

بهینه‌سازی ضرایب معادله منحنی سنجه رسوب در برآورد دبی رسوب با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده (SA) (مطالعه موردی ایستگاه شهر بیجار)

علیرضا وفایی نژاد^۱، زهرا چترسیماب^{۲*}، سمیرا بلوری^۳، فرشاد میردار هریجانی^۴

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۱/۲ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۷/۹

چکیده

پدیده فرسایش و انتقال رسوب در رودخانه‌ها یکی از مهمترین و پیچیده‌ترین موضوعات می‌باشد. این پدیده‌ها اثرات ویژه‌ای روی شاخص‌های کیفی آب، کنش کف بستر و کناره‌های رودخانه داشته و همچنین خسارات جبران ناپذیری به طرح‌های عمرانی وارد می‌نمایند برای تخمین هر چه بهتر میزان رسوب معلق بر اساس معادله منحنی سنجه، می‌توان ضرایب این معادله را بهینه نمود. یکی از روشهای بهینه‌سازی ضرایب معادله منحنی سنجه رسوب، استفاده از الگوریتمهای فرا ابتکاری می‌باشد. هدف اصلی این تحقیق استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و تبرید شبیه‌سازی شده برای بهینه کردن ضرایب معادله منحنی سنجه رسوب برای ایستگاه شهر بیجار و مقایسه نتایج بدست آمده از این مدل‌ها با منحنی سنجه رسوب می‌باشد. برآورد رسوب با برخی از الگوریتمهای فرا ابتکاری انجام شده است اما تاکنون از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده در بهینه‌سازی ضرایب a و b در معادله سنجه رسوب استفاده نشده است. برای محاسبه دبی رسوب توسط مدل‌ها در ابتدا آمار و اطلاعات لازم از جمله آمار دبی آب و غلظت اندازه‌گیری شده رسوب از سال ۱۳۶۵ تا سال ۱۳۹۰ در ایستگاه مورد مطالعه جمع‌آوری شده است. مدل‌های الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و تبرید شبیه‌سازی شده (SA) در نرم افزار متلب کدنویسی شدند. پس از اینکه مدل‌ها با ۷۰ درصد از داده‌ها مورد آموزش قرار گرفتند، ۱۵ درصد داده‌ها در ایستگاه شهر بیجار مورد آزمون قرار گرفت. معیار ارزیابی مدل‌ها، ضریب تبیین (R^2)، ضریب ناش ساتکلیف (CE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بوده است. نتایج بدست آمده از مدل‌ها که در واقع کمینه کردن خطای حاصل از داده‌های محاسبه شده و مقادیر واقعی می‌باشد، نشان دهنده این واقعیت است که مدل الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با مقدار ۶/۶ تن در روز در ایستگاه شهر بیجار دارای کمترین مقدار جذر میانگین مربعات خطا و پس از آن، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده با مقدار ۱۹/۷ تن در روز قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: الگوریتم PSO، SA، بهینه‌سازی، رسوبات معلق، ایستگاه شهر بیجار

۱. استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی
۲. دانشجوی دکتری رشته سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، نویسنده مسئول (z_simab@yahoo.com)
۳. دانشجوی دکتری رشته سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات
۴. کارشناس ارشد آبخیزداری، سازمان جنگلها، مراتع و آبخیزداری کشور

مقدمه

بیش از ۷۰ درصد مساحت ایران را محیط‌های خشک و نیمه خشک در بر گرفته است. فرسایش خاک یک فرایند پیچیده و خطر ژئومورفولوژیکی بالقوه است و مقدار آن بازتابی از نحوه مدیریت زمین و شاخصهای محیطی تخریب به شمار می‌رود. همچنین به دلیل خاصیت تشدید شوندگی و اثرات چند جانبه آشکار و نهان محیط زیستی، به سرطان زمین شهرت یافته است (۲۰). بانک جهانی و دیگر مراکز تحقیقاتی دنیا نرخ فرسایش را در جهان بین ۲/۱۲ تا ۳۷ تن در هکتار تخمین زده‌اند (۱۴). به طور کلی بیشترین مساحت در معرض خطر فرسایش در جهان، مربوط به قاره آسیا با ۳۵ میلیون هکتار و پس از آن مربوط به قاره های آفریقا، آمریکا و اروپاست (۵).

سرعت تشکیل خاک در شرایط دست نخورده ۲۵ میلی متر در مدت ۳۰۰ سال و در مواقعی که بر اثر عملیات کشاورزی فرایندهای به هم خوردگی و هوادیدگی، شستشوی خاک سرعت می‌گیرند، و حدود ۲۵ میلی‌متر در ۳۰ سال است. که تقریباً برابر با فرسایش ۱۲/۵ تن در هکتار در سال است و این رقم اغلب به عنوان حدی که فرسایش نباید از آن بیشتر شود، پذیرفته شده است (۱۱). لذا توجه جدی به این موضوع علی‌الخصوص با رشد سریع جمعیت و کمبود منابع غذایی احساس می‌گردد. روش‌های مهندسی متعددی جهت تخمین رسوب معلق مانند استفاده از روش‌های سنجش از راه دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، اندازه‌گیری مستقیم غلظت رسوبات در رودخانه وجود دارد

(۱۶). یکی از این روشها استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری می‌باشد.

