

الگوریتم بهینه‌سازی جهش قورباغه در تخمین ضرایب مدل روندیابی سیلاب

حسین عروجی^۱، امید بزرگ حداد^{۲*} و الهه فلاح مهدی‌پور^۳

چکیده

مدل ماسکینگام از جمله روش‌های روندیابی هیدرولوژیک است که دقت در تخمین پارامترهای آن بر هیدروگراف روندیابی شده، به خصوص بر حداکثر مقدار سیلاب، تأثیرگذار است. الگوریتم‌های فراکوشی گزینه‌های مناسبی برای تعیین پارامترهای بهینه یا نزدیک به بهینه در مدل ماسکینگام هستند. در این مقاله، الگوریتم بهینه‌سازی جهش قورباغه در دو مورد مطالعاتی آزمایشی و واقعی به کار رفته و مجموع مربعات و قدر مطلق انحرافات دبی روندیابی شده مشاهداتی و محاسباتی به عنوان تابع هدف و میزان انحراف دبی اوج مشاهداتی و محاسباتی به عنوان پارامتر مهم دخیل در هیدروگراف روندیابی شده سیلاب در نظر گرفته شده است. نتایج حاکی از آن است که استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جهش قورباغه به ترتیب سبب کاهش ۰/۰۳ و ۰/۴۰ درصدی در مجموع مربعات و قدر مطلق انحرافات دبی روندیابی شده مشاهداتی و محاسباتی نسبت به بهترین مقادیر موجود در مورد مطالعاتی آزمایشی و ۳/۶۷ و ۰/۲۷ درصدی در مورد مطالعاتی واقعی شده است. همچنین الگوریتم بهینه‌سازی جهش قورباغه مقدار میزان انحراف دبی اوج مشاهداتی و محاسباتی محاسبه شده را به ترتیب در مورد مطالعاتی آزمایشی و واقعی به ترتیب ۳/۶۷ و ۱۷/۶۵ درصد نسبت به بهترین (کمترین) جواب گزارش شده بهبود داده است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم جهش قورباغه، بهینه‌سازی، روندیابی سیل، مدل ماسکینگام.

ارجاع: عروجی ح. بزرگ حداد ا. و فلاح مهدی‌پور ا. ۱۳۹۲. الگوریتم بهینه‌سازی جهش قورباغه در تخمین ضرایب مدل روندیابی سیلاب. مجله پژوهش آب ایران. ۷(۱۳):۱۶۷-۱۷۴.

۱- دانش‌آموخته مهندسی منابع آب پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران.
۲- دانشیار گروه آبیاری و آبادانی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران.
۳- دانشجوی دکتری منابع آب پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران.

* نویسنده مسئول: OBHaddad@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۷/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۰۳

مقدمه

پدیده طبیعی سیل می‌تواند اثرات زیان‌باری را در مناطق شهری، صنعتی و کشاورزی به وجود آورد. لذا برای ممانعت از اثرات مخرب سیل، شناختن ویژگی‌های سیل، به خصوص مقدار اوج سیل بسیار مهم است. پیش‌بینی چگونگی طغیان و فروکش کردن سیل در مقطع مشخصی از رودخانه با روندیابی انجام می‌شود. به طور کلی دو نوع روندیابی وجود دارد: ۱) روندیابی هیدرولیکی و ۲) روندیابی هیدرولوژیک. چنانچه محاسبات بر اساس معادلات پیچیده هیدرولیکی و قوانین جریان‌های غیرماندگار در کانال‌های روباز استوار باشد، روندیابی در حالت هیدرولیکی و در صورتی که معادله پیوستگی به همراه شکل ساده شده‌ای از معادله اندازه حرکت حل شود، روندیابی هیدرولوژیک نامیده می‌شود. مدل ماسکینگام یکی از روش‌های روندیابی هیدرولوژیک است که اولین بار توسط مک‌کارتی (۱۹۳۸) پیشنهاد شد. در این مدل از معادلات پیوستگی و معادلات بین مقادیر ورودی، خروجی و ذخیره سیل استفاده می‌شود. اما شکل غیرخطی مدل ماسکینگام برای اولین بار توسط گیل و همکاران (۱۹۷۸) ارائه شد. نکته مهم در حل این معادله، لزوم تخمین مناسب سه پارامتر موجود در معادله غیرخطی مذکور است که تأثیر زیادی در نتایج روندیابی داشته و محاسبه آن‌ها با روش‌های عددی و سعی و خطا، مشکل می‌باشد. در سال‌های اخیر برای تسهیل این محاسبات روش‌های مختلفی به خصوص الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکوشی برای حل مدل ماسکینگام و تخمین پارامترهای آن استفاده شده‌اند. شیوه‌های بهینه‌سازی مختلفی از جمله الگوریتم ژنتیک^۱ (GA) و الگوریتم‌های دیگر نظیر الگوریتم بهینه‌سازی مجموعه ذرات^۲ (PSO)، الگوریتم جستجوی هارمونی^۳ (HS) برای مشخص کردن این سه پارامتر به کار گرفته شده است.

