

Research Paper

Estimation of the type 6 Muskingum Nonlinear Model Parameters in the Flood Routing with The Mayfly Algorithm (MA)

Saeid Khalifeh¹, Kazem Esmaili^{2*}, Saeed Reza Khodashenas³, Fereshteh Modaresi⁴

¹ PhD student, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

³ Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran



10.22125/IWE.2023.173242

Received:
February 28, 2022
Accepted:
July 8, 2022
Available online:
June 25, 2023

Keywords:
Optimization, MA,
Hydrologic routing,
Muskingum, Nonlinear
type 6 model

Abstract

One of the basic topics in hydrological and river engineering studies is flood routing. Flood flooding is common in multi-tributary rivers and rivers without intermediate basin statistics. Therefore, to achieve the determination of slopes and cross-sections in all sections of the river, the Muskingum hydrological model is a useful method that helps to save information on the depth and flow of the flood at any time by saving time and money. To specify. In this study, the nonlinear parameters of the new Muskingum model are optimized based on the fly algorithm (MA). In this non-linear model of Muskingum, which has eight parameters, the recovery coefficient γ is used, which has more or less values than the number of peaks discharged in the output hydrograph. To evaluate the performance of Muskingum's new nonlinear model with the new MA algorithm, the Wilson and Weisman-Lewis case study has been used by many previous researchers for validation. The results of the MA algorithm for Wilson and Weissman-Lewis rivers show the minimization of the residual squares (SSQ) as the objective function, which is 3.21 for the Wilson River and 68722 for the Weissman River. The results of this study showed that the proposed model has high accuracy in estimating the output discharge values.

1. Introduction

Flood is a natural phenomenon that can cause numerous financial and life casualties in civil, industrial, and agricultural areas. Therefore, knowing its characteristics such as its peak during a period and in different places of the river is of the utmost importance. Forecasting these characteristics and changes in depth and flow in the river in general, could be done using the flood routing methods. Flood routing is one of the most important issues in water engineering projects. Hydrologic routing is common

* **Corresponding Author:** Kazem Esmaili

Address: Department of Water Science and Engineering,
Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad,
Mashhad, Iran

Email: Esmaili@um.ac.ir
Tel: +989151825327

particularly in arterial rivers and rivers with the lack of mid-basin data. To do that, there is a need to perform cross-sections and determine the river slope in every region. The Muskingum method is frequently used to route floods in Hydrology. The implementation of metaheuristic algorithm methods has shown satisfactory results in this regard. Therefore, in this study, we evaluate the efficiency of the Mayfly algorithm (MA) in estimating the optimal parameter estimation of the Non-linear Muskingum model.

2. Materials and Methods

This study has evaluated the performance of Mayfly (MA) algorithm in estimating the optimum parameters of the Muskingum Non-linear model. To investigate the research's findings desirability, the results of the Mayfly (MA) have been compared to the results of other meta-Heuristic methods. Meta-heuristics sample a set of solutions which are too large to be completely sampled. Meta-heuristics may make few assumptions about the optimization problem being solved, and so they may be usable for a variety of problems.

In this research, the Wilson and Weissman-Lewis Rivers as a previous instance (1974), to investigate the performance of algorithms used in the Non-linear Muskingum equation in the flood routing model. In this study, Minimizing the sum of squares (SSQ) between the volume of real and routed outputs has been considered as an objective function to evaluate the optimum parameters of K , X , α_1 , α_2 , β , C_1 , C_2 and γ in the non-linear Muskingum equation. The obtained optimum parameters from algorithms for both rivers show that the MA algorithm could approximate the SSQ to optimal value and all meta-heuristic algorithms could route the output flood as well.

3. Results

The results of the MA algorithm for Wilson and Weissman-Lewis's rivers show the minimization of the residual squares (SSQ) as the objective function, which is 3.21 for the Wilson River and 68722 for the Weissman River. The results of this study showed that the proposed model has high accuracy in estimating the output discharge values.

4. Discussion and Conclusion

To evaluate the performance of MA, the results of its implementation have been compared with the algorithms of previous researches in two case studies. The results showed that the estimation accuracy of estimating the nonlinear parameters of the model with MA algorithm was high.

In the first case study, Wilson flood routing, the best values for the SSQ and DPO target functions of the MA algorithm were 3.21 and 0.025, respectively. 68722 and 6.15.

5. Six important references

- 1) Bozorg Haddad O, Hamed F, Orouji H, Pazoki M, Loáiciga HA. 2015. A re-parameterized and improved nonlinear muskingum model for flood routing. *Water Resources Management* 29(9):3419- 3440.
- 2) Easa SM. 2013. New and improved four parameter nonlinear Muskingum model. *Proceeding of the Institution of Civil Engineering-Water Management*. 167(5):288–298
- 3) Gao, Z.M., Zhao, J., Li, S.R. and Hu, Y.R., 2020, December. The improved mayfly optimization algorithm with Opposition based learning rules. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1693, No. 1, p. 012117). IOP Publishing.
- 4) Khalifeh, S., Esmaili, K., Khodashenas, S., and Akbarifard, S. 2020. Data on Optimization of the Non-linear Muskingum Flood Routing in Kardeh River Using GOA Algorithm. *Journal of Data in Brief*, Volume 30, <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105398>.
- 5) Wilson, E. M. 1974. *Engineering hydrology*, MacMillan Education, Hampshire, United Kingdom.
- 6 Zervoudakis, K. and Tsafarakis, S., 2020. A mayfly optimization algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 145, p.106559.



