

ارزیابی عملکرد الگوریتم خفاش در بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام برای روندیابی سیلاب

محمد احترام^۱، حجت کرمی^{۲*}، سید فرهاد موسوی^۳، سعید فرزین^۴، سعید سرکمریان^۵

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۳. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۴. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۵. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه چمران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۱/۰۵؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۵/۱۴)

چکیده

در این پژوهش، الگوریتم خفاش به‌عنوان الگوریتمی مبتنی بر سرعت و مکان خفاش‌ها در بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام برای روندیابی سیلاب استفاده شده است. به‌منظور بررسی کارایی این الگوریتم، مطالعه موردی سیل ویلسون و همچنین یک سیل تاریخی از منطقه ليقوان به‌منظور روندیابی سیلاب و محاسبه پارامترهای مدل ماسکینگام انتخاب شد. مجموع مربعات انحرافات و مجموع قدر مطلق انحرافات بین دبی‌های روندیابی شده و مشاهداتی، به‌عنوان توابع هدف در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از روندیابی سیل ویلسون با استفاده از الگوریتم خفاش، مقادیر این توابع هدف به‌ترتیب برابر ۳۵/۱۴ و ۲۲/۷۶ مترمکعب بر ثانیه است. نتایج روندیابی سیل ليقوان با الگوریتم خفاش نیز نشان داد مجموع مربعات انحرافات، مجموع قدر مطلق انحرافات و تفاوت بین دبی‌های اوج مشاهداتی و روندیابی شده به‌ترتیب برابر ۷/۲۴، ۶/۲۳ و صفر مترمکعب بر ثانیه است. در تحقیق حاضر، عملکرد الگوریتم خفاش با الگوریتم‌های تکاملی نظیر الگوریتم ژنتیک، ازدحام ذرات و هارمونی مقایسه شد. نتایج بیان‌کننده برتری روش خفاش برای محاسبه دقیق پارامترهای مدل ماسکینگام و پیش‌بینی دقیق سیلاب است. بنابراین، از دستاوردهای تحقیق حاضر می‌توان به معرفی روش الگوریتم خفاش برای حل مسائل مرتبط با هیدرولوژی و مدیریت منابع آب اشاره داشت به‌گونه‌ای که در بسیاری از این مسائل با توابع هدف غیرخطی و قيود پیچیده مواجهیم که الگوریتم یادشده پاسخ‌های باکیفیت در کمترین زمان ممکن را دارد.

کلیدواژگان: الگوریتم خفاش، بهینه‌سازی، روندیابی سیل، سیلاب ویلسون، سیلاب ليقوان، مدل ماسکینگام.

مقدمه

روندیابی جریان در یک رودخانه برای پیش‌بینی تغییرات بزرگی، سرعت و شکل موج سیل به صورت تابعی از زمان در یک یا چند نقطه طول آبراهه، نهر یا آبگیر در نظر گرفته شده است. اگر جریان مربوط به آن سیلابی باشد، به آن روندیابی سیل گفته می‌شود [۱]. یکی از معضلات کشور در زمینه مطالعات روندیابی سیلاب، دسترسی نداشتن به آمار و اطلاعات کامل درباره رودخانه‌ها و تعداد ایستگاه‌های هیدرومتری است که استفاده از روش‌هایی که به آمار و اطلاعات دقیق نیاز دارند را با مشکل مواجه می‌سازد [۲]. دو روش عمده در زمینه مطالعات روندیابی سیلاب، روش‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیک هستند. اهمیت و لزوم استفاده از روش هیدرولیکی را می‌توان در بی‌نیازی این روش به آمار و داده‌های مقاطع خروجی بیان کرد [۳]. اگر مشخصات و اطلاعات هیدرولیکی به دقت تعیین شوند، نیازی به داده‌ها و مقاطع خروجی نخواهد بود و از طریق روندیابی هیدرولیکی در هر مقطعی، این داده‌ها قابل حصول است [۴]. روندیابی سیلاب با روش هیدرولوژیک تقریباً ساده است و دقت قابل قبولی دارد؛ ولی به داده‌های هیدروگراف ورودی و خروجی نیاز دارد. روندیابی در مخزن و رودخانه دو کاربرد مهم روندیابی هیدرولوژیک‌اند. در روندیابی مخزن، از روش‌هایی استفاده می‌شود که تغییرات دبی سیل ضمن عبور از یک مخزن و در روندیابی رودخانه، حرکت سیل ضمن عبور از رودخانه بررسی می‌شود [۵]. روندیابی هیدرولیکی بر اصول پیچیده هیدرولیکی و قوانین جریان‌های غیرماندگار در کانال باز استوار است. این روش به اطلاعات وسیع هیدرولیکی و محاسبات طولانی نیاز دارد.

