهش است نیازی به نرمال کردن داده‌های غیرنرمال نیست. لازم به ذکر است که برای کنترل اعتبارسنجی نتایج، حدود ۳۰ درصد داده‌های اولیه با نمونه‌گیری تصادفی کنار گذاشته شد. در این پژوهش از روش حد وسط دسته‌ها برای درون‌یابی و از روش الگوریتم ژنتیک به عنوان یک روش فراکاوشی برای بهینه‌سازی ضرائب به دست آمده از روش‌های برون‌یابی

۱- "یک داده پرت مشاهده‌ای است که به طور غیر عادی یا اتفاقی از وضعیت عمومی داده‌های تحت آزمایش و نسبت به قاعده‌ای که براساس آن آنالیز می شوند، انحراف داشته است."

2 - Run Tet

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-07-03]

[DOI: 10.29252/jwmr.8.16.132]

استفاده شده است. نتایج حاصل از بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک با آنچه از رگرسیون‌گیری به دست آمده، مقایسه شده و در مورد تاثیر شرط نرمال بودن داده‌ها بر کارایی این روش‌ها بحث شده است.

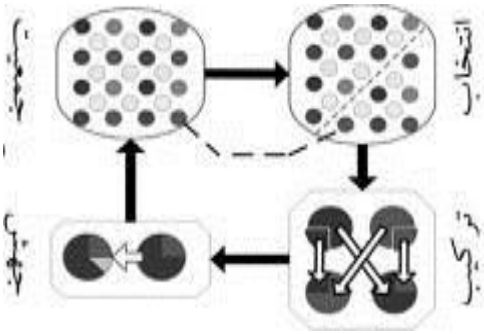
روش حد وسط دسته‌ها

در روش حد وسط دسته‌ها که آن را برای اولین بار جانسون (۲۶) پیشنهاد نمود، دبی‌های جریان با یک نمو ثابت به تعدادی دسته تقسیم شده و برای دبی متوسط هر دسته، دبی رسوب متوسط اندازه‌گیری شده همان دسته تعیین می‌شود و در آخر منحنی سنجه رسوب با استفاده از آن‌ها به دست می‌آید. در منابع مختلف توصیه شده که نمو دسته‌ها به گونه‌ای تعیین شود که تعداد کل دسته‌ها بین ۵ تا ۱۰۰ عدد باشد.

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک اولین بار توسط هالند (۲۷) به عنوان ابزاری قوی استفاده شد. GA یک الگوریتم جستجو برگرفته از طبیعت بیولوژیکی و فرایند انتخاب طبیعی می‌باشد. اساس این روش مبتنی بر نظریه داروین که در محیط متغیر همواره موجوداتی ادامه حیات دارند که از همه پایدارترند، می‌باشد. این الگوریتم از مجموعه‌ای جواب‌های تصادفی اولیه به نام جمعیت آغاز می‌گردد. هر جمعیت از مجموعه‌ی کروموزوم‌ها که هر کدام یک جواب مساله هستند، تشکیل می‌شود و هر کروموزوم مجموعه‌ای از ژن‌ها و در واقع متغیرهای تصمیم مساله می‌باشند.

روش جستجوی ژنتیکی تلاشی است برای شبیه‌سازی و به‌کارگیری برخی خصوصیات و توانایی‌های تکامل در بهینه‌سازی. این روش ابتدا با یک نگاشت مناسب و معکوس‌پذیر، استراتژی‌های ممکن برای حل مسأله را به رشته‌هایی کد شده (معمولاً دودویی) می‌نگارد. بدین ترتیب مسأله‌ی یافتن پاسخ مناسب معادل می‌شود با یافتن یک رشته‌ی خاص. بدین منظور با انتخاب مجموعه‌ای تصادفی از رشته‌ها، جمعیتی از پاسخ‌های بالقوه برای مسأله‌ی مورد نظر ایجاد می‌کند. آنگاه افراد این جمعیت براساس تابع هدف، که معیار سنجش کارایی آن رشته است، برای بقا و ایجاد پاسخ‌های جدید و بهتر با یکدیگر رقابت می‌کنند و به این ترتیب در نسل‌های متوالی با استفاده از عملگرهای سه‌گانه انتخاب، ترکیب و جهش، کمیّت و کیفیت پاسخ‌های مناسب افزایش می‌یابد و این روند تا همگرایی الگوریتم و یافتن پاسخ نهایی ادامه می‌یابد. شکل کلی مراحل انجام یک الگوریتم ساده در شکل (۲) بصورت مفهومی نشان داده شده است.



