



## Development of Nonlinear Muskingum Model Using Hybrid Evolutionary Algorithms

M.M. Rezapour Tabari<sup>1\*</sup>  
and S.A. Emami Dehcheshmeh<sup>2</sup>

### Abstract

The nonlinear Muskingum model has a significant advantage as compared to the linear model due to the nonlinear relationship between the storage and the flow discharge. In this model, the correct estimation of the parameters is necessary to achieve the proper precision. Previous studies indicated that there are five nonlinear corrected models which, with different optimization algorithms, tried to increase the prediction accuracy of output hydrographs. Due to the error in the output hydrograph of the previous models, in this study, a new structure of nonlinear Muskingum model was developed based on hybrid PSO and DSO algorithms. In this eight-parameter model (NL6 model), the improvement coefficient  $\gamma$  was used which held values less or more than one according to the number of peak discharges in the output hydrograph. By applying the proposed approach to the three types of input hydrographs and determining the optimal values of the parameters for the NL6 model, this research showed that the proposed model has a high accuracy in estimating the discharge values of the output hydrograph. The error reduction rate of the NL6 model based on SSQ and SAD indicators for multi-peak hydrographs were 53 and 35.6 percent compared to the last proposed model, respectively. So, this model have a high performance in estimating flood routing hydrograph.

**Keywords:** Flood Routing, Nonlinear Muskingum Method, Parameter Estimation, Hybrid Evolutionary Algorithms.

Received: July 14, 2017

Accepted: September 8, 2017

## توسعه مدل غیرخطی ماسکینگام با استفاده از هیبرید الگوریتم‌های فراکاوشی

محمود محمد رضا پورطبری<sup>۱\*</sup> و سید علی امامی ده‌چشمه<sup>۲</sup>

### چکیده

با توجه به وجود ارتباط غیرخطی بین ذخیره و دبی جریان در مدل ماسکینگام غیرخطی، این مدل از مزیت‌های بالایی نسبت به مدل خطی برخوردار می‌باشد. تخمین صحیح پارامترهای این مدل، جهت دستیابی به دقت مناسب ضروری است. بررسی مطالعات قبلی بیانگر وجود ۵ مدل غیرخطی اصلاح شده است که با الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی سعی نمودند تا دقت پیش‌بینی هیدروگراف خروجی را افزایش دهند. با توجه به خطای موجود در هیدروگراف خروجی روندیابی شده توسط مدل‌های قبلی، در این مطالعه ساختار جدیدی از مدل غیرخطی ماسکینگام بر مبنای هیبرید الگوریتم‌های فراکاوشی PSO و DSO توسعه داده شد. در این مدل ۸ پارامتره (مدل NL6) از ضریب بهبود دهنده  $\gamma$ ، که با توجه به تعداد دبی اوج واقع در هیدروگراف خروجی مقادیر کمتر و بیشتر از یک را به خود می‌گیرد، استفاده گردید. اعمال رویکرد پیشنهادی بر روی سه نوع هیدروگراف ورودی و تعیین مقادیر بهینه پارامترهای مدل NL6 نشان می‌دهد که این مدل از دقت بالایی در تخمین مقادیر دبی هیدروگراف خروجی برخوردار می‌باشد. میزان کاهش خطای مدل NL6 بر اساس شاخص‌های SSQ و SAD برای هیدروگراف چند اوج به ترتیب برابر با ۵۳ و ۳۵/۶ درصد نسبت به آخرین مدل پیشنهادی می‌باشد. لذا این مدل می‌تواند از عملکرد بالایی در تخمین هیدروگراف روندیابی شده سیل برخوردار باشد.

**کلمات کلیدی:** روندیابی سیلاب، روش ماسکینگام غیرخطی، برآورد پارامتر، هیبرید الگوریتم‌های فراکاوشی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۴/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۶/۱۷

1- Associate Professor in Civil Engineering, Department of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. Email: mrtabari@eng.sku.ac.ir

2- M.Sc. Student in Civil Engineering - Hydraulic Structures, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

\*- Corresponding Author

۱- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد.

\*- نویسنده مسئول  
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

پارامترهای ماسکینگام و در نهایت دستیابی به کمترین خطای ممکن به وسیله‌ی متداول‌ترین شاخص‌های خطا می‌باشد. روش استاندارد جهت استفاده از مدل ماسکینگام شامل دو مرحله برآورد پارامترها و پیش‌بینی هیدروگراف سیلاب می‌باشد (Das, 2004). گام اول برآورد پارامترهای مدل ماسکینگام با استفاده از داده‌های هیدروگراف ورودی - خروجی تاریخی ثبت شده از رودخانه، تعیین می‌شوند. گام دوم پیش‌بینی سیلاب برای حل هیدروگراف‌های خروجی یک هیدروگراف ورودی با استفاده از معادلات روندیابی ماسکینگام به کار برده می‌شود. در تحقیقات انجام شده پیشین، پنج نوع مدل غیرخطی ماسکینگام گزارش شده است (Chow, 1959; Gavilan and Houck, 1985; Gill, 1978; Bozorg Haddad et al., 2015; Easa, 2013). استفاده از ترکیب پارامترهای نمایی با ورودی و خروجی‌های متغیر معادله ذخیره‌سازی در نسخه‌ی خطی مدل ماسکینگام، دو نسخه‌ی NL1 و NL2 از مدل ماسکینگام غیرخطی به ترتیب در مرحله‌ی اول و دوم به دست آمد. با به کارگیری پارامترهای نمایی نسخه سوم (مدل NL3)، مدل ماسکینگام غیرخطی با جریان وزنی معادله ذخیره‌سازی مرتبط گردید. با استفاده از چهارمین نسخه از مدل ماسکینگام غیرخطی (NL4) معادله ذخیره‌سازی مدل NL1 و مدل NL2 با هم ترکیب شدند. با استفاده از اصلاح مدل NL4 نسخه پنجم ماسکینگام غیرخطی یعنی NL5 بدست آمد. (Easa (2013 اشاره کرد که هدف اصلاح ساختار یک مدل روندیابی سیل ایجاد درجات آزادی بیشتر در مدل می‌باشد. او همچنین اظهار داشت که مدل NL4 دارای درجات آزادی بیشتری نسبت به دیگر مدل‌های ماسکینگام غیرخطی است، از این رو، به طور کلی انطباق نزدیکتری نسبت به داده‌های خروجی اندازه‌گیری شده بدست می‌آید. (Bozorg Haddad et al. (2015 یک مدل ماسکینگام غیرخطی که ساختار مدل ذخیره‌سازی NL4 را اصلاح کرده است، را به عنوان NL5 معرفی کردند. این مدل دارای درجات آزادی بیشتری نسبت به NL4 استاندارد می‌باشد و ۷ پارامتر ماسکینگام غیرخطی را ارائه می‌دهد. گام برآورد پارامترها دارای بیشترین اهمیت برای به کارگیری روش ماسکینگام غیرخطی است (Chow et al., 1988). روش‌های مختلفی برای برآورد پارامترهای روش ماسکینگام غیرخطی توسط محققانی به کار برده شدند. روش‌های موجود برای تخمین پارامتر مدل‌های غیرخطی ماسکینگام را می‌توان در سه گروه دسته‌بندی کرد (Barati, 2011). گروه اول شامل روش‌های ریاضی، گروه دوم از روش‌های تخمین پارامتر ماسکینگام غیرخطی شامل الگوریتم پدیده-تقلید<sup>۲</sup> و گروه سوم ترکیبی از الگوریتم پدیده-تقلید و روش‌های ریاضی می‌باشد. این روش‌های الگوریتمی ترکیبی علاوه بر مزایای دو روش بهینه‌ای الگوریتم پدیده-تقلید و روش‌های ریاضی، معایب این دو روش را نیز جبران می‌کنند. برای نزدیک شدن جریان‌های اندازه‌گیری شده و روندیابی شده، مدل

