



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۲ | شماره ۱۰ | دی ۱۴۰۰ (ص ۲۷۰۷-۲۶۹۳)

<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2021.329243.669051>

(مقاله علمی - پژوهشی)

River Flood Routing Using the Multi-Reach Linear Muskingum Approach and Marine Predators Algorithm

ALI RAEISI^{1*}, SAEDEH IZADI¹

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
(Received: Aug. 30, 2021- Revised: Oct. 11, 2021- Accepted: Oct. 16, 2021)

ABSTRACT

Flood routing is an essential and fundamental issue in water resources management and flood control engineering. The Muskingum model is one of the well-known and the most widely used hydrological flood routing approaches. In addition to reasonable accuracy, the linear Muskingum model is also simpler and has a lower cost than that of hydraulic and nonlinear Muskingum models. In this study, a multi-reach linear Muskingum method considering lateral flow is proposed to increase the accuracy and efficiency of the current version of the Muskingum model. To the aim, the river path is divided into a finite number of sub-intervals, and the Muskingum model is then separately applied to each sub-interval successively; in such a way that the input flood hydrograph for each sub-interval is indeed the same as the output flood hydrograph from Muskingum calculations in the previous sub-interval. Here, besides the parameters χ and k , α as lateral flow coefficient and n as the number of sub-intervals are also considered as decision variables where the Marine Predators Algorithm (MPA) was used to determine their optimized values. The results showed that the multi-reach approach increased the accuracy of the sum of squared deviation (SSQ) by 70 and 73 percent for Wilson data and Wye river flood, respectively, indicating a higher accuracy for the multi-reach version Muskingum compared to that of single-reach. In addition, the multi-reach Muskingum approach was tested on three flood events of Karun river, in which the calculated statistical criteria, all, show a high accuracy for the proposed method and the MPA.

Keywords: Flood Routing, Multi-Reach Linear Muskingum, Marine Predators Algorithm, Lateral Flow.

* Corresponding Author's Email: ali_raeisi@sku.ac.ir

روند یابی سیل با استفاده از روش ماسکینگام خطی چندبازه‌ای و الگوریتم شکارچیان دریایی

علی رئیسی^{۱*}، سعیده ایزدی^۱

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۶/۸ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۷/۱۹ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۷/۲۴)

چکیده

روندیابی سیل یکی از موضوعات مهم و اساسی در مدیریت سامانه‌های منابع آب و مهندسی کنترل سیل می‌باشد. مدل ماسکینگام از معروف‌ترین و پرکاربردترین روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی است. روش ماسکینگام خطی، علاوه بر اینکه از دقت مناسبی برخوردار است، نسبت به روش‌های هیدرولیکی و روش‌های ماسکینگام غیرخطی ساده‌تر و کم هزینه‌تر است. در این تحقیق روش ماسکینگام خطی چندبازه‌ای با ملحوظ داشتن دبی جانبی به منظور افزایش دقت و کارایی محاسبات روش معمول ماسکینگام، معرفی و ارائه شده است. در این روش، رودخانه مورد بررسی به چند بازه کوچک‌تر تقسیم شده و سپس روندیابی ماسکینگام به صورت مجزا و پی‌درپی روی هر یک از بازه‌ها به گونه‌ای اجرا شد که هیدروگراف سیل ورودی در هر بازه همان هیدروگراف سیل خروجی حاصل از محاسبات ماسکینگام در بازه قبلی باشد. در این تحقیق علاوه بر متغیرهای X و k به‌عنوان پارامترهای تصمیم، متغیر α تحت عنوان ضریب دبی جانبی و متغیر r به‌عنوان تعداد بازه‌های تقسیم‌بندی، نیز در نظر گرفته شد که برای تعیین مقادیر بهینه آنها، الگوریتم بهینه‌سازی شکارچیان دریایی مورد استفاده قرار گرفت. به‌کارگیری روش مذکور، به ترتیب کاهش ۷۰ و ۷۳ درصدی مجموع مربع انحرافات (SSQ) بین جریان‌های خروجی مشاهده شده و محاسبه شده سیل‌های Wilson و رودخانه Wye را نسبت به حالت تک بازه‌ای به همراه داشته است، که حاکی از دقت بالای ماسکینگام چندبازه‌ای نسبت به نوع تک بازه‌ای است. علاوه بر این روش ماسکینگام چند بازه‌ای بر روی سه واقعه سیلاب رودخانه کارون مورد ارزیابی قرار گرفت، که معیارهای ارزیابی محاسبه شده همه نشان از دقت بسیار بالای روش مذکور و الگوریتم شکارچیان دریایی دارد.

واژه‌های کلیدی: روندیابی سیل، ماسکینگام خطی چندبازه‌ای، الگوریتم شکارچیان دریایی، دبی جانبی

مقدمه

سیل یکی از مخرب‌ترین پدیده‌های طبیعی در جهان است. جهت پیشگیری از خسارت‌های زیان‌بار ناشی از آن، پیش‌بینی چگونگی طغیان و فروکش کردن سیل در مقاطع مختلف رودخانه با استفاده از روش‌های روندیابی سیلاب و تحلیل هیدروگراف خروجی با استفاده از داده‌های دریافتی رودخانه از اهمیت خاصی برخوردار است. برای روندیابی سیل در رودخانه‌ها از دو روش کلی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. روش هیدرولیکی براساس حل عددی معادلات یک‌بعدی سنت و نانت حاکم بر جریان غیردائمی و غیریکنواخت تدریجی در مجاری روباز می‌باشد (Chagas & Souza, 2005). نتایج این روش قابل قبول بوده اما حاوی اطلاعات بسیار و محاسبات پیچیده است. از جمله اطلاعات وسیع مورد نیاز این روش‌ها می‌توان به اطلاعاتی نظیر شیب، توپوگرافی، تغییرات مسیر رودخانه، زبری و مشخصات مقاطع عرضی اشاره کرد. به‌منظور برطرف نمودن پیچیدگی و زمان‌بر بودن روش‌های هیدرولیکی، استفاده از روش‌های

هیدرولوژیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی از اصل پیوستگی جریان، رابطه دبی و ذخیره موقت آب در طول مسیر استفاده می‌شود. این روش‌ها در عین حال که ساده بوده، از دقت قابل قبولی نیز برخوردارند (Ponce & Lugo, 2001). مدل ماسکینگام از معروف‌ترین و پرکاربردترین روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی است (Akan, 2006). روش ماسکینگام اولین بار توسط McCarthy (1938) معرفی شد و سپس شکل غیرخطی آن توسط Gill (1978) ارائه گردید. در دهه‌های گذشته تحقیقات وسیعی در زمینه روندیابی سیل با استفاده از روش ماسکینگام صورت پذیرفته است. از جمله می‌توان به پژوهش‌های Yoon and Padmanabhan (1993) اشاره نمود که روش‌های متفاوتی برای محاسبه پارامترهای مدل ماسکینگام خطی و غیرخطی ارائه کردند. Mahmoudinia et al. (2014) نیز به مقایسه توابع هدف مختلف در تخمین پارامترهای بهینه ماسکینگام خطی و غیرخطی پرداختند که نتایج حاصل از به‌کارگیری توابع هدف مختلف، حاکی از تغییر نتایج و افزایش

که هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل توسعه یافته با اندازه‌گیری‌های صحرائی مطابقت دارند (Yang *et al.*, 2019). Norouzi and bazargan (2020) پارامترهای روش خطی را به جای استفاده از یک سیلاب اصلی با استفاده از محاسبات مربوط به دو سیل اساسی در قالب هشت مدل مختلف برای دستیابی به هیدروگراف پایین دست محاسبه کردند. نتایج نشان داد اگر به جای استفاده از پارامترهای روش خطی ماسکینگام یک سیل اساسی، از میانگین حسابی χ ، k و میانگین هندسی Δt مربوط به دو سیل اساسی استفاده شود، برآورد قسمت اوج هیدروگراف سیلاب پایین دست بالاترین میزان دقت را دارد. Hosseini (2009) در پژوهش خود پارامترهای مدل ماسکینگام را در یک زمان برای یک رودخانه خاص، ثابت فرض نمود و به منظور افزایش دقت نتایج، یک آبراهه را به چند بازه تقسیم و برای هر بازه، محاسبات مدل ماسکینگام را به صورت مجزا اجرا نمود. در آن پژوهش روندیابی سیلاب با استفاده از داده‌های Wilson به روش ماسکینگام چندبازه‌ای صورت پذیرفت و دقت آن با روش یک بازه‌ای ماسکینگام مقایسه شد که نتایج حاکی از کارایی بهتر روش پیشنهادی بود.