شکل ۲- مراحل انجام یک الگوریتم ژنتیک
Figure 2. Steps to a Genetic Algorithm

در این پژوهش معادلات منحنی سنجه‌ی رسوب پس از تقسیم‌بندی داده‌ها بر اساس روش حد وسط دسته‌ها استخراج گردید، سپس ضرائب a و b رابطه (۲) با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه شدند. مقدار تابع هدف برای این بهینه‌سازی، حداقل ساختن مجموع مربعات اختلاف مقادیر مشاهده‌ای و مقادیر برآورد شده از معادله توانی برآورد رسوب تعریف شد. این محاسبات در محیط نرم‌افزار Matlab و با استفاده از توابع آماده ارایه شده در Genetic Algorithm Solver از جعبه‌ابزار بهینه‌سازی انجام شد. تابع ga یک تابع آماده برای بهینه‌سازی مقید با استفاده از الگوریتم ژنتیک در MATLAB است. با استفاده از این تابع علاوه بر امکان گذاشتن قید (خطی و غیرخطی) برای متغیرها، امکان تعیین اندازه جمعیت، امکان حصول نتایج فقط به صورت اعداد صحیح و بسیاری امکانات دیگر وجود دارد. در این پژوهش با استفاده از این تابع و با قید مثبت بودن مقادیر a و b اقدام به بهینه‌سازی ژنتیک با اندازه جمعیت ۲۰۰ و با نسبت ترکیب ژنتیکی 0.7 گردید. همچنین رواداری[1] تابع که از ملاک‌های توقف رویه است برابر 1×10^{-10} انتخاب گردید. حداکثر تعداد تکرار نیز ۱۰۰۰ مرتبه منظور شد. تابع جهش نیز به صورت یکنواخت با مقیاسی برابر ۱ در نظر گرفته شد. دیگر پارامترها برابر با مقادیر پیش فرض تابع استفاده شد. شایان ذکر است از آنجا که مسئله مورد بررسی ابعاد بزرگی ندارد، تنظیم این پارامترها به صورت مذکور در جهت اطمینان بیشتر از جواب‌های حاصله بوده و موجب طولانی شدن روند حل البته در محدوده قابل قبولی می‌گردد. برای ارزیابی ضرائب ارائه شده از هر یک از دو روش، شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2) و ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RME) با استفاده از داده‌های اعتبار سنجی برای هر یک از ایستگاه‌ها محاسبه شد.

معیار مقایسه روش‌ها و نحوه محاسبه مقدار خطای هر روش

کارایی روش‌های انتخابی با استفاده از ۳۰ درصد داده‌های اعتبارسنجی، ارزیابی شد و مناسب‌ترین روش با توجه به مقادیر ریشه دوم میانگین مربع خطاها (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) انتخاب گردید. مقدار RMSE بیانگر میزان

1- Tolerance

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-07-03]
[DOI: 10.29252/jwmr.8.16.132]

اختلاف مقادیر تخمینی با مقادیر محاسباتی می‌باشد هر چه این مقدار کمتر بوده و نزدیک صفر باشد تطابق بیشتری بین داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسباتی وجود دارد (۷):

(۳)
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{n} \left(Qse_k - Qso_k\right)^2}{n}}$$

(۴)
$$R^2 = \frac{\left(\left(n \sum_{k=0}^{n} Qso_k\, Qse_k\right) - \left(\sum_{k=0}^{n} Qso_k \sum_{k=0}^{n} Qse_k\right)\right)^2}{\left(\left(n \sum_{k=0}^{n} {Qso_k}^2\right) - \left(\sum_{k=0}^{n} Qso_k\right)^2\right)\left(\left(n \sum_{k=0}^{n} {Qse_k}^2\right) - \left(\sum_{k=0}^{n} Qse_k\right)^2\right)}$$

Q_{Se}: مقدار برآوردی رسوب معلق

Q_{So}: مقدار واقعی رسوب معلق

n: تعداد داده‌ها

همچنین در این پژوهش برای نشان دادن تطابق بین داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسباتی مقدار ضریب تعیین (R^2) گزارش شد. ضریب تعیین در واقع قدرت توضیح دهندگی مدل را نشان می‌دهد و به صورت زیر تعیین می‌شود (۷).