اولین کاربرد یک الگوریتم فراکوشی در بهینه‌سازی پارامترهای مدل ماسکینگام توسط موهان (۱۹۹۷) گزارش شده است. نتایج پژوهش او نشان داد که تخمین به وسیله GA بهتر از سایر نتایج روش‌های به کار رفته مبتنی بر انواع شیوه‌های سعی و خطا بوده و نیازی به حدس جواب اولیه نزدیک به بهینه ندارد. کیم و همکاران (۲۰۰۱)، الگوریتم HS را در مسأله‌ای مشابه به کار بردند. نتایج به

دست آمده از HS تخمین بهتری از GA داشت. روش آن‌ها نه تنها در کمینه کردن مجموع مربعات انحرافات^۴ (SSQ) دبی روندیابی شده مشاهداتی و محاسباتی به عنوان تابع هدف موفق بود، بلکه سایر پارامترهای در نظر گرفته شده مانند مجموع قدر مطلق انحرافات^۵ (SAD) دبی روندیابی شده مشاهداتی و محاسباتی و میزان انحراف دبی اوج مشاهداتی و محاسباتی^۶ (DPO) نیز مقادیر بهتری نسبت به سایر روش‌های قبلی داشتند. در سال‌های اخیر، چو و همکاران (۲۰۰۹) الگوریتم PSO را برای تخمین این پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام که توسط سایر پژوهشگران (موهان (۱۹۹۷) و کیم و همکاران (۲۰۰۱)) با هدف کمینه کردن SSQ استفاده شده بود، به کار بردند. نتایج این روش نشان از برتری PSO نسبت به GA و اختلاف اندک نسبت به HS داشته است. محمدی قلعه‌نی و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از الگوریتم نورد شبیه‌سازی شده^۷ (SA) دقت محاسبه تابع هدف SSQ را با سایر انواع الگوریتم‌های مطرح شده تاکنون مقایسه نمودند و نتایج حاکی از بالاتر بودن دقت تخمین الگوریتم SA نسبت به تمام روش‌های گذشته به جز HS بود.

الگوریتم بهینه‌سازی جهش قورباغه^۸ (SFLA) یک الگوریتم بهینه‌سازی فراکوشی است که برای اولین بار توسط یوسف و لانس (۲۰۰۳) به عنوان یک ابزار بهینه‌سازی پیشنهاد شد. پس از آن کاربردهای گوناگون و متنوعی نظیر البلتاجی و همکاران در بهینه‌سازی مسایل ریاضی (۲۰۰۵)، نیکنام و فرسانی (۲۰۱۰) در بهینه‌سازی توزیع تغذیه‌کننده شبکه برق و القاضی و همکاران (۲۰۱۱) در بهینه‌سازی زمان بندی اقتصادی پروژه گزارش شده است. در حوضه منابع آب نیز یوسف و لانس (۲۰۰۳) در بهینه‌سازی طراحی شبکه توزیع آب شهری و لی و همکاران (۲۰۱۰) در بهره‌برداری سد با هدف کنترل سیلاب استفاده کردند.

با توجه به نتایج قابل قبول استفاده از الگوریتم‌های فراکوشی در تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام، لزوم افزایش دقت محاسبات روندیابی با استفاده از انتخاب پارامترهای مناسب، در این پژوهش سعی بر آن است که پارامترهای مدل ماسکینگام با استفاده از SFLA، به عنوان ابزاری مناسب جهت بهینه‌سازی که نتایج مناسبی را در

4- Sum of the Square of Deviations (SSD)

5- Sum of the Absolute value of the Deviations (SAD)

6- Deviations of Peak of Routed and Actual Flows (DPO)

7- Simulated Annealing (SA)

8- Shuffled Frog Leaping Algorithm (SFLA)

1- Genetic Algorithm (GA)

2- Particle Swarm Optimization (PSO)

3- Harmony Search (HS)

$$S_t = K[XI_t^m + (1-X)O_t^m] \quad (4)$$

در مدل غیرخطی ماسکینگام پارامتر m به عنوان توان به معادله اضافه شده است، که مدل را قادر می‌سازد تا معادله غیرخطی بین ذخیره تجمعی و جریان را بهتر مدل‌سازی کند. معادله ۳ نسبت به معادله ۴، به دلیل دقت بالاتر، بیشتر رایج است و توسط موهان (۱۹۹۷)، کیم و همکاران (۲۰۰۱) و چو و همکاران (۲۰۰۹) استفاده شده است، به کار رفته و نتایج آن با سایر روش‌های بهینه‌سازی مقایسه شده است. سپس کاربرد SFLA با استفاده از نرم‌افزار Matlab در استخراج پارامترهای بهینه مورد مطالعاتی واقعی بررسی شده است.

