

ارزیابی الگوریتم‌های جستجوی مستقیم و ژنتیک در بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام - یک سیلاب از کارون

مهدی محمدی قلعه‌نی^۱ و کیومرث ابراهیمی^{۲*}

(E-mail: ebrahimik@ut.ac.ir)

(تاریخ دریافت: ۸۹/۱۱/۱۸ - تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۲/۱۹)

چکیده

در این پژوهش، کارایی الگوریتم جستجوی مستقیم در بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام جهت روندیابی سیل ویلسون و یک سیل از رودخانه کارون ارائه شده است. روندیابی سیل ویلسون به منظور مقایسه کارایی الگوریتم جستجوی مستقیم با سایر الگوریتم‌های فراکاوشی متداول و روندیابی یک سیل از رودخانه کارون نیز به دلیل بررسی بیشتر قابلیت این الگوریتم در روندیابی سیل در نظر گرفته شده است. براساس نتایج به‌دست آمده از روندیابی سیل ویلسون با استفاده از الگوریتم جستجوی مستقیم مجموع مربعات و قدرمطلق خطا بین دبی روندیابی شده و مشاهداتی به ترتیب ۶۲/۶۵ و ۲۹/۴۸ مترمکعب بر ثانیه به‌دست آمد. کمترین تفاوت بین دبی پیک مشاهداتی و دبی روندیابی شده سیل ویلسون، با کاربرد الگوریتم جستجوی مستقیم ۰/۲۹ مترمکعب بر ثانیه به‌دست آمد. نتایج روندیابی سیل رودخانه کارون با الگوریتم جستجوی مستقیم نیز نشان داد که مجموع مربعات خطا، مجموع قدرمطلق خطا و تفاوت بین دبی پیک مشاهداتی و روندیابی شده به ترتیب ۴۲۰، ۷۸۴۲/۱۰ و ۹/۷ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج دیگر تحقیقات نشان داد با وجودی که الگوریتم جستجوی مستقیم نتوانسته است در بعضی پارامترهای مقایسه‌ای جواب‌های بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها به‌دست آورد، اما با توجه دقت مناسب برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام، توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: الگوریتم جستجوی مستقیم، بهینه‌سازی، روندیابی سیل، کارون، مدل غیرخطی ماسکینگام، ویلسون

۱ - دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج - ایران

۲ - دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج - ایران (نویسنده مسئول مکاتبات *)

مقدمه

استفاده از روش سعی و خطا برای پیدا کردن مقادیر صحیح سه پارامتر K ، X و m پیچیده و مشکل بود، روش‌های مختلفی برای تخمین پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام ارائه شد. در همین راستا، الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکوشی^۱ در تخمین این پارامترها کاربرد و قابلیت زیادی داشته‌اند.

محققین با استفاده از روش حداقل مربعات^۲ مقادیر سه پارامتر مدل غیرخطی ماسکینگام را بهینه کردند (۶). نتایج تحقیق حاکی از دقت بالاتر این روش نسبت به روش سعی و خطا بود. در ادامه محققین، بر مبنای روش هوک - جیوز^۳ در ترکیب با روش‌های رگرسیون خطی^۴ (HJ+CG)، شیب هم‌زمان^۵ و DFP^۵ را برای بهینه کردن این پارامترها به کار بردند که نتایج نشان داد استفاده از روش‌های (HJ+CG) و (HJ+DFP) در مقایسه با روش گیل بهتر است (۱۳). تحقیق تونگ نیز محدودیت‌های زیاد مدل خطی را ثابت کرد (۱۳). در ادامه روش‌های متفاوتی برای تخمین پارامترهای خطی و غیرخطی ماسکینگام با استفاده از بسته نرم‌افزاری به نام سیستم روندیابی سیل و تخمین پارامترهای ماسکینگام^۶ مورد بررسی قرار گرفت (۱۵). این نرم‌افزار براساس پارامترهای تخمینی و مدل خطی یا غیرخطی انتخاب شده روندیابی سیل را انجام دهد. نتایج تحقیق آنها به علت اینکه داده‌های انتخابی غیرخطی بودند رضایت‌بخش بود، اگرچه سایر روش‌های تخمینی دیگر هم عملکرد خوبی داشتند. در یک تحقیق نشان داده شد که تمام روش‌های قبلی، رسیدن به جواب بهینه مطلق را ضمانت نمی‌کنند و در دام جواب‌های بهینه موضعی قرار می‌گیرند (۱۲). در این تحقیق، الگوریتم ژنتیک^۸ (GA) برای تخمین پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام استفاده شد و نشان داده

روندیابی جریان برای پیش‌بینی تغییرات بزرگی، سرعت و شکل موج یک جریان به صورت تابعی از زمان در یک یا چند نقطه از طول رودخانه یا مخزن در نظر گرفته می‌شود (۴). روش‌های روندیابی سیل به دو دسته روش‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی تقسیم‌بندی می‌شوند. روش روندیابی هیدرولیکی بر اصول پیچیده هیدرولیکی و قوانین جریان‌های غیرماندگار در کانال‌های روباز استوار است. این روش نیازمند اطلاعات وسیع هیدرولیکی و محاسباتی طولانی است. در روش هیدرولوژیکی از اصل پیوستگی جریان و رابطه بین دبی و ذخیره موقت آب در طول مسیر استفاده می‌شود که روش به نسبت آسانی بوده و از دقت کافی در کارهای آبی برخوردار است. مدل ماسکینگام یکی از روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی است. این مدل از معادلات پیوستگی و روابط بین مقادیر ورودی، خروجی و ذخیره سیل استفاده شده است. مدل خطی ماسکینگام اولین بار توسط (۱۱) به شکل رابطه (۱) ارائه شد:

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

در این رابطه، S_t ، I_t و O_t به ترتیب نشان‌دهنده ذخیره، ورودی و خروجی در زمان t است و K ضریب زمان - ذخیره برای رودخانه بوده و یک مقدار منطقی نزدیک به زمان گذر جریان از کل مسیر رودخانه است. همچنین X یک فاکتور وزنی است که معمولا برای مخازن ذخیره بین صفر تا ۰/۵ و برای رودخانه‌ها بین صفر تا ۰/۳ در نظر گرفته می‌شود (۱۲). به طور معمول، پارامترهای K و X از مدل ماسکینگام خطی را با روش ترسیمی و به کمک سعی و خطا به دست می‌آورند که این روش مشکل و تقریبی است. از طرف دیگر، رابطه بین S_t و $[XI_t + (1 - X) O_t]$ همیشه خطی نبود. لذا در سال ۱۹۷۸ رابطه غیرخطی مدل ماسکینگام به صورت زیر پیشنهاد شد (۶):

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

در این رابطه، پارامتر m به عنوان توان به معادله غیرخطی اضافه شده و مدل را قادر می‌سازد تا رابطه غیرخطی و دقیق‌تری بین ذخیره تجمعی و جریان ارائه کند. از آنجایی که

1 - Metaheuristic Optimization Algorithms

2 - Least-Squares Method

3 - Hook-Jeeves

4 - Linear Regression

5 - Conjugate Gradient

6 - Davidon-Fletcher Powell

7 - Muskingum Parameter Estimation and Flood Routing System

8 - Genetic Algorithm

الگوریتم جستجوی مستقیم

معرفی الگوریتم‌های جستجوی مستقیم و از جمله الگوریتم جستجوی مستقیم به دهه ۱۹۵۰ باز می‌گردد. از دیرباز این الگوریتم‌ها به سبب کاربرد آسان و نتایج خوب در مسائل مختلف پرکاربرد بوده‌اند. الگوریتم جستجوی مستقیم یک الگوریتم ارزشمند است اما انتخاب‌های محدود این الگوریتم در جهت‌های مختلف در آنالیزهای غیرخطی کاربرد آن را با محدودیت مواجه کرده است (۲). روش جستجوی مستقیم شبکه هیبریدی^۴ (MADS) محدودیت‌های الگوریتم جستجوی مستقیم را در آنالیزهای غیرخطی تا حدودی برطرف کرده است. الگوریتم جستجوی مستقیم را به صورت شکل (۱) می‌توان نمایش داد.

روش‌های مبتنی بر جستجوی مستقیم با شروع از یک نقطه تصادفی در فضای تصمیم قابل قبول و با استفاده از ضرایب انبساط و انقباض به سمت فضای بهینه کلی حرکت کند. در این روش‌ها، ابتدا حدود متغیرهای تصمیم، ضرایب انبساط و انقباض و تعداد تکرارهای لازم جهت دستیابی به جواب بهینه مشخص می‌شود. سپس با توجه به محدودیت‌های تابع هدف، جواب اولیه‌ای به صورت تصادفی تولید می‌شود. با توجه به نقطه اولیه و نوع روش جستجو، نقاطی حول جواب اولیه تولید می‌شود. سپس مقدار تابع هدف برای هر یک از جواب‌های تولید شده، محاسبه می‌گردد و با تابع هدف مرتبط با جواب اولیه مقایسه می‌شود. چنانچه جوابی بهتر از جواب اولیه در بین مجموعه جواب‌های تولید شده وجود داشت، مسیر حرکت مدل بهینه‌سازی از نقطه اولیه به نقطه‌ای خواهد بود که از مطلوبیت بیشتری از نظر تابع هدف برخوردار باشد. در این حالت، شبکه با استفاده از ضرایب انبساط افزایش می‌یابد و مدل فضای بیشتری را مورد جستجو قرار می‌دهد، اما اگر جواب بهتری در فضای اولیه مشخص شده پیدا نشد، با استفاده از ضریب انقباض و براساس نوع روش جستجو تعداد نقطه دیگری که نزدیکتر به نقطه اولیه باشند، تولید می‌شود. این روند تولید مجموعه جواب‌ها با استفاده از ضرایب انبساط و انقباض تا زمانی ادامه می‌یابد که معیار توقف تأمین شود. دو نکته مثبت، دلیل انتخاب الگوریتم

شد که برآورد به وسیله GA بهتر از روش‌های قبلی بوده و نیازی به حدس اولیه نزدیک به جواب بهینه ندارد. الگوریتم جستجوی هارمونیک^۱ (HS) در بهینه‌سازی پارامترهای غیرخطی مدل ماسکینگام به‌کار برده شد و نتایج تحقیق حاکی از دقت بالاتر الگوریتم HS نسبت به الگوریتم GA بود (۸). همچنین دو روش تقریبی برای برآورد پارامترهای مدل خطی ماسکینگام ارائه شد، به طوری که در روش اول محاسبه شیب‌های هیدروگراف‌های ورودی و خروجی در نقطه تقاطع و محاسبه ماکزیمم حجم ذخیره در داخل این ناحیه ضروری بود، اما در روش دوم، تنها نیاز به محاسبه هیدروگراف‌های ورودی و خروجی در دو نقطه مشخص بود (۱). ارزیابی این دو روش در سه مورد مطالعاتی نشان‌گر توانایی بهتر روش اول نسبت به روش دوم در برآورد این پارامترها بود. الگوریتم بهینه‌سازی مجموعه ذرات^۲ (PSO) برای برآورد پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام به‌کار برده شد (۷). نتایج نشان داد که الگوریتم PSO از دقت بالایی در برآورد تخمین پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام برخوردار است، به طوری که نتایج الگوریتم PSO بعد از الگوریتم HS بیشترین دقت را در روندیابی سیل ویلسون داشت. لازم به ذکر است که در تمام تحقیقات اشاره شده، از روندیابی سیل ویلسون برای مقایسه دقت انواع الگوریتم‌ها استفاده شده است. در این پژوهش، برای اولین بار الگوریتم جستجوی مستقیم^۳ (PS) در بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام ارزیابی شد. از ابتدای استفاده از روش‌های فراکاوشی به منظور بهینه‌سازی پارامترهای غیرخطی مدل ماسکینگام، از سیل ویلسون به عنوان مبنای مقایسه کارایی روش‌های فراکاوشی در بهینه‌سازی استفاده شده است. سیل ویلسون به مدت ۱۲۶ ساعت و در بازه‌های زمانی شش ساعته ثبت شده است. در این سیل رابطه غیرخطی بین مقادیر S_t و $[XI_t + (1 - X) O_t]$ برقرار می‌باشد (۱۴). علاوه بر روندیابی سیل ویلسون به منظور مقایسه بیشتر کارایی الگوریتم جستجوی مستقیم با نتایج سایر الگوریتم‌ها، یک سیل از رودخانه کارون نیز روندیابی شد.