در روش هیدرولوژیک از اصل پیوستگی جریان و رابطه بین دبی و ذخیره موقت آب طی مسیر استفاده می‌شود که روش به نسبت آسانی است و دقت کافی در کارهای آبی دارد [۶]. مدل ماسکینگام یکی از مدل‌های مبتنی بر روندیابی هیدرولوژیک است. این مدل از معادلات پیوستگی و روابط بین مقادیر ورودی و خروجی و ذخیره سیل استفاده می‌کند. پژوهشگران در سال‌های اخیر از روش‌های مختلف هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی و روندیابی سیلاب استفاده کرده‌اند. از پرکاربردترین مسائل مطرح شده در این زمینه، دستیابی به پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام است که پس از محاسبه پارامترها، مقادیر سیلاب روندیابی شده و با هیدروگراف

خروجی مشاهداتی مقایسه می‌شود. بنابراین، پیش‌بینی دبی یک سیلاب و زمان دقیق آن بر اساس محاسبه پارامترهای مدل ماسکینگام یکی از اهداف مهم در پژوهش‌های مختلف است. موهان در سال ۱۹۹۷ از الگوریتم ژنتیک برای محاسبه پارامترهای مدل ماسکینگام استفاده کرد. روش یادشده از روش‌های سعی و خطا و روش‌هایی نظیر رگرسیون خطی و شیب هم‌زمان بهتر است و نیازی به حدس جواب اولیه و نزدیک به جواب بهینه ندارد [۷]. شو و همکارانش (۲۰۱۱) از الگوریتم تکاملی تفاضلی برای بهینه‌سازی پارامترهای معادله ماسکینگام استفاده کردند که نتایج بیان‌کننده دقت زیاد روش یادشده نسبت به روش‌های ازدحام ذرات، هارمونی و ژنتیک بود [۸]. کیم و همکارانش (۲۰۰۱) از الگوریتم هارمونی برای محاسبه دقیق پارامترهای مدل ماسکینگام استفاده کردند که نتایج تخمین زده شده در زمینه دبی اوج محاسباتی و مشاهداتی منطبق با یکدیگر و همچنین دقت روش نسبت به الگوریتم ژنتیک، بیشتر بود [۹]. عروجی و همکارانش (۲۰۱۲) به روندیابی سیلاب با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک پرداختند و نتایج را با نتایج معادله سنت-نانت مقایسه کردند. نتایج بیان می‌کرد که روش یادشده به شکل قابل توجهی با استفاده از اصول مدل ماسکینگام، بهتر از روش سنت و نانت عمل می‌کند [۱۰]. اویانگ و همکارانش (۲۰۱۴) با استفاده از الگوریتم غلف هرز نسبت به بهینه‌سازی پارامترهای روش ماسکینگام و پیش‌بینی دقیق سیلاب اقدام کردند که نتایج نسبت به روش ازدحام ذرات، انطباق بیشتری با سیلاب مشاهداتی داشت [۱۱].

یکی از روش‌هایی که اخیراً در زمینه هوش مصنوعی مطرح شده است، روش خفاش است. الگوریتم خفاش در زمینه مدیریت منابع آب و بهینه‌سازی بهره‌برداری مخازن توسط پژوهشگران مختلف به کار گرفته شده است که نتایج این روش و سرعت محاسبات نسبت به روش الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات بهبود قابل توجهی داشته است [۱۲]. احمدیان‌فر و همکارانش از روش خفاش در کنار الگوریتم تکاملی تفاضلی برای بهینه‌سازی یک سیستم چندمخزنه شامل چندین نیروگاه مبتنی بر افزایش انرژی استفاده کردند که نتایج پژوهش آنها بیان‌کننده تولید انرژی و سود بیشتر با استفاده از روش خفاش بود [۱۳]. همچنین، آزمون روش روی توابع ریاضی محک نشان داد الگوریتم خفاش پتانسیل زیادی در حل مسائل پیچیده مهندسی دارد [۱۴].

صوت در هوا ۳۴۰ متر بر ثانیه است، طول موج مربوط به اصوات از رابطه ۱ به‌دست می‌آید:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1)$$

که λ طول موج صوت، v سرعت صوت در هوا و f فرکانس صوت است.

مقدار طول موج از ۲ تا ۱۴ میلی‌متر برای بازه فرکانس بین ۲۵ تا ۱۵۰ هزار هرتز تغییر می‌کند. بلندی صدای خفاش‌ها همچنین متغیر است و هنگام دستیابی به شکار مقدار آن بیشتر و هنگام بازگشت به آشیانه مقدار آن کمتر است [۱۳]. خفاش‌ها از توانایی بازگشت اصوات برای دستیابی به شکار استفاده می‌کنند و این توانایی برای خفاش‌ها به میزانی قوی است که قابلیت تشخیص موانع از شکار را دارند. خفاش‌ها به شکل تصادفی با سرعت v_l در موقعیت y_l با فرکانس ثابت f_{\min} و طول موج متغیر λ پرواز می‌کنند. خفاش‌ها قابلیت تنظیم طول موج، فرکانس، بلندی صدا و پالس اصوات خود را دارند. بلندی اصوات از A_0 تا A_{\min} متغیر است. در کل، فرکانس اصوات در بازه $[f_{\min}, f_{\max}]$ تغییر می‌کند. همچنین، نرخ پالس صدا (r) در فاصله صفر تا ۱ تغییر می‌کند. صفر به معنای نبود پالس و یک به معنای ماکزیمم نرخ پالس است. بعد از آنکه خفاش‌ها شکار خود را شناسایی کردند، که به‌بیانی همان تابع هدف است، باید نسبت به تولید جمعیت اولیه خفاش‌ها و همچنین تولید پارامترهای v_l ، v_l ، f_l و r_l اقدام کنند. معادلات ۲ تا ۴ چگونگی به‌روزرسانی موقعیت و سرعت خفاش‌ها را نشان می‌دهند [۱۳]:

$$f_l = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) \times \beta \quad (2)$$

$$v_l(t) = [y_l(t-1) - Y_*] \times f_l(t) \quad (3)$$

$$y_l(t) = y_l(t-1) + v_l(t) \quad (4)$$

که $y_l(t-1)$ موقعیت خفاش در زمان $t-1$ ، β بردار تصادفی در بازه صفر و یک و Y_* بهترین موقعیت فعلی خفاش در مقایسه با سایر خفاش‌هاست و (Y^*) مقدار بهترین تابع هدف است. با توجه به اینکه حاصل ضرب فرکانس در طول موج ثابت است، بنابراین برای تنظیم سرعت می‌توان از تغییر فرکانس یا طول موج استفاده کرد. در مرحله بعد، برای اعمال جست‌وجوی محلی از یک گام تصادفی استفاده می‌شود:

$$y(t) = y(t-1) + \varepsilon A(t) \quad (5)$$

مجموعه‌ای از پژوهش‌های انجام‌شده بیان می‌کند که الگوریتم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی تا حد زیادی توانسته‌اند به پیش‌بینی نسبتاً دقیق سیلاب مبادرت ورزند. جمع‌بندی مطالعات گذشته نشان می‌دهد الگوریتم‌های یادشده در پیش‌بینی دبی پیک و همچنین زمان محاسبات مشکلاتی داشته‌اند و گاه مقادیر دبی پیک سیلاب را با تفاوت زیاد نسبت به مقدار مشاهداتی پیش‌بینی کرده‌اند، بنابراین استفاده از الگوریتم خفاش که تا کنون رویکردی موفق در مسائل بهینه‌سازی داشته است، می‌تواند به‌عنوان راهکاری مناسب استفاده شود. آنچه نیاز به تحقیق حاضر را ضروری می‌سازد، استفاده از روشی است که مشکلات روش‌های قبل را نداشته باشد. به‌طور مثال، روش الگوریتم ژنتیک در برخی از مسائل در دام بهینه‌های محلی می‌افتد و یا روش ازدحام ذرات دچار همگرایی زودرس می‌شود [۱۵-۱۷]. برخی از روش‌ها عدم تعادل بین قابلیت پوشش^۱ و ارتفاع^۲ دارند که سبب می‌شود به‌دلیل جست‌وجوی بیش از اندازه، زمان حل طولانی شود و گاه جست‌وجو را در محدوده‌های کوچک از فضای حل انجام دهند [۱۷-۲۲]. بنابراین، در پژوهش حاضر برای نخستین‌بار از الگوریتم خفاش که پتانسیل خوبی در حل مسائل پیچیده مهندسی و بهینه‌سازی دارد، برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگ استفاده می‌شود. در ادامه این تحقیق، پس از توضیح مختصر الگوریتم خفاش، از دو مطالعه موردی (سیل ویلسون و همچنین سیل منطقه لیقون) برای آزمون روش خفاش استفاده خواهد شد.

مواد و روش‌ها

خفاش‌ها به‌عنوان تنها پستانداران بالدار، قابلیت تشخیص و تولید اصوات و نیز دریافت پژواک را دارند. جمعیت خفاش‌ها حدود ۲۰ درصد سایر پستانداران است. خفاش‌ها قابلیت پخش صدا هنگام پرواز و همچنین گیرنده‌هایی برای دریافت صوت بازگشتی از اشیا دارند. هر پالس صوتی خفاش بازه‌ای مشخص در زمینه فرکانس دارد، بازه‌ای که بین ۲۵ تا ۱۵۰ هزار هرتز قرار می‌گیرد [۱۳]. خفاش قابلیت تولید ۱۰ تا ۲۰ عدد از اصوات را در هر ثانیه دارد که هنگام دستیابی به شکار تعداد آن‌ها افزایش پیدا می‌کند [۱۳]. با توجه به اینکه سرعت

1. exploration
2. exploitation

مجموع مربعات انحرافات (SSQ^1) و مجموع قدر مطلق انحرافات (SAD^2) در نظر گرفته شده است:

$$MinSSQ = \sum_{t=1}^T (O - \hat{O})^2 \quad (10)$$

$$MinSAD = \sum_{t=1}^T |O - \hat{O}| \quad (11)$$

که O مقدار دبی مشاهداتی و \hat{O} مقدار دبی روندیابی شده است.