$$O_t = \left(\frac{I}{1-X} \right) \left(\frac{S_t}{K} \right)^{1/m} - \left(\frac{X}{1-X} \right) I_t \quad (5)$$

با ترکیب معادلات ۱ و ۵ معادله زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\Delta S_t}{\Delta t} = - \left(\frac{1}{1-X} \right) \left(\frac{S_t}{K} \right)^{1/m} + \left(\frac{1}{1-X} \right) I_t \quad (6)$$

که در آن $\frac{\Delta S_t}{\Delta t}$ تغییرات ذخیره نسبت به زمان می‌باشد. همچنین داریم:

$$S_{t+1} = S_t + \Delta S_t \quad (7)$$

که S_{t+1} = ذخیره در زمان $t+1$ است. جم (۲۰۰۶) برای محاسبه هیدروگراف سیل با استفاده از معادلات فوق، الگوریتم زیر را به کار برد:

مرحله ۱: در نظر گرفتن مقدار اولیه‌ای برای سه پارامتر K ، X و m .

مرحله ۲: محاسبه ذخیره (S_t) با استفاده از معادله ۳ با فرض مقدار جریان خروجی اولیه برابر با جریان ورودی ($O_1 = I_1$).

مرحله ۳: محاسبه نسبت تغییرات ذخیره نسبت به زمان با استفاده از معادله ۶.

مرحله ۴: محاسبه مقدار ذخیره در مرحله زمانی بعدی با استفاده از معادله ۷.

مرحله ۵: محاسبه حجم جریان خروجی در مرحله زمانی بعدی با استفاده از معادله ۵.

مرحله ۶: تکرار مراحل ۱ تا ۵.

در این پژوهش برای ارزیابی مقادیر بهینه پارامترهای K ، X و m در مدل ماسکینگام دو نوع تابع هدف مختلف مطابق معادلات ۸ و ۹ استفاده شده است:

$$Min. \quad SSQ = \sum_{t=1}^{NT} (O_t - \hat{O}_t)^2 \quad (8)$$

$$Min. \quad SAD = \sum_{t=1}^{NT} |O_t - \hat{O}_t| \quad (9)$$

یافتن جواب‌های بهینه ارایه کرده، محاسبه و استخراج شود. بدین منظور در ابتدا این الگوریتم بهینه‌سازی در یک مطالعه موردی که به عنوان مسأله آزمایشی در کلیه مطالعات قبلی (موهان (۱۹۹۷)، کیم و همکاران (۲۰۰۱)، چو و همکاران (۲۰۰۹) و محمدی قلعه‌نی و همکاران (۱۳۸۹)) استفاده شده است، به کار رفته و نتایج آن با سایر روش‌های بهینه‌سازی مقایسه شده است. سپس کاربرد SFLA با استفاده از نرم‌افزار Matlab در استخراج پارامترهای بهینه مورد مطالعاتی واقعی بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

روندیابی توسط مدل ماسکینگام غیرخطی

مدل ماسکینگام از جمله روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی است که اصول آن بر اصل پیوستگی جریان و معادله بین دبی و ذخیره موقت آب در طول مسیر استوار است. این مدل روش به نسبت ساده‌ای بوده و دقت کافی در مسایل آبی دارد. این مدل به دلیل سادگی از بین انواع روش‌های هیدرولوژیکی برای روندیابی سیل کاربرد وسیعی دارد. دو معادله پیوستگی و ذخیره غیرخطی به عنوان معادلات پایه‌ای به صورت معادلات ۱ و ۲ در مدل ماسکینگام به کار رفته‌اند:

$$\frac{ds}{dt} = I_t - O_t \quad (1)$$

$$S_t = K[XI_t + (1-X)O_t] \quad (2)$$

در این معادلات S_t ، I_t و O_t به ترتیب ذخیره، ورودی و خروجی در زمان t ، K ضریب زمان-ذخیره برای رودخانه است که یک مقدار منطقی نزدیک به زمان گذر جریان از کل مسیر رودخانه می‌باشد، X یک فاکتور وزنی که معمولاً برای مخازن ذخیره بین صفر و ۰/۵ و برای رودخانه‌ها بین صفر و ۰/۳ در نظر گرفته می‌شود. معمولاً چنانچه معادله ماسکینگام به صورت خطی در نظر گرفته شود، پارامترهای K و X در مدل با روش ترسیمی به کمک سعی و خطا محاسبه می‌شود. در حالی که این روش مشکل و تقریبی است، همچنین معادله بین S_t و $[XI_t + (1-X)O_t]$ همیشه خطی نیست. ویلسون (۱۹۷۴) و گیل (۱۹۷۸) در روندیابی سیلاب با استفاده از مدل غیرخطی ماسکینگام، معادلات را به ترتیب مطابق معادلات ۳ و ۴ به کار بردند:

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

سپس بدترین قورباغه (نه همه قورباغه‌ها) در هر تکرار به سمت جواب بهتر حرکت می‌کند. این تغییر با استفاده از معادلات ۱۰ و ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$D_i = rand(x_b - x_w) \quad (10)$$

$$x_{new} = D_i + x_w \quad (11)$$

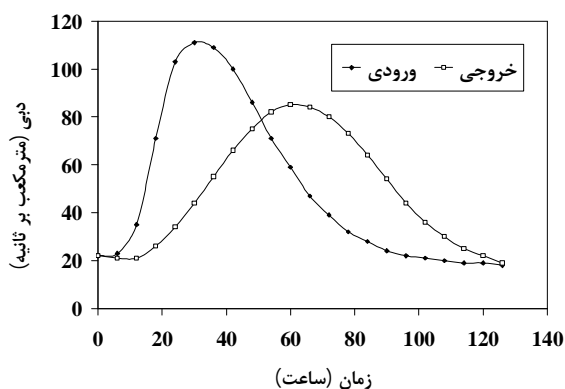
که در آن $rand$ عدد تصادفی بین صفر و یک و D_i میزان حرکت قورباغه i ام (بدترین قورباغه هر مجموعه) است. چنانچه با این تغییر بهبودی در میزان تابع هدف نسبت به حالت قبلی حاصل نگردد، دوباره محاسبات با استفاده از معادلات فوق انجام می‌گیرد، با این تفاوت که از x_g به جای x_b استفاده می‌شود. اگر دوباره بهبودی در میزان تابع هدف حاصل نشود، قورباغه جدیدی به طور تصادفی تولید شده و به جای بدترین حالت قرار می‌گیرد.

نتایج و بحث

در این پژوهش جهت بررسی کارایی SFLA در تخمین پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام دو مورد مطالعاتی در نظر گرفته شده است.

مطالعه موردی اول (آزمایشی)

مثال مطرح شده در این بخش برای اولین بار توسط ویلسون (۱۹۷۴) ارائه شده است. در این مثال معادله غیرخطی بین مقادیر S_t و $[XI_t + (1-X)O_t]$ برقرار می‌باشد. همچنین انواع روش‌های فراکوشی در این مثال، مورد آزمون شده است. لذا، امکان مقایسه نتایج آن را با سایر روش‌های بهینه‌سازی فراهم می‌کند. شکل ۱ نمایانگر مقدار جریان ورودی و خروجی مطالعه موردی اول است. همان طور که دیده می‌شود، بیشترین جریان ورودی و خروجی به ترتیب ۱۱۱ و ۸۵ مترمکعب بر ثانیه بوده است.



شکل ۱- هیدروگراف ورودی و خروجی مطالعه موردی اول

که در آن \hat{O}_t حجم خروجی روندیابی شده (محاسباتی) در زمان t و NT تعداد گام‌های زمانی روندیابی سیل است.

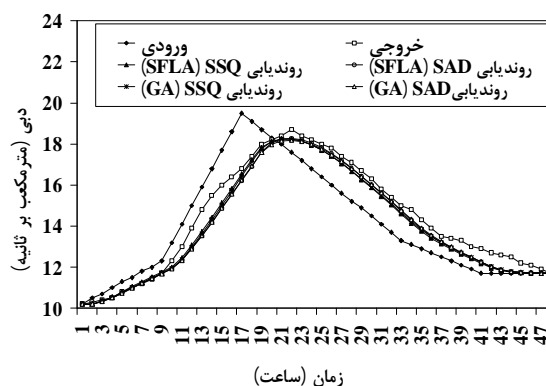
الگوریتم ترکیبی جهش قورباغه

الگوریتم‌های فراکوشی یک نام معمول برای روش‌هایی است که به طور عموم الهام گرفته از طبیعت هستند. در سال‌های اخیر الگوریتم‌های فراکوشی با پیشرفتی سریع در مسایل پیچیده و مشکل بهینه‌سازی، استفاده شده‌اند و الگوریتم‌های مختلف بسیاری برای ارتقاء عملکرد این الگوریتم‌ها نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی چه در رسیدن به معیارهای مورد نظر و چه در کاهش زمان اجرا، توسعه یافته‌اند.

