

تخمین پارامترهای غیرخطی مدل ماسکینگام در مدل روندیابی سیلاب با الگوریتم نوین سنجاقک

سعید خلیفه (دانشجوی دکتری)

سعیدرضا خداشناس* (استاد)

کاظم اسماعیلی (دانشیار)

گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی عمران شریف، تابستان (۱۴۰۰)
دوری ۲ - ۳۷، شماره ۱/۲، ص. ۱۰-۳، (پژوهشی)

روندیابی سیلاب رودخانه‌یی یکی از مهم‌ترین مسائلی است که در مهندسی هیدرولوژی بررسی می‌شود و بررسی آن به شناخت بیشتر تأثیر آن بر پروژه‌های اجرایی در مسیر رودخانه و اطراف آن کمک می‌کند. از میان روش‌های متداول روندیابی سیل، روش ماسکینگام، روشی هیدرولوژیکی، کاربرد گسترده‌یی در مطالعات سیلاب رودخانه‌ها داشته و از دقت نسبتاً بالایی برخوردار است. در پژوهش حاضر، از الگوریتم نوین فراکوشی سنجاقک استفاده شده است. نتایج حاصل از الگوریتم سنجاقک (DA) برای ارزیابی و میزان کاربردی بودن آن با الگوریتم‌های ژنتیک (GA) و الگوریتم جست‌وجوی هارمونی (HS) مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم DA قادر است برآورد مناسبی از مقادیر بهینه پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی را ارائه کند، به طوری که برای الگوریتم DA مقادیر SSQ و $RMSE$ به ترتیب برای رودخانه‌ی کارده به عنوان مطالعه‌ی موردی برابر با $۴/۵۵$ و $۰/۷۱$ به دست آمد. این الگوریتم نوین می‌تواند برای هر مسئله‌ی بهینه‌سازی پیوسته در مهندسی مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: روندیابی هیدرولوژیکی، الگوریتم سنجاقک، بهینه‌سازی، تابع جریمه‌ی غیرمستقیم.

khalifeh.saeid@mail.um.ac.ir
khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir
esmaili@um.ac.ir

۱. مقدمه

سیل یکی از حوادث طبیعی است که اگر به دقت با ساخت سازه‌های محافظ در پایین‌دست رودخانه کنترل نشود، خطرات جدی برای ساکنان و تأسیسات پایین‌دست رودخانه ایجاد می‌شود. روندیابی سیلاب، مجموع عملیاتی است که به وسیله‌ی آن‌ها هیدروگراف جریان پایین‌دست توسط هیدروگراف جریان معلوم بالادست تعیین می‌شود. بنابراین پیش‌بینی دقیق رویداد سیل یکی از موضوعات مهم در مهندسی هیدرولیک است. یکی از مسائل مهم مرتبط با پیش‌بینی سیل، روندیابی سیل است. روندیابی سیل صورت گرفته توسط روش‌های ریاضی به مهندسان طراح در شناخت تأثیرات جریان در مسیر رودخانه و اطراف آن کمک می‌کند. روندیابی سیلاب در آبراه‌ها (کانال و رودخانه) عبارت است از عملیات محاسباتی که تغییرات مقادیر متغیرهای هیدرولیکی، هندسه‌ی جریان و شکل موج سیل را به عنوان تابعی از زمان در یک یا چند نقطه در طول آبراه‌ها پیش‌بینی می‌کند.^[۱-۳]

یکی از معضلات کشور در زمینه‌ی مطالعات روندیابی سیلاب، دسترسی نداشتن

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱۲/۷، اصلاحیه ۱۳۹۹/۶/۲، پذیرش ۱۳۹۹/۷/۲۰.

DOI:10.24200/J30.2020.55391.2726

غیرخطی پیشنهاد کرده است. موهان^۴ (۱۹۸۵) مدلی را بر مبنای الگوریتم ژنتیک^۵ به منظور تخمین پارامترهای ماسکینگام غیرخطی ارائه کرد. نتایج نشان می‌دهد هیدروگراف جریان خروجی حاصل از روش GA با هیدروگراف جریان خروجی مشاهداتی نسبت به روش‌های ارائه شده از سوی سایر محققان انطباق بالاتری دارد. پرمال و راجو^۶ (۱۹۹۸)^[۱۱-۸] بر اساس معادلات سنت‌ونانت روشی را برای روندیابی جریان غیرماندگار ارائه کردند که مشابه فرمول مورد استفاده در روش ماسکینگام با پارامترهای متغیر بوده است و برای روندیابی از هیدروگراف اشلی^۷ استفاده می‌کند. در این روش هیدروگراف دبی نیز به‌طور همزمان با هیدروگراف اشلی روندیابی می‌شود. نتایج از کارایی مناسب این روش حکایت داشت.^[۱۱-۸]

کیم و جیم^۸ (۲۰۰۱) الگوریتم HS^۹ را در بهینه‌سازی پارامترهای ماسکینگام به‌کار برد. نتایج به‌دست آمده از HS تخمین بهتری نسبت به الگوریتم GA داشت. روش آن‌ها نه تنها در کمینه کردن مجموع مربعات انحرافات (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 (SAD) دبی روندیابی شده مشاهداتی و محاسباتی و میزان انحراف دبی اوج مشاهداتی و محاسباتی (DPO) نیز مقادیر بهتری نسبت به سایر روش‌های پیشین داشتند.^[۱۲]