1 - Harmony Search

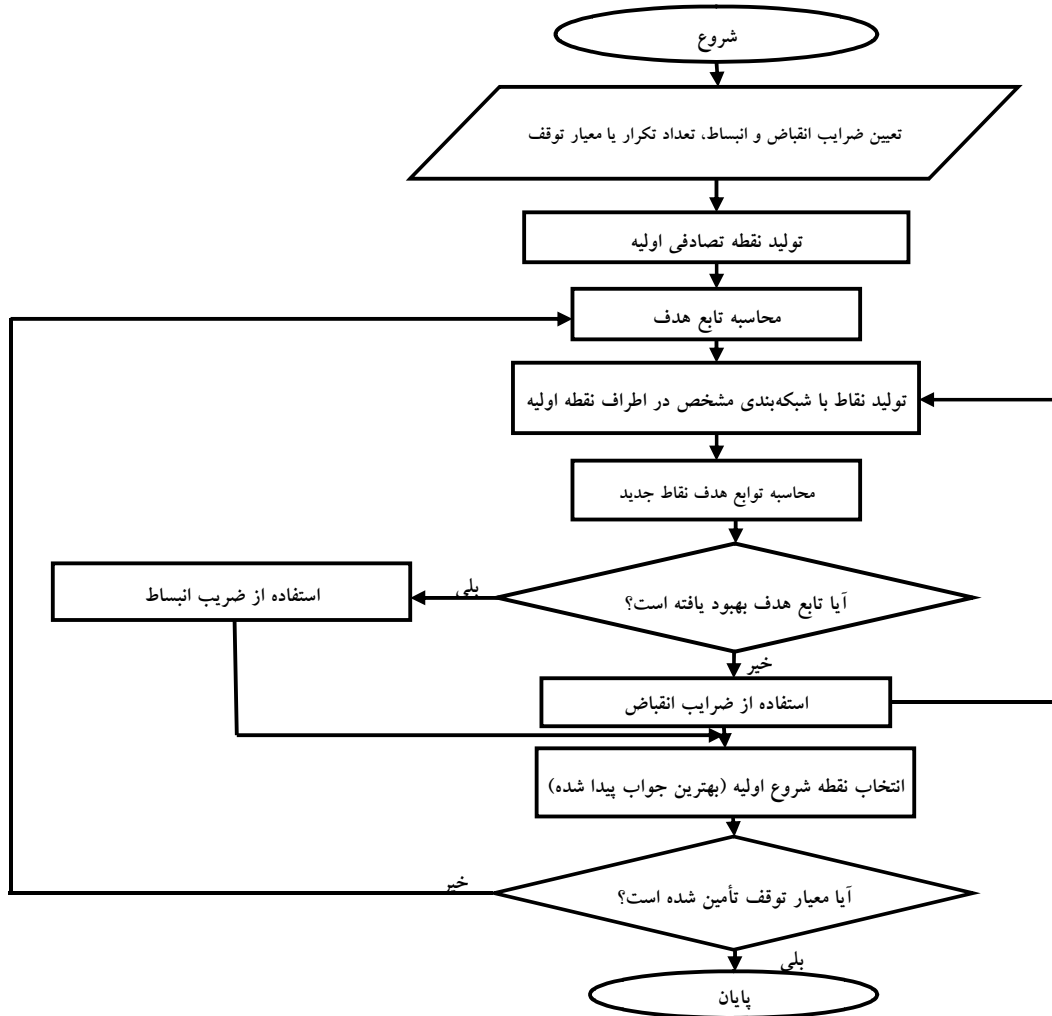
2 - Particle Swarm Optimization

3 - Pattern Search

4 - Mesh Adaptive Direct Search

برای بهینه‌سازی پیچیده مسایل ریاضی استفاده و آزمایش شده است، اما این الگوریتم در بهینه‌سازی پارامترهای غیرخطی ماسکینگام به منظور روندیابی سیل به کار نرفته است (۱۰). در پژوهش حاضر، برای اولین بار از الگوریتم جستجوی مستقیم به منظور بهینه‌سازی پارامترهای غیرخطی مدل ماسکینگام جهت روندیابی سیل کارون استفاده شده است.

جستجوی مستقیم برای ارزیابی و بررسی در پژوهش حاضر بوده است. نکته نخست، سادگی کاربرد و نکته دوم، برآوردهای غیرصریح این الگوریتم می‌باشد. با وجودی که این الگوریتم ساده به نظر می‌رسد اما دارای خصوصیات با امکان هم‌گرایی سراسری مشابه الگوریتم‌های جستجوی خطی است (۹). در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های جستجوی الگو



شکل ۱ - ساختار مدل بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم جستجوی مستقیم

مواد و روش‌ها

مرحله ۱ - در نظر گرفتن مقدار اولیه‌ای برای سه پارامتر K ، X و m بر اساس حدود قابل قبول
 مرحله ۲ - محاسبه مقدار ذخیره (S_t) با استفاده از رابطه (۲) با فرض مقدار جریان خروجی اولیه‌ای برابر با جریان ورودی $(O_t = I_t)$

در پژوهش حاضر، به منظور ارزیابی الگوریتم جستجوی مستقیم در بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام از نسخه ۷/۶ نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. بدین منظور، ابتدا الگوریتم روندیابی رابطه غیرخطی ماسکینگام طی مراحل زیر با استفاده از نرم‌افزار MATLAB برنامه‌نویسی شد.

جهش ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شد و از بین ۲۰ جواب تصادفی، بهترین جواب (کمترین خطا) به عنوان جواب نهایی گزارش شده است. در تحقیق حاضر، مقادیر حدی پیشنهادی برای پارامترهای K ، X و m در الگوریتم ژنتیک به ترتیب $[0, 1]$ ، $[0, 1]$ و $[1, \infty]$ در نظر گرفته شد (۱۲).