سیل یکی از زیان‌بارترین پدیده‌های طبیعی است (Garcia and Loaiciga, 2013). جهت پیشگیری از خسارت‌های ناشی از سیل، بایستی هیدروگراف خروجی با استفاده از اطلاعات دریافتی رودخانه به صورت دقیق پیش‌بینی شود (Tewolde and Smithers, 2006). برای روندیابی سیل در رودخانه‌ها از دو روش کلی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی استفاده می‌شود (Chow et al., 1988). روش هیدرولیکی بر اساس راه حل عددی معادلات همرفتی-نفوذ یا معادلات یک بعدی سنت و نانت جریان غیردائمی غیریکنواخت تدریجی در کانال‌های باز می‌باشد (Cunge et al., 1980). این روش از عملکرد خوبی برخوردار بوده اما دارای اطلاعات فشرده و محاسبات سنگین است (Samani and Shamsipour, 2004). روش هیدرولوژیکی بر اساس اصل بقای جرم و استفاده از ارتباط بین ذخیره و دبی جریان دینامیکی عمل می‌نماید (Chow et al., 1988). برای برطرف نمودن محدودیت پیچیدگی و زمان‌بر بودن روش‌های هیدرولیکی، از روش‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. در زمینه‌ی روندیابی ماسکینگام که به وسیله‌ی مک‌کارتی در سال ۱۹۳۸ معرفی شده، خواص افت انرژی سیل با استفاده از یک مجموعه از هیدروگراف‌های ورودی و خروجی اندازه‌گیری شده از یک بازه‌ی رودخانه که بدون تغییر باقی مانده، تعیین و برای روندیابی هیدروگراف‌های آبی در بازه‌ی رودخانه‌ای یکسان استفاده می‌شود (Das, 2009). به علت کاربرد گسترده‌ی روش ماسکینگام در بسیاری از شرایط روندیابی سیل رودخانه، با تأکید بر برآورد پارامترهای این روش برای اشکال خطی و غیرخطی، این روش مورد بررسی قرار گرفته است. (Fotuhi and Maghrebi (2011 اقدام به مقایسه روش‌های روندیابی دینامیکی و ماسکینگام کونژ با پارامترهای ثابت و متغیر در روندیابی سیل نمودند. نتایج نشان داد که روش ماسکینگام کونژ در شیب‌های کم دارای اختلاف زیادی با روش دینامیکی است و لازم است در استفاده از آن احتیاط نمود.

(Akbari et al. (2011 با استفاده از روش ماسکینگام کونژ اقدام به روندیابی سیل در آبراهه‌های طبیعی نمودند. نتایج بیانگر قابل قبول بودن خروجی‌های سیل محاسباتی با مقادیر مشاهداتی دارد. در بیشتر رودخانه‌های طبیعی که تغییرات غیرخطی در جریان‌ها یا ذخیره بین بالادست و پایین دست حکم‌فرماست، داشتن یک مدل برای شبیه‌سازی فرآیندهای سیل غیرخطی مطلوب است. با توجه به مطالعات عدیده‌ی صورت گرفته بر روی روندیابی به روش ماسکینگام غیرخطی و کارآمدی این روش، هدف این مطالعه بهبود مدل ماسکینگام غیرخطی و ترکیب آن با الگوریتم‌های قدرتمند بهینه‌سازی جهت بهینه‌کردن

ماسکینگام غیرخطی به پارامترهای بیشتری نیاز دارد (Geem, 2014). مدل‌های قبل از NL4 نهایتاً توانستند سه پارامتر را ارائه دهند و NL4 تنها چهار پارامتر را ارائه داد. این در حالی است که مدل NL5 از مدل ماسکینگام غیرخطی هفت پارامتر ماسکینگام را ارائه می‌دهد. مدل پیشنهادی در تحقیق حاضر (مدل NL6) دارای هشت پارامتر است. با توجه به اینکه برای روندیابی دقیق‌تر یک رودخانه مخصوصاً رودخانه‌های دارای دبی چند اوجه که به پارامترهای بیشتری نیازمند است، می‌توان گفت مدل پیشنهادی بر تمام مدل‌های پیشین ماسکینگام غیرخطی ارجحیت دارد و مناسب‌تر می‌باشد. مدل پیشنهادی در بخش ۲ به صورت مفصل تشریح گردیده است. پارامتر جدید  $\gamma$  در این تحقیق در بخش ۲ معرفی شده که در واقع بیانگر خطی یا غیرخطی بودن هیدروگراف خروجی است. برای ارزیابی خطا از سه شاخص  $SSQ$ ،  $SAD$  و  $DPO$  استفاده گردید. جهت بهینه کردن پارامترهای مدل پیشنهادی از دو الگوریتم قدرتمند  $PSO$  و  $DSO$  استفاده گردید که نتایج مطلوبی به بار آوردند. نتایج حاصل در بخش ۳ برای سه نوع هیدروگراف تک اوجه صاف، تک اوجه ناصاف و چند اوجه بیان گردیده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