تخمین پارامترهای مدل غیرخطی نوع ششم ماسکینگام در روندیابی سیلاب با الگوریتم بهینه سازی مگس (Mayfly Algorithm)

سعید خلیفه^۱، کاظم اسماعیلی^{۲*}، سعید رضا خداشناس^۳، فرشته مدرسی^۴

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۱۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۷

مقاله پژوهشی

چکیده

یکی از موضوعات اساسی و پایه در مطالعات مهندسی هیدرولوژی و رودخانه، روندیابی سیلاب است. روندیابی سیلاب به روش هیدرولوژیکی در رودخانه‌های چند شاخه و رودخانه‌های فاقد آمار حوضه میانی مرسوم است. از این رو، مدل هیدرولوژیکی ماسکینگام یک روش مفید است که بدون نیاز به تعیین شیب‌ها و مقاطع عرضی در تمام بازه‌های رودخانه، عمق و دبی جریان سیلابی را در مقاطع مختلف رودخانه روندیابی می‌کند و از این رو، سبب صرفه جویی در هزینه و زمان می‌شود. در این مطالعه، مقادیر بهینه پارامترهای غیرخطی مدل جدید ماسکینگام نوع ششم بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی مگس (MA) محاسبه شده است. در این مدل غیرخطی ماسکینگام که دارای هشت پارامتر است، از ضریب بهبود γ استفاده شده است که با توجه به تعداد پیک‌های موجود در هیدروگراف خروجی، مقادیر بیشتر یا کمتر از یک دارد. برای ارزیابی عملکرد ترکیبی مدل جدید غیرخطی ماسکینگام همراه با الگوریتم نوین MA، از مطالعه موردی ویلسون و وایسمن لوئیس استفاده شده که توسط بسیاری از محققان قبلی برای اعتبار سنجی مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج الگوریتم MA برای دو رودخانه ویلسون و وایسمن لوئیس نشان دهنده کمینه‌سازی مجموع مربعات باقیمانده‌ها (SSQ) به عنوان تابع هدف می‌باشد که برای رودخانه ویلسون برابر با ۳.۲۱ و رودخانه وایسمن برابر با ۶۸۷۲۲ است. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل پیشنهادی دارای دقت زیادی در برآورد مقادیر تخلیه خروجی است.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، الگوریتم مگس، روندیابی هیدرولوژیکی، ماسکینگام، مدل غیرخطی NL6

^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب، Email: khalifeh.saeid@mail.um.ac.ir

^{۲*} دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب. (نویسنده مسئول: Email: esmaili@um.ac.ir)

^۳ استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب، Email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir

^۴ استادیار، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب، Email: fmodaresi@ferdowsi.um.ac.ir



مقدمه

سیل به معنی افزایش ارتفاع آب رودخانه و اشغال سواحل رودخانه است که منجر به آسیب به ساختمانها و تأسیسات عمومی و تلفات انسانی می شود. در برخی موارد، سیل می تواند ناشی از افزایش ارتفاع آب در دریاچه یا دریا باشد، که می تواند بر بادهای شدید تأثیر عمیقی بگذارد. روندیابی سیلاب یک روش ریاضی برای پیش بینی تغییرات حجم، سرعت و شکل موج سیل در کانال به عنوان تابعی از زمان است که در مهندسی رودخانه ها، حفاظت از رودخانه ها، مدل سازی جریان در مخزن و سرریزها از اهمیت زیادی برخوردار است. بسته به شرایط و اطلاعات موجود از رودخانه، مشکل مسیریابی سیلاب را می توان با روش های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی حل کرد. (اکبری و همکاران، ۲۰۱۰)

روندیابی هیدرولوژیکی بر اساس اصل تداوم جریان است و رابطه بین ذخیره، خروجی و ذخیره سیل در طول مسیر را توصیف می کند و نتایج آن برای استفاده در مسایل آبی به اندازه کافی دقیق است. در روش های دیگر، اصول پیچیده هیدرولیکی و قوانین جریان های ناپایدار در آبراهه های باز مورد استفاده قرار گرفته که به آنها روندیابی هیدرولیکی می گویند. با توجه به توضیحات، دو نوع مدل روندیابی شامل هیدرولیکی و هیدرولوژیکی تعریف شده است (خلیفه و همکاران، ۲۰۱۸).

مدل های هیدرولیکی، مانند MIKE11 و HEC-RAS، به دلیل وابستگی به حل معادله انرژی، و معادلات حرکت نسبت به مدل های هیدرولوژیکی بسیار پیچیده هستند (Das, 2004).

علاوه بر این، مدل های مسیریابی هیدرولیکی نیازمند ضریب تقریبی مانینگ و اطلاعات هندسه رودخانه هستند، که تعیین آن هزینه بر و زمان بر است و برای اهداف کالیبراسیون چالش برانگیز است. به عبارت دیگر، مدل های مسیریابی هیدرولوژیکی مانند روش ماسکینگام، به دلیل سادگی از محبوبیت بیشتری برخوردار هستند، هر چند روش های هیدرولیک مسیریابی دارای پایه فیزیکی بیشتری هستند و از دقت

بیشتری برخوردارند. با این حال، واسنجی قوی مدل های هیدرولوژیکی دقت آنها را به سطوح قابل قبول افزایش داده است. مدل ماسکینگام یکی از روش های هیدرولوژیکی است که اولین بار توسط مک کارتی توسعه یافت (کانج و همکاران، ۱۹۸۰). روشی که توسط مک کارتی معرفی شد یک رابطه خطی بود و توانایی مدل سازی روابط غیرخطی بین جریان ورودی، خروجی و ذخیره سیل را نداشت. با این حال، (Geem, 2006)، نسخه غیر خطی این روش را توسعه داد. نکته مهم در استفاده از روش ماسکینگام غیر خطی تعیین مقادیر مناسب پارامترهای آن است که معمولاً با آزمایش و خطا یا با استفاده از روش های عددی وقت گیر تعیین می شود. بنابراین، استفاده از روش های بهینه سازی به منظور تعیین این پارامترها یک راه حل مناسب بحساب می آید.

در مطالعات گذشته، پنج نوع مدل غیر خطی ماسکینگام گزارش شده است.

نسخه های ۱ و ۲ مدل ماسکینگام غیر خطی با ترکیب پارامترهای نمایی با جریان ورودی و خروجی در معادله ذخیره سیل بدست آمد (طبری و همکاران، ۲۰۱۸).

در مدل خطی ماسکینگام با ترکیب پارامترهای نمایی با معادله ذخیره و خروج سیلاب ورودی و خروجی، نسخه های غیر خطی ۱ و ۲ به ترتیب در مراحل اول و دوم بدست آمد. با استفاده از جریان ذخیره سازی وزنی و با توجه به پارامترهای نمایی، مدل ماسکینگام نسخه ۳ (NL3) توسعه یافت که پرکاربردترین مدل در بین محققان بود. الگوریتم های بهینه سازی مورد استفاده در این مدل را می توان به الگوریتم نورد، الگوریتم ملخ، الگوریتم خفاش، الگوریتم موجودات همزیست و غیره اشاره کرد (فرزین و همکاران، ۲۰۱۸؛ خلیفه و همکاران، ۲۰۲۰).

