[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.25.7]

[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.321]

تخمین پارامترهای بهینه مدل روندیابی ماسکینگام غیرخطی با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری (ICA)

داود رجبی[1*]، حجت کرمی[1]، خسرو حسینی[1]، سیدفرهاد موسوی[1] و سیدعلی‌اصغر هاشمی[2]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۰۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۵/۲۶)

چکیده

مدل غیرخطی ماسکینگام روشی کارا در روندیابی سیلاب است، اما کارایی این روش تحت تأثیر سه پارامتر به‌کار رفته در آن است. در سال‌های اخیر، نتایج رضایت‌بخشی از استفاده الگوریتم‌های فراکاوشی در تعیین مقدار مناسب پارامترهای این مدل گزارش شده است. از این‌رو در این پژوهش به ارزیابی کارایی الگوریتم رقابت استعماری (ICA) در تخمین پارامترهای بهینه مدل غیرخطی ماسکینگام پرداخته شد. علاوه‌بر ICA، الگوریتم ژنتیک (GA) و بهینه‌سازی مجموعه ذرات (PSO) نیز با هدف در دست بودن معیار برای قضاوت در مورد عملکرد ICA مورد استفاده قرار گرفتند. بدین‌منظور ابتدا ICA در روندیابی سیل ویلسون به‌کار گرفته شد؛ پس از آن روندیابی دو واقعه سیلاب مربوط به رودخانه دوآب صمصامی مورد بررسی قرار گرفت. در مورد سیل ویلسون که تابع هدف به‌صورت مجموع مربعات انحرافات (SSQ) دبی مشاهداتی و محاسباتی در نظر گرفته شد؛ مقدار تابع هدف حاصل از ICA، برابر ۳۶/۷۷ و مقدار تابع هدف حاصل از GA و PSO به‌ترتیب برابر ۳۸/۲۳ و ۳۶/۸۹ به‌دست آمد. در روندیابی دو سیل دیگر علاوه‌بر SSQ، تابع هدف دیگری به‌صورت مجموع قدر مطلق انحرافات (SAD) دبی مشاهداتی و محاسباتی نیز در نظر گرفته شد. در سیلاب اول براساس SSQ، GA بهترین عملکرد را از خود نشان داد ولی براساس SAD، ICA در رتبه نخست قرار گرفت. در مورد سیلاب دوم بر مبنای هر دو تابع هدف، ICA عملکرد بهتری داشته است. در این رابطه ICA نسبت به GA در تابع هدف SSQ، ۹ درصد و در تابع هدف SAD، ۰/۰۸ درصد بهتر بوده است و نسبت‌به PSO، تابع هدف SSQ و SAD را به‌ترتیب ۰/۱ و ۰/۱۶ درصد بهبود داده است. با توجه به‌نتایج حاصل می‌توان گفت که الگوریتم ICA می‌تواند به‌عنوان یک روش مناسب به‌منظور تخمین پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: الگوریتم رقابت استعماری ، الگوریتم ژنتیک ، بهینه‌سازی مجموعه ذرات ، سیل ویلسون ، رودخانه دوآب صمصامی

۱. گروه مهندسی آب ، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲. مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: d.rajabi@semnan.ac.ir

مقدمه

سیل از جمله مهم‌ترین مخاطرات طبیعی است که باعث آسیب به مناطق شهری و کشاورزی می‌شود. آگاهی از وضعیت بزرگی سیلاب‌ها در یک منطقه می‌تواند مدیران را در ساخت سازه‌های مناسب برای جلوگیری از خسارت‌های ناشی از این پدیده کمک نماید. تخمین چگونگی اوج گرفتن و فروکش هیدروگراف سیل در پایین دست هر مقطع مشخص از رودخانه را روندیابی سیل گویند. روندیابی سیلاب به‌طور کلی به دو صورت هیدرولیکی و هیدرولوژیکی انجام می‌شود. در روندیابی هیدرولیکی با استفاده از روش‌های عددی و معادلات جریان غیرماندگار روندیابی سیل انجام می‌شود، اما در روش‌های هیدرولوژیکی، روندیابی سیل به‌کمک حل معادلات پیوستگی و رابطه ذخیره موقت در بازهٔ مشخصی از رودخانه، صورت می‌گیرد.

از آنجا که روش‌های هیدرولیکی دارای پیچیدگی‌های محاسباتی هستند معمولاً استفاده از آنها سخت و نیازمند اطلاعات زیادی است، اما در مقابل روش‌های هیدرولوژیکی از روابط ساده‌تری استفاده می‌کنند و با حداقل اطلاعات ممکن (هیدروگراف سیل)، روندیابی را با دقت مناسبی انجام می‌دهند. از این‌رو استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی مورد استقبال محققین قرار گرفته است. روش روندیابی ماسکینگام از جمله روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی است که اولین بار توسط مک‌کارتی (۱۴) پیشنهاد شد. از آنجا که روش معرفی شده توسط مک‌کارتی یک رابطه خطی بود و توانایی مدل کردن روابط غیرخطی بین ورودی، خروجی و ذخیره موقت را نداشت، گیل (۱۱)نسخه غیرخطی از این روش را ارائه نمود. نکته مهم در استفاده از روش ماسکینگام غیرخطی، تعیین مقدار مناسب پارامترهای آن است، که معمولاً تعیین این پارامترها به‌روش آزمون و خطا و یا روش‌های عددی دشوار و زمان‌بر انجام می‌شود؛ به‌همین دلیل استفاده از روش‌های بهینه‌سازی در تعیین این پارامترها راهکار مناسبی است. در میان روش‌های مختلف بهینه‌سازی، الگوریتم‌های فراکاوشی جایگاه ویژه‌ای در این زمینه دارند.

تحقیقات زیادی در زمینه روندیابی سیل با استفاده از مدل ماسکینگام غیرخطی و با کاربرد الگوریتم‌های فراکاوشی انجام شده است. چن و یانگ (۷) به بهینه‌سازی پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی با استفاده از الگویتم ژنتیک (GA) (Genetic Algorithm پرداختند. آنها نتایج خود را با نتایج حاصل از برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP) Non-Linear Programming و روش حداقل مربعات (LSM) Least- Squares Method مقایسه نمودند، نتایج نشان داد که GA توانایی بالاتری در یافتن پارامترهای بهینه مدل ماسکینگام غیرخطی نسبت به دو روش دیگر دارد. چو و چانگ (۸) با استفاده از بهینه‌سازی مجموعه ذرات (PSO) Particle Swarm Optimization پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام را تخمین زدند. آنها نتایج خود را با روش LSM، رگرسیون حداقل مربعات خطا (NONLR) Nonlinear Least-Squares Regression ، GA و جستجوی هارمونی (HS) Harmony Search مقایسه نمودند. نتایج نشان داد عملکرد PSO از روش‌های LSM و NONLR بهتر بوده است و در مقایسه با GA و HS، الگوریتم PSO عملکرد تقریباً مشابه‌ای داشته است. ایشان بیان کردند PSO می‌تواند به‌عنوان یک راه‌حل مناسب برای تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام مورد استفاده قرار گیرد. زوو همکاران (۱۷) استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) Differential Evolution به تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی پرداختند. آنها نتایج خود را با نتایج حاصل از PSO، HS و GA که توسط دیگر پژوهش‌گران به‌دست آمده بود، مقایسه کردند. نتایج نشان داد که جواب‌های حاصل از DE تفاوت چندانی با سایر الگوریتم‌های فراکاوشی ندارد و می‌تواند آن را به‌عنوان یک روش مناسب در تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام شناخت. عروجی و همکاران (۱۶) به روندیابی سیلاب با استفاده از برنامه ریزی ژنتیک Genetic Programming (GP) پرداختند. ایشان نتایج حاصل را با نتایج حاصل از معادله سنت ونانت مقایسه کردند و بیان نمودند GP

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.25.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.321]

به‌طور قابل توجهی بهتر از روش سنت ونانت عمل می‌کند.

