نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و یکم، شماره سوم، ۱۳۹۳
http://jwsc.gau.ac.ir

بهینه‌سازی پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی با استفاده از الگوریتم کلونی زنبورعسل

*مهدی وفاخواه[۱]، علی دستورانی[۲] و علیرضا مقدم‌نیا[۳]

[۱]استادیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشگاه تربیت مدرس، [۲]دانشجوی کارشناسی‌ارشد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشگاه تربیت مدرس، [۳]دانشیار گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۹۱/۸/۲۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۲/۲۰

چکیده

روندیابی سیلاب به‌عنوان یک روش ریاضی برای پیش‌بینی بزرگی و سرعت یک موج سیلاب در مسیر جریان رودخانه می‌باشد و پایه اساسی برای انجام پهنه‌بندی سیلاب، پیش‌بینی سیلاب و طراحی سازه‌های رودخانه‌ای را فراهم می‌کند. یکی از روش‌های رایج و مهم روندیابی سیل، مدل ماسکینگام می‌باشد. در این پژوهش بهینه‌سازی پارامترهای مدل ماسکینگام (K، x و m) توسط الگوریتم کلونی زنبورعسل با استفاده از داده‌های ۹ هیدروگراف سیلاب هم‌زمان ثبت شده در ایستگاه‌های آب‌سنجی ملاثانی و اهواز رودخانه کارون مورد بررسی قرار گرفته است. برای ارزیابی کارآیی روش از نمایه‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد خطای نسبی (RE)، میانگین مطلق خطا (MBE)، میانگین انحراف خطا (MAE)، ضریب ناش- ساتکلیف (NS)، ضریب تبیین (R^2) و همچنین مقایسه کیفی هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و برآوردی استفاده شد. نتایج نشان داد که الگوریتم‌های کلونی زنبورعسل و ژنتیک با میانگین ریشه میانگین مربعات خطای ۷۹/۸۵ مترمکعب بر ثانیه در مقایسه با روش گرافیکی با میانگین ریشه میانگین مربعات خطای ۸۸/۰۷ متر مکعب بر ثانیه عملکرد بهتری در محاسبه پارامترهای مدل ماسکینگام دارد. مقایسه دبی اوج هیدروگراف‌ها نشان‌دهنده دقت بالاتر روش گرافیکی در برآورد دبی اوج هیدروگراف با میانگین خطای ۳۱/۲ مترمکعب بر ثانیه بوده و الگوریتم ژنتیک و الگوریتم کلونی زنبورعسل به‌ترتیب با میانگین خطای ۵۸/۸ و ٦٢/١٨ مترمکعب بر ثانیه دبی اوج هیدروگراف را برآورد نموده‌اند.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، الگوریتم کلونی زنبورعسل، روندیابی سیل، مدل ماسکینگام، رودخانه کارون

* مسئول مکاتبه: vafakhah@modares.ac.ir

مقدمه

امروزه افزایش رشد جمعیت و در نتیجه بالا رفتن نیازهای غذایی، مسکن و نیازهای تفریحی از یک‌سو و از سوی دیگر، وجود زمین‌های حاصل‌خیز و امکانات دسترسی به آب در حاشیه رودخانه‌ها باعث افزایش جمعیت در این مناطق شده است (مهدوی، ۲۰۰۹). این روند با توجه به گسترش مناطق سیل‌خیز، به‌دلیل ساخت و سازهای بی‌رویه در حریم رودخانه‌ها و سیلاب‌دشت‌ها رو به افزایش است. منظور اصلی و اساسی از روندیابی سیل در مسایل مهندسی، شناخت وضعیت تراز سطح آب و دبی در مسیر رودخانه یا در دریاچه پشت سد، بدون اندازه‌گیری این مقادیر در هنگام وقوع حادثه سیل است. کاربرد نتایج به‌دست آمده از روندیابی سیل را می‌توان در طراحی و برنامه‌ریزی حجم مخازن سد، تعیین بزرگی و ظرفیت خروجی سرریزها، اندازه و ظرفیت خروجی‌ها در سدها، اندازه و بزرگی سرریزها در سدهای بدون دریچه و یا با دریچه، تعیین سطح تراز آب در مخازن دریاچه سدها برای تولید برق‌آبی، ایجاد و طراحی سدها و بندها و سیل‌گیرها و طراحی آبگیرها، مسایلی مانند سیلابی شدن تراس‌های رودخانه‌ای و غرقاب شدن اراضی کشاورزی و نقاط مسکونی و شهرها، ایجاد دریاچه‌های مصنوعی و تفریحی و توسعه و بهبود رودخانه‌ها جستجو نمود (نجمائی، ۱۹۸۹). روندیابی با دقت کم و تقریبی سیل، دبی اوج و زمان اوج سیل در بازه موردنظر را بیش‌تر و یا کم‌تر از میزان واقعی برآورد می‌نماید. در نتیجه سازه‌ها و اقدامات نامتناسب و نامناسب طراحی و اجرا می‌گردد، که از طرفی باعث افزایش هزینه‌های ساخت سازه‌ها و یا باعث تخریب سازه‌ها و خسارات جانی و مالی در اطراف شهرها می‌گردد. مهم‌تر از همه دیدگاه مردم نسبت به اقدامات انجام شده تغییر نموده و باعث نبود اعتماد و مشارکت در طرح‌های مهندسی رودخانه و پیش‌بینی سیلاب می‌گردد. بنابراین ضرورت دارد تا حد ممکن با استفاده از فناوری‌های پیشرفته و علم روز و روش‌های جدید بهینه‌سازی روندیابی دقیق سیل در مقطع موردنظر انجام گیرد تا با اطمینان کافی از عملیات و برنامه‌ریزی مهندسی رودخانه، پیش‌بینی سیل و تخصیص اعتبار مناسب برای اجرا از هدررفت منابع و خسارت‌های ناشی از سیلاب جلوگیری نمود.

به‌منظور برآورد پارامترهای مدل ماسکینگام در بیش‌تر منابع از مثال ویلسون (۱۹۷٤) استفاده کرده‌اند که استفاده از یک مثال مقایسه روش‌های جدید را با روش‌های قبلی فراهم آورده تا با برآورد پارامترهای ماسکینگام برای این مثال با روش‌های مختلف در نهایت بتوان روشی را بهتر معرفی کرد.