SFLA برای اولین بار توسط یوسف و لانس (۲۰۰۳) برای طراحی بهینه سیستم توزیع آب مطرح شد. در SFLA، مجموعه‌ای از قورباغه‌ها (راه حل‌ها) وجود دارد که به مجموعه‌هایی تقسیم شده‌اند و هر کدام شامل قورباغه‌های متفاوتی هستند که به جستجوی محلی می‌پردازند. در هر مجموعه، هر قورباغه می‌تواند از سایر قورباغه‌ها تأثیر پذیرد. پس از تعداد تکرار مشخص این گام (تأثیرپذیری قورباغه‌ها از یکدیگر)، اطلاعات هر مجموعه نیز می‌تواند در یک فرآیند ترکیبی به اشتراک با سایر مجموعه‌ها گذاشته شود، جستجوی محلی و ترکیب آن‌ها تا برآورده شدن معیار مشخصی ادامه می‌یابد. در واقع در این الگوریتم جمعیتی از P قورباغه به صورت تصادفی با توزیع یکنواخت تولید می‌شود که برای یک مسأله D بعدی (D متغیر تصمیم)، موقعیت قورباغه i ام به صورت بردار $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i(D-1)}, x_{iD}]$ نمایش داده می‌شود. سپس تابع هدف متناظر با هر قورباغه مشخص می‌شود و قورباغه‌ها با توجه به آن به ترتیب صعودی در صورت کمینه‌سازی مسأله و نزولی در صورت بیشینه‌سازی مرتب می‌شوند. در ادامه جمعیت قورباغه‌ها به M مجموعه که هر کدام شامل n قورباغه هستند، تقسیم می‌شوند. در این فرآیند اولین قورباغه در مجموعه اول، دومین قورباغه در مجموعه دوم و قورباغه M ام در M امین مجموعه جای گرفته و قورباغه $M+1$ ام به مجموعه اول تعلق می‌گیرد. در هر مجموعه، بهترین و بدترین قورباغه‌ها به عنوان x_w و x_b می‌باشند و بهترین قورباغه کل جمعیت با x_g نمایش داده می‌شود.

مطالعه موردی دوم (واقعی)

دومین مثالی که جهت بررسی قابلیت کاربرد SFLA در مدل ماسکینگام ارایه شده است، مربوط به رودخانه قره‌چای می‌باشد. بر این اساس سیلی که در تاریخ ۱۳۸۳/۰۱/۱۷ به مدت ۴۸ ساعت در بازه‌های زمانی یک ساعته در این رودخانه ثبت شده‌اند، به عنوان هیدروگراف ورودی و خروجی در نظر گرفته شده و مقادیر پارامترهای مدل ماسکینگام برای آن‌ها استخراج شده است. شکل ۲ هیدروگراف ورودی و خروجی این سیلاب را نمایش می‌دهد.



شکل 2- هیدروگراف خروجی روندبایی شده (محاسباتی) با روش‌های مختلف

نتایج مطالعه موردی اول

مطالعه موردی اول، مسأله‌ای آزمایشی در روندبایی جریان با استفاده از مدل ماسکینگام است که به وسیله برخی الگوریتم‌های فراکاوشی حل شده و پارامترهای بهینه به دست آمده است. این مثال با ۱۰۰ کروموزوم، ۱۰۰ حافظه و ۱۰۰ ذره به ترتیب توسط GA، HS و PSO حل شده است. در حالی که تعداد تکرارها و در نتیجه آن تعداد دفعات ارزیابی تابع هدف متفاوت بوده است. اما نکته مهم در تمامی این مطالعات وجود روند همگرایی نزولی بوده است. بر این اساس، در مطالعه حاضر از ۱۰ قورباغه و ۵۰ تکرار برای بهینه کردن پارامترهای مدل ماسکینگام استفاده شد. با توجه به طبیعت جستجوی تصادفی الگوریتم‌های فراکاوشی، گزارش نتایج چندین بار اجرای برنامه و ارایه پارامترهای آماری آن در قضاوت در خصوص کارایی الگوریتم مورد استفاده مفید باشد. به این منظور، نتایج حاصل از SFLA با استفاده از توابع هدف SSQ و SAD برای ۱۰ بار اجرای برنامه در جدول ۱ گزارش شده‌است. همان طور که دیده می‌شود، ضریب تغییرات ۱۰ بار اجرای برنامه با در نظر گرفتن توابع هدف SSQ و SAD به ترتیب ۰/۰۰۱۵۱ و ۰/۰۰۱۴۳ است که مقادیر بسیار اندکی است. بنابراین با اطمینان قابل قبولی می‌توان حتی به نتایج یک بار اجرای برنامه نیز اعتماد کرد.

جدول 1- مقادیر توابع هدف SSQ و SAD و پارامترهای آماری آن حاصل از 10 بار اجرای برنامه

شماره اجرا	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
تابع هدف SSQ	۳۶/۷۶۷۸۹	۳۶/۷۷۱۹۳	۳۶/۸۷۰۱۱	۳۶/۹۳۴۵۴	۳۶/۷۸۰۲۳	۳۶/۷۹۶۵۹	۳۶/۷۷۰۹۸	۳۶/۷۷۵۳۳	۳۶/۷۷۳۴۱	۳۶/۷۸۱۲۸
تابع هدف SAD	۲۲/۸۷۰۳۰	۲۲/۸۸۱۸۱	۲۲/۹۷۷۵۴	۲۲/۹۳۴۶۸	۲۲/۸۸۴۵۴	۲۲/۸۹۴۰۰	۲۲/۸۹۱۶۸	۲۲/۹۱۶۳۲	۲۲/۸۸۸۸۵	۲۲/۹۳۲۹۹
پارامترهای آماری	کمینه	میانگین	بیشینه	انحراف معیار	ضریب تغییرات					
تابع هدف SSQ	۳۶/۷۶۷۸۹	۳۶/۸۰۲۲۴	۳۶/۹۳۴۵۴	۰/۰۵۵۴۷	۰/۰۰۱۵۱					
تابع هدف SAD	۲۲/۸۷۰۳۰	۲۲/۹۰۷۲۷	۲۲/۹۷۷۵۴	۰/۰۳۲۸۷	۰/۰۰۱۴۳					