در چند دهه گذشته از الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی نظیر الگوریتم ژنتیک (GA)^۸، به منظور تخمین پارامترهای روش روندیابی ماسکینگام استفاده شده است. Mohan (1997) پیشنهادی مبنی بر استفاده از این الگوریتم برای برآورد پارامترهای ماسکینگام ارائه و تابع هدف را مجموع مربعات خطا (SSE)^۹ دبی محاسباتی و مشاهداتی در نظر گرفت. نتایج حاصل از تحقیق وی دستیابی به جوابی قابل قبول بدون نیاز به حدس اولیه با به کارگیری الگوریتم ژنتیک بود. Kim *et al.* (2001) برای محاسبه دقیق پارامترهای مدل ماسکینگام از الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA)^{۱۰} استفاده کردند که نتایج مربوط به دبی اوج محاسباتی منطبق بر مقادیر دبی اوج مشاهداتی و دقت روش نسبت به روش ژنتیک بیشتر بود (Kim *et al.*, 2001). Hosseini (2009) در تحقیق خود بهینه‌سازی پارامترهای روش ماسکینگام را به کمک نرم‌افزار اکسل و ابزار Solver پیشنهاد داد. وی اذعان داشت این ابزار قابلیت بسیار بالایی در بهینه‌سازی معادلات غیرخطی و پیچیده دارد و به همین دلیل انجام محاسبات مدل ماسکینگام به کمک اکسل نسبت به روش معمول گرافیکی و نیز

دقت محاسبات در شبیه‌سازی ماسکینگام خطی و عدم ایجاد تغییرات چشمگیر در شبیه‌سازی ماسکینگام غیرخطی است. روش ماسکینگام خطی، علاوه بر اینکه از دقت مناسبی برخوردار است، نسبت به روش‌های هیدرولیکی و روش‌های ماسکینگام غیرخطی ساده‌تر و کم هزینه‌تر نیز می‌باشد (Mahmoudinia *et al.*, 2014). از مزایای عمده روش ماسکینگام خطی نسبت به فرم غیرخطی آن، تعداد پارامترهای کم‌تر می‌باشد و بنابراین تخمین پارامترهای روش خطی به مراتب ساده‌تر از برآورد پارامترهای روش غیرخطی است. از آنجایی که پارامترهای مدل ماسکینگام با تجزیه و تحلیل داده‌های ورودی و خروجی برآورد می‌شوند، استفاده از مدل ماسکینگام خطی به کانال‌ها و رودخانه‌های فاقد ایستگاه اندازه‌گیری محدود شده است. از این رو برای رفع این مشکل Yoo *et al.* (2017) اذعان داشتند پارامترهای مدل ماسکینگام را می‌توان با استفاده از اطلاعات زمان تمرکز و ضریب ذخیره نمایانگر ورودی و خروجی کانال تخمین زد. در مثال یک کاربردی با داده‌های مشاهده شده از آزمایش تخلیه سد در حوضه رودخانه گوم^۱ کره^۲ نشان داده شد که با استفاده از این روش تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام بسیار نزدیک به روش مرسوم گرافیکی می‌باشد (Yoo *et al.*, 2017). نتایج بررسی دقت روش خطی ماسکینگام در مطالعه Bazargan and Norouzi (2018) در محدوده ایستگاه هیدرومتری ملاثانی^۳ و ایستگاه اهواز^۴ در بالادست و پایین‌دست رودخانه کارون^۵ نشان می‌دهد در صورتی که در روش ماسکینگام، سه مقدار متمایز به جای مقادیر ثابت χ ، k و Δt استفاده شود، دقت تخمین مقادیر محاسبه شده به ویژه در بخش اوج هیدروگراف افزایش خواهد یافت به طوری که میانگین خطای نسبی (MRE) در بخش اوج هیدروگراف هنگامی که پارامترها ثابت باشند به ۲/۴۴٪ و در حالت استفاده از سه مقدار مختلف برای این پارامترها، مقدار خطا به ۰/۸۹٪ رسیده است (Bazargan & Norouzi, 2018). Yang *et al.* (2019) آب آزاد شده از فرآیند ذوب پوشش یخ را به عنوان ورودی جانبی به جریان کانال در طی روند انتشار موج سیلاب از بالادست به پایین‌دست در نظر گرفته و مدلی برای فرآیند روندیابی سیلاب در طول دوره ذوب یخ رودخانه بر اساس روش هیدرولوژیکی ماسکینگام خطی ارائه نمودند. با استفاده از این مدل اصلاح شده، هیدروگراف خروجی در بازه بااوتو^۶ رودخانه زرد^۷ در طول دوره ذوب شدن یخ رودخانه، تعیین شد. نتایج نشان داد

7 Yellow River
8 Genetic Algorithm
9 Sum of Squared Error
10 Harmony Search Algorithm

1 Geum River
2 Korea
3 Mollasani
4 Ahvaz
5 Karoun
6 Baotou

هر زمان برقرار است:

$$\frac{ds}{dt} = (1 + \alpha)I_t - O_t \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$S_t = k[\chi(1 + \alpha)I_t + (1 - \chi)O_t]$$

در این معادلات S_t ، I_t و O_t به ترتیب نشان‌دهنده حجم ذخیره، دبی ورودی و دبی خروجی در زمان t است. k (برحسب ساعت) ضریب زمان-ذخیره برای رودخانه و بیان‌کننده زمان پیمایش رودخانه است. χ نیزفاکتور وزنی، بدون بعد و بیانگر اثر نسبی دبی‌های ورودی و خروجی سیل بر حجم ذخیره رودخانه است که معمولاً مقدار آن بین ۰ و ۰/۵ می‌باشد. α ضریب یا سهم دبی جانبی براساس هیدروگراف ورودی است که در طول مسیر به رودخانه اضافه و یا از آن خارج می‌شود. روندیابی با استفاده از معادله زیر صورت می‌پذیرد که با جایگزینی معادله (۲) در معادله (۱) بدست می‌آید:

$$O_t = C_1 I_t + C_2 I_{t-\Delta t} + C_3 O_{t-\Delta t} \quad (\text{رابطه ۲})$$

C_1 و C_2 و C_3 پارامترهای مدل ماسکینگام خطی‌اند که تابعی از k ، χ و Δt هستند:

$$C_1 = (1 + \alpha) \frac{-k\chi + 0.5\Delta t}{k - k\chi + 0.5\Delta t} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$C_2 = (1 + \alpha) \frac{k\chi + 0.5\Delta t}{k - k\chi + 0.5\Delta t} \quad (\text{ابطه ۴})$$

$$C_3 = \frac{k - k\chi - 0.5\Delta t}{k - k\chi + 0.5\Delta t} \quad (\text{رابطه ۵})$$

در روابط فوق I_t جریان ورودی در زمان t ، $I_{t-\Delta t}$ جریان ورودی در زمان $(t - \Delta t)$ و $O_{t-\Delta t}$ جریان خروجی در زمان $(t - \Delta t)$ می‌باشد و Δt طول هر گام زمانی است. با تعیین ضرایب C_i ($i = 1, 2, 3$) می‌توان از معادله (۳) به طور پی در پی برای یافتن جریان خروجی (O_t) در هر زمان استفاده کرد. استفاده از معادله (۳) به تخمین مقادیر صحیح χ و k در رودخانه بستگی دارد. برای تعیین پارامترهای روندیابی ماسکینگام، روش‌های مختلفی استفاده شده‌است. اگر روش ماسکینگام مربوط به مدل همرفت-انتشار باشد، می‌توان پارامترها را از نقطه نظر مشخصات هیدرولیکی و مورفولوژیکی کانال بیان کرد (Cunge, 1969). از طرف دیگر، اگر این روش به عنوان یک مدل جعبه سیاه در نظر گرفته‌شود، می‌توان پارامترهای آن را از طریق هیدروگراف‌های گذشته سیلاب از طریق دست‌یابی به روش کالیبراسیون تخمین زد. Singh (1988) مروری جامع در مورد روش‌های مختلف برای تعیین پارامترهای روندیابی ماسکینگام دارد. روش معمول و پیشنهادی تحقیق وی برای تعیین مقدار χ ، روش گرافیکی است. این روش شامل انتخاب χ ، در یک روش آزمون و خطا است، به این ترتیب که حلقه حاصل از نمودار S_t در مقابل $(1 - \chi)I_t +$

سایر روش‌های بهینه‌سازی از دقت و سرعت بیشتری برخوردار است. Karahan et al. (2013) با استفاده از ترکیب الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA) و روش شبه نیوتونی BFGS^۱، پارامترهای معادله ماسکینگام غیرخطی را در روندیابی سیلاب رودخانه ویلسون^۲ و وای^۳ برآورد کردند. آن‌ها نشان دادند که از بین دوازده روش مختلف، روش ترکیبی فوق عملکرد بهتری داشته است. Bozorg Haddad et al. (2015) ضمن ارائه یک مدل جدید ماسکینگام براساس معادله ذخیره‌سازی غیرخطی هفت پارامتری، به منظور برآورد پارامترهای مدل، ترکیبی از الگوریتم جهش قوریباغه ($SFLA$)^۴ و روش نلدر-مید یا سیمپلکس سراسیبی (NMS)^۵ را مورد استفاده قرار دادند. نتایج حاصل شده در مقایسه با سایر مدل‌های ماسکینگام و الگوریتم‌های بهینه‌سازی، بهبود عملکرد روش توصیف شده و الگوریتم مورد استفاده را نشان می‌دهد. Norouzi and bazrgan (2019) از روش ماسکینگام خطی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)^۶ به منظور محاسبه عمق سیلاب رودخانه‌ها استفاده کردند، نتایج حاصل شده حاکی از بر خورداری دقت مناسب الگوریتم به کارگرفته بود.