با مرور منابع مشخص می‌شود که روش گرافیکی[1] توسط آلداما (۱۹۹۰)، کارهان (۲۰۰۹)، گلگنیس و سرانو (۲۰۰۰)، الحمود و اسن (۲۰۰٦) و دهقانی (۲۰۰٤)، برنامه‌ریزی خطی[2] توسط کارهان (۲۰۰٤)، انواع الگوریتم ژنتیک[3] توسط موهان (۱۹۹۷)، چن و یانگ (۲۰۰۷) و ونگ و همکاران (۲۰۰۹)، الگوریتم جستجوی هارمونی توسط کیم و همکاران (۲۰۰۱)، الگوریتم ازدحام ذرات توسط چائو و چانگ (۲۰۰۹) و ونگ و همکاران (۲۰۱۰)، الگوریتم کلونی انتخابی ایمنی توسط لئو و زای (۲۰۱۰) و الگوریتم نورد شبیه‌سازی شده توسط محمدی‌قلعه‌نی و همکاران (۲۰۱۰)، به‌منظور برآورد پارامترهای مدل ماسکینگام استفاده شده است و هر کدام از پژوهشگران الگوریتم مورد بررسی را مناسب ارزیابی نموده‌اند. روش بهینه‌سازی الگوریتم کلونی زنبورعسل[4] تاکنون به‌منظور برآورد پارامترهای مدل ماسکینگام استفاده نشده است. از این‌رو در این پژوهش هدف مقایسه میزان کارایی الگوریتم‌های زنبورعسل، ژنتیک، کلونی مورچگان[5]، برنامه‌ریزی خطی و روش گرافیکی برای محاسبه پارامترهای مدل روندیابی سیل ماسکینگام در بازه ملاثانی- اهواز رودخانه کارون می‌باشد. تا با انتخاب روشی مناسب، بتوان هیدروگراف سیل با حداقل خطا نسبت به مقادیر واقعی به‌دست آورد.

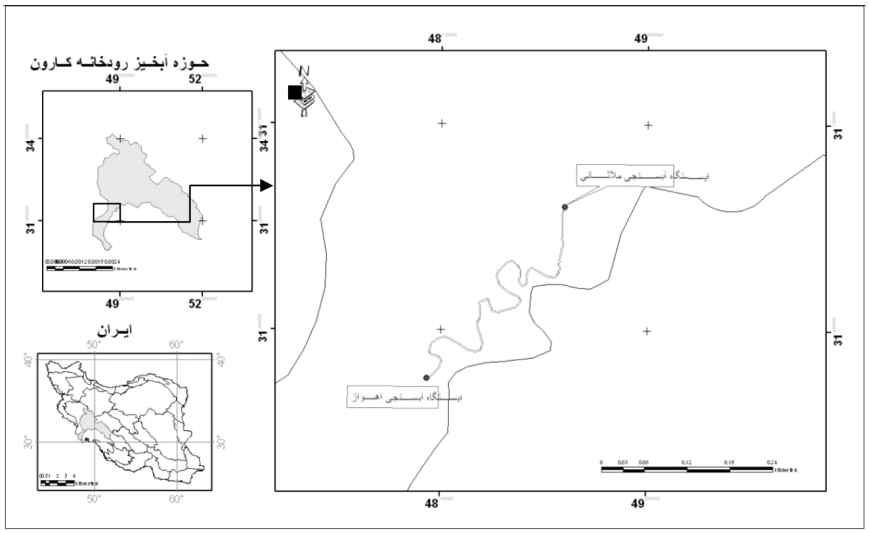
مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی منطقه پژوهش: با بررسی بازه‌های رودخانه کارون، بازه حدفاصل ایستگاه‌های آب سنجی ملاثانی و اهواز به طول ٦۳ کیلومتر و به‌دلیل داشتن آمار مشترک کافی (٤۲ سال) و نبود شاخه‌های فرعی ورودی و خروجی انتخاب گردید. در مورد بهترین طول روندیابی با دقت مناسب سینگ (۱۹۹٦)، در ٤ بازه ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ٤۰ کیلومتری مطالعه نمود و نشان داد که طول بازه اهمیت چندانی در دقت نتایج روندیابی ندارد، بلکه انتخاب ضرایب و به‌خصوص در نظر گرفتن دشت سیلابی از اهمیت بیش‌تری برخوردار می‌باشد که این نتایج می‌تواند متأثر از خصوصیات فیزیکی حوزه آبخیز و بستر رودخانه باشد. جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های نام‌برده و شکل ۱ موقعیت بازه پژوهش را بر روی نقشه ایران نشان می‌دهند.

1- Graphical Method
2- Linear Programming (LP)
3- Genetic Algorithm (GA)
4- Artificial Bee Colony (ABC)
5- Ant Colony Algorithm (ACO)

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های آب‌سنجی (مرکز تحقیقات منابع آب، ۲۰۱۱).

نام ایستگاه	کد ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	مساحت حوضه (کیلومترمربع)	سال تاسیس	تعداد سال‌های آماری
ملاثانی	۲۱۳۰۸	٤٨ درجه و ٥٣ دقیقه	٣١ درجه و ٣٥ دقیقه	٢٨	٥٧٤٩٠	١٣٤٦	٤٢
اهواز	۲۱۳۰۹	٤٨ درجه و ٤٠ دقیقه	٣١ درجه و ٢٠ دقیقه	٢٠	٥٨١٨٠	١٣٢٩	٤٤



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی بازه پژوهش.