برای مقایسه مناسب‌تر، بهترین مقادیر توابع هدف و DPO الگوریتم‌های مختلف مورد استفاده در مطالعه موردی اول در جدول ۲ گزارش شده است. بر اساس نتایج جدول ۲، کم‌ترین (بهترین) مقادیر توابع هدف توسط SFLA گزارش شده است. بر این اساس توابع هدف SSQ و SAD حاصل از SFLA به ترتیب ۰/۰۲۷ و ۰/۴۰۰ درصد کاهش نسبت به بهترین مقدار مشابه گزارش شده توسط سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی داشته‌اند. در حالی که DPO حاصل از SFLA با در نظر گرفتن تابع هدف SAD ۷۴ درصد بهبود (کاهش) نسبت به مقدار مشابه است.

جدول ۳ مقادیر هیدروگراف خروجی به دست آمده به روش‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود، DPO حاصل از SFLA با تابع هدف SAD، ۰/۱۳ حاصل شد که مقدار آن کم‌ترین مقدار گزارش شده تاکنون است. لازم به یادآوری است که DPO پارامتر بسیار مهمی

برای مقایسه مناسب‌تر، بهترین مقادیر توابع هدف و DPO الگوریتم‌های مختلف مورد استفاده در مطالعه موردی اول در جدول ۲ گزارش شده است. بر اساس نتایج جدول ۲، کم‌ترین (بهترین) مقادیر توابع هدف توسط SFLA گزارش شده است. بر این اساس توابع هدف SSQ و SAD حاصل از SFLA به ترتیب ۰/۰۲۷ و ۰/۴۰۰ درصد کاهش نسبت به بهترین مقدار مشابه گزارش شده توسط سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی

دیگر الگوریتم‌های گزارش شده به ترتیب تنها ۰/۰۳ و ۰/۴ می‌باشد، این بهبود، باعث کاهش به ترتیب ۲/۱۷ و ۷۴ درصدی DPO گردیده است که در روندیابی سیلاب بسیار مؤثر بوده، است.

در روندیابی سیل می‌باشد. به طوری که خسارات ناشی از سیل در بازه پایاب رودخانه به وسیله افزایش دقت تخمین DPO می‌تواند کاهش یابد. اگر چه بهبود نتایج توابع هدف SAD و SSQ حاصل از SFLA در مقایسه با

جدول 2- مقایسه نتایج SFLA و سایر الگوریتم‌های مورد استفاده در مورد مطالعاتی اول

تابع هدف	الگوریتم	K	X	m	تابع هدف	DPO
SSQ	GA	۰/۱۰۳۳	۰/۲۸۱۳	۱/۸۲۸۲	۳۸/۲۳	۰/۷۰
	HS	۰/۰۸۸۳	۰/۲۸۷۳	۱/۸۶۳۰	۳۶/۷۸	۰/۹۲
	PSO	۰/۱۸۲۴	۰/۳۳۳۰	۲/۱۴۵۸	۳۶/۸۹	۰/۶۰
	SA	۰/۵۱۸۳	۰/۲۸۷۳	۱/۸۶۸۰	۳۶/۷۸	۰/۹۰
	SFLA	۰/۰۸۶۴۵	۰/۲۸۶۹۲	۱/۸۶۸۰۹	۳۶/۷۷	۰/۹۰
SAD	HS	۰/۰۸۸۳	۰/۲۸۰۳	۱/۸۶۴۰	۲۲/۹۶	۰/۵۰
	SFLA	۰/۰۷۷۲	۰/۲۷۹۸	۱/۸۹۶۹	۲۲/۸۷	۰/۱۳

