

بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام با استفاده از

الگوریتم بهینه‌سازی نورد شبیه‌سازی شده

مهدی محمدی قلعه‌نی^{۱*} - امید بزرگ حداد^۲ - کیومرث ابراهیمی^۳

تاریخ دریافت: ۸۸/۱۰/۴

تاریخ پذیرش: ۸۹/۴/۲۷

چکیده

اگرچه کاربرد مدل ماسکینگام به دلیل مشکل بودن تخمین پارامترها هنوز با دشواری روبروست، اما این مدل به طور گسترده‌ای برای روندیابی سیل در هیدرولوژی بکار می‌رود. در تحقیق حاضر الگوریتم نورد شبیه‌سازی شده که الگوریتمی کارا در بهینه‌سازی است برای تخمین و بهینه‌سازی سه پارامتر مدل غیرخطی ماسکینگام استفاده شد. نتایج بدست آمده نشانگر دقت بالای این الگوریتم در تخمین این پارامترها بود، بطوریکه در مثال اول مجموع مربعات خطا (SSQ) برابر $۳۶/۷۸$ ، مجموع قدر مطلق خطاها (SAD) برابر $۲۲/۴۴$ ، دبی پیک واقعی ۸۵ مترمکعب بر ثانیه بود و دبی پیک روندیابی شده $۸۵/۹۰$ بدست آمد که، تفاوت این دو (DPO) برابر یک درصد خطا و تفاوت گام زمانی وقوع دبی پیک واقعی و روندیابی شده ($DPOT$) صفر بدست آمد. در مثال موردی دوم الگوریتم SA ($Simulated Annealing$) در مورد سیلاب رودخانه کارون آزمایش و نتایج آن با روش GA ($Genetic Algorithm$) مقایسه شد. نتایج نشان داد که الگوریتم SA تخمین بهتری نسبت به روش GA دارد. بطوریکه مجموع مربعات خطا (SSQ) برابر $۴۹۴۷/۰۶$ ، مجموع قدر مطلق خطاها (SAD) برابر $۴۱۲/۸$ ، دبی پیک واقعی ۱۱۸۲ مترمکعب بر ثانیه بود و دبی پیک روندیابی شده ۱۱۹۱ بدست آمد که، تفاوت این دو (DPO) برابر کمتر از یک درصد خطا و تفاوت گام زمانی وقوع دبی پیک واقعی و روندیابی شده ($DPOT$) صفر بدست آمد. در نهایت این تحقیق قابلیت الگوریتم SA را در زمینه بهینه‌سازی پارامترهای مدل ماسکینگام نشان داد.

واژه های کلیدی: الگوریتم نورد شبیه‌سازی شده، بهینه‌سازی، روندیابی سیل، مدل ماسکینگام

مقدمه

می‌گیرد. این محاسبات به عنوان روندیابی هیدرولیکی^۴ نامیده می‌شود. در بسیاری از مواقع، می‌توان برخی از عبارات را که کوچکترند حذف و آنها را ساده‌تر کرد. این چنین تجزیه و تحلیل را روش‌های تقریبی^۵ گویند. با توجه به نوع فرمول در نظر گرفته شده برای اندازه حرکت در محاسبات، روش‌های تقریبی برای روندیابی سیل دارای نام‌های مختلفی خواهند بود. هرگاه معادله پیوستگی به همراه شکل ساده شده‌ای از معادله اندازه حرکت حل شود، روندیابی هیدرولوژیکی^۶ نامیده می‌شود. اما در صورتیکه یک عبارت اضافی مربوط به شیب سطح آزاد آب نیز در نظر گرفته شود، آن را روندیابی پخشیدگی^۷ نامند. اگر در معادله اندازه حرکت ساده شده، معادله جریان پا برجا و یکنواخت باشد، روش مذکور را روندیابی سینماتیک^۸ گویند (۱). در

سیل می‌تواند باعث خسارات زیادی در مناطق شهری، صنعتی و کشاورزی واقع در مجاورت رودخانه‌ها شود. به منظور جلوگیری از خسارات سیل معمولاً سازه‌هایی در مجاورت رودخانه احداث می‌شود. مهمترین مسئله برای ساخت چنین سازه‌هایی تخمین حجم سیلاب در هر نقطه در امتداد رودخانه می‌باشد. پیش بینی چگونگی طغیان و فروکش سیل در مقطع مشخصی از رودخانه با روندیابی انجام می‌شود. روندیابی در حقیقت تعیین مشخصات هیدروگراف مقطع مشخصی در پایین دست رودخانه با استفاده از هیدروگراف مقطع مشخصی در بالادست آن می‌باشد (۲). روندیابی سیل در جریان دو بعدی، با استفاده از معادلات و روش‌های عددی حاکم صورت

- 4- Hydraulic Routing
- 5- Approximate Method
- 6- Hydrologic Routing
- 7- Dispersion Routing
- 8- Kinematic Routing

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب و استادیاران گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران
* - نویسنده مسئول: (Email: M.mghaleni@gmail.com)

غیرخطی ماسکینگام استفاده کردند. این نرم افزار بر اساس پارامترهای تخمینی و مدل خطی یا غیرخطی انتخاب شده روندیابی سیل را انجام می‌دهد. نتایج آنها به علت اینکه داده‌های انتخابی غیرخطی بودند رضایت بخش بود، اگرچه سایر روش‌های تخمینی دیگر هم به خوبی جواب دادند. موهان (۱۷) نشان داد که تمام روش‌های قبلی رسیدن به جواب بهینه مطلق را ضمانت نمی‌کنند و در دام جوابهای بهینه موضعی قرار می‌گیرند. او از GA برای تخمین پارامترهای مدل استفاده کرد و نتایج نشان داد که تخمین به وسیله GA بهتر از روشهای قبلی بوده و نیازی به حدس اولیه نزدیک به جواب بهینه ندارد.

کیم و همکاران (۱۱) الگوریتم HS را در مسئله‌ای مشابه به کار بردند. نتایج بدست آمده از HS تخمین بهتری از GA داشت و همچنین نیازی به حدس اولیه نزدیک به جواب بهینه ندارد. روش آنها نه تنها در کمینه کردن تابع هدف (SSQ)^{۱۲} موفق بود، بلکه سایر پارامترهای در نظر گرفته شده مانند مجموع قدرمطلق خطا (SAD)^{۱۳}، تفاوت دبی اوج واقعی و روندیابی شده (DPO)^{۱۴} و تفاوت گام زمانی دبی اوج واقعی و روندیابی شده ($DPOT$)^{۱۵} نیز مقادیر بهتری نسبت به سایر روش‌های قبلی دارا بودند. جاسم و همکاران (۳) دو روش تقریبی را برای تخمین پارامترهای مدل خطی ماسکینگام ارائه دادند. بطوریکه، در روش اول محاسبه شیب‌های هیدروگراف‌های ورودی و خروجی در نقطه تقاطع و محاسبه ماکزیمم حجم ذخیره در داخل این ناحیه ضروری بود ولی در روش دوم تنها نیاز به محاسبه هیدروگراف‌های ورودی و خروجی در دو نقطه مشخص بود. آزمایش این دو روش در سه مورد مطالعاتی نشانگر قابل مقایسه بودن روش اول با روش سعی و خطا در مورد تخمین این پارامترها بود. چو و همکاران (۲۰۰۹) الگوریتم بهینه‌سازی مجموعه ذرات^{۱۶} (PSO) را برای تخمین این پارامترها به کار بردند. نتایج در مقایسه با روش‌های قبلی تخمین بهتری نسبت به همه روش‌های قبلی به جز الگوریتم HS داشت. همچنین در این روش نیازی به حدس اولیه نزدیک به جواب بهینه نبود. نتایج نشان داد که الگوریتم PSO از دقت بالایی در تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی برخوردار است. همچنین با قابلیت بالای این روش در پیش بینی هیدروگراف خروجی که در تحقیق آنها به اثبات رسید، به نظر می‌رسد الگوریتم PSO در آینده جایگاه خاصی در زمینه هیدرولوژی