با توجه به مطالعات مختلف صورت گرفته، هدف اصلی مقاله حاضر تعیین تعداد بهینه بازه‌ها در روش ماسکینگام خطی چندبازه‌ای در رودخانه‌های مختلف بوده که برای اولین بار در تحقیق پیش رو مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور الگوریتم شکارچیان دریایی (MPA) برای تعیین تعداد زیربازه‌ها و پارامترهای مدل ماسکینگام مورد استفاده قرار گرفت که علاوه بر اینکه الگوریتم کاملاً جدید و قوی محسوب می‌شود، عملکرد آن در زمینه‌های مختلف مهندسی آب تاکنون مورد ارزیابی قرار نگرفته است. همچنین برای افزایش دقت روندیابی، ماسکینگام خطی براساس دبی جانبی مورد استفاده قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

روندیابی سیل براساس مدل ماسکینگام خطی

روش ماسکینگام دارای مبانی ساده‌ای است که در عین حال کاربرد فراوانی در مطالعات و تحقیقات مربوط به کنترل سیلاب رودخانه‌ها دارد. پایه و مبنای این روش رابطه پیوستگی می‌باشد که بیانگر تساوی تغییرات حجم ذخیره نسبت به زمان با تغییرات مقادیر جریان ورودی و خروجی است. در این مدل فرض می‌شود که رابطه خطی بین مقدار ذخیره و مقادیر ورودی و خروجی در

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (O_i^O - O_A^O)(O_i^C - O_A^C)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i^O - O_A^O)^2 \sum_{i=1}^N (O_i^C - O_A^C)^2}} \right]^2 \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i^C - O_i^O)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i^O - O_A^O)^2} \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$KG = 1 - \sqrt{(R-1)^2 + \left(\frac{\sigma^C}{\sigma^O} - 1\right)^2 + \left(\frac{O_A^C}{O_A^O} - 1\right)^2} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

در روابط فوق O_A^O و O_A^C به ترتیب میانگین داده‌های دبی خروجی مشاهداتی و محاسباتی، و σ^O و σ^C به ترتیب انحراف معیار داده‌های دبی خروجی مشاهداتی و محاسباتی است.

روندیابی چند بازه‌ای ماسکینگام

روش ماسکینگام چندبازه‌ای به منظور افزایش دقت و کارایی محاسبات روش معمول ماسکینگام معرفی و ارائه شده است. در این روش، رودخانه مورد بررسی به چند بازه کوچک‌تر تقسیم شده و سپس روندیابی ماسکینگام به صورت مجزا و پی‌درپی روی هر یک از بازه‌ها به گونه‌ای اجرا می‌شود که هیدروگراف سیل ورودی در هر بازه همان هیدروگراف سیل خروجی حاصل از محاسبات ماسکینگام در بازه قبلی باشد. به عبارت بهتر با فرض مقادیری ثابت برای پارامترهای α ، k و χ روندیابی ماسکینگام روی تمام بازه‌ها بدین‌گونه قابل پیاده‌سازی است: در بازه اول هیدروگراف ورودی که با I_t^1 نمایش داده می‌شود همان هیدروگراف سیل ورودی به رودخانه در نظر گرفته می‌شود، یعنی $I_t^1 = I_t$ با اعمال روش ماسکینگام براساس رابطه (۳) یک هیدروگراف خروجی برای بازه اول قابل محاسبه خواهد بود که آن را O_t^1 نامیده و از آن به عنوان ورودی بازه بعدی که همان بازه دوم خواهد بود، استفاده می‌شود. بنابراین برای بازه دوم می‌توان نوشت $I_t^2 = O_t^1$ حال که هیدروگراف سیل ورودی بازه دوم مشخص شده است می‌توان معادله (۳) را بار دیگر برای بازه دوم به کار گرفت و از خروجی آن (O_t^2) به عنوان هیدروگراف ورودی برای بازه بعدی یعنی بازه سوم استفاده نمود. بدیهی است با به کارگیری مجدد معادله مذکور، هیدروگراف سیل خروجی برای این بازه نیز محاسبه خواهد شد. مشاهده می‌شود در هر بار به کارگیری روندیابی ماسکینگام در هر یک از بازه‌ها، هیدروگراف خروجی هر بازه به عنوان هیدروگراف ورودی بازه بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد، بدین‌گونه این روند تکراری و پیاپی محاسبات روش ماسکینگام را می‌توان برای تمامی بازه‌های باقی‌مانده تا آخرین بازه (بازه r -ام) ادامه داد. در این صورت برای بازه آخر می‌توان نوشت $O_t^r = O_t^r$ که نهایتاً همان هیدروگراف مطلوب سیل خروجی

O_t (χ) تا حد ممکن به یک خط مستقیم نزدیک شود. شیب خط مستقیم، همان مقدار k را به دست می‌دهد (Vijay P. Singh, 1988). اگرچه این رویکرد برای دهه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است، اما این روش زمان‌بر و دارای دقت کمتری می‌باشد. Yoon and Padmanabhan (1994) با به حداقل رساندن انحراف داده‌ها از خط رگرسیون در صفحه جریان-ذخیره سازی، برای تخمین پارامترهای روندیابی χ و k برنامه رایانه‌ای تهیه کردند (Yoon & Padmanabhan, 1994). پارامترهای روندیابی، χ و k را می‌توان با به حداقل رساندن معادله (۵)، با اندازه‌گیری مستقیم تفاوت بین هیدروگراف‌های خروجی مشاهده‌شده و محاسبه‌شده نیز به دست آورد (Samani H MV, 2004). بدین صورت که برآورد پارامتر مساله روندیابی خطی ماسکینگام را می‌توان با بیان یک رابطه بهینه‌سازی حل کرد. هدف اصلی در این رابطه، به حداقل رساندن اختلاف بین مقادیر خروجی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده است. در اینجا نیز با در نظر گرفتن α ، k ، χ و r به عنوان متغیرهای تصمیم مساله، از معیار مجموع مربعات خطا (SSQ^1) بین مقادیر خروجی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده، به عنوان تابع هدف استفاده گردید. از نظر ریاضی، مقدار SSQ به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$SSQ = \sum_{i=1}^N (O_i^C - O_i^O)^2 \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن SSQ مجموع مربع انحرافات بین جریان‌های خروجی مشاهده شده و محاسبه شده، O_i^C و O_i^O به ترتیب دبی روندیابی شده و مشاهده شده در خروجی رودخانه و N نیز تعداد داده‌های ثبت شده می‌باشد. برای یافتن بهترین مقادیر α ، k ، χ و r باید در این موارد از تکنیک‌های بهینه‌سازی استفاده شود، که با در نظر گرفتن دامنه‌های معقول برای α ، k ، χ و r می‌توان قیودی را به روش بهینه‌سازی به منظور تسریع همگرایی آن اعمال کرد. در اینجا محدوده مورد استفاده برای هر یک از متغیرها در تمامی مسائل حل شده بدین شرح می‌باشد:

$$0 \leq \chi \leq 0.5, \quad 0 \leq k \leq 50, \quad -1 \leq \alpha \leq 1 \quad \text{و} \quad 1 \leq x \leq 10.$$

علاوه بر SSQ ، از معیارهای میانگین خطای نسبی^۲ (MRE)، ضریب تبیین^۳ (R^2)، ضریب کارایی ناش-ساتکلیف^۴ (NS) و ضریب کارایی کلینگ-گوپتا^۵ (KG) برای ارزیابی نتایج حاصل از روندیابی به ترتیب ذیل استفاده گردید:

$$MRE = 100 \times \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|O_i^C - O_i^O|}{O_i^O} \quad (\text{رابطه ۷})$$

۴ Nash-Sutcliffe (NS) efficiency

۵ Kling-Gupta (KG) efficiency

۱ Sum of Squared (SSQ) deviations

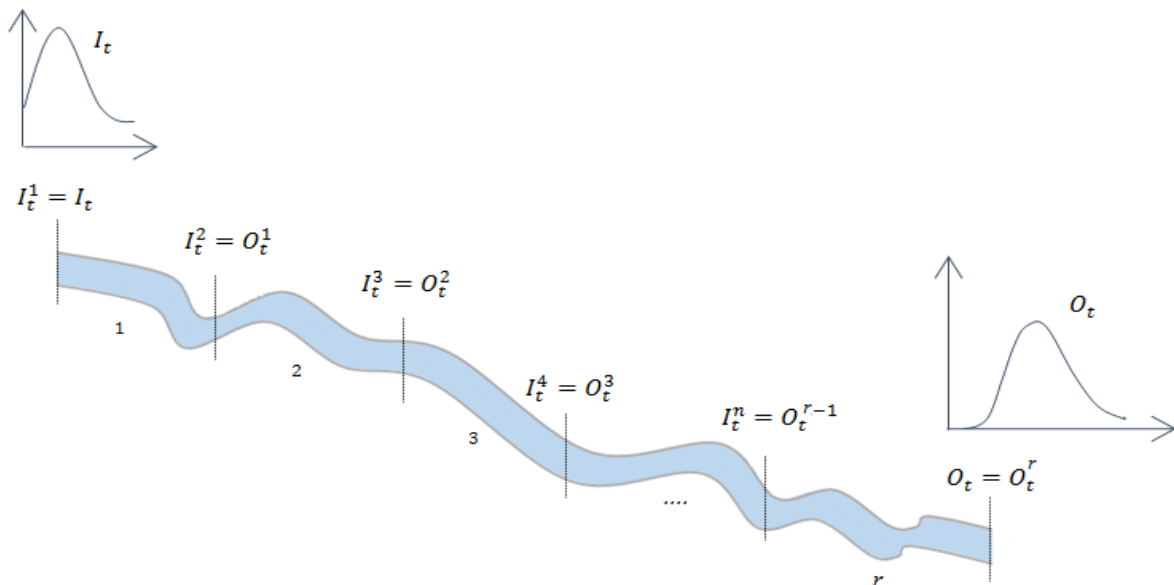
۲ Mean Relative Error (MRE)