معادلات ذخیره سازی NL1 و NL2 ترکیب شدند و چهارمین نسخه غیرخطی مدل ماسکینگام (NL4) بدست آمد. (Easa, 2013)، هدف ایجاد یک مدل روندیابی سیل را با استفاده از روش ماسکینگام برای ایجاد درجه آزادی بیشتر معرفی کرد. (بزرگ حداد و

خطی در نظر گرفته شود، پارامترهای X و K در مدل با روش ترسیمی به کمک سعی و خطا محاسبه می‌شود (خلیفه و همکاران، ۱۳۹۹).

شکل غیرخطی مدل ماسکینگام کاربرد وسیعی در روندیابی سیلاب دارد. تحقیقات زیادی در مورد انواع غیرخطی مدل ماسکینگام صورت گرفته است. در مطالعه‌ی حاضر شکل اصلاح‌شده‌ای از این مدل که توسط طبری و همکاران، (۱۳۹۸) پیشنهاد شده است، که در این مطالعه به‌عنوان مدل غیرخطی ماسکینگام نوع ششم ($NL6$) بکار برده شده است. اساس مدل ماسکینگام معادله‌ی پیوستگی است. در ادامه روند دستیابی به مدل $NL6$ تشریح می‌شود.

$$S_{in} = b \left(\frac{I}{a_1} \right)^{n_1} \quad (3)$$

$$S_{out} = b \left(\frac{O}{a_2} \right)^{n_2} \quad (4)$$

که در آن a_1 و n_1 پارامترهای مرتبط با مشخصات رابطه عمق-دبی بازه بالادست رودخانه را بیان می‌کند؛ a_2 و n_2 ویژگی‌های عمق-دبی بخش پایین‌دست را بیان می‌کند؛ با جایگذاری S_{in} و S_{out} از معادله ۳ و ۴ در معادله $S = [XS_{in} + (1-X)S_{out}]^\beta$ و ساده‌کردن نتیجه‌ی کار معادله‌ی ۵ تولید می‌گردد.

$$S = K \gamma [X(C_1 I^{\alpha_1}) + (1-X)(C_2 O^{\alpha_2})]^\beta \quad (NL6) \quad (5)$$

$$K = b^\beta$$

$$\alpha_1 = \frac{m}{n_1}$$

$$C_1 = \left(\frac{1}{a_1} \right)^{\alpha_1}$$

$$C_2 = \left(\frac{1}{a_2} \right)^{\alpha_2}$$

که در آن I و O : به ترتیب دبی ورودی و دبی خروجی $\left(\frac{m^3}{s} \right)$ ؛ K : ثابت ذخیره که از صفر بزرگ‌تر است.

همکاران، ۲۰۱۵). یک مدل ماسکینگام غیر خطی را معرفی کرد که ساختار مدل ذخیره سازی $NL4$ را به عنوان $NL5$ تغییر داد. این مدل دارای درجه آزادی بیشتری نسبت به مدل $NL4$ است و ۷ پارامتر غیر خطی ماسکینگام را ارائه می‌دهد. مدل توسعه یافته $NL6$ توسط (طبری و همکاران، ۲۰۱۸)، بر اساس مدل $NL5$ با افزودن ضریب بهبود ۷ ارائه شد که با توجه به حداکثر سرعت جریان در هیدروگراف خروجی مقادیر کمتر و بیشتر از یک را می‌گیرد.

با توجه به مطالب ذکر شده، در این مطالعه از مدل جدید ماسکینگام غیر خطی $NL6$ به عنوان روش توسعه یافته برای روندیابی رودخانه‌ها استفاده شده است در این مقاله، بهینه‌سازی پارامترهای مدل غیر خطی بر اساس یک تکنیک هوشمند قوی الهام گرفته از طبیعت به نام الگوریتم بهینه‌ساز مگس (MA) صورت گرفته است. در این مقاله برای اولین بار از الگوریتم MA برای بهینه‌سازی پارامترهای مدل جدید غیر خطی ماسکینگام به نام مدل $NL6$ با ۸ متغیر استفاده شد.

مواد و روش‌ها

مدل ماسکینگام یکی از روش‌های هیدرولوژیکی است که اصول آن بر اصل پیوستگی جریان و معادله بین دبی و ذخیره موقت آب در طول مسیر استوار است. دو معادله پیوستگی و ذخیره غیرخطی به عنوان معادلات پایه‌ای به صورت معادلات (۱) و (۲) در مدل ماسکینگام به کار رفته‌اند:

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

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

در این معادلات S_t ، I_t و O_t به ترتیب ذخیره، ورودی و خروجی در زمان t ، K ضریب ذخیره برای رودخانه است که یک مقدار منطقی نزدیک به زمان گذر جریان از کل مسیر رودخانه می‌باشد (ثابت و بزرگتر از صفر)، X یک فاکتور وزنی که معمولاً بین صفر و ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. معمولاً چنانچه معادله ماسکینگام به صورت

که در آن DPO قدر مطلق اختلاف دبی اوج خروجی اندازه‌گیری شده و دبی اوج خروجی روندیابی شده، O_p مقدار دبی اوج خروجی اندازه‌گیری شده و \hat{O}_p مقدار دبی اوج خروجی روندیابی شده می‌باشد. بایستی متذکر شد که DPO یک متغیر مهم در پیش‌بینی روندیابی سیلاب به شمار می‌آید. آسیب ناشی از سیل با استفاده از دقت بهبود داده شده‌ی DPO در بازه‌ی پایین دست رودخانه‌ها برآورد می‌شود (عروجی و همکاران، ۲۰۱۳). بنابراین SSQ شاخص اصلی ارزیابی خطا در فرآیندهای بهینه‌سازی می‌باشد و DPO توابع جایگزین هستند.