الگوریتم‌های فرا ابتکاری، مجموعه الگوریتم‌هایی برای حل مسائل بهینه‌یابی هستند که بصورت تصادفی اما هدفمند و ساده در فضای جواب مسئله به دنبال جواب بهینه مطلق حرکت می‌نمایند. تحقیقات زیادی در مورد برآورد رسوب با برخی از الگوریتم‌های فرا ابتکاری انجام شده است و اما تاکنون از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده در بهینه‌سازی ضرایب a و b در معادله سنجه رسوب استفاده نشده است. این تحقیق عملکرد دو الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده و ازدحام ذرات در بهینه‌سازی ضرایب مذکور را مقایسه می‌کند. همانگونه که ذکر شد در بهینه‌سازی ضرایب a و b در معادله سنجه رسوب با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری تحقیقاتی انجام شده است.

از جمله مدل‌های پیش‌بینی رسوب معلق، مدل‌های جعبه سیاه می‌باشند که فقط مبتنی بر اطلاعات ورودی و خروجی بازیابی شده از حوزه آبخیز می‌باشند که از آن جمله مدل شبکه عصبی مصنوعی ANN می‌باشد (۷). بیضایی و همکاران (۱۳۹۰) در تحقیقی بر روی تعدادی از رودخانه‌های واقع در استان آذربایجان شرقی به بررسی کارایی روشهای مختلف برون‌یابی پرداختند و نتایج نشان داد، روش حد وسط داده‌ها روشی مناسب برای بررسی رسوب در استان آذربایجان شرقی می‌باشد (۴). عبدی دهکردی و همکاران (۱۳۹۰) در تحقیقی به منظور افزایش دقت برآوردها، ضرایب معادله منحنی سنجه رسوب را با

مدل سازی رسوب استفاده کرد. نتایج دقت بالاتری را نسبت به روش های سنتی برای مدل سازی رسوب در رودخانه ها نشان داد. هدف از انجام این تحقیق استفاده از الگوریتم تبرید شبیه سازی شده (SA) و ازدحام بهینه-سازی ذرات (PSO) برای بهینه کردن ضرایب منحنی سنج رسوب در برآورد دبی رسوب معلق در ایستگاه شهر بیجار بر روی رودخانه سیاهکل و مقایسه نتایج بدست آمده با منحنی سنج رسوب (SRC) می باشد.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

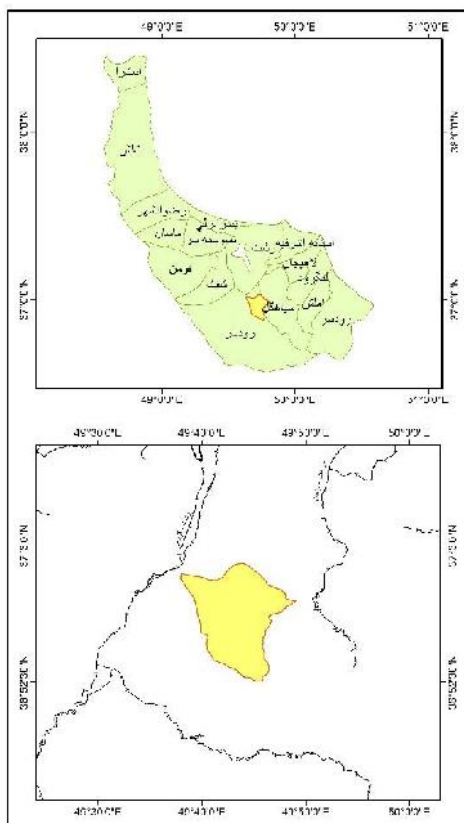
وجود ایستگاه هیدرومتری در خروجی حوزه از پارامترهای لازم در انتخاب منطقه مورد مطالعه می باشد. از آنجایی که حوزه های تفصیلی اجرایی دارای مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ می باشد و مساحت آنها بیشتر از ۱۰ تا ۱۵ هزار هکتار نیست پیدا کردن حوزه هایی که در خروجی آنها ایستگاه های هیدرومتری داشته باشد محدود است. برای این تحقیق از حوزه آبخیز شهر بیجار که در استان گیلان قرار دارد، استفاده شد.

منطقه مورد مطالعه بین "۴۸' ۳۷° ۴۹ تا "۳۲' ۵۳° ۴۹ طول شرقی و "۱۷' ۵۱° ۳۶ تا "۱۴' ۰۲° ۳۷ عرض شمالی واقع شده است. وسعت حوزه آبخیز ۲۴۱۸۷/۴۳ هکتار می باشد. حداقل ارتفاع حوزه ۸۰ متر و حداکثر ارتفاع آن ۲۶۰۳ متر و شیب متوسط حوزه آبخیز ۵۲ درصد می باشد. منطقه مورد مطالعه در یک منطقه کوهستانی و پر باران واقع شده است که

استفاده از روش الگوریتم ژنتیک بهینه نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از روشهای جستجوی هوشمند، عملکرد روش مرسوم منحنی سنج را به میزان قابل توجهی بهبود می بخشد (۱).

محمدرضاپور و همکاران (۱۳۹۴) از الگوریتم ژنتیک و بهینه سازی ازدحام ذرات برای بهینه نمودن ضرایب منحنی سنج رسوب ایستگاه کهک قم استفاده نمودند. نتایج بدست آمده نشان دهنده این واقعیت بود که مدل الگوریتم ژنتیک دارای بهترین نتیجه و پس از آن، الگوریتم ازدحام ذرات نسبت به منحنی سنج رسوب دارای نتایج بهتری بود (۱۷). محمدرضاپور و همکاران (2011) در تحقیقی از الگوریتم ژنتیک برای بهینه کردن رابطه بین دبی جریان و دبی رسوب برای ایستگاه نوده واقع بر رودخانه گرگانرود استفاده کردند که نتایج بدست آمده با منحنی سنج رسوب مقایسه شد. ارزیابی نتایج نشان داد که الگوریتم ژنتیک از دقت بالاتری نسبت به منحنی سنج رسوب برخوردار می باشد. آلتونکیناک^۵ (۲۰۰۹) با استفاده از الگوریتم ژنتیک به برآورد مقدار رسوب با استفاده از مقادیر دبی پرداخته است. سن و همکاران^۶ (۲۰۰۴) از الگوریتم های هوش مصنوعی از جمله GA برای پیش بینی های وقوع بارش استفاده کردند و بیان کردند که از الگوریتم GA می توان به راحتی با روش های دیگر مانند مدل منطق فازی و شبکه های عصبی هیبرید نمود و در پیش بینی ها به کار برد. بابوویچ^۷ (۲۰۰۰) از الگوریتم GP برای