در شکل ۱، فلوجارت مراحل انجام این تحقیق نشان داده شده است.

نتایج و بحث

در این تحقیق، سیلاب ویلسون به عنوان یک مطالعه موردی بررسی شده است که قبلاً نیز توسط پژوهشگران مختلف با استفاده از روش‌های متنوع هوش مصنوعی مطالعه شده است. همچنین، نتایج الگوریتم خفاش با روش‌های الگوریتم ژنتیک [۵]، الگوریتم ازدحام ذرات [۳]، الگوریتم هارمونی [۱۶] و روش حداقل مربعات [۱۶] نیز مقایسه شد. جدول ۱ بهترین پارامترهای استفاده شده در این مطالعه موردی را در زمینه الگوریتم خفاش پس از آنالیز حساسیت نشان می‌دهد. به منظور آنالیز حساسیت، مقدار هر پارامتر در بازه‌ای که در روش خفاش تعریف شد، در نظر گرفته می‌شود و سپس تغییرات توابع هدف به‌زای هر بار تغییر پارامترها مشخص می‌شود. بهترین مقدار یک پارامتر زمانی به دست می‌آید که توابع هدف کمترین مقدار خود را داشته باشند. به‌طور مثال، بر اساس مراجع [۱۴] و [۱۵] با توجه به آنکه بازه پیشنهادی برای پارامترهای تصادفی موجود است، مقدار متوسط این پارامترها به عنوان حدس اولیه قرار داده می‌شود و سپس اندازه جمعیت تغییر داده می‌شود تا بهترین مقدار تابع هدف و بهترین اندازه جمعیت مشخص شود. سپس در مرحله بعد مقدار جمعیت ثابت نگه داشته می‌شود و بهترین مقدار مربوط به هر پارامتر تصادفی مشخص می‌شود.

جدول ۲ بیان‌کننده نتایج روش خفاش در زمینه توابع هدف و همچنین مقایسه با نتایج سایر روش‌ها است توابع هدف مطالعاتی در ارتباط روندیابی سیلاب و مقادیر مشاهداتی هستند که میزان خطای مقادیر محاسباتی را نسبت به مقادیر مشاهداتی اندازه می‌گیرند. به‌وضوح مشخص

که ε عددی تصادفی در بازه -1 و 1 و $A(t)$ متوسط بلندی صوت خفاش در زمان t است. بلندی صوت $A(t)$ و نرخ پالس $r(t)$ در هر مرحله از تکرار به‌روزرسانی می‌شوند. مقدار نرخ پالس بر اساس رابطه ۶ به‌روزرسانی می‌شود:

$$r_t^{t+1} = r_t [1 - \exp(-\gamma t)] A_t^{t+1} = \alpha A_t^t \quad (6)$$

که α و γ ضرایب ثابت معادله‌اند. با در نظر گرفتن مقدار t به سمت بی‌نهایت، چنانچه مقدار α بین صفر و یک و همچنین γ بزرگ‌تر از صفر باشد، آن‌گاه A_t^t به سمت صفر و r_t^t به سمت r_t^0 میل می‌کند. در ادامه، برای طی کردن مراحل الگوریتم روندیابی رابطه غیرخطی ماسکینگام، مراحل زیر در نظر گرفته می‌شود [۵]:

۱. در نظر گرفتن مقدار اولیه برای سه پارامتر K و X و

m

۲. محاسبه مقدار ذخیره (S_t) بر اساس رابطه غیرخطی مدل ماسکینگام، که در معادله ۷ ارائه شده است [۸]:

$$S_t = K [X I_t + (1 - X) O_t]^m \quad (7)$$

که S مقدار ذخیره، I_t مقدار ورودی، O_t مقدار خروجی، X فاکتور وزنی که معمولاً برای مخازن بین صفر تا 0.5 و برای رودخانه‌ها بین صفر تا 0.3 در نظر گرفته می‌شود. همچنین K ضریب زمان - ذخیره برای رودخانه بوده و مقدار آن در حدود زمان گذر جریان از بازه مد نظر در مسیر رودخانه است. پارامتر m به‌عنوان توان به معادله غیرخطی اضافه می‌شود و مدل را قادر می‌سازد تا رابطه غیرخطی و دقیق‌تری بین ذخیره تجمعی و جریان ارائه کند.