✓ روش شبیه‌سازی مدل ماسکینگام غیرخطی NL6

برای شبیه‌سازی مدل NL6 از گام‌های زیر تبعیت می‌شود. جریان ورودی اندازه‌گیری شده، جریان خروجی محاسبه شده و ذخیره‌ی محاسبه شده در بازه‌ی زمانی t ام به ترتیب I_i ، O_i و S_i می‌باشند که در اینجا $i = 0.1.2. \dots N$ به عنوان بازه‌های زمانی شبیه‌سازی می‌باشند. گام‌های مربوط به روش NL6 به صورت زیر می‌باشد:

گام ۱) اطلاعات مربوط به دبی‌های ورودی و خروجی اندازه‌گیری شده با بازه‌های زمانی معین برای هیدروگراف مورد نظر جمع‌آوری می‌شود.

گام ۲) مقادیری برای هشت پارامتر هیدرولوژیکی K ، X ، α_1 ، β_2 ، α ، C_1 ، C_2 و γ فرض می‌شود.

گام ۳) مدل بهینه‌سازی مناسب جهت بهینه نمودن پارامترهای مدل NL6 انتخاب می‌شود.

گام ۴) مقادیر هشت پارامتر با استفاده از یک روش بهینه‌سازی انتخابی بهینه می‌شوند.

گام ۵) مقدار ذخیره‌ی اولیه S_0 از رابطه زیر محاسبه می‌شود. مقدار دبی خروجی محاسبه شده با مقدار دبی ورودی اندازه‌گیری شده برابر فرض می‌شود ($\hat{O}_0 = I_0$):

X: ضریب وزنی بدون بعد که بیانگر اثرات نسبی دبی ورودی و خروجی بر ذخیره است. مقدار آن برای رودخانه بین صفر و ۰.۵ می‌باشد.
 α_1 ، α_2 و β : پارامترهای نمایی که از صفر بزرگ‌ترند.
 C_1 و C_2 : پارامترهای ثابتی هستند که از صفر بزرگ‌تر می‌باشند.

پارامتر γ در واقع ضریب تعیین‌کننده‌ی خطی و غیرخطی بودن هیدروگراف خروجی است که مقدار آن برای هیدروگراف‌های دارای دبی تک اوج کمتر از یک و برای هیدروگراف‌های دارای دبی چند اوج بیشتر از یک می‌باشد.

معرفی شاخص‌های ارزیابی خطای رویکرد محاسباتی

برای اینکه بتوان نتایج حاصل از دو روش را مقایسه کرد بایستی از یک سری شاخص یا تابع هدف استفاده نمود. این شاخص‌ها در ذیل آورده شده است.

✓ SSQ¹

شاخص ارزیابی خطای SSQ برای ارزیابی مقادیر بهینه‌ی پارامترهای مدل NL6 استفاده می‌شود و به صورت زیر می‌باشد:

$$MinSSQ = \sum_{i=1}^N (O_i - \hat{O}_i)^2 \quad (6)$$

که در آن SSQ مجموع اختلاف مربعات دبی خروجی اندازه‌گیری شده و دبی خروجی محاسبه شده در بازه‌ی زمانی t ، O_i دبی خروجی اندازه‌گیری شده در بازه‌ی زمانی t و \hat{O}_i دبی خروجی محاسبه شده در بازه‌ی زمانی t می‌باشد.

✓ DPO²

شاخص ارزیابی خطایی را که می‌توان برای محاسبه‌ی کمترین اختلاف بین دبی اوج اندازه‌گیری شده و دبی اوج روندیابی شده به کار برد به قرار زیر است:

$$DPO = minimize \left| O_p - \hat{O}_p \right| \quad (7)$$

². Deviations of peak of routed and Observed outflows

¹. Sum of squared deviations between observed and computed outflows

بین جزایر الهام گرفته شده است (Gao et al, 2020). به طور کلی جانوران و گیاهان به دنبال استفاده از منابع به صورت انحصاری هستند به طوری که در یک محل زندگی جانوران مختلفی وجود دارند و ناچار به اشتراک منابع می‌باشند. بنا براین یا جانورانی که قوی‌تر هستند برنده می‌شوند و یا اکوسیستمی شکل می‌گیرد تا گونه‌ها از یکدیگر تغذیه نمایند. کاربرد الگوریتم مگس در حل مسائل بهینه‌سازی، اولین بار به چگونگی استفاده از فرآیندی طبیعی برای حل مسائل بهینه‌سازی پرداخته است. این الگوریتم مانند سایر الگوریتم‌های تکاملی از جمله ژنتیک دارای عملگرهای جهش و مهاجرت است که باعث ایجاد تغییرات مطلوب در روند تولید جمعیت نسل‌ها می‌شود (Zervoudakis et al, 2020). شکل (۱) مراحل تولید مثل و زندگی مگس را نشان می‌دهد.



شکل (۱): مراحل تولید مثل و زندگی مگس

الگوریتم مگس شامل دو نوع نر و ماده می‌باشند که ممکن است مگس‌های نر همیشه قوی بوده و در نتیجه عملکرد بهتری داشته باشند. افراد حاضر در الگوریتم بهینه‌سازی مگس با توجه به رفتارهای مختلف مگس‌های زن و مرد، سرعت آن‌ها به روش‌های مختلف به روز می‌شود. مگس‌های نر و ماده موقعیت خود را با استفاده از رابطه (۱۲) و (۱۳) بروزرسانی می‌نمایند.

$$X_i^{(t+1)} = X_i^{(t)} + V_i^{(t+1)} \quad (12)$$

$$y_i^{(t+1)} = y_i^{(t)} + V_i^{(t+1)} \quad (13)$$

$$S_0 = K \gamma \left[X (C_1 I^{\alpha_1}) + (1-X) (C_2 O_0^{\alpha_2}) \right]^\beta \quad i = 0 \quad (8)$$

گام ۶) نرخ زمانی تغییر حجم ذخیره در بازه‌ی زمانی t از رابطه زیر محاسبه می‌شود (شروع از $t = 1$):

$$\frac{\Delta S_i}{\Delta t} = I_i \left\{ \left[\frac{1}{(1-X)C_2} \right] \left(\frac{S_i}{K\gamma} \right)^\beta - \left[\frac{1}{(1-X)C_2} \right] \left[(C_1 I^{\alpha_1}) X \right] \right\}^{\frac{1}{\alpha_2}} \quad (9)$$

لازم بذکر است که مقدار $\frac{\Delta S_i}{\Delta t}$ در $t = 0$ برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود.