نتایج و بحث

اطلاعات کلی و محاسبات آماری دبی جریان و رسوب سه ایستگاه هیدرومتری ماکو، مراکند و دیزج در محدوده منطقه مورد مطالعه در جدول (۲) آورده شده است. این امر برای بیش از ۵۰۰ بار نمونه برداری در طول دوره آماری ۴۵ ساله از ایستگاه‌های هیدرومتری موجود بر روی رودخانه‌های زنگمار، قطورچای و باراندوز بدست آمده است.

جدول ۲- آماره‌های توصیفی دبی جریان و دبی رسوب برای ایستگاه‌های هیدرومتری-رسوب سنجی انتخاب شده

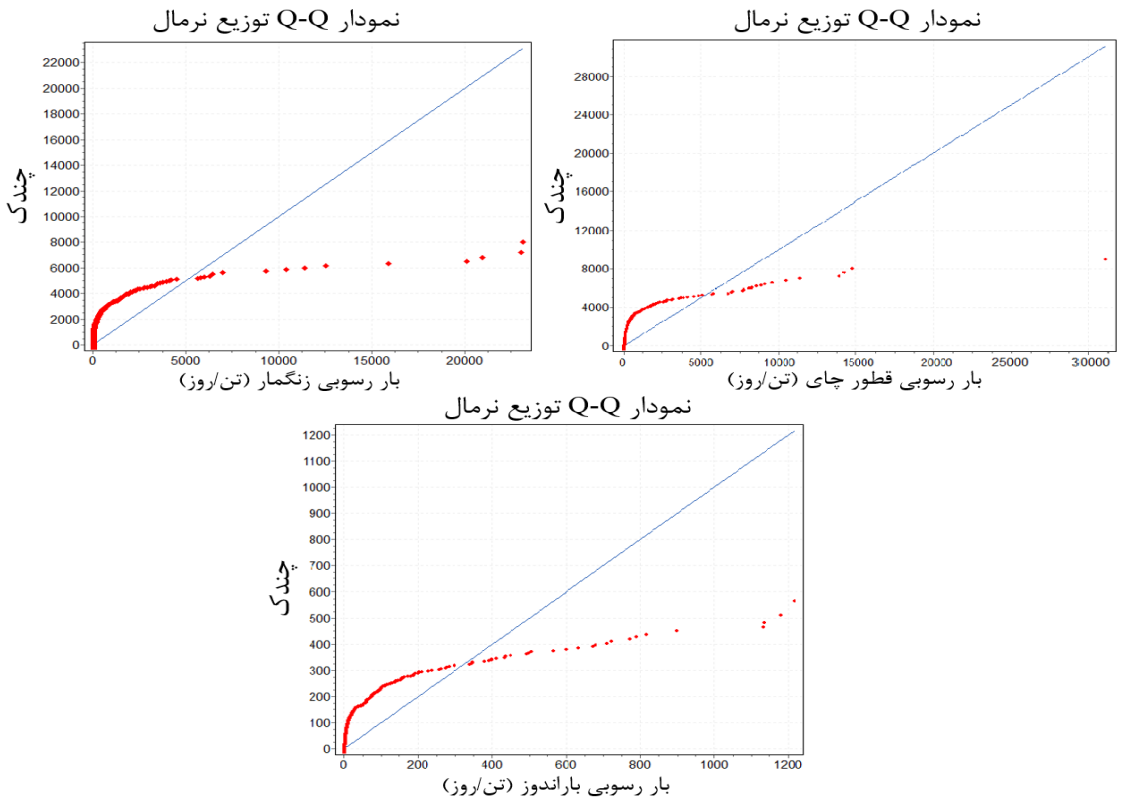
Table 2. The descriptive statistics of flow rate and sediment rate for selected hydrometric-sediment stations

