# تخمین پارامترهای بهینه مدل روندیابی غیرخطی ماسکینگام با استفاده از الگوریتم مورچگان پیوسته

محمد جواد زینلی[۱]، محسن پوررضا بیلندی[۲]

تاریخ ارسال:۱۳۹۵/۰۹/۱۷
تاریخ پذیرش:۱۳۹۶/۰۱۲/۰۵

## چکیده

بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام به روش آزمون و خطا و روش‌های عددی انجام می‌شود. این روش‌ها دشوار و وقت‌گیر می‌باشد اما الگوریتم‌های فرا ابتکاری با سرعت بالاتر و به‌صورت دقیق‌تر می‌توانند تخمینی مناسب از این پارامترها را به دست دهند. در این پژوهش کارایی الگوریتم مورچگان پیوسته (ACOr)، در تخمین پارامترهای بهینه مدل روندیابی غیرخطی ماسکینگام مورد بررسی قرار گرفته است و برای ارزیابی آن از معیار مجموع مربعات خطا استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که الگوریتم مورچگان پیوسته در مورد سیل ویلسون با SSE = ۳۶/۷۶۷۹ و در مورد سیلاب رودخانه وی با SSE = ۳۷۹۴۴/۱۴ کارایی مناسبی داشته است. پس اطمینان از کارایی الگوریتم ACOr، مدل روندیابی غیرخطی ماسکینگام برای رودخانه کارون نیز مورد بررسی قرار گرفت و مقدار SSE آن برابر ۱۴۴۶۹۱/۷۳۵ بوده که در مقایسه با الگوریتم کلونی زنبور عسل (SSE=۱۷۷۱۶۱/۴) کارایی بالاتری را نشان داد. همچنین در این تحقیق روندیابی این سه سیلاب با روش کان‌وکس نیز مورد بررسی قرار گرفت که در مورد سیلاب ویلسون و سیلاب رودخانه وی این روش عملکرد مناسبی نداشته اما در روندیابی سیلاب رودخانه کارون عملکرد مناسبی را نسبت به روش ماسکینگام غیرخطی نشان داده است. این مدل تخمین مناسبی از دبی اوج به دست آورده است، که این موضوع از نظر اجرای سیستم‌های هشدار سیل بسیار اهمیت دارد.

**واژه هان کلیدی: بهینه‌سازی، رودخانه وی، سیل ویلسون، کارون، کان‌وکس، ماسکینگام.**

[۱] دانشجوی دکتری منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند
[۲] استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند . (نویسنده مسئول: Mohsen.pourreza@birjand.ac.ir)

## مقدمه

سیل یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی است که در سال‌های اخیر نیز خساراتی را به مردم مناطق مختلف وارد آورده است. لذا به‌منظور جلوگیری از خسارات سیل معمولاً سازه‌هایی در مجاورت رودخانه احداث می‌شود. مهم‌ترین مسئله برای ساخت چنین سازه‌هایی تخمین درست حجم سیلاب در هر مقطع در امتداد رودخانه و چگونگی اوج گرفتن و فروکش کردن هیدروگراف سیل در آن مقطع می‌باشد.

روندیابی در حقیقت تعیین مشخصات هیدروگراف مقطعی مشخص در پایین دست با استفاده از هیدروگراف مقطعی مشخص در بالادست آن می‌باشد. روش‌های روندیابی سیل به دو گروه عمده هیدرولیکی و هیدرولوژیکی تقسیم می‌شوند. در روندیابی هیدرولیکی از رابطه پیوستگی جریان و رابطه حرکت استفاده می‌شود و اساس آن بر اصول تئوری جریان‌های غیر دائم استوار است. در روندیابی هیدرولوژیکی از اصل پیوستگی جریان و رابطه بین دبی و ذخیره موقت آب در طول مسیر استفاده می‌شود (علیزاده، ۱۳۸۵). از آنجا که روش‌های هیدرولیکی دارای پیچیدگی‌های محاسباتی هستند معمولاً استفاده از آن‌ها مشکل بوده و نیازمند اطلاعات زیادی هستند، اما در مقابل روش‌های هیدرولیکی از روابط ساده‌تری می‌توان استفاده نمود و در عین حال روندیابی را با دقت مناسبی انجام داد. روش روندیابی ماسکینگام[1] از جمله روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی است و از آنجا که این روش یک رابطه خطی بود و توانایی مدل کردن روابط غیرخطی بین ورودی، خروجی و ذخیره موقت را نداشت، (Gill, 1978) نسخه غیرخطی این روش را ارائه نمود و با استفاده از روش حداقل مربعات[2] (LSM) مقادیر سه پارامتر مدل ماسکینگام غیرخطی را پیدا کرد. نکته مهم در استفاده از روش ماسکینگام غیرخطی، تعیین مقدار مناسب پارامترهای آن است، که معمولاً تعیین این پارامترها به‌صورت آزمون و خطا و یا روش‌های عددی دشوار و زمان‌بر انجام می‌شود. به همین منظور استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری جهت یافتن مناسب‌ترین (بهینه‌ترین) مقدار برای پارامترهای این رابطه مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. در این خصوص (Tung, 1985) روشی بر مبنای جست‌وجوی نمونه[3] یا هوک-جیوز[4] در ترکیب با رگرسیون خطی،[5] شیب هم‌زمان[6] و روش[7] (DFP) را برای بهینه‌سازی این پارامترها به کار برد. (Yoon and Padmanabhan, 1993) نشان دادند زمانی که رابطه بین $[XI_t+(1-X)I_t]$ و $S_t$ خطی نیست استفاده از روش غیرخطی جواب‌های قابل‌اطمینان‌تری را ارائه می‌کند. (Mohan, 1987) نشان داد که تمام روش‌های قبلی، رسیدن به جواب بهینه مطلق را ضمانت نمی‌کنند و در دام جواب‌های بهینه موضعی قرار می‌گیرند. او از الگوریتم ژنتیک[8] برای تخمین پارامترهای مدل استفاده کرد و نتایج نشان داد که تخمین به‌وسیله الگوریتم GA بهتر از روش‌های قبلی بوده و نیازی به حدس اولیه نزدیک به جواب بهینه ندارد. (Kim et al, 2001) برای تخمین پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام از الگوریتم جست‌وجوی هارمونی[9] بهره گرفت. (Das, 2004) برای تخمین پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام از لاگرانژ افزاینده[10] و (Geem, 2006) از BFGS بهره گرفتند. (Chu and Chang, 2009) با استفاده از بهینه‌سازی مجموعه ذرات[11] (PSO) پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام را تخمین زدند. آن‌ها نتایج خود را با روش LSM رگرسیون حداقل مربعات خطا[12] (NONLR)، GA و HS مقایسه نمودند و نتایج نشان داد عملکرد PSO از روش‌های LSM و NONLR بهتر بوده است و در مقایسه با GA و HS الگوریتم PSO عملکرد تقریباً مشابهی داشته است. (Luo and Xie, 2010) از روش