گام ۷) مقدار حجم ذخیره در زمان t از رابطه زیر محاسبه می‌شود (شروع از $t = 1$):

$$S_i = S_{i-1} + \Delta t \left(\frac{\Delta S_{i-1}}{\Delta t} \right) \quad (10)$$

گام ۸) دبی خروجی در بازه‌ی زمانی t از رابطه زیر محاسبه می‌شود (شروع از $t = 1$):

$$\hat{O}_i = \left\{ \left[\frac{1}{(1-X)C_2} \right] \left(\frac{S_i}{K\gamma} \right)^\beta - \left[\frac{1}{(1-X)C_2} \right] \left[(C_1 I_{i-1}^{\alpha_1}) X \right] \right\}^{\frac{1}{\alpha_2}} \quad (11)$$

لازم بذکر است که مقدار \hat{O}_0 در $t = 0$ ، برابر با I_0 در نظر گرفته می‌شود.

گام ۹) شاخص t یک واحد افزایش و گام‌های ۷ تا ۹ را تا اینکه شبیه‌سازی به زمان N برسد، تکرار می‌شود.

گام ۱۰) شاخص‌های SSQ محاسبه و ثبت می‌شود.

گام ۱۱) اگر شاخص‌های SSQ رضایت‌بخش باشند

روند شبیه‌سازی خاتمه می‌یابد، در غیر این صورت

پارامترهای اخیر مدل NL6 به عنوان حدس اولیه‌ی

تلاش بعدی استفاده شده و مراحل از گام ۴ تا گام ۱۱

تکرار می‌شود.

برای بررسی عملکرد الگوریتم توسعه داده شده، نتایج

حاصل از اجرای آن با روش‌های فراابتکاری دیگر در

پژوهش‌های قبلی مورد مقایسه قرار گرفته است.

کدنویسی الگوریتم‌های MA در قسمت برنامه‌نویسی

نرم‌افزار MATLAB (R2018a) انجام شد.

الگوریتم مگس (MA)

الگوریتم مگس یک الگوریتم تکامل یافته بر پایه جمعیت است که از پدیده مهاجرت حیوانات و پرندگان

نر، دومین ماده با بهترین نر انتخاب می‌شوند. سپس فرزندان خود طبق رابطه (۱۸) و (۱۹) به دنیا می‌آورند:

$$of\ fspring1 = L * male + (1 - L) * female$$

$$of\ fspring2 = L * female + (1 - L) * male$$

فرزندان متولد شده نیز جهش می‌یابند و بزرگ می‌شوند و براساس مقادیر تناسب اندام خود طبقه‌بندی شده و به عنوان مرد یا زن برای تکرار و جفت‌گیری آماده می‌شوند روند الگوریتم Mayfly به صورت شکل (۲) خلاصه می‌شود.

مراحل اصلی الگوریتم MA که به شرح زیر توضیح داده می‌شوند (شکل ۲):



شکل (۲): مراحل مختلف بهینه سازی الگوریتم مگس (Zervoudakis et al, 2020)

داده‌های موردی مورد ارزیابی

برای آنالیز روش غیرخطی ماسکینگام جهت روندیابی سیلاب، در این پژوهش، از اطلاعات و داده‌های دو مطالعه موردی شامل یک سیل با هیدروگراف یک دبی تک اوج صاف که توسط ویلسون (۱۹۷۴) ارائه و یک سیل با هیدروگراف دارای دبی چند اوجه که

در رابطه (۱۲) و (۱۳)، X_i و y_i به ترتیب موقعیت مگس نر و ماده، V_i سرعت فعلی مگس‌ها می‌باشد.

سرعت حرکت مگس‌ها

مگس‌های نر همیشه قوی بوده و با میل خود به پرواز می‌آیند. سرعت مگس نر و ماده را می‌توان به ترتیب با استفاده از رابطه (۱۴) و (۱۵) محاسبه کرد:

$$V_{ij}^{t+1} = V_{ij}^t + a_1 e^{-\beta r_p^2 (P_{bestij} - X_{ij}^t)} + a_2 e^{-\beta r_g^2 (G_{bestj} - X_{ij}^t)} \quad (14)$$

$$V_{ij}^{t+1} = \begin{cases} V_{ij}^t + a_2 e^{-\beta r_{mf}^2 (X_{ij}^t - y_{ij}^t)} & \text{if } f(y_i) > f(x_i) \\ V_{ij}^t + fl.r & \text{if } f(y_i) \leq f(x_i) \end{cases} \quad (15)$$

در روابط بالا V_{ij}^t : سرعت مگس در مرحله i ام و بعد j مقداری بین ۱ تا n در زمان t ، X_{ij}^t و y_{ij}^t : موقعیت مگس در مرحله i ام و بعد j و زمان t ، a_1 و a_2 : ثابت بوده و به ترتیب مولفه‌های شناختی و اجتماعی اشاره کرد، P_{bestij} : بهترین موقعیت مگس در

زمان $t+1$ ، β : ضریب ثابت، r_{mf} : فاصله دکارتی بین مگس‌های نر و ماده، $fl.r$: ضریب پرواز که مقداری تصادفی است و در ۲ که بین محدوده (۱، -۱) است. فاصله دکارتی بین مگس‌های نر و ماده از رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود. برای بررسی عملکرد الگوریتم مگس، بهترین شرایط حرکت عمودی (بالا و پایین) مگس نر یا ماده می‌باشد و به طور مداوم در حال تغییر سرعت خود باشند که سرعت آن‌ها براساس رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود.

$$\|x_i - X_i\| = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - X_{ij})^2} \quad (16)$$

$$V_{ij}^{t+1} = V_{ij}^t + d.r \quad (17)$$

که d ضریب ثابت و r یک پارامتر تصادفی بین (۱، -۱) می‌باشد. حرکت بالا و پایین به عنوان عنصر تصادفی به الگوریتم معرفی می‌شود.

جفت‌گیری مگس‌ها

روند جفت‌گیری بین دو نوع مگس نر و ماده بگونه‌ای است که انتخاب والدین به صورت تصادفی و براساس تابع هدف می‌باشد و بهترین مگس ماده با بهترین مگس

برای بررسی کارآمدی و برتری مدل‌های غیرخطی ماسکینگام، با استفاده از نتایج بدست آمده در مطالعات قبلی و مطالعه‌ی حاضر برای مطالعه‌ی موردی اول، جدولی به صورت جدول ۱ تدوین شده است. این جدول شامل روش‌های بهینه‌سازی استفاده شده، مقادیر پارامترهای بهینه و مقادیر شاخص‌های ارزیابی خطا جهت مقایسه‌ی مدل‌ها می‌باشد.