حوزه -ایستگاه	دبی جریان (متر مکعب در ثانیه)			دبی رسوب (تن در روز)			اندازه نمو دسته	تعداد دسته‌ها
	میانگین	چولگی	ضریب تغییرات	میانگین	چولگی	ضریب تغییرات		
ماکو-زنگمار	۸/۰۱	۳/۲۶	۰/۳۹	۵۳۲/۶۰	۷/۹۹۴	۰/۰۸	۲/۷۵	۱۴
مراکند-قطورچای	۹/۱۴	۲/۰	۰/۳۶	۹۷۶/۲۵	۸/۲۵۲	۰/۳۶	۴/۵	۱۲
دیزج-باراندوز	۱۰/۵	۱/۶۱	۰/۳۱	۶۵/۹۱	۴/۲۶۷	۰/۱۹	۲/۴	۲۱

به منظور بررسی نرمال بودن داده‌ها، داده‌های دبی جریان و بار رسوب برای هر یک از چهار ایستگاه مذکور در کاغذ احتمالی نرمال ترسیم شد. این نمودارها در اشکال ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند. همانطور که در این نمودارها دیده می‌شود داده‌های دبی جریان و بار رسوب برای هر سه ایستگاه انحراف قابل توجهی از توزیع نرمال دارند. این انحراف برای ایستگاه زنگمار از همه بیشتر است. برای همه ایستگاه‌ها هر دو نوع داده انحراف قابل توجهی را از توزیع نرمال نشان می‌دهند اما به طور کلی می‌توان گفت که انحراف برای داده‌های بار رسوب بیشتر از داده‌های دبی جریان است. شایان ذکر است که دلیل استفاده از نمودارهای چندک احتمالی نرمال توانایی آن‌ها در نشان دادن میزان انحراف از توزیع نرمال است. به کمک این نمودارها می‌توان راجع به میزان انحراف داده‌ها از نرمال و اثر آن بر عملکرد رگرسیون‌گیری اظهار نظر کرد.

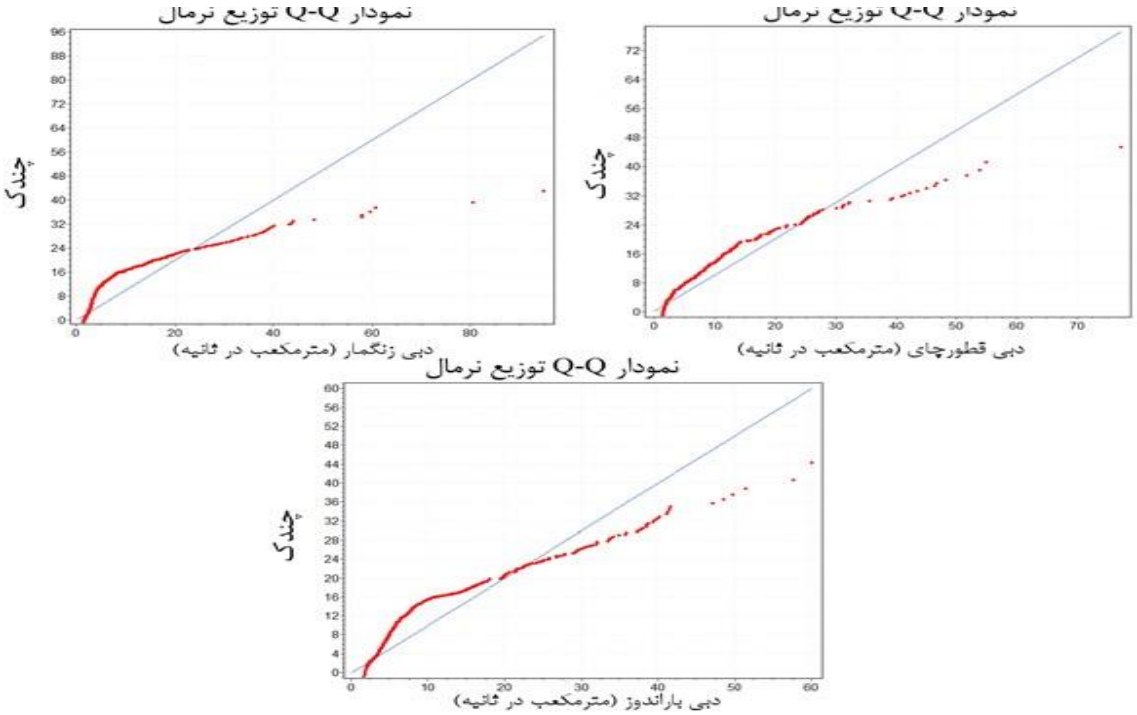
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-07-03]