داس^{۱۰} (۲۰۰۴) به منظور تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام خطی و غیرخطی از یک الگوریتم تکرار شونده، بر مبنای کمینه کردن خطای هیدروگراف محاسباتی نسبت به هیدروگراف مشاهداتی بهره برد. نتایج نشان داد که به کارگیری الگوریتم سرعت محاسبات را به نحو چشم‌گیری افزایش می‌دهد.^[۱۳] فرزین و همکاران (۲۰۱۸) به روندیابی سیلاب رودخانه کاراهان و مقایسه آن با سیلاب رودخانه‌ی ویلسون و سیلاب رودخانه‌ی میانمار با استفاده از الگوریتم خفاش پرداختند. این پژوهشگران پس از محاسبات و تهیه هیدروگراف محاسباتی با استفاده از الگوریتم خفاش در هر سه مطالعه موردی نتایج را با سایر الگوریتم‌های فراکوشی نظیر ژنتیک، ازدحام ذرات و جست‌وجوی هارمونی مقایسه کردند. میزان خطای نسبی برای رودخانه‌ی ویلسون برای الگوریتم خفاش نسبت به ۳ الگوریتم دیگر به ترتیب ۵۱٪، ۸۹٪ و ۶۹٪ کاهش یافته است و همچنین برای رودخانه کاراهان به ترتیب ۸۸٪، ۸۳٪ و ۹۴٪ و برای رودخانه‌ی میانمار به ترتیب ۱۱٪، ۸۸٪ و ۹۴٪ کاهش یافته است که نشان‌دهنده عملکرد مناسب و دقت زیاد الگوریتم خفاش در مقایسه با الگوریتم‌های به کار رفته دیگر است.^[۱۴]

بازرگان و نوروزی (۲۰۱۸) در پژوهش خود به بررسی معادله‌ی ماسکینگام با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای رودخانه‌ی کارون در بالادست و پایین‌دست آن پرداختند. آن‌ها مقدار دقیق خروجی جریان رودخانه را بررسی کردند و هیدروگراف خروجی را رسم کردند و نتیجه گرفتند اگر مقادیر ضرایب این الگوریتم متفاوت و غیر ثابت باشند، دقت میزان دبی خروجی افزایش می‌یابد و میزان خطای نسبی متوسط ۲/۴۴٪ است و در صورت ثابت بودن مقادیر ضرایب الگوریتم میزان خطای ۸۹٪ را ایجاد می‌کند.^[۱۵] خلیفه و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی بهینه‌سازی مسیریابی غیرخطی سیلاب رودخانه کارده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ملخ (GOA) پرداختند و با سایر الگوریتم‌های فراکوشی مقایسه کردند. تجزیه و تحلیل‌ها حاکی از عملکرد مناسب‌تر این الگوریتم نسبت به الگوریتم‌های مورد استفاده بوده است.^[۱۶] دیده می‌شود که در سال‌های اخیر کاربرد روش‌های هوشمند و الگوریتم‌های فراکوشی به‌منظور پیش‌بینی و بهینه‌سازی معادلات گوناگون مورد توجه محققان علوم مختلف بوده و همواره نتایج مناسبی را به همراه داشته است.

بررسی منابعی که نویسندگان این مقاله استفاده کردند نشان می‌دهد که تاکنون

الگوریتم نوین سنجاچک را محققان به صورت محدود به کار گرفته‌اند و کارایی این الگوریتم در زمینه‌ی روندیابی سیلاب و مهندسی رودخانه تاکنون ارزیابی نشده است. از این رو در این تحقیق به‌منظور تخمین پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام از الگوریتم DA که بر پایه‌ی شبیه‌سازی رفتاری متقابل میان سنجاچک‌ها، توسط میرجلیلی (۲۰۱۶) ارائه شده است، استفاده شد.^[۱۷] برای بررسی عملکرد الگوریتم ارائه شده نتایج حاصل از اجرای آن با الگوریتم‌های پایه‌ی نظیر ژنتیک و جست‌وجوی هارمونی مقایسه شد. کدنویسی الگوریتم‌های HS، DA و GA در قسمت برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB (R۲۰۱۸b) انجام شد. پارامترهای آماری به‌دست آمده برای رودخانه‌ی مورد مطالعه توسط الگوریتم DA حاکی از عملکرد مناسب این الگوریتم‌ها در برآورد مقادیر بهینه‌ی پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی در روندیابی سیلاب نسبت به سایر الگوریتم‌ها بوده است.

۲. مواد و روش‌ها

روش ماسکینگام از جمله روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی است که اصول آن بر پایه‌ی اصل پیوستگی جریان و معادله‌ی بین دبی و ذخیره‌ی موقت آب در طول مسیر استوار است. این مدل، روش نسبتاً ساده‌ی است و دقت کافی در مسائل آبی دارد. این مدل به دلیل سادگی از بین انواع روش‌های هیدرولوژیک برای روندیابی سیل کاربرد وسیعی دارد.^[۱۸] دو معادله‌ی پیوستگی و ذخیره‌ی غیرخطی به عنوان معادلات پایه‌ی به صورت معادلات ۱ و ۲ در مدل ماسکینگام به کار رفته‌اند:

$$\frac{ds}{dt} = I_t - O_t \quad (۱)$$

$$S_t = K[XI_t + (1 - X)O_t] \quad (۲)$$

در این معادلات S_t ، I_t و O_t به ترتیب ذخیره، ورودی و خروجی در زمان t و K ضریب بدون بعد ذخیره برای رودخانه است که یک مقدار منطقی نزدیک به زمان گذر جریان از کل مسیر رودخانه می‌باشد (ثابت و بزرگتر از صفر). X یک عامل وزنی است که معمولاً بین صفر و ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. معمولاً چنانچه معادله‌ی ماسکینگام به صورت خطی در نظر گرفته شود، پارامترهای K و X در مدل با روش ترسیمی به کمک سعی و خطا محاسبه می‌شود. این روش مشکل و تقریبی است، هم‌چنین معادله‌ی بین S_t و $[XI_t + (1 - X)O_t]$ همیشه خطی نیست. ویلسون^{۱۱} (۱۹۷۴)^[۱۹] و جیل^{۱۲} (۱۹۷۴)^[۲۰] در روندیابی سیلاب با استفاده از مدل غیرخطی ماسکینگام، معادلات را به ترتیب مطابق معادله‌های ۳ و ۴ به کار بردند:

$$S_t = K[XI_t + (1 - X)O_t]^m \quad (۳)$$

$$S_t = K[XI_t^m + (1 - X)O_t^m] \quad (۴)$$

در مدل ماسکینگام پارامتر m به عنوان توان برای در نظر گرفتن اثرات غیرخطی (بزرگتر از یک) به معادله اضافه شده است، که مدل را قادر می‌سازد تا معادله‌ی غیرخطی بین ذخیره‌ی تجمعی و جریان را بهتر مدل‌سازی کند. معادله‌ی ۳ نسبت به معادله‌ی ۴، به دلیل دقت بالاتر، بیشتر رایج است. پس با در نظر گرفتن معادله‌ی ۳ می‌توان معادله‌ی زیر را استخراج کرد:

$$O_t = \left(\frac{1}{1 - X}\right) \left(\frac{S_t}{K}\right)^{\frac{1}{m}} - \left(\frac{X}{1 - X}\right) I_t \quad (۵)$$

با ترکیب معادلات ۱ و ۵ معادله‌ی زیر به دست می‌آید:

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

که در آن $(\Delta S_t)/\Delta t$ تغییرات ذخیره نسبت به زمان است.