به منظور بررسی کارایی الگوریتم جستجوی مستقیم در بهینه‌سازی پارامترهای غیرخطی مدل ماسکینگام دو سیل موردی به کمک این الگوریتم روندیابی شد. مورد اول، سیل معروف و مورد دوم نیز یک سیل از رودخانه کارون که در تاریخ ۱۳۶۱/۱/۵ در ایستگاه ورودی کارون و ایستگاه خروجی گتوند اندازه‌گیری و ثبت شده است که برای روندیابی در نظر گرفته شده است (۱۴). در تحقیق حاضر، سیل ویلسون با الگوریتم جستجوی مستقیم روندیابی شده و نتایج آن با روش‌های غیرخطی (NONLR)، (HJ + CG)، (HJ + DFP)، الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم جستجوی هارمونیک (HS) و الگوریتم بهینه‌سازی مجموعه ذرات (PSO) مقایسه شده است. مبنای مقایسه نتایج الگوریتم‌های مختلف چهار معیار مجموع مربعات خطا^۲ (SSQ)، مجموع قدرمطلق خطا^۳ (SAD) (Tung, 1985)، تفاوت دبی پیک مشاهداتی و روندیابی شده^۴ (DPO) و جابه‌جایی گام زمانی دبی پیک مشاهداتی و روندیابی شده^۵ (DPOT) (Yoon and Padmanabhan, 1993) در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

روندیابی سیل ویلسون

نتایج پارامترهای بهینه‌سازی شده K ، X و m در روندیابی سیل ویلسون به همراه معیارهای مقایسه SSQ، SAD، DPO و DPOT در جدول (۱) ارائه شده است. ستون‌های (۱) تا (۷) در جدول‌های (۱) و (۲) به ترتیب نتایج تحقیقات (۶)، (۷)، (۸)، (۱۲)، (۱۳) و (۱۵) در ستون (۸) جدول‌های (۱) و (۲) نتایج تحقیق حاضر می‌باشد.

مرحله ۳ - محاسبه تغییرات ذخیره نسبت به زمان با استفاده از رابطه (۳)

$$\frac{\Delta S_t}{\Delta t} = -\left(\frac{1}{1-X}\right)\left(\frac{S_t}{K}\right)^{1/m} - \left(\frac{1}{1-X}\right)I_t \quad (3)$$

مرحله ۴ - محاسبه حجم جریان خروجی در مرحله زمانی بعدی با استفاده از رابطه زیر:

$$O_{t+1} = \left(\frac{I}{I-X}\right)\left(\frac{S_{t+1}}{K}\right)^{1/m} - \left(\frac{X}{I-X}\right)\bar{I}_{t+1} \quad (4)$$

در این رابطه، \bar{I}_{t+1} بیان‌کننده میانگین ورودی‌ها می‌باشد و مقدار I_t با $(I_{t+1} + I_t)/2$ از گام زمانی دو به بعد ($t \geq 2$) جایگزین می‌شود (۵).

تابع هدف برای ارزیابی مقادیر بهینه پارامترهای K ، X و m در مدل ماسکینگام غیرخطی کمینه کردن مجموع مربعات باقیمانده‌های بین حجم خروجی‌های مشاهداتی و روندیابی شده در نظر گرفته شده است. تابع هدف نیز از رابطه (۵) قابل محاسبه است:

$$MinSSQ = \sum_{t=1}^n (O_t - \hat{O}_t)^2 \quad (5)$$

در این رابطه، \hat{O}_t حجم خروجی روندیابی شده توسط مدل ماسکینگام غیرخطی و O_t حجم خروجی مشاهده شده در زمان t است. در پژوهش حاضر، حدود بالا و پایین پارامترها به عنوان قیدهای مسئله با توجه به مقادیر ممکن آنها در نظر گرفته شد. پارامتر X بین ۰/۲ تا ۰/۳، پارامتر K بین ۰/۱ تا ۰/۶، و پارامتر m بین ۱/۵ تا ۲/۵ در نظر گرفته شد. این محدودیت‌ها با توجه به تحقیقات جدید انجام شده در این زمینه، در نظر گرفته شده است (۷). نوع روش نمونه‌گیری نیز برای الگوریتم جستجوی مستقیم روش جستجوی الگوی تعمیم یافته^۱ (GPS) انتخاب شد. در این روش، به تعداد $2N$ جواب با توجه به جواب اولیه و با الگوی مشخص تولید می‌شود. ضرایب انبساط و انقباض به ترتیب دو و ۰/۵ و معیار توقف حداکثر تکرار ۱۰۰ مرتبه در نظر گرفته شد. در الگوریتم GA تعداد جمعیت ۱۰۰، احتمال جابه‌جایی ۰/۹ و احتمال