کرهان و همکاران (۱۲)به تخمین پارامترهای روش ماسکینگام غیرخطی با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی ترکیبی Hybrid Harmony Search (HHS) پرداختند. ایشان نتایج کار خود را با نتایج حاصل از تحقیق دیگر محققان مقایسه کردند، در این مقایسه که ۱۲ روش مختلف وجود داشت، روش پیشنهادی توانست با دقت بهتری، پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام را برآورد نماید. بزرگ حداد و همکاران (۶) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جهش قورباغه (SFLA) Shuffled Frog Leaping Algorithm ترکیب شده با روش نلدر مید سیمپلکس (Nelder-Mead simplex) پارامترهای روش ماسکینگام غیرخطی را تخمین زدند. ایشان نتایج خود را با نتایج حاصل از GA مقایسه کردند که نتایج نشان دهند بهبود ۴/۴ درصدی روش پیشنهادی بود. اویانگ و همکاران (۴) با استفاده از الگوریتم ترکیب علف هرز (IWOA) Invasive Weed Optimization Algorithm به رونیابی سیلاب براساس مدل غیرخطی ماسکینگام پرداخت. ایشان نتایج خود را با روش نلدر مید سیمپلکس، PSO مقایسه کردند. نتایج نشان داد روش توسعه داده شد بهتر از سایر روش‌ها عمل نموده است.

محمدی قلعه‌نی و همکاران (۲) از الگوریتم نورد شبیه‌سازی شده Simulated Annealing (SA) برای بهینه‌سازی سه پارامتر مدل غیرخطی ماسکینگام استفاده نمودند. ایشان نتایج خود را با GA مقایسه کردند. نتایج حاکی از کارایی روش SA در بهینه‌سازی پارامترهای مورد نظر بود؛ به‌نحوی که دبی پیک واقعی سیلاب برابر ۱۱۸۲ و دبی پیک روندیابی شده برابر ۱۱۹۱ مترمکعب بر ثانیه به‌دست آمده است. قلعه‌نی و ابراهیمی (۱) با استفاده از روش جستجوی مستقیم Pattern Search (PS) به روندیابی یک سیلاب مربوط به رودخانه کارون پرداختند. آنها بیان کردند که مجموع مربعات خطا، مجموع قدرمطلق خطا و تفاوت بین دبی پیک مشاهداتی و محاسباتی به‌ترتیب ۴۲۰، ۷۸۴۲ و ۹/۷ مترمکعب است. عروجی و همکاران (۳) از SFLA در تخمین ضرایب مدل روندیابی غیرخطی ماسکینگام استفاده نمودند. آنها با مقایسه نتایج حاصل با GA بیان نمودند که SFLA مجموع مربعات و قدر مطلق انحرافات بین دبی روندیابی شده و مشاهداتی به‌ترتیب ۳/۶۷ و ۰/۲۷ درصد بهبود داده است.

با توجه به مطالعات انجام شده مشخص است که روش‌های فراکاوشی کارایی خوبی در زمینهٔ تخمین پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام از خود نشان داده‌اند. استفاده از روش‌های فراکاوشی گوناگون گواه براین است که بهبود هر چند جزئی در نتایج حاصل از روندیابی ماسکینگام می‌تواند در کاهش آسیب‌های ناشی از سیلاب، مهم و تأثیرگذار باشد؛ به‌همین علت در این تحقیق از الگوریتم رقابت استعماری (ICA) Imperialist Competitive Algorithm که از الگوریتم‌های فراکاوشی جدید است در بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

مدل ماسکینگام غیرخطی

مدل ماسکینگام به‌دلیل سادگی و نیاز به اطلاعات کم، مدلی پرکاربرد در روندیابی سیل است (۹، ۱۱)روش ماسکینگام از طریق معادله‌های (۱) و (۲) که به‌ترتیب معادلات پیوستگی و ذخیره موقت در بازهای از رودخانه هستند، هیدروگراف پایین‌دست را تخمین می‌زند.

$$\frac{ds}{dt} = O_t - I_t \qquad [۱]$$

$$S_t = K[XI_t + (۱-X)O_t] \qquad [۲]$$

در این روابط O_t: جریان خروجی در زمان t، I_t: جریان ورودی در زمان t، $\frac{ds}{dt}$: تغییرات ذخیره در بازه زمانی، K: ضریب زمان ذخیره، X: بیانگر تأثیر جریان ورودی و خروجی در میزان ذخیره و S_t: ذخیره در زمان t است. روابط فوق، یک رابطه خطی بین ذخیره و جریان ورودی و خروجی برقرار می‌کند؛ یون و پادمنابهان (۱۸) نشان دادند زمانی که رابطه بین $[XI_t + (۱-X)O_t]$ و S_t خطی نیست استفاده از روش

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.25.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.321]

غیرخطی جواب‌های قابل اطمینان‌تری را گزارش می‌کند. گیل (۱۱) مدل غیرخطی ماسکینگام را معرفی نمود، معادله (۳) این مدل را نشان می‌دهد:

$$S_t = K[XI_t + (1-X)O_t]^m \quad [3]$$

در این رابطه m پارامتری است که امکان برقراری رابطه غیرخطی ذخیره و جریان را فراهم می‌کند. به‌کمک معادله (۳) و (۱) می‌توان روابط (۴) و(۵) را استخراج نمود:

$$O_t = \left(\frac{1}{1-X}\right)\left(\frac{S_t}{K}\right)^{\frac{1}{m}} - \left(\frac{X}{1-X}\right)I_t \quad [4]$$

$$\frac{aS_t}{at} = -\left(\frac{1}{1-X}\right)\left(\frac{S_t}{K}\right)^{\frac{1}{m}} + \left(\frac{1}{1-X}\right)I_t \quad [5]$$

با در دست بودن S_t و aS_t، حجم ذخیره در زمان بعدی توسط رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$S_{t+1} = S_t + aS_t \quad [6]$$

جیم (۱۰)برای محاسبه هیدروگراف سیل با استفاده از روش ماسکینگام غیرخطی، گام‌های زیر را استفاده کرد:

گام اول: در نظر گرفتن مقدار اولیه برای سه پارامتر K، X و m.

گام دوم: محاسبه ذخیره با استفاده از معادله (۳) با فرض برابر بودن جریان ورودی و خروجی در ابتدای گام زمانی ($I_1 = O_1$)

گام سوم: محاسبه تغییرات ذخیره نسبت به زمان براساس رابطه(۵).