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

که S_{t+1} برابر ذخیره در زمان $t+1$ است. جیم ۱۳ (۲۰۰۶)^[۲۱] برای محاسبه‌ی هیدروگراف سیل با استفاده از معادلات فوق، الگوریتم زیر را به کار برد:

مرحله ۱: در نظر گرفتن مقدار اولیه‌ی m و پارامتر x, k, x و m ؛

مرحله ۲: محاسبه‌ی ذخیره‌ی (S_t) با استفاده از معادله‌ی ۳ با فرض مقدار جریان خروجی اولیه برابر با جریان ورودی $(O_1 = I_1)$ ؛

مرحله ۳: محاسبه‌ی نسبت تغییرات ذخیره نسبت به زمان با استفاده از معادله‌ی ۶؛

مرحله ۴: محاسبه‌ی مقدار ذخیره در مرحله‌ی زمانی بعدی با استفاده از معادله‌ی ۷؛

مرحله ۵: محاسبه‌ی دبی جریان خروجی در مرحله‌ی زمانی بعدی با استفاده از معادله‌ی ۵؛

مرحله ۶: تکرار مراحل ۱ تا ۵.

است:

$$X^k(\min) \leq X^k \leq X^k(\max) \quad (9)$$

که $X^k(\min)$ حد پایین در بعد K و $X^k(\max)$ حد بالا در بعد K را نشان می‌دهد. اساساً، موقعیت‌های سنجاک با استفاده از تابع توزیع نرمال ایجاد می‌شود.

$$X^k = X^k(\min) + (X^k(\max) - X^k(\min)) \times rand \quad (10)$$

در نهایت یک تابع برازندگی، موقعیت‌های سنجاک را به عنوان ورودی می‌گیرد و یک خروجی عددی که نمایانگر راه‌حل خوب بالقوه است، ذرات را نمایش می‌دهد. بر طبق گفته‌ی رینولدز رفتار ذرات از سه قانون زیر پیروی می‌کند.^[۱۷]

۱. تفکیک، مانع برخورد عامل با عامل دیگر می‌شود.

۲. هم‌ترازی، سرعت عامل نسبت به سایر عامل‌ها.

۳. پیوستگی، به گرایش ذرات به سمت یک مرکز از همسایه‌ها اشاره دارد.

رفتار DA در پنج مرحله خلاصه می‌شود، که در زیر به آنها اشاره می‌شود. تفکیک که به صورت زیر است:

$$S_i = -\sum_{j=1}^N X - X_j \quad (11)$$

که در آن X نشان‌دهنده‌ی موقعیت ذره‌ی فعلی و X_j نشان‌دهنده‌ی ژامین همسایه است.

هم‌ترازی:

$$A_i = \frac{-\sum_{j=1}^N V_j}{N} \quad (12)$$

که در آن V_j نشان‌دهنده‌ی سرعت ژامین همسایه است. پیوستگی:

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} - X \quad (13)$$

جذب به سمت شکار:

$$F_i = X^+ - X \quad (14)$$

که در آن X^+ موقعیت شکار است.

دور شدن از دشمن:

$$E_i = X^- + X \quad (15)$$

که در آن X^- نشان‌دهنده‌ی موقعیت دشمن است.

برای بروز کردن موقعیت‌ها دو بردار وجود دارد، گام حرکت و ΔX موقعیت X .

$$\Delta X_{t+1} = (sS_i + aA_i + cC_i + fF_i + eE_i) + wW_t \quad (16)$$

گام حرکت مسیر را نشان می‌دهد، در فرمول بالا s وزن حرکت تفکیک، a وزن حرکت هم‌ترازی، c وزن حرکت پیوستگی، f وزن جذب شکار، e وزن دوری از دشمن و w وزن گام حرکت است.

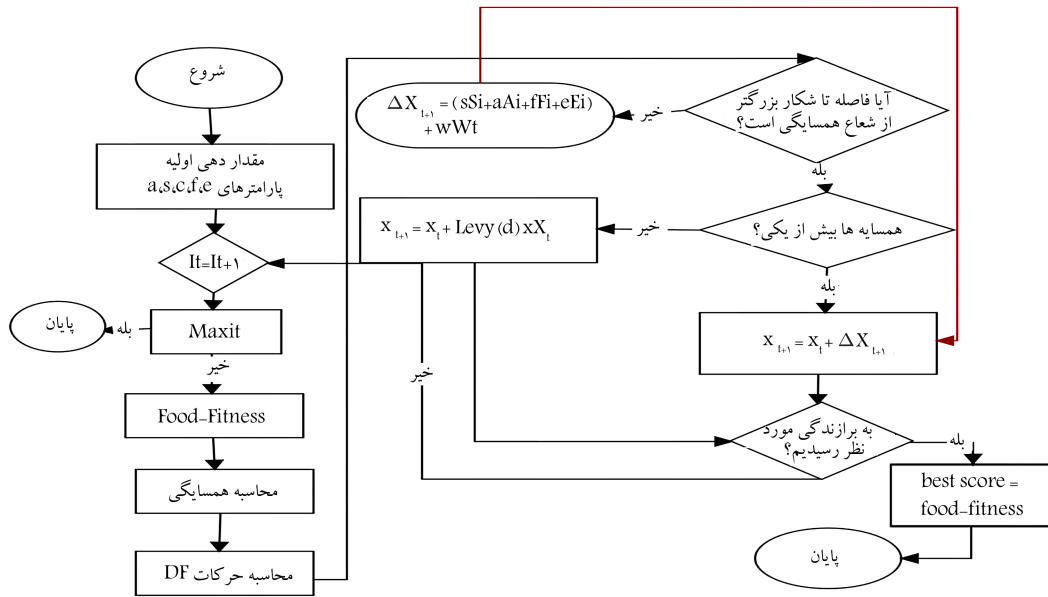
۱.۲. الگوریتم نوین سنجاک (DA)