برای به‌دست آوردن دبی سیلاب از آمار سال‌های مشترک ۸۸-۱۳٤۲ ایستگاه‌های آب‌سنجی ملاثانی و اهواز استفاده شده است که پس از بررسی‌های لازم تعداد ۹ هیدروگراف سیل ورودی و خروجی به بازه ملاثانی- اهواز با فواصل اندازه‌گیری ۲ ساعت با توجه به حداقل‌سازی خطای ناشی از افزایش آب در اثر بارندگی مستقیم بر روی سطح رودخانه و کاهش دبی آب در اثر برداشت آب از رودخانه برای مصارف کشاورزی در بازه موردنظر از میان حدود ۲۸ هیدروگراف سیل موجود انتخاب گردید. به این منظور ابتدا هیدروگراف‌های سیل ماه‌های با حداقل برداشت آب برای مصارف کشاورزی (آذر، دی و بهمن) (کاویانی، ۱۹۹۳) از بین کل هیدروگراف‌های موجود تفکیک شد و در

ادامه با بررسی آمار هواشناسی و تاریخ هیدروگراف‌های سیل، هیدروگراف‌هایی که با بارش هم‌زمان بودند به‌منظور اجتناب از خطای ناشی از افزایش دبی در اثر بارش مستقیم بر روی سطح آب و کاهش دبی در اثر پمپاژ آب برای کشاورزی از مجموع هیدروگراف‌ها جدا گردید.

مدل روندیابی ماسکینگام: روندیابی سیل در کانال‌های باز با روش‌ها و مدل‌های مختلفی قابل انجام است. روش ماسکینگام در هیدرولوژی کاملاً نهادینه شده و همچنین نیازمند داده‌های کمی در مقایسه با مدل‌های هیدرولیکی پیچیده می‌باشد (چن و یانگ، ۲۰۰۷). روش ماسکینگام اولین بار توسط مک‌کارتی (۱۹۳۸) در مطالعات کنترل سیل در رودخانه ماسکینگام ایالت اوهایو[1] اجرا شد. شکل عمومی روش ماسکینگام در رابطه ۱ آورده شده است.

$$S_t = K\left[xI_t + (1-x)Q_t\right]^m \qquad (1)$$

که در آن، S_t: ذخیره مطلق کانال در زمان t (مترمکعب)، I_t و Q_t به‌ترتیب دبی ورودی و خروجی در زمان t (مترمکعب بر ثانیه)، K: ثابت زمانی ذخیره برای رودخانه موردنظر (معادل زمان انتقال موج) (ساعت)، x: یک فاکتور وزنی بین صفر و ۰/۵ بوده که اثر مقدار نسبی دبی ورودی و خروجی را به‌صورت بی‌بعد بیان می‌کند و m: پارامتری است که به رابطه درجه آزادی بیش‌تری می‌دهد. برای سادگی کار در بیش‌تر مواقع آن را مساوی یک قرار می‌دهند. برای استفاده از مدل روندیابی سیل ماسکینگام در یک بازه از رودخانه لازم است ابتدا پارامترهای K، x و m آن بازه تعیین شود، که با استفاده از آمار ثبت شده جریان ورودی و خروجی در بازه موردنظر سال‌های گذشته قابل تعیین می‌باشد (کاراهان، ۲۰۰۹).

بهینه‌یابی پارامترهای مدل ماسکینگام با الگوریتم کلونی زنبورعسل: الگوریتم کلونی زنبورعسل (ABC) توسط کارابگا و باستورک (۲۰۰۷) براساس رفتار هوشمند زنبورعسل، برای بهینه‌سازی پارامترها ارایه شد. این الگوریتم یک الگوریتم بهینه‌سازی است و رفتار کاوشی کلونی زنبورها را برای مسایل بهینه‌سازی بدون محدودیت شبیه‌سازی می‌کند.

در یک کلونی زنبورعسل واقعی، وظایفی وجود دارد که توسط زنبورهای تخصص‌یافته انجام می‌شود. این زنبورهای متخصص تلاش می‌کنند تا میزان شهد ذخیره شده در کندو را با تقسیم کار و خود سازماندهی مؤثر حداکثر کنند. مدل کمینه انتخاب جستجوی غذا توسط گروه‌های هوشمند زنبور

1- Ohaio

در یک کلونی زنبورعسل یا به اختصار الگوریتم ABC، شامل سه نوع زنبور است: زنبورهای کارگر، زنبورهای ناظر و زنبورهای پیشاهنگ (یا دیده‌ور). نصف کلونی شامل زنبورهای کارگر است و نصف دیگر آن شامل زنبورهای ناظر است. زنبورهای کارگر مسئول بهره‌برداری از منابع شهدی هستند که قبلاً کشف شده‌اند. همچنین اطلاعات لازم را به سایر زنبورهای منتظر (زنبورهای ناظر) در کندو درباره کیفیت مکان مواد غذایی که در حال استخراج است، می‌رسانند. زنبورهای ناظر در کندو می‌مانند و مطابق با اطلاعاتی که زنبورهای کارگر به اشتراک گذاشته‌اند درباره یک منبع غذایی برای بهره‌برداری شدن تصمیم‌گیری می‌کنند. زنبورهای پیشاهنگ به‌صورت تصادفی محیط را برای یافتن یک منبع غذایی جدید براساس یک انگیزه درونی یا تصادفی جستجو می‌کنند. مراحل اصلی الگوریتم ABC که این رفتار را شبیه‌سازی می‌کند، به‌منظور بهینه‌سازی پارامترهای مدل ماسکینگام به‌شرح ذیل می‌باشد:

مرحله اول- مقداردهی اولیه به موقعیت‌های منابع غذایی، با انتخاب تصادفی پارامترهای مدل ماسکینگام و تعیین مقدار تابع برازش پارامترها (رابطه ۱)، (در این مسأله سه پارامتر x، K و m به‌عنوان یک منبع غذایی شناخته می‌شوند $x_i = (i = ۱,...,SN)$، که در آن SN تعداد منابع غذایی است)، راه‌حل‌ها به‌صورت تصادفی تولید می‌شوند.

مرحله دوم- هر زنبور کارگر یک منبع غذایی جدید (رابطه ۲) در محدوده منبع غذایی خود تولید می‌کند و منبع بهتر را استخراج می‌کند.

$$v_{ij} = x_{ij} + \varphi_{ij} (x_{ij} - x_{kj}) \qquad (۲)$$

که در آن، φ_{ij}: یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه [۱،۱-] است که تولید موقعیت منابع غذایی همسایه را در اطراف x_{ij} کنترل می‌کند، k شاخص راه‌حل است که به‌صورت تصادفی از کلونی انتخاب شده است.