میزان رسوب گذاری در آن زیاد است و همچنین چندین ایستگاه اندازه‌گیری رسوب در آن موجود است که می‌توان نتیجه حاصل از مدل‌ها را جهت صحت‌سنجی با آنها مقایسه نمود. شکل شماره (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل شماره (۱) موقعیت حوزه شهر بیجار در استان گیلان

روش پژوهش

آموزش، اعتبار سنجی و آزمون تقسیم شدند. ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۱۵ درصد برای اعتبار سنجی و ۱۵ درصد برای صحت-سنجی اختصاص پیدا کرد. مرحله بعد شامل مدل‌سازی به کمک داده‌های آموزش است که پس از طراحی مدل‌ها با داده‌های آزمون و کل داده‌ها، مدل‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بهینه‌سازی ضرایب معادله منحنی سنج رسوب از الگوریتم (PSO) و تبرید شبیه‌سازی شده (SA) استفاده شد.

برای محاسبه دبی رسوب توسط مدل‌ها در ابتدا آمار و اطلاعات لازم از قبیل آمار غلظت اندازه-گیری شده رسوب و دبی جریان متناظر با آن، از سال ۱۳۷۲ تا سال ۱۳۹۱ در ایستگاه رسوب‌سنجی شهر بیجار جمع‌آوری شد. سپس داده‌های نامناسب با استفاده از شاخص باقیمانده استیوندت در نرم‌افزار SAS شناسایی و حذف گردید. پس از اطمینان از همگنی و نرمال‌سازی داده‌ها، مجموع داده‌ها به سه گروه

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (۳) \text{ معادله}$$

$Gbest_i^k$ و $pbest_i^k$ به ترتیب G_i^k و p_i^k می باشند. پارامترهای r_1 و r_2 مقادیری تصادفی بین $\{0, 1\}$ و c_1 و c_2 به ترتیب ضریب یادگیری شخصی و گروهی می باشند. w همان وزنی است که باعث کنترل سرعت قبلی در سرعت جدید می باشد و می تواند بین $\{0, 1\}$ تغییر کند (۱۹). هرچه w به ۱ نزدیک تر باشد، PSO در فضای تحقیق بزرگتری حرکت می کند (۹). با توجه به تحقیقات انجام شده توسط Clerc و Kennedy می توان w و c_1 و c_2 را از معادله ۴، ۵ و ۶ محاسبه نمود:

$$\varphi_1, \varphi_2 > 4$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 > 4$$

$$\aleph = \frac{2}{\varphi - 2 + \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}} \quad (۴) \text{ معادله}$$

$$w = \aleph$$

$$c_1 = \aleph * \varphi_1 \quad (۵) \text{ معادله}$$

$$c_2 = \aleph * \varphi_2 \quad (۶) \text{ معادله}$$

نتایج تجربی نشان داده است در شرایط مناسب φ_1 و φ_2 برابر با ۲/۰۵ و مقادیر $w=0.7298$ و $c_1=c_2=1.49618$ می باشند (Clerc & Kennedy, 2002).

الگوریتم تبرید شبیه سازی شده (SA)

روش تبرید شبیه سازی شده، یک روش بهینه سازی بر مبنای روش مونت کارلو است که توسط متروپولیس و همکارانش در سال ۱۹۵۳ ارائه شد. در سال ۱۹۸۳، کریک پاتریک و همکارانش از روش تبرید شبیه سازی شده برای حل یک مسئله بهینه سازی ترکیبی پیچیده استفاده کردند (۱۵). از آن زمان به بعد

الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات^۸ (PSO)

الگوریتم ازدحام ذرات روشی جمعیت محور و الهام گرفته از رفتار پرندگان و ماهی ها می باشد (۹). PSO به عنوان یکی از الگوریتم های فرا ابتکاری برای نخستین بار توسط Kennedy و همکاران در سال ۱۹۹۵ ارائه گردید. PSO یک تکنیک بهینه سازی آماری جامعه مناسب است که به خوبی می تواند به بهینه سازی توابع غیرخطی در یک فضای چند بعدی پردازد (۱۲).

در این الگوریتم ابتدا یک جمعیت اولیه تولید می شود بنابراین PSO دسته ای از ذرات است که دارای مکان و سرعت می باشند (۳).

$$S = \{x_1^k, x_2^k, x_3^k \dots x_n^k\} \quad (۱) \text{ معادله}$$

$$v = \{v_1^k, v_2^k, v_3^k \dots v_n^k\}$$

K نشان دهنده مرتبه تناوب، x_i موقعیت و v_i سرعت ذره و n تعداد ذرات می باشد. در هر تناوب ذرات موقعیت خود را تغییر می دهند و به موقعیت جدید x_i^{k+1} می روند. در حالت کلی هر ذره بر اساس بهترین مقدار تابع شایستگی خود (P_{best}) و بهترین تابع شایستگی جمعیت (G_{best}) هدایت می شود (آل شیخ و همکاران، ۱۳۹۲). این هدایت بر اساس روابط (۲ و ۳) صورت می گیرد:

$$\text{معادله (۲)}$$

$$v_i^{k+1} = w * v_i^k + r_1 c_1 * (p_i^k - x_i^k) + r_2 c_2 * (G_i^k - x_i^k)$$