[1] Muskingum
[2] Least Square Method
[3] Pattern Search
[4] Hook-Jeeves
[5] Linear Regression
[6] Conjugate Gradient
[7] Davidon-Fletcher Powell
[8] Genetic Algorithm
[9] Harmony Search
[10] Lagrange-multiplier method
[11] Particle Swarm Optimization
[12] Nonlinear Least-Squares Regression

(ICSA)[1] و (Geem, 2011) از روش (PSF-SH)[2] بهره گرفتند. (Xu et al, 2001) با استفاده از الگوریتم تفاضل تکاملی[3] (DE) به تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی پرداختند. آن‌ها نتایج خود را با نتایج حاصل از PSO، HS و GA که توسط دیگر پژوهشگران به دست آمده بود مقایسه نمودند و بیان داشتند که جواب‌های حاصل از DE تفاوت چندانی با سایر الگوریتم‌های فرا کاوشی ندارد و می‌توان آن را به‌عنوان یک روش مناسب در تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام شناخت. (Vafakhah et al, 2015) با الگوریتم کلونی زنبور عسل[4] (ABC) پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام را تخمین زده و عملکرد این الگوریتم را با چند الگوریتم دیگر مقایسه کرده و برای ارزیابی توانایی الگوریتم ABC از معیارهایی مانند مجموع مربعات خطا، مجموع خطای مطلق، میانگین قدر مطلق خطا استفاده نمودند.

در مطالعه حاضر کارایی الگوریتم مورچگان پیوسته، مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از روش‌های فرا ابتکاری برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام نشان می‌دهد که بهبود هر چند جزئی در نتایج حاصل از روندیابی ماسکینگام می‌تواند در کاهش آسیب‌های ناشی از سیلاب مهم و تأثیرگذار باشد.

## مواد و روش‌ها

### مدل ماسکینگام غیرخطی

مدل ماسکینگام به دلیل سادگی و نیاز به اطلاعات کم، مدلی پرکاربرد در روندیابی سیل است. روش ماسکینگام از طریق معادله‌های (۱) و (۲) که به ترتیب معادلات پیوستگی و ذخیره موقت در بازه‌ای از رودخانه هستند، هیدروگراف پایین دست را تخمین می‌زنند.

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

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

در این روابط $O_t$ جریان خروجی در زمان t، $I_t$ جریان ورودی در زمان t، $\frac{dS}{dt}$ تغییرات ذخیره در بازه زمانی، K ضریب زمان ذخیره، X بیانگر تأثیر جریان ورودی و خروجی در میزان ذخیره و $S_t$ ذخیره در زمان t است. رابطه فوق، یک رابطه خطی بین ذخیره و جریان ورودی و خروجی برقرار می‌کند؛ اما رابطه غیرخطی ماسکینگام به‌صورت زیر است.

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

در این رابطه m پارامتری است که امکان برقراری رابطه غیرخطی ذخیره و جریان را فراهم می‌کند. به کمک معادله (۱) و (۳) می‌توان روابط (۴) و (۵) را استخراج نمود.

$$O_t = (\frac{1}{1-X})(\frac{S_t}{K})^{\frac{1}{m}} - (\frac{X}{1-X})I_t \qquad (۴)$$

$$\frac{\Delta S_t}{\Delta t} = -(\frac{1}{1-X})(\frac{S_t}{K})^{\frac{1}{m}} + (\frac{1}{1-X})I_t \qquad (۵)$$

با در دست بودن $S_t$ و $\Delta S_t$، حجم ذخیره در زمان بعدی توسط رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$S_{t+1} = S_t + \Delta S_t \qquad (۶)$$

برای محاسبه هیدروگراف سیل با استفاده از روش ماسکینگام غیرخطی، می‌بایست مراحل زیر طی شود:

۱- در نظر گرفتن مقادیر اولیه برای پارامترهای X، K و m.

۲- ذخیره با استفاده از معادله (۳) با فرض برابر بودن جریان ورودی و خروجی در ابتدای گام زمانی ($I_1 = O_1$)

۳- محاسبه تغییرات ذخیره نسبت به زمان بر اساس رابطه (۵)

۴- محاسبه مقدار ذخیره در مرحله t+1 بر اساس رابطه (۶)

[1] immune clonal selection algorithm
[2] parameter-setting-free harmony search
[3] Differential Evolution
[4] Artificial Bee Colony

۵- محاسبه مقدار جریان خروجی در مرحله t+1 بر اساس رابطه (۴)
۶- تکرار مراحل ۲ تا ۵.

تابع هدف در این مطالعه مجموع مربعات خطا مطابق رابطه (۷) در نظر گرفته شده است. که در آن $O_t$ دبی مشاهده‌ای در زمان t، $\hat{O}_t$ دبی روندیابی شده در زمان t به‌وسیله رابطه (۴) و T تعداد کل داده‌ها است.

$$Min \quad SSE = \sum_{t=1}^{T} (O_t - \hat{O}_t)^2 \qquad (۷)$$

## روش کان‌وکس

این روش بر مبنای این استدلال است که جریان خروجی در هر زمان t به خروجی O و ورودی I در ابتدای فاصله زمانی $\Delta t$ بستگی دارد. با فرض ثابت بودن مقدار c و $0 \le c \le 1$، می‌توان به معادله (۸) دست یافت:

$$O_{t+\Delta t} = cI_t + (1-c)O_t \qquad (۸)$$

یکی از دقیق‌ترین راه‌های محاسبه مقدار c در روش کان‌وکس، مقایسه بین هیدروگراف‌های ورودی و خروجی می‌باشد. در این روش معادله کان‌وکس را می‌توان به‌صورت رابطه (۹) محاسبه نمود:

$$O_2 - O_1 = c(I_1 - O_1) \qquad (۹)$$

این رابطه مشابه معادله خطی است که از مبدأ مختصات می‌گذرد ($y = ax$) و مقدار ضریب زاویه آن ($a = \frac{\sum XY}{\sum X^2}$) می‌باشد و بر این اساس مقدار c مطابق با رابطه (۱۰) محاسبه می‌گردد.

$$c = \frac{\sum (O_2 - O_1)(I_1 - O_1)}{\sum [(I_1 - O_1)^2]} \qquad (۱۰)$$

## سیلاب‌های مورد مطالعه

در این تحقیق سه سیلاب جهت ارزیابی و مقایسه روش‌های روندیابی با کمک الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان پیوسته مورد استفاده قرار گرفت. اکثر محققین سیلاب ویلسون را به‌عنوان یک مبنا برای بررسی عملکرد مدل‌های خود مورد استفاده قرار داده‌اند است. در این پژوهش نیز عملکرد الگوریتم مورچگان پیوسته به‌منظور تخمین پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام روی سیلاب ویلسون و پس از آن به تخمین پارامترهای مدل روی سیلاب رودخانه وی[1] در تاریخ دسامبر ۱۹۶۰ مورد بررسی قرار گرفته در نهایت تخمین پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام روی سیلاب سال ۲۰۰۸ در رودخانه کارون مورد بررسی قرار گرفته است.