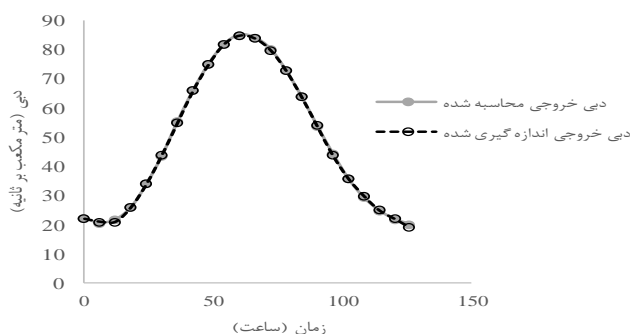
همان‌طور که از جدول ۱ دریافت می‌شود، مدل پیشنهادی NL6 نسبت به دیگر مدل‌های غیرخطی ماسکینگام در زمینه‌ی تمامی شاخص‌های ارزیابی خطا عملکرد بهتری داشته و میزان خطای این روش برای هیدروگراف دارای دبی تک اوجهی صاف بسیار اندک است و برای این نوع هیدروگراف بسیار خوب عمل خواهد کرد.

بوسیله‌ی وایسمن و لوئیس (۲۰۰۳) معرفی شده است، مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث

مطالعه‌ی موردی اول - هیدروگراف یک دبی اوج صاف

نمونه مورد استفاده در این مطالعه برای اولین بار توسط ویلسون (۱۹۷۴) ارائه شده است. در این نمونه رابطه غیرخطی بین مقادیر S_t و $[XI_t + (1-X)O_t]$ برقرار می‌باشد و می‌توان عملکرد الگوریتم‌های مختلف را در بدست آوردن مقادیر بهینه پارامترهای معادله ماسکینگام غیرخطی مورد بررسی قرار داد. بیشترین جریان ورودی و خروجی از این رودخانه به ترتیب ۱۱۱ و ۸۵ متر مکعب بر ثانیه بوده است. در جدول ۱ مقایسه‌ی هیدروگراف‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده‌ی مدل NL6 برای مطالعه‌ی موردی اول در شکل ۳ آورده شده است. در شکل ۳ مشاهده می‌شود هیدروگراف محاسبه‌شده انطباق خوبی با هیدروگراف اندازه‌گیری شده دارد. علاوه بر این، این شکل نشان می‌دهد که مدل NL6 با دقت دبی اوج هیدروگراف خروجی را محاسبه می‌کند، که یک متغیر مهم در روندیابی هیدروگراف می‌باشد.



شکل (۳): مقایسه‌ی هیدروگراف اندازه‌گیری شده و هیدروگراف محاسبه‌شده‌ی بدست آمده با مدل NL6



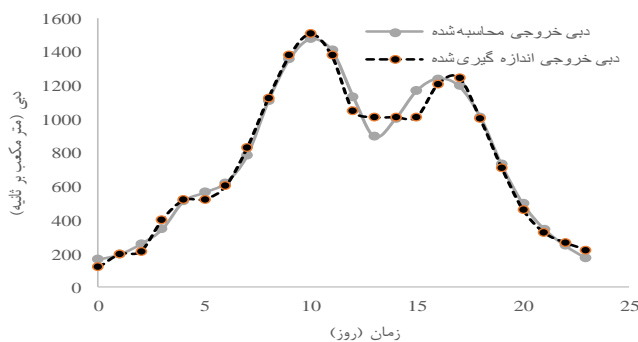
جدول (۱): مقایسه مقادیر بهینه SSQ و DPO بدست آمده از مدل پیشنهادی و مدل های موجود غیرخطی ماسکینگام برای مطالعه موردی اول با استفاده از داده های ویلسون (۱۹۷۴)

مدل	الگوریتم	پارامترهای هیدرولوژیک										
		DPO	SSQ	γ	C_2	C_1	β	α_2	α_1	α	X	K
NL1	EV-GRG	۱/۸۵	۲۵۸/۴۵	---	---	---	---	---	---	۱/۵۰۱	۰/۲۲۹	۰/۴۶۱
NL2	EV-GRG	۰/۵۵	۱۸۴/۳۲	---	---	---	---	۱/۵۶۸	۳/۰۴۲	---	۰/۰۰۰۳	۰/۲۷۱
NL3	GOA	۰/۹	۳۶/۷۷	---	---	---	۱/۸۶۸	---	---	---	۰/۲۷۸	۰/۰۸۶
NL4	GA-GRG	۰/۳۱	۷/۶۷	---	---	---	۴/۰۷۹	---	---	۰/۴۳۳	۰/۲۹۶	۰/۸۳۴
NL5	SFLA-NMS	۰/۰۵	۵/۴۴	---	۰/۷۳۵	۰/۶۱۹	۳/۸۱۷	۰/۴۲۵	۰/۶۹۶	---	۰/۰۸۸	۰/۴۷۸
NL6	MA	۰/۰۲۵	۳/۲۱	۰/۹۱۷۹	۰/۷۲۶۷	۰/۵۹۲۸	۳/۸۲۰۴	۰/۴۲۵۲	۰/۷۰۲۵	---	۰/۸۷۵۹	۰/۴۹۷۶

با در دست داشتن نتایج حاصل از مدل های NL4، NL5 و مدل NL6 از مطالعات قبلی و مطالعه حاضر برای مطالعه موردی دوم جدول ۲ به صورت زیر بدست می آید. این جدول شامل نوع مدل، روش بهینه سازی، پارامترهای هیدرولوژیک و توابع هدف می باشد. همان طور که از جدول ۲ مشاهده می شود، عملکرد مدل پیشنهادی (NL6) نسبت به مدل های دیگر ماسکینگام خطی بسیار بهتر و دقیق تر است. این مدل دارای کمترین مقدار برای تمامی شاخص های ارزیابی خطا می باشد به طوری که اختلاف این مقادیر با مقادیر شاخص های ارزیابی خطا مربوط به مدل NL5 بسیار فاحش است. مدل NL6 برای هیدروگراف های دارای دبی چند اوجه عملکرد خوبی دارد و در مقایسه با سایر مدل های ماسکینگام غیرخطی دقیق تر عمل می کند.