⁹ . Simulated Annealing

⁸ . Particle Swarm Optimization

این توزیع بر این نکته تأکید می‌کند که وقتی یک سیستم در دمای T در تعادل گرمایی قرار دارد، یک توزیع انرژی دارد که در بین کل حالات مختلف انرژی توزیع شده است. همیشه این امکان وجود دارد که حتی در یک دمای پایین، حالت انرژی سیستم بالا باشد. بنابراین شانس اینکه سیستم از یک مقدار انرژی مینیمم موضعی بیرون آمده و به یک مقدار مطلق همگرا شود، وجود دارد (۱۰).

$$P(E) \propto e^{\frac{-E}{KT}} \quad (۷) \quad \text{معادله}$$

معرفی تابع هدف

هدف از انجام این تحقیق حداقل نمودن اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده رسوب واقعی Q_0 با مقادیر محاسبه شده Q_m با استفاده از مدل مورد استفاده می‌باشد. از آنجا که مقدار رسوب محاسبه شده، تابعی از پارامترهای دبی روزانه رودخانه Q_w می‌باشد، باید برای حداقل نمودن تابع هدف به دنبال پارامترهایی بود که Q_m را به Q_0 نزدیک کند.

در این تحقیق رابطه بین دبی رسوب و دبی جریان به صورت معادله زیر تعریف شده است:

$$Q = aQ_w^b \quad (۸) \quad \text{معادله}$$

$Q_w(t)$ مقدار دبی جریان روزانه، b و a ضرایبی هستند که باید بهینه شوند.

معیارهای ارزیابی مدل‌های ارائه شده

جهت ارزیابی مدل‌های مذکور در تخمین میزان رسوبات سالانه، از شاخص‌های آماری نظیر جذر میانگین مربعات خطا، ضریب ناش-ساتکلیف و ضریب تبیین، از معادلات ۹ تا ۱۱ استفاده شده است.

روش تبرید شبیه‌سازی شده برای حل مسائل بهینه‌سازی مختلف که شامل متغیرهای مستقل بسیاری هستند به کار گرفته شده است. برخلاف روش‌های بهینه‌سازی موضعی که فقط می‌توانند یک مقدار مینیمم نزدیک به حدس اولیه را پیدا کنند، روش تبرید شبیه‌سازی شده، مقدار مینیمم مطلق را پیدا می‌کند (۲۱).

مفهوم اصلی روش تبرید شبیه‌سازی شده از فرآیند فیزیکی تبرید فلزات مذاب سرچشمه می‌گیرد. در فرآیند تبرید، یک فلز مذاب با دمای بسیار بالا به تدریج خنک می‌شود. در دماهای بالا، اتم‌های سازنده فلز به صورت تصادفی قرار گرفته‌اند و لذا می‌توانند به آسانی نسبت به یکدیگر جابه‌جا شوند. با کاهش تدریجی دما، حرکت اتم‌ها محدود می‌شود به طوری که اتم‌ها شروع به مرتب شدن نموده و تشکیل کریستال می‌دهند (۸). سطح انرژی کریستال تشکیل شده، به سرعت سرد کردن فلز بستگی دارد. اگر کاهش دما خیلی سریع صورت بگیرد، ممکن است ساختار کریستالی تشکیل نشده و به جای آن ساختاری غیرکریستالی با سطح انرژی بالا تشکیل شود. بنابراین برای رسیدن به کمترین میزان سطح انرژی، فرآیند سرد کردن باید به آرامی صورت پذیرد (۲۲).

روش تبرید شبیه‌سازی شده از توزیع احتمالی بولتزمن، که در معادله ۷ نشان داده شده است، استفاده می‌کند که در آن، E و T به ترتیب، نشان دهنده انرژی و دمای سیستم هستند. همچنین K نشان دهنده ثابت بولتزمن است.

بهینه‌سازی ضرایب بر اساس ۷۰ درصد داده‌ها در الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده و بهینه‌سازی ازدحام ذرات انجام شد و ۱۵ درصد داده‌ها در بخش آزمون یا اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. ضرایب به دست آمده از مدل‌های مختلف، با مقادیر واقعی رسوب معلق در ایستگاه شهر بیجار بر اساس شاخص‌های ارزیابی مطرح شده بررسی و مقایسه شد.

جدول شماره (۱) برآورد ریشه میانگین مربعات خطا، ضرایب تبیین، ضریب ناش-ساتکلیف در هر سه مدل (SA و PSO، SRC) را بررسی می‌نماید. شکل شماره (۲) بیانگر نمودار پراکندگی داده‌های دبی جریان و رسوب در ایستگاه شهر بیجار را می‌باشد. شکل شماره (۳) مقایسه بین داده‌های واقعی دبی رسوب با مقادیر محاسبه شده توسط مدل‌ها بوسیله ۱۵ درصد داده‌های آموزشی را نشان می‌دهد. همچنین به منظور مقایسه و ارزیابی عملکرد مدل‌های مورد آزمون و تعیین میزان دقت مدل‌ها، علاوه بر مجذور میانگین مربعات خطا، ضریب ناش-ساتکلیف و ضریب تبیین از ترسیم نمودارهای مقادیر برآوردی رسوب معلق توسط مدل‌ها و مقادیر واقعی رسوب برای دبی‌های جریان، نیز استفاده شده است [شکل شماره (۴)]. شکل شماره (۵) نیز مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا در مدل‌های مختلف در ایستگاه شهر بیجار را نشان می‌دهد.