$j = ۱,...,D$ و D محدوده مسأله است. بعد از تولید v_i این راه‌حل جدید با x_i مقایسه می‌شود و زنبور کارگر منبع بهتر را استخراج می‌کند.

مرحله سوم- هر زنبور پیشاهنگ یک منبع را وابسته به کیفیت راه‌حلش انتخاب می‌کند و یک منبع غذایی جدید را در مکان منبع غذایی انتخاب شده تولید می‌کند و منبع بهتر را استخراج می‌کند. یک زنبور ناظر یک منبع غذایی را با احتمال رابطه ۳ انتخاب می‌کند و منبع جدیدی را در مکان منبع غذایی انتخاب شده توسط رابطه ۲ تولید می‌کند و به همان شکل روش زنبور کارگر، منبع بهتر برای استخراج شدن مورد تصمیم‌گیری قرار می‌گیرد.

$$p_i = \frac{fitness_i}{\sum_{j=1}^{SN} fitness_i} \quad (۳)$$

که در آن، $fitness_i$: میزان شایستگی راه‌حل x_i است.

مرحله چهارم- تعیین منبعی که باید متروک شود و زنبورهای کارگر آن به‌عنوان دیده‌ور برای جستجوی منابع غذایی جدید تخصیص داده شوند.

بعد از آن‌که تمام زنبورهای ناظر در منابع توزیع شدند، منابع مورد بررسی قرار می‌گیرند که آیا باید ترک شوند یا خیر. اگر تعداد چرخه‌هایی که یک منبع نمی‌تواند بهبود یابد بزرگ‌تر از محدوده از قبل تعیین شده باشد آن منبع به‌عنوان منبع تمام شده در نظر گرفته می‌شود. زنبور کارگر مربوط به منبع تمام شده یک زنبور دیده‌ور شده و جستجوی تصادفی را در محدوده مسأله به‌وجود می‌آورد. این مرحله توسط رابطه ٤ صورت می‌گیرد.

$$x_{ij} = x_j min + (x_j max - x_j min)*rand \quad (٤)$$

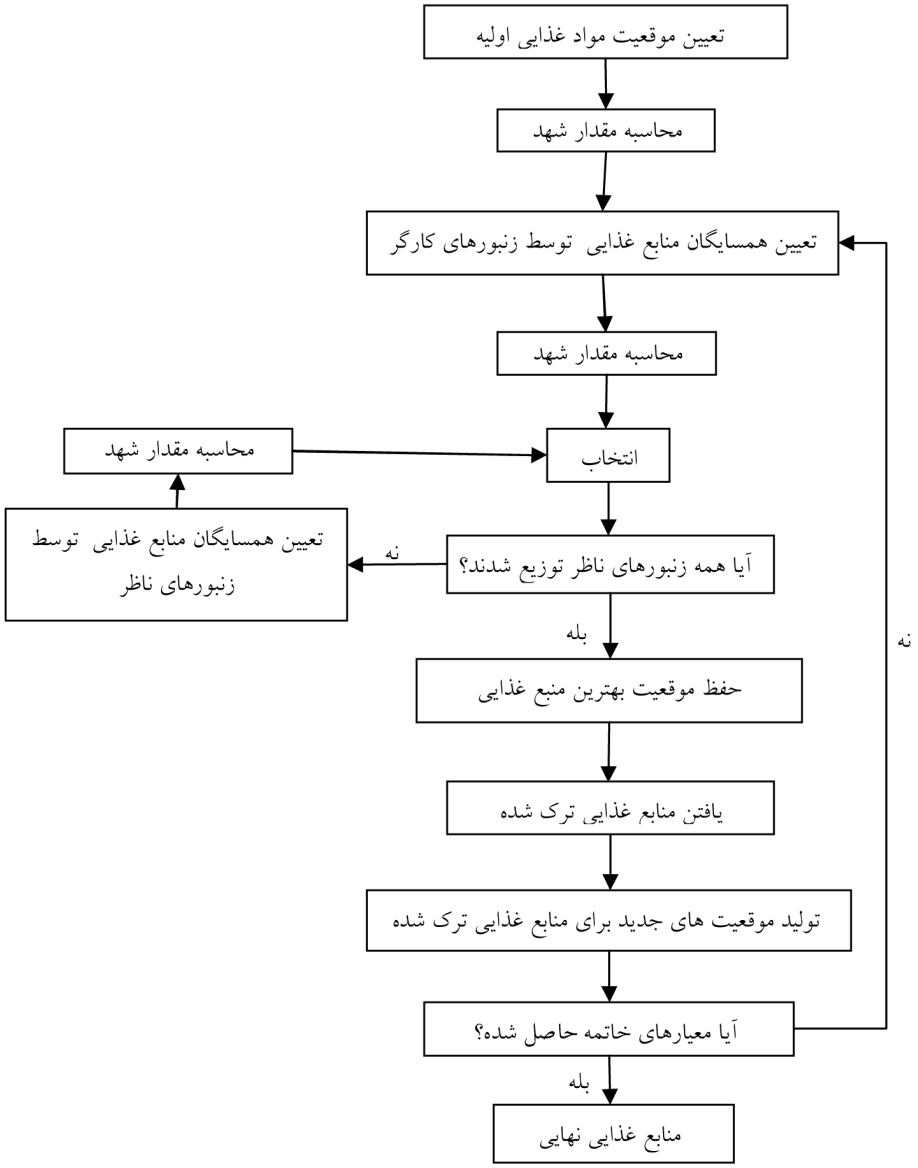
مرحله پنجم- به‌خاطر سپردن بهترین منبع غذایی پیدا شده تاکنون با توجه به مقدار تابع برازش.

مرحله ششم- تکرار مرحله‌های ۲ تا ۵ تا زمانی که معیار توقف ارضا گردد (تعداد تکرار حلقه به‌عنوان معیار توقف در این مسأله می‌باشد).

