Archive of SID

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

Original Article

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

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 فراکاوشی 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 بهینه‌ی پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی را ارائه کند، به‌طوری که برای الگوریتم DA مقادیر SSQ و RMSE به ترتیب برای رودخانه‌ی کارده به عنوان مطالعه‌ی موردی برابر با ۴/۵۵ و ۰/۷۱ به‌دست 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 به‌وسیله‌ی 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 سیلِ صورت گرفته توسط روش‌های ریاضی به مهندسان طراح در شناخت تأثیرات جریان در مسیر رودخانه و اطراف آن کمک می‌کند. روندیابی سیلاب در آبراهه‌ها (کانال و رودخانه) عبارت است از عملیات محاسباتی که تغییرات مقادیر متغیرهای هیدرولیکی، هندسه‌ی جریان و شکل موج سیل را به‌عنوان تابعی از زمان در یک یا چند نقطه در طول آبراهه‌ها پیش‌بینی می‌کند.[۱-۳]

یکی از معضلات کشور در زمینه‌ی مطالعات روندیابی سیلاب، دسترسی نداشتن به آمار و اطلاعات کامل درباره‌ی رودخانه‌ها و تعداد ایستگاه‌های آب‌سنجی است که استفاده از روش‌هایی را که به آمار و اطلاعات دقیق نیاز دارند، با مشکل مواجه می‌سازد. روندیابی جریان یک تجزیه و تحلیل برای ردیابی جریان از طریق یک سیستم هیدرولوژیکی با توجه به ورودی است. روش‌های روندیابی سیل به دو دسته‌ی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی تقسیم می‌شوند. روش‌های روندیابی هیدرولیکی بر مبنای حل عددی معادلات سنت‌ونانت و معادلات غیردائمی متغیر تدریجی در کانال‌های باز قرار دارند؛ درحالی‌که روش‌های هیدرولوژیکی بر پایه‌ی معادله‌ی پیوستگی و روابط بین دبی و ذخیره‌ی موقت حجم اضافی آب در دوره‌ی سیلاب استوار است. روش‌های هیدرولوژیکی در مقایسه با روش‌های هیدرولیکی دارای محاسبات ساده و سریعی هستند و در کاربردهای مهندسی با اطمینان قابل قبولی به‌کار می‌روند. پرکاربردترین و مشهورترین روش در این دسته، روش ماسکینگام[۱] است.[۴-۶] روش ماسکینگام اولین بار توسط مهندسان ارتش ایالت متحده برای مطالعات کنترل سیل حوضه‌ی رودخانه‌ی ماسکینگام در اوهایو ارائه شد.[۷] تانگ[۲] (۱۹۸۵) بر اساس پژوهش‌های انجام شده، سه روش رگرسیون خطی، شیب ترکیبی و داویدون ـ فلمنتچر ـ پاول[۳] را بر پایه‌ی تحقیقات الگویی هوک و ژیور، برای تخمین پارامترهای مدل

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱۲/۷، اصلاحیه ۱۳۹۹/۶/۲، پذیرش ۱۳۹۹/۷/۲۰.
DOI:10.24200/J30.2020.55391.2726

www.SID.ir

Archive of SID

غیرخطی پیشنهاد کرده است. موهان[4] (۱۹۸۵) مدلی را برمبنای الگوریتم ژنتیک[5] 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[6] (۱۹۹۸)[۸-۱۱] 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 اشل[7] استفاده می‌کند. در این روش هیدروگراف دبی نیز به‌طور همزمان با هیدروگراف اشل روندیابی می‌شود. نتایج از کارایی مناسب این روش حکایت داشت.[۸-۱۱]

کیم و جیم[8] (۲۰۰۱) الگوریتم HS [9] 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 درنظرگرفته شده مانند مجموع قدر مطلق انحرافات (SAD) دبی روندیابی شده‌ی مشاهداتی و محاسباتی و میزان انحراف دبی اوج مشاهداتی و محاسباتی (DPO) نیز مقادیر بهتری نسبت به سایر روش‌های پیشین داشتند.[۱۲]