## الگوریتم مورچگان پیوسته

الگوریتم مورچگان متغیرهای تصمیم را به‌صورت گسسته در نظر می‌گیرد اما در الگوریتم مورچگان پیوسته متغیرهای تصمیم به‌صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شوند و از این رو کارایی آن به‌مراتب بالاتر از الگوریتم ACO است. دو پارامتر اصلی این الگوریتم q و $\xi$ می‌باشد که مقدار q احتمال انتخاب حل‌های مجاور گره انتخاب شده را مشخص می‌کند که هر چه مقدار آن کم باشد احتمال انتخاب حل‌های مجاور گره انتخاب شده کمتر می‌باشد و پارامتر $\xi$ شبیه به تبخیر فرامان در الگوریتم ACO می‌باشد. همان‌طور که گفته شد الگوریتم مورچگان پیوسته متغیرهای تصمیم را به‌صورت پیوسته در نظر گرفته می‌گیرد و این پیوسته‌سازی فضا با استفاده از یک تابع چگالی احتمال انجام می‌پذیرد. (Socha and Dorigo, 2008) استفاده از یک تابع گوسی را برای ایجاد چنین ساختاری را پیشنهاد نمودند. در سیستمی با n متغیر تصمیم تعداد k تابع گوسی منفرد برای هر متغیر تصمیم در آرشیو در نظر گرفته می‌شود که با انتخاب هر یک از آن‌ها و تولید جواب جدید، در واقع وضعیتی معادل با یک تابع گوسی کرنل برای هر متغیر به وجود می‌آید و به این ترتیب در آرشیو، n تابع گوسی کرنل خواهیم داشت.

تعداد راه حل‌های ذخیره شده در آرشیو با $S_l$ مشخص شده است متغیرهای تصمیم مربوط به l امین جواب، با $S_l^1$ و $S_l^2$ و به همین ترتیب تا متغیر تصمیم n ام با $S_l^n$ نشان داده شده است (تشکیل یک مجموعه

[1] Wye

جواب را داده‌اند). مجموعه جواب هر راه حل وارد تابع هدف شده و سپس مقدار آن برای هر راه حل، $f(S_l)$ ، محاسبه می‌شود. آنگاه جواب‌های موجود در آرشیو بر اساس کیفیت آن‌ها به‌صورت نزولی مرتب شده و ذخیره می‌گردند. سپس برای هر راه حل، $S_l$، یک وزن، $\omega$، تعیین می‌شود که مقدار آن مرتبط باکیفیت جواب مربوطه است (Socha and Dorigo, 2008).

حال برای تولید جواب جدید بر اساس جواب $S_l$ یک عدد تصادفی نرمال به روش باکس مولر با میانگین $S_l^i$ و انحراف معیار $\sigma_l^i$ برای متغیر تصمیم i ام تولید می‌شود (Box and Muller,1958). مقدار عدد تولید شده جدید بر اساس متغیر i ام خواهد بود. این کار برای همه n متغیر تکرار می‌شود تا یک جواب برای کلیه متغیرهای تصمیم تولید گردد. جواب تولید شده حاصل انتخاب یکی از مورچه‌ها است. با تکرار این مرحله برای هر مورچه، سرانجام به تعداد مورچه‌ها، جواب جدید تولید و به آرشیو اضافه می‌شود. در ادامه، پس از مرتب‌سازی کل جواب‌ها، k جواب برتر ذخیره و مابقی پاک می‌شود (Karahan et al, 2012).

## نتایج و بحث

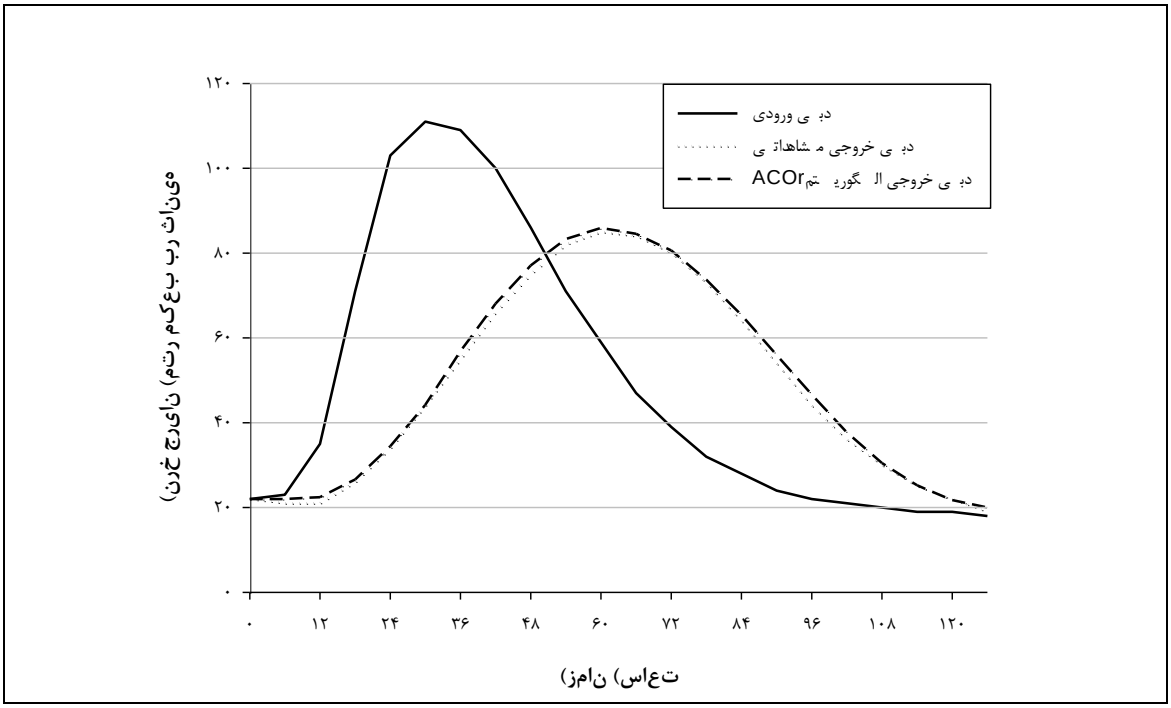
### سیل ویلسون ۱۹۷۶

بازه مناسب برای متغیرهای X، K و m در روش ماسکینگام غیرخطی به ترتیب (۰/۵، ۰/۰۱)، (۱، ۰/۱) (۳، ۱) می‌باشد (Karahan et al, 2012). در الگوریتم مورچگان پیوسته مقدار تابع هدف به تعداد نمونه‌های تولیدی و مقدار ضریب‌های q و $\xi$ وابسته است. تعداد زیاد نمونه‌های تولیدی باعث کاهش سرعت الگوریتم شده و از طرفی تعداد کم نمونه‌ها باعث می‌شود که تمامی فضای جواب‌ها مورد جست‌وجو قرار نگیرد. مقادیر بهینه پارامترهای سیستم مورچگان پیوسته در حل مسئله بهینه‌سازی مدل غیرخطی ماسکینگام برای ضریب q برابر ۰/۱، ضریب $\xi$ برابر ۰/۸ و تعداد نمونه-ها برابر ۱۰۰ بوده است. همچنین تعداد مورچه‌ها و تعداد تکرارها به ترتیب برابر ۳۰۰ و ۵۰۰ می‌باشد.