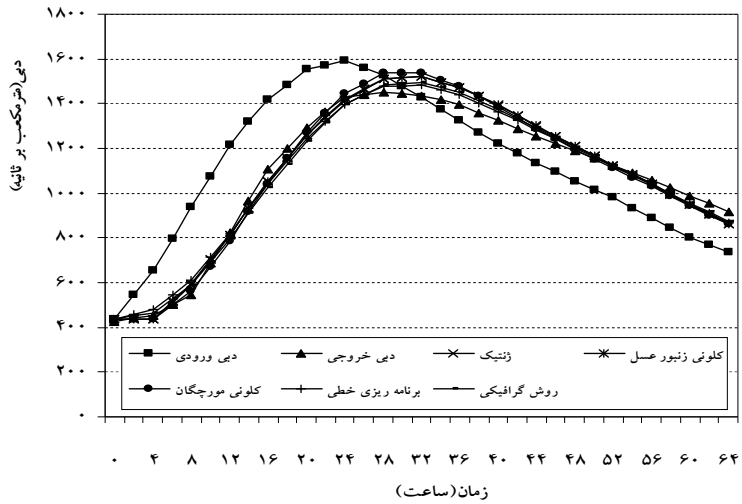
در پایان توقف الگوریتم، بهترین منبع غذایی (پارامترهای مدل ماسکینگام) که در مرحله پنجم ذخیره شده به‌عنوان جواب بهینه مسأله موردنظر می‌باشد. این الگوریتم به کمک نرم‌افزار Matlab R2009a نوشته و محاسبه گردید.

نتایج و بحث

اطلاعات و شکل یک نمونه هیدروگراف در جدول ۲ و شکل ۳ آورده شده است. آنالیز آماری هیدروگراف سیل مورخه ۱۷ تا ۱۳٦۰/۱۰/۱۹ نشان می‌دهد که براساس نمایه‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا، درصد خطای نسبی، میانگین مطلق خطا، میانگین انحراف خطا، ضریب ناش- ساتکلیف، ضریب تبیین و خطای دبی پیک، به ترتیب برنامه‌ریزی خطی (LP)، روش گرافیکی (Graphical)، روش‌های الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم کلونی زنبورعسل (ABC) و الگوریتم کلونی مورچگان (ACO) برآورد بهتری دارند. همچنین تمامی روش‌های مورد بررسی با ۲ ساعت تاخیر زمانی، دبی اوج هیدروگراف را برآورد کرده‌اند.



شکل ۲- فلوچارت الگوریتم کلونی زنبورعسل.



شکل ۳- هیدروگراف‌های خروجی واقعی و محاسبه‌هایی برای سیل مورخ ۱۷ تا ۱۳۶۰/۱۰/۱۹.

جدول ۲- هیدروگراف‌های واقعی و محاسبه‌هایی و نمایه‌های آماری سیل مورخ ۱۷ تا ۱۳۶۰/۱۰/۱۹.

زمان (ساعت)	دبی ورودی واقعی (I) (مترمکعب بر ثانیه)	دبی خروجی واقعی (Q) (مترمکعب بر ثانیه)	هیدروگراف‌های محاسباتی با روش (مترمکعب بر ثانیه)				
			الگوریتم ژنتیک (GA)	الگوریتم کلونی زنبورعسل (ABC)	الگوریتم مورچگان (ACO)	برنامه‌ریزی خطی (LP)	گرافیکی (Graphical)
۰	٤٣٩	٤٢٨	٤٣٩	٤٣٩	٤٣٩	٤٣٩	٤٣٩
۲	٥٤٨	٤٤١	٤٣٩	٤٣٩	٤٣٩	٤٥٩	٤٥١
٤	٦٥٦	٤٥٣	٤٣٩	٤٣٩	٤٣٩	٤٧٨	٤٦٤
٦	٧٩٦	٥٠١	٥١٥	٥١٦	٥٠١	٥٤٦	٥٢٨
٨	٩٣٦	٥٤٨	٥٩١	٥٩٣	٥٦٣	٦١٤	٥٩١
١٠	١٠٧٧	٦٨٧	٧٠٢	٧٠٤	٦٧٤	٧١٦	٦٩٣
١٢	١٢١٨	٨٢٥	٨١٣	٨١٥	٧٨٤	٨١٨	٧٩٥
١٤	١٣١٩	٩٦٧	٩٣٤	٩٣٥	٩١٤	٩٣١	٩١١
١٦	١٤١٩	١١٠٨	١٠٥٥	١٠٥٥	١٠٤٤	١٠٤٤	١٠٢٧
١٨	١٤٨٦	١٢٠١	١١٥٨	١١٥٧	١١٥٨	١١٤٤	١١٣١
٢٠	١٥٥٣	١٢٩٣	١٢٦٠	١٢٥٨	١٢٧٢	١٢٤٥	١٢٣٥
٢٢	١٥٧٤	١٣٦٢	١٣٤٠	١٣٣٧	١٣٥٨	١٣٢٢	١٣١٦
٢٤	١٥٩٤	١٤٣١	١٤١٩	١٤١٥	١٤٤٤	١٣٩٨	١٣٩٧
٢٦	١٥٦٢	١٤٤٢	١٤٦٦	١٤٦٢	١٤٩١	١٤٣٨	١٤٤١