[DOI: 10.29252/jwmr.8.16.132]



شکل ۳ – مقادیر آورد رسوب در کاغذ احتمالی نرمال در ایستگاه‌های هیدرومتری–رسوب سنجی انتخاب شده

Figure 3. Sediment values in normal probable paper at selected hydrometric-sediment stations



شکل ۴– مقادیر دبی جریان در کاغذ احتمالی نرمال در ایستگاه‌های هیدرومتری–رسوب سنجی انتخاب شده

Figure 4. Flow rate values in normal probable paper at selected hydrometric-sediment stations

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-07-03]

[DOI: 10.29252/jwmr.8.16.132]

طی چندین‌بار اجرای الگوریتم ژنتیک با پارامترهای مذکور در بخش مواد و روش‌ها، مجموعه‌ای از ضرائب منحنی به دست آمد. بهترین این ضرائب از منظر RMSE برای داده‌های آموزشی در هر ایستگاه انتخاب شد که مقادیر آن در جدول (۳) آمده است.

پس از آن معادلات به دست آمده از روش‌های رگرسیون و الگوریتم ژنتیک با داده‌های اعتبارسنجی ارزیابی شد و معیار RMSE و R^2 برای هر دو مورد در هر یک از ایستگاه‌ها به دست آمد. همان‌طورکه در جدول (۴) مشاهده می‌شود روش الگوریتم ژنتیک نسبت به روش رگرسیون در تمام ایستگاه‌ها از مقادیر RMSE کمتر و R^2 بالاتری برخوردار است. این کاهش RMSE در ایستگاه زنگمار بیشتر از دیگر ایستگاه‌ها است که می‌توان آن را به انحراف بیشتر داده‌های آن از توزیع نرمال نسبت داد؛ هر چند میزان ریشه میانگین مربعات خطا و همبستگی برای ایستگاه مراکند در دو حالت معمولی و استفاده از روش الگوریتم ژنتیک تفاوت چندانی ندارد، در ایستگاه مذکور مقادیر همبستگی پایین و ریشه میانگین مربعات خطا بالایی برای هر دو روش گزارش شده که می‌توان آن را به دلیل عدم توجیه پدیده انتقال رسوب توسط معادله با فرم توانی و یا حتی مناسب نبودن روش حد وسط دسته‌ها دانست. در مورد ایستگاه دیزج هر چند ضرائب بدست آمده از الگوریتم ژنتیک به برآورد کمتری در مقادیر پایین و میانی می‌انجامند، اما در مقادیر بالاتر برآورد بسیار بهتری نسبت به آنچه از رگرسیون به دست آمده دارند. این برتری به حدی است که منجر به کاهش مقدار RMSE کلی شده است. همچنین می‌توان اضافه کرد که این روش در برخی ایستگاه‌ها مانند ایستگاه دیزج به‌خوبی قادر به توصیف روابط میان داده‌های دبی و دبی رسوب نیست که این امر شاید به دلیل وجود اختلاف در میزان غلظت رسوب واقعی در این ایستگاه با مقادیر مورد انتظار ناشی از تاثیر عوامل طبیعی اعم از پوشش گیاهی، بافت خاک و ... در بالادست حوزه‌های آبخیز بر شرایط پایین دست حوزه‌ها در این ایستگاه و ایستگاه‌های مشابه باشد. هرچند بهبود ناشی از استفاده از الگوریتم ژنتیک را می‌توان به دلیل عدم اتکای این روش بر فرضیات محدودکننده‌ای مثل نرمال بودن، خطی بودن و واریانس ثابت دانست. همانطور که گفته شد استفاد از روش الگوریتم ژنتیک سبب بهینه‌شدن پارامترهای روابط برآورد رسوب معلق می‌گردد که این نتایج با نتایج رضاپور و همکاران (۱۹) و آیتک و کیسی (۲۰) هم‌خوانی دارد. همچنین نتایج این پژوهش بهبود روش‌های برآورد رسوب معلق را نسبت به نتایج مطالعات میرزایی و همکاران (۵)، میرزایی و همکاران (۵)، داداش‌زاده اصل و همکاران (۶)، میرابولقاسمی و مرید (۹)، آچیت و سیلوین (۱۰)، عرب خدری و همکاران (۱۱)، فرخ زاده و همکاران (۱۲)، وروانی و همکاران (۱۳)، سیوتسکی و همکاران (۱۴)، هورورویتز (۱۵) و ایدانزا و ناپولیتانو (۱۶) نشان داد.