پیش‌بینی و جلوگیری از خسارت‌های ناشی از وقوع سیلاب یک امر بسیار ضروری است. در سال‌های اخیر خسارات جانی و مالی زیادی ناشی از وقوع سیلاب در سراسر دنیا از جمله کشور ایران رخ داده است. روندیابی سیلاب یک راهکار کارآمد جهت پیش‌بینی و جلوگیری از خسارت‌های ناشی از وقوع سیلاب می‌باشد. از جمله راهکارهای ساده، بسیار سریع و کم‌هزینه برای روندیابی، رویکرد روندیابی هیدرولوژیکی است. یکی از انواع این روندیابی، روش ماسکینگام است. روندیابی به روش ماسکینگام به بهینه‌سازی پارامترها وابسته است و هر قدر که این پارامترها بهتر بهینه‌سازی شوند، پیش‌بینی وقوع سیلاب دقیق‌تر به دست خواهد آمد. پس این روش روندیابی به شدت به روش‌های نوین و قدرتمند بهینه‌سازی بستگی دارد. در مطالعه حاضر، آخرین مدل روندیابی ماسکینگام غیرخطی اصلاح شده و از آن برای روندیابی و بهینه‌سازی سه مطالعه موردی استفاده شده است. بدلیل وابستگی مدل ماسکینگام به تخمین دقیق پارامترهای ارائه شده در روابط وابسته به این مدل، دو روش قدرتمند بهینه‌سازی بر مبنای جستجوی مستقیم ( $DSO$ )<sup>۳</sup> و بهینه‌سازی ازدحام ذرات ( $PSO$ )<sup>۴</sup> به صورت هیبریدی مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه به بررسی ساختار مدل پیشنهادی بر مبنای رویکرد هیبریدی توسعه داده شده پرداخته می‌شود.

## ۲-۱- مدل ماسکینگام غیرخطی پیشنهادی

شکل غیرخطی مدل ماسکینگام کاربرد وسیعی در روندیابی سیلاب دارد. تحقیقات زیادی در مورد انواع غیرخطی مدل ماسکینگام صورت گرفته است. در این تحقیق شکل اصلاح شده‌ای از این مدل پیشنهاد شده است که در این مطالعه به عنوان مدل غیرخطی ماسکینگام نوع ششم ( $NL6$ ) نامیده می‌شود. اساس مدل ماسکینگام معادله‌ی پیوستگی است. در ادامه، روند دستیابی به مدل  $NL6$  تشریح می‌شود. به این منظور از معادلات زیر استفاده می‌گردد:

$$S_{in} = b \left( \frac{I}{a_1} \right)^{n_1} \quad (1)$$

$$S_{out} = b \left( \frac{O}{a_2} \right)^{n_2} \quad (2)$$

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 پایین دست را بیان می‌کند؛ با جایگذاری  $S_{in}$  و  $S_{out}$  که بیانگر حجم ذخیره ورودی و خروجی می‌باشند، از معادله ۱ و ۲ در معادله  $S = [XS_{in} + (1 - X)S_{out}]^\beta$  ساده کردن آن خواهیم داشت:

$$S = \gamma K [X(C_1 I^{\alpha_1}) + (1 - X)(C_2 O^{\alpha_2})]^\beta \quad (NL6) \quad (3)$$

$$K = b^\beta \quad (4)$$

$$\alpha_1 = \frac{m}{n_1} \quad (5)$$

$$\alpha_2 = \frac{m}{n_2} \quad (6)$$

$$C_1 = \left( \frac{1}{a_1} \right)^{\alpha_1} \quad (7)$$

$$C_2 = \left( \frac{1}{a_2} \right)^{\alpha_2} \quad (8)$$

که در آن  $I$  و  $O$ : به ترتیب دبی ورودی و خروجی ( $m^3/s$ )،  $K$ : ثابت ذخیره که از صفر بزرگتر است.  $X$ : ضریب وزنی بدون بعد که بیانگر اثرات نسبی دبی ورودی و خروجی بر ذخیره است. مقدار آن برای مخزن بین صفر و  $0/5$  و برای رودخانه بین صفر و  $0/3$  می‌باشد.  $\alpha_1$ ،  $\alpha_2$  و  $\beta$ : پارامترهای نمایی که از صفر بزرگترند.  $\gamma$ ،  $C_1$  و  $C_2$ : پارامترهای ثابتی هستند که از صفر بزرگترند. پارامتر  $\gamma$  در واقع ضریب تعیین‌کننده‌ی خطی و غیرخطی بودن هیدروگراف خروجی است که مقدار آن برای هیدروگراف‌های دارای دبی تک اوجه کمتر از یک و برای هیدروگراف‌های دارای دبی چند اوجه بیشتر از یک می‌باشد.  $S$  نیز بیانگر حجم ذخیره می‌باشد.

## ۲-۱-۱- معرفی پارامتر $\gamma$

در این مطالعه جهت افزایش دقت روش ماسکینگام غیرخطی پارامتر جدیدی به نام پارامتر  $\gamma$  به معادله‌ی ذخیره‌سازی اضافه گردید که مقدار آن از صفر بزرگتر است. این پارامتر تعیین‌کننده‌ی خطی و یا غیرخطی بودن هیدروگراف خروجی است. اگر مقدار  $\gamma$  از یک کمتر باشد هیدروگراف خروجی خطی و اگر از یک بیشتر باشد هیدروگراف خروجی

غیرخطی می‌باشد. لازم بذکر است که مدل NL6 روشی منعطف است که دارای هشت پارامتر می‌باشد. اگر مقدار  $\gamma$  برابر یک در نظر گرفته شود مدل NL5 بدست خواهد آمد. به همین ترتیب می‌توان تمامی مدل‌های ماسکینگام را از طریق مدل NL6 بدست آورد.

## ۲-۲- نحوه شبیه‌سازی مدل ماسکینگام غیرخطی NL6

جهت شبیه‌سازی مدل NL6 از مراحل زیر استفاده می‌شود. جریان ورودی اندازه‌گیری شده، جریان خروجی محاسبه شده و ذخیره‌ی محاسبه شده در بازه‌ی زمانی  $I_i$ ،  $O_i$  و  $S_i$  می‌باشند که در اینجا  $i = 0, 1, 2, \dots, N$  به عنوان گام زمانی شبیه‌سازی می‌باشند. مراحل روش NL6 عبارتند از:

گام ۱) جمع‌آوری هیدروگراف دبی‌های ورودی و خروجی،  
گام ۲) فرض نمودن مقادیری برای هشت پارامتر هیدرولوژیکی  $X, K, \alpha_1, \alpha_2, \beta, C_1, C_2$  و  $\gamma$

گام ۳) محاسبه مقدار ذخیره‌ی اولیه  $S_0$  با استفاده از رابطه ۹، لازم به ذکر است اولین مقدار دبی خروجی محاسبه شده با مقدار دبی ورودی اندازه‌گیری شده برابر فرض می‌شود ( $\bar{O}_0 = I_0$ ):

$$S_0 = \gamma K \left[ X(C_1 I_0^{\alpha_1}) + (1 - X)(C_2 \bar{O}_0^{\alpha_2}) \right]^\beta \quad \text{in } i = 0 \quad (9)$$