ادامه جدول ۲-

زمان (ساعت)	دبی ورودی واقعی (I) (مترمکعب بر ثانیه)	دبی خروجی واقعی (Q) (مترمکعب بر ثانیه)		هیدروگراف‌های محاسباتی با روش (مترمکعب بر ثانیه)				
				الگوریتم ژنتیک (GA)	الگوریتم کلونی زنبورعسل (ABC)	الگوریتم مورچگان (ACO)	برنامه‌ریزی خطی (LP)	گرافیکی (Graphical)
۲۸	۱۵۲۹	۱٤٥۳		۱٥۱۲	۱٥۰۹	۱٥۳۸	۱٤۷۸	۱٤۸٥
۳۰	۱٤۸۰	۱٤٤٥		۱٥۱٦	۱٥۱٤	۱٥۳۸	۱٤۸۰	۱٤۹۰
۳۲	۱٤۳۱	۱٤۳۷		۱٥۲۱	۱٥۱۹	۱٥۳۹	۱٤۸۳	۱٤۹٤
۳٤	۱۳۷۷	۱٤۱۸		۱٤۹۷	۱٤۹٦	۱٥۰۸	۱٤٦۱	۱٤۷۲
۳٦	۱۳۲۳	۱۳۹۸		۱٤۷٤	۱٤۷٤	۱٤۷۸	۱٤۳۸	۱٤٥۰
۳۸	۱۲۷۲	۱۳٦۱		۱٤۳۳	۱٤۳٤	۱٤۳۲	۱٤۰۲	۱٤۱۳
٤۰	۱۲۲۱	۱۳۲۳		۱۳۹۳	۱۳۹٥	۱۳۸۷	۱۳٦٥	۱۳۷٥
٤۲	۱۱۷۹	۱۲۸۹		۱۳٤۷	۱۳٤۸	۱۳۳۷	۱۳۲٤	۱۳۳۳
٤٤	۱۱۳۷	۱۲٥٤		۱۳۰۰	۱۳۰۲	۱۲۸۸	۱۲۸۳	۱۲۹۱
٤٦	۱۰۹٦	۱۲۲۲		۱۲٥٥	۱۲٥۷	۱۲٤۲	۱۲٤۱	۱۲٤۹
٤۸	۱۰٥٤	۱۱۹۰		۱۲۱۰	۱۲۱۲	۱۱۹۷	۱۲۰۰	۱۲۰۷
٥۰	۱۰۱۷	۱۱٥۸		۱۱٦٦	۱۱٦۸	۱۱٥٤	۱۱٦۰	۱۱٦٦
٥۲	۹۸۰	۱۱۲٥		۱۱۲۲	۱۱۲٤	۱۱۱۱	۱۱۲۱	۱۱۲٦
٥٤	۹۳٤	۱۰۹۲		۱۰۸۱	۱۰۸۳	۱۰۷۱	۱۰۷۹	۱۰۸٥
٥٦	۸۸۷	۱۰٥۹		۱۰٤۱	۱۰٤۲	۱۰۳۲	۱۰۳۷	۱۰٤٤
٥۸	۸٤٥	۱۰۲٤		۹۹٥	۹۹۷	۹۸۸	۹۹٤	۱۰۰۰
٦۰	۸۰۳	۹۸۹		۹٥۰	۹٥۲	۹٤٥	۹٥۲	۹٥۷
٦۲	۷۷۱	۹٥٤		۹۰٦	۹۰۷	۹۰۲	۹۱۰	۹۱٥
٦٤	۷۳۸	۹۱۹		۸٦۲	۸٦۲	۸٥۹	۸٦۹	۸۷۳
			K	۰/۸۷٦	۰/٦۷۷	٦/۱۳۸	٦/۹۹	۷/۲٥
پارامترهای محاسباتی مدل ماسکینگام			x	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۱	۰/۲۲۰۷	۰/۰٥٥	۰/۱٥
			m	۱/۲٦۳	۱/۲۹۷	۱/۰۱٤	۱	۱
ریشه میانگین مربعات خطا				٤٥/۳۹	٤٥/٤٦	٥۰/۰۳	۳٥/٥۷	٤۱/۲
درصد خطای نسبی				۱/۰۲٦	۱/۰۲۸	۱/۱۳۱	۰/۸٤۹	۰/۹۳۲
میانگین مطلق خطا				۰/۰۳٦	۰/۰۳٦	۰/۰۳۷	۰/۰۳٤	۰/۰۳٤
میانگین انحراف خطا				۳۸/۱۳	۳۸/۲۹	٤۰/۸۸	۳۲/۸٦	۳٥/۸۹
ضریب ناش- ساتکلیف				۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۷٦	۰/۹۸٦	۰/۹۸٤
ضریب تبیین				۰/۹۸٥	۰/۹۸٥	۰/۹۸٤	۰/۹۸۷	۰/۹۸٥
خطای برآورد دبی پیک				٦۷/۹	٦٦/۲	۸٥/٥	۲۹/۸	٤۱/۱
خطای برآورد زمان دبی پیک				۲	۲	۲	۲	۲

به‌منظور اولویت‌بندی کارایی روش‌های برآورد متغیرهای مدل ماسکینگام مورد استفاده در این پژوهش و با توجه به تعدد هیدروگراف‌های مورد بررسی، میانگین نمایه‌های آماری به‌دست آمده از ۹ هیدروگراف در جدول ۳ آورده شده است تا براساس آن دقت و کارایی روش‌های مورد استفاده بررسی گردد.

جدول ۳- میانگین نمایه‌های آماری ۹ هیدروگراف سیل.

روش‌های بهینه‌سازی	GA	ABC	ACO	LP	Graphical
ریشه میانگین مربعات خطا (مترمکعب بر ثانیه)	۷۹/۸۵	۷۹/۸۵	۸۳/٤۲	۸۰/۷٦	۸۸/۰۷
خطای نسبی (درصد)	۱/۷٤	۱/۷۳	۱/۸۲	۱/۷۵	۱/۸٤
میانگین مطلق خطا (مترمکعب بر ثانیه)	۰/۰٦۸	۰/۰٦٦	۰/۰٦۹	۰/۰۷۲	۰/۰۷
میانگین انحراف خطا (مترمکعب بر ثانیه)	٦۵/٤۲	٦٤/۸۱	٦۸/۱٤	٦۵/٤۷	٦۳/۵۲
ضریب ناش- ساتکلیف	۰/۹٦٦	۰/۹٦٦	۰/۹٦۳	۰/۹٦۵	۰/۹٦۲
ضریب تبیین	۰/۹٦۸	۰/۹۷۱	۰/۹۵۸	۰/۹٦۳	۰/۹۵۹
خطای برآورد دبی حداکثر (مترمکعب بر ثانیه)	۵۸/۸	٦۲/۱۸	٦۹/۵۹	٤٦/٤۳	۳۱/۲
خطای برآورد زمان حداکثر (ساعت)	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۸۸