ارائه‌ی یک راه‌حل بهینه که بتواند مسائل با پیچیدگی بالا را با مناسب‌ترین زمان و نتیجه‌ی محتمل به دست آورد، دغدغه‌ی بسیاری از محققان بوده است. از این رو الگوریتم‌های تکاملی فراکاوشی به عنوان یک روش بهینه‌سازی، توجه علاقمندان زیادی را در کاربردهای مهندسی، هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و شناسایی الگو به خود جلب کرده است. با توجه به این که در طبیعت از رفتار اجتماعی موجودات بسیاری به منظور الگوریتم تکاملی استفاده می‌شود، رفتار سنجاک به دلیل خاص و تک بودن مورد و اکتشاف بالا مورد توجه قرار گرفته است. سنجاک‌ها گروه‌های کوچکی را تشکیل می‌دهند تا نواحی بزرگ را برای یافتن غذا طی کنند که مرحله‌ی اکتشاف را تشکیل می‌دهد؛ در مرحله‌ی استخراج گروه‌های بزرگی ایجاد می‌کنند تا به نواحی مختلف نزدیک به هم بروند.

ایده‌ی اصلی الگوریتم DA از رفتار گروهی سنجاک‌ها در حالت ایستا (استراحت) و پویا (حرکت یا جنب‌وجوش) در طبیعت الهام گرفته شده است.^[۱۷] سنجاک‌ها به عنوان شکارچیان کوچک تقریباً اکثر حشرات دیگر که در طبیعت وجود دارند را شکار می‌کنند. حقیقت مورد توجه در الگوریتم سنجاک رفتار خاص و نادر این حشرات است. دو مرحله‌ی اساسی در بهینه‌سازی، اکتشاف و بهره‌برداری است که از (کار گروهی) راهبری، جست‌وجوی غذا و اجتناب از دشمنان در حالت‌های ایستا و پویا الگوبرداری شده است. الگوریتم سنجاک موقعیت سنجاک‌ها را به صورت تصادفی در فضای جست‌وجو ایجاد می‌کند که این موقعیت می‌تواند یک راه‌حل بالقوه در مسائل بهینه‌سازی باشد. هر ژامین سنجاک به عنوان برداری از X_i است.

$$X_i = [X_i^1, X_i^2, \dots, X_i^{nv}] \quad (18)$$

که X_i^j نشان‌دهنده‌ی ژامین موقعیت پارامتر ژامین سنجاک و nv نشان‌دهنده‌ی تعداد متغیرهای مسئله است. فضای جست‌وجو با حد بالا و پایین زیر محدود شده



شکل ۱. روندنما الگوریتم DA (میرجلیلی ۲۰۱۶) [۱۷]

که در آن O_{ct} دبی سیلاب خروجی روندیابی شده (محاسباتی) در زمان t و N تعداد گام‌های زمانی روندیابی سیل است. اگر مقادیر غیرممکن X, K و m انتخاب شوند، مقادیر O_t و S_t در مدل ماسکینگ منفی به دست می‌آیند و از این رو از روش تابع غیرمستقیم جریمه به شکل زیر استفاده می‌شود:

$$S_{t+1}^* = \alpha_1 [S_{t+1}], \text{ if } S_{t+1}^* < 0 \quad (22)$$

$$O_{t+1}^* = \alpha_2 [O_{t+1}], \text{ if } O_{t+1}^* < 0 \quad (23)$$

که در آن α_1 و α_2 ثابت‌های جریمه، S_{t+1}^* و O_{t+1}^* مقدار ذخیره و سیلاب خروجی در بازه‌ی زمانی $t + 1$ بعد از اعمال جریمه هستند و مقادیر مثبت اما غیر واقعی هستند.

۳.۲. معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی مدل‌های مورد نظر از شاخص کمیته‌سازی مجموع مربعات باقیمانده‌ها (SSQ)^{۱۴} و مربع میانگین خطای استاندارد (MSE)^{۱۵} بهره برده شده است که در روابط ۲۱ تا ۲۴ آورده شده‌اند.^[۱۸]

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n} \quad (24)$$

در این معادلات S_i سیلاب خروجی روندیابی شده، \bar{S} میانگین داده‌های محاسباتی، O_i سیلاب خروجی مشاهداتی، \bar{O} میانگین داده‌های مشاهداتی و n تعداد مشاهدات است. MSE اختلاف بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی را نشان می‌دهد که هر چه این مقادیر کمتر باشند، یعنی کار نتیجه‌بخش‌تر بوده است.

۴.۲. داده‌های مورد استفاده

برای ارزیابی الگوریتم‌های مورد بررسی در این پژوهش داده‌های رودخانه‌ی ویلسون (به عنوان مثال استاندارد) و رودخانه‌ی کارده (به عنوان مطالعه‌ی موردی واقعی) استفاده شده است.

برای محاسبه‌ی شعاع همسایگی از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$R = \frac{(X_j^k(\max) - X_j^k(\min))}{4} + (X_j^k(\max) - X_j^k(\min)) \times \left(\frac{Iter}{Maxiter} \right) \times 2 \quad (17)$$

در صورتی که سنجاک در شعاع همسایگی قرار نگیرد، از فرمول زیر گام حرکت محاسبه می‌شود.

$$\Delta X_{t+1} = (rand \times S_i + rand \times A_i + rand \times C_i) + w \Delta X_t \quad (18)$$

با وجود پارامترهای a, f, c, s, e که می‌توانند رفتار اکتشافی و استخراجی را تنظیم کنند، همسایه‌های سنجاک نیز نقش مهمی دارند؛ بنابراین یک شعاع همسایگی برای هر سنجاک مشخص می‌شود.