مطالعه موردی دوم- هیدروگراف دارای دبی چند اوجه

دومین مطالعه موردی یک سیل با هیدروگراف دارای دبی چند اوجه می باشد که بوسیله وایسمن و لوئیس (۲۰۰۳) معرفی شده است. این مطالعه موردی شامل Δt برابر با یک روز و $N = 23$ می باشد. برای مقایسه هیدروگراف اندازه گیری شده و هیدروگراف خروجی محاسبه شده مطالعه موردی سوم که از مدل NL6 بدست آمده از شکل ۴ استفاده می شود. همانطور که از شکل دریافت می شود در بیشتر نقاط انطباق خوبی مشاهده می شود و تنها در نقاط معدودی که بین دو دبی اوج هیدروگراف می باشد اختلافاتی وجود دارد. در نقاط اوج هم تقریباً انطباق خوبی صورت گرفته است. در کل می توان گفت بین دو نمودار انطباق خوبی وجود دارد.



شکل (۴): مقایسه هیدروگراف اندازه گیری شده و هیدروگراف محاسبه شده بدست آمده با مدل NL6



جدول (۲): مقایسه مقادیر بهینه‌ی SSQ و DPO بدست آمده از مدل NL6 و مدل‌های موجود غیر خطی ماسکینگام برای مطالعه‌ی موردی دوم با استفاده از داده‌های بزرگ‌حداد (۲۰۱۵)

توابع هدف	پارامترهای هیدرولوژیک										الگوریتم	مدل	
	DPO	SSQ	γ	C_2	C_1	β	α_2	α_1	α	X			K
۵۰	۷۳۳۹۹	---	---	---	---	۱/۵۶۸	---	---	۰/۹۲۱	۰/۱۶۷	۰/۰۷۷	SFLA-NMS	NL4
۳۰	۶۹۸۶۰	---	۱/۰۳	۰/۹۹	۱/۰۸۶۱	۱/۴۲۰	۳/۱۲۱	---	5×10^{-7}	۰/۰۷۸	SFLA-NMS	NL5	
۶/۱۵	۶۸۷۲۲	۱/۲۷۵۵	۲/۱۲۳۷	۰/۵۱۰۳	۱/۰۷۵۶	۱/۳۲۵۵	۳/۲۲۴۵	---	5×10^{-7}	۰/۰۷۸۹	MA	NL6	

تقریباً برای هر دو مطالعه‌ی موردی تمامی توابع هدف (SSQ و DPO) مدل NL6 به صورت چشمگیری کاهش یافتند و مقادیر دبی خروجی روندیابی شده بهبود یافته و به مقادیر واقعی نزدیکتر شدند.

نتیجه‌گیری

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 فراابتکاری یکی از راه‌حل‌هایی بوده‌اند که توانسته‌اند در تخمین این پارامترها موفق باشند. در مطالعه حاضر الگوریتم مگس در تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی به کار رفته است.

در این پژوهش به منظور برآورد مقادیر بهینه پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی در روندیابی سیلاب دو مثال موردی رودخانه ویلسون و وایسمن مورد بررسی قرار گرفته است.

در این میان با توجه به بررسی‌ها و مطالعات صورت گرفته این نتیجه دریافت شد که مدل NL6 بدلیل درجات آزادی بیشتر دارای کارآمدی بیشتری است. همچنین از الگوریتم نوین و قوی MA هم جهت بهینه‌سازی و بهبود پارامترهای غیرخطی مدل استفاده گردید که کارایی این الگوریتم اثبات شد.

نتایج بدست آمده به صورت مدل NL6-MA ارائه شد که چکیده‌ی این نتایج به قرار زیر می‌باشد.

۱- در مدل روندیابی NL6-MA پارامتر γ بیانگر ضریب تعیین‌کننده‌ی خطی و غیرخطی بودن هیدروگراف خروجی است. اگر هیدروگراف خروجی دارای دبی تک اوج باشد، معمولاً مقدار γ کمتر از یک و اگر دارای دبی چند اوج باشد مقدار γ بیشتر از یک خواهد بود. برای مطالعه موردی اول γ کمتر از یک و برای مطالعه موردی دوم γ بیشتر از یک می‌باشد.

۲- با مقایسه‌ی نمودارهای هیدروگراف‌های خروجی واقعی و روندیابی شده بوسیله‌ی مدل NL6-MA می‌توان دریافت کرد که در مطالعه‌ی موردی اول یک انطباق بسیار خوبی بین این دو هیدروگراف برقرار است و دبی اوج هیدروگراف خروجی روندیابی شده با دقت بسیار خوبی با استفاده از مدل NL6-MA محاسبه شده است.

در مطالعه‌ی موردی دوم هم انطباق بسیار خوبی بین دو هیدروگراف خروجی اندازه‌گیری شده و روندیابی شده با استفاده از NL6-MA صورت گرفته و تنها در معدود نقاط بین دو هیدروگراف اختلافاتی وجود دارد. همچنین در نقاط اوج هم انطباق نسبتاً خوبی بین دو هیدروگراف مشاهده می‌شود.

۳- برای بررسی عملکرد MA، نتایج حاصل از اجرای آن با الگوریتم‌های پژوهش‌های قبلی در دو مطالعه موردی مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاکی از بالا بودن دقت تخمین برآورد پارامترهای غیرخطی مدل با الگوریتم MA بوده است.

در مطالعه موردی اول یعنی روندیابی سیل ویلسون بهترین مقدار برای توابع هدف SSQ و DPO الگوریتم MA به ترتیب برابر مقدار ۳.۲۱ و ۰.۰۲۵ بوده است و در مطالعه موردی دوم روندیابی سیلاب وایسمن و لوئیس بهترین مقدار توابع هدف SSQ و DPO در اجرای الگوریتم MA به ترتیب برابر ۶۸۷۲۲ و ۶.۱۵ بوده است.