همان‌طور که گفته شد در خصوص بهینه‌سازی مدل غیرخطی ماسکینگام تحقیقات زیادی بر روی سیل ویلسون صورت گرفته که روش مورد استفاده محقق و نتایج آن به همراه نتایج حاصل از اجرای الگوریتم مورچگان پیوسته در جدول (۱) آورده شده است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود بهترین مقدار برای پارامترهای K، X و m در اجرای الگوریتم مورچگان پیوسته به ترتیب برابر ۰/۵۱۷۴۹، ۰/۲۸۶۹۲ و ۱/۸۶۸۱ می‌باشد و مقدار SSE نیز برابر ۳۶/۷۶۷۹ می‌باشد. شکل (۱) نیز هیدروگراف دبی ورودی، خروجی و هیدروگراف دبی خروجی برآورد شده به‌وسیله الگوریتم ACOr را نشان می‌دهد.

**جدول (۱): نتایج حاصل از اجرای الگوریتم ACOr و مطالعات گذشته در سیلاب ویلسون**

| ردیف | محقق | سال تحقیق | روش | K | X | m | SSE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | Gill | ۱۹۷۸ | S-LSM | ۰/۰۱ | ۰/۰۵ | ۲/۳۴۷ | ۱۴۵/۹۶۴۵ |
| ۲ | Tung | ۱۹۸۵ | HJ+DFP | ۰/۰۷۶۴ | ۰/۲۶۷۷ | ۱/۸۹۷۸ | ۴۵/۶۱۲ |
| ۳ | Yoon and Padmanabham | ۱۹۹۳ | NL-LSM | ۰/۰۶ | ۰/۲۷ | ۲/۳۶ | ۱۵۶/۴۳۹۹ |
| ۴ | Mohan | ۱۹۹۷ | GA | ۰/۱۰۳۳ | ۰/۲۸۱۳ | ۱/۸۲۸۲ | ۳۸/۲۳۶۳ |
| ۵ | Kim et al. | ۲۰۰۱ | HS | ۰/۰۸۸۳ | ۰/۲۸۷۳ | ۱/۸۶۳ | ۳۶/۲۹/۷۸ |
| ۶ | Das | ۲۰۰۴ | LMM | ۰/۰۷۵۳ | ۰/۲۷۶۹ | ۲/۲۹۳۲ | ۱۳۰/۴۸۷۲ |
| ۷ | Geem | ۲۰۰۶ | BFGS | ۰/۰۸۶۳ | ۰/۲۸۶۹ | ۱/۸۶۷۹ | ۳۶/۷۶۷۹ |
| ۸ | Luo and Xie | ۲۰۱۰ | ICSA | ۰/۰۸۸۴ | ۰/۲۸۶۲ | ۱/۸۶۲۴ | ۳۶/۸۰۲۶ |
| ۹ | Geem | ۲۰۱۱ | PSF-HS | ۰/۰۸۶۴ | ۰/۲۸۶۹ | ۱/۸۶۷۷ | ۳۶/۷۶۸ |
| ۱۰ | Xu et al. | ۲۰۱۱ | DE | ۰/۵۱۷۵ | ۰/۲۸۶۹ | ۱/۸۶۸ | ۳۶/۷۷ |
| ۱۱ | Karahan et al. | ۲۰۱۲ | HS-BFGS | ۰/۰۸۶۲۴۹ | ۰/۲۸۶۹۱۷ | ۱/۸۶۸۰۸۸ | ۳۶/۷۶۷۸۸۸ |
| ۱۲ | Vafakhah et al. | ۲۰۱۵ | ABC | ۰/۳۱۸۰۶۴ | ۰/۲۸۶۹۷۹ | ۱/۸۸۶۳۷۲ | ۳۵/۶۲ |
| ۱۳ | - | - | ACOr | ۰/۵۱۷۴۹ | ۰/۲۸۶۹۲ | ۱/۸۶۸۱ | ۳۶/۷۶۷۹ |




**شکل (۱): هیدروگراف دبی ورودی، خروجی و هیدروگراف دبی خروجی برآورد شده به‌وسیله الگوریتم ACOr سیلاب ویلسون**

## سیلاب رودخانه وی

برای تحلیل کارایی الگوریتم ACOr سیلاب سال ۱۹۶۰ رودخانه وی در انگلستان نیز مورد بررسی قرار گرفته که با همان بازه‌های پیش‌فرض برای متغیرهای K،X و m و همچنین تعداد نمونه‌ها و مقادیر ضریب‌های q و ξ که در سیل ویلسون به دست آمده بود، الگوریتم اجرا، و نتایج نشان داد بهترین مقدار برای پارامترهای K، X و m در اجرای الگوریتم مورچگان پیوسته به ترتیب برابر ۰/۴۷۵۴۱، ۰/۴۰۹۲۴ و ۱/۵۸۱۵ می‌باشد و مقدار SSE نیز برابر ۳۷۹۴۴/۱۴۴۶ می‌باشد. (Karahan et al, 2012) نیز بهترین مقدار برای پارامترهای K، X و m در اجرای الگوریتم HS-BFGS به ترتیب برابر ۰/۰۷۹۲۳۵، ۰/۴۰۹۲۳۸ و ۱/۵۸۱۴۸۳ می‌باشد و مقدار SSE نیز برابر ۳۷۹۴۴/۱۴ می‌باشد. که نتایج نشان می‌دهد این دو

الگوریتم تفاوت چندانی در محاسبه دبی خروجی ندارند. مقادیر دبی ورودی، خروجی و دبی خروجی برآورد شده در هر یک از این روش‌ها به همراه نتایج حاصل از اجرای الگوریتم مورچگان پیوسته در جدول (۲) آورده شده است. همچنین شکل (۲) دبی خروجی مشاهداتی، دبی خروجی محاسبه شده توسط (Karahan et al, 2012) و دبی خروجی حاصل از اجرای الگوریتم ACOr را نشان می‌دهد.