برای به‌روزرسانی موقعیت در صورتی که همسایه‌ی وجود داشته باشد از فرمول زیر

$$X_{t+1} = X_t + \Delta X_{t+1} \quad (19)$$

و در غیر این صورت از فرمول پرواز (Levy) استفاده می‌شود.

$$X_{t+1} = X_t + Levy(d) \times X_t \quad (20)$$

فلوچارت شکل ۱، فرایند این الگوریتم را نشان می‌دهد.

۲.۲. مدل ریاضی

در این پژوهش برای ارزیابی مقادیر بهینه‌ی پارامترهای X, K و m در مدل ماسکینگ از تابع هدف به صورت کمیته‌سازی مجموع مربعات باقیمانده‌ها (SSQ) بین دبی خروجی‌های واقعی و روندیابی شده مطابق معادله‌ی ۲۱ استفاده شده است:

$$\min SSQ = \sum_{t=1}^N (O_t - O_{ct})^2 \quad (21)$$

جدول ۱. تجزیه و تحلیل ۱۰ بار پردازش از توابع هدف و میانگین زمان اجرای پردازش برای هر الگوریتم برای رودخانهی ویلسون.

GA		HS		DA		دفعات پردازش
زمان پردازش	مقدار بهینه	زمان پردازش	مقدار بهینه	زمان پردازش	مقدار بهینه	
۸/۵۲	۱۳۰/۳۳	۳	۱۳۱/۲۴	۱۸/۶۰	۱۸۲/۶۱	۱
۷/۹۸	۱۳۴/۸۸	۲/۸۹	۱۲۹/۴۴	۱۹/۲	۱۹۰/۲۵	۲
۷/۵۸	۱۳۵/۱۱	۲/۸۲	۱۳۱/۲۵	۱۹/۳۵	۱۲۸/۷۸۶۸	۳
۷/۲۳	۱۳۱/۸۷	۲/۸۰	۱۳۰	۱۹/۵۵	۱۲۸/۷۹۸۸	۴
۷/۳۹	۱۳۳/۰۵	۲/۸۲	۱۳۱/۲۶	۱۹/۳۸	۱۲۸/۷۸۶۴	۵
۷/۶۴	۱۲۹/۶۷	۲/۸۴	۱۳۳/۱۱	۱۹/۶۷	۱۲۸/۷۸۶۷	۶
۹/۳۲	۱۲۹/۰۱	۲/۸۰	۱۳۳/۰۸	۱۹/۵۹	۱۲۸/۷۸۹۵	۷
۷/۲۷	۱۴۵/۳۵	۲/۸۳	۱۳۳/۸۹	۲۰/۵۸	۲۰۰/۱۸۰	۸
۷/۱۳	۱۲۸/۹	۲/۸۱	۱۳۷/۵۱	۱۹/۷۲	۱۲۸/۷۸۶۵	۹
۷/۲۶	۱۴۱/۹۹	۲/۸۲	۱۳۰/۱۹	۱۹/۵۸	۱۲۸/۷۸۶۲	۱۰
۱۲۸/۹		۱۲۹/۴۴		۱۲۸/۷۸۶۲		بهترین پردازش
۱۴۵/۳۵		۱۳۷/۵۱		۲۰۰/۱۸۰		بدترین پردازش
۱۳۴/۰۱		۱۳۲/۰۷		۱۴۷/۷		میانگین پردازش ها
۵/۶۱		۲/۳۹		۳۰/۷۵		انحراف معیار
۰/۰۴۱		۰/۰۱۸		۰/۲۰۸۲		ضریب تغییرات
۷/۱۳		۲/۸۰		۱۸/۶۰		بهترین زمان پردازش

۵.۲. رودخانهی ویلسون

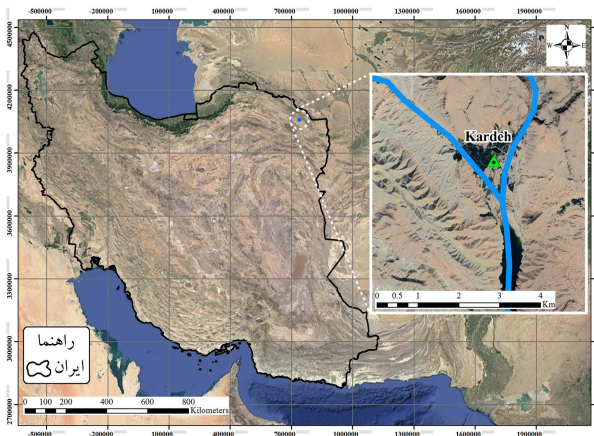
مثال مورد مطالعه در این پژوهش اولین بار توسط ویلسون (۱۹۷۴) ارائه شده است. [۱۹] در این مثال رابطهی غیرخطی بین مقادیر S_t و $[XI_t + (1-X)O_t]$ برقرار است و می توان عملکرد الگوریتم های مختلف را در به دست آوردن مقادیر بهینهی پارامترهای معادلهی ماسکینگام غیرخطی بررسی کرد. هم چنین انواع روش های فراکاشی در این مثال، مورد آزمون قرار گرفته است. بیشترین جریان ورودی و خروجی از این رودخانه به ترتیب ۱۱۱ و ۸۵ مترمکعب بر ثانیه بوده است. [۱۱]

۶.۲. رودخانهی کارده

در این پژوهش برای بررسی عملکرد الگوریتم های مورد مطالعه در برآورد پارامترهای معادلهی ماسکینگام غیرخطی در مدل روندیابی سیلاب، رودخانهی کارده به عنوان یک مثال واقعی مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۲). حوضه ی آبریز کارده در شرق ناحیه هزار مسجد - کیه داغ واقع است و یکی از زیرحوضه های حوضه ی آبریز اصلی کشف رود است. بالاترین نقطه ی ارتفاعی در شمال غرب حوضه ۲۹۷۷ متر از سطح دریا و پایین ترین نقطه ی ارتفاعی در خروجی حوضه و در پایین دست آبادی کارده ۱۲۰۰ متر است. متوسط بارندگی در بخش جنوبی حوضه ۳۷۴/۲ میلی متر و در ارتفاعات بخش شمالی به ۴۵۰ میلی متر می رسد. داده های مورد بررسی در این پژوهش سیلاب دوروزه ی مشاهداتی در تاریخ ۱۳۷۱/۰۲/۰۷ تا ۱۳۷۱/۰۲/۰۸ تا ۱۳۷۱/۰۲/۰۸ به صورت ۶ ساعته است که در دو ایستگاه کوشک آباد و کارده برداشت شده است.