داس[10] (۲۰۰۴) به منظور تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام خطی و غیرخطی از یک الگوریتم تکرارشونده، برمبنای 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 مقایسه‌ی آن با سیلاب رودخانه‌ی ویلسون و سیلاب رودخانه‌ی میانمار با استفاده از الگوریتم خفاش پرداختند. این پژوهشگران پس از محاسبات و تهیه‌ی هیدروگراف محاسباتی با استفاده از الگوریتم خفاش در هر سه مطالعه موردی نتایج را با سایر الگوریتم‌های فراکاوشی نظیر ژنتیک، ازدحام ذرات و جست‌وجوی هارمونی مقایسه کردند. میزان خطای نسبی برای رودخانه‌ی ویلسون برای الگوریتم خفاش نسبت به ۳ الگوریتم دیگر به‌ترتیب ۸۹٪، ۵۱٪ 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 غیرثابت 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 فراکاوشی 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 فراکاوشی 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 سنجاقک را محققان به صورت محدود به کار گرفته‌اند و کارایی این الگوریتم در زمینه‌ی روندیابی سیلاب و مهندسی رودخانه تاکنون ارزیابی نشده است. از این‌رو در این تحقیق به‌منظور تخمین پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام از الگوریتم DA که بر پایه‌ی شبیه‌سازی رفتاری متقابل میان سنجاقک‌ها، توسط میرجلیلی (۲۰۱۶) ارائه شده است، استفاده شد.[۱۷] برای بررسی عملکرد الگوریتم ارائه شده نتایج حاصل از اجرای آن با الگوریتم‌های پایه‌ای نظیر ژنتیک و جستجوی هارمونی مقایسه شد. کدنویسی الگوریتم‌های DA، HS 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 ساده‌یی 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 پایه‌یی به صورت معادلات ۱ و ۲ در مدل ماسکینگام به کار رفته‌اند:

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

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

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 به‌صورت خطی در نظرگرفته 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 $[XI_t + (۱ - X)O_t]$ همیشه خطی نیست. ویلسون[11] (۱۹۷۴)[۱۹] و جیل[12] (۱۹۷۴)[۲۰] در روندیابی سیلاب با استفاده از مدل غیرخطی ماسکینگام، معادلات را به ترتیب مطابق معادله‌های ۳ و ۴ به کار بردند:

$$S_t = K[XI_t + (۱ - X)O_t]^m \qquad (۳)$$

$$S_t = K[XI_t^m + (۱ - X)O_t^m] \qquad (۴)$$

در مدل ماسکینگام پارامتر m به‌عنوان توان برای درنظرگرفتن 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 درنظرگرفتن معادله‌ی ۳ می‌توان معادله‌ی زیر را استخراج کرد:

$$O_t = (\frac{۱}{۱ - X})(\frac{S_t}{K})^{\frac{۱}{m}} - (\frac{X}{۱ - X})I_t \qquad (۵)$$

www.SID.ir

Archive of SID

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

$$\frac{\Delta s_t}{\Delta t} = -(\frac{1}{1-X})(\frac{S_t}{K})^{\frac{1}{m}} + (\frac{1}{1-X})I_t \quad (۶)$$

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

$$S_{t+1} = S_t + \Delta S_t \quad (۷)$$

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: درنظرگرفتن مقدار اولیه‌یی برای سه پارامتر 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.

۱.۲. الگوریتم نوین سنجاقک (DA)

ارائه‌ی یک راه‌حل بهینه که بتواند مسائل با پیچیدگی بالا را با مناسب‌ترین زمان و نتیجه‌ی محتمل به‌دست آورد، دغدغه‌ی بسیاری ازمحققان بوده است. از این‌رو الگوریتم‌های تکاملی فراکاوشی به‌عنوان یک روش بهینه‌سازی، توجه علاقمندان زیادی را درکاربردهای 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 به‌منظور الگوریتم تکاملی استفاده می‌شود، رفتار سنجاقک به دلیل خاص و تک بودن مورد و اکتشاف بالا مورد توجه قرارگرفته است. سنجاقک‌ها 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 سنجاقک‌ها در حالت ایستا (استراحت) و پویا (حرکت یا جنب‌وجوش) در طبیعت الهام گرفته شده است.[۱۷] سنجاقک‌ها به‌عنوان شکارچیان کوچک تقریباً اکثر حشرات دیگرکه در طبیعت وجود دارند را شکار می‌کنند. حقیقت مورد توجه در الگوریتم سنجاقک 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 سنجاقک موقعیت سنجاقک‌ها را به صورت تصادفی در فضای جست‌وجو ایجاد می‌کند که این موقعیت می‌تواند یک راه‌حل بالقوه در مسائل بهینه‌سازی باشد. هر iامین سنجاقک به‌عنوان برداری از X_i است.