گام ۴) محاسبه نرخ زمانی تغییر حجم ذخیره در بازه‌ی زمانی  $i$  بر اساس رابطه زیر:

$$\frac{\Delta S_i}{\Delta t} = I_i - \left\{ \left[ \frac{1}{C_2(1-X)} \right] \left( \frac{S_i}{K} \right)^{\frac{1}{\beta}} - \left[ \frac{1}{C_2(1-X)} \right] \left[ X(C_1 I_i^{\alpha_1}) \right]^{\frac{1}{\alpha_2}} \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

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

گام ۵) محاسبه مقدار حجم ذخیره در زمان  $i$ :

$$S_i = S_{i-1} + \Delta t \left( \frac{\Delta S_{i-1}}{\Delta t} \right) \quad (11)$$

گام ۶) محاسبه دبی خروجی در بازه‌ی زمانی  $i$ :

$$\bar{O}_i = \left\{ \left[ \frac{1}{C_2(1-X)} \right] \left( \frac{S_i}{K} \right)^{\frac{1}{\beta}} - \left[ \frac{1}{C_2(1-X)} \right] \left[ X(C_1 I_{i-1}^{\alpha_1}) \right] \right\}^{\frac{1}{\alpha_2}} \quad (12)$$

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

گام ۷) شاخص  $i$  یک واحد افزایش می‌یابد و گام‌های ۶ تا ۸ تکرار می‌شود. به  $i = N$  تکرار می‌شود.

گام ۸) استخراج مقادیر بهینه پارامترهای گام دوم با استفاده از هیبرید الگوریتم‌های فراکاوشی PSO و DSO: در این مرحله از سه تابع هدف

تابع هدف  $SSQ^A$ ،  $SAD^B$  و  $DPO^C$  با توجه به فراوانی کاربرد آن در مطالعات قبلی استفاده گردید. نکته قابل توجه اینکه هر یک از این توابع هدف به طور جداگانه مورد ارزیابی قرار می‌گیرند:

$$SSQ = \text{Minimize} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)^2, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

$$SAD = \text{Minimize} \sum_{i=1}^N |O_i - \bar{O}_i|, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

$$DPO = \text{minimize} |O_p - \bar{O}_p|, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

که در آن  $SSQ$  مجموع مربعات اختلاف دبی خروجی اندازه‌گیری شده ( $O_i$ ) و دبی خروجی محاسبه شده ( $\bar{O}_i$ ) در بازه‌ی زمانی  $i$  می‌باشد. همچنین شاخص  $SAD$  مجموع قدر مطلق اختلاف دبی خروجی اندازه‌گیری شده و دبی خروجی روندیابی شده است. شاخص  $DPO$  نیز جهت محاسبه‌ی کمترین قدرمطلق اختلاف بین دبی اوج اندازه‌گیری شده ( $O_p$ ) و دبی اوج روندیابی شده ( $\bar{O}_p$ ) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

## ۲-۳- ساختار هیبرید الگوریتم‌های فراکاوشی PSO و DSO

با توجه کاربرد وسیع الگوریتم فراکاوشی PSO در ارائه مقادیر بهینه پارامترهای مؤثر در موضوعات منابع آب، در این مطالعه نیز از این الگوریتم جهت تعیین مقادیر بهینه پارامترهای مرتبط با مدل غیرخطی پیشنهادی ماسکینگام استفاده گردید. از آنجا که این الگوریتم جواب‌های نزدیک به بهینه کلی (NGS) را ارائه می‌نماید، مقادیر بهینه بدست آمده از این الگوریتم وارد الگوریتم فراکاوشی دیگری تحت عنوان DSO گردید. در واقع در الگوریتم DSO فضای جستجوی در اطراف بهترین جواب تولیدی با دقت بیشتری جهت یافتن مقدار بهینه‌تر رصد می‌شود. با انجام این عمل می‌توان با احتمال بسیار بالایی بیان نمود که جواب بهینه بدست آمده همان جواب بهینه کلی است. ساختار هیبرید الگوریتم‌های PSO و DSO پیشنهادی را می‌توان در شکل ۱ ملاحظه نمود. جزئیات مرتبط با نحوه عملکرد الگوریتم PSO و DSO را به ترتیب می‌توان در مطالعات (Chu and Chang 2009) و Mohammad Rezapour Tabari (2016) یافت.

## ۳- ارائه نتایج

سیل یکی از حوادث طبیعی است که خسارت‌های جانی و مالی زیادی به بار می‌آورد. لذا جهت پیشگیری از این خسارات لازم است سیلاب مورد پیش‌بینی قرار گیرد. روندیابی سیل راه حلی مطمئن برای این منظور است.