۳ Coefficient of determination

مورفولوژی و هندسی همان رودخانه بستگی دارد، البته تفاوت در بزرگی سیل نیز می‌تواند اثر گذار باشد ولی در صورتی که سیل‌هایی با بزرگی نزدیک به هم رخ دهد، انتظار می‌رود نتایج تعداد بازه بهینه برای آن رودخانه مورد بررسی یکسان به دست آید. اما به‌طور قطع می‌توان گفت، این تقسیم‌بندی و نتایج حاصل از آن از یک رودخانه به رودخانه دیگر متفاوت خواهد بود. به عبارتی دیگر تعداد بازه بهینه برای یک رودخانه صرفاً برای همان رودخانه بهترین نتیجه را به دنبال خواهد داشت، حال آنکه ممکن است همین تعداد بازه برای رودخانه دیگری بهترین جواب ممکن نباشد. در نتیجه تعداد بازه اختصاص یافته برای رودخانه‌های متمایز، متفاوت بوده و از همین رو بهترین راه حل برای تقسیم بندی یک رودخانه به بازه‌های کوچک‌تر، استفاده از روش بهینه‌سازی است. در این تحقیق علاوه بر متغیرهای تصمیم X و k ، متغیرهای α و r به ترتیب برای تعیین مقدار دبی جانبی و تعداد بازه بهینه رودخانه‌های مورد بررسی با به کارگیری الگوریتم جدید شکارچیان دریایی اضافه شده است.

است. در شکل (۱) نمای ساده‌ای از تقسیم‌بندی یک آبراهه به چند بازه در روش ماسکینگام چندبازه‌ای نشان داده شده است. استفاده مکرر و پیاپی مدل ماسکینگام خطی باعث بهبود نتایج و کاهش خطای احتمالی خواهد شد. با مقایسه هیدروگراف خروجی حاصله با هیدروگراف خروجی ثبت شده می‌توان میزان خطا (اختلاف) به ازای پارامترهای مورد استفاده را محاسبه نمود و سپس با استفاده از بهینه‌سازی پارامترهای به کارگرفته در مدل ماسکینگام، خطای حاصل شده را به حداقل رساند.

سوالاتی که ممکن است در اینجا مطرح شود این است که در روندیابی چندبازه‌ای، تقسیم‌بندی رودخانه به چه تعداد بازه بهترین نتیجه ممکن را در برخواهد داشت؟ پاسخ به این سوال همان هدف مقاله حاضر (براساس روش بهینه‌سازی الگوریتم شکارچیان دریایی) را شکل می‌دهد. استفاده از روش سعی و خطا یکی از راه‌های پیشنهادی است که روشی زمان‌بر بوده و در نهایت نیز ممکن است به بهترین جواب منجر نشود. شایان ذکر است که تقسیم‌بندی رودخانه به چندین بازه، به شرایط



شکل ۱- تقسیم‌بندی سیستم اصلی رودخانه به بازه‌های کوچک‌تر در روش ماسکینگام چندبازه‌ای

الگوریتم‌های فرا-ابتکاری (MH)، براساس رویکرد جستجوی طعمه بنا نهاده شده است، الگوریتم شکارچیان دریایی نیز با کشف فضای جست‌وجو و به دست آوردن دامنه‌های تصادفی حل‌های اولیه شروع می‌شود. مطابق چارچوب اصلی الگوریتم مکان بعدی حل بر اساس مکان فعلی تعیین می‌گردد. شکارچیان

الگوریتم شکارچیان دریایی^۱ (MPA)

الگوریتم شکارچیان دریایی که به اختصار MPA نامیده می‌شود، یک الگوریتم فرا-ابتکاری (MH)^۲ است که الهام گرفته از استراتژی‌های حرکتی شکارچیان دریایی هنگام به دام انداختن طعمه خود در اقیانوس‌ها می‌باشد. همان‌طور که تمام رویکردهای

که طعمه‌ها برای تأمین غذای خود حرکتی بسیار سریع دارند. این مرحله از نظر ریاضی توسط معادله (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است (Faramarzi et al., 2020).

(رابطه ۱۴)

For $Iter < \frac{1}{3} Iter_{Max}$

Where, $\overrightarrow{stepsize}_i = \vec{R}_B \otimes (\overrightarrow{Elite}_i - \vec{R}_B \otimes \overrightarrow{prey}_i)$

$i = 1, 2, 3, \dots, n$

$\overrightarrow{prey}_i = \overrightarrow{prey}_i + P \cdot \vec{R} \otimes \overrightarrow{stepsize}_i$

\vec{R}_B طبیعتاً یک بردار تصادفی توزیع شده است که نمایانگر حرکت براونی است. علامت \otimes ضرایب بردار را مشخص می‌کند، P یک ضریب ثابت برابر با 0.5 بوده و \vec{R} یک بردار تصادفی یکنواخت در محدوده $[0, 1]$ است. $Iter_{Max}$ و $Iter$ نیز به ترتیب تعداد تکرارهای فعلی و تکرارهای حداکثر را مشخص می‌کنند.

مرحله دوم: مرحله گذار

در این مرحله، شکارچی و طعمه تقریباً با سرعت همسان حرکت می‌کنند. در این حالت طعمه (نیمی از جمعیت) مسئول بهره برداری بوده و اکتشاف به عهده شکارچی می‌باشد. معادلات (۱۵) و (۱۶) نشان دهنده نیمه اول جمعیت (بهره‌بردار) و معادلات (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) نمایانگر نیمه دیگر از جمعیت (مکتشف) به شرح زیر است (Faramarzi et al., 2020):

برای جمعیت مبتنی بر بهره‌بردار:

For $\frac{1}{3} Iter_{Max} < Iter < \frac{2}{3} Iter_{Max}$ (رابطه ۱۵)

(رابطه ۱۶)

Where, $\overrightarrow{stepsize}_i = \vec{R}_L \otimes (\overrightarrow{Elite}_i - \vec{R}_L \otimes \overrightarrow{prey}_i)$

$i = 1, 2, 3, \dots, n/2$

(رابطه ۱۷)

$\overrightarrow{prey}_i = \overrightarrow{prey}_i + P \cdot \vec{R} \otimes \overrightarrow{stepsize}_i$

\vec{R}_L برداری از اعداد تصادفی براساس توزیع لوی است.

برای جمعیت مبتنی بر اکتشاف:

(رابطه ۱۸)

Where, $\overrightarrow{stepsize}_i = \vec{R}_B \otimes (\vec{R}_B \otimes \overrightarrow{Elite}_i - \overrightarrow{prey}_i)$

$i = n/2, \dots, n$

(رابطه ۱۹)

$\overrightarrow{prey}_i = \overrightarrow{Elite}_i + P \cdot CF \otimes \overrightarrow{stepsize}_i$

(رابطه ۲۰)

$CF = (1 - \frac{Iter}{Iter_{Max}})^{(2 * \frac{Iter}{Iter_{Max}})}$

که در آن CF یک پارامتر تنظیم برای کنترل اندازه گام شکارچی است.

دریابی هنگام جستجوی طعمه‌های خود، بر اساس در دسترس بودن طعمه‌ها، بین دو استراتژی جستجوی لوی^۱ و براونیان^۲ تغییر وضعیت می‌دهند. در مناطقی که مجموعه طعمه‌های کم‌تری در دسترس است، شکارچیان از حرکت لوی استفاده می‌کنند. در حالی که حرکت براونیان در صورت وجود طعمه‌های فراوان به کار گرفته می‌شود (Faramarzi et al., 2020). راه حل‌های اولیه به دلخواه انتخاب می‌شوند و به روزرسانی‌های موقعیت با توجه به معادله (۱۰) انجام می‌شود:

(رابطه ۱۱)

$y_0 = y_{min} + rand * (y_{max} - y_{min})$

که در آن y_{min} و y_{max} به ترتیب محدوده بالا و پایین متغیر طراحی و $rand$ نیز یک بردار تصادفی در محدوده $[0, 1]$ است. در الگوریتم شکارچیان دریایی دو ماتریس اصلی وجود دارد، ماتریس مناسب‌ترین شکارچیان (Best/Elite) و ماتریس طعمه (Prey)، که در معادله (۱۱) و (۱۲) آورده شده است.