گام چهارم: محاسبه مقدار ذخیره در مرحله t +۱ براساس رابطه(۶).

گام پنجم: محاسبه مقدار جریان خروجی مرحله t+۱ براساس رابطه (۴).

گام ششم: تکرار مراحل ۲ تا ۵.

الگوریتم رقابت استعماری (ICA)

ICA توسط اسماعیل آتش‌پز گرگری و کارو لوکس (۵)معرفی شد. این الگوریتم مانند بسیاری از الگوریتم‌های فراکاوشی دیگر یک رویکرد جمعیت به جمعیت دارد. در شروع فرآیند ICA جمعیتی از جواب‌های اولیه (کشورها) ایجاد می‌شود (همانند کروموزوم در GA)، تعدادی از کشورها که قدرتمندتر هستند به‌عنوان استعمارگر و مابقی به‌عنوان مستعمره در نظر گرفته می‌شود. تعداد کشورهای استعمارگر توسط کاربر به‌عنوان یک پارامتر انتخاب می‌شود. این پارامتر بسته به‌نوع مسئله و جمعیت اولیه مقادیر مختلفی را به‌خود اختصاص می‌دهد. با مشخص شدن این کشورها می‌توان فرآیند بهینه‌سازی را آغاز نمود. برای هر مسئله بهینه‌سازی با N متغیر تصمیم (این متغیرها می‌توانند فرهنگ، زبان و ... باشند)، هر کشور به‌صورت آرایهٔ ۱×N به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Country = [var_1, var_2, ..., var_i .., var_N] \quad [7]$$

$$Cost = f(Country) \quad [8]$$

در این روابط var_i : متغیر تصمیم iام، Country: راه‌حل مسئله و Cost: مقدار تابع هدف است.

در گام بعد که به سیاست جذب معروف است استعمارگران مستعمرات را به‌سمت خود جذب می‌کنند (مستعمرات از فرهنگ، زبان و ... استعمارگر الگو می‌گیرند). در این مرحله مستعمرات با یک انحراف θ درجه‌ای به‌میزان x به‌سمت استعمارگران حرکت می‌کنند، این انحراف موجب جستجوی جامع‌تر فضای تصمیم می‌شود. شکل ۱ چگونگی این فرآیند را نشان می‌دهد. x و θ اعدادی تصادفی با توزیع یکنواخت هستند.

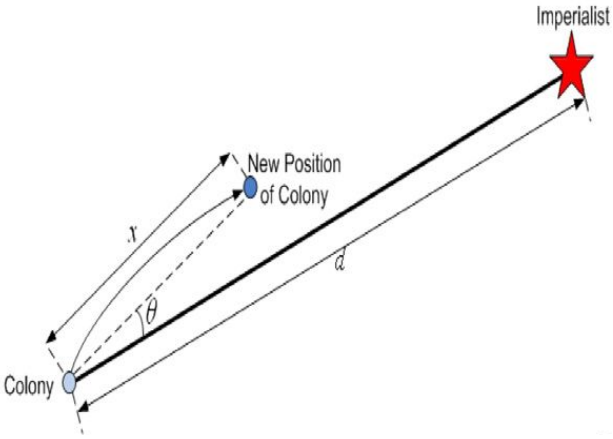
$$x \sim U(0, \beta \times d) \quad [9]$$

$$\theta \sim U(-\gamma, \gamma) \quad [10]$$

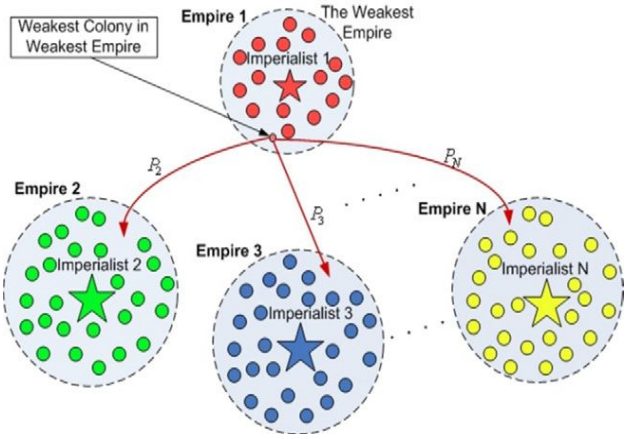
که β: عددی بزرگ‌تر از ۱ است که باعث می‌شود مستعمرات از دو طرف به‌سمت استعمارگرها نزدیک شوند، d : فاصله بین استعمارگر و مستعمره و γ: پارامتری است که میزان انحراف از مسیر اصلی را مشخص می‌کند.

در هر نسل (تکرار) برخی از کشورها که پیشرفت قابل توجهی نداشتند دچار انقلاب می‌شوند. عملگر انقلاب مانع از گیر افتادن الگوریتم در بهینه‌های موضعی می‌شود. توسط این عملگر در هر تکرار درصدی از جمعیت که مقدار تابع هدف

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.25.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.321]



شکل ۱. حرکت مستعمرات به‌سمت استعمارگر



شکل ۲. فرآیند جذب ضعیف‌ترین مستعمرهٔ ضعیف‌ترین امپراطوری توسط امپراطوری‌های دیگر

مناسبی ندارد با یک جواب تصادفی جایگزین می‌شود. ایجاد جواب‌های جدید باعث جستجو جامع‌تر فضای تصمیم می‌گردد. بعد از حرکت مستعمرات به‌سمت استعمارگران یا وقوع انقلاب، ممکن است یکی از مستعمرات شرایط بهتری از استعمارگر خود پیدا کند، در چنین شرایطی جای مستعمره با استعمارگرش عوض می‌شود.

مهم‌ترین مرحله در ICA مرحلهٔ رقابت استعماری است، که در این مرحله تمام استعمارگران سعی بر افزایش تعداد مستعمرات خود دارند. این فرآیند با از دست رفتن ضعیف‌ترین مستعمره از ضعیف‌ترین امپراطوری و پیوستن آن به امپراطوری‌های قوی‌تر انجام می‌شود. پیوستن مستعمرات به امپراطورهای قوی‌تر براساس یک احتمال مشخص انجام می‌گیرد. این احتمال متناسب با قدرت هر استعمارگر به‌علاوه درصد دلخواهی از میانگین قدرت مستعمرات آن می‌باشد.

$$T.C_n = Cost(imperiaalist_n) + \xi\ mean\{Cost(colonies of empire_n)\}$$

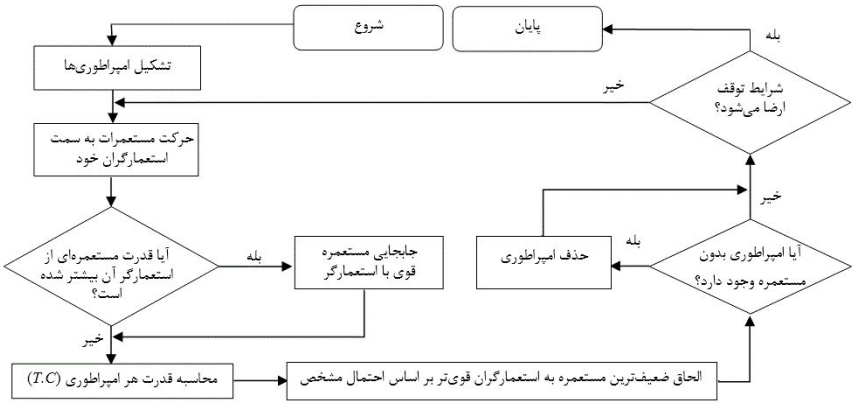
[۱۱]