۳. نتایج و بحث

پیش تر گفته شد که در مطالعه ی حاضر برای ارزیابی مقادیر بهینهی پارامترهای K ،



شکل ۲. نقشه جغرافیایی رودخانه کارده.

جدول ۲. مقادیر پارامترهای بدست آمده از الگوریتم DA برای رودخانه ویلسون.

الگوریتم	X	K	m	SSQ
DA	۰/۳۱۰	۰/۱۶۷	۲/۱۵۱	۱۲۸/۷۸۶
GA	۰/۳۰۰	۰/۳۲۸	۱/۹۹۹	۱۳۸/۸۰۵
HS	۰/۳۰۱	۰/۱۶۴	۲/۱۵۵	۱۲۹/۴۴۲

X و m در مدل ماسکینگام غیرخطی، کمینه سازی مجموع مربعات باقیمانده ها (SSQ) بین دبی خروجی های واقعی و روندیابی شده به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد. نتایج پارامترهای بهینهی بدست آمده از الگوریتم های مورد بررسی برای رودخانهی ویلسون در جدول ۱ و جدول ۲ آورده شده است.

همان طور که در جدول ۱ مشاهده می شود الگوریتم های فراکاشی مورد استفاده توانسته اند SSQ را به مقدار بهینه نزدیک تر کنند. شکل ۳ هیدروگراف خروجی

جدول ۳. مقادیر هیدروگراف خروجی روندیابی شده توسط الگوریتم‌های مورد بررسی برای رودخانه ویلسون.

دبی خروجی روندیابی شده (m^3/s)			دبی (m^3/s)		زمان (ساعت)
HS	GA	DA	خروجی مشاهداتی	ورودی	
۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۰
۲۱/۷۸۴	۲۱/۷۸۴	۲۱/۷۸۴	۲۱	۲۳	۶
۲۰/۰۰۳	۱۹/۹۱۴	۲۰/۰۰۳	۲۱	۳۵	۱۲
۲۰/۱۷۷	۱۹/۴۸۶	۲۰/۱۷۶	۲۶	۷۱	۱۸
۲۹/۹۵۵	۲۹/۱۵۵	۲۹/۹۵۴	۳۴	۱۰۳	۲۴
۴۴/۵۶۰	۴۴/۳۲۵	۴۴/۵۶۰	۴۴	۱۱۱	۳۰
۵۷/۱۱۲	۵۷/۴۴۹	۵۷/۱۱۲	۵۵	۱۰۹	۳۶
۶۷/۵۳۳	۶۸/۲۶۴	۶۷/۵۳۳	۶۶	۱۰۰	۴۲
۷۵/۵۹۹	۷۶/۴۹۶	۷۵/۵۹۹	۷۵	۸۶	۴۸
۸۰/۴۴۵	۸۱/۲۸۱	۸۰/۴۴۵	۸۲	۷۱	۵۴
۸۱/۵۲۰	۸۲/۱۲۵	۸۱/۵۲۰	۸۵	۵۹	۶۰
۸۰/۲۹۴	۸۰/۵۹۷	۸۰/۲۹۴	۸۴	۴۷	۶۶
۷۵/۸۷۲	۷۵/۸۶۷	۷۵/۸۷۲	۸۰	۳۹	۷۲
۶۹/۸۱۳	۶۹/۵۹۰	۶۹/۸۱۳	۷۳	۳۲	۷۸
۶۱/۸۰۵	۶۱/۵۲۴	۶۱/۸۰۵	۶۴	۲۸	۸۴
۵۳/۴۱۴	۵۳/۲۸۵	۵۳/۴۱۴	۵۴	۲۴	۹۰
۴۴/۱۴۷	۴۴/۱۴۰	۴۴/۱۴۷	۴۴	۲۲	۹۶
۳۵/۳۶۲	۳۶/۱۷۰	۳۶/۳۶۲	۳۶	۲۱	۱۰۲
۲۸/۳۴۷	۲۹/۵۸۹	۲۸/۳۴۸	۳۰	۲۰	۱۰۸
۲۳/۴۵۰	۲۴/۷۷۰	۲۳/۴۵۰	۲۵	۱۹	۱۱۴
۲۰/۲۶۳	۲۱/۳۰۸	۲۰/۲۶۳	۲۲	۱۹	۱۲۰
۱۹/۹۴۵	۲۰/۰۱۸	۱۹/۹۴۶	۱۹	۱۸	۱۲۶

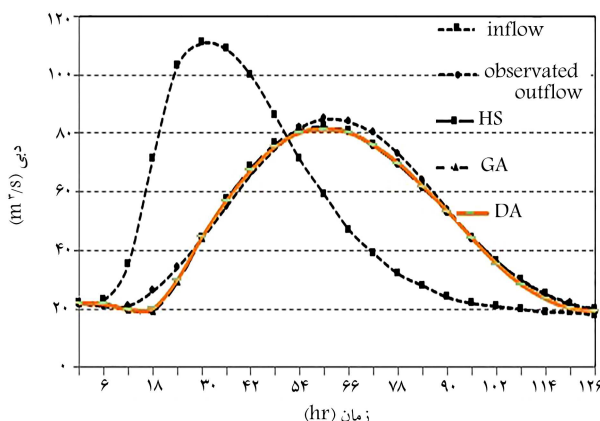
جدول ۴. شاخص‌های آماری مورد بررسی برای رودخانه ویلسون.

الگوریتم	MSE	SSQ
DA	۵/۸۵۳	۱۲۸/۷۸۶۲
GA	۶/۳۰۹	۱۳۸/۸۰۵
HS	۵/۸۵۳	۱۳۶/۷۸۶

جدول ۵. مقادیر پارامترهای بدست آمده از الگوریتم DA برای رودخانه کارده.