جدول 3- هیدروگراف خروجی روندیابی شده حاصل از بهینه‌سازی

SFLA SSQ	SFLA SAD	دبی خروجی روندیابی شده (m ³ /s)				دبی خروجی مشاهده شده (m ³ /s)	دبی ورودی (m ³ /s)	زمان (ساعت)
		SA	PSO	HS	GA			
۲۲	۲۲	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲	۲۲	۰
۲۲	۲۲	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۱	۲۳	۶
۲۲/۴	۲۲/۴	۲۲/۴۲	۲۲/۶۰	۲۲/۴۰	۲۲/۴۰	۲۱	۳۵	۱۲
۲۶/۶	۲۶/۶	۲۶/۶۱	۲۸/۱۰	۲۶/۶۰	۲۶/۳۰	۲۶	۷۱	۱۸
۳۴/۵	۳۴/۵	۳۴/۴۶	۳۲/۲۰	۳۴/۴۰	۳۴/۲۰	۳۴	۱۰۳	۲۴
۴۴/۲	۴۴	۴۴/۱۷	۴۵/۰۰	۴۴/۱۰	۴۴/۲۰	۴۴	۱۱۱	۳۰
۵۶/۹	۵۶/۴	۵۶/۸۶	۵۷/۰۰	۵۶/۸۰	۵۶/۹۰	۵۵	۱۰۹	۳۶
۶۸/۱	۶۷/۴	۶۸/۰۶	۶۷/۵۰	۶۸/۱۰	۶۸/۲۰	۶۶	۱۰۰	۴۲
۷۷/۱	۷۶/۲	۷۷/۰۷	۷۵/۹۰	۷۷/۱۰	۷۷/۱۰	۷۵	۸۶	۴۸
۸۳/۳	۸۲/۴	۸۳/۳۲	۸۱/۲۰	۸۳/۳۰	۸۳/۲۰	۸۲	۷۱	۵۴
۸۵/۹	۸۵/۱	۸۵/۹۰	۸۵/۹۰	۸۵/۷۰	۸۳/۲۰	۸۵	۵۹	۶۰
۸۴/۵	۸۴	۸۴/۵۴	۸۴/۵۰	۸۴/۲۰	۸۲/۸۰	۸۴	۴۷	۶۶
۸۰/۶	۸۰/۳	۸۰/۵۸	۸۰/۶۰	۸۰/۲۰	۸۰/۱۰	۸۰	۳۹	۷۲
۷۳/۷	۷۳/۸	۷۳/۷۱	۷۳/۷۰	۷۳/۳۰	۷۴/۵۰	۷۳	۳۲	۷۸
۶۵/۴	۶۵/۸	۶۵/۴۰	۶۵/۴۰	۶۵/۰۰	۶۷/۲۰	۶۴	۲۸	۸۴
۵۶	۵۶/۷	۵۵/۹۹	۵۶/۰۰	۵۵/۸۰	۵۸/۱۰	۵۴	۲۴	۹۰
۴۶/۷	۴۷/۵	۴۶/۶۷	۴۶/۷۰	۴۶/۷۰	۴۸/۱۰	۴۴	۲۲	۹۶
۳۷/۸	۳۸/۶	۳۷/۷۵	۳۷/۸۰	۳۸/۰۰	۳۷/۶۰	۳۶	۲۱	۱۰۲
۳۰/۵	۳۱/۲	۳۰/۴۷	۳۰/۹۰	۳۰/۹۰	۲۸/۲۰	۳۰	۲۰	۱۰۸
۲۵/۲	۲۵/۷	۲۵/۲۳	۲۵/۳۰	۲۵/۷۰	۲۱/۹۰	۲۵	۱۹	۱۱۴
۲۱/۷	۲۲	۲۱/۷۴	۲۱/۸۰	۲۲/۱۰	۱۹/۱۰	۲۲	۱۹	۱۲۰
۲۰	۲۰/۱	۱۹/۹۹	۲۲/۰۰	۲۰/۲۰	۱۹/۰۰	۱۹	۱۸	۱۲۶

بهینه کردن پارامترهای روندیابی مدل غیرخطی ماسکینگام، در یک مورد واقعی پرداخته شده است. برای مقایسه مناسب‌تر نتایج حاصل از SFLA، نتایج روندیابی با استفاده

نتایج مطالعه موردی دوم در پژوهش حاضر با توجه به نتایج قابل قبول از SFLA در مطالعه موردی اول، به بررسی کارایی این الگوریتم برای

از ۱۷/۶۵ درصد بهتر از مقادیر مشابه GA بوده است. همان طور که در جدول ۴ مشخص است، الگوریتم SFLA توانسته است تخمین بهتری در کلیه پارامترها از روندیابی در مورد سیل رخ داده نسبت به GA داشته باشد. در شکل ۲ هیدروگراف ورودی و خروجی مشاهده شده و روندیابی شده توسط دو الگوریتم GA و SFLA آورده شده است. همانطور که دیده می‌شود، از لحاظ مقدار و زمان دبی اوج روندیابی شده (محاسباتی)، SFLA تخمین نزدیکتری به مقدار مشاهداتی داشته است.