جدول ۳- ضرائب محاسبه شده مدل‌های منحنی سنجه رسوب حوزه‌های آبخیز منتخب با داده‌های واسنجی

Table 3. Calculated coefficients of the sediment rating curve models for the selected watersheds with calibration data

	رگرسیون عادی (حداقل مربعات)		الگوریتم ژنتیک	
حوزه –ایستگاه	a	b	a	b
ماکو–زنگمار	۱/۹۵	۱/۶۴	۶/۶۲	۱/۲۵
مراکند–قطورچای	۷۹/۷۵	۱/۰۶	۱۱۲/۷۹	۱/۰۴
دیزج–باراندوز	۱/۳۰	۱/۴۵	۰/۰۲	۲/۵۸

جدول ۴- مقایسه نتایج کارائی مدل‌های مختلف منحنی سنجه رسوب حوزه‌های آبخیز منتخب با داده های اعتبارسنجی

Table 4. Comparison of the Efficiency Results of Different Models of Sediment rating Curve in Selected Watersheds with Validation Data

	رگرسیون عادی (حداقل مربعات)		الگوریتم ژنتیک	
حوزه –ایستگاه	RMSE	R^2	RMSE	R^2
ماکو–زنگمار	۴۰/۵۷	۰/۸۰	۲۹/۱۲	۰/۸۱
مراکند–قطورچای	۴۲۹/۰۷	۰/۳۶	۴۲۴/۷۸	۰/۳۶
دیزج–باراندوز	۱۴/۷۳	۰/۸۳	۱۳/۴۸	۰/۸۵

یکی از روش‌های مرسوم در برآورد رسوبات بارمعلق، استفاده از منحنی‌های سنجه رسوب می‌باشد. برآورد بار معلق رسوبات با استفاده از این منحنی‌ها همواره با مقداری خطا همراه است، بنابراین سعی می‌شود با اعمال شرایط یا تغییراتی در آن‌ها از جمله دسته‌بندی داده‌ها، میزان این خطا را کاهش داد. در این روش ارزش بیشتری به دبی‌های بالا که اهمیت بیشتری در کل آورد رسوب سالانه دارند، داده می‌شود. در پژوهش حاضر ابتدا با دسته‌بندی داده‌ها اقدام به برآورد ضرایب معادله‌ی منحنی سنجه‌ی رسوب با رگرسیون‌گیری برای داده‌های ۳ ایستگاه در استان آذربایجان غربی گردید و سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک این ضرایب بهینه شده و نتایج بر روی داده‌های مشاهداتی با استفاده از شاخص‌های آماری متفاوت با یکدیگر مقایسه شدند؛ نتایج نشان داد که استفاده از روش الگوریتم ژنتیک عملکرد روش دسته‌بندی داده‌ها را برای برآورد دقیق رسوب در برخی از ایستگاه‌های مورد مطالعه بهبود می‌بخشد. این بهبود در ضرائب معادله

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-07-03]

[DOI: 10.29252/jwmr.8.16.132]