روش هیدرولوژیکی از اصل پیوستگی جریان و رابطه بین دبی و ذخیره موقت آب در طول مسیر استفاده می‌شود، که روش نسبتاً ساده‌ای بوده و از دقت کافی در کارهای آبی برخوردار است. روش روندیابی هیدرولوژیکی بر اصول پیچیده هیدرولوژیکی و قوانین جریان‌های غیرماندگار در کانال‌های روباز استوار است. این روش نیازمند اطلاعات وسیع هیدرولوژیکی و دارای محاسباتی طولانی است (۲). مدل ماسکینگام یکی از روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی است. در این مدل از معادلات پیوستگی و روابط بین مقادیر ورودی، خروجی و ذخیره سیل استفاده می‌شود. رابطه غیرخطی مدل ماسکینگام توسط گیل و همکاران (۸) ارائه شد. مسئله مهم در این معادله تخمین قابل قبولی از سه پارامتر موجود می‌باشد، که محاسبه آنها با روش‌های عددی و سعی و خطا، بسیار طولانی و مشکل است. به همین منظور از سال‌ها قبل روش‌های مختلفی برای تخمین این پارامترها استفاده شده است، که الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکوشی^۱ در تخمین این پارامترها کاربرد زیادی داشته‌اند. در طول دو دهه گذشته تکنیک‌های بهینه‌سازی مختلفی از جمله روش الگوریتم $BFGS$ ^۲، GA ^۳ و الگوریتم جستجوی هارمونی^۴ (HS) برای مشخص کردن این سه پارامتر به کار گرفته شده است. گیل و همکاران (۱۹۷۸) با استفاده از روش حداقل مربعات^۵ (LSM) مقادیر سه پارامتر مدل ماسکینگام غیرخطی را پیدا کردند (۸). تونگ (۲۰) روشی بر مبنای جستجوی مستقیم^۶ (PS) یا هوک-جیوز^۷ (HJ) در ترکیب با رگرسیون خطی^۸ (LR)، شیب همزمان^۹ (CG) و روش DFP ^{۱۰} را برای بهینه کردن این پارامترها به کار برد. جواب‌های این روش ($HJ+CG$) و ($HJ+DFP$) در مقایسه با روش گیل نتایج بهتری را بدست آوردند. این تحقیق محدودیت‌های زیاد مدل خطی را ثابت کرد و اینکه در مورد هر مسئله‌ای باید با توجه به رفتار سیستم مدلی مناسب برای آن انتخاب شود.

یون و همکاران (۲۲) روش‌های متفاوتی را برای تخمین این پارامترها مورد بحث قرار دادند. آنها در تحقیق خود از بسته نرم افزار به نام سیستم روندیابی سیل و تخمین پارامترهای ماسکینگام^{۱۱} ($MUPERS$) برای تخمین پارامترهای مدل خطی و

- 1- Metaheuristic Optimization Algorithms
- 2- Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno
- 3- Genetic Algorithm
- 4- Harmony Search
- 5- Least-Squares Method
- 6- Pattern Search
- 7- Hook-Jeeves
- 8- Linear Regression
- 9- Conjugate Gradient
- 10- Davidon-Fletcher Powell
- 11- Muskingum Parameter Estimation and Flood Routing System

- 12- Sum of the Square of the Deviations Between the Observed and Routed Outflows
- 13- Sum of the Absolute Value of the Deviations
- 14- Deviations of Peak of Routed and Actual Flows
- 15- Deviations of Peak Time of Routed and Actual Outflow
- 16- Particle Swarm Optimization

توسط مهندسين ارتش ايالات متحده آمریکا (۱۹۳۸) برای پروژه کنترل سيلاب در حدود ۶ دهه قبل گسترش يافت (۱۵). دو معادله پيوستگی و ذخيره غيرخطی بطور مشترک در مدل ماسکينگام به شکل زیر به کار رفته اند:

$$\frac{ds}{dt} = I_t - O_t \quad (1)$$

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

در این معادلات S_t ، I_t و O_t به ترتیب نشان دهنده ذخيره، ورودی و خروجی در زمان t می باشند. K ضريب زمان - ذخيره برای رودخانه است که یک مقدار منطقی نزدیک به زمان گذر جريان از کل مسير رودخانه است. X یک فاکتور وزنی است که معمولاً برای مخازن ذخيره بين ۰ و ۰/۵ و برای رودخانه ها بين ۰ و ۰/۳ می باشد. معمولاً پارامترهای K و X در مدل ماسکينگام خطی را با روش ترسيمی به کمک سعی و خطا بدست می آورند. در حالی که این روش مشکل و تقریبی است و رابطه بين S_t و $[X I_t + (1 - X) O_t]$ همیشه خطی نمی باشد. گیل و همکاران (۱۹۷۸) رابطه غيرخطی مدل ماسکينگام را به صورت معادله (۳) پیشنهاد کردند (۸):

$$S_t = K [X I_t + (1 - X) O_t]^m \quad (3)$$

در مدل غير خطی ماسکينگام پارامتر m به عنوان توان به معادله اضافه شده است، که مدل را قادر می سازد تا رابطه غيرخطی بين ذخيره تجمعی و جريان را بهتر مدل سازی کند. از آنجائیکه با استفاده از روش سعی و خطا پیدا کردن مقادير درستی برای سه پارامتر m ، K و X پیچیده و مشکل است، روشی متفاوت برای تخمین این سه پارامتر نیاز می باشد. در این راستا در تحقيق حاضر الگوریتم بهينه سازی نورد شبیه سازی شده مورد ارزیابی قرار گرفت تا این مشکل را برطرف کند.

از معادله (۳) می توان معادله زیر را استخراج کرد:

$$O_t = \left(\frac{I}{1-X} \right) \left(\frac{S_t}{K} \right)^{1/m} - \left(\frac{X}{1-X} \right) I_t \quad (4)$$

با ترکیب معادلات (۱) و (۴) معادله زیر بدست می آید.

$$\frac{\Delta S_t}{\Delta t} = - \left(\frac{1}{1-X} \right) \left(\frac{S_t}{K} \right)^{1/m} - \left(\frac{1}{1-X} \right) I_t \quad (5)$$

در این معادله $\frac{\Delta S_t}{\Delta t}$ ، تغییرات ذخيره نسبت به زمان می باشد.

همچنین داریم:

$$S_{t+1} = S_t + \Delta S_t \quad (6)$$

که S_{t+1} در این معادله ذخيره در زمان $t+1$ است.

$$O_{t+1} = \left(\frac{I}{1-X} \right) \left(\frac{S_{t+1}}{K} \right)^{1/m} - \left(\frac{X}{1-X} \right) I_{t+1} \quad (7)$$

پیدا خواهد کرد (۱۰).