(رابطه ۱۲)

$$Elite = \begin{bmatrix} y_{11}^1 & y_{12}^1 & \dots & y_{1d}^1 \\ y_{21}^1 & y_{22}^1 & \dots & y_{2d}^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{n1}^1 & y_{n2}^1 & \dots & y_{nd}^1 \end{bmatrix}$$

که در آن y یک بردار از مناسب‌ترین شکارچیان است که n مرتبه برای سازماندهی ماتریس Elite تکرار می‌گردد. n و d به تعداد و ابعاد عوامل جستجو اشاره دارند. Elite پس از هر بار تکرار با جایگزینی شکارچیان بهتر به روز می‌شود. ماتریس Prey مبنایی^۱ شکارچیان موقعیت خود را به روز می‌کنند و ابعاد آن ... ماتریس Elite می‌باشد. ماتریس Prey به شرح زیر بیان می‌گردد:

(رابطه ۱۳)

$$Prey = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1d} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2d} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{n1} & y_{n2} & \dots & y_{nd} \end{bmatrix}$$

که در آن y_{ij} -j-امین بعد برای طعمه i -ام است. MPA

در هنگام جستجو از متغیرها و عملگرهای تصادفی بطور مکرر بهره می‌برد تا مانع از به دام افتادن الگوریتم در نقاط کمینه محلی^۳ گردد (Faramarzi et al., 2020).

مراحل مختلف الگوریتم شکارچیان دریایی (MPA)

مرحله اول: مرحله اکتشاف

در مرحله اکتشاف، سرعت طعمه بیش‌تر از سرعت شکارچی است، به طوری که نسبت سرعت از عدد ۱۰ بیش‌تر می‌باشد. این مرحله یک سوم اول تکرارها^۴ را به خود اختصاص می‌دهد. در این‌جا مناسب‌ترین شکارچیان به هیچ وجه حرکت نمی‌کنند، در حالی

محل‌ی هستند. برای جلوگیری از گرفتار شدن الگوریتم شکارچیان دریایی (MPA) در نقاط بهینه غیرعمومی، معادله (۲۲) اعمال می‌شود (Faramarzi et al., 2020).
(رابطه ۲۲)

$$\overrightarrow{prey}_i = \begin{cases} \overrightarrow{prey}_i + CF [\overrightarrow{y_{min}} + R \otimes (\overrightarrow{y_{max}} - \overrightarrow{y_{min}})] \otimes \vec{U} & \text{if } l \leq FAD \\ \overrightarrow{prey}_i + [FAD \times (1 - l) + l](\overrightarrow{prey}_{l1} - \overrightarrow{prey}_{l2}) & \text{if } l > FAD \end{cases}$$

که در آن بردار صفر و یک و $\overrightarrow{y_{min}}$ و $\overrightarrow{y_{max}}$ بردارهای مربوط حدود بالا و پایین مسأله هستند. اندیس‌های $l1$ و $l2$ نمایانگر شاخص‌های تصادفی ماتریس $prey$ هستند و FAD معمولاً مقدار 0.2 را نیز به خود اختصاص می‌دهد. به منظور تفهیم بهتر روش MPA در فلوجارت شکل (۲) ساختار الگوریتم پیشنهادی به تصویر کشیده شده است (Swief et al., 2021).

مرحله سوم: مرحله بهره‌برداری

در آخرین مرحله MPA، شکارچی با سرعت بیش‌تری نسبت به طعمه حرکت می‌کند. در این قسمت، مدل ریاضی براساس معادلات (۲۰) و (۲۱) بیان می‌شود (Faramarzi et al., 2020).

(رابطه ۲۱)

For $Iter > \frac{2}{3} Iter_{Max}$

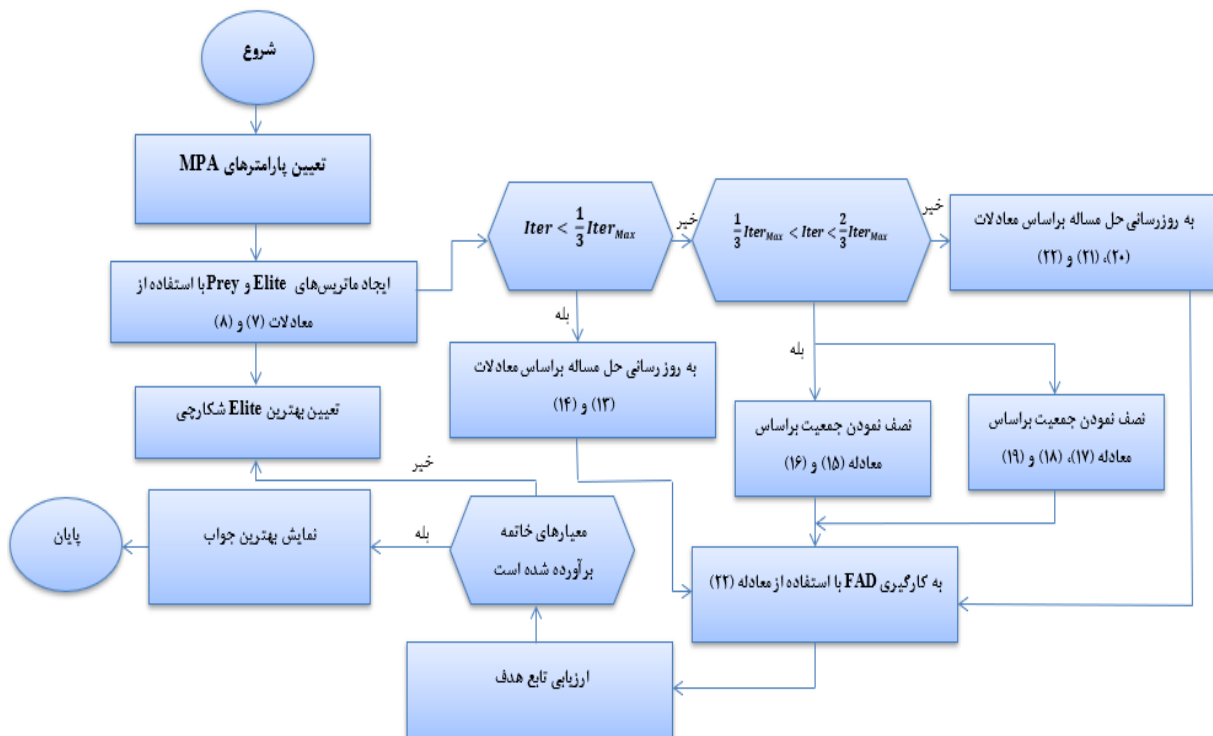
$\overrightarrow{stepsize}_i = \vec{R}_L \otimes (\vec{R}_L \otimes \overrightarrow{Elite}_i - \overrightarrow{prey}_i)$ Where,

$i = 1, 2, 3, \dots, n$

$\overrightarrow{prey}_i = \overrightarrow{Elite}_i + P.CF \otimes \overrightarrow{stepsize}_i$

فرار از نقاط کمینه محلی

در زندگی دریایی، تشکیل گرداب یا وجود ابزارهای تجمیع‌کننده ماهی‌ها (FADs) بر رفتار شکارچی دریایی تأثیر می‌گذارد. از نظر ریاضی، ابزارهای تجمیع‌کننده ماهی‌ها (FADs)، نقاط کمینه



شکل ۲- فلوجارت الگوریتم بهینه‌سازی شکارچیان دریایی (MPA) (Swief et al., 2021)

2013). این داده‌ها شامل هیدروگراف‌های ورودی و خروجی تک پیک با سهم جریان جانبی کم می‌باشد (Ayvaz & Gurarlan, 2017). داده‌های گزارش شده توسط این محقق برای یک نسبت غیرخطی دبی و ذخیره وزنی است و در اکثر مطالعات پیشین برای بازبینی روش‌های مختلف برآورد پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی استفاده شده است (Mohan, 1997). در داده‌های گزارش شده Wilson (1974) تعداد گام‌های زمانی برابر با ۲۱ و

نتایج و بحث

سیل Wilson

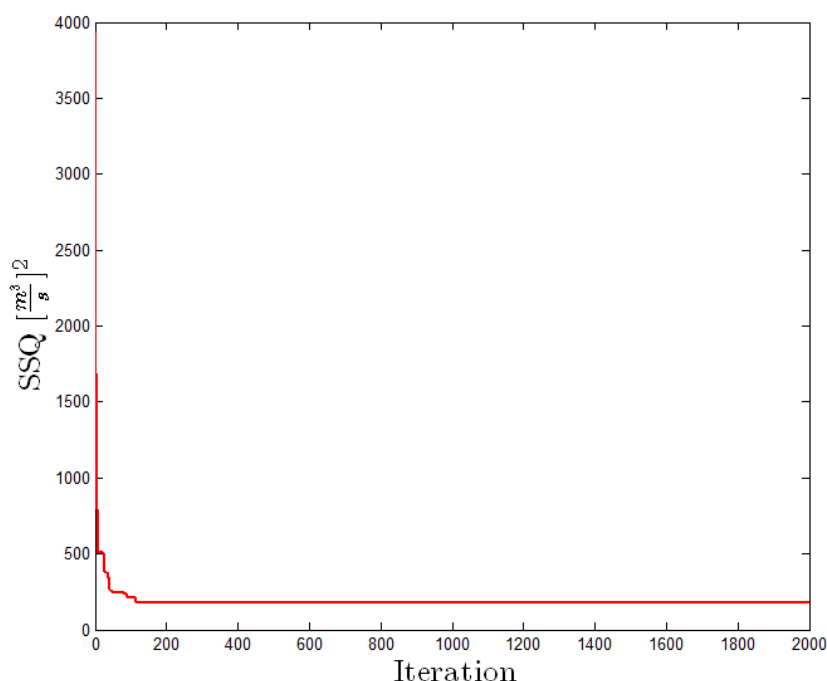
داده‌های Wilson (1974) یکی از مهم‌ترین داده‌هایی است که برای بسیاری از مطالعات روندیابی سیل به روش خطی و غیرخطی ماسکینگام استفاده شده و به طور گسترده‌ای در منابع علمی به عنوان یک مسأله معیار به کار گرفته شده است (Karahana et al.,

مطلب است که به‌کارگیری ماسکینگام چند بازه‌ای باعث بهبود نتایج تا حد زیادی شده است.