۳. محاسبه تغییرات ذخیره نسبت به زمان بر اساس معادله ۸:

$$\frac{\Delta S_t}{\Delta t} = - \left(\frac{1}{1 - X} \right) \left(\frac{S_t}{K} \right)^{\frac{1}{m}} - \left(\frac{1}{1 - X} \right) I_t \quad (8)$$

۴. محاسبه حجم جریان خروجی در مرحله زمان بعدی با استفاده از رابطه ۹:

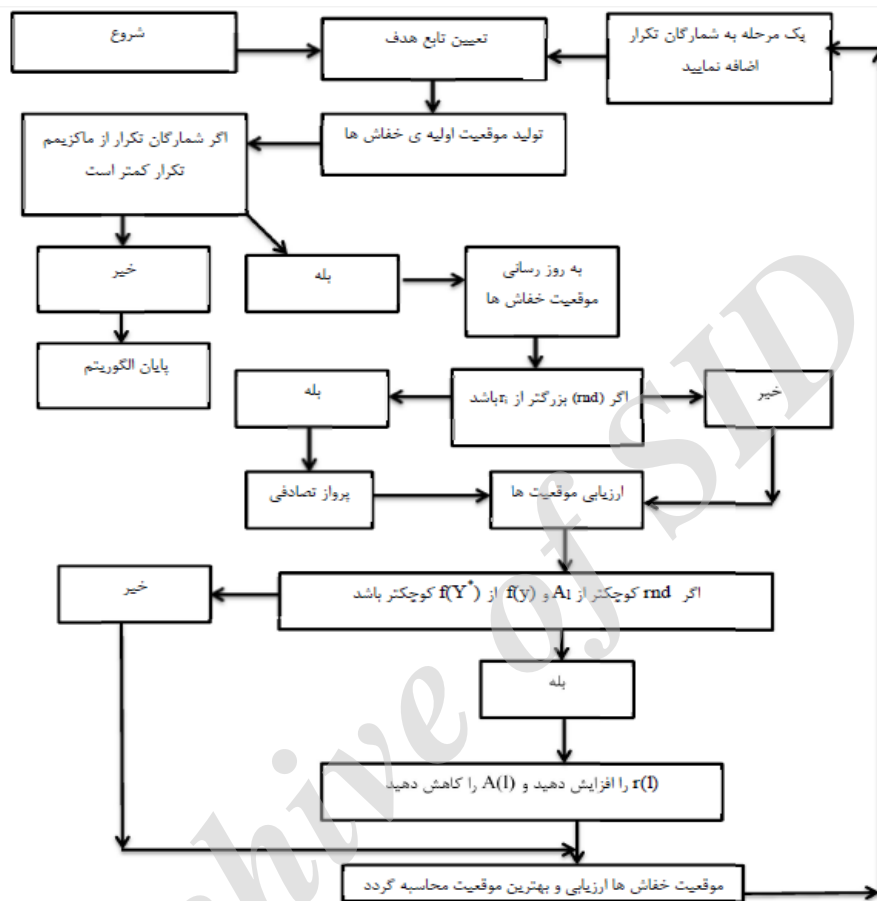
$$O_{t+1} = \left(\frac{1}{1 - X} \right) \left(\frac{S_{t+1}}{K} \right)^{\frac{1}{m}} - \left(\frac{X}{1 - X} \right) \bar{I}_{t+1} \quad (9)$$

در این معادله، \bar{I}_{t+1} میانگین ورودی‌هاست. برای مطالعه حاضر، با توجه به آنکه نیاز به مقایسه روش خفاش با سایر آثار پژوهشی است، دو تابع هدف

1. Sum of the Squares of the Deviation
2. sum of the absolute deviations

ارائه شده‌اند. مقادیر مجموع مربعات انحرافات و قدر مطلق انحرافات در روش خفاش برابر ۳۵/۱۴ و ۲۲/۷۶ است که نسبت به سایر روش‌ها کمترند.

است که روش خفاش مقادیر توابع هدف کوچک‌تری دارد که مطلوب مسئله است. همچنین در جدول ۲، دو پارامتر DPO و DPOT به‌عنوان تفاوت دبی اوج مشاهداتی و محاسباتی و همچنین تفاوت گام زمانی دبی اوج مشاهداتی و محاسباتی



شکل ۱. مراحل عملکرد الگوریتم خفاش در فرایند بهینه‌سازی

جدول ۱. مقادیر پارامترهای الگوریتم خفاش در زمینه سیل ویلسون

اندازه جمعیت	مینیمم بلندی صدا (دسی‌بل)	ماکزیمم بلندی صدا (دسی‌بل)	مینیمم فرکانس (هرتز)	ماکزیمم فرکانس (هرتز)
۵۰	۰/۱	۰/۹	۰	۵

جدول ۲. مقایسه روش‌های مختلف در زمینه بهینه‌سازی سیل ویلسون

پارامترها	روش حداقل مربعات	الگوریتم ژنتیک	الگوریتم هارمونی	الگوریتم ازدحام ذرات	الگوریتم خفاش
SSQ	۱۴۳/۶	۳۸/۳۳	۷۸/۳۶	۳۶/۸۹	۳۵/۱۴
SAD	۴/۴۶	۲۳/۰۰	۲۳/۴	۲۴/۱	۲۲/۷۶
DPO	۱/۸	۱/۷۰۰	۰/۹۲	۱/۶۰	۰/۰۰
DPOT	۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
K	۰/۰۱	۰/۱۰۳۳	۰/۰۸۸۳	۰/۱۸۲۴	۰/۱۰۷۸
X	۰/۲۵	۰/۳۸۲۳	۰/۲۸۷۳	۰/۳۳۳	۰/۳۷۴۵
m	۲/۳۴۷	۱/۸۲۸۲	۱/۸۶۳۰	۲/۱۴۵۸	۱/۸۱۳