2 - Sum of the Squares of the Deviation

3 - Sum of the Absolute Deviation

4 - Deviation of Peak of the Routed and Observed Outflows

5 - Deviation of Peak Time of the Routed and Actual Outflows

1 - Generalized Pattern Search

جدول ۱ - مقایسه مقادیر خطا در روش‌های مختلف بهینه‌سازی

روش‌های بهینه‌سازی								معیارهای خطا و پارامترهای تخمینی
(۸)	(۷)	(۶)	(۵)	(۴)	(۳)	(۲)	(۱)	
PS	PSO	HS	GA	LSM	HJ + DFP	HJ + CG	NONLR	
۶۲/۶۵	۳۶/۸۹	۳۶/۷۸	۳۸/۲۳	۱۴۳/۶۰	۴۵/۵۴	۴۹/۶۴	۴۳/۲۶	SSQ (مترمکعب بر ثانیه) ^۲
۲۹/۴۸	۲۴/۱۰	۲۳/۴۰	۲۳/۰۰	۴۶/۴۰	۲۴/۸۰	۲۵/۲۰	۲۵/۲۰	SAD (مترمکعب بر ثانیه)
۰/۲۹	۰/۶۰	۰/۹۲	۰/۷۰	۱/۸۰	۰/۳۰	۰/۵۰	۰/۷۰	DPO (مترمکعب بر ثانیه)
.	۱	DPOT (ساعت)
۰/۴۸۹۱	۰/۱۸۲۴	۰/۰۸۸۳	۰/۱۰۳۳	۰/۰۱۰۰	۰/۰۷۶۴	۰/۰۶۶۹	۰/۰۶۰۰	K (ساعت)
۰/۲۷۱۴	۰/۳۳۳۰	۰/۲۸۷۳	۰/۲۸۷۳	۰/۲۵۰۰	۰/۲۶۷۷	۰/۲۶۸۵	۰/۲۷۰۰	X
۱/۸۲۸۱	۲/۱۴۵۸	۱/۸۶۳۰	۱/۸۲۸۲	۲/۳۴۷۰	۱/۸۹۷۸	۱/۹۲۹۱	۲/۳۶۰۰	m

ترتیب ۰/۴۸۹۱، ۰/۲۷۱۴ و ۱/۸۲۸۱ به‌دست آمده است. در جدول (۲) مقادیر هیدروگراف خروجی به‌دست آمده از روش‌های مختلف به منظور بررسی دقت الگوریتم جستجوی مستقیم در روندیابی سیل ویلسون در گام‌های زمانی مختلف ارائه شده است.

در گام زمانی ۳۶ ساعت، مقادیر دبی خروجی مشاهده شده و دبی خروجی روندیابی شده توسط الگوریتم جستجوی مستقیم به ترتیب ۵۵ و ۵۸/۱۳ مترمکعب بر ثانیه است که حداکثر اختلاف بین این دو مقدار ۳/۱۳ مترمکعب بر ثانیه به‌دست آمده است. دبی پیک خروجی روندیابی شده با الگوریتم جستجوی مستقیم در گام زمانی ۶۰ ساعت از ابتدای سیل، ۸۴/۷۱ مترمکعب بر ثانیه است و دبی پیک خروجی مشاهداتی نیز در همین گام ۸۵ مترمکعب بر ثانیه رخ داده که اختلاف بین این دو مقدار، دقت الگوریتم جستجوی مستقیم را در روندیابی دبی پیک سیل ویلسون نشان می‌دهد. خطای روندیابی در الگوریتم جستجوی مستقیم در گام‌های زمانی ۱۲، ۳۶، ۴۲، ۴۸ (شاخه بالارونده هیدروگراف خروجی)، ۹۰ و ۹۶ (شاخه پایین‌رونده هیدروگراف خروجی) بیشتر از گام‌های زمانی ۶۰ تا ۷۸ ساعت پس از شروع سیلاب که نقاط

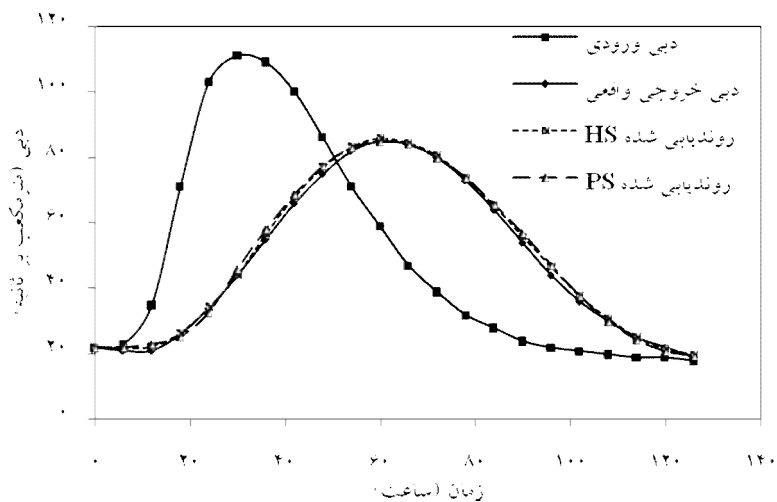
باتوجه به نتایج به‌دست آمده، الگوریتم جستجوی مستقیم جواب‌های بهتری نسبت به روش حداقل مربعات (LSM) ارائه کرده است، به‌طوری‌که مقادیر SSQ، SAD و DPO در الگوریتم جستجوی مستقیم به ترتیب ۶۲/۶۵، ۲۹/۴۸ و ۰/۲۹ و در روش LSM به ترتیب ۱۴۳/۶۰، ۴۶/۴۰ و ۱/۸۰ متر مکعب ثانیه به‌دست آمده است (جدول ۱). الگوریتم جستجوی مستقیم نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی در جدول (۱) در معیارهای SSQ و SAD دقت کمتری دارد، اما مقدار DPO با الگوریتم جستجوی مستقیم نسبت به تمام روش‌های جدول (۱) کمتر است، به‌طوری‌که تفاوت دبی پیک مشاهداتی و روندیابی شده با استفاده از الگوریتم جستجوی مستقیم و الگوریتم HS به ترتیب ۰/۲۹ و ۰/۹۲ مترمکعب بر ثانیه به‌دست آمده است. به منظور جلوگیری از خسارت‌های سیل، برآورد دقیق دبی پیک ضروری است و الگوریتم جستجوی مستقیم با تخمین دقیق‌تر دبی پیک سیلاب، کارایی مناسبی از خود نشان داده است. علاوه بر این، جابه‌جایی گام زمانی دبی پیک مشاهداتی و روندیابی شده در الگوریتم جستجوی مستقیم برابر صفر به‌دست آمد که مقادیر بهینه شده پارامترهای K، X و m در الگوریتم جستجوی مستقیم به

الگوریتم جستجوی مستقیم توانسته از عهده این امر برآید. در شکل (۲) نمودار هیدروگراف خروجی تخمین زده شده توسط الگوریتم‌های جستجوی مستقیم و HS که بالاترین دقت رونديابی را در جدول (۲) دارد، رسم شده است.