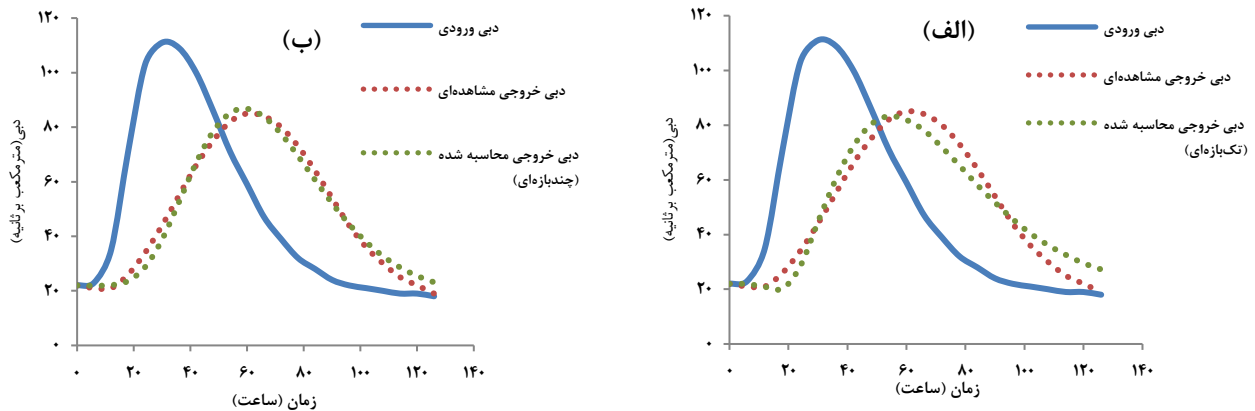
مقادیر بهینه χ ، k ، α برای هر دو حالت تک بازه‌ای و چندبازه‌ای و مقدار بهینه r برای حالت چند بازه‌ای در جدول (۲) آورده شده است. علاوه بر این نتایج برخی از تحقیقات مربوط به روندیابی ماسکینگام خطی توسط سایر محققین در جدول (۱) جهت مقایسه آورده شده است. مشاهده می‌شود برای حالت تک بازه‌ای کمترین مقدار SSQ به‌دست آمده مربوط به تحقیق حاضر می‌باشد. تنها تحقیق چندبازه‌ای انجام شده در تحقیقات گذشته مربوط به Hosseini (2009) است که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد بازه‌ها به هر تعداد (در اینجا تا ۵ بازه)، SSQ به‌طور مرتب تا مقدار $155 \left(m^3/s\right)^2$ کاهش پیدا کرده است، که دلیل آن، جایز بودن مقادیر منفی برای χ می‌باشد. مقدار χ در ماسکینگام خطی تعیین‌کننده سهم مشارکت دبی ورودی و خروجی در مقدار ذخیره است (رابطه ۲)، که مقدار معمول آن بین ۰ تا ۰/۵ می‌باشد (Bazargan & Norouzi, 2018; Norouzi & Bazargan, 2020)، از همین رو در اینجا استفاده از مقادیر منفی برای آن غیر قابل قبول در نظر گرفته شده است. بر این اساس مشاهده می‌شود که در تحقیق حاضر تعداد بازه بهینه برای سیل Wilson، ۳ به‌دست آمده، که مقدار SSQ حاصل در مقایسه با حالت ۳ بازه‌ای تحقیق Hosseini (2009) کمتر می‌باشد. نتایج فوق حاکی از عملکرد مناسب الگوریتم بهینه‌سازی شکارچیان دریایی و بکارگیری ایده چند بازه‌ای است.

طول هرگام زمانی برابر با شش ساعت می‌باشد ($N = 21$ و $\Delta t = 6$) (Tabari & Emami Dehcheshmeh, 2018).

در این قسمت روندیابی سیل بر اساس داده‌های مذکور و با اعمال رویکرد پیشنهادی به روش ماسکینگام خطی تک بازه‌ای و چند بازه‌ای صورت پذیرفته است. پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم شکارچیان دریایی عبارتند از: $p = 2$ و $FADs = 0.5$. پارامترهای ماسکینگام شامل χ ، k ، α و r با استفاده از الگوریتم شکارچیان دریایی تعیین شد که در شکل (۳) نحوه همگرایی الگوریتم به عنوان نمونه برای حالت چندبازه‌ای ارائه شده است. در شکل (۴) نتایج حاصل از روندیابی سیل به روش ماسکینگام خطی تک بازه‌ای و چندبازه‌ای برای داده‌های Wilson نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نمایان است مطابقت هیدروگراف سیل خروجی به‌دست آمده با هیدروگراف خروجی ثبت شده در حالت چندبازه‌ای نسبت به حالت تک‌بازه‌ای بهبود قابل توجهی یافته است. این موضوع را به‌طور کمی نیز از مقادیر بدست آمده برای SSQ در جدول (۱) می‌توان استنباط نمود. مجموع مربعات خطا برای حالت تک بازه $605/549 \left(m^3/s\right)^2$ به‌دست آمده در حالی که این معیار در ماسکینگام چندبازه‌ای به $180/316 \left(m^3/s\right)^2$ تقلیل یافته است که حدود ۷۰ درصد کاهش را نشان می‌دهد. این درحالی است که مجموع مربعات خطا برای نتایج اصلی Wilson که بر پایه حل روش ماسکینگام به کمک روش گرافیکی است حدود $1105 \left(m^3/s\right)^2$ می‌باشد. سایر معیارهای ارزیابی سیل روندیابی شده در جدول (۱) نیز گواه این



شکل ۳- فرایند بهینه‌سازی پارامترهای ماسکینگام چندبازه‌ای توسط الگوریتم شکارچیان دریایی



شکل ۴- نتایج روندیابی سیل ویلسون به کمک روش ماسکینگام خطی تک‌بازه‌ای (الف) و چندبازه‌ای (ب)

جدول ۱- معیارهای ارزیابی نتایج حاصل از روندیابی سیل در مقایسه با داده‌های مشاهداتی سیل Wilson

روش	SSQ	MRE	R ²	NS	KG
ماسکینگام خطی تک‌بازه‌ای (r = 1)	۶۰۵/۵۴۹	۱۱/۹۳	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۴
ماسکینگام خطی چندبازه‌ای (r = 3)	۱۸۰/۳۱۶	۶/۶۴	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸

جدول ۲- مقادیر بهینه پارامترهای مدل ماسکینگام خطی و نتایج حاصل شده در تعدادی از تحقیقات مربوط به سیل Wilson