الگوریتم نورد شبیه سازی شده^۱ اولین بار توسط مترپولیس و همکاران (۱۶) در مکانیک مطرح گردید. پس از آن کیرک و پاتریک، و بوکهام و لامبرت از این الگوریتم در حل مسأله فروشنده دوره گرد^۲ (TSP) استفاده نمودند (۴ و ۱۲). گوئه و همکاران (۹) نیز در حل بهينه توابع ریاضی از این الگوریتم استفاده کردند. در علوم آب نیز این الگوریتم به عنوان ابزار بهينه سازی استفاده گردیده است، به طوریکه کانهها (۵)، از الگوریتم SA در مدیریت بهره برداری از سفره آب زیرزمینی با هدف کمینه نمودن هزینه استفاده نمود. راثو و همکاران (۱۸)، پمپاژ بهينه را از ۹۰ چاه در مجاورت رودخانه ای در شمال هند با استفاده از این روش بدست آوردند. لین و همکاران (۱۴) با استفاده از الگوریتم SA و با به کار گیری مدل MODFLOW میزان پمپاژ از منابع آب زیرزمینی را بهينه نمودند. تیگاراپو و همکاران (۱۹) از الگوریتم SA، در بهره برداری بهينه از سیستم های چند مخزنه با هدف حداکثر نمودن منافع استفاده کردند. جهت استفاده بهينه از آب کشاورزی و تنظیم جدول زمان بندی آبیاری نیز، کو و همکاران (۱۳) از الگوریتم نورد شبیه سازی شده استفاده نمودند.

تا کنون تعدادی از الگوریتم های فراکوشی در تخمین پارامترهای مدل ماسکينگام غيرخطی استفاده و نتایج آن با سایر روش های قبلی مقایسه گردیده است. در تحقيق حاضر از روش فراکوشی جدیدی در بهينه کردن این پارامترها استفاده شد، که در مسائل مختلف آبی جواب های مطلوبی را بدست آورده است. در مطالعه حاضر تخمین پارامترهای مدل ماسکينگام غيرخطی به کمک الگوریتم SA انجام گرفت. سپس نتایج بدست آمده با سایر نتایج قبلی مقایسه شد.

مواد و روش ها

روش روندیابی مدل ماسکينگام غيرخطی:

دو روش عمده برای روندیابی سیل وجود دارد: روش روندیابی هیدرولوژیکی و روش روندیابی هیدرولیکی. روش روندیابی هیدرولیکی بر اصول پیچیده هیدرولیکی و قوانین جريان های غیرماندگار در کانال های روباز استوار است. این روش نیازمند به اطلاعات وسیع هیدرولیکی و دارای محاسباتی طولانی است. در عوض روش هیدرولوژیکی که بر اصل پیوستگی جريان و رابطه بين دبی و ذخيره موقت آب در طول مسير استوار است، روش نسبتاً ساده ای بوده و از دقت کافی در مسائل آبی برخوردار است. از بین انواع روش های هیدرولوژیکی برای روندیابی سیل، مدل ماسکينگام به دلیل سادگی، کاربرد وسیعی دارد. مدل روندیابی سیل ماسکينگام

1- Simulated Annealing

2- Traveling Salesman Problem

در این رابطه O_{t+I} خروجی در زمان $t+I$ است. همچنین در معادله (۷):

$$\bar{I}_{t+I} = (I_{t+I} + I_t) / 2$$

که \bar{I}_{t+I} متوسط ورودی در دو گام زمانی متوالی t و $t+I$ است. I_t و I_{t+I} به ترتیب ورودی در زمان‌های t و $t+I$ است (۷). الگوریتم شبیه‌سازی معادله ماسکینگام غیرخطی شامل مراحل زیر است (۷):

مرحله (۱): در نظر گرفتن مقدار اولیه ای برای سه پارامتر X ، K و m

مرحله (۲): محاسبه ذخیره (S_t) با استفاده از معادله (۳) با فرض مقدار جریان خروجی اولیه برابر با جریان ورودی ($O_t = I_t$).

مرحله (۳): محاسبه نسبت تغییرات ذخیره نسبت به زمان با استفاده از معادله (۵).

مرحله (۴): محاسبه حجم جریان خروجی در مرحله زمانی بعدی با استفاده از معادله (۷) \bar{I}_{t+I} ، بیان کننده میانگین ورودی‌ها می‌باشد و مقدار I_t با نسبت $(I_{t+I} + I_t) / 2$ از گام زمانی دو به بعد ($t \geq 2$) جایگزین می‌شود.

الگوریتم نورد شبیه‌سازی شده (SA):

الگوریتم‌های فراکاوشی یک نام معمول برای روش‌هایی است که عموماً الهام گرفته از طبیعت هستند. در سال‌های اخیر الگوریتم‌های فراکاوشی با پیشرفتی سریع در مسائل پیچیده و مشکل بهینه‌سازی، مورد استفاده قرار گرفته‌اند و الگوریتم‌های مختلف بسیاری جهت ارتقاء عملکرد این الگوریتم‌ها نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی چه در رسیدن به معیارهای موردنظر و چه در کاهش زمان اجرا، توسعه یافته‌اند. ایگلِس^۱ (۱۹۹۰) فرآیند حل مسأله را با استفاده از الگوریتم SA به این صورت ارائه نمود (۶): اساس این الگوریتم بر اساس شبیه‌سازی فرآیند نورد می‌باشد. هر گاه ماده‌ای را در محفظه گرمایش، جهت رسیدن به پائین‌ترین سطح انرژی ممکن و یا کمترین حرارت سرد کنند، فرآیند نورد صورت گرفته است. مبنای اصلی الگوریتم SA بر اساس شباهت با روشی است که مایعات منجمد و متبلور می‌شوند. هنگامیکه مایعات در دمای بالا قرار دارند، مولکول‌هایشان می‌توانند آزادانه در کنار همدیگر جابجا شوند. هنگامیکه دمای مایع پائین می‌آید، این آزادی جابجایی کمتر و مایع شروع به انجماد می‌کند. اگر مایع به اندازه کافی و به آرامی سرد شود، مولکول‌ها فرصت آرایش پیدا کردن و کریستاله شدن را دارند. مولکول‌ها در پائین‌ترین سطح انرژی تشکیل کریستال خواهند داد. اگر مایع سریع سرد شود مولکول‌ها فرصت تشکیل کریستال را پیدا نمی‌کنند، اما جامدی شکل می‌گیرد

که مولکول‌هایش در پائین‌ترین سطح انرژی نیستند. بنابراین اصل الگوریتم SA اصلاح تکراری شبیه‌سازی بازآرایی مولکول‌ها در یک مایع در حال سرد شدن است. انرژی مولکول‌ها مساوی با تابع هزینه‌ای است که با این الگوریتم اصلاح تکراری بهینه می‌شود. بنابراین هدف SA بدست آوردن جواب نزدیک بهینه مطلق با همگرایی آهسته به سمت جواب نهایی است. لذا فلوجارت الگوریتم SA را می‌توان به صورت شکل (۱) خلاصه کرد:

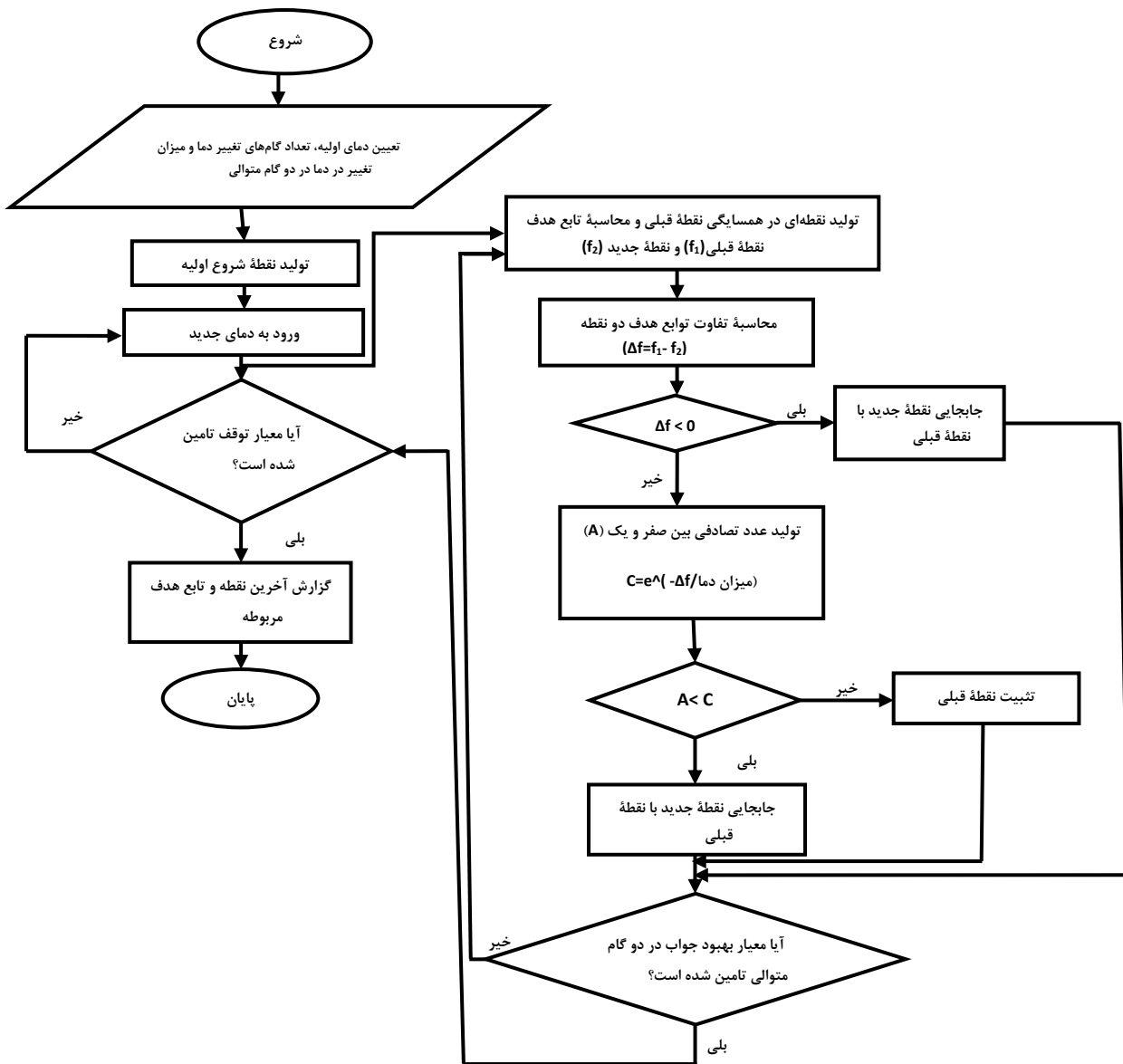
به منظور بررسی کاربرد الگوریتم SA در تخمین پارامترهای روندیابی مدل غیرخطی ماسکینگام، این الگوریتم در مورد دو مثال موردی آزمایش شد تا دقت آن در روندیابی سیل مشخص شود.

مثال موردی اول (ویلسون):

در مثال موردی اول الگوریتم SA برای مثالی که اولین بار توسط ویلسون^۲ (۱۹۷۴) ارائه شد، به کار رفت. دو دلیل برای انتخاب این مثال وجود داشت: (۱) انواع روش‌های فراکاوشی و غیره در مورد این مثال تست شده بود و این امکان مقایسه نتایج را با سایر روش‌ها فراهم می‌ساخت. (۲) در این مثال رابطه غیرخطی بین مقادیر S_t و $[XI_t + (1 - X)O_t]$ برقرار می‌باشد (۱۷).

مثال موردی دوم (کارون):

رود کارون پرآب‌ترین و بزرگ‌ترین رودخانه ایران است. این رود با طول ۹۵۰ کیلومتر طولانی‌ترین رودی است که تنها در داخل ایران قرار دارد و همچنین تنها رود ایران است که بخشی از آن قابل کشتیرانی است. سرچشمه شاخه‌های اصلی کارون (ارمند و بازفت)، زردکوه بختیاری در استان چهارمحال و بختیاری است. ولی شاخه‌های فرعی آن از کوه‌های مختلف سرچشمه می‌گیرند مانند خرسان از دنا در استان کهگیلویه و بویراحمد و دز از ارتفاعات لرستان. این رود، پس از عبور از مناطق کوهستانی و پر پیچ و خم، در منطقه‌ای به نام گتوند وارد دشت خوزستان می‌شود. رود کارون در شمال شوشتر به دو شاخه تقسیم می‌شود که در جنوب شوشتر به یکدیگر متصل می‌شوند. مهم‌ترین شاخه فرعی کارون، رود دز است که در شمال اهواز به کارون ملحق می‌شود. رود کارون در مرز ایران و عراق، به اروندرود پیوسته و روانه خلیج فارس می‌شود. پیچ و خم‌های موجود در سر راه این رود، خوزستان را به جلگه‌ای بی‌نظیر از لحاظ کشاورزی تبدیل کرده است.



شکل ۱- فلوجارت الگوریتم SA

نتیجه‌گیری و بحث

نتایج مثال موردی اول

تابع هدف برای ارزیابی مقادیر بهینه پارامترهای X, K و m در مدل ماسکینگام غیرخطی کمینه کردن مربعات باقیمانده‌های بین حجم خروجی‌های واقعی و روندیابی شده است. که طبق معادله زیر قابل محاسبه است:

$$MinSSQ = \sum_{t=1}^n (O_t - \hat{O}_t)^2 \quad (8)$$

که در این معادله \hat{O}_t حجم خروجی روندیابی شده در زمان t است.

سدهای مختلفی بر روی این رودخانه ساخته شده‌اند که مهم‌ترین آنها، سدهای کارون ۱، کارون ۳، کارون ۴، مسجد سلیمان و در پایین‌تر، سدهای مخزنی گتوند علیا و سد تنظیمی گتوند می‌باشند. به منظور ارزیابی دقت الگوریتم SA در روندیابی سیل واقعی، مثال موردی دوم سیل رودخانه کارون در نظر گرفته شد. این سیل در تاریخ ۱۳۳۶/۱۲/۱۶ در ایستگاه هیدرومتری گذار به عنوان ورودی و در ایستگاه هیدرومتری گتوند به عنوان خروجی ثبت شده است. این سیل به مدت ۹۶ ساعت و در بازه‌های زمانی دو ساعته اندازه‌گیری شده بود.

و ۰/۲۸۷۳ به دست آمد. از مقادیر بیشینه و کمینه‌ای که برای هر پارامتر بدست آمده است، می‌توان نتیجه گرفت که حدود بدست آمده برای پارامترهای K ، m و X قابل قبول و منطقی است. به علت اینکه در روندیابی سیل میزان و زمان دبی پیک از اهمیت خاصی برخوردار است، در مقایسهٔ جواب‌ها دو پارامتر DPO (تفاوت دبی پیک واقعی و تخمینی) و $DPOT$ (جابجایی گام زمانی دبی پیک واقعی و تخمینی) در نظر گرفته شده است. در جدول (۲) نتایج بدست آمده با سایر نتایج قبلی مقایسه شده است. همانطور که از جدول (۲) مشخص است الگوریتم SA تخمینی برابر با HS و بهتر از GA بدست آورده است. با توجه به جدول (۲) مشاهده می‌شود، که دو الگوریتم HS و SA بهترین دقت (کمترین مقدار SSQ) را بدست آورده‌اند. بعد از این الگوریتم‌ها به ترتیب PSO ، GA ، $NONLR$ ، $HJ+DFP$ و LSM دارای بهترین تخمین می‌باشند. از لحاظ خطای مطلق (SAD)، بعد از GA که دارای کمترین مقدار است، دو الگوریتم HS و SA قرار دارند. بعد از آنها به ترتیب PSO ، $NONLR$ ، $HJ+DFP$ و LSM قرار دارند. جدول (۳) مقادیر هیدروگراف خروجی بدست آمده به روش‌های مختلف را نشان می‌دهد.