معادله (۹) $RMSE =$

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (o - p)^2}$$

که RMSE جذر میانگین مربعات خطا می‌باشد که هر چه مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد مدل از دقت بیشتری برخوردار است.

$$E = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O-P)^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O-\bar{O})^2} \quad (10)$$

معیار ن‌ناش-ساتکلیف می‌باشد که مقدار آن از منفی بی‌نهایت تا ۱ متغیر است. که هر چقدر مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، مدل از کارایی بیشتری برخوردار است (Nash & Sutcliffe, 1970).

معادله (۱۱) $R^2 =$

$$\left[\frac{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})(p_i - \bar{p})}{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2 \sqrt{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2}} \right]^2$$

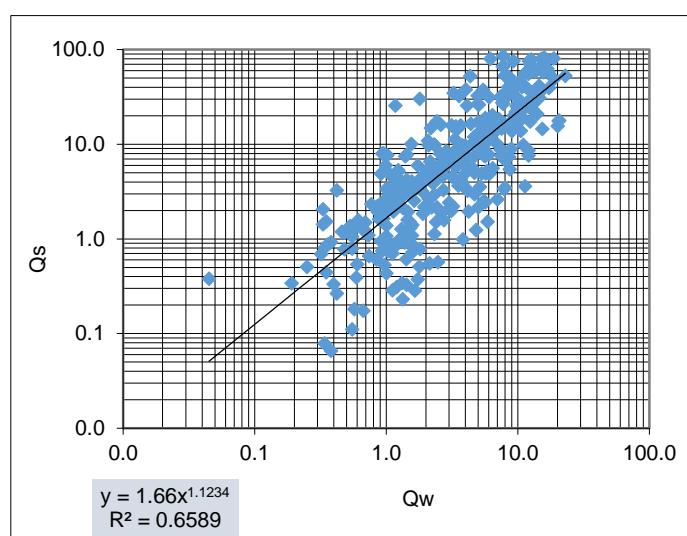
که در آن R^2 ، ضریب تبیین، N تعداد داده‌ها O_i دبی رسوب بار معلق مشاهده شده، p_i دبی رسوب بار معلق تخمین زده شده، \bar{O} میانگین مقادیر مشاهده و \bar{P} میانگین مقادیر برآورد شده می‌باشد که مقدار بهینه این شاخص آماری ۱۰۰٪ می‌باشد.

نتایج و بحث

در الگوریتم‌های PSO و SA، پارامترهایی وجود دارد که تنظیم آنها باعث بهبود عملکرد الگوریتم‌های مذکور می‌گردد. به دست آوردن بهترین پارامترهای این الگوریتم‌ها مبتنی بر منابع موجود و تحقیقات گذشته می‌باشد. جهت رسیدن به جواب بهینه برای ضرایب a و b هر دو الگوریتم ۱۵۰ مرتبه تکرار شدند.

جدول شماره (۱) پارامترهای آماری دبی جریان (متر مکعب بر ثانیه) و رسوب معلق (تن بر روز)

ایستگاه شهر بیجار					
مدل	a	b	CE	RMSE	R2
SRC	۱,۶۶	۱,۱۲۳	۰,۴۶	۶۶,۹	۰,۵۲
الگوریتم بهینه‌سازی ذرات	۳,۰۱	۰,۹۸۳	۰,۵۵	۶,۷	۰,۵۳
الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده	۳,۷۰	۰,۸۹۱	۰,۴۹	۱۹,۷	۰,۴۶



شکل شماره (۲) نمودار پراکندگی داده‌های دبی جریان و رسوب در ایستگاه شهر بیجار

آن الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده با ۱۹/۷ تن در روز دارای کمترین مقدار تابع هدف می باشد. با توجه به اینکه در این تحقیق علاوه بر مقادیر تابع هدف پارامترهای ضریب تبیین و ضریب ناش-ساتکلیف نیز برای ارزیابی مدل‌ها استفاده شده است بخوبی از جدول شماره (۱) مشخص است که الگوریتم ازدحام ذرات با دارا بودن مقادیر ضریب تبیین و ضریب نش ۰/۵۵ و ۰/۵۳ به ترتیب بالاترین مقادیر را در بین سایر مدل‌ها به خود اختصاص داده است. با توجه به شکل شماره (۴) می‌توان دریافت که برای

با توجه به شکل شماره (۳) و (۴) مشاهده می‌شود که نتایج بدست آمده از هر سه مدل الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده، الگوریتم ازدحام ذرات و منحنی سنجه رسوب در مقادیر پایین دبی جریان و مقادیر رسوب برآورد شده به خوبی با مقادیر رسوب مشاهده‌ای مطابقت دارند اما در دبی جریان بالا، میزان رسوب تخمین زده شده کمتر از میزان رسوبات مشاهده شده می‌باشد. همانطور که شکل شماره (۵) نشان می‌دهد، مدل الگوریتم ازدحام ذرات با مقدار ۶/۷ تن در روز کمترین میزان RMSE را در ایستگاه شهر بیجار دارا می‌باشد و پس از