در این رابطه، $Cost\ (imperiaalist_n)$: مقدار تابع هدف استعمارگر nام، $Cost(colonies\ of\ empire_n)$: مقدار تابع هدف مستعمرات استعمارگر nام، ξ: یک عدد مثبت دلخواه کوچک‌تر از یک، $T.C_n$: مقدار تابع هدف امپراطوری nام است. شکل ۲ فرآیند رقابت استعماری را نشان می‌دهد. در این شکل امپراطوری ۱ ضعیف‌ترین امپراطوری است و امپراطوری‌های ۲ تا N در حال رقابت برای جذب ضعیف‌ترین مستعمره آن هستند. با در اختیار داشتن احتمال جذب برای هر امپرطوری، می‌توان از عملگری مانند چرخ رولت برای انتخاب امپراطوری مقصد، استفاده نمود. این فرآیند تا جایی که یکی از معیارهای توقف ارضا گردد ادامه خواهد یافت. شکل ۳ فلوچارت رقابت استعماری را نشان می‌دهد.

الگوریتم ژنتیک (GA)

GA مشهورترین الگوریتم فراکاوشی است که توسط هلند (۱۹) معرفی گردید. جمعیت در GA به مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها اطلاق می‌شود. هر کروموزوم یک راه‌حل برای مسئله است. این کروموزوم‌ها به تعداد ابعاد مسئله دارای ژن هستند، طی فرآیند بهینه‌سازی این ژن‌ها توسط عملگرهای ژنتیکی ترکیب (Crossover) و جهش (Mutation) بهبود می‌یابند. از آن‌جا که هر کروموزوم یک راه‌حل است بنابراین می‌توان برای هر کروموزوم یک تابع هدف محاسبه نمود. پس از آن کروموزوم‌ها براساس شایستگی تابع هدف متناظر با آنها، برای انتقال به نسل بعد انتخاب می‌گردند. به‌منظور این انتخاب، از عملگرهایی چون چرخ رولت (Roulette wheel) و انتخاب رقابتی (Tournament Selection)که عملگرهای

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.25.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.321]



شکل ۳. روندنمای الگوریتم رقابت استعماری (ICA)

تکاملی هستند، استفاده می‌شود. در این رابطه نیازمند تعیین یک نرخ ترکیب (تزویج) و عملگر انتخاب هستیم که توسط کاربرد تعیین می‌شوند. نرخ ترکیب بیان کننده این است که چه کسری از جمعیت در تکرار بعدی الگوریتم از طریق ترکیب دو کروموزوم والد تولید شوند. عملگر انتخاب وظیفه انتخاب دو کروموزوم از جمعیت را دارد که به‌عنوان والد برای ترکیب شدن مورد استفاده قرار می‌گیرند. این انتخاب براساس احتمالی متناسب با تابع هدف هر کروموزوم صورت می‌گیرد. به‌نحوی که هرقدر تابع هدف متناظر با هر کروموزوم بهتر باشد، احتمال بیشتری برای انتخاب شدن برای نسل بعد وجود دارد. بعد از انتخاب دو کروموزوم، با استفاده از عملگر ترکیب تعدادی از ژن‌های دو کروموزوم انتخاب شده، با یکدیگر جابه‌جا می‌شوند. ژن‌های برخی کروموزوم‌ها نیز توسط عملگر جهش به‌صورت تصادفی تغییر می‌کنند. در تولید هر نسل جدید سه عملگر انتخاب، جهش و ترکیب، فرآیند بهینه‌سازی را به‌نحوی پیش می‌برند که کروموزوم‌های ایجاد شده، مقدار تابع هدف را در هر تکرار بهتر و بهتر کنند، تا جایی‌که فرآیند بهینه‌سازی توسط یکی از شرط‌های توقف، پایان یابد.

بهینه‌سازی مجموعه ذرات (PSO)

PSO رفتار جمعی ماهیان و پرندگان را شبیه‌سازی می‌کند. این الگوریتم توسط کندی و ابراهات (۲۰)معرفی گردیده است. در PSO هر ذره یک جواب برای مسئله است. هر ذره دارای یک بردار سرعت می‌باشد که این بردار تحت تأثیر دو عامل است: ۱) بهترین موقعیتی است که ذره تا به حال به آن رسیده است (Pbest) ۲) بهترین موقعیتی است که بهترین ذره به آن رسیده است (Gbest). برای یک مسئله N بعدی با P راه‌حل، سرعت حرکت ذره iام از رابطه (۱۲) محاسبه می‌گردد:[۱۲]

$$v_{id}^{n+1} = \chi(w.v_{id}^{n} + c_1 r_1^{n}(Pbest_{id}^{n} - x_{id}^{n}) + c_2 r_2^{n}(Gbest_{d}^{n} - x_{id}^{n}))$$

$$i=1,\ldots,P \text{ و } d=1,..,N$$

که در این رابطه، v : سرعت ذرات، n: شماره تکرار، χ: فاکتور انقباض که بزرگی سرعت را در هر مرحله کنترل می‌کند، w: وزن اینرسی، این پارامتر باعث می‌شود سرعت در هر تکرار به‌مقدار w برابر سرعت قبل باشد که یک w کوچک‌تر از یک باعث جستجوی جامع‌تر الگوریتم می‌شود زیرا در مسیر حرکت به سمت نقطه جدید با فاصله‌های کمتر حرکت می‌کند، c_1 و c_2: ضرایب شناختی و اجتماعی این ضرایب به‌ترتیب میزان حرکت به‌سمت Pbest و Gbest را کنترل می‌کنند و r_1 و r_2: اعدادی تصادفی با توزیع یکنواخت که وجود آنها باعث جستجوی جامع‌تر فضای تصمیم مسئله می‌شود. بنابراین موقعیت iاُمین ذره در جمعیت، در هر تکرار از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$x_{id}^{n+1} = x_{id}^{n} + v_{id}^{n+1} \qquad [۱۳]$$

$$i=1,\ldots,P \text{ و } d=1,..,N$$

بنا به تجربه اگر مقدار w در ابتدا بزرگ و در طی فرآیند بهینه‌سازی کاهش یابد نتایج بهتری را حاصل می‌کند بنابراین

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.25.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.321]

برای w از رابطه زیر استفاده گردید:

$$w_n = w_{max} - \frac{(w_{max} - w_{min}) \times n}{iter_{max}} \quad [۱۴]$$

که در آن: w_{max} میزان اولیه اینرسی، w_{min}: میزان نهایی اینرسی، $iter_{max}$: حداکثر تعداد تکرار الگوریتم است. پارامترهای PSO محدوده مشخصی ندارند ولی معمولاً مقدار w از ۲ تجاوز نمی‌کند و χ برابر ۱ همگرایی لازم را ایجاد می‌کند. همچنین در انتخاب دو ضریب c_1 و c_2 معمولاً رابطه $c_1 + c_2 \leq 4$ رعایت می‌شود.