همانطور که در جدول (۳) مشخص است، نزدیک‌ترین روندیابی به HS ، SA می‌باشد. بر طبق جدول (۳) میزان اختلاف مقادیر دبی خروجی مشاهده شده و دبی خروجی روندیابی شده توسط الگوریتم SA حدود یک درصد است. همچنین گام زمانی دبی پیک خروجی روندیابی شده و خروجی با هم فرقی ندارند و هر دو در زمان ۶۰ ساعت از ابتدای سیل رخ داده‌اند. بیشترین خطای مربوط به دبی روندیابی شده در الگوریتم SA در گام‌های زمانی ۷ تا ۱۲ و ۱۷ تا ۲۰ رخ داده است. به عبارتی در وسط شاخه‌های پایین رونده و بالارونده هیدروگراف خروجی، الگوریتم SA نتوانسته به اندازه دقت اوج هیدروگراف خروجی، روندیابی انجام دهد. از آنجا که تخمین مقادیر دبی اوج قلّه هیدروگراف خروجی در سیلاب به علت بروز خسارات مهم‌تر است، الگوریتم SA نتوانسته از عهدهٔ این مهم برآید. در شکل (۲) قسمت الف و ب نمودار هیدروگراف خروجی تخمین زده شده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی رسم شده است.

همان‌طور که از شکل (۲) قسمت الف مشاهده می‌شود، الگوریتم SA نتوانسته است که تخمین خوبی از روندیابی هیدروگراف خروجی داشته باشد. برای وضوح بیشتر تخمین الگوریتم SA ، نمودار آن به تهنایی در شکل (۲) قسمت ب رسم شده است.

نتایج مثال موردی دوم

در تحقیق حاضر سیلاب ثبت شده در رودخانهٔ کارون به منظور روندیابی توسط الگوریتم SA و GA استفاده شده است. این سیل در تاریخ ۱۳۳۶/۱۲/۱۶ در ایستگاه هیدرومتری گذار به عنوان ورودی و

که با جایگذاری مقدار آن در معادلهٔ (۴)، تابع هدف به صورت زیر خواهد بود:

$$MinSSQ = \sum_{t=1}^n \left(O_t - \left[\left(\frac{1}{1-X} \right) \left(\frac{S_t}{K} \right)^{1/m} - \left(\frac{X}{1-X} \right) I_t \right] \right)^2 \quad (9)$$

در الگوریتم GA تعداد جمعیت ۱۰۰، احتمال جابجایی ۰/۹ و احتمال جهش ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است. و از بین ۲۰ جواب تصادفی، بهترین جواب (کمترین خطا) به عنوان جواب نهایی گزارش شده است. حدود در نظر گرفته شده برای پارامترهای K ، X و m به ترتیب (۰،۱)، (۰،۱) و (۱،∞) در نظر گرفته شده است (۱۷). در الگوریتم HS تعداد حافظه ۱۰۰، درصد تغییرات حافظهٔ مورد نظر ۰/۹۵ و ماکزیمم تکرار ۵۰۰۰ در نظر گرفته شده است. حدود در نظر گرفته شده برای پارامترهای K ، X و m به ترتیب (۰/۲، ۰/۳)، (۰/۱، ۰/۲) و (۱/۵، ۲/۵) در نظر گرفته شده است (۱۱). در الگوریتم PSO تعداد جمعیت ۱۰۰ و ماکزیمم تکرار نیز ۱۰۰ و حدود برای سه پارامتر K ، X و m به ترتیب (۰/۲، ۰/۳)، (۰/۱، ۰/۳) و (۱/۵، ۲/۵) در نظر گرفته شده است (۱۰).

در مطالعه حاضر ابتدا روند شبیه‌سازی مدل ماسکینگام غیرخطی (معادله (۳)) در قالب برنامه‌ای کد نویسی شد. سپس تابعی به عنوان تابع هدف (معادله (۹)) با سه متغیر تصمیم K ، m و X با هدف کمینه کردن مجموع مربعات خطاها تعریف شد. می‌توان نقاط شروع را برای سه پارامتر K ، m و X به ترتیب ۰/۲، ۰/۵ و ۱/۵ در نظر گرفت. در قسمت قیدها برای حدود بالا و پائین پارامترها با توجه به مقادیر ممکن پارامتر X را بین ۰/۲ و ۰/۳، پارامتر K را بین ۰/۵ و ۰/۶، و پارامتر m را بین ۱/۵ تا ۲/۵ در نظر گرفته شد. نوع تابع برای تولید نقاط در تکرارهای متوالی نورد سریع^۱ انتخاب شد، که بر اساس انتخاب تصادفی با اندازه نسبت به دما استوار است. مقدار نرخ کاهش دما در هر تکرار (شمارهٔ تکرار $0/95^{\wedge}$)، دمای اولیه ۱۰۰ و ماکزیمم تکرار نیز ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. به علت اینکه الگوریتم SA بر انتخاب تصادفی استوار است، از بین ۱۰ اجرای متوالی (جواب تصادفی متوالی) بهترین آنها (جواب با کمترین خطا) به عنوان جواب نهایی گزارش شده است. در جدول زیر مقادیر پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی و معیارهای SSQ و SAD در ۱۰ اجرای متوالی الگوریتم SA آورده شده است. همچنین مقادیر بیشینه، کمینه، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات این ۱۰ اجرا نیز آورده شده است.

با توجه به جدول (۱) بهترین جواب SA در تکرار سوم بدست آمده است. در این تکرار مقدار مجموع مربعات خطا (SSQ) برابر ۳۶/۷۸ و مقادیر پارامترهای K ، m و X به ترتیب ۰/۵۱۸۳، ۰/۸۶۸۰ و

بحث

تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی با استفاده از روش سعی و خطا کاری مشکل و با محاسبات طولانی است. در طول دو دهه گذشته از روش‌های متفاوتی برای تخمین این پارامترها استفاده شده است. روش‌های فراکاشی یکی از راه‌حل‌هایی بوده‌اند که توانسته‌اند در تخمین این پارامترها موفق باشند. در مطالعه حاضر الگوریتم SA در تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی به کار رفت. این الگوریتم در مورد مثال واحدی که برای حل آن انواع روش‌های بهینه‌سازی از جمله GA، HS و PSO به کار رفته است، استفاده شد.

در ایستگاه هیدرومتری گتوند به عنوان خروجی ثبت شده است. این سیل به مدت ۹۶ ساعت و در بازه‌های زمانی دو ساعته اندازه‌گیری شده بود. نکته قابل توجه در مورد این سیل این است که سیل تا رسیدن به دبی پایه اندازه‌گیری نشده بود. به عبارتی بر اساس داده‌های در دسترس، این سیل تا پایان به طور کامل اندازه‌گیری نشده بود. در جدول (۴) مقادیر خطا در دو الگوریتم SA و GA آورده شده است.

همانطور که در جدول (۴) مشخص است، الگوریتم SA توانسته است تخمین بهتری در کلیه پارامترها از روندیابی در مورد سیلاب رودخانه کارون نسبت به الگوریتم GA داشته باشد. از لحاظ مقدار و زمان دبی اوج روندیابی شده هم الگوریتم SA تخمین نزدیکتری به مقدار واقعی داشته است. در شکل (۳) هیدروگراف ورودی و خروجی مشاهده شده و روندیابی شده توسط دو الگوریتم SA و GA آورده شده است.