الگوریتم	X	K	m	SSQ
DA	۰/۳۴۴	۰/۰۲۱۵	۴/۷	۴/۵۵۱
GA	۰/۳۷۳	۰/۱۷۷	۳/۵۴۲	۵/۲۳۵
HS	۰/۳۵۲	۰/۰۲۱	۴/۷۸۱	۴/۸۲۲

رودخانه‌ی ویلسون نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، الگوریتم DA در کمینه‌سازی مجموع مربعات باقیمانده‌ها (SSQ) با (۵/۸۵۳۹۲۹) MSE و (۱۲۸/۷۸۶۲) SSQ عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های HS و GA داشته‌اند. نتایج پارامترهای بهینه‌ی بدست آمده از الگوریتم‌های مورد بررسی برای رودخانه‌ی کارده در جدول ۵ آمده است. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، الگوریتم‌های



شکل ۳. هیدروگراف خروجی روندیابی شده توسط الگوریتم‌های مورد بررسی برای رودخانه‌ی ویلسون.

روندیابی شده توسط الگوریتم‌های مختلف و هیدروگراف خروجی مشاهداتی برای رودخانه‌ی ویلسون را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، تمام الگوریتم‌های فراکوشی توانسته‌اند به خوبی سیلاب خروجی را روندیابی کنند. جدول ۳ مقادیر هیدروگراف خروجی روندیابی شده با استفاده از الگوریتم‌های مختلف برای رودخانه‌ی ویلسون را نشان می‌دهد. جدول ۴ عملکرد الگوریتم‌های مورد بررسی در کمینه‌سازی مجموع مربعات باقیمانده‌ها (SSQ) را توسط پارامترهای آماری برای

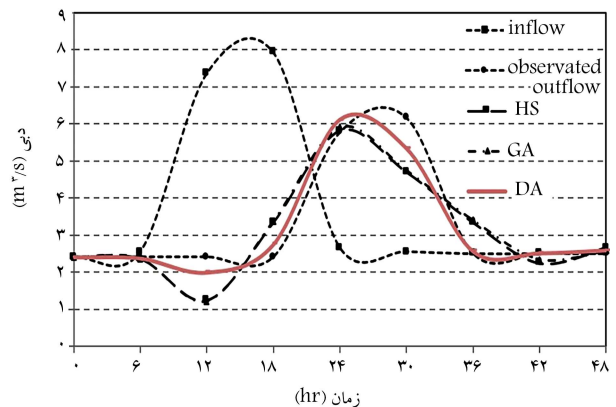
جدول ۶. مقادیر هیدروگراف خروجی رونديابی شده توسط الگوریتم‌های مورد بررسی برای رودخانه‌ی کارده.

زمان (ساعت)	دبی خروجی رونديابی شده (m^3/s)		دبی (m^3/s)	
	HS	GA	خروجی مشاهداتی	ورودی
۰	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱
۶	۲/۳۷۰	۲/۳۶۵	۲/۴۱	۲/۵۶
۱۲	۱/۲۴۹	۱/۲۱۲	۲/۴۱	۷/۳۷
۱۸	۳/۳۵۷	۳/۳۸۱	۲/۴۱	۷/۹۳
۲۴	۵/۸۲۴	۵/۹۱۳	۵/۷۷	۲/۶۶
۳۰	۴/۶۹۱	۴/۷۴۸	۶/۱۶	۲/۵۶
۳۶	۳/۳۳۶	۳/۴۰۱	۲/۵	۲/۵
۴۲	۲/۲۴۸	۲/۳۴۴	۲/۵	۲/۵
۴۸	۲/۶۶۹	۲/۵۸۰	۲/۵	۲/۵

جدول ۷. شاخص‌های آماری مورد بررسی برای رودخانه‌ی کارده.

SSQ	MSE	الگوریتم
۴/۵۵۱	۰/۵۰۵	لطفا ارجاع داده شود. DA
۵/۲۳۵	۰/۵۸۱	GA
۴/۸۲۲	۰/۵۶۵	HS

همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، الگوریتم DA در کمینه‌سازی مجموع مربعات باقیمانده‌ها (SSQ) با (۰/۵۰۵) MSE و (۴/۵۵۱) SSQ عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های HS و GA داشته‌اند. شکل ۵ روند همگرایی الگوریتم‌های بررسی‌شده برای یافتن بهترین جواب را برای رودخانه‌ی کارده مورد ارزیابی قرار داده است.

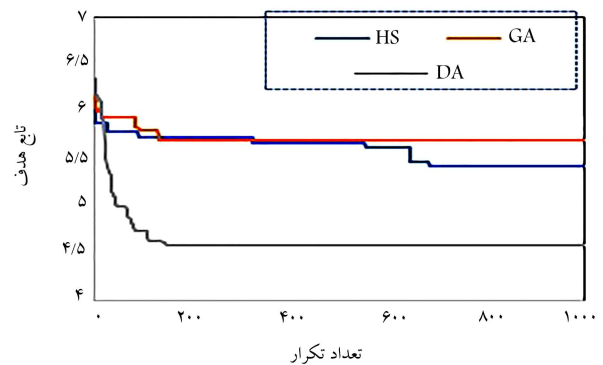


شکل ۴. هیدروگراف خروجی رونديابی شده توسط الگوریتم‌های مورد بررسی برای رودخانه‌ی کارده.

۴. نتیجه‌گیری

برآورد پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی با استفاده از روش سعی و خطا کار دشوار و با محاسبات طولانی است. در سال‌های اخیر از روش‌های گوناگونی برای تخمین این پارامترها استفاده شده است. روش‌های فراکاووشی از راه‌حلی‌هایی بوده‌اند که توانسته‌اند در تخمین این پارامترها موفق عمل کنند. در مطالعه‌ی حاضر الگوریتم نوین سنجاقک در تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی به کار گرفته شد. از سری داده‌های مشاهداتی دو مطالعه‌ی موردی شامل رودخانه‌ی ولسون و رودخانه‌ی کارده استفاده شد. برای بررسی عملکرد DA، نتایج حاصل از اجرای آن با الگوریتم‌های HS و GA مقایسه شد. در این پژوهش به منظور برآورد مقادیر بهینه‌ی پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی در رونديابی سیلاب ابتدا مثال آزمایشی که به عنوان مورد مطالعه‌ی موردی پژوهشگران استفاده شده است، حل شد. نتایج حاکی از بالا بودن دقت تخمین الگوریتم DA بوده است.