$$X_i = \left[X_i^1, X_i^1, ..., X_i^{nv}\right] \quad (۸)$$

که X_i^j نشان‌دهنده‌ی jامین موقعیت پارامتر از iامین سنجاقک و nv نشان‌دهنده‌ی تعداد متغیرهای مسئله است. فضای جست‌وجو با حد بالا و پایین زیر محدود شده است:

$$X^k(\min) \le X^k \le X^k(\max) \quad (۹)$$

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

$$X^k = X^k(\min) + (X^k(\max) - X^k(\min)) \times rand \quad (۱۰)$$

در نهایت یک تابع برازندگی، موقعیت‌های سنجاقک 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 می‌کنند.[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 به‌صورت زیر است:

$$S_i = -\sum_{j=1}^{N} X - X_j \quad (۱۱)$$

که در آن X نشان‌دهنده‌ی موقعیت ذره‌ی فعلی و X_j نشان دهنده‌ی jاُمین همسایه است.

هم‌ترازی:

$$A_i = \frac{-\sum_{j=1}^{N} V_j}{N} \quad (۱۲)$$

که درآن V_j نشان‌دهنده‌ی سرعت jاُمین همسایه است.

پیوستگی:

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^{N} X_j}{N} - X \quad (۱۳)$$

جذب به سمت شکار:

$$F_i = X^+ - X \quad (۱۴)$$

که در آن X^+ موقعیت شکار است.

دور شدن از دشمن:

$$E_i = X^- + X \quad (۱۵)$$

که در آن X^- نشان‌دهنده‌ی موقعیت دشمن است.

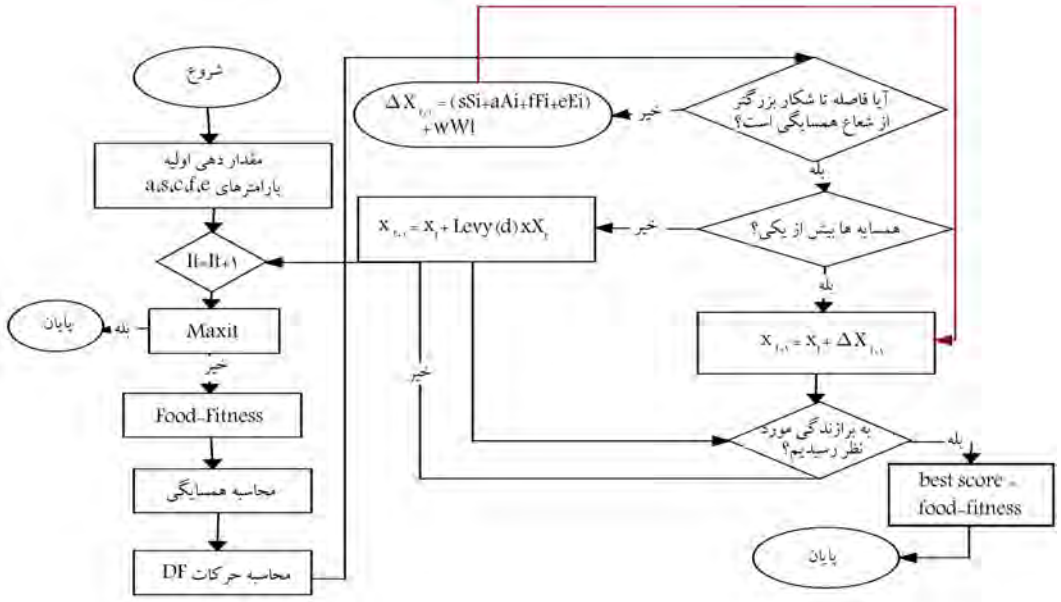
برای بروزکردن موقعیت‌ها دو بردار وجود دارد، گام حرکت و ΔX موقعیت X.

$$\Delta X_{t+1} = (sS_i + aA_i + cC_i + fF_i + eE_i) + wW_t \quad (۱۶)$$

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.