از GA نیز استخراج شده است. در این مورد نیز مانند مورد مطالعاتی اول تعداد دفعات ارزیابی تابع هدف برابر ۵۰۰ در نظر گرفته شده که در GA و SFLA به ترتیب ۱۰ کروموزوم و ۱۰ قورباغه با ۵۰ تکرار استفاده شده است. نتایج حاصل از مقادیر خطا در دو الگوریتم SFLA و GA با استفاده از توابع هدف SSQ و SAD در جدول ۴ گزارش شده است. بر اساس نتایج جدول ۴، توابع هدف SSQ و SAD حاصل از SFLA به ترتیب ۳/۶۷ و ۰/۲۷ درصد از GA کمتر بوده است. همچنین DPO به دست آمده از SFLA، ۴/۳۵ و

جدول 4- نتایج بهترین توابع هدف حاصل از GA و SFLA در مطالعه موردی دوم

تابع هدف	روش	K	X	m	تابع هدف	DPO
SSQ	GA	۰/۰۵	۰/۲۲	۲/۲۸	۱۱/۴۴	۰/۴۶
	SFLA	۰/۰۲	۰/۲۰	۲/۵۰	۱۱/۰۲	۰/۴۴
SAD	GA	۰/۰۳	۰/۲۴	۲/۴۳	۱۸/۶۸	۰/۵۱
	SFLA	۰/۰۳	۰/۳۰	۲/۴۴	۱۸/۶۳	۰/۴۲

نتیجه‌گیری

در نهایت این پژوهش قابلیت الگوریتم SFLA را در زمینه بهینه‌سازی پارامترهای مدل ماسکینگام نشان داد. از این رو استفاده از SFLA جهت در زمینه روندیابی جریان با مدل ماسکینگام توصیه می‌شود.

در سال‌های اخیر استفاده از انواع الگوریتم‌های فراکاوشی سبب کاهش خطا و سهولت محاسبات تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام به خصوص در مقایسه با روش‌های مبتنی بر سعی و خطا شده است. در این پژوهش با توجه به کاربرد الگوریتم‌های مختلف از جمله GA، HS، PSO و SA در استخراج پارامترهای مدل ماسکینگام به بررسی کارایی SFLA در این خصوص پرداخته شده است. بدین منظور ابتدا مثال آزمایشی که به عنوان مورد مطالعاتی توسط سایر پژوهشگران استفاده شده، حل شد. نتایج حاکی از بالاتر بودن دقت تخمین SFLA نسبت به تمام روش‌های گذشته بوده است. از آنجا که در روندیابی سیل تخمین دقیق دبی پیک از اهمیت خاصی برخوردار است، معیار DPO در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج به دست آمده با استفاده از توابع هدف SSQ و SAD، با کاربرد SFLA در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های گزارش شده ۰/۰۳ و ۰/۴ درصد بهبود یافت. در دومین مورد مطالعاتی که روندیابی یک سیل واقعی است، باز هم SFLA نتایج مناسب‌تری نسبت به GA ارائه کرده است. در این مورد توابع هدف SSQ و SAD به ترتیب ۳/۶۷ و ۰/۲۷ درصد کمتر از مقدار مشابه حاصل از GA بوده است.

منابع

۱. محمدی قلعه‌نی م. بزرگ‌حداد ا. و ابراهیمی ک. ۱۳۸۹. بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی نورد شبیه‌سازی شده. نشریه آب و خاک. ۲۴(۵):۹۰۸-۹۱۹.
2. Alghazi A. Selim S. Z. and Elazouni A. 2011. Performance of shuffled frog leaping algorithm in finance based scheduling. Journal of Computing in Civil Engineering DOI: 10.1061/(ASCE) CP. 1943-5487.0000157.
3. Chu H. J. and Chang L. C. 2009. Applying particle swarm optimization to parameter estimation of the nonlinear Muskingum model. Journal of Hydrologic Engineering (ASCE). 14(9):1024-1027.
4. Elbeltagi E. Hegazy T. and Grierson D. 2005. Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms. Advanced Engineering Informatics. 19(1):43-53.
5. Eusuff M. M. and Lansey K. E. 2003. Optimization of water distribution network

- flood control operation. *Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE)*. 136(2):217-226.
10. McCarthy G. T. 1938. The unit hydrograph and flood routing. In *Proceedings of the Conference of North Atlantic Division, U. S. Army Corps of Engineers, U. S. Engineering Office, Providence, Rhode Island*.
 11. Mohan S. 1997. Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using genetic algorithm. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*. 123(2):137-142.
 12. Niknam T. and Farsani E. A. 2010. A hybrid evolutionary algorithm for distribution feeder reconfiguration. *Science China Technological Sciences*. 53(4):950-959.
 13. Wilson E. M. 1974. *Engineering hydrology*. MacMillan Education Ltd., Hampshire, U. K. 288 p.
- design using the shuffled frog leaping algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE)*. 129(3):210-225.
 6. Geem Z. W. 2006. Parameter estimation for the nonlinear Muskingum model using the BFGS technique. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE)*. 5(1):474-478.
 7. Gill M. A. 1978. Flood routing by Muskingum method. *Journal of Hydrology*. 36(3-4):353-363.
 8. Kim J. H. Geem Z. W. and Kim E. S. 2001. Parameter estimation of the nonlinear Muskingum model using harmony search. *Journal of the American Water Resources Association*. 37(5):1131-1138.
 9. Li Y. Zhou J. Zhang Y. Qin H. and Liu L. 2010. Novel multiobjective shuffled frog leaping algorithm with application to reservoir