جدول ۱- مقادیر بدست آمده پارامترها در ۱۰ اجرای متوالی الگوریتم SA

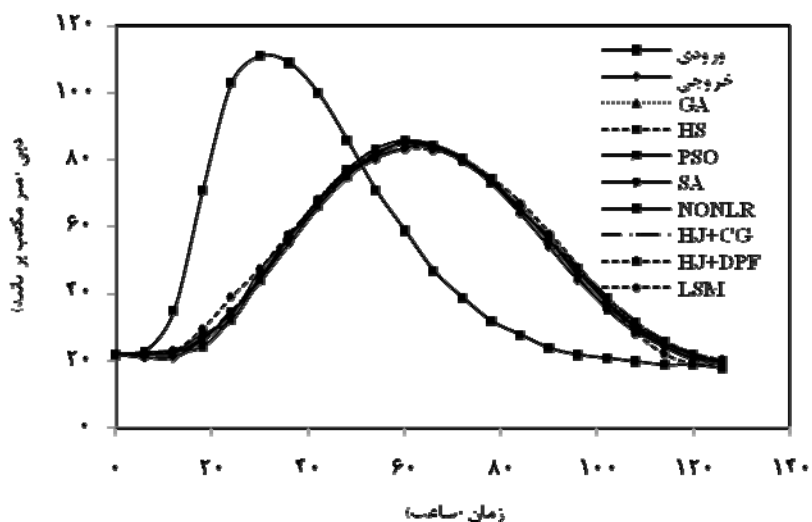
شماره اجرا	X	K (زمان)	m	SSQ	SAD
۱	۰/۲۸۹۸	۰/۵۷۱۵	۱/۹۵۳۴	۲۶۶۴/۶۰	۲۰۹/۰۱
۲	۰/۲۹۶۶	۰/۵۱۸۴	۱/۸۶۸۱	۳۸/۱۹	۲۴/۳۶
۳	۰/۲۸۷۳	۰/۵۱۸۳	۱/۸۶۸۰	۳۶/۷۸	۲۳/۴۴
۴	۰/۲۸۷۰	۰/۵۸۸۶	۱/۹۸۱۶	۴۳۱۹/۶۰	۲۶۴/۹۰
۵	۰/۲۹۰۳	۰/۵۷۴۱	۱/۸۶۸۰	۱۶۸/۴۹	۴۸/۷۷
۶	۰/۲۸۷۴	۰/۵۲۶۶	۱/۸۶۹۵	۴۳/۶۶	۲۴/۲۲
۷	۰/۲۸۷۰	۰/۵۱۸۶	۱/۸۶۸۰	۳۶/۸۰	۲۳/۴۰
۸	۰/۲۹۳۲	۰/۵۳۳۱	۱/۸۷۸۶	۱۰۴/۸۹	۳۵/۹۲
۹	۰/۲۹۹۲	۰/۵۱۸۳	۱/۹۹۰۰	۳۳۹۰/۳۰	۲۳۵/۴۶
۱۰	۰/۲۹۴۵	۰/۵۶۴۲	۱/۹۴۲۰	۲۰۷۱/۸۰	۱۸۴/۰۹
کمینه	۰/۲۸۷۰	۰/۵۱۸۳	۱/۸۶۸۰	۳۶/۷۸	۲۳/۴۰
میانگین	۰/۲۹۱۲	۰/۵۴۳۱	۱/۹۰۸۷	۱۲۸۷/۵۱	۱۰۷/۳۷
بیشینه	۰/۲۹۹۲	۰/۵۸۸۶	۱/۹۹۰۰	۴۳۱۹/۶۰	۲۶۴/۹۰
انحراف معیار	۰/۰۰۴	۰/۰۲۸	۰/۰۵۲	۱۶۶۷/۱۴	۱۰۲/۱۳
ضریب تغییرات (درصد)	۱/۵۲	۵/۱۸	۲/۷۱	۱۲۹/۴۹	۹۵/۱۳

جدول ۲- مقایسه مقادیر خطا در روش‌های مختلف بهینه‌سازی

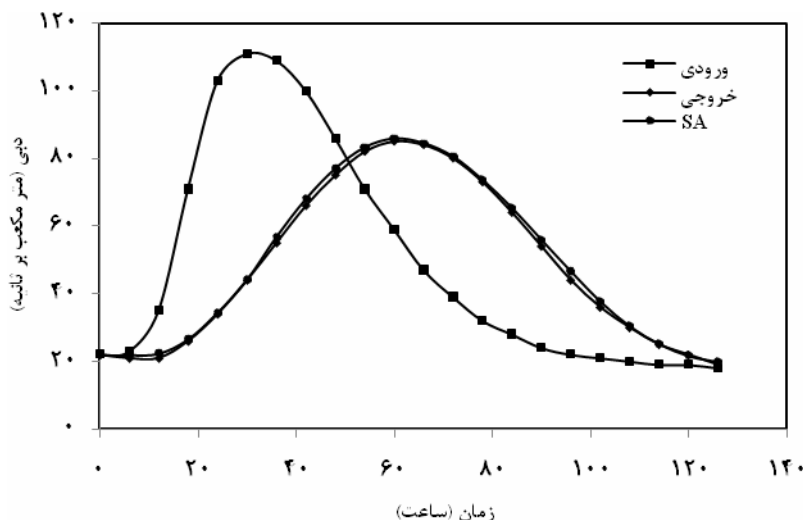
روش‌های بهینه‌سازی								معیارهای خطا و پارامترهای تخمینی
SA	PSO	HS	GA	LSM	HJ+DFP	HJ+CG	NONLR	
۳۶/۷۸	۳۶/۸۹	۳۶/۷۸	۳۸/۲۳	۱۴۳/۶	۴۵/۵۴	۴۹/۶۴	۴۳/۲۶	SSQ
۲۳/۴۴	۲۴/۱۰	۲۳/۴۰	۲۳/۰۰	۴۶/۴۰	۲۴/۸۰	۲۵/۲۰	۲۵/۲۰	SAD
۰/۹۰	۰/۶۰	۰/۹۲	۰/۷۰	۱/۸۰	۰/۳۰	۰/۵۰	۰/۷۰	DPO (مترمکعب بر ثانیه)
.	۱	DPOT (ساعت)
۰/۵۱۸۳	۰/۱۸۲۴	۰/۰۸۸۳	۰/۱۰۳۳	۰/۰۱۰۰	۰/۰۷۶۴	۰/۰۶۶۹	۰/۰۶۰۰	K (زمان)
۰/۲۸۷۳	۰/۳۳۳۰	۰/۲۸۷۳	۰/۲۸۷۳	۰/۲۵۰۰	۰/۲۶۷۷	۰/۲۶۸۵	۰/۲۷۰۰	X
۱/۸۶۸۰	۲/۱۴۵۸	۱/۸۶۳۰	۱/۸۲۸۲	۲/۳۴۷۰	۱/۸۹۷۸	۱/۹۳۹۱	۲/۳۶۰۰	m