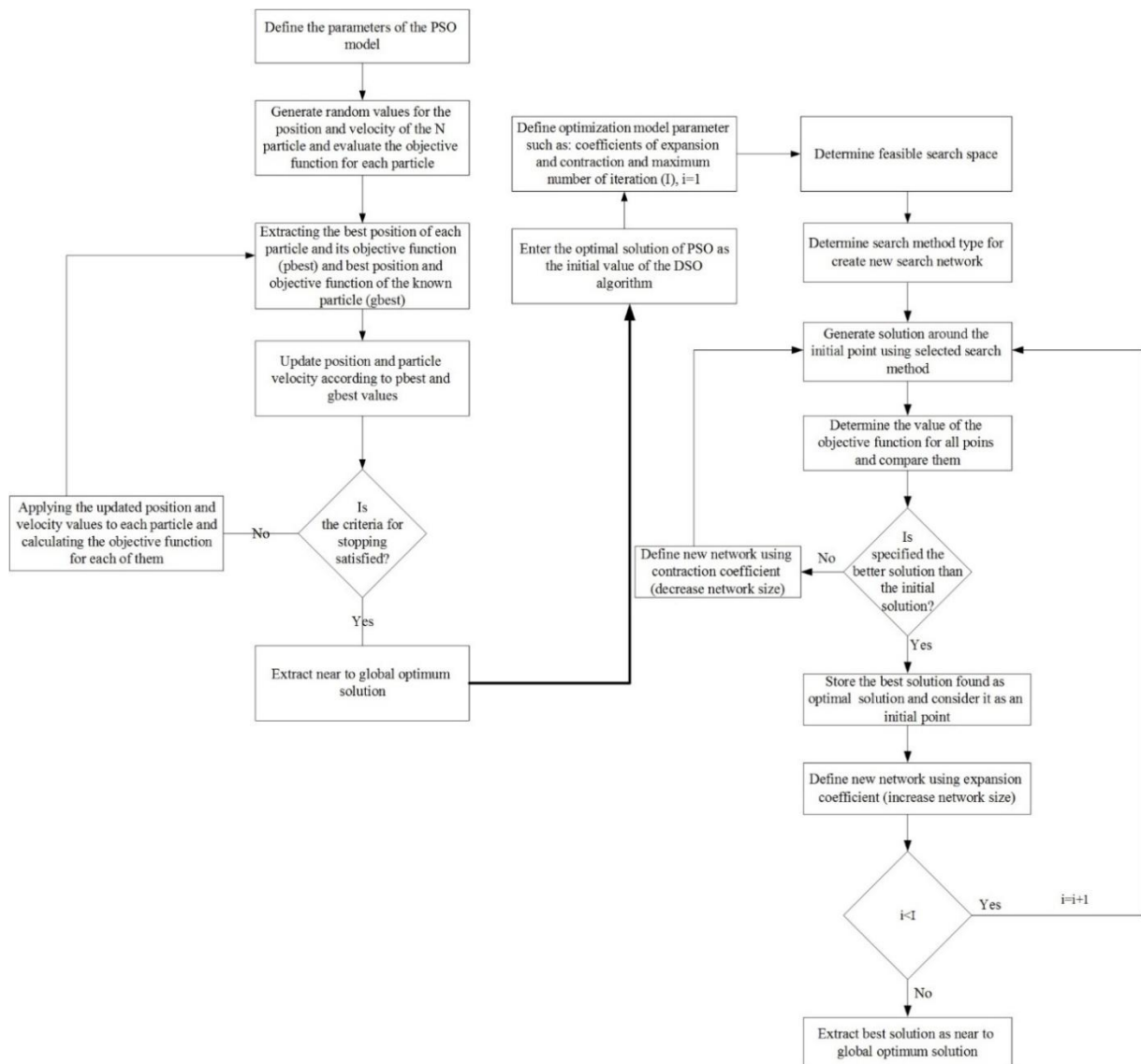


Fig. 1- The proposed structure of hybrid PSO and DSO algorithms  
 شکل ۱- ساختار پیشنهادی هیبرید الگوریتم‌های PSO و DSO

### ۳-۱- مطالعه‌ی موردی اول- هیدروگراف با یک دبی اوج صاف (SSPH)<sup>۹</sup>

اولین مطالعه‌ی موردی هیدروگراف ورودی و خروجی مربوط به مطالعات گزارش شده توسط Wilson (1974) می‌باشد. داده‌های گزارش شده توسط این محقق برای یک نسبت غیرخطی دبی و ذخیره وزنی است و در اکثر مطالعات قبلی برای بازبینی روش‌های مختلف برآورد پارامتر مدل‌های مختلف ماسکینگام غیرخطی (به‌خصوص مدل NL3) استفاده شده است (Yoon and Padmanabhan, 1993; Mohan, 1997). تعداد گام‌های زمانی و طول هر گام زمانی در داده‌های گزارش شده توسط Wilson (1974) برابر با ۶ ساعت و  $\Delta t = 6 \text{ hour}$  و  $N = 21$  می‌باشد.

برای ارزیابی و آزمایش کارایی هر روش و مدل روندیابی لازم است که از مطالعات موردی و داده‌های موجود از این مطالعات بهره برد.

به علت اینکه در مطالعات و مقالات متعددی از دو هیدروگراف با یک دبی اوج صاف و هیدروگراف تک‌اوجهی ناصاف استفاده شده است، لذا در مطالعه‌ی حاضر هم از این دو هیدروگراف جهت پیشبرد اهداف روندیابی استفاده می‌شود (Al-Humoud and Ismail, 2006; Bozorg Easa, 2015; Latt, 2015; Barati, 2013; Das, 2009; Haddad et al., 2015). همچنین جهت ارزیابی رویکرد توسعه داده شده، از هیدروگراف سیل واقعی مرتبط با رودخانه کارون به عنوان هیدروگراف دارای چند دبی اوجه استفاده گردید. در ادامه این سه هیدروگراف به طور کامل به همراه تمام جزئیات شرح داده خواهد شد.

شده انطباق خوبی با هیدروگراف اندازه‌گیری شده دارد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که مدل NL6 با دقت بالایی دبی اوج هیدروگراف خروجی را محاسبه می‌کند، که یک امر از اهمیت بالایی در روندیابی هیدروگراف سیلاب برخوردار می‌باشد.

### ۳-۲- مطالعه‌ی موردی دوم- هیدروگراف تک‌اوجه ناصاف (NSPH) ۱۰

دومین مطالعه‌ی موردی سیلی است که در رودخانه‌ی Wye در بریتانیا (NERC, 1975) اتفاق افتاده است. گستره‌ی ۶۹/۷۵ کیلومتری رودخانه‌ی Wye از Erwood تا Belmont است که بدون انشعاب بوده و دارای جریان ورودی بسیار کوچکی است. بنابراین این سیل یک مورد آزمایشی خوب برای آزمایش روش‌های روندیابی است (Bajracharya and Barry, 1997).

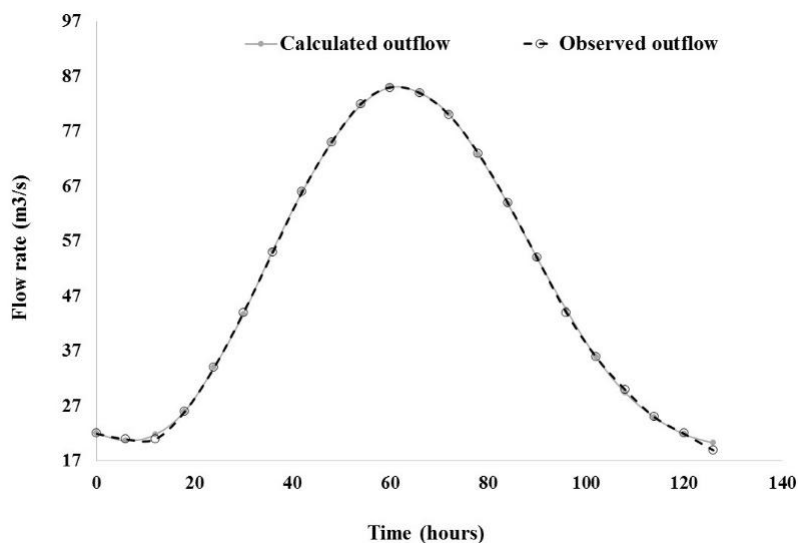
با استفاده از داده‌های ذکر شده از مطالعه‌ی موردی اول و اعمال رویکرد پیشنهادی، مقادیر بهینه هشت پارامتر مرتبط با مدل NL6 به صورت مقایسه‌ای با سایر مدل‌های مرتبط با مطالعات قبلی در جدول ۱ ارائه گردید. این جدول شامل روش‌های بهینه‌سازی استفاده شده، مقادیر پارامترهای بهینه و مقادیر شاخص‌های ارزیابی خطا جهت مقایسه‌ی مدل‌ها می‌باشد. مطابق این جدول می‌توان دریافت که 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 می‌نماید.