تحقیق	روش بهینه‌سازی	x	k	α	تعداد بازه (f)	SSQ
(Wilson, 1974)	تجزیه رگرسیونی	۰/۲۵۰	۳۶/۰۰۰	-	۱	۱۱۰۴/۰۰۰
(O'donnell, 1985)	تجزیه رگرسیونی	۰/۲۵۰	۳۶/۰۰۰	-	۱	۱۱۰۴/۰۰۰
(Hosseini, 2009)	صفحه گسترده	۰/۲۲۱	۲۹/۱۶۵	-	۱	۶۰۶
(Hosseini, 2009)	صفحه گسترده	۰/۰۸۵	۱۳/۲۶۹	-	۲	۲۴۰
(Hosseini, 2009)	صفحه گسترده	-۰/۰۸۱	۸/۶۷۵	-	۳	۱۸۲
(Hosseini, 2009)	صفحه گسترده	-۰/۲۵۷	۶/۴۶۱	-	۴	۱۶۴
(Hosseini, 2009)	صفحه گسترده	-۰/۴۳۵	۵/۱۵۲	-	۵	۱۵۵
(Hasanpour & Sheykhali pour, 2014)	-	۰/۲۵	۲۹/۱۰۰	-	۱	۶۳۹/۹۹۰
(Mahmoudinia et al., 2014)	الگوریتم وراثتی	۰/۲۲۱	۲۹/۱۶۰	-	۱	۶۷۳/۱۸۶
(Oladghaffari et al., 2010)	سعی و خطا	۰/۲۱۸	۲۵/۳۹۴	-	۱	۸۰۵/۱۱۲
(Rahmani, 2017)	روش گرادیان کاهش یافته عمومی (حالت مقید)	۰/۲۶۱	۱۱/۹۷۷	-	۱	۱۴۵۷۳۵/۰۰۰
(Rahmani, 2017)	روش گرادیان کاهش یافته عمومی (حالت نامقید)	۰/۲۶۱	۱۱/۹۷۷	-	۱	۱۴۵۷۳۵/۰۰۰
(Rahmani, 2017)	الگوریتم تکاملی	۰/۲۶۱	۱۱/۹۷۷	-	۱	۱۴۵۷۳۵/۰۰۰
(Bayrami et al., 2019)	روش های عددی	۰/۱۱۸	۲۹/۱۴۷	-	۱	۶۰۵/۶۳۳
مطالعه حاضر (تک‌بازه‌ای)	الگوریتم شکارچیان دریایی	۰/۲۲۲	۲۹/۱۴۳	-۰/۰۰۱۴	۱	۶۰۵/۵۴۹
مطالعه حاضر (چندبازه‌ای)	الگوریتم شکارچیان دریایی	۰	۸/۶۳۲	-۰/۰۰۷	۳	۱۸۰/۳۱۶

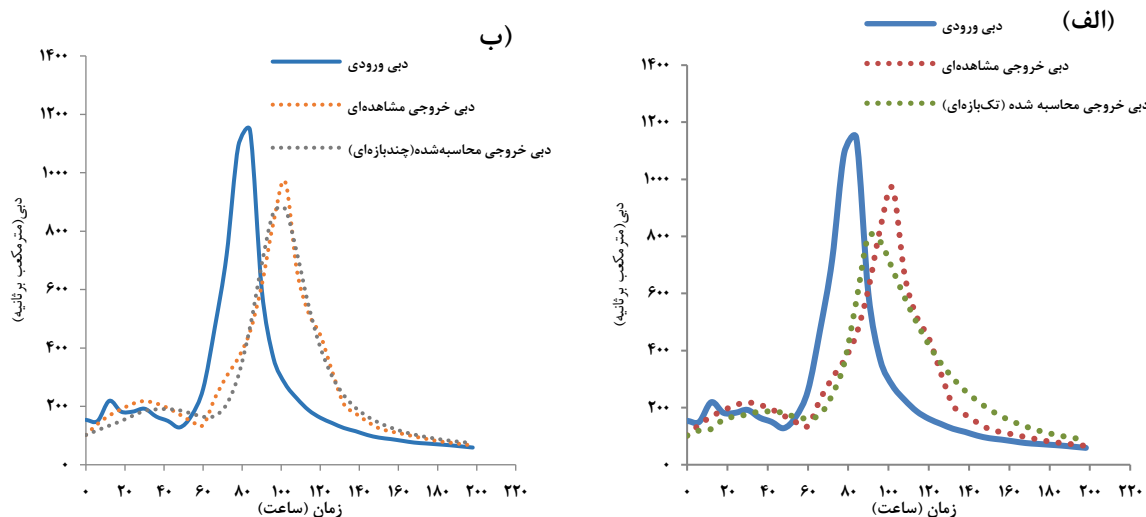
سیل رودخانه Wye

در این بخش سیلاب سال ۱۹۶۰ رودخانه Wye در انگلستان مورد بررسی قرار گرفت. این رویداد سیل نیز شبیه داده‌های ویلسون است (Barati, 2013). رودخانه Wye از ورود^۱ تا بلمونت^۲ ۶۹/۷۵ کیلومتر بدون هیچ گونه انشعاب و با ورودی جانبی محدود امتداد

دارد. این داده‌های سیل با استفاده از روش LMM-L با در نظر گرفتن جریان جانبی، توسط O'Donnell (1985) مدل‌سازی شد (Mohan, 1997; O'donnell, 198). در داده‌های گزارش شده Wye (1960) تعداد گام‌های زمانی برابر با ۳۳ و طول هر گام زمانی برابر با شش ساعت می‌باشد (N = 33 و Δt = 6).

نشان می‌دهد تابع هدف در حالت چند بازه‌ای حدوداً ۷۳ درصد نسبت به حالت تک بازه‌ای کاهش داشته است. در این مسأله نیز تعداد بازه بهینه در حالت چند بازه‌ای (مطابق جدول ۳) سه بازه به دست آمده است. سایر آماره‌های ارزیابی نتایج حاصل در جدول (۴) نیز حاکی از برتری کامل ماسکینگام چند بازه‌ای نسبت به ماسکینگام تک بازه‌ای است. در جدول (۳)، نتایج تحقیق O'donnell (1985) در مقایسه با تحقیق حاضر برای این مسأله ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود استفاده از الگوریتم شکارچیان دریایی در تخمین پارامترهای ماسکینگام و روش به کار رفته باعث بهبود نتایج به‌طور چشم‌گیری شده است.

پارامترهای مدل ماسکینگام تک بازه‌ای و چند بازه‌ای با استفاده از الگوریتم شکارچیان دریایی ($FAD = 0.3$ و $p = 1.5$) تعیین گردید. در شکل (۵) نتایج روندیابی سیلاب به روش ماسکینگام خطی تک بازه‌ای و چند بازه‌ای برای داده‌های رودخانه Wye نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در این مسأله نیز هیدروگراف روندیابی شده چندبازه‌ای نسبت به حالت تک بازه‌ای تطابق بیشتری با هیدروگراف مشاهداتی سیل خروجی دارد. مقادیر بهینه تابع هدف و پارامترهای χ , k , α و r نیز در جداول (۳) و (۴) نیز ارائه شده است. مشاهده می‌شود مجموع مربعات خطا (همان مقدار تابع هدف) برای حالت تک بازه‌ای و چند بازه‌ای به ترتیب $۱۸۴۴۶۷/۲۷۵$ و $۴۹۱۴۱/۳۹۲$ (m^3/s)² به دست آمده که



شکل ۵- نتایج روندیابی سیل Wye به کمک روش ماسکینگام خطی تک‌بازه‌ای (الف) و چندبازه‌ای (ب)

جدول ۳- مقادیر بهینه پارامترهای مدل ماسکینگام خطی و نتایج حاصل شده در تعدادی از تحقیقات مربوط به رودخانه Wye

تحقیق	روش بهینه‌سازی	x	k	α	تعداد بازه (n)	SSQ
(O'donnell, 1985)	تجزیه رگرسیونی	۰/۱۷۳	۳۰/۳۰۰	۰/۰۷۲	۱	۲۵۰۶۴۶/۰۰۰
مطالعه حاضر (تک بازه‌ای)	الگوریتم شکارچیان دریایی	۰/۲۵۲	۲۴/۲۵۰	۰/۰۶۶	۱	۱۸۴۴۶۷/۲۷۵
مطالعه حاضر (چند بازه‌ای)	الگوریتم شکارچیان دریایی	۰/۲۰۰	۶/۸۶۹	۰/۰۱۲	۳	۴۹۱۴۱/۳۹۲

جدول ۴- معیارهای ارزیابی نتایج حاصل از روندیابی سیل در مقایسه با داده‌های مشاهداتی سیل Wilson

روش	SSQ	MRE	R ²	NS	KG
ماسکینگام خطی تک بازه‌ای ($r = 1$)	۱۸۴۴۶۷/۲۷۵	۲۲/۷۸	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۹۰
ماسکینگام خطی چند بازه‌ای ($r = 3$)	۴۹۱۴۱/۳۹۲	۱۲/۰۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۸