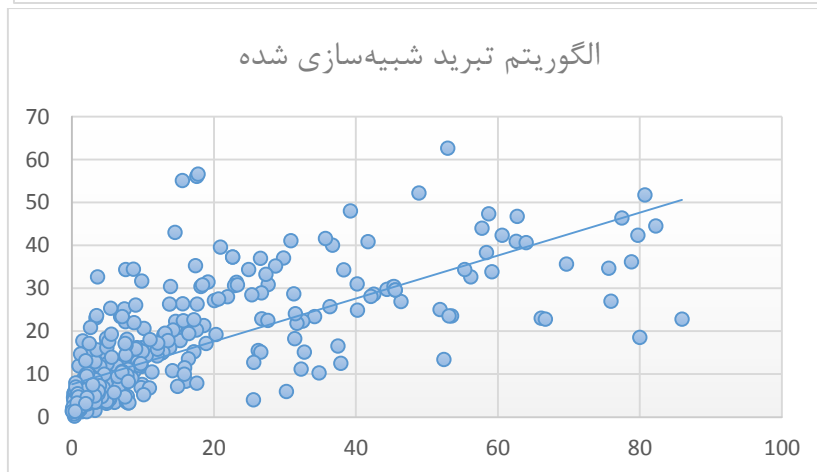
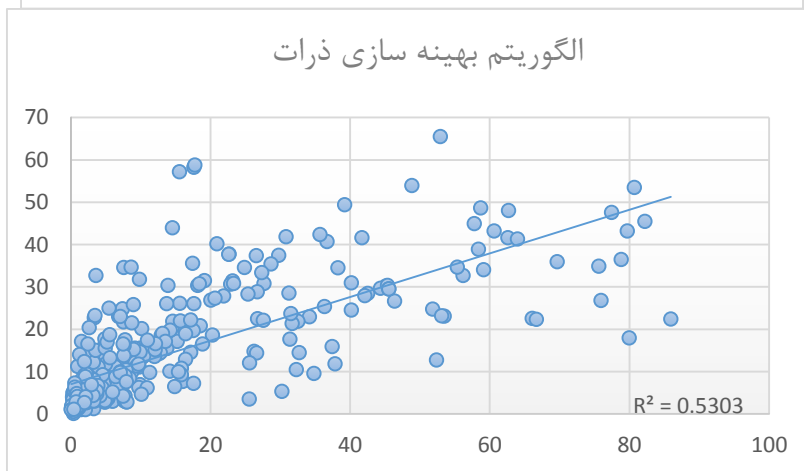
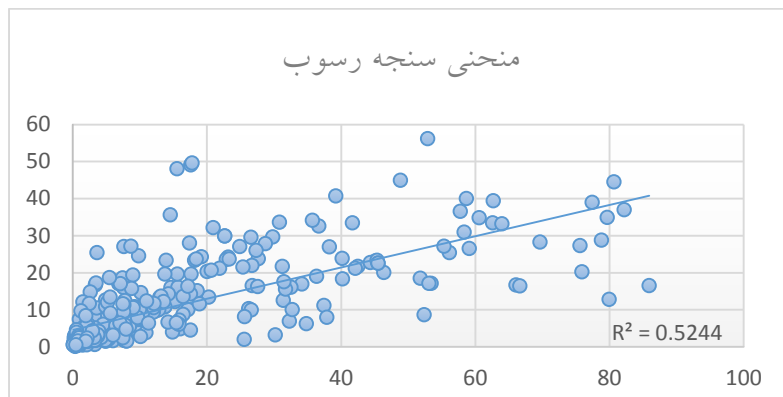
۱۵ درصد دیگر در آزمایش مدل به کار گرفته شد.

در این تحقیق عملکرد مدل های مختلف به کمک فاکتورهای $RMSE$ و $R2$ و ضریب ناش- ساتکلیف مورد ارزیابی قرار گرفت. این مقادیر مزیت نسبی مدل ها را نشان می دهند. بیشترین ضریب تبیین و ضریب نش-ساتکلیف و کمترین میزان خطای $RMSE$ بهترین روش را معرفی می نمایند. بنابراین، ارزش برآوردی روش ها به ترتیب SA ، PSO ، SRC و با ضریب $RMSE$ ۶،۷، ۶۶،۹ و ۱۹،۷ می باشد. نتایج سایر آزمون ها در جدول شماره (۱) مشخص گردیده است. به طور کلی نتایج حاصل از مدل ها نشان داد که دو الگوریتم تبرید شبیه-سازی شده و بهینه سازی ازدحام ذرات در تعیین ضرایب بهینه نتایج تقریبا مشابهی را حاصل کردند که با نتایج بدست آمده از مدل SRC تفاوت قابل توجهی دارد (جدول شماره (۱)).