نتایج مقایسه‌ی هیدروگراف‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده‌ی با استفاده از مدل NL6 برای مطالعه‌ی موردی اول در شکل ۲ آورده شده است. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که هیدروگراف محاسبه

**Table 1- Comparison of the optimal parameter values of the proposed model with other nonlinear Muskingum models (first case study)**

جدول ۱- مقایسه مقادیر بهینه‌ی پارامترهای مدل پیشنهادی با سایر مدل‌های موجود غیرخطی ماسکینگام (مطالعه‌ی موردی اول)

Model	Optimization Algorithm	Optimized hydrologic parameter in nonlinear Muskingum models									Objective Functions		
		K	X	$\alpha$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\beta$	$C_1$	$C_2$	$\gamma$	SSQ	SAD	DPO
NL1	EV-GRG	0.461	0.229	1.5	-	-	-	-	-	-	258.45	58.25	1.85
NL2	EV-GRG	0.271	0.0003	-	3.042	1.568	-	-	-	-	184.32	32.18	0.55
NL3	HS-BFGS	0.086	0.278	-	-	-	1.868	-	-	-	36.77	23.47	0.9
NL4	GA-GRG	0.834	0.296	0.43	-	-	4.079	-	-	-	7.67	10.31	0.31
NL5	SFLA-NMS	0.478	0.088	-	0.696	0.425	3.82	0.619	0.735	-	5.44	6.69	0.05
NL6	PSO-DSO	0.497	0.876	-	0.703	0.425	3.82	0.593	0.73	0.92	3.21	5.25	0.025



**Fig. 2- Comparison of the measured and calculated hydrographs obtained with the proposed NL6 model (first case study)**

شکل ۲- مقایسه‌ی هیدروگراف اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده‌ی بدست آمده با مدل NL6 (مطالعه موردی اول)

نتایج مقایسه‌ی هیدروگراف‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده‌ی با استفاده از مدل NL6 برای مطالعه‌ی موردی دوم در شکل ۳ آورده شده است. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که هیدروگراف محاسبه‌شده انطباق خوبی با هیدروگراف اندازه‌گیری شده دارد. در واقع در تمامی نقاط اندازه‌گیری شده، انطباق خوبی صورت گرفته و تنها در نقطه‌ی اوج هیدروگراف خروجی اختلافی مشاهده می‌شود که در مقایسه با مدل‌های قبلی این اختلاف کمتر می‌باشد.

### ۳-۳- مطالعه‌ی موردی سوم- هیدروگراف دارای دبی چنداوجه (MPH)<sup>۱۱</sup>

سومین مطالعه‌ی موردی مرتبط با سیل رودخانه کارون، به عنوان سیل واقعی، است که در ۱۶ اسفند سال ۶۶ رخ داده است. اطلاعات مرتبط با هیدروگراف این سیل در ایستگاه‌های هیدرومتری گذار (هیدروگراف ورودی) و گتوند (هیدروگراف خروجی) ثبت شده است. اطلاعات سیل مذکور به مدت ۹۲ ساعت و در بازه‌های زمانی دو ساعته مورد

در ابتدا این سیل توسط O'Donnell et al. (1998) با یک مدل ماسکینگام خطی مورد بررسی قرار داده شد. این سیل به داده‌های گزارش شده توسط Wilson (1974) شبیه است، چرا که یک ارتباط غیرخطی بین جریان و حجم ذخیره نشان می‌دهد. این مطالعه موردی شامل  $\Delta t$  برابر با ۶ ساعت و  $N = 33$  می‌باشد.

جهت ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی تدوین شده، نتایج حاصل از مدل‌های NL3، NL4، NL5 و NL6، بدست آمده از مطالعات قبلی و مدل NL6 برای توابع هدف مختلف محاسبه و در قالب جدول ۲ ارائه گردید. این جدول شامل نوع مدل، روش بهینه‌سازی، پارامترهای هیدرولوژیک بهینه شده و مقادیر شاخص‌های ارزیابی خطا می‌باشد. مطابق این جدول، کمترین مقدار شاخص‌های ارزیابی خطا در SSQ و SAD مربوط به مدل NL6 می‌باشد. کمترین مقدار DPO نیز مربوط به مدل NL6 و NL5 است. بر این اساس می‌توان استنباط نمود که مدل NL6 برای هیدروگراف‌های تک اوجهی ناصاف نیز عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهد.

Table 2- Comparison of the optimal parameter values of the proposed model with other nonlinear Muskingum models (second case study)

جدول ۲- مقایسه مقادیر بهینه‌ی پارامترهای مدل پیشنهادی با سایر مدل‌های موجود غیرخطی ماسکینگام (مطالعه‌ی موردی دوم)

Model	Optimization Algorithm	Optimized hydrologic parameter in nonlinear Muskingum models										Objective Functions		
		K	X	$\alpha$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\beta$	$C_1$	$C_2$	$\gamma$	SSQ	SAD	DPO	
NL3	GRG	0.076	0.415	-	-	-	1.59	-	-	-	34789.4	739	90	
NL4	GA-GRG	0.437	0.404	1.197	-	-	1.33	-	-	-	32299.2	743.3	76	
NL5	SFLA-NMS	0.6	0.609	-	1.06	1.16	1.39	0.96	1.02	-	30894.4	731.7	72	
NL6	PSO-DSO	0.6	0.496	-	1.06	1.16	1.39	1.23	0.774	0.95	30812.1	725.79	72.33	