از این رو استفاده از الگوریتم MA و مدل جدید غیرخطی ماسکینگام جهت استفاده در زمینه روندیابی سیلاب توصیه می‌شود.

منابع

- خلیفه، س.، ع. اسماعیلی، ک. اسماعیلی و س. خدشناس. ۱۳۹۹. کاربرد مقایسه ای الگوریتم جستجوی موجودات همزیست با الگوریتم های فراکاوشی در مدل روندیابی سیلاب. نشریه آب و خاک فردوسی مشهد، جلد ۳۴، شماره ۲. زینلی، م.، و م. پوررضا. ۱۳۸۸. تخمین پارامترهای بهینه مدل روندیابی غیرخطی ماسکینگام با استفاده از الگوریتم مورچگان پیوسته. نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران، سال هشتم، شماره ۳۱، ص ۹۴-۱۰۶.
- محمدی قلعه نی، م.، و ا. بزرگ حداد. ۱۳۸۹. بهینه سازی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام با استفاده از الگوریتم بهینه سازی نورد شبیه سازی شده. نشریه آب و خاک فردوسی مشهد، سال ۱۳۸۹، شماره ۵، ص ۹۱۹-۹۰۸.
- Barati R, Badfar M, Azizyan G, Akbari GH. 2017. Discussion of parameter estimation of extended nonlinear Muskingum models with the weed optimization algorithm” by Farzan Hamedi, Bozorg Haddad O, Hamedi F, Orouji H, Pazoki M, Loáiciga HA. 2015. A re-parameterized and improved nonlinear muskingum model for flood routing. *Water Resources Management* 29(9):3419- 3440.
- Cheng, M. Y. and Prayogo, D. 2014. Symbiotic Organisms Search: A new metaheuristic optimization algorithm. *J. Comput. Struct.* 139, 98-112.
- Chow, V. T. 1973. *Open Channel Hydraulic*. 3rd Ed. McGraw Hill Book Company. New York. Inc.
- Easa SM. 2013. New and improved four parameter nonlinear Muskingum model. *Proceeding of the Institution of Civil Engineering-Water Management*. 167(5):288–298
- Ehteram, M.; Binti Othman, F.; Mundher Yaseen, Z.; Abdulmohsin Afan, H.; Falah Allawi, M.; Bt. Abdul Malek, M.; Najah Ahmed, A.; Shahid, S.; P. Singh, V.; El-Shafie, A. Improving the Muskingum Flood Routing Method Using a Hybrid of Particle Swarm Optimization and Bat Algorithm. *Water* **2018**, 10, 807.
- Gao, Z.M., Zhao, J., Li, S.R. and Hu, Y.R., 2020, December. The improved mayfly optimization algorithm with Opposition based learning rules. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1693, No. 1, p. 012117). IOP Publishing.
- Gavilan G, Houck MH. 1985. Optimal Muskingum River routing. *Proceedings of ASCE WRPMD Specialty Conference on Computer Applications in Water Resources*, 10-12 June, New York, Reston, VA, USA, 1294–1302.
- Geem, Z. W. 2006. Parameter estimation for the nonlinear Muskingum model using the BFGS technique. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 5: 474-478.
- Gill, M. A. 1978. Flood routing by Muskingum method. *Journal of Hydrology*, 36: 353-363.
- Karahan, H., G. Gurarlan., A.M. ASCE and Z.W. Geem. 2013. Parameter Estimation of the Nonlinear Muskingum Flood-Routing Model Using a Hybrid Harmony Search Algorithm. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18: 352–360.
- Heidari, A. A., Mirjalili, S., Faris, H., Aljarah, I., Mafarja, M., & Chen, H. 2019. Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Future generation computer systems*, 97, 849-872.
- 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*, 37:1131-1138.
- Khalifeh, S., Esmaili, K., Khodashenas, S., and Akbarifard, S. 2020. Data on Optimization of the Non-linear Muskingum Flood Routing in Kardeh River Using GOA Algorithm. *Journal of Data in Brief*, Volume 30, <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105398>.
- McCarthy, G. T. 1938. The unit hydrograph and flood routing. *Proc. Conf. of North Atlantic Division, U.S. Army Corps of Engineers*, Washington, DC.
- Mohan, S. 1997. Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using genetic algorithm. *J. Hydraulic. Eng.* 123: 137–142.
- Premual, M. and K.G. RangaRaju. 1998. Variable – parameter stage – hydrograph routing method: I Theory. *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE*, 3: 109-114.
- Wilson, E. M. 1974. *Engineering hydrology*, MacMillan Education, Hampshire, United Kingdom.
- Zervoudakis, K. and Tsafarakis, S., 2020. A mayfly optimization algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 145, p.106559.



Estimation of the Type 6 Muskingum Nonlinear Model Parameters in the Flood Routing with The Mayfly Algorithm (MA)

Saeid Khalifeh¹, Kazem Esmaili^{2*}, Saeed Reza Khodashenas³, Fereshteh Modaresi⁴

Abstract

One of the basic topics in hydrological and river engineering studies is flood routing. Flood flooding is common in multi-tributary rivers and rivers without intermediate basin statistics. Therefore, to achieve the determination of slopes and cross-sections in all sections of the river, the Muskingum hydrological model is a useful method that helps to save information on the depth and flow of the flood at any time by saving time and money. To specify. In this study, the nonlinear parameters of the new Muskingum model are optimized based on the fly algorithm (MA). In this non-linear model of Muskingum, which has eight parameters, the recovery coefficient γ is used, which has more or less values than the number of peaks discharged in the output hydrograph. To evaluate the performance of Muskingum's new nonlinear model with the new MA algorithm, the Wilson and Weisman-Lewis case study has been used by many previous researchers for validation. The results of the MA algorithm for Wilson and Weissman-Lewis rivers show the minimization of the residual squares (SSQ) as the objective function, which is 3.21 for the Wilson River and 68722 for the Weissman River. The results of this study showed that the proposed model has high accuracy in estimating the output discharge values.

Keywords: Optimization, MA, Hydrologic routing, Muskingum, Nonlinear type 6 model

¹ PhD Student, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran Email: khalifeh.saeid@mail.um.ac.ir

² Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran (*Corresponding Author, Email: esmaili@um.ac.ir)

³ Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran Email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir

⁴ Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran Email: fmodaresi@ferdowsi.um.ac.ir