www.SID.ir

Archive of SID



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

برای محاسبه‌ی شعاع همسایگی از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$R = \frac{(X_j{}^k(\max) - X_j{}^k(\min))}{۴} + (X_j{}^k(\max) - X_j{}^k(\min)) \times (\frac{Iter}{Maxiter}) \times ۲) \quad (۱۷)$$

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

$$\Delta X_{t+۱} = (rand \times S_i + rand \times A_i + rand \times C_i) + w\Delta X_t \quad (۱۸)$$

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

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

$$X_{t+۱} = X_t + \Delta X_{t+۱} \quad (۱۹)$$

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

$$X_{t+۱} = X_t + Levy(d) \times X_t \quad (۲۰)$$

فلوچارت شکل ۱، فرایند این الگوریتم را نشان می‌دهد.

۲.۲. مدل ریاضی

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

$$\min SSQ = \sum_{t=۱}^{N}(O_t - O_{ct})^۲ \quad (۲۱)$$

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 K، X و m انتخاب شوند، مقادیر O_t و S_t در مدل ماسکینگام منفی به دست می‌آیند و از این رو از روش تابع غیرمستقیم جریمه به شکل زیر استفاده می‌شود:

$$S^*_{t+۱} = \alpha_۱[S_{t+۱}], if, S^*_{t+۱} \prec ۰ \quad (۲۲)$$

$$O^*_{t+۱} = \alpha_۲[O_{t+۱}], if, O^*_{t+۱} \prec ۰ \quad (۲۳)$$

که در آن $\propto_۱$ و $\propto_۲$ ثابت‌های جریمه، $S^*_{t+۱}$ و $O^*_{t+۱}$ مقدار ذخیره و سیلاب خروجی در بازه‌ی زمانی $t+۱$ بعد از اعمال جریمه هستند و مقادیر مثبت اما غیر واقعی هستند.

۳.۲. معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی مدل‌های مورد نظر از شاخص کمینه‌سازی 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]

$$MSE = \frac{\sum_{i=۱}^{n}(O_i - S_i)^۲}{n} \quad (۲۴)$$

در این معادلات S_i سیلاب خروجی روندیابی شده، $\overline{S}$ میانگین داده‌های محاسباتی، O_i سیلاب خروجی مشاهداتی، $\overline{O}$ 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.

www.SID.ir

Archive of SID

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

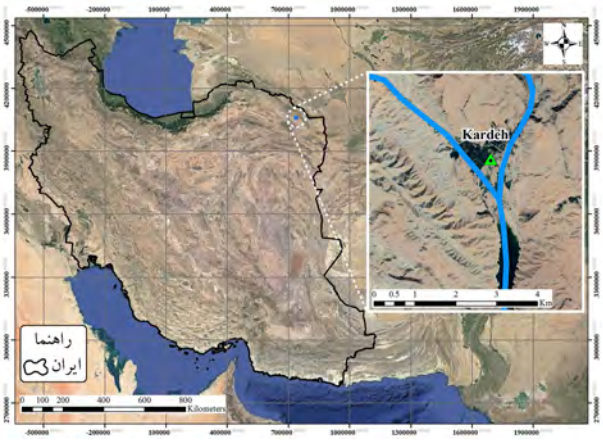
دفعات پردازش	DA		HS		GA	
	مقدار بهینه	زمان پردازش	مقدار بهینه	زمان پردازش	مقدار بهینه	زمان پردازش
۱	۱۸۲/۶۱	۱۸/۶۰	۱۳۱/۲۴	۳	۱۳۰/۳۳	۸/۵۲
۲	۱۹۰/۲۵	۱۹/۲	۱۲۹/۴۴	۲/۸۹	۱۳۴/۸۸	۷/۹۸
۳	۱۲۸/۷۸۶۸	۱۹/۳۵	۱۳۱/۲۵	۲/۸۲	۱۳۵/۱۱	۷/۵۸
۴	۱۲۸/۷۹۸۸	۱۹/۵۵	۱۳۰	۲/۸۰	۱۳۱/۸۷	۷/۲۳
۵	۱۲۸/۷۸۶۴	۱۹/۳۸	۱۳۱/۲۶	۲/۸۲	۱۳۳/۰۵	۷/۳۹
۶	۱۲۸/۷۸۶۷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