اوج هیدروگراف سیل می‌باشد، بوده است، به طوری که اختلاف بین دبی مشاهداتی و رونديابی شده در گام‌های زمانی ۶۰ تا ۷۸، کمتر از یک مترمکعب بر ثانیه می‌باشد (جدول ۲). از آنجا که برآورد مقادیر دبی اوج قله هیدروگراف خروجی به علت ایجاد خسارات مهم‌تر است،

جدول ۲ - مقادیر هیدروگراف خروجی تخمین زده شده سیل ویلسون توسط روش‌های مختلف بهینه‌سازی

دبی خروجی رونديابی شده								دبی خروجی مشاهداتی (m ³ /s)	دبی ورودی (m ³ /s)	گام زمانی (ساعت)
(۸)	(۷)	(۶)	(۵)	(۴)	(۳)	(۲)	(۱)			
PS	PSO	HS	GA	LSM	HJ + DFP	HJ + CG	NONLR			
۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲	۲۲	۰
۲۲/۰۶	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۶۰	۲۱	۲۳	۶
۲۳/۰۲	۲۲/۶۰	۲۲/۴۰	۲۲/۴۰	۲۲/۸۰	۲۲/۴۰	۲۲/۴۰	۲۳/۰۰	۲۱	۳۵	۱۲
۲۵/۳۵	۲۸/۱۰	۲۶/۶۰	۲۶/۳۰	۲۹/۶۰	۲۶/۷۰	۲۶/۸۰	۲۴/۲۰	۲۶	۷۱	۱۸
۳۲/۷۴	۳۲/۲۰	۳۴/۴۰	۳۴/۲۰	۳۹/۱۰	۳۴/۸۰	۳۴/۹۰	۳۳/۲۰	۳۴	۱۰۳	۲۴
۴۵/۹۹	۴۵/۰۰	۴۴/۱۰	۴۴/۲۰	۴۷/۶۰	۴۴/۷۰	۴۴/۵۰	۴۷/۱۰	۴۴	۱۱۱	۳۰
۵۸/۱۳	۵۷/۰۰	۵۶/۸۰	۵۶/۹۰	۵۸/۰۰	۵۶/۹۰	۵۶/۷۰	۵۶/۸۰	۵۵	۱۰۹	۳۶
۶۸/۷۶	۶۷/۵۰	۶۸/۱۰	۶۸/۲۰	۶۷/۱۰	۶۷/۷۰	۶۷/۳۰	۶۶/۲۰	۶۶	۱۰۰	۴۲
۷۷/۴۸	۷۵/۹۰	۷۷/۱۰	۷۷/۱۰	۷۴/۸۰	۷۶/۳۰	۷۵/۹۰	۷۵/۰۰	۷۵	۸۶	۴۸
۸۳/۰۸	۸۱/۲۰	۸۳/۳۰	۸۳/۲۰	۸۰/۴۰	۸۲/۲۰	۸۱/۹۰	۸۰/۷۰	۸۲	۷۱	۵۴
۸۴/۷۱	۸۵/۶۰	۸۵/۹۰	۸۵/۷۰	۸۳/۲۰	۸۴/۷۰	۸۴/۵۰	۸۳/۵۰	۸۵	۵۹	۶۰
۸۴/۰۱	۸۴/۲۰	۸۴/۵۰	۸۴/۲۰	۸۲/۸۰	۸۳/۵۰	۸۳/۴۰	۸۴/۳۰	۸۴	۴۷	۶۶
۷۹/۸۳	۷۹/۶۰	۸۰/۶۰	۸۰/۲۰	۸۰/۱۰	۷۹/۸۰	۷۹/۹۰	۷۹/۹۰	۸۰	۳۹	۷۲
۷۳/۸۵	۷۳/۳۰	۷۳/۷۰	۷۳/۳۰	۷۴/۵۰	۷۳/۳۰	۷۳/۶۰	۷۴/۳۰	۷۳	۳۲	۷۸
۶۵/۶۸	۶۵/۰۰	۶۵/۴۰	۶۵/۰۰	۶۷/۲۰	۶۵/۵۰	۶۵/۸۰	۶۵/۳۰	۶۴	۲۸	۸۴
۵۶/۹۰	۵۶/۲۰	۵۶/۰۰	۵۵/۸۰	۵۸/۱۰	۵۶/۵۰	۵۶/۹۰	۵۵/۹۰	۵۴	۲۴	۹۰
۴۷/۱۱	۴۶/۵۰	۴۶/۷۰	۴۶/۷۰	۴۸/۱۰	۴۷/۵۰	۴۷/۸۰	۴۵/۱۰	۴۴	۲۲	۹۶
۳۷/۷۲	۳۷/۳۰	۳۷/۸۰	۳۸/۰۰	۳۷/۶۰	۳۸/۷۰	۳۸/۹۰	۳۵/۴۰	۳۶	۲۱	۱۰۲
۲۹/۹۶	۲۹/۷۰	۳۰/۹۰	۳۰/۹۰	۲۸/۲۰	۳۱/۴۰	۳۱/۵۰	۲۸/۷۰	۳۰	۲۰	۱۰۸
۲۴/۳۱	۲۴/۳۰	۲۵/۳۰	۲۵/۷۰	۲۱/۹۰	۲۵/۹۰	۲۵/۸۰	۲۴/۳۰	۲۵	۱۹	۱۱۴
۲۰/۸۵	۲۰/۶۰	۲۱/۸۰	۲۲/۱۰	۱۹/۱۰	۲۲/۱۰	۲۲/۰۰	۲۰/۹۰	۲۲	۱۹	۱۲۰
۱۹/۴۳	۱۹/۶۰	۲۲/۰۰	۲۰/۲۰	۱۹/۰۰	۲۰/۲۰	۲۰/۱۰	۲۰/۴۰	۱۹	۱۸	۱۲۶



شکل ۲ - هیدروگراف روندبایی شده سیل ویلسون با استفاده از الگوریتم‌های HS و جستجوی مستقیم

روندبایی سیل رودخانه کارون
روندبایی یک سیل از رودخانه کارون به کمک مدل
غیرخطی ماسکینگام و بهینه‌سازی پارامترهای K ، X و m آن با
استفاده از الگوریتم جستجوی مستقیم انجام شد (جدول ۳).