مطالعه موردی

در این تحقیق سه مطالعه موردی در نظر گرفته شد. مطالعه موردی اول مربوط به سیل ویلسون است. این سیلاب یک مسئله آزمون برای بررسی توانایی روش‌های مختلف، در بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام است؛ بنابراین از این جهت معیار مناسبی برای بررسی قدرت ICA خواهد بود. دو سیلاب دیگر مربوط به رودخانه دوآب صمصامی از شاخه‌های اصلی کارون بزرگ واقع در استان چهارمحال و بختیاری است. اطلاعات این دو سیلاب مربوط به دو سیلاب رخ داده در این رودخانه در سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۸۹ است که در یک بازه ۳/۵ کیلومتری در گام‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای ثبت شده است. توابع هدف در نظر گرفته شده در این مطالعه در مورد سیل ویلسون مجموع مربعات انحرافات (SSQ) و در دو سیل دیگر علاوه‌بر SSQ، مجموع قدرمطلق انحرافات (SAD) است که به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\text{Min} \quad SSQ = \sum_{t=1}^{T} (O - \hat{O})^2 \quad [۱۵]$$

$$\text{Min} \quad SAD = \sum_{t=1}^{T} \left| O - \hat{O} \right| \quad [۱۶]$$

که در آن $\hat{O}$: دبی روندیابی شده توسط رابطه (۴) است. هم‌چنین بازه مناسب برای متغیرهای X، K و m در روش ماسکینگام غیرخطی به‌ترتیب (۰/۵، ۰/۰۱)، (۱، ۰/۰۱) و (۱،۳) می‌باشند کاراهان و همکاران(۱۲) .

نتایج

سیل ویلسون

این سیلاب به‌عنوان یک مبنا برای عملکرد الگوریتم‌های فراکاوشی توسط بسیاری از محققین مورد استفاده قرار گرفته است. در این مطالعه تنها ICA به‌منظور تخمین پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام برای این سیل اجرا گردید و برای GA و PSO از نتایج سایر مطالعات موهان (۸)، چو و چانگ (۱۵) (استفاده شد. در این مسئله جمعیت الگوریتم GA و PSO برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شد. در مورد تعداد تکرارهای الگوریتم GAعددی توسط موهان (۱۵) گزارش نشده است اما چو وچانگ (۸) تعداد تکرارهای الگوریتم PSO را برابر ۱۰۰ در نظر گرفتند. الگوریتم ICA برای این سیلاب با تعداد ۵۰ جمعیت و ۱۰۰ تکرار در نظر گرفته شد؛ بنابراین تعداد ارزیابی‌های تابع هدف توسط ICA نصف الگوریتم PSO بوده است. در روش ICA تعداد امپراطوری‌ها برابر ۵، نرخ انقلاب برابر ۵ درصد و پارامترهای β، γ و ξ به‌ترتیب ۱، ۰/۰۵ و ۰/۰۲ در نظر گرفته شدند.

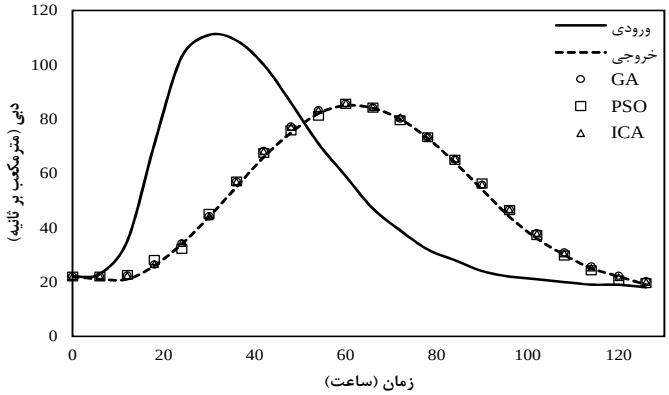
پس از تعیین پارامترهای مناسب الگوریتم ICA، پارامترهای K، X و m بهینه مدل غیرخطی ماسکینگام توسط این روش به‌ترتیب برابر ۰/۰۸۶۲، ۰/۲۸۶۹ و ۱/۸۶۸۱ به‌دست آمده است. جدول ۱ نتایج حاصل از ICA را در مقابل نتایج به‌دست آمده از GA و PSO نشان می‌دهد. با توجه به‌پارامترهای به‌دست آمده مقدار تابع هدف SSQ حاصل از ICA، برابر ۳۶/۷۷ و تابع هدف حاصل از GA و PSO به‌ترتیب برابر ۳۸/۲۳ و ۳۶/۸۹ می‌باشند، که نشان دهنده برتری ICA در دستیابی به‌جواب بهینه مسئله است. این نتایج نشان می‌دهد ICA، مقدار تابع هدف را نسبت به GA، ۳/۸ درصد و نسبت به PSO، ۰/۳۲ درصد بهبود داده است. علاوه‌بر این مقایسه نتایج حاصل از ICA با دیگر الگوریتم‌های فراکاوشی به‌کار گرفته شده برای حل این مثال، گواهی بر عملکرد مناسب ICA است؛ برای مثال مقدار SSQ حاصل از الگوریتم HS برابر ۳۶/۷۸ (۱۳)، الگوریتم DE برابر ۳۶/۷۷ (۱۷)، الگوریتم PS برابر ۶۲/۶۵ (۱) و الگوریتم SA برابر

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.25.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.321]

جدول ۱. پارامترهای بهینه مدل غیرخطی ماسکینگام برای سیل ویلسون

الگوریتم	m	X	K	SSQ
GA*	۱/۸۲۸۲	۰/۲۸۱۳	۰/۱۰۳۳	۳۸/۲۳
PSO**	۲/۱۴۵۸	۰/۳۳۳۰	۰/۱۰۲۴	۳۶/۸۹
ICA	۱/۸۶۸۱	۰/۲۸۶۹	۰/۰۸۶۲	۳۶/۷۷

* موهان (۱۵) ** چو و چانگ (۸)



شکل ۴. هیدروگراف ورودی، خروجی و روندیابی شده سیل ویلسون

۳۶/۷۸ (۲) به‌دست آمده است. شکل ۴ هیدروگراف سیل ویلسون را در کنار هیدوگراف‌های روندیابی شده و جدول ۲ مقادیر دبی مربوط به‌این سیلاب را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است، خط توپر هیدروگراف ورودی و خط چین هیدروگراف خروجی است که باید از طریق روندیابی محاسبه شود. با توجه به‌شکل هر سه الگوریتم تقریباً به‌خوبی روندیابی را انجام داده‌اند اما روش PSO در برخی نقاط کم‌تخمین و بیش‌تخمین دارد. جدول ۲ نیز مقادیر عددی شکل ۴ را دربر می‌گیرد در این جدول داده‌های سیل ولیسون به‌همراه نتایج روندیابی هیدروگراف خروجی ارائه شده توسط سایر محققین با روش GA و PSO در کنار نتایج حاصل از این تحقیق (ICA) ارائه شده است.