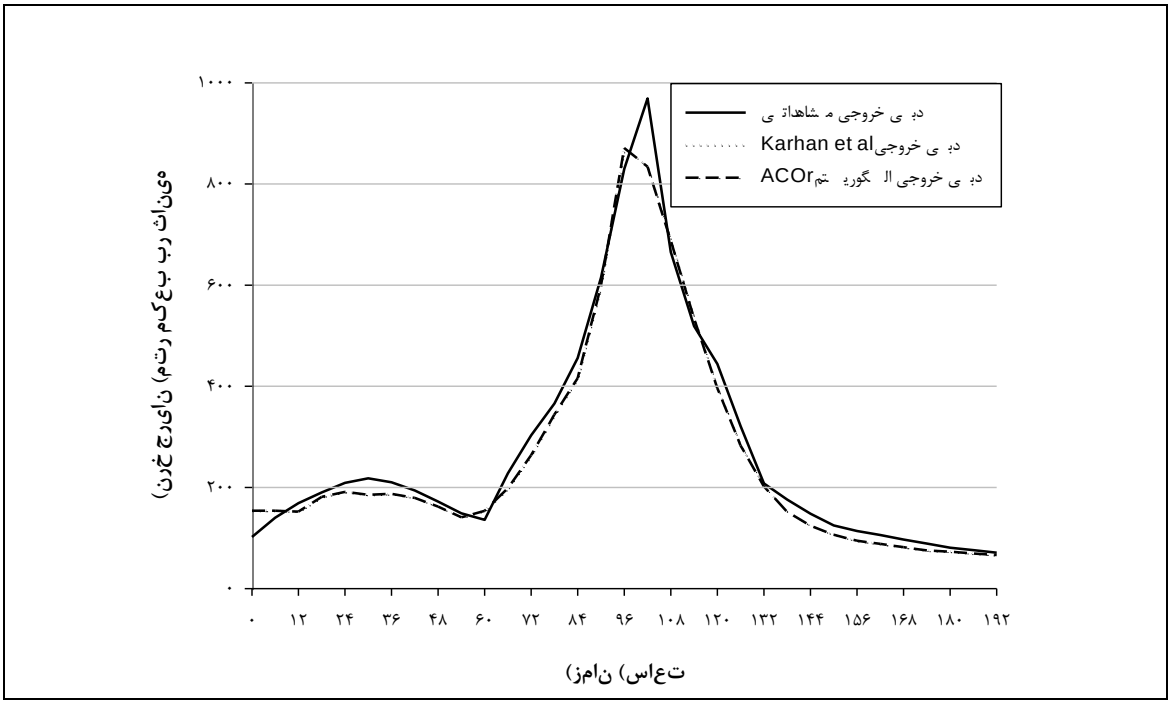
**جدول (۲): مقادیر دبی ورودی، خروجی و دبی خروجی محاسبه شده توسط Karahan et al دبی خروجی محاسبه شده در الگوریتم ACOr**

| Time (h) | $I_t$ ($m^3/s$) | $O_t$ ($m^3/s$) | دبی محاسبه شده | |
|---|---|---|---|---|
| | | | BFGS | ACOr |
| ۰ | ۱۵۴ | ۱۰۲ | ۱۵۴ | ۱۵۴/۰۰ |
| ۶ | ۱۵۰ | ۱۴۰ | ۱۵۴ | ۱۵۴/۰۰ |
| ۱۲ | ۲۱۹ | ۱۶۹ | ۱۵۲ | ۱۵۱/۸۶ |
| ۱۸ | ۱۸۲ | ۱۹۰ | ۱۸۱ | ۱۸۱/۴۴ |
| ۲۴ | ۱۸۲ | ۲۰۹ | ۱۹۱ | ۱۹۱/۱۵ |
| ۳۰ | ۱۹۲ | ۲۱۸ | ۱۸۵ | ۱۸۵/۲۲ |
| ۳۶ | ۱۶۵ | ۲۱۰ | ۱۸۷ | ۱۸۷/۱۵ |
| ۴۲ | ۱۵۰ | ۱۹۴ | ۱۷۹ | ۱۷۹/۰۱ |
| ۴۸ | ۱۲۸ | ۱۷۲ | ۱۶۲ | ۱۶۲/۰۹ |
| ۵۴ | ۱۶۸ | ۱۴۹ | ۱۴۱ | ۱۴۰/۶۲ |
| ۶۰ | ۲۶۰ | ۱۳۶ | ۱۵۴ | ۱۵۳/۷۱ |
| ۶۶ | ۴۷۱ | ۲۲۸ | ۱۹۸ | ۱۹۸/۲۵ |
| ۷۲ | ۷۱۷ | ۳۰۳ | ۲۶۴ | ۲۶۳/۵۶ |
| ۷۸ | ۱۰۹۲ | ۳۶۶ | ۳۴۴ | ۳۴۳/۹۵ |
| ۸۴ | ۱۱۴۵ | ۴۵۶ | ۴۱۶ | ۴۱۶/۲۷ |
| ۹۰ | ۶۰۰ | ۶۱۵ | ۵۹۹ | ۵۹۸/۵۱ |
| ۹۶ | ۳۶۵ | ۸۳۰ | ۸۷۱ | ۸۷۱/۲۰ |
| ۱۰۲ | ۲۷۷ | ۹۶۹ | ۸۳۴ | ۸۳۳/۸۲ |
| ۱۰۸ | ۲۲۷ | ۶۶۵ | ۶۸۹ | ۶۸۸/۵۸ |
| ۱۱۴ | ۱۸۷ | ۵۱۹ | ۵۳۵ | ۵۳۴/۵۲ |
| ۱۲۰ | ۱۶۱ | ۴۴۴ | ۳۹۷ | ۳۹۶/۶۷ |
| ۱۲۶ | ۱۴۳ | ۳۲۱ | ۲۸۳ | ۲۸۲/۹۷ |
| ۱۳۲ | ۱۲۶ | ۲۰۸ | ۲۰۲ | ۲۰۲/۳۱ |
| ۱۳۸ | ۱۱۵ | ۱۷۶ | ۱۵۲ | ۱۵۱/۷۶ |
| ۱۴۴ | ۱۰۲ | ۱۴۸ | ۱۲۴ | ۱۲۴/۱۳ |
| ۱۵۰ | ۹۳ | ۱۲۵ | ۱۰۶ | ۱۰۶/۱۳ |
| ۱۵۶ | ۸۸ | ۱۱۴ | ۹۴ | ۹۴/۲۹ |
| ۱۶۲ | ۸۲ | ۱۰۶ | ۸۸ | ۸۸/۱۹ |
| ۱۶۸ | ۷۶ | ۹۷ | ۸۲ | ۸۱/۷۹ |
| ۱۷۴ | ۷۳ | ۸۹ | ۷۵ | ۷۵/۳۴ |
| ۱۸۰ | ۷۰ | ۸۱ | ۷۳ | ۷۲/۵۴ |