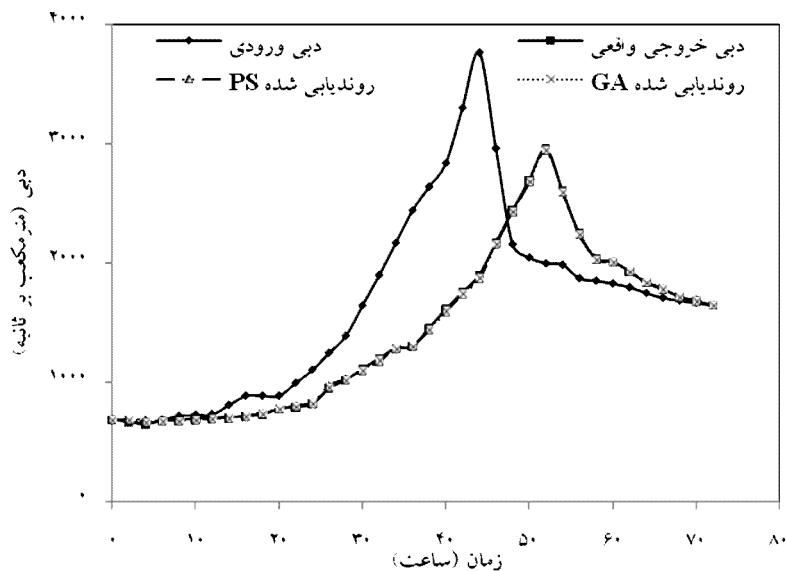
الگوریتم جستجوی مستقیم توانسته است هیدروگراف
سیل ویلسون را با دقت زیادی روندبایی کند و تفاوت قابل
توجهی بین روندبایی به کمک الگوریتم جستجوی مستقیم و
HS وجود ندارد (شکل ۲).

جدول ۳ - مقادیر خطا در الگوریتم جستجوی مستقیم در روندبایی سیل کارون

معیارهای خطا و پارامترهای تخمینی							الگوریتم‌های بهینه‌سازی
m	X	K (ساعت)	DPOT (ساعت)	DPO (مترمکعب بر ثانیه)	SAD	SSQ	
۱/۹۹۲۹	۰/۱۹۳۱	۰/۳۸۳۹	۰	۹/۷	۴۲۰	۷۸۴۲/۱	PS
۱/۸۷۶۴	۰/۲۸۸۶	۰/۵۰۷۸	۰	۴/۹	۲۲۰/۵	۲۲۹۱/۳	GA

الگوریتم جستجوی مستقیم، ۹/۷ مترمکعب بر ثانیه به‌دست
آمده است. مقادیر بهینه پارامترهای K ، X و m در دو
الگوریتم GA و جستجوی مستقیم در جدول (۳) ارائه شده
است. شکل (۳) هیدروگراف روندبایی شده سیل کارون
توسط دو الگوریتم GA و جستجوی مستقیم را نشان می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم GA دقت بالاتری در
روندبایی سیل رودخانه کارون داشته است، زیرا پارامترهای
SSQ و SAD با الگوریتم GA به ترتیب ۲۲۹۱/۳ و ۲۲۰/۵ و
با الگوریتم جستجوی مستقیم به ترتیب ۷۸۴۲/۱ و ۴۲۰
به‌دست آمده است (جدول ۳). همچنین تفاوت بین دبی پیک
مشاهداتی و روندبایی شده در الگوریتم GA، ۴/۸۵ و در



شکل ۳ - هیدروگراف روندیابی شده سیل کارون با استفاده از الگوریتم‌های جستجوی مستقیم و GA

برای حدود بالا و پایین پارامترهای K ، X و m محدودیتی ایجاد نشود، الگوریتم‌های فراکاوشی قادر به یافتن مقادیر بهینه پارامترها نمی‌باشند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر کارایی الگوریتم جستجوی مستقیم در تخمین و بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام در روندیابی هیدروگراف سیل مشهور ویلسون و سیل دیگری از رودخانه کارون (۱۳۶۱) را بررسی کرده است. روندیابی سیل ویلسون به منظور مقایسه کارایی الگوریتم جستجوی مستقیم با نتایج روش‌های متداول و سیل رودخانه کارون نیز به دلیل امکان بررسی بیشتر قابلیت این الگوریتم در روندیابی سیل در نظر گرفته شدند. براساس نتایج در سیل ویلسون مجموع مربعات خطا $۶۲/۶۵$ ، مجموع قدرمطلق خطاها $۲۹/۴۸$ و دبی پیک روندیابی شده $۸۴/۷۱$ مترمکعب بر ثانیه در مقابل دبی پیک مشاهداتی ۸۵ مترمکعب بر ثانیه به دست آمده است که تفاوت دو عدد اخیر برابر یک درصد خطا و تفاوت گام زمانی وقوع دبی پیک مشاهداتی و روندیابی شده تقریباً مساوی صفر به دست آمد. در مقایسه با نتایج تحقیق دیگر، نتایج تحقیق حاضر حاکی از کارایی بهتر الگوریتم جستجوی

شکل (۳) قابلیت الگوریتم جستجوی مستقیم را در روندیابی سیل واقعی رودخانه کارون نشان می‌دهد. انطباق فوق‌العاده‌ای بین هیدروگراف‌های دبی خروجی واقعی و هیدروگراف روندیابی شده با استفاده از الگوریتم‌های GA و PS وجود دارد (شکل ۳). الگوریتم جستجوی مستقیم در روندیابی سیل دقتی به اندازه الگوریتم GA ندارد، اما دقت این روش در حد قابل قبولی برای بهینه‌سازی پارامترهای غیرخطی مدل ماسکینگام می‌باشد (جدول ۳). علت برازش دقیق هیدروگراف‌های خروجی مشاهداتی و روندیابی شده با الگوریتم‌های GA و جستجوی مستقیم در شکل (۳) به نظر نرسیدن تفاوت‌ها بین دبی خروجی مشاهداتی و روندیابی شده است، به طوری که تفاوت بین دبی خروجی مشاهداتی و روندیابی شده با الگوریتم جستجوی مستقیم در گام زمانی چهار برابر $۳۹/۵$ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد که در شکل (۳) به نظر نمی‌رسد.