سیلاب‌های رودخانه دوآب صمصامی

در سیل ویلسون نتایج نشان داد ICA توانایی مناسبی در نزدیک شدن به جواب بهینه مطلق دارد. در این قسمت به‌بررسی کارایی ICA در بهینه‌سازی ضرایب رابطه ماسکینگام در دو پدیده واقعی سیلاب پرداخته شده است. در این‌جا علاوه‌بر تابع هدف SSQ، تابع SAD نیز مورد بررسی قرار گرفت. برای هر سه الگوریتم مورد بحث جمعیت برابر ۱۰۰ و تعداد تکرار برابر ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد؛ سایر پارامترهای سه الگوریتم در جدول‌های ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند. این پارامترها براساس آزمون و خطا برای هر الگوریتم به‌دست آمده‌اند. در الگوریتم ICA پارامتر β به عنوان پارامتر حساس شناخته شد. زیرا بیشترین تغییر در مقدار تابع هدف را با تغییر جزئی در مقدار این پارامتر مشاهده شد. در الگوریتم GA نرخ تزویج پارامتر حساس بود و بعد از آن مقدار جهش بیشترین تغییر را در مقدار تابع هدف اعمال می‌کرد. در الگوریتم PSO نیز مقادیر C_1 و C_2 حساس‌ترین پارامترهای الگوریتم بودند.

پس از تعیین پارامترهای بهینه هر الگوریتم برای هر دو

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.25.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.321]

جدول ۲. هیدروگراف سیل ویلسون و هیدروگراف‌های روندیابی شده توسط الگوریتم‌های مختلف

زمان (ساعت)	دبی ورودی (مترمکعب بر ثانیه)	دبی خروجی (مترمکعب بر ثانیه)	دبی روندیابی شده (مترمکعب بر ثانیه)		
			ICA	GA	PSO
۰	۲۲	۲۲	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰
۶	۲۳	۲۱	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰
۱۲	۳۵	۲۱	۲۲/۴۲	۲۲/۴۰	۲۲/۶۰
۱۸	۷۱	۲۶	۲۶/۶۱	۲۶/۴۰	۲۸/۱۰
۲۴	۱۰۳	۳۴	۳۴/۴۶	۳۴/۲۰	۳۲/۲۰
۳۰	۱۱۱	۴۴	۴۴/۱۷	۴۴/۲۰	۴۵/۰۰
۳۶	۱۰۹	۵۵	۵۶/۸۵	۵۷/۰۰	۵۷/۰۰
۴۲	۱۰۰	۶۶	۶۸/۰۶	۶۸/۲۰	۶۷/۵۰
۴۸	۸۶	۷۵	۷۷/۰۷	۷۷/۲۰	۷۵/۹۰
۵۴	۷۱	۸۲	۸۳/۳۲	۸۳/۳۰	۸۱/۲۰
۶۰	۵۹	۸۵	۸۵/۹۰	۸۵/۷۰	۸۵/۶۰
۶۶	۴۷	۸۴	۸۴/۵۴	۸۴/۲۰	۸۴/۲۰
۷۲	۳۹	۸۰	۸۰/۵۸	۸۰/۲۰	۷۹/۶۰
۷۸	۳۲	۷۳	۷۳/۷۱	۷۳/۳۰	۷۳/۳۰
۸۴	۲۸	۶۴	۶۵/۴۱	۶۵/۱۰	۶۵/۰۰
۹۰	۲۴	۵۴	۵۶/۰۰	۵۵/۸۰	۵۶/۲۰
۹۶	۲۲	۴۴	۴۶/۶۷	۴۶/۷۰	۴۶/۵۰
۱۰۲	۲۱	۳۶	۳۷/۷۵	۳۸/۰۰	۳۷/۳۰
۱۰۸	۲۰	۳۰	۳۰/۴۷	۳۰/۹۰	۲۹/۷۰
۱۱۴	۱۹	۲۵	۲۵/۲۳	۲۵/۷۰	۲۴/۳۰
۱۲۰	۱۹	۲۲	۲۱/۷۴	۲۲/۲۰	۲۰/۶۰
۱۲۶	۱۸	۱۹	۱۹/۹۹	۲۰/۳۰	۱۹/۶۰

جدول ۳. پارامترهای مناسب الگوریتم ICA

	پارامتر	تعداد امپراطوری‌ها	نرخ انقلاب	β	γ	ξ
ICA	مقدار	5	۰/۱	۱/۴	۰/۰۸	۰/۰۱

جدول ۴. پارامترهای مناسب الگوریتم GA

	پارامتر	نرخ تزویج	نرخ جهش	تابع جهش	تابع انتخاب
GA	مقدار	۰/۸	۰/۱	یکنواخت	چرخ رولت

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.25.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.321]

جدول ۵. پارامترهای مناسب الگوریتم PSO

	پارامتر	C_1	C_2	w_{min}	w_{max}	χ
PSO	مقدار	۱	۱	۰/۴	۱	۱

جدول ۶. خلاصه نتاج مربوط به مدل غیرخطی ماسکینگام برای سیلاب اول رودخانه دوآب صمصامی

	الگوریتم	m	X	K	مقدار تابع هدف
SSQ	GA	۱/۲۱۴۸	۰/۰۴۰۹	۰/۹۸۶۴	۳۵/۵۴۹۲
	PSO	۱/۲۰۸۶	۰/۰۱۸۱	۰/۹۹۹۹	۳۵/۶۱۲۴
	ICA	۱/۲۰۸۲	۰/۰۱۰۰	۱/۰۰۰۰	۳۵/۶۱۷۲
SAD	GA	۱/۰۰۰۹	۰/۰۳۰۲	۰/۵۶۴۰	۲۹/۸۲۲۵
	PSO	۱/۰۰۰۰	۰/۰۳۴۵	۰/۵۶۸۱	۲۹/۹۴۰۳
	ICA	۱/۰۰۰۰	۰/۰۳۴۵	۰/۵۶۷۱	۲۹/۸۰۲۸

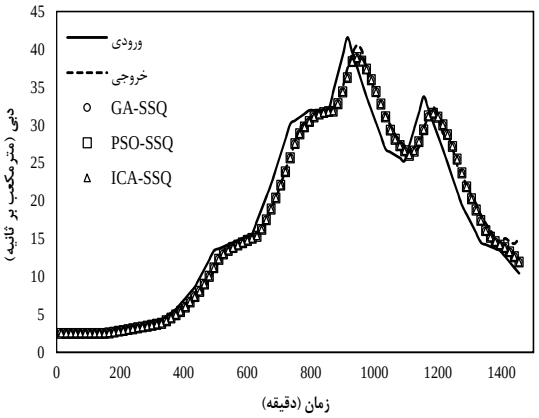
سیلاب در نظر گرفته شده، روندیابی صورت گرفت. از آنجا که ماهیت الگوریتم‌های فراکاوشی تصادفی است هر الگوریتم ۱۰ بار اجرا شد و بهترین عملکرد هر الگوریتم در این ۱۰ اجرا به‌عنوان معیار مقایسه در نظر گرفته شد. مقدار SSQ برای سیلاب اول در روش ICA برابر ۳۵/۶۱۷۲ و در روش GA و PSO به‌ترتیب برابر ۳۵/۵۴۹۲ و ۳۵/۶۱۲۴ به‌دست آمده است، بنابراین براساس این معیار GA با اندکی اختلاف بهتر از دو الگوریتم دیگر عمل کرده است. مقدار تابع هدف SAD مربوط به‌این سیل به‌ترتیب برای الگوریتم‌های ICA، GA و PSO برابر ۲۹/۸۰۲۸، ۲۹/۸۲۲۵ و ۲۹/۹۴۰۳ بوده است. براساس معیار SAD، ICA در رتبه نخست و GA و PSO در رتبه دوم و سوم قرار می‌گیرند.