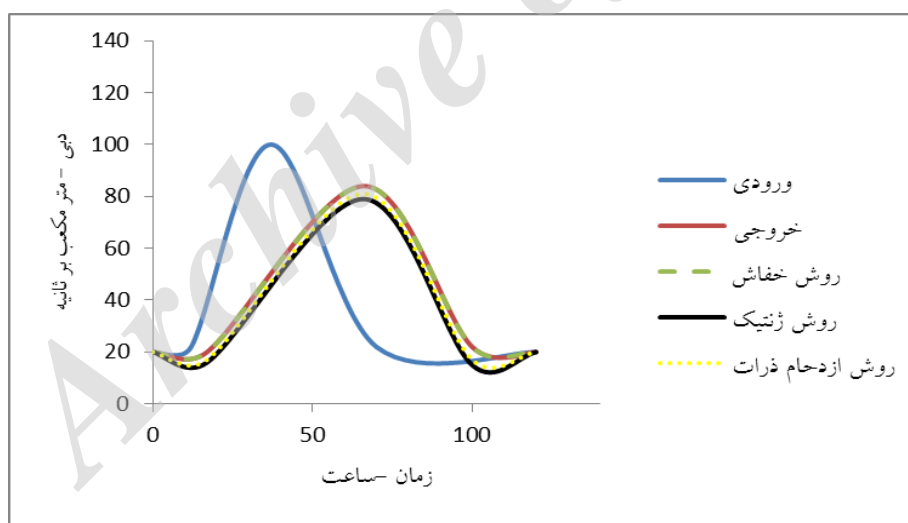
مطلق انحرافات است. با توجه به این جدول، می‌توان مشاهده کرد که مقادیر انحراف معیار و ضریب تغییرات محاسبه شده با در نظر گرفتن دو تابع هدف مقادیر اندکی است. با این حساب می‌توان به نتایج یک بار اجرای برنامه نیز اعتماد کرد که این امر در کاهش هزینه محاسبات نیز مؤثر است.

جدول ۴ نتایج روش خفاش را در مقایسه با روش‌های الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات که در مرجع [۱۷] ذکر شده‌اند، نشان می‌دهد. نتایج بیان‌کننده کاهش مقادیر مجموع مربعات انحرافات و مجموع قدر مطلق انحرافات در روش خفاش به مقدار $7/1$ و 32 درصد نسبت به روش ازدحام ذرات و 18 و 37 درصد نسبت به روش الگوریتم ژنتیک است که بیان‌کننده عملکرد مناسب روش خفاش است. اختلاف مقدار دبی اوج مشاهداتی و دبی اوج محاسباتی صفر و نیز تفاوت در گام زمانی صفر است. شکل ۳ مقایسه نتایج روش خفاش را در زمینه هیدروگراف تاریخی نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، نتایج از انطباق زیاد روش خفاش نسبت به داده‌های مشاهداتی اطلاع می‌دهد.

همچنین، مقدار DPO به‌عنوان تفاوت دبی اوج مشاهداتی و محاسباتی با روش خفاش صفر است. علاوه بر آن، مقدار DPOT به‌عنوان تفاوت گام زمانی دبی اوج مشاهداتی و محاسباتی برای روش خفاش نیز صفر است. از آنجا که برآورد مقادیر دبی اوج هیدروگراف خروجی به‌علت ایجاد خسارت مهم‌تر است، الگوریتم خفاش توانسته است به‌خوبی از عهده این امر برآید.

در شکل ۲ انطباق قابل توجه الگوریتم خفاش با مقادیر دبی خروجی مشاهداتی دیده می‌شود که بیان‌کننده پتانسیل زیاد الگوریتم پیشنهادی در شبیه‌سازی و روندیابی سیلاب است. همچنین مقدار دبی پیک در زمان ۶۶ ساعت و با مقدار 84 متر مکعب بر ثانیه رخ می‌دهد که منطبق با مقدار هیدروگراف مشاهداتی است.