در پژوهش حاضر، در صورتی که پارامترهای K ، X و m در مدل ماسکینگام غیرخطی به صورت نامفید فرض شوند، جواب‌ها به سمت واگرایی پیش می‌رود و الگوریتم‌ها قادر به یافتن جواب‌های بهینه نمی‌باشند. این نتیجه در مورد روندیابی هر دو سیل ویلسون و کارون صادق می‌باشد و در صورتی که

الگوریتم‌ها به دست آورد، اما دقت مناسب و قابل اعتماد الگوریتم جستجوی مستقیم در بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام، استفاده این الگوریتم را در سایر مطالعه‌های موردی توصیه می‌کند. برای جمع‌بندی می‌توان چون این اظهار نمود که براساس نتایج تحقیق حاضر، ضمن آنکه قابلیت مناسب الگوریتم جستجوی مستقیم در تخمین و بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام به اثبات رسید، می‌توان استفاده از آن را به موازات سایر روش‌ها و همچنین مطالعه بیشتر در این مورد را توصیه نمود.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه تهران و شرکت مدیریت منابع آب ایران قدردانی می‌شود.

مستقیم نسبت به روش حداقل مربعات (LSM) است (۶). در مورد سیلاب رودخانه کارون نیز نتایج نشان داد که مجموع مربعات خطا $7842/10$ ، مجموع قدرمطلق خطاها 420 و دبی پیک روندیابی شده $2948/30$ مترمکعب در مقابل دبی پیک مشاهداتی 2958 مترمکعب بر ثانیه به دست آمد. همچنین در مورد اخیر، تفاوت دبی روندیابی شده با دبی مشاهداتی کمتر از یک درصد خطا و تفاوت گام زمانی وقوع دبی پیک مشاهداتی و روندیابی شده برابر صفر محاسبه شد. در روندیابی سیل کارون الگوریتم GA در مقایسه با الگوریتم جستجوی مستقیم نتایج بهتری ارائه کرد. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج دیگر تحقیقات حاکی از این امر است که علی‌رغم اینکه الگوریتم جستجوی مستقیم نتوانسته است، در بعضی پارامترهای مقایسه جواب‌های بهتری نسبت به سایر

References

- 1 . Al-Hummed JM and Essen II (2006) Approximate Methods for the Estimation of Muskingum Flood Routing Parameters. Water Resources Management. 20: 979-990.
- 2 . Audet C and Dennis JE (2003) Analysis of generalized pattern searches. SIAM Journal on Optimization. Pp. 889-903.
- 3 . Audet C (2004) Convergence results for pattern search algorithms are tight. Optimization and Engineering. Pp. 101-122.
- 4 . Chow VT (1959) Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill New York.
- 5 . Geem ZW (2006) Parameter Estimation for the Nonlinear Muskingum Model using the BFGS Technique. Irrigation and Drainage Engineering. ASCE. 132(5): 474-478.
- 6 . Gill MA (1978) Flood routing by Muskingum Method. Hydrology. 36: 353-363.
- 7 . Hone JC and Liang CC (2009) Applying Particle Swarm Optimization to Parameter Estimation of the Nonlinear Muskingum Model. Hydrologic Engineering. ASCE. Pp. 1943-5584.
- 8 . Kim JH, Geem ZW and Kim ES (2001) Parameter Estimation of the Nonlinear Muskingum Model using Harmony Search. The American Journal of Water Resources Association. 37(5): 1131-1138.
- 9 . Lewis RM, Torczon V and Trosset MW (1998) Why pattern search works. Optimization. Pp. 1-7.
- 10 . Lewis RM and Torczon V (2000) Pattern search methods for linearly constrained minimization. SIAM Journal on Optimization. Pp. 917-941.
- 11 . McCarthy GT (1938) The Unit Hydrograph and Flood Routing. Presented at Conference of North Atlantic Division. U. S. Army Corps of Engineers. Rhode and Island.
- 12 . Mohan S (1997) Parameter Estimation of Nonlinear Muskingum Models using Genetic Algorithm. Hydraulic Engineering. ASCE. 132(2): 137-142.

- 13 . Tung YK (1985) River Flood Routing by Nonlinear Muskingum Method. Hydraulic Engineering ASCE. 111(12): 1447-1460.
- 14 . Wilson EM (1974) Engineering Hydrology. Macmillan Education Ltd. Hampshire U.K.
- 15 . Yoon JW and Padmanabhan G (1993) Parameter Estimation of Linear and Nonlinear Muskingum Models. Water Resources Planning and Management ASCE. 119(5): 600-610.

Evaluation of direct search and genetic algorithms in optimization of muskingum nonlinear model parameters - a flooding of Karoun river, Iran

M. Mohammadi Ghaleni¹ and K. Ebrahimi^{2*}

(E-mail: ebrahimik@ut.ac.ir)

(Received: 7 February 2011, Accepted: 9 March 2013)

Abstract

In this research, performance of Pattern Search algorithm (PS) was investigated in order to optimize the nonlinear Muskingum model parameters in contrast with the general algorithms, for Wilson and Karoun floods routing. Wilson flood routing has been chosen to compare the ability of PS algorithm with other algorithms and Karoun flood routing has been chosen for a better evaluation of PS. The results of the Wilson flood routing using PS algorithm showed that the absolute and the sum squares errors were equal to 62.65 and 29.48 m³/s, respectively. Also, the lowest difference between the real and routing Wilson flood discharges, by the PS algorithm, was found to be equal to 0.29 m³/s. The results of Karoun flood routing using PS algorithm showed that the sum square error, sum absolute error and difference between the real and routing floods were equal to 7842.10, 420 and 9.7 m³/s, respectively. A comparison between the current studies with the other research results showed that PS algorithm is efficient and could be suggested for optimizing of nonlinear Muskingum model parameters.

Keywords: Direct search algorithms, Flood routing, Karoun, Nonlinear Muskingum model, Optimization, Wilson

1 - Ph.D. Student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj - Iran

2 - Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj - Iran (**Corresponding Author ***)