منحنی سنجه رسوب تا ۲۵ درصد کاهش در مقادیر ریشه دوم میانگین مربع خطاها (RMSE) می‌باشد. از مقایسه نتایج بخش‌های مختلف عملکرد این روش می‌توان مشاهده کرد که در ایستگاه‌های مختلف استفاده از روش الگوریتم ژنتیک سبب بهبود روابط برآورد رسوب معلق گردید. از آنجا که در بسیاری از پژوهش‌هایی که در منطقه و در سایر نقاط ایران انجام شده روش حد وسط داده‌ها به عنوان بهترین روش هیدرولوژیک برآورد رسوب شناخته شده است (۹،۲۱)، در این پژوهش نشان داده شده که روش الگوریتم ژنتیک یک روش کارا نسبت به سایر روش‌ها در برآورد رسوب معلق است. لازم به ذکر است که این پژوهش با الگو گرفتن از مطالعات قبلی انجام شده در زمینه برآورد رسوبات و با مقایسه روش‌های سنتی و نوین سعی در جهت توسعه مطالعات و بهبود آن‌ها به خصوص در منطقه مورد مطالعه دارد. همچنین از آنجا که در بسیاری از کارهای پژوهشی مشابه، فرضیات روش رگرسیون صادق نیست. از طرف دیگر امروزه ابزارهای اجرای الگوریتم ژنتیک به آسانی در دسترس است، لذا با توجه به نتایج پژوهش حاضر، استفاده از الگوریتم ژنتیک به جای روش رگرسیون‌گیری برای برآورد ضرایب معادله توانی انتقال رسوب در این منطقه و سایر مناطق توصیه می‌شود.

منابع

1. Olive, L. and W. Rieger. 1992. Stream suspended sediment transport monitoring-why, how and what is being measured. Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins 210: 245-254.
2. Alizadeh, A. 1997. Principles of Applied Hydrology. Tehran University Press, 2: 620.
3. Walling, D. and B. Webb. 1981. Reliability of suspended sediment load data. Erosion and Sediment Transport Measurement: Symposium IAHS Publication (In Persian).
4. Mirmoieni, A. 2007. Investigation of the accuracy of the multi-variable sediment rating curves in estimating sediment load (Gorgan river-Qzaqly). MSc thesis of watershed management. Gorgan University, 160 pp (In Persian).
5. Mirzaei, M.R., D. Arabkhedry, S.A. Feiznia and H. Ahmadi. 2005. comparison of statistical methods estimating rivers suspended sediment loads, Iranian Journal of Natural Resources, 58(2): 315-301.
6. Dadashzadehasl, F., M.M. Sarovi, H. Ahmadi and J. Varvani. 2009. Evaluation and development of the sediment rating curves models in estimating sediment loads during flood events (Case study: Ghare Chay Basin). Watershed Management Researches (Pajouhesh & Sazandegi), In Persian, 84: 28-35.
7. Zanganeh, M.A., A. Mosaedi, M.M. Holqy and A.A. Dehghani. 2011. Determination of Suitable Method for Estimating Suspended Sediments Discharge in Arazkoose Hydrometric Station (Gorganrood Basin) Iranian Journal of Water and Soil Conservation, 18(2): 85-103 (In Persian).
8. Barzegar, F. 1997. Comparison of suspended sediment load estimation methods, MSc Thesis, Natural Resources factuly, Tehran University, 120 pp (In Persian).
9. Mirabolghasem, H.M. and S. Morid. 1995. Investigation of the hydrological methods in estimating rivers suspended load sediment. Water and Development magazine, 10: 67-54 (In Persian).
10. Achite, M. and O. Sillvain. 2007. Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Journal of Hydrology, 84(3): 187-202.
11. Arabkhedri, D., F. Iranmanesh, P. Razmjoo and Sh. Hakim-Khani. 1997. Sediment ptoduction map for Iran. Third National Symposium on Erosion and Sedimentation, Tehran, Iran.
12. Farrokhzadeh, B., M. Mahdavi and A. Salajegheh. 2001. Investigate of the effective factors on sediment rating curves slope in different climatic zones in Iran. The 5th National Conference on Science and Watershed Engineering in Iran, (In Persian).
13. Varvani, J., A.A. Davidi-Rad and M. Arab-Khedri. 1997. Investigation of the correctness methods Logarithmic transformation in the regression models and estimating sediment load in the selected rivers. The final report of the research project, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute.
14. Syvitski, J.P., M.D. Morehead, D.B. Bahr and T. Mulder. 2000. Estimating fluvial sediment transport: The rating parameters. Water Resources Research 36: 2747-2760.
15. Horowitz, A.J. 2003. An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. Hydrological Processes 17: 3387-3409.
16. Iadanza, C, and F. Napolitano. 2006. Sediment transport time series in the Tiber River. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 31: 1212-1227.
17. Altunkaynak, A. 2009. Sediment load prediction by genetic algorithms. Advances in Engineering Software 40: 928-934.
18. Danndhmhr, A., A. Olyiaie and M.A. Ghorbani. 2010. Suspended sediment load prediction based on river discharge and genetic programming method. Iranian journal of Watershed Management Researches Journal (Pajouhesh & Sazandegi), 88: 44-54 (In Persian).
19. Rezapour, O.M., L.T. Shui and A.A. Dehghani. 2010. Review of Genetic Algorithm Model for Suspended Sediment Estimation, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 4(8): 3354-3359.
20. Aytek, A., M. Asce and M. Alp. 2008. An application of artificial intelligence for rainfall runoff modeling. Journal of Earth System Science, 17(2): 145-155.
21. Ashoori, M. and M. Yasi. 2015. Investigation of Different Evaluation Methods of Sediment Ratting Curve using STM Software. The 9th National Conference on World Environment, Tehran, Iran.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-07-03]