جدول ۳ نشان می‌دهد که روش‌های مورد استفاده شامل الگوریتم‌های ژنتیک، کلونی زنبورعسل، برنامه‌ریزی خطی و روش گرافیکی، برآوردی نزدیک به هم دارند، اما با توجه به جدول ۳ روش بهینه‌یابی الگوریتم کلونی زنبورعسل با برآورد بهتر متغیرهای مدل ماسکینگام براساس بیش‌تر نمایه‌های آماری ۹ هیدروگراف مورد استفاده شامل ریشه میانگین مربعات خطا با میانگین ۷۹/۸۵ مترمکعب بر ثانیه، درصد خطای نسبی با میانگین ۱/۷۳ درصد، میانگین مطلق خطا با میانگین ۰/۰٦٦ مترمکعب بر ثانیه، میانگین انحراف خطا با میانگین ٦٤/۸۱ مترمکعب بر ثانیه، ضریب تبیین با میانگین ۰/۹۷۱ و ضریب ناش- ساتکلیف با میانگین ۰/۹٦٦ همراه با الگوریتم ژنتیک از دیگر روش‌های مورد استفاده عملکرد بهتری نشان می‌دهد. همچنین روش الگوریتم ژنتیک نیز با ریشه میانگین مربعات خطا با میانگین ۷۹/۸۵ مترمکعب بر ثانیه، درصد خطای نسبی با میانگین ۱/۷٤ درصد، میانگین مطلق خطا با میانگین ۰/۰٦۸ مترمکعب بر ثانیه، میانگین انحراف خطا با میانگین ٦۵/٤۲ مترمکعب بر ثانیه، ضریب تبیین با میانگین ۰/۹٦۸ و ضریب ناش- ساتکلیف با میانگین ۰/۹٦٦ در بیش‌تر نمایه‌های آماری مشابه روش الگوریتم کلونی زنبورعسل می‌باشد. روش برنامه‌ریزی خطی با ریشه میانگین مربعات خطا با

میانگین ۸۰/۷۶ مترمکعب بر ثانیه، درصد خطای نسبی با میانگین ۱/۷۵ درصد، میانگین مطلق خطا با میانگین ۰/۰۷۲ مترمکعب بر ثانیه، میانگین انحراف خطا با میانگین ٦٥/٤٧ مترمکعب بر ثانیه، ضریب تبیین با میانگین ۰/۹٦۳ و ضریب ناش- ساتکلیف با میانگین ۰/۹٦٥ در اولویت سوم قرار می‌گیرد. روش گرافیکی با میانگین نمایه‌های آماری (جدول ۳) در اولویت آخر می‌باشد.

با توجه به تجزیه و تحلیل روش‌های مورد استفاده و نتایج به‌دست آمده به‌منظور برآورد متغیرهای مدل ماسکینگام در مجموع روش الگوریتم کلونی زنبورعسل با وجود سادگی برنامه، حجم پایین برنامه‌نویسی، سرعت بالای محاسبه هر حلقه الگوریتم و سرعت بالای هم‌گرایی، نسبت به سایر الگوریتم‌ها و همچنین دقت بالاتری که در بیش‌تر نمایه‌های آماری ارایه نموده، بهترین روش بهینه‌یابی پارامترهای مدل ماسکینگام در بازه مورد مطالعه می‌باشد.

الداما (۱۹۹۰)، گلگنیس و سرانو (۲۰۰۰)، الحمود و اسن (۲۰۰٦)، عبدالشاه‌نژاد (۱۹۹٦) و دهقانی (۲۰۰٤) در پژوهش‌های خود به این نتیجه رسیدند که روش گرافیکی نسبت به سایر روش‌های برآورد پارامترهای مدل ماسکینگام بهتر است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که براساس برآورد دبی پیک هیدروگراف‌های موجود در بازه موردنظر، روش گرافیکی نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری دارد. ولی در این پژوهش براساس بیش‌تر نمایه‌های آماری مانند ریشه میانگین مربعات خطا، درصد خطای نسبی، میانگین مطلق خطا، میانگین انحراف خطا، ضریب ناش- ساتکلیف و ضریب تبیین، روش گرافیکی نه تنها عملکرد خوبی نداشته بلکه جز اولویت‌های آخر از نظر دقت می‌باشد.

موهان (۱۹۹۷)، چن و یانگ (۲۰۰۷) و وانگ و همکاران (۲۰۰۹)، با بهینه‌سازی پارامترهای مدل ماسکینگام با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک، به این نتیجه رسیدند که دقت این روش نسبت به سایر روش‌های مورد استفاده بهتر می‌باشد. نتایج این پژوهش نیز با توجه به بیش‌تر نمایه‌های آماری مورد آنالیز و همچنین با ذکر این نکته که روش الگوریتم کلونی زنبورعسل تاکنون به‌منظور بهینه‌یابی پارامترهای مدل ماسکینگام استفاده نشده نتایج بالا را تأیید می‌کند.

لئو و زای (۲۰۱۰)، با مقایسه تعداد تکرار حلقه الگوریتم کلونی انتخابی ایمنی تا رسیدن به جواب بهینه، سرعت همگرایی این روش را خوب ارزیابی کردند. در این پژوهش با تحلیل تعداد تکرار حلقه الگوریتم‌های ژنتیک، الگوریتم کلونی زنبورعسل، الگوریتم کلونی مورچگان تا رسیدن به جواب بهینه، الگوریتم کلونی زنبورعسل سرعت همگرایی بهتری نسبت الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ژنتیک سرعت همگرایی بهتری نسبت به روش الگوریتم کلونی مورچگان دارد.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست آمده و روش‌های مورد بررسی و تحلیل سرعت همگرایی پارامترها نتیجه‌گیری می‌شود که روش الگوریتم کلونی زنبورعسل، برآورد پارامترهای مدل ماسکینگام با خطای کم‌تر و همچنین سادگی، روش برتر این پژوهش می‌باشد. همچنین با تحلیل حساسیت پارامترهای مدل ماسکینگام و پارامترهای به‌دست آمده از سه روش برآورد پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی شامل الگوریتم‌های ژنتیک، کلونی زنبورعسل، کلونی مورچگان در مقایسه با ماسکینگام خطی با دو روش برآورد پارامتر شامل برنامه‌ریزی خطی و روش گرافیکی برآورد بهتری دارد. با توجه به پیشرفت روش‌های بهینه‌یابی و تکنولوژی پیشرفته نرم‌افزاری و از طرفی افزایش جمعیت و ورود انسان به حریم رودخانه‌ها، روندیابی دقیق با استفاده از روش‌های جدید مانند الگوریتم تابو عملکرد بهتری و الزام دارد تا بتوان براساس آن برنامه‌ریزی و ساماندهی دقیق رودخانه صورت گیرد تا با صرف کم‌ترین هزینه، خسارت‌های مالی و جانی ناشی از سیلاب به حداقل برسد.