جدول ۶ خلاصه نتایج حاصل از تخمین پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام توسط این سه الگوریتم را نشان می‌دهد. با توجه به‌جدول ۶ براساس تابع هدف SAD پارامتر m تقریبا برابر ۱ به‌دست آمده است؛ که نشان می‌دهد براساس این تابع هدف رابطه بین $[XI_t+(1 - X)O_t]$ و S_t خطی است؛ بنابراین استفاده از روش ماسکینگام خطی براساس این تابع، می‌تواند نتایج مشابه‌ای را گزارش نماید. شکل ۵ و۶ هیدروگراف‌های مشاهداتی و روندیابی شده را نشان می‌دهند.

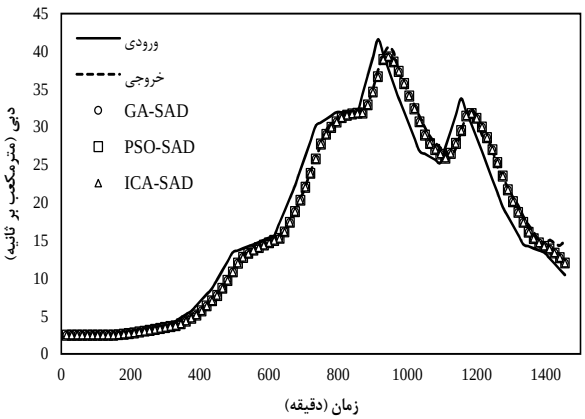
شکل ۵ هیدروگراف ورودی و خروجی مربوط به سیلاب اول را در کنار هیدروگراف روندیابی شده توسط سه روش براساس در نظر گرفتن تابع هدف SSQ نشان می‌دهد. در این شکل عملکرد مناسب الگوریتم‌های فراکاوشی مشاهده می‌شود به‌نحوی که تمام روش‌ها از نظر ظاهری مشابه هستند. شکل ۶ نیز تمام موارد گفته شده برای شکل ۵ را در نظر می‌گیرد با این تفاوت که نتایج براساس تابع هدف SAD به‌دست آمده است. نتایج مشابهی برای واقع سیلاب دوم نیز در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود. با توجه به شکل‌ها به‌نظر می‌رسد که عملکرد روش‌ها تفاوت معنی‌داری ندارند ولی اگر از نظر عددی برتری‌ها را بررسی نماییم، روش ICA (بر مبنای تابع هدف) بهتر از روش‌های دیگر بوده است. این برتری‌های هرچند جزئی در سیلاب‌های بزرگ اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند و در این شرایط حتی یک درصد بهبود عملکرد نتایج مثبت فراوانی به‌همراه دارد.

در مورد سیلاب دوم تابع هدف SSQ حاصل از ICA برابر ۲/۲۰۸۴ و برای GA و PSO به‌ترتیب برابر ۲/۴۲۶۴ و ۲/۲۳۰۷ به‌دست آمده است. در مورد این سیلاب و براساس SSQ الگوریتم ICA، ۹ درصد جواب حاصل از GA و ۱ درصد جواب حاصل از PSO را بهبود بخشیده است. مقدار تابع هدف

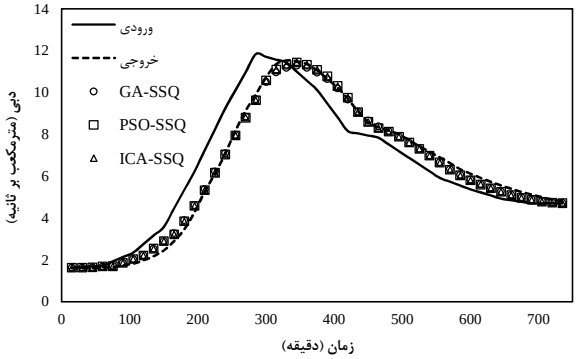
[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.25.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.321]



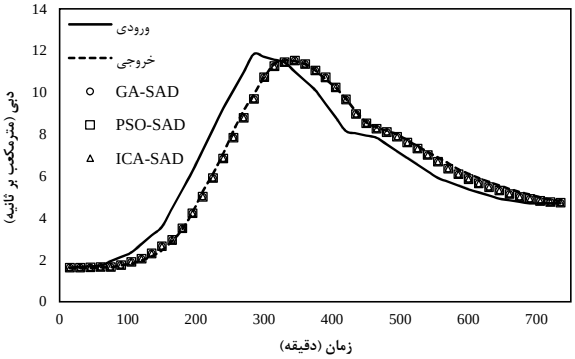
شکل ۵. هیدروگراف ورودی، خروجی و روندیابی شده سیلاب اول براساس SSQ



شکل ۶. هیدروگراف ورودی، خروجی و روندیابی شده سیلاب اول براساس SAD



شکل ۷. هیدروگراف ورودی، خروجی و روندیابی شده سیلاب دوم براساس SSQ



شکل ۸: هیدروگراف ورودی، خروجی و روندیابی شده سیلاب دوم بر اساس SAD

SAD بـرای روش ICA برابـر ۶/۳۴۵۵ و بـرای GA و PSO به‌ترتیب برابر ۶/۳۵۰۷ و ۶/۳۵۵۸ به‌دست آمده است. براین مبنا هر سه الگوریتم عملکرد تقریباً مشابهی داشته‌اند اما هرچند جزئی ICA بهتر از دو الگوریتم دیگر عمل کرده است. خلاصه نتایج مربوطه در جدول ۷ نشان داده شده است، در این سیلاب نیز بر مبنای تابع هدف SAD مقدار توان رابطه غیرخطی ماسکینگام برابر m=۱ به‌دست آمده است که عملاً مدل غیرخطی ماسکینگام را به مدل خطی تبدیل می‌کند. شکل ۷ و ۸ هیدروگراف‌های ورودی، خروجی و روندیابی شده مربوط به‌این سیلاب را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

استفاده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی به‌منظور یافتن پارامترهای مناسب مدل غیرخطی ماسکینگام یکی از مسائلی است که توجه پژوهشگران زیادی را به‌خود جلب کرده است.