[DOI: 10.29252/jwmr.8.16.132]

22. Littlewood, I.G., C.D. Watts and J.M. Custance. 1998. Systematic application of United Kingdom river flow and quality databases for estimating annual river mass loads (1975–1994). Science of The Total Environment 210-211: 21-40.
23. Day, T. 1988. Evaluation of long term suspended sediment records for selected Canadian rivers. Symposium on sediment budgets. Porto Algere. Brazil: IAHS, 189-195.
24. Phillips, J.M., B.W. Webb, D.E. Walling and G.J.L. Leeks. 1999. Estimating the suspended sediment loads of rivers in the LOIS study area using infrequent samples. Hydrological Processes 13:1035-1050.
25. Kottegoda, N.T. and R. Rosso. 2008. Applied statistics for civil and environmental engineers. Malden, MA: Blackwell, 2:736. Jansson, M. B. 1996. Estimating a sediment rating curve of the Reventazón river at Palomo using logged mean loads within discharge classes. Journal of Hydrology, 183: 227-241.
26. Holland, J.H. 1975. Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence. U Michigan Press.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-07-03]

[DOI: 10.29252/jwmr.8.16.132]

Comparison of River Suspended Sediment Load Estimation, using Regression and GA Methods

Javad Bahmanesh[1], Maryam Mohammadpour[2] and Mohammad Mehdi Bateni[2]

1- Associate Professor of Water Engineering, Urmia University
(Corresponding author: j.behmanesh@urmia.ac.ir)
2- Ph.D. Student of Water Resources Engineering, Urmia University, Iran.
Received: September 7, 2014 Accepted: December 24, 2016

Abstract

The rivers sediment load is determined using hydrologic methods. In the statistical methods, by measuring the rivers discharge and suspended sediment load in a long-term period, the relationships between the suspended sediment load and discharge is obtained. The aim of this study is to compare different estimation methods of suspended load and select the most appropriate relationship for the prediction of suspended sediment load which results in more accurate prediction of sediment load discharge in the studied rivers. In this research, by using the daily river flow rate and corresponding suspended sediment discharge in four hydrometric stations in West Azerbaijan, the rating curve power equation for the middle limit of the data was used. The optimum coefficients of the mentioned equation ware obtained by using genetic algorithm (GA) and the ordinary regression, and the necessary programs ware written in Matlab® software. Since GA does not require any restrictive assumptions on input data, so it showed better performance in real data validation phase. This improvement in the rating curve coefficients causes to decrease up to 25 percent Root Mean Squared Error (RMSE). Therefore using GA as an appropriate tool was proposed to estimate the sediment rating curve for the studied stations.

Keywords: Genetic algorithm, Matlab software, Rating curve, Regression methods, Suspended sediment load

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-07-03]

[DOI: 10.29252/jwmr.8.16.132]