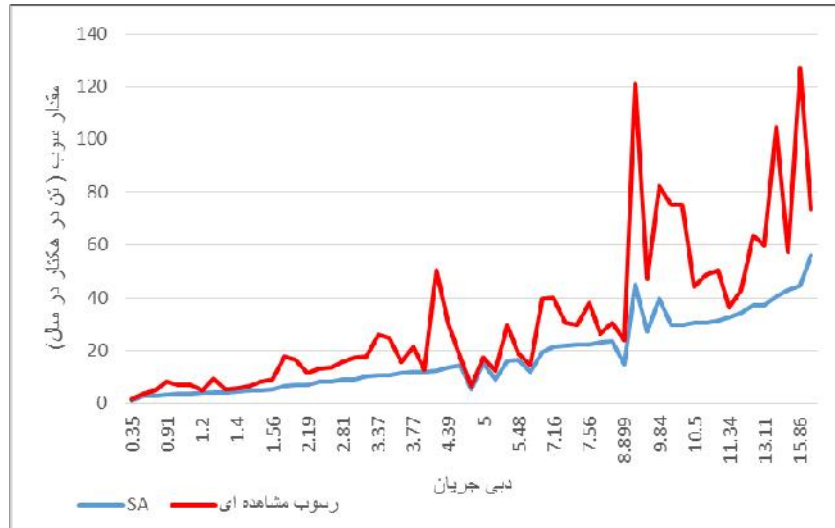
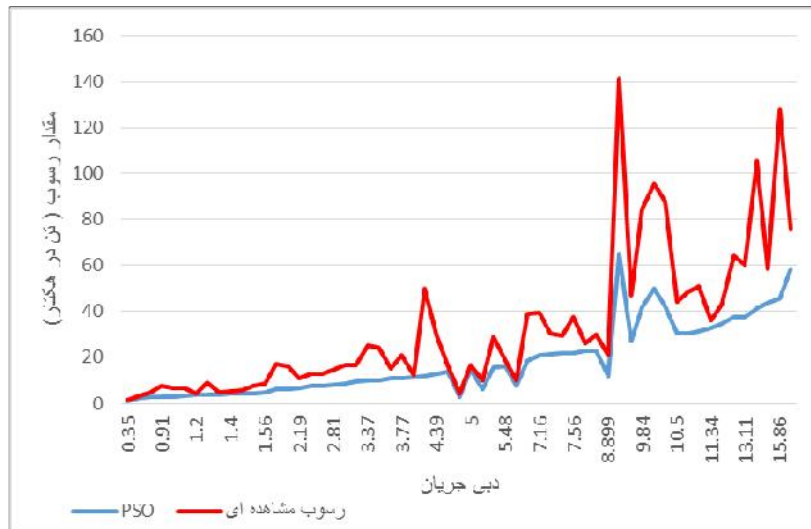
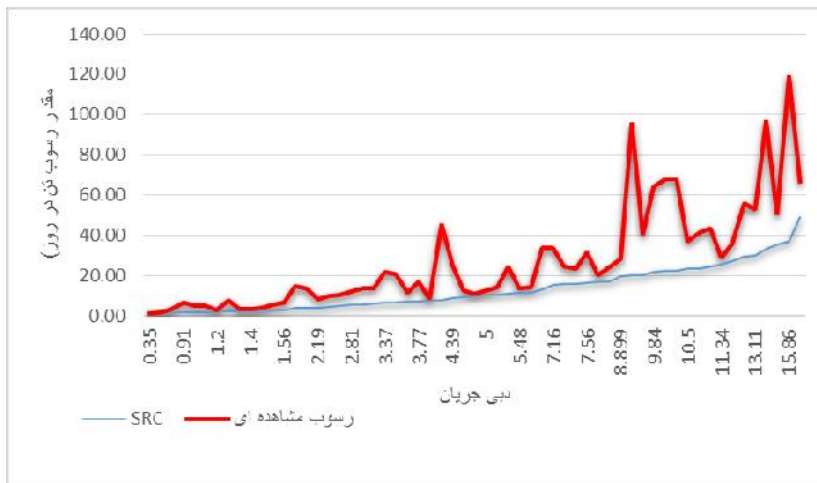
دبی های بالا مدل های الگوریتم تبرید شبیه-سازی شده و ازدحام ذرات جواب های نزدیک-تری با مقدار واقعی رسوب دارند. از طرفی رضا پور و همکاران (۱۳۹۴) ضرایب معادله منحنی سنج رسوب را در ایستگاه کهک با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات و ژنتیک بهینه کردند و بیان داشتند که مدل ژنتیک نسبت به مدل الگوریتم ازدحام ذرات نتایج بهتری را نشان می دهد، همچنین سپهوند و همکاران (۱۳۹۱) در حوزه آبخیز گذارخوش به ارزیابی اثر ارائه منحنی سنج رسوب در دوره های کم آبی و پرآبی بر میزان خطای تخمین رسوب و مقایسه روش مذکور با روش شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. نتایج مبین قابلیت بالای روش شبکه عصبی مصنوعی با ضرایب تبیین و کارایی به ترتیب ۰/۹۰۳ و ۰/۸۹ می باشد.

نتیجه گیری

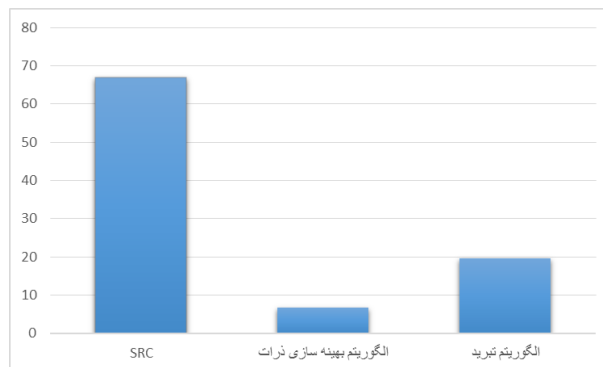
هدف از انجام این تحقیق بکارگیری الگوریتم-های ازدحام بهینه سازی ذرات و تبرید شبیه-سازی شده در بهینه سازی ضرایب منحنی سنج رسوب در برآورد رسوب معلق می باشد که در آن از داده های ۳۰ ساله دبی جریان و دبی رسوب اندازه گیری شده در ایستگاه شهر بیجار بر روی رودخانه سیاهکل استفاده شده است. بنابراین هدف کلی، حداقل کردن جذر میانگین مربعات خطا بین داده های مشاهده ای و مقادیر بدست آمده از معادله منحنی سنج رسوب با استفاده از مدل های الگوریتم تبرید شبیه سازی شده و ازدحام ذرات می باشد. پس از کدنویسی مدل ها در نرم افزار $Matlab$ ، مدل ها با ۷۰ درصد داده ها، مورد آموزش قرار گرفت، ۱۵ درصد داده ها برای اعتبارسنجی و



شکل شماره (۳) مقایسه بین داده‌های واقعی دبی رسوب با مقادیر محاسبه شده توسط مدل‌ها بوسیله ۱۵ درصد داده-های آموزشی



شکل شماره (۴) نمودارهای مقادیر برآوردی رسوب معلق توسط مدل‌ها و مقادیر واقعی رسوب برای دبی‌های جریان



شکل شماره (۵) مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا در مدل‌های مختلف در ایستگاه شهر بیجار

نتایج بدست آمده از مدل‌ها که در واقع کمینه کردن خطای حاصل از داده‌های محاسبه شده و مقادیر واقعی می‌باشد نشان دهنده این واقعیت است که الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات نسبت به الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده و منحنی سنجه رسوب توانسته است مقادیر تابع هدف را بهتر کمینه نماید (شکل شماره (۵)). همچنین پارامترهای ارزیابی دیگر از قبیل ضریب تبیین و ضریب نش-ساتکلیف نیز در ارزیابی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این ارزیابی‌ها نیز مبین این واقعیت است که الگوریتم بهینه‌سازی ذرات دارای مقادیر ضریب تبیین و ضریب نش-ساتکلیف بالاتری نسبت به دو مدل دیگر می‌باشد.