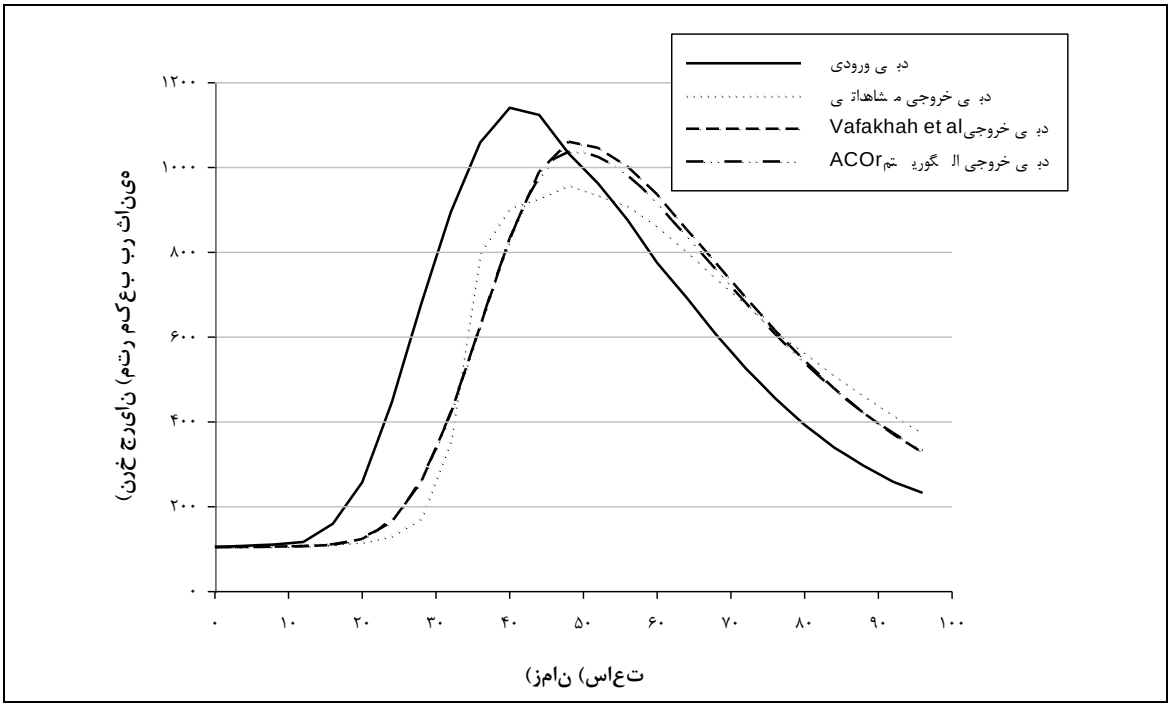
| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ۱۸۶ | ۶۷ | ۷۶ | ۶۹ | ۶۹/۴۰ |
| ۱۹۲ | ۶۳ | ۷۱ | ۶۶ | ۶۶/۲۸ |
| ۱۹۸ | ۵۹ | ۶۶ | ۶۲ | ۶۱/۸۰ |

**سیلاب رودخانه کارون**

سیلاب مورد بررسی در تاریخ ۳۰/۱۱/۲۰۰۸ تا ۳/۱۲/۲۰۰۸ رودخانه کارون رخ داده است (Vafakhah et al, 2015). کارایی الگوریتم ACOr در خصوص سیلاب نیز مورد بررسی قرار گرفته اما در این مسئله بایستی بازه پیش‌فرض برای متغیرهای X، K و m تغییر نماید؛ اما با همان تعداد نمونه‌ها و مقادیر ضریب‌های q و ξ که در سیل ویلسون و سیلاب رودخانه وی به دست آمده بود، الگوریتم اجرا شد و نتایج نشان داد بهترین مقدار برای پارامترهای X، K و m در اجرای الگوریتم مورچگان پیوسته به ترتیب برابر ۲۳۷/۷۱۵۳، ۰/۰۰۰۱ و ۰/۵۶۸۴۱ می‌باشد و مقدار SSE نیز برابر ۱۴۴۶۹۱/۷۳۵ می‌باشد. (Vafakhah et al, 2015) نیز بهترین مقدار برای پارامترهای X، K و m در اجرای الگوریتم ABC به ترتیب برابر ۷۶/۹۴، ۰/۰۰۰۱ و ۰/۷۱۴۳ و مقدار SSE نیز برابر ۱۷۷۱۶۱/۴ به دست آوردند. با توجه به شاخص SSE، مقایسه بین این دو الگوریتم نشان می‌دهد الگوریتم ACOr عملکرد مناسب‌تری داشته است. شکل (۳) دبی خروجی مشاهداتی، دبی خروجی محاسبه شده توسط (Vafakhah et al, 2015) و دبی خروجی حاصل از اجرای الگوریتم ACOr را نشان می‌دهد.




**شکل (۲): دبی خروجی مشاهداتی، دبی خروجی محاسبه شده توسط Karahan et al و دبی خروجی حاصل از اجرای الگوریتم ACOr**



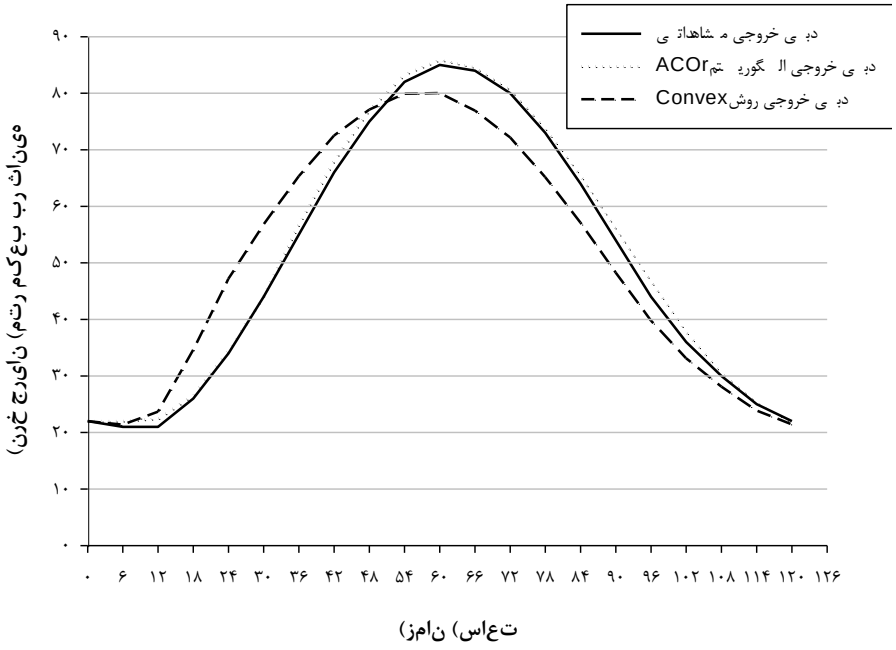

**شکل (۳): دبی ورودی، خروجی مشاهداتی، دبی خروجی محاسبه شده توسط Vafakhah et al و دبی خروجی حاصل از اجرای الگوریتم ACOr**

اما از آنجایی در روندسازی سیلاب خروجی امکان بیش‌تخمینی یا کم تخمینی وجود دارد و از طرفی جهت اجرای سیستم‌های هشدار سیل، دبی اوج سیلاب اهمیت بیشتری دارد لذا دبی اوج روندیابی شده نیز نبایستی اختلاف زیادی با مقدار دبی اوج سیلاب داشته باشد. در این تحقیق دبی اوج سیلاب رودخانه کارون برابر ۹۵۸ متر مکعب بر ثانیه بوده و دبی روندیابی شده توسط الگوریتم مورچگان پیوسته برابر ۱۰۳۷/۴ بوده است و مقدار این دبی در الگوریتم ABC ( Vafakhah et al, 2015) برابر ۱۰۶۰/۸ به دست آمده است.