در دومین مطالعه موردی، قسمتی از رودخانه مه‌ران رود، حد فاصل ایستگاه‌های ليقوان و هروی، استفاده شده است. یک سیلاب تاریخی ($1382/1/18$) برای آزمون روش خفاش انتخاب شد. نتایج جدول ۳ بیان‌کننده ۱۰ اجرای مختلف در زمینه مجموع مربعات انحرافات و قدر



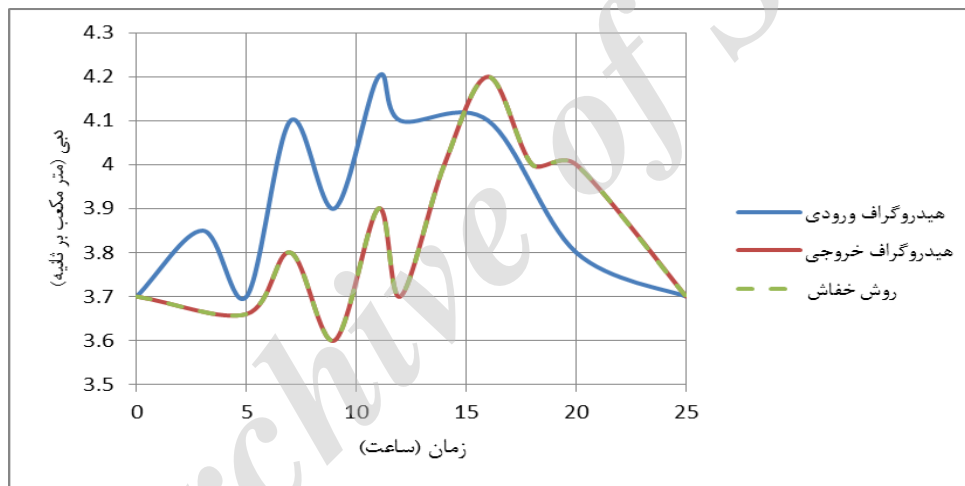
شکل ۲. مقایسه مقادیر مشاهده شده و مدل شده هیدروگراف سیل ویلسون

جدول ۳. نمایش اجراهای مختلف توابع هدف در زمینه سیل ليقوان

شماره اجرا	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
SSQ	۷/۴۵	۷/۴۴	۷/۴۴	۷/۴۴	۷/۴۴	۷/۴۴	۷/۴۴	۷/۴۴	۷/۴۴	۷/۴۴	۷/۴۴	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۰۴
SAD	۶/۲۴	۶/۲۳	۶/۲۳	۶/۲۴	۶/۲۳	۶/۲۴	۶/۲۴	۶/۲۴	۶/۲۴	۶/۲۴	۶/۲۴	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۰۸

جدول ۴. مقایسه توابع هدف مربوط به سیل ليقوان برای روش‌های مختلف هوش مصنوعی

پارامترها	الگوریتم ژنتیک	الگوریتم ازدحام ذرات	الگوریتم خفاش
SSQ	۹/۱۲	۸/۰۱	۷/۴۴
SAD	۹/۹۵	۹/۲۴	۶/۲۴
DPO	۱/۱۲	.	.
DPOT	.	.	.
K	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۲	۰/۳۶۸۹۰۰
X	۰/۱۰۱۷	۰/۹۸۱۰	۰/۲۷۴۴
m	۴/۱۱۳۰	۴/۱۲۳	۵/۲۱۲
درصد بهبود عملکرد الگوریتم خفاش برای پارامتر SSQ	نسبت به ژنتیک ۱۸ درصد	نسبت به ازدحام ذرات ۷ درصد	-
درصد بهبود عملکرد الگوریتم خفاش برای پارامتر SAD	نسبت به ژنتیک ۳۷ درصد	نسبت به ازدحام ذرات ۳۲ درصد	-



شکل ۳. مقایسه هیدروگراف‌های خروجی مشاهداتی و مدل‌سازی شده سیل ليقوان

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، از الگوریتم خفاش برای محاسبه پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام استفاده شد. برای بهینه‌سازی، دو تابع هدف مجموع مربعات انحرافات و مجموع قدر مطلق خطاها در نظر گرفته شد. دو مطالعه موردی برای آزمون روش خفاش انتخاب شد. مطالعه اول مربوط به سیل ویلسون بود که روش خفاش نسبت به سایر روش‌های هوش مصنوعی نظیر ازدحام ذرات، هارمونی و الگوریتم ژنتیک با داشتن مقدار $۳۵/۱۴$ و $۲۲/۷۶$ برای مقادیر مربعات انحراف خطا و مجموع قدر مطلق خطاها، جواب‌های دقیق‌تری داشت. اختلاف دبی اوج برای روش

خفاش و نتایج مشاهداتی چه از لحاظ مقدار و چه از لحاظ گام زمانی برابر صفر بود. این در حالی است که در روش ازدحام ذرات مقادیر مربعات انحراف خطا و مجموع قدر مطلق خطا به ترتیب معادل با $۳۶/۸۹$ و $۲۴/۱$ است. در مطالعه دوم، هیدروگراف یک سیل در منطقه ليقوان انتخاب شد. روش خفاش نسبت به روش‌های الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات کاهش تابع هدف دارد به گونه‌ای که نسبت به روش الگوریتم ژنتیک، مقادیر مربعات انحرافات و قدر مطلق خطا به میزان ۱۸ و ۳۷ درصد کاهش یافته است. همچنین، مقدار دبی اوج محاسبه شده و زمان آن نیز با مقدار مشاهداتی منطبق است. در نهایت، می‌توان