جدول ۳- مقادیر هیدروگراف خروجی تخمین زده شده توسط روش‌های مختلف بهینه‌سازی

دبی خروجی رونديابی شده (m ³ /s)								دبی خروجی مشاهده شده (m ³ /s)	دبی ورودی (m ³ /s)	زمان (ساعت)
SA	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
۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۰۰	۲۲/۶۰	۲۱	۲۳	۶
۲۲/۴۲	۲۲/۶۰	۲۲/۴۰	۲۲/۴۰	۲۲/۸۰	۲۲/۴۰	۲۲/۴۰	۲۳/۰۰	۲۱	۳۵	۱۲
۲۶/۶۱	۲۸/۱۰	۲۶/۶۰	۲۶/۳۰	۲۹/۶۰	۲۶/۷۰	۲۶/۸۰	۲۴/۲۰	۲۶	۷۱	۱۸
۳۴/۴۶	۳۲/۲۰	۳۴/۴۰	۳۴/۲۰	۳۹/۱۰	۳۴/۸۰	۳۴/۹۰	۳۳/۲۰	۳۴	۱۰۳	۲۴
۴۴/۱۷	۴۵/۰۰	۴۴/۱۰	۴۴/۲۰	۴۷/۶۰	۴۴/۷۰	۴۴/۵۰	۴۷/۱۰	۴۴	۱۱۱	۳۰
۵۶/۸۶	۵۷/۰۰	۵۶/۸۰	۵۶/۹۰	۵۸/۰۰	۵۶/۹۰	۵۶/۷۰	۵۶/۸۰	۵۵	۱۰۹	۳۶
۶۸/۰۶	۶۷/۵۰	۶۸/۱۰	۶۸/۲۰	۶۷/۱۰	۶۷/۷۰	۶۷/۳۰	۶۶/۲۰	۶۶	۱۰۰	۴۲
۷۷/۰۷	۷۵/۹۰	۷۷/۱۰	۷۷/۱۰	۷۴/۸۰	۷۶/۳۰	۷۵/۹۰	۷۵/۰۰	۷۵	۸۶	۴۸
۸۳/۳۲	۸۱/۲۰	۸۳/۳۰	۸۳/۲۰	۸۰/۴۰	۸۲/۲۰	۸۱/۹۰	۸۰/۷۰	۸۲	۷۱	۵۴
۸۵/۹۰	۸۵/۶۰	۸۵/۹۰	۸۵/۷۰	۸۳/۲۰	۸۴/۷۰	۸۴/۵۰	۸۳/۵۰	۸۵	۵۹	۶۰
۸۴/۵۴	۸۴/۲۰	۸۴/۵۰	۸۴/۲۰	۸۲/۸۰	۸۳/۵۰	۸۳/۴۰	۸۴/۳۰	۸۴	۴۷	۶۶
۸۰/۵۸	۷۹/۶۰	۸۰/۶۰	۸۰/۲۰	۸۰/۱۰	۷۹/۸۰	۷۹/۹۰	۷۹/۹۰	۸۰	۳۹	۷۲
۷۳/۷۱	۷۳/۳۰	۷۳/۷۰	۷۳/۳۰	۷۴/۵۰	۷۳/۳۰	۷۳/۶۰	۷۴/۳۰	۷۳	۳۲	۷۸
۶۵/۴۰	۶۵/۰۰	۶۵/۴۰	۶۵/۰۰	۶۷/۲۰	۶۵/۵۰	۶۵/۸۰	۶۵/۳۰	۶۴	۲۸	۸۴
۵۵/۹۹	۵۶/۲۰	۵۶/۰۰	۵۵/۸۰	۵۸/۱۰	۵۶/۵۰	۵۶/۹۰	۵۵/۹۰	۵۴	۲۴	۹۰
۴۶/۶۷	۴۶/۵۰	۴۶/۷۰	۴۶/۷۰	۴۸/۱۰	۴۷/۵۰	۴۷/۸۰	۴۵/۱۰	۴۴	۲۲	۹۶
۳۷/۷۵	۳۷/۳۰	۳۷/۸۰	۳۸/۰۰	۳۷/۶۰	۳۸/۷۰	۳۸/۹۰	۳۵/۴۰	۳۶	۲۱	۱۰۲
۳۰/۴۷	۲۹/۷۰	۳۰/۹۰	۳۰/۹۰	۲۸/۲۰	۳۱/۴۰	۳۱/۵۰	۲۸/۷۰	۳۰	۲۰	۱۰۸
۲۵/۲۳	۲۴/۳۰	۲۵/۳۰	۲۵/۷۰	۲۱/۹۰	۲۵/۹۰	۲۵/۸۰	۲۴/۳۰	۲۵	۱۹	۱۱۴
۲۱/۷۴	۲۰/۶۰	۲۱/۸۰	۲۲/۱۰	۱۹/۱۰	۲۲/۱۰	۲۲/۰۰	۲۰/۹۰	۲۲	۱۹	۱۲۰
۱۹/۹۹	۱۹/۶۰	۲۲/۰۰	۲۰/۲۰	۱۹/۰۰	۲۰/۲۰	۲۰/۱۰	۲۰/۴۰	۱۹	۱۸	۱۲۶



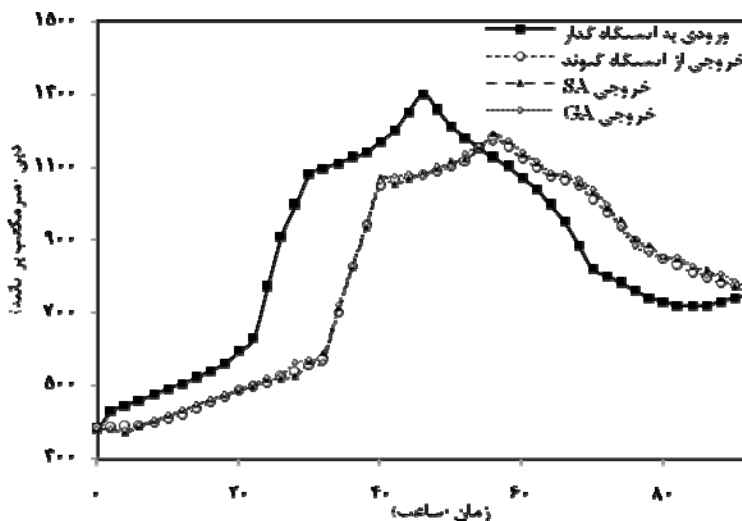
شکل ۲- (الف): هیدروگراف خروجی رونديابی شده به روش‌های مختلف



شکل ۲- (ب): هیدروگراف خروجی روندیابی شده با استفاده از الگوریتم SA

جدول ۴- مقایسه مقادیر خطا در روش‌های مختلف بهینه‌سازی

معیارهای خطا و پارامترهای تخمینی								الگوریتم‌های بهینه‌سازی
m	X	K (زمان)	$DPOT$ (ساعت)	DPO (متر مکعب بر ثانیه)	SAD	SSQ		
۱/۸۹۹۰	۰/۲۵۷۲	۰/۵۴۵۵	۰	۹	۴۱۲/۸	۴۹۴۷/۰۶	SA	
۱/۸۸۷۴	۰/۲۹۱۰	۰/۵۲۴۳	۱	۱۳/۷	۵۲۶/۵	۸۰۱۲/۷	GA	



شکل ۳- هیدروگراف خروجی روندیابی شده با الگوریتم SA و GA

و روندیابی شده) و $DPOT$ (مقدار جابجایی گام زمانی دبی پیک واقعی و روندیابی شده) در نظر گرفته شد. که بر اساس نتایج بدست آمده مقدار دبی پیک روندیابی شده یک درصد بیشتر از دبی پیک واقعی بدست آمد. زمان وقوع دبی پیک برای روندیابی شده و واقعی با هم تفاوتی نداشت، و هر دو در گام زمانی یازدهم یعنی ۶۰ ساعت پس از شروع سیل رخ داد. در مثال موردی دوم الگوریتم SA

نتایج دقت بالای SA را در تخمین این پارامترها اثبات کرد. برای مقایسه دقت تخمین دو معیار خطای SSQ و SAD انواع روش‌ها با هم مقایسه و نتایج حاکی از بالاتر بودن دقت تخمین الگوریتم SA نسبت به تمام روش‌های گذشته به جز HS بود. از آنجا که در روندیابی سیل تخمین دقیق دبی پیک و زمان وقوع آن از اهمیت خاصی برخوردار است، دو معیار DPO (مقدار تفاوت دبی پیک واقعی

سیلاب توسط الگوریتم SA بود. در نهایت این تحقیق قابلیت الگوریتم SA را در زمینه بهینه‌سازی پارامترهای مدل ماسکینگام نشان داد از اینرو، الگوریتم SA جهت استفاده در این زمینه توصیه می‌شود.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه تهران که امکانات انجام این تحقیق را فراهم نمودند تشکر و قدردانی می‌شود.