در این راستا در تحقیق حاضر کارایی الگوریتم ICA در بهینه‌سازی سه پارامتر K، X و m که برای استفاده از روش ماسکینگام غیرخطی در روندیابی سیلاب لازم است پرداخته شد. به‌منظور در دست بودن مبنایی استاندارد برای مقایسه عملکرد ICA نسبت به سایر الگوریتم‌های فراکاوشی در ابتدا سیل ویلسون به‌عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شد. در این سیل که تابع هدف به‌صورت SSQ در نظر گرفته شد، ICA

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.25.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.321]

جدول ۷. خلاصه نتاج مربوط به مدل غیرخطی ماسکینگام برای سیلاب دوم رودخانه دوآب صمصامی

	الگوریتم	m	X	K	هدف تابع مقدار
SSQ	GA	۱/۳۰۳۱	۰/۰۱۰۲	۰/۹۹۹۸	۲/۴۲۶۴
	PSO	۱/۳۲۵۲	۰/۲۰۶۱	۰/۹۸۶۳	۲/۲۳۰۷
	ICA	۱/۳۲۰۴	۰/۲۰۶۶	۰/۹۹۹۹	۲/۲۰۸۴
SAD	GA	۱/۰۰۰۰	۰/۲۴۲۲	۰/۶۵۰۹	۶/۶۵۰۷
	PSO	۱/۰۰۰۰	۰/۲۳۸۹	۰/۶۴۹۰	۶/۳۵۵۸
	ICA	۱/۰۰۰۰	۰/۲۳۶۹	۰/۶۴۸۴	۶/۳۴۵۵

مقدار تابع هدف را نسبت به GA، ۳/۸ درصد و نسبت به PSO، ۰/۳۲ درصد بهبود بخشید.

پس از سیل ویلسون به بررسی دو مطالعه موردی واقعی که مربوط به دو واقعه سیلاب در رودخانه دوآب صمصامی بود پرداخته شد. در مورد سیلاب اول براساس تابع هدف SSQ، GA با مقدار تابع هدف ۳۵/۵۴۹۲ بهترین عملکرد را از خود نشان داد. در این مورد مقدار تابع هدف حاصل از ICA برابر ۳۵/۶۱۷۲ بوده و تابع هدف PSO، برابر ۳۵/۶۱۲۴ به‌دست آمده است. مقدار تابع هدف SAD مربوط به این سیل به‌ترتیب برای الگوریتم‌های ICA، GA و PSO برابر ۲۹/۸۰۲۸، ۲۹/۸۲۲۵ و ۲۹/۹۴۰۳ بوده است. براساس SAD، ICA بهترین عملکرد را داشته است. در مورد سیلاب دوم تابع هدف SSQ برای ICA، GA و PSO به‌ترتیب برابر ۲/۲۰۸۴، ۲/۴۲۶۴ و ۲/۲۳۰۷ به‌دست آمده است. در این سیلاب مقدار تابع هدف SAD حاصل از ICA برابر ۶/۳۴۵۵ و برای GA و PSO به‌ترتیب برابر ۶/۳۵۰۷ و ۶/۳۵۵۸ به‌دست آمده است. در این سیلاب براساس SSQ و SAD الگوریتم ICA بهترین عملکرد را داشته است. با توجه به‌نتایج حاصل مشخص شد که نه تنها الگوریتم ICA توانایی رقابت با الگوریتم فراکاوشی شناخته شده نظیر GA و PSO را دارد بلکه به‌عنوان یک روش کارا می‌تواند، جایگزین این روش‌ها گردد.

منابع مورد استفاده

۱. محمدی قلعه‌نی، م. و ک. ابراهیمی. ۱۳۹۱. ارزیابی الگوریتم‌های جستجوی مستقیم و ژنتیک در بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام- یک سیلاب از رودخانه کارون. مجله مدیریت آب و آبیاری ۲(۲): ۱۲-۱.

۲. محمدی قلعه‌نی، م.، ا. بزرگ‌حداد و ک. ابراهیمی. ۱۳۸۹. بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی نورد شبیه‌سازی شده. نشریه آب و خاک ۲۴(۵):۹۱۹-۹۰۸ .

۳. عروجی، ح.، ا. بزرگ‌حداد و ا. فلاح‌پور مهدی‌پور. ۱۳۹۲. الگوریتم بهینه‌سازی جهش قورباغه در تخمین ضرایب مدل روندیابی سیلاب. مجله پژوهش آب ایران ۷(۱۳):۱۷۴-۱۶۴ .

4. Ouyang, A., L. Liu and K. Li. 2014. GPU-based variation of parallel invasive weed optimization algorithm for 1000D functions. Natural Computation (ICNC). 10th International Conference.19-21 August. Xiamen.
5. Atashpaz-Gargari, E. and C. Lucas. 2007. Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. In Evolutionary Computation. IEEE Congress. 25-28 September, Singapour.
6. Bozorg-Haddad, O., F. Hamedi, E. Fallah-Mehdipour, H. Orouji and M. A. Mariño. 2015. Application of a Hybrid Optimization Method in Muskingum Parameter Estimation. J. Irrigation and Drainage Engineering. 140: 15-26.
7. Chen, J. and X. Yang. 2007. Optimal parameter estimation for Muskingum model based on Gray-encoded accelerating genetic algorithm. J. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation 12:849-858.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.25.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.321]

8. Chu, H. J. and L. C. Chang . 2009. Applying particle swarm optimization to parameter estimation of the nonlinear Muskingum model. J. Hydrologic Engineering 14: 1024-1027.
9. Das, A. 2004. Parameter estimation for Muskingum models. J. Irrigation and Drainage Engineering 130: 140-147.
10. Geem, Z. W. 2006. Parameter estimation for the nonlinear Muskingum model using the BFGS technique. J. Irrigation and Drainage Engineering 132: 474-478.
11. Gill, M. A. 1978. Flood routing by Muskingum method. J. Hydrology. 36:353-363.
12. Karahan, H., G. Gurarslan and Z. W. Geem. 2012. Parameter estimation of the nonlinear Muskingum flood-routing model using a hybrid harmony search algorithm. J. Hydrologic Engineering 18: 352-360.
13. Kim, J. H., Z. W. Geem and E. S. Kim. 2001. Parameter Estimation of the Nonlinear Muskingum Model using Harmony Search, J. The American Water Resources Association 37:1131-1138.
14. McCarthy, G. T. 1983. The unit hydrograph and flood routing. In Proceedings of the Conference of North Atlantic Division. 24-26 June. United States.
15. Mohan, S. 1997. Parameter Estimation of Nonlinear Muskingum Models using Genetic Algorithm. J. Hydraulic Engineering ASCE 123:137-142.
16. Orouji, H., O. B. Haddad, E. Fallah-Mehdipour and M. A. Mariño. 2012. Flood routing in branched river by genetic programming.
17. Xu, D. M., L. Qiu and S. Y. Chen. 2011. Estimation of nonlinear Muskingum model parameter using differential evolution. J. Hydrologic Engineering 17:348-353.
18. Yoon, J. and G. Padmanabhan. 1993. Parameter Estimation of Linear and Nonlinear Muskingum Models. J. Water Resources Planning and Management 119: 600-610.
19. Holland, J. H. 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.
20. Kennedy, J. and R. Eberhart. 1995. Particle Swarm Optimization. In Proceedings of IEEE international conference on neural networks. 27 November-1December. Perth.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.25.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.321]