پیشنهادات

در تحقیقات بعدی بهتر است از روش‌های ترکیبی شبکه عصبی با الگوریتم‌های بهینه‌سازی از جمله PSO و تبرید استفاده شود تا بتوان ضعیفی که مدل‌های مطرح شده در پیش-بینی میزان رسوب در دبی جریان‌های بالا دارد را برطرف نمود.

References:

1. Abdi Dehkordi, M., Meftah, M., Dehghani, A. and M. Hesam. (2010) Application of genetic algorithm in optimizing coefficients of function. 5th congress of watershed and management of soil and water resources.
2. Ale Sheikh, A., Gazmeh, H., Ghehrehgan, A. and M. Karimi. (2013) Modeling the spread of forest fire using cellular automata, GIS and bird's algorithm. journal of surveying engineering and spatial information, 4(3).
3. Amini, F. and H. Baghi. (2010) Active control of buildings using reformed bird's algorithm. 6th national congress of civil engineering, Semnan university, Iran.
4. Baizaei, M., Erfanian, M., Abghari, H, and A. Esmaeili. (2010) Evaluation of methods in estimation of river suspend burdens in Azarbaijane sharghi. 7th national congress of science and watershed engineering, 27,28 th April.
5. Caretagena, D.F. (2004) Remotely sensed land cover parameter extraction for watershed erosion modeling. MS.c thesis, International institute for geo-information science and earth observation, Enschede, The Netherland, ITC publications.
6. Clerc, M. and J. Kennedy. (2002) The Particle Swarm-Explosion Stability, and Convergence in a Multidimensional Complex Space. IEE Transactions on Evolutionary Computation, 58-73.
7. Dawson, C. W. and R. L. Wilby. (2001) Hydrological modeling using artificial neural networks. Progress in Physical Geography, 108:25-80.
8. Durand, M. D. and S. R. White. (2000) Trading accuracy for speed in parallel simulated annealing with simultaneous moves. Elsevier parallel computing, 26:135-150.
9. Eberhart, R. C. and Y. Shi. (2001) Comparing inertia weights and constriction factor in Particle Swarm Optimization. In Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation, 84-88.
10. Gholinezhad, S. and M. Masihi. (2012) Conformity and speedy simulated annealing algorithm for modeling break network in natural broken depository. Oil research, 80.
11. Hudson, N. (1981) Soil Conservation. The University of Michigan, Cornell University Press, 324.
12. Karaboga, D. and B. Basturk. (2008) On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm. Applied Soft computing. 8:687-697.
13. Kennedy, J., Eberhart, C. and et.al. (1995) Particle swarm optimization. In Proceedings of IEEE international conference on neural network, Perth, Australia, 4:1942-1948.
14. Malava, J. and F. Bonda. (1999) Proposal for research to support erosion hazard assessment in Malawi. Agricultural engineering Bunda College of Agriculture, www.ag.arizona.edu.
15. Misevicius A. (2003) A Modified simulated annealing algorithm for the quadratic assignment problem informatica. 14: 497-514.
16. Mohammad Reza Pour, O., Lee, T. SH. and et. al. (2011) Genetic algorithm model for the relation between flow discharge and suspended sediment load (Gorgan River in Iran). Electronic journal of geotechnical engineering, 16:539-555.
17. Mohammad Reza Pour, O., Haghightajou, P. and et. al. (2015) Analogy between PSO and genetic algorithm in optimizing coefficient of in estimating of

- suspended erosion debye in sistan river: case study of Kahak station. Journal of watershed and water engineering, 26.
18. Nash, J. E. and J. V, Sutcliffe. (1970) River flow forecasting through conceptual models part I. A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10 (3): 282–290.
 19. Pereze, R. and K. Behdinan. (2007) Particle swarm approach for structural design optimization. Computers and Structures, 85:1579-1588.
 20. Rostaei, S., Nikjou, MR. and et. al. (2011) Investigation of Soil erodibility of Bejoshan Chay Basin based on Fuzzy-GIS. Journal of Geography and planning, Tabriz University, 33:147-173.
 21. Tran, N. H., Chen, Z. and et. al. (2003) Object-based global optimization in modeling discrete-fracture network map: A case study SPE 84456. Annual technical conference and exhibition, Denver, Colorado, U. S. A.
 22. Vasan, A. and K. S, Raju. (2009) Comparative analysis of simulated annealing. Simulated quenching and genetic algorithms for optimal reservoir operation Elsevier. Applied soft computing, 9:274-281.
 23. Altunkaynak.A. 2009. Sediment load prediction by genetic algorithms. J. Adv.Engineering Software.40: 928-934.
 24. Babovic V, Keijzer M, Aguilera, DR, Harrington J. (2001). Automatic Discovery Settling Velocity Equations. D2K Technical Report, D2K-0201-1.
 25. S_en Z, Oztopal A. Genetic algorithms for the classification and prediction of precipitation occurrence. Hydrol Sci J 2001;46(2):255–68.