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 می‌توان عملکرد الگوریتم‌های مختلف را در به‌دست آوردن مقادیر بهینه‌ی پارامترهای معادله‌ی ماسکینگام غیرخطی بررسی کرد. هم‌چنین انواع روش‌های فراکاوشی 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 الگوریتم‌های مورد مطالعه در برآورد پارامترهای معادله‌ی ماسکینگام غیرخطی در مدل روندیابی سیلاب، رودخانه‌ی کارده به‌عنوان یک مثال واقعی مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۲). حوضه‌ی آبریز کارده در شرق ناحیه هزار مسجد ـ کپه داغ واقع است و یکی از زیرحوضه‌های حوضه‌ی آب‌ریز اصلی کشف‌رود است. بالاترین نقطه‌ی ارتفاعی در شمال غرب حوضه ۲۹۷۷ متر از سطح دریا و پایین‌ترین نقطه‌ی ارتفاعی در خروجی حوضه و در پایین‌دست آبادی کارده ۱۲۰۰ متر است. متوسط بارندگی در بخش جنوبی حوضه ۳۷۴/۲ میلی‌متر و در ارتفاعات بخش شمالی به ۴۵۰ میلی‌متر می‌رسد. داده‌های مورد بررسی در این پژوهش سیلاب دوروزه‌ی مشاهداتی در تاریخ ۱۳۷۱/۰۲/۰۷ تا ۱۳۷۱/۰۲/۰۸ به‌صورت ۶ ساعته است که در دو ایستگاه کوشک‌آباد و کارده برداشت شده است.



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

۳. نتایج و بحث

پیش‌تر گفته شد که در مطالعه‌ی حاضر برای ارزیابی مقادیر بهینه‌ی پارامترهای K، X و m در مدل ماسکینگام غیرخطی، کمینه‌سازی مجموع مربعات باقیمانده‌ها (SSQ) بین دبی خروجی‌های واقعی و روندیابی شده به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد. نتایج پارامترهای بهینه‌ی به‌دست آمده از الگوریتم‌های مورد بررسی برای رودخانه‌ی ویلسون در جدول ۱ و جدول ۲ آورده شده است.

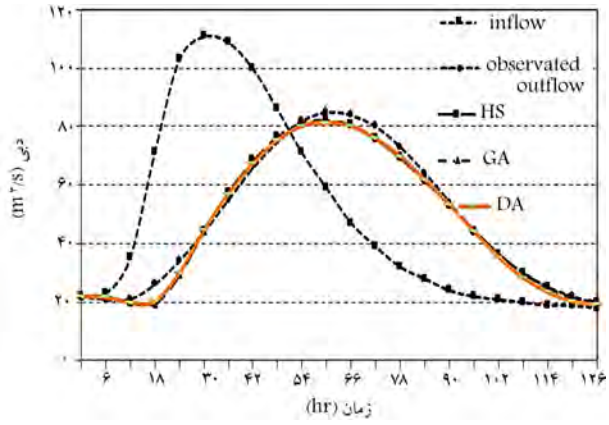
همان‌طورکه در جدول ۱ مشاهده می‌شود الگوریتم‌های فراکاوشی مورد استفاده توانسته‌اند SSQ را به مقدار بهینه نزدیک‌تر کنند. شکل ۳ هیدروگراف خروجی

www.SID.ir

Archive of SID

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

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



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

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

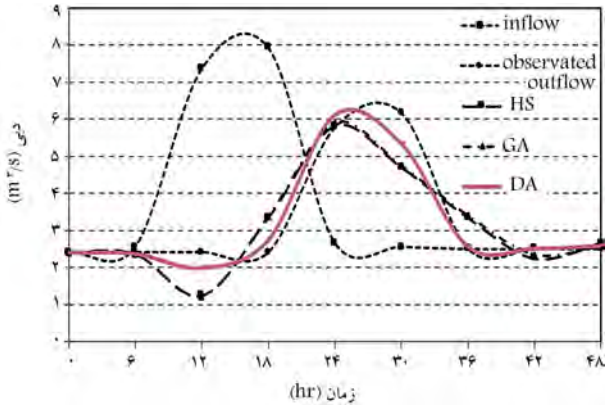
رودخانه‌ی ویلسون نشان می‌دهد. همان‌طورکه درجدول ۴ مشاهده می‌شود، الگوریتم DA درکمینه‌سازی مجموع مربعات باقیمانده‌ها (SSQ) با (۵/۸۵۳۹۲۹) MSEو (۱۲۸/۷۸۶۲) SSQعملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های HS و GA داشته‌اند. نتایج پارامترهای بهینه‌ی به‌دست آمده از الگوریتم‌های مورد بررسی برای رودخانه‌ی کارده درجدول ۵ آمده است. همان‌طورکه درجدول ۵ مشاهده می‌شود، الگوریتم‌های