در مورد سیلاب رودخانه کارون آزمایش و نتایج آن با الگوریتم GA مقایسه شد. نتایج نشان داد که الگوریتم SA تخمین بهتری نسبت به الگوریتم GA دارد. بطوریکه مجموع مربعات خطا (SSQ) برابر ۴۹۴۷/۰۶، مجموع قدر مطلق خطاها (SAD) برابر ۴۱۲/۸، دبی پیک واقعی ۱۱۸۲ مترمکعب بر ثانیه بود و دبی پیک روندیابی شده ۱۱۹۱ بدست آمد که، تفاوت این دو (DPO) برابر کمتر از یک درصد خطا و تفاوت گام زمانی وقوع دبی پیک واقعی و روندیابی شده (DPOT) صفر بدست آمد. همچنین نتایج حاکی از برآورد خوبی از حجم دبی

منابع

- ۱- حامدی م. ح. ۱۳۸۲. هیدرولیک مجاری باز (جلد دوم). انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. تهران. ۸۶۳-۸۶۲.
- ۲- علیزاده ا. ۱۳۸۵. اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد. ۶۲۰-۶۰۵.
- 3- Al-Hummed J.M., and Essen I.I. 2006. Approximate Methods for the Estimation of Muskingum Flood Routing Parameters, *Water Resources Management*, 20:979-990.
- 4- Buck ham B.J., and Lambert C. 1999. Simulated Annealing Applications. Seminar presentation: MECH620 Quantitative Analysis, Reasoning and Optimization Methods in CAD/CAM and Concurrent Engineering, Department of Mechanical Engineering, University of Victoria.
- 5- Cunha M.D.C. 1999. On Solving Aquifer Management Problems with Simulated Annealing Algorithms. *Water Resources Management*, 13:153-169.
- 6- Eggless R.W. 1990. Simulated annealing: A Tool for Operational Research. *European Journal of Operational Research*, 46:271-281.
- 7- Geem Z.W. 2006. Parameter Estimation for the Nonlinear Muskingum Model using the BFGS Technique, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 132:474-478.
- 8- Gill M.A. 1978. Flood routing by Muskingum Method, *Journal of Hydrology*, 36 (3-4), 353-363.
- 9- Goff W.L., Ferrier G.D., and Rogers J. 1994. Global Optimization of Statistical Functions with Simulated Annealing. *Journal of Econometrics*, 60: 65-99.
- 10- Hone J.C., and Liang C.C. 2009. Applying Particle Swarm Optimization to Parameter Estimation of the Nonlinear Muskingum Model, *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, 14:554-558.
- 11- Kim J.H., Geem Z.W., and Kim E.S. 2001. Parameter Estimation of the Nonlinear Muskingum Model using Harmony Search, *Journal of the American Water Resources Association*, 37:1131-1138.
- 12- Kirkpatrick S., Gelatt C.D. and Vichy M.P. 1983. Optimization by Simulated Annealing. *Journal of Science*, 671-680.
- 13- Kio S.F., Liu C.W., and Merkley G.P. 2002. SW Soil and Water Application of the Simulated Annealing Method to Agricultural Water Resource Management. *Journal of Agricultural Water Resource*, 80:109-124.
- 14- Lin Y.C., and Yen H.D. 2008. Identifying Groundwater Pumping Source Information using Simulated Annealing. *Hydrological Processes*, 75.
- 15- McCarthy G.T. 1938. The Unit Hydrograph and Flood Routing. Presented at Conference of North Atlantic Division, U. S. Army Corps of Engineers, Rhode and Island.
- 16- Metropolis N., Rosenblatt A., Rosenblatt M., Teller A., and Teller E. 1953. *Journal of Chemistry Physics*. 21:1087.
- 17- Mohan S. 1997. Parameter Estimation of Nonlinear Muskingum Models using Genetic Algorithm, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 123:137-142.
- 18- Rao S.V.N., Kumar S., Shekar S., Sinha S.K., and Manju S. 2007. Optimal Pumping from Skimming Wells from the Yamuna River Flood Plain in North India. *Hydrogeology Journal*, 15:1157-1167.
- 19- Teegavarapu R.S.V., Simonovic S.P. 2002. Optimal Operation of Reservoir System using Simulated Annealing. *Water Resources Management*, 16:401-428.

- 20- Tung Y.K. 1985. River Flood Routing by Nonlinear Muskingum Method, Hydraulic Engineering, ASCE, 111: 1447-1460.
- 21- Wilson E.M. 1974. Engineering Hydrology, Macmillan Education Ltd., Hampshire, U.K.
- 22- Yoon J.W. and Padmanabhan G. 1993. Parameter Estimation of Linear and Nonlinear Muskingum Models, Water Resources Planning and Management, ASCE, 119:600-610.

Parameter Estimation of the Nonlinear Muskingum Model Using Simulated Annealing

M. Mohammadi Ghalehi^{*1} - O. Bozorg Hadad² - K. Ebrahimi³

Received: 25-12-2009

Accepted: 18-6-2010

Abstract

The Muskingum method is frequently used to route floods in Hydrology. However, application of the model is still difficult because of the parameter estimation⁵. Recently, some of heuristic methods have been used in order to estimate the nonlinear Muskingum model. This paper presents a efficient heuristic algorithm, Simulated Annealing, which has been used to estimate the three parameters nonlinear Muskingum model. The results show the high accuracy of the algorithm in estimation of the parameters, so that it is obtained terms of the sum of the square of the deviations between the observed and routed outflows (SSQ), the sum of the absolute value of the deviations between the observed and routed outflows (SAD), deviations of peak of routed and actual flows (DPO), and deviations of peak time of routed and actual outflow (DPOT), 36/78, 23/44, 0/9 and 0, respectively. As Value of the SSQ has obtained equal its value Harmony Search method that is the best answer between the heuristic Optimization Algorithms that has been used so far. Finally, the performance of the new proposed method has been compared with other methods. The results showed that the height efficiency of the algorithm in parameter optimization of the nonlinear Muskingum model. SA algorithm in the second example the Karun River flood test and the results were compared with the GA method. The results showed that SA algorithms estimate is better than the GA method. As the error sum of squares (SSQ) before 4947/06, the total absolute error (SAD) against 412/8, Dubai actual peak was 1182 cubic meters per second and peak Routing 1191 was obtained by the difference of these two (DPO) times less a percentage error and the occurrence of different steps in Dubai when the real peak and has Routing (DPOT) zero respectively. Finally, this research capability in the blank verses optimal SA algorithm making Muskingum model parameters indicated therefore, to use SA algorithm in this area is recommended.

Keywords: Flood Routing, Muskingum Model, Optimization, Simulated Annealing Algorithm

1,2,3 - M.Sc. student of Water Resource Engineering and Assistant professors, Department of Irrigation and Reclamation, University of Tehran, respectively
(* - Corresponding author Email: M.mghalehi@gmail.com)