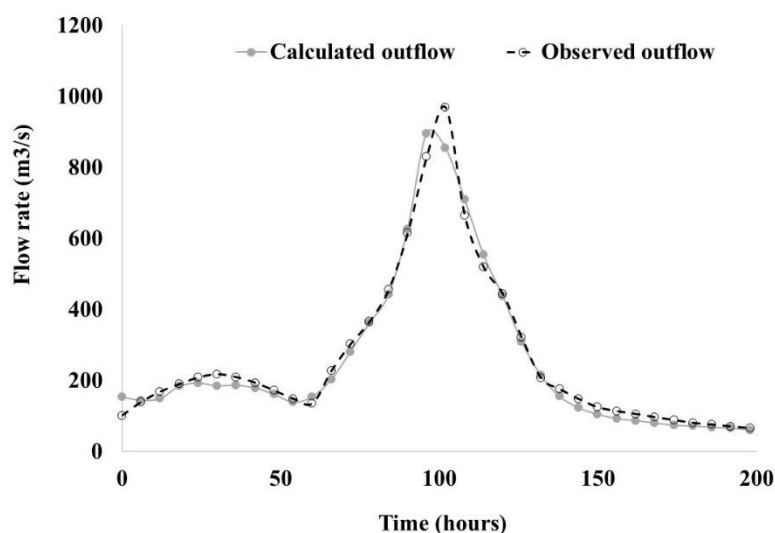


Fig. 3- Comparison of the measured and calculated hydrographs obtained with the proposed NL6 model (second case study)

شکل ۳- مقایسه‌ی هیدروگراف اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده‌ی بدست آمده با مدل NL6 (مطالعه موردی دوم)



نقاط انطباق خوبی مشاهده می‌شود و تنها در نقاط معدودی اختلافاتی وجود دارد. در نقاط اوج هم تقریباً انطباق خوبی صورت گرفته است.

#### ۴- جمع‌بندی

با توجه به اهمیت روندیابی سیلاب و گستره فراوان استفاده از روش ماسکینگام خطی و غیرخطی برای برآورد هیدروگراف خروجی سیلاب، تاکنون مطالعات زیادی در خصوص افزایش دقت مدل غیرخطی ماسکینگام صورت گرفته است. بر این اساس روابط متفاوتی با تعداد پارامترهای مختلف در رابطه ذخیره مدل غیرخطی پیشنهاد گردید. از آنجا که در مطالعات قبلی، همچنان خطای هیدروگراف خروجی به خصوص برای هیدروگراف‌های چنداوجه نسبتاً بالا برآورد شده بود، لذا در این مطالعه مدل ۸ پارامتره غیرخطی ماسکینگام تحت عنوان مدل NL6 جهت بهبود هیدروگراف خروجی محاسباتی پیشنهاد گردید. در این مدل، پارامتر  $\gamma$  به عنوان ضریب تعیین‌کننده‌ی خطی و غیرخطی بودن هیدروگراف خروجی در رابطه‌ی ذخیره‌ی اولیه لحاظ شد.

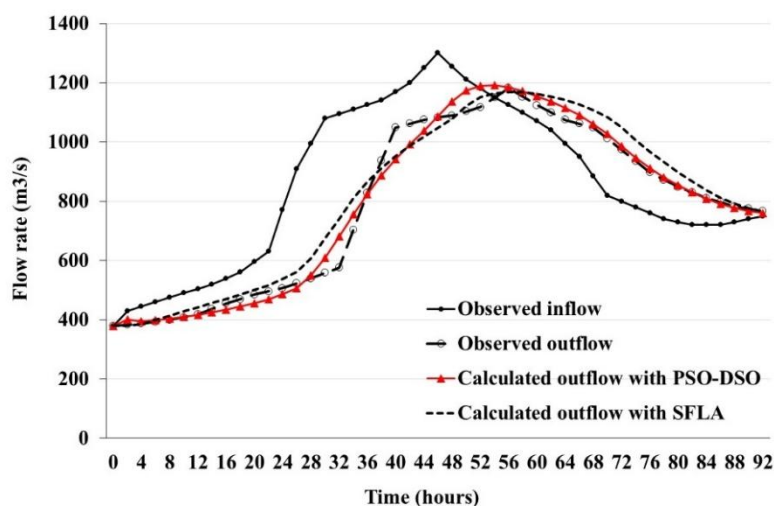
اندازه‌گیری قرار گرفته است (Orouji et al., 2013). با توجه به هیدروگراف ورودی و خروجی این سیل، نتایج مدل پیشنهادی با نتایج موجود سایر مدل‌ها به صورت جدول ۳ مقایسه گردید. همان‌طور که از این جدول برمی‌آید عملکرد مدل پیشنهادی (NL6) نسبت بسیار بهتر و دقیق‌تر است. این مدل دارای کمترین مقدار برای تمامی شاخص‌های ارزیابی خطا می‌باشد به طوری که اختلاف این مقادیر با مقادیر شاخص‌های ارزیابی خطا مربوط به مطالعه Orouji et al. (2013) بسیار فاحش است. بر این اساس شاخص خطای SSQ با کاهش ۵۳ درصدی نسبت به آخرین مطالعه صورت گرفته بر روی این هیدروگراف سیل به مقدار  $61390.2/2$  رسیده است. بنابراین می‌توان بیان نمود که مدل پیشنهادی برای هیدروگراف‌های دارای دبی چند اوجه عملکرد خوبی دارد و در مقایسه با سایر مدل‌های ماسکینگام غیرخطی دقیق‌تر عمل می‌نماید.

برای مقایسه‌ی هیدروگراف اندازه‌گیری‌شده و هیدروگراف خروجی محاسبه‌شده‌ی مطالعه‌ی موردی سوم که از مدل NL6 بدست آمد، شکل ۴ ترسیم گردید. همان‌طور که از شکل دریافت می‌شود در بیشتر

**Table 3- Comparison of the optimal parameter values of the proposed model with other Muskingum models (third case study)**

جدول ۳- مقایسه مقادیر بهینه‌ی پارامترهای مدل پیشنهادی با سایر مدل‌های موجود ماسکینگام (مطالعه‌ی موردی سوم)

Model	Optimization Algorithm	Optimized hydrologic parameter in nonlinear Muskingum models									Objective Functions		
		K	X	$\alpha$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\beta$	$C_1$	$C_2$	$\gamma$	SSQ	SAD	DPO
NL3	SFLA	0.1466	0.2449	1.5	-	-	-	-	-	-	130928.65	1835.63	14.6
NL6	PSO-DSO	0.6804	0.7643	-	0.0045	0.0959	4.88	9.78	4.289	1.0047	61390.2	1182.6	9.3



**Fig. 4- Comparison of the measured and calculated hydrographs obtained with the proposed NL6 model (third case study)**

شکل ۴- مقایسه‌ی هیدروگراف اندازه‌گیری‌شده و هیدروگراف محاسبه‌شده‌ی بدست آمده با مدل NL6 (مطالعه موردی سوم)



Iran-Water Resources Research 7(3):62-74 (In Persian)

Al-Humoud JM, Ismail IE (2006) Approximate methods for the estimation of muskingum flood routing parameters. *Water Resources Management* 20(6):979-990

Bajracharya K, Barry DA (1997) Accuracy criteria for linearized diffusion wave flood routing. *Journal of Hydrology* 195(1-4):200-217