منابع

1. Abdol Shahnejad, A. 1996. Comparison of hydraulic and hydrologic methods for flood routing in a part of Karoon River, M.Sc. Thesis of Watershed Management, Tehran University, 230p. (In Persian)
2. Aldama, A. 1990. Least-Squares parameter estimation for Muskingum flood routing. J. Hydr. Engin. 116: 4. 580-586.
3. AL-Humoud, J.M., and Esen, I.I. 2006. Approximate methods for the estimation of Muskingum flood routing parameters. Water Resource. Management. 20: 979-990.
4. Chen, J., and Yang, X. 2007. Optimal parameter estimation for Muskingum model based on Gray-encoded accelerating genetic algorithm. Communality Nonlinear Science Numerical Simulation. 12: 849-858.
5. Chu, H.J., and Chang, L.Ch. 2009. Applying particle swarm optimization to parameter estimation of the nonlinear Muskingum model. J. Hydr. Engin. 9: 1024-1027.
6. Dehghani, M. 2004. The efficiency assessment of flood routing methods in tidal Zohreh river, M.Sc. Thesis of Watershed Management, Tarbiat Modares University. 78p. (In Persian)
7. Gelegenis, J., and Serrano, S.E. 2000. Analysis of Muskingum equation based flood routing schemes. J. Hydrol. Engin. 5: 1. 102-105.
8. Karaboga, D., and Basturk, B. 2007. A powerful and efficient Algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm, J. Global Optim. 39: 3. 459-471.

9.Karahan, H. 2009. Predicting Muskingum flood routing parameters using spreadsheets. Comput. Appl. Eng. Edu. 20: 2. 1-7.
10.Kavyani, M.R. 1993. Environmental assessment of human climate in Iran, Iran J. Geogr. Res. 28: 45-61. (In Persian)
11.Kim, J.H., Geem, Z.W., and Kim, E.S. 2001. Parameter estimation of the nonlinear Muskingum model using harmony search. J. Water Res. Plan. Manage. ASCE. 37: 5. 1131-1138.
12.Luo, J., and Xie, J. 2010. Parameter estimation for nonlinear Muskingum model based on immune clonal selection algorithm. J. Hydrol. Engin. 15: 10. 844-851.
13.Mahdavi, M. 2009. Applied Hydrology, Chapter 2, Tehran University Press, 396p. (In Persian)
14.Mohammadi Ghaleni, M., Bozorg Hadad, O., and Ebrahimi, K. 2010.Parameter estimation of the nonlinear Muskingum model using simulated annealing, Iran. J. Water Soil Sci. 24: 5. 908-919. (In Persian)
15.Mohan, L. 1997. Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using genetic algorithm. J. Hydr. Engin. 123: 2. 137-142.
16.Najmaei, M. 1989. Engineering Hydrology. Iran University of Science and Technology, 500p. (In Persian)
17.Singh, A.K. 1996. Criterion for location of downstream control for dynamic flood routing. J. Hydr. Engin. 196: 66-75.
18.Wang, W., Kang, Y., and Qiu, L. 2010. Optimal parameter estimation for Muskingum model using a modified particle swarm algorithm, P 153-156. In: Proceeding of 2010 Third International Joint Conference on Computational Science and Optimization (CSO), Volume: 2, Huangshan, Anhui, China.
19.Wang, W., Xu, Z., Qiu, L., and Xu, D. 2009. Hybrid chaotic genetic algorithms for optimal parameter estimation of Muskingum flood routing model, P 215-218. In: Proceeding of International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, Sanya, Hainan, China.
20.Water Resources Research Center (WRRC). 2011. Water Year Report, Water Resources Management Organization, Ministry of Energy, Iran. http://www.inwrn.ir/bank/t9list.aspx?uhid=23&user=check.
21.Wilson, E.M. 1974. Engineering hydrology. MacMillan Education Ltd., Hampshire, U.K. 232p.

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 21(3), 2014
http://jwsc.gau.ac.ir

Parameter Optimization of the Nonlinear Muskingum Model Using Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm

***M. Vafakhah[1], A. Dastorani[2] and A.R. Moghadam Nia[3]**

[1]Assistant Prof., Dept. of Watershed Management Engineering, Tarbiat Modares University,
[2]M.Sc. Student, Dept. of Watershed Management Engineering, Tarbiat Modares University,
[3]Associate Prof., Dept. of Rehabilitation of Arid and Mountainous, Tehran University
Received: 11/18/2012; Accepted: 05/10/2013

Abstract

Flood routing, as a mathematical method for predicting the changing magnitude and celerity of a flood wave as it propagates down rivers, provides the substantive bases for conducting flood zonation, flood forecasting and design of river structures. The Muskingum technique is one of important and most frequently used techniques of flood routing. In the present research, accuracy of some methods for optimization of Muskingum parameters (K, x and m) including graphical technique, linear programming, genetic algorithm, ant colony algorithm and artificial bee colony algorithm has been evaluated by using statistics of 9 flood hydrographs contemporaneous detected in two hydrometric stations of Mola Sani and Ahwaz in a 63-km reach of Karun River called Mola Sani-Ahwaz. In order to evaluate the different techniques, statistical criteria of the root-mean-square error (RMSE), relative error (RE), mean absolute error (MBE), mean error deviation (MAE), Nash and Sutclife coefficient (NS), coefficient of determination (R^2) and also visual comparison by plotting estimated and observed hydrographs were used. The results showed that artificial bee colony and genetic algorithms with RMSE of 79.85 m^3/s were found to be superior to graphical technique with RMSE of 88.07 m3/s for estimation of Muskingum model parameters. Comparing peak flow of hydrographs indicate more accurate for graphical technique with mean absolute error (MAE) of 31.2 m^3/s than genetic algorithm with MAE of 58.8 m^3/s and artificial bee colony algorithm with MAE of 62.18 m^3/s.

Keywords: Optimization, Bee colony algorithm, Flood routing, Muskingum model, Karun river

* Corresponding Author; Email: vafakhah@modares.ac.ir