در دومین مورد مطالعه‌ی کارده رونديابی یک سیل واقعی است، پارامترهای آماری به دست آمده برای رودخانه‌ی کارده توسط الگوریتم DA برابر با (۰/۵۰۵) MSE و (۴/۵۵۱) SSQ بود که حاکی از عملکرد مناسب این الگوریتم در برآورد مقادیر بهینه‌ی پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی در رونديابی سیلاب است. در نهایت، این پژوهش قابلیت الگوریتم DA را در زمینه‌ی بهینه‌سازی پارامترهای مدل ماسکینگام نشان داد. از این رو استفاده از الگوریتم DA برای استفاده در زمینه‌ی رونديابی جریان با مدل ماسکینگام توصیه می‌شود.



شکل ۵. روند همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی برای رودخانه کارده.

فراکاووشی توانسته‌اند SSQ را به مقدار بهینه نزدیک‌تر کنند. شکل ۴ هیدروگراف خروجی رونديابی شده توسط الگوریتم‌های مختلف و هیدروگراف خروجی مشاهداتی برای رودخانه‌ی کارده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، تمام الگوریتم‌های فراکاووشی توانسته‌اند به خوبی سیلاب خروجی را رونديابی کنند. جدول ۶ مقادیر هیدروگراف خروجی رونديابی شده با استفاده از الگوریتم‌های مختلف برای رودخانه‌ی کارده را نشان می‌دهد.

جدول ۵ عملکرد الگوریتم‌های مورد بررسی در کمینه‌سازی مجموع مربعات باقیمانده‌ها (SSQ) را توسط پارامترهای آماری برای رودخانه‌ی کارده نشان می‌دهد.

پانوشتها

1. Muskingum
2. Tung
3. DFP
4. Mohan
5. genetic algorithm
6. Premual & RangaRaju
7. scale
8. Kim & Geem
9. harmony search
10. Das
11. Wilson
12. Gill
13. Geem
14. The sum of squares
15. Mean square error

منابع (References)

1. Ehteram, M., El-Shafie, A.H., Hin, L.S. and et al. "Toward bridging future irrigation deficits utilizing the shark algorithm integrated with a climate change model", *Appl Sci*, **9**(19), p. 3960 (2019).
2. Mirzazade, P, "Investigation flood routing methods in river and reservoirs", Master Thesis. Sistan and Baluchestan University. Civil college (In Persian) (2018).
3. Barati, R., Badfar, M., Azizyan G. and et al. "Discussion of "parameter estimation of extended nonlinear Muskingum models with the weed optimization algorithm" by Farzan Hamed, Omid Bozorg-Haddad, Maryam Pazoki, Hamid-Reza Asgari, Mehran Parsa, and Hugo a. Loiciga", *J Irrig Drain Eng*, **144**(1), pp. 07017021 doi:org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.000109 (2017).
4. Ehteram, M., Binti Othman, F., Mundher Yaseen, Z. and et al. "Improving the muskingum flood routing method using a hybrid of particle swarm optimization and bat algorithm", *Water*, **10**, p. 807 (2018).
5. Najah Ahmed, A., Binti Othman, F., Abdulmohsin Afan, H. "Machine learning methods for better water quality prediction", *Journal of Hydrology*, **578**, pp. 41-58 (2016).
6. Chow, V.T, *Open Channel Hydraulic*, 3rd Ed. McGraw Hill Book Company. New York. Inc, (1973).
7. McCarthy, G.T, "The unit hydrograph and flood routing", Proc. Conf. of North Atlantic Division, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, (1938).
8. Tung, Y.K, "River flood routing by nonlinear Muskingum method", *Journal of Hydrologic Engineering*, **111**, pp. 1447-1460 (1985).
9. Mohan, S. Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using genetic algorithm", *J. Hydraulic Eng*, **123**, pp. 137-142, (1997).
10. Premual, M., K.G. RangaRaju, "Variable-parameter stage -hydrograph routing method: I Theory", *Journal of Hydrologic Engineering ASCE*, **3**, pp. 109-114 (1998).
11. Premual, M., O'Donnell, P.E. and K.G. RangaRaju. "Field application of a variable parameter Muskingum-Cunge method", *Journal of Hydrologic Engineering*, **6**, pp. 196-207 (2001).
12. 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*, **37**, pp. 1131-1138 (2001).
13. Das, A, "Parameter estimation for Muskingum models", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **2**, pp. 140-147 (2004).
14. Farzin S., and Singh V., Karami H. and et al. "Flood routing in river reaches using a three-parameter Muskingum model coupled with an improved bat algorithm", *Water*, **10**(9), p. 1130 (2018).
15. Bazargan J. and Norouzi H. "Investigation the effect of using variable values for the parameters of the linear Muskingum method using the particle swarm algorithm (PSO)", *Water Resources Management*, **32**(14), pp. 4763-4777 (In Persian) (2018).
16. Khalifeh, S., Esmaili, K., Khodashenas, S. and et al. "Data on optimization of the Non-linear muskingum flood routing in kardeh river using GOA algorithm ", *Journal of Data in Brief*, **30**, doi:org/10.1016/j.dib.2020.105398 (2020).
17. Mirjalili S. "Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving singleobjective, discrete, and multi-objective problems", *Neural Comput. Appl*, **27** (4), pp. 1053-1073 (2016).
18. Chu, H.J. and Chang, L.C. "Applying particle swarm optimization to parameter estimation of the nonlinear Muskingum model", *Journal of Hydrologic Engineering*, **14**, pp. 1024-1027 (2009).
19. Wilson, E.M. "Engineering hydrology", MacMillan Education, Hampshire United Kingdom, (1974).
20. Gill, M.A, "Flood routing by the Muskingum method", *Journal of Hydrology*, **36**(3-4), pp. 353-363 (1978).
21. Geem, Z. "Parameter estimation for the noulinear muskingum model Using the BFGS technique", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **5**(474), pp.474-478 (2006).