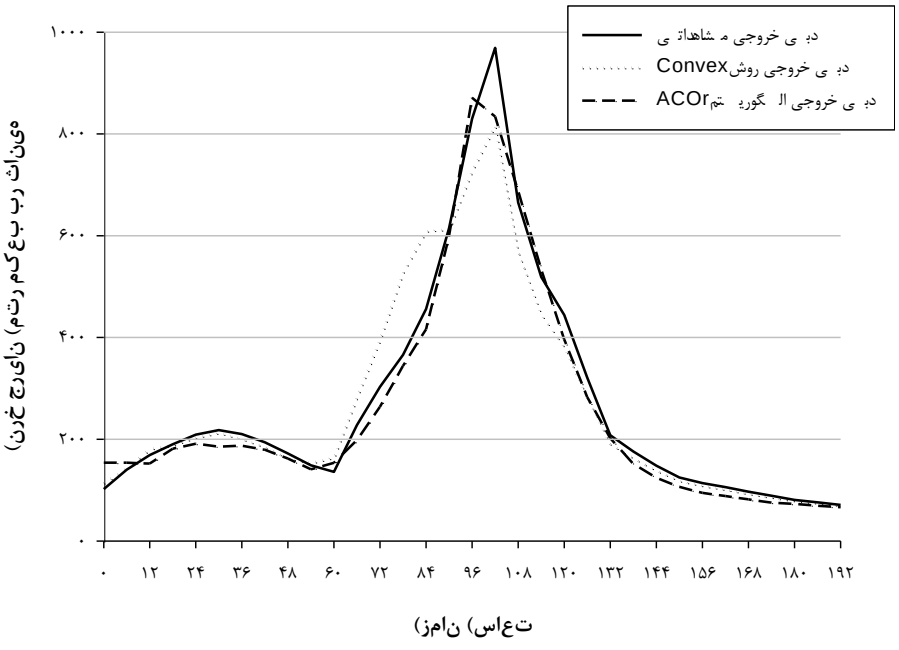
در این تحقیق، هر سه سیلاب با روش کان‌وکس (Convex) نیز مورد بررسی قرار گفته که در مورد سیلاب ویلسون و سیلاب رودخانه وی، روش کان‌وکس نسبت به روش ماسکینگام غیرخطی عملکرد مناسبی نداشته اما در مورد سیلاب رودخانه کارون این روش عملکرد مناسب‌تری نسبت به روش ماسکینگام غیرخطی داشته است. مقدار SSE در روش کان‌وکس برای هریک از سیلاب‌ها در جدول (۳) آورده شده است. همچنین دبی خروجی مشاهداتی، و خروجی روندیابی شده با روش کان‌وکس در شکل‌های (۴-الف) تا (۴-ج) آورده شده است.

**جدول (۳) مقدار SEE روش کان‌وکس برای سیلاب‌های ویلسون، رودخانه وی و کارون**

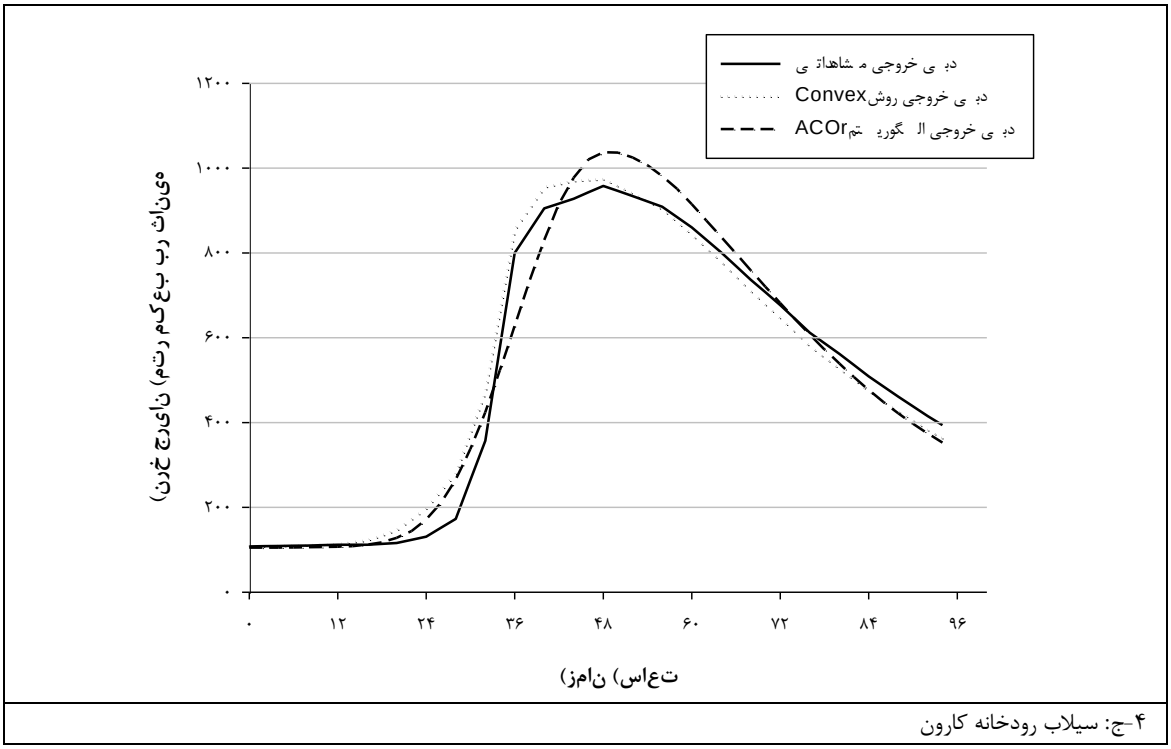
| | سیلاب ویلسون | سیلاب رودخانه Wye | سیلاب رودخانه کارون |
|---|---|---|---|
| مقدار SSE | ۸۸۵/۶۷ | ۱۱۷۳۳۴/۶۵ | ۹۰۳۰۹/۱۳ |