Barati R (2011) Parameter estimation of nonlinear muskingum models using the nelder-mead simplex algorithm. *Journal of Hydrologic Engineering* 16(11):946-954

Barati R (2013) Application of excel solver for parameter estimation of the nonlinear muskingum models. *KSCE Journal of Civil Engineering* 17(5):1139-1148

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

Chow VT (1959) *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill, New York. 680p

Chow VT, Maidment D, Mays L (1988) *Applied hydrology*. McGraw-Hill, New York, 572p

Chu HJ, Chang LC (2009) Applying particle swarm optimization to parameter estimation of the nonlinear muskingum model. *Journal of Hydrologic Engineering ASCE* 14(9):1024-1027

Cunge JA, Holly FM, Verwey A (1980) *Practical aspects of computational river hydraulics*. Pitman Publishing Limited, London, 420p

Das A (2009) Reverse stream flow routing by using muskingum models. *Sādhanā* 34(3):483-499

Das A, (2004) Parameter estimation for muskingum models. *Journal of Irrigation Drainage Engineering* 130(2):140-147

Easa SM (2013) New and improved four parameter nonlinear muskingum model. *Proceeding of the Institution of Civil Engineering-Water Management* 167(5):288-298

Easa SM (2015) Evaluation of nonlinear muskingum model with continuous and discontinuous exponent parameters. *KSCE Journal of Civil Engineering* 19(7):2281-2290

Fotuhi M, Maghrebi MF (2011) The Impact of effective parameters on muskingum-cunge in comparison with dynamic routing. *Iran-Water Resources Research* 7(1):26-37

با اعمال رویکرد پیشنهادی بر روی سه مطالعه موردی حاوی هیدروگراف‌های تک و چندوجه و بهینه نمودن پارامترهای مدل غیرخطی توسط هیبرید الگوریتم‌های فراکاوشی PSO و DSO (تهیه شده در محیط MATLAB2016a)، نتایج هیدروگراف خروجی محاسبه و با سایر مدل‌های موجود مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد که اگر هیدروگراف خروجی دارای دبی تک اوجه باشد، معمولاً مقدار  $\gamma$  کمتر از یک و اگر دارای دبی چند اوجه باشد مقدار  $\gamma$  بیشتر از یک خواهد بود. همچنین بر مبنای مقادیر بهینه پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام و هیدروگراف‌های خروجی محاسبه شده بر اساس آن، برای هر سه مطالعه‌ی موردی، مقدار تمامی توابع هدف مورد بررسی (SSQ، SAD و DPO) به صورت چشمگیری نسبت به سایر مدل‌های موجود کاهش یافته و مقادیر دبی خروجی روندیابی شده بهبود یافته و به مقادیر واقعی نزدیک‌تر شدند. این کاهش خطا برای توابع هدف SSQ، SAD و DPO و برای مطالعه موردی اول به ترتیب ۴۱، ۲۱/۵ و ۵۰ درصد و برای مطالعه موردی سوم و توابع هدف SSQ و SAD به ترتیب ۵۳ و ۳۵/۶ درصد می‌باشد. با توجه به نتایج حاصله می‌توان بیان نمود که ساختار پیشنهادی مدل غیرخطی ماسکینگام به همراه هیبرید الگوریتم‌های فراکاوشی می‌تواند روندیابی مناسب‌تری از هیدروگراف‌های خروجی تک و چند اوجه را بر اساس هیدروگراف‌های سیل ورودی ارائه نماید. بر این اساس رویکرد این مطالعه می‌تواند به عنوان راهنمای مناسبی برای روندیابی سیل در رودخانه‌هایی که دبی اندازه‌گیری شده آن‌ها به صورت طبیعی بوده و دستخوش برداشت‌های مصنوعی نمی‌باشد، مورد استفاده قرار گیرد.

## پی‌نوشت‌ها

- 1- Non-Linear 1
- 2- Phenomenon-Mimicking Algorithms
- 3- Direct Search Optimization
- 4- Particle Swarm Optimization
- 5- Sum of Squared Deviations Between Observed and Computed Outflows
- 6- Sum of the Absolute Deviations Between Observed and Computed Outflows
- 7- Deviations of Peak of Routed and Observed Outflows
- 8- Near to Global Solution
- 9- Smooth Single Peak Hydrograph
- 10- Non-Smooth Single Peak Hydrograph
- 11- Multiple-Peak Hydrograph

## ۵- مراجع

Akbari GH, Barati R, Hosseinneshad AR (2011) Analysis for the different schemes of the muskingum-cunge method in the natural waterways.

- Natural Environment Research Council (NERC) (1975) Flood studies report. vol III, Institute of Hydrology, Wallingford
- O'Donnell T, Pearson CP, Woods RA (1988) Improved fitting for the three parameter muskingum procedure. *Journal of Hydrologic Engineering* 114(5):516–528
- Orouji H, Bozorg Haddad O, Fallah-Mehdipour E, Marino MA (2013) Estimation of muskingum parameter by meta-heuristic algorithms. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water Management* 166(WM6):315-324
- Samani H MV, Shamsipour GA (2004) Hydrologic flood routing in branched river systems via nonlinear optimization. *Journal of Hydraulical Researches* 24(1):55–59
- Tewelde MH, Smithers JC (2006) Flood routing in ungauged catchments using muskingum methods. *Journal of Water South Africa* 32(3):379–388
- Wilson EM (1974) *Engineering Hydrology*. MacMillan Education Ltd, Hampshire Management 167(5):288–298
- Yoon J, Padmanabhan G (1993) Parameter estimation of linear and nonlinear muskingum models. *Journal of Water Resources Planning Management* 199(5):600–610
- Garcia ES, Loáiciga HA (2013) Sea-level rise and flooding in coastal riverine floodplains. *Hydrologic Science Journal* 59(1):1–17
- 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 ZW (2014) Issues in optimal parameter estimation for the nonlinear muskingum flood routing model. *Engineering Optimization* 46(3):328-339
- Gill MA (1978) Flood routing by muskingum method. *Journal of Hydrologic* 36(3–4):353–363
- Latt ZZ (2015) Application of feedforward artificial neural network in muskingum flood routing: a black-box forecasting approach for a natural river system. *Water Resources Management* 29(14):4995-5014
- Mohammad Rezapour Tabari M (2016) Prediction of river runoff using fuzzy theory and direct search optimization algorithm coupled model. *Arabian Journal for Science and Engineering* 41:4039–4051
- Mohan S (1997) Parameter estimation of nonlinear muskingum models using genetic algorithm. *Journal of Hydraulic Engineering* 123(2):137–142