- in branched river by genetic programming. *Water Management*. (2012); 167(2): 115-123.
- [11]. Ouyang, A., Liu, L. and Li, K.. GPU-based variation of parallel invasive weed optimization algorithm for 1000D functions. *Natural Computation (ICNC)*. 10th International Conference. (2014);19-21 August. Xiamen.
- [12]. Yang, X.S. and Gandomi, A.H. Bat algorithm: A novel approach for global engineering optimization. *Engineering Computations*. (2012); 29(5): 464-483.
- [13]. Ahmadianfar, I., Adib, A., and Salarijazi, M. Optimizing multireservoir operation: Hybrid of bat algorithm and differential evolution. *J. Water Resour. Plann. Manage.* (2015);, 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.
- [14]. Yang, X.S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm. *Nature inspired cooperative strategies for optimization (NISCO 2010)*, J. R. Gonzalez, et al. Eds., Springer, Berlin, (2010) 284: 65-74.
- [15]. Yang, X.S. Meta-heuristic optimization with applications: Demonstration via bat algorithm. *Proc. 5th Bioinspired Optimization Methods and Their Applications (BIOMA2012)*, Bohinj, Slovenia, pp. (2012); 23-34.
- [16]. Yoon, J.W. and Padmanabhan, G. Parameter estimation of linear and nonlinear Muskingum models. *Water Resources Planning and Management (ASCE)*. (1993); 119(5): 600-610.
- [17]. Ghafari, A., Fakhari, A. Flood routing based on hydraulic model and hydrologic model. *Water and soil*. (2011); 201 (3):48-70 (In Persian).
- [18]. Barati, R. Discussion of 'Parameter estimation of the nonlinear Muskingum model using parameter-setting-free harmony search' by Z. W. Geem. *J. Hydrology*. (2012);.1943-5584.
- [19]. Barati, R. Application of Excel solver for parameter estimation of the nonlinear Muskingum models. *KSCE J. Civil. Engineering*., (2013);17(5), 1139-1148.
- [20]. Barati, R. Closure to 'Parameter estimation of nonlinear Muskingum model using Nelder-Mead simplex algorithm' by R. Barati. *J. Hydrol. Eng.* (2013);, 367-370.
- [21]. Easa, S. M. Multi-criteria optimisation of the Muskingum flood model: A new approach. *Proc. ICE Water Manage.*, (In Persian). (2014). 16(4):214-228
- [22]. Easa, S. M. Versatile Muskingum flood model with four variable parameters. *Proc. ICE - Water Manage.*, (2014);168(3): 139-148.
- اذعان داشت که الگوریتم خفاش قابلیت زیادی در شبیه‌سازی و روندیابی سیلاب و انتخاب دقیق پارامترهای مدل ماسکینگام است. کاربرد تحقیق یادشده پیش‌بینی دقیق دبی پیک سیلاب است به‌گونه‌ای که سازه‌های هیدرولیکی پایین‌دست را می‌توان بر اساس مقادیر پیش‌بینی‌شده طراحی کرد و همچنین در بحث کنترل سیلاب بر اساس مقادیر پیش‌بینی‌شده برنامه‌ریزی دقیق‌تری داشت.

منابع

- [1]. Das, A.. Parameter estimation for Muskingum models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE. (2004); 130(2): 140-147.
- [2]. Ponce, V.M. and Lugo, A.. Modeling looped ratings in Muskingum-Cunge routing. *Journal of Hydrologic Engineering (ASCE)*. (2001); 6(2): 119-124.
- [3]. Chu, H.J. and Chang L.C.. Applying particle swarm optimization to parameter estimation of the nonlinear Muskingum model. *Journal of Hydrologic Engineering (ASCE)*. (2009); 14(9):1024-1027.
- [4]. Al-Hummed, J.M. and Essen, I.I. Approximate methods for the estimation of Muskingum flood routing parameters. *Water Resources Management*. (2006); 20: 979-990.
- [5]. Geem, Z..Parameter Estimation for the Nonlinear Muskingum Model using the BFGS Technique. *Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE. (2006); 132(5): 474-478.
- [6]. Wang, G.T. and Chen, S. A semianalytical solution of the Saint-Venant equations for channel flood routing. *Journal of Water Resources Research*. (2003); 39(4): 1-10.
- [7]. Mohan, S. Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using Genetic Algorithm. *Hydraulic Engineering (ASCE)*. (1997);132(2): 137-142.
- [8]. Xu, D.M., Qiu, L. and Chen, S.Y. Estimation of nonlinear Muskingum model parameter using differential evolution. *Journal of Hydrologic Engineering (ASCE)*. (2011);17: 348-353.
- [9]. Kim, J.H., Geem, Z.W. and Kim, E.S.. Parameter estimation of the nonlinear Muskingum model using Harmony Search, *Journal of The American Water Resources Association*. (2001);37: 1131-1138.
- [10]. Orouji, H., Bozorg-Haddad, O., Fallah-Mehdipour, E. and Mariño, M.A.. Flood routing