۴-الف: سیلاب ویلسون




۴-ب: سیلاب رودخانه Wye




۴-ج: سیلاب رودخانه کارون

**شکل (۴): دبی ورودی، دبی خروجی، و خروجی روندیابی شده با روش کانوکس**

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق کارایی الگوریتم مورچگان پیوسته در تخمین پارامترهای بهینه مدل روندیابی غیرخطی ماسکینگام مورد بررسی قرار گرفته و برای ارزیابی عملکرد این الگوریتم سیل ویلسون، سیلاب رودخانه وی و سیلاب رودخانه کارون مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ارزیابی عملکرد الگوریتم ACOr با تحقیقات گذشته مربوط به سیلاب ویلسون نشان داد این الگوریتم کارایی مناسبی داشته و همچنین در مورد سیلاب رودخانه وی کارایی خود را نشان داده است. در روندیابی سیل ویلسون بهترین مقدار برای پارامترهای K، X و m در اجرای الگوریتم ACOr به ترتیب برابر ۰/۵۱۷۴۹، ۰/۲۸۶۹۲ و ۱/۸۶۸۱ و مقدار SSE نیز برابر ۳۶/۷۶۷۹ بوده است و در روندیابی سیلاب رودخانه وی بهترین مقدار برای پارامترهای K، X و m در اجرای الگوریتم مورچگان پیوسته به ترتیب برابر ۰/۴۷۵۴۱، ۰/۴۰۹۲۴ و ۱/۵۸۱۵ و مقدار SSE نیز برابر ۳۷۹۴۴/۱۴۴۶ بوده است. و بهترین مقدار برای پارامترهای K، X و m در اجرای الگوریتم ACOr در مورد سیلاب رودخانه کارون به ترتیب برابر ۲۳۷/۷۱۵۳، ۰/۰۰۰۱ و ۰/۵۶۸۴۱ و مقدار SSE نیز برابر ۱۴۴۶۹۱/۷۳۵ بوده است در حالی که (Vafakhah et al, 2015) بهترین مقدار را برای پارامترهای K، X و m در اجرای الگوریتم ABC به ترتیب برابر ۷۶/۹۴، ۰/۰۰۰۱ و ۰/۷۱۴۳ و مقدار SSE نیز برابر ۱۷۷۱۶۱/۴ به دست آوردند. همچنین سه سیلاب مذکور با روش کانوکس نیز مورد بررسی قرار گرفت که روش ماسکینگام غیرخطی در سیلاب ویلسون و سیلاب رودخانه وی نسبت به روش کان-وکس کارایی مناسبی داشته، اما در مورد سیلاب رودخانه کارون روش کانوکس عملکرد مناسب‌تری را از خود نشان داده است. همچنین روش کانوکس تخمین دقیق‌تری از مقدار دبی اوج به دست داده است

## منابع

داریان، ع. ،ر. و م. ا. مرادی. ۱۳۸۹. الگوریتم مورچگان پیوسته در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی، مطالعه موردی: مخازن حوضه کرخه. هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران. دانشگاه شیراز. شیراز.

علیزاده، ا. ۱۳۸۵. اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع). مشهد. ۶۲۰-۶۰۵.

Box, G. E. P. and M. E. Muller. 1958. A note on the generation of random normal deviates. Annals of Math. Statistics. 29(2): 610-611.

Chu, H. J. and L. C. Chang. 2009. Applying particle swarm optimization to parameter estimation of the nonlinear Muskingum model. J. Hydrologic Engineering 14: 1024-1027.

Das, A. 2004. Parameter estimation of Muskingum models. Journal of Irrigation and Drain Engineering. 130(2):140–147.

Geem, Z. W. 2006. Parameter estimation for the nonlinear Muskingum model using the BFGS technique. Journal of Irrigation and Drain Engineering. 132(5):474–478.

Geem, Z. W. 2011. Parameter estimation of the nonlinear Muskingum model using parameter-setting-free harmony search algorithm. Journal of Hydrology Engineering. 16(8):684–688.

Gill, M. A. 1978. Flood routing by Muskingum method. Journal of Hydrology. 36:353-363.

Karahan, H., G. Gurarslan and Z. W. Geem. 2012. Parameter estimation of the nonlinear Muskingum flood-routing model using a hybrid harmony search algorithm. Journal of Hydrologic Engineering. 18:352-360.

Kim, J. H., Z. W. Geem and E. S. Kim. 2001. Parameter estimation of the nonlinear Muskingum model using harmony search. Journal of the American Water Resources Association. 37(5):1131–1138.

Luo, J., and J. Xie. 2010. Parameter estimation for the nonlinear Muskingum model based on immune clonal selection algorithm. Journal of Hydrologic Engineering. 15(10):844–851.

Mohan S. 1997. Parameter Estimation of Nonlinear Muskingum Models using Genetic Algorithm, Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 123:137-142.

Socha, K. and M. Dorigo. 2008. Ant colony optimization for continuous domains. European Journal of Operational Research. 185(3):1155-1173.

Tung Y. K. 1985. River Flood Routing by Nonlinear Muskingum Method. Hydraulic Engineering. ASCE. 111:1447-1460.

Vafakhah, M., A. Dastorani and A. Moghadam Nia. 2015. Optimal Parameter Estimation for Nonlinear Muskingum Model based on Artificial Bee Colony Algorithm. ECOPERSIA. 3(1):847-865.

Xu, D. M., L. Qiu and S. Y. Chen. 2011. Estimation of nonlinear Muskingum model parameter using differential evolution. Journal of Hydrologic Engineering 17:348-353.

Yoon, J. W. and G. Padmanabhan. 1993. Parameter-estimation of linear and nonlinear Muskingum models. Journal of Water Resources Planning and Management. 119(5):600–610.

# Estimation of Optimal Parameters of the Nonlinear Muskingum Model Using Continuous Ant Colony Algorithm

**Mohammad Javad Zeinali[1], Pourreza-Bilondi Mohsen[2]**

## Abstract

Optimizing parameters of nonlinear Muskingum model done by the method of try and error and numerical. These methods are difficult and time-consuming. But Meta-Heuristic Algorithms can indicate the good estimation of these parameters with high-speed and more precision. In this study investigated performance of continuous ant colony algorithm (ACOr) for estimation of optimal parameters of the nonlinear Muskingum routing model and we used sum of squared error criteria to evaluate that. The results indicated that continuous ant colony algorithm has good efficiency on Wilson flood and Wye River flood with SSE=36.7679 and 37944.14. After ensuring the efficiency of ACOr algorithm, we used nonlinear Muskingum routing model investigated for Karoon River and the value of SSE was equal to 144691.735 that indicated higher performance in comparing to bee colony algorithm (SEE = 177161.4). Also, in this study the three flood routing have investigated by the convex method. This method didn't has good performance on Wilson flood and Wye River flood but in Karoon River flood routing indicated better performance than nonlinear Muskingum methods. This model provided good estimation of peak of flow discharge, that this issue is very important for Implementation of flood warning systems.

**Keywords: Convex, Karoon, Muskingum, Optimization, Wilson Flood, Wye River.**

1 Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
2 Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran (Corresponding Author: Mohsen.pourreza@birjand.ac.ir)