www.SID.ir

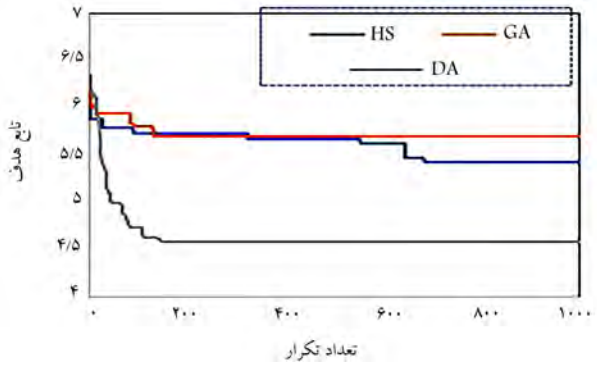
Archive of SID

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

زمان (ساعت)	دبی (m^3/s)		دبی خروجی روندیابی شده (m^3/s)		
	ورودی	خروجی مشاهداتی	DA	GA	HS
۰	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱	۲/۴۱
۶	۲/۵۶	۲/۴۱	۲/۳۸۰	۲/۳۶۵	۲/۳۷۰
۱۲	۷/۳۷	۲/۴۱	۱/۹۹۷	۱/۲۱۲	۱/۲۴۹
۱۸	۷/۹۳	۲/۴۱	۲/۷۵۰۴	۳/۳۸۱	۳/۳۵۷
۲۴	۲/۶۶	۵/۷۷	۶/۱۱۵	۵/۹۱۳	۵/۸۲۴
۳۰	۲/۵۶	۶/۱۶	۵/۳۴۱	۴/۷۴۸	۴/۶۹۱
۳۶	۲/۵	۲/۵	۲/۵۶۵	۳/۴۰۱	۳/۳۳۶
۴۲	۲/۵	۲/۵	۲/۵۱۹	۲/۳۴۴	۲/۲۴۸
۴۸	۲/۵	۲/۵	۲/۵۱۹	۲/۵۸۰	۲/۶۶۹



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



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

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

جدول ۷. شاخص‌های آماری مورد بررسی برای رودخانه‌ی کارده.

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

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.

۴. نتیجه‌گیری

برآورد پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی با استفاده از روش سعی و خطاکاری دشوار و با محاسبات طولانی است. در سال‌های اخیر از روش‌های گوناگونی برای تخمین این پارامترها استفاده شده است. روش‌های فراکاوشی از راه‌حل‌هایی بوده‌اند که توانسته‌اند در تخمین این پارامترها موفق عمل کنند. در مطالعه‌ی حاضر الگوریتم نوین سنجاقک در تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی به کارگرفته شد. از سری داده‌های مشاهداتی دو مطالعه‌ی موردی شامل رودخانه‌ی ویلسون و رودخانه‌ی کارده استفاده شد. برای بررسی عملکرد DA، نتایج حاصل از اجرای آن با الگوریتم GA و HS مقایسه شد. در این پژوهش به‌منظور برآورد مقادیر بهینه‌ی پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی در روندیابی سیلاب ابتدا مثال آزمایشی که به‌عنوان مورد مطالعاتی توسط پژوهشگران استفاده شده است، حل شد. نتایج حاکی از بالا بودن دقت تخمین الگوریتم DA بوده است.

در دومین مورد مطالعاتی که روندیابی یک سیل واقعی است، پارامترهای آماری به‌دست آمده برای رودخانه‌ی کارده توسط الگوریتم DA برابر با MSE(۰/۵۰۵۹) و SSQ (۴/۵۵۱) بود که حاکی از عملکرد مناسب این الگوریتم در برآورد مقادیر بهینه‌ی پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی در روندیابی سیلاب است. درنهایت، 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 روندیابی جریان با مدل ماسکینگام توصیه می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

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 Hamedi, 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).

www.SID.ir