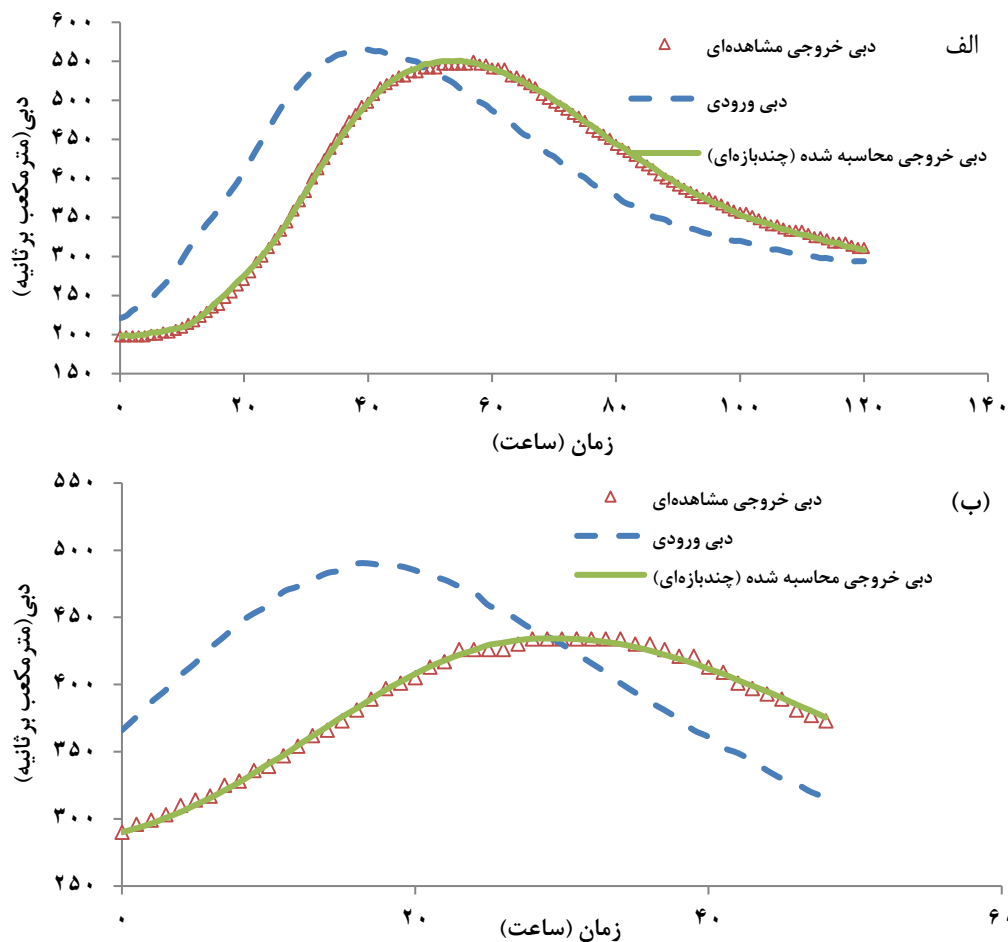
سیل کارون

سیل دوم ۳۱۶ تا ۴۹۰ و سیل سوم ۲۲۲ تا ۴۹۴ مترمکعب بر ثانیه است. با استفاده از بهینه‌سازی ابتدا پارامترهای χ , k , α و r برای رخدادهای سیل اول و دوم تعیین (مرحله واسنجی) و سپس از میانگین این پارامترها جهت روندیابی سیل سوم استفاده گردید (مرحله صحت‌سنجی). پس از اجرای الگوریتم شکارچیان دریایی

در این بخش داده‌های مربوط به سه واقعه سیل ثبت شده در رودخانه کارون، حد فاصل ایستگاه هیدرومتری ملاثانی تا ایستگاه آب‌سنجی اهواز به فاصله ۶۰/۵ کیلومتر مورد بررسی قرار گرفت. دامنه تغییرات دبی ورودی سیل اول بین مقادیر ۲۲۱ تا ۵۶۵،

Bazargan (2020) در جدول (۵) آورده شده است. مشاهده می‌شود میانگین خطای نسبی محاسبه شده (MRE) نسبت به تحقیق Norouzi and Bazargan (2020) بطور قابل ملاحظه‌ای برای هر دو رخداد کمتر آمده است و با توجه به این موضوع که نتایج هر دو تحقیق براساس یک بازه‌ای است، نشان از برتری الگوریتم شکارچیان دریایی (MPA) دارد. در شکل (۶) به مقایسه هیدروگراف خروجی محاسباتی با هیدروگراف خروجی مشاهداتی رخداد سیل اول و دوم پرداخته شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد هیدروگراف محاسباتی با هیدروگراف مشاهداتی تطابق بسیار زیادی دارد و در اینجا نیز دقت بالای محاسبات و بهینه‌سازی الگوریتم شکارچیان دریایی کاملاً مشهود است. سایر آماره‌های محاسبه شده در جدول (۷) نیز، حاکی از دقت بسیار بالای محاسبات روندیابی است.

(براساس ماسکینگام چند بازه‌ای) برای سیل اول و دوم مشاهده گردید که تعداد بازه بهینه (r) برای هر دو رخداد یک بازه به‌دست آمد و بنابراین نتایج ماسکینگام چندبازه‌ای و تک بازه‌ای یکسان است. این بدان معنی است که افزایش تعداد بازه‌ها به بیشتر از یک بازه، نه تنها دقت نتایج را افزایش نمی‌دهد بلکه موجب کاهش دقت نیز می‌گردد. همانطور که قبلاً نیز ذکر شد با توجه به اینکه بزرگی (دبی پیک) سیلاب‌ها به هم نزدیک می‌باشد، انتظار می‌رود تعداد بازه بهینه برای سیل اول و دوم یکسان به‌دست آید و از طرفی با توجه به یکنواختی تقریبی مشخصات هندسی و فیزیکی رودخانه در طول این مسیر و کوتاه بودن فاصله آن باز هم انتظار می‌رود تعداد بازه بهینه حداقل باشد که با نتیجه به‌دست آمده ($r = 1$) کاملاً هم‌خوانی دارد. پارامترهای حاصل از مرحله واسنجی برای رخدادهای اول و دوم شامل α ، k ، χ و r با استفاده از الگوریتم شکارچیان دریایی در مقایسه با تحقیق Norouzi and



شکل ۶- مقایسه هیدروگراف روندیابی شده سیل با هیدروگراف مشاهداتی برای رخدادهای اول (الف) و دوم (ب) سیل رودخانه کارون در مرحله واسنجی

گرفت. مقادیر این پارامترها در جدول (۶) آورده شده است. در شکل (۷) به مقایسه هیدروگراف سیل‌های خروجی محاسباتی و مشاهداتی رخداد سوم بصورت بصری پرداخته شده است.

در پایان به‌منظور صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده از مرحله قبل، میانگین حسابی پارامترهای حاصل در جدول (۵)، محاسبه و سپس برای روندیابی سیل سوم مورد استفاده قرار

این موضوع است، چرا که تمامی معیارهای به‌دست آمده در سطح عالی قرار دارد.

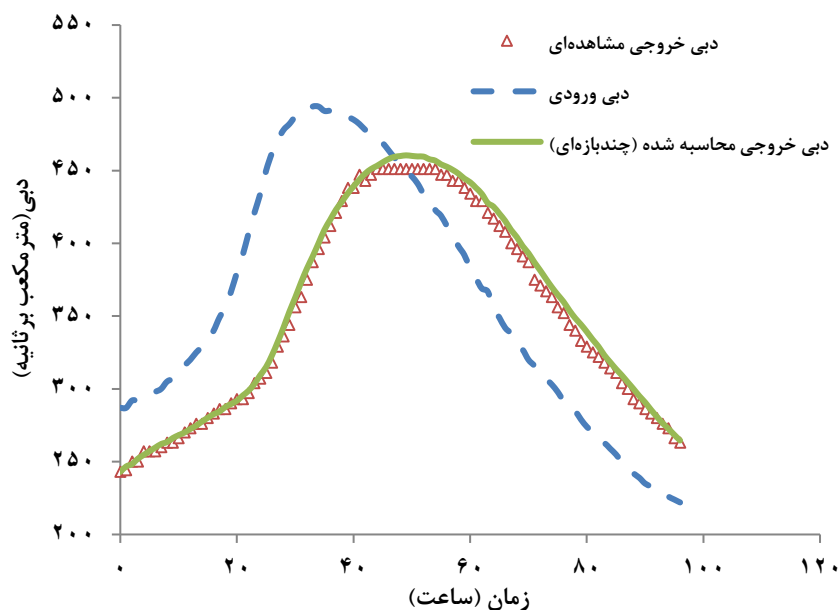
همان‌طور که مشاهده می‌شود تطابق بسیار زیادی میان هیدروگراف محاسباتی و هیدروگراف مشاهداتی وجود دارد. معیارهای ارزیابی محاسبه شده در جدول (۷) نیز تایید کننده

جدول ۵- مقادیر بهینه پارامترهای حاصل از مرحله واسنجی مدل ماسکینگام خطی در رودخانه کارون

رخداد	تحقیق	روش بهینه‌سازی	χ	k	α	تعداد بازه (r)	MRE(%)
سیل ۱	(Hadi Norouzi and Jalal bazargan, 2020)	PSO	۰/۴۰۱	۱۴/۷۰۹	-	۱	۴/۶۹
	مطالعه حاضر (چند بازه‌ای)	MPA	۰/۳۹۶	۱۳/۴۰۴	۰/۰۰۱	۱	۰/۶۵
سیل ۲	(Hadi Norouzi and Jalal bazargan, 2020)	PSO	۰/۰۷۸	۱۱/۹۵۷	-	۱	۵/۳۷
	مطالعه حاضر (چند بازه‌ای)	MPA	۰/۱۹۸	۱۴/۹۷۰	-۰/۰۳۸	۱	۰/۵۵

جدول ۶- مقادیر میانگین پارامترهای حاصل در مرحله واسنجی

نوع محاسبات	x	k	α	تعداد بازه (r)
میانگین حسابی پارامترها	۰/۳۹۷	۱۴/۱۸۷	-۰/۰۱۸۵	۱



شکل ۷- مقایسه هیدروگراف روندیابی شده با هیدروگراف مشاهداتی برای رخداد سوم سیل رودخانه کارون در مرحله صحت‌سنجی

جدول ۷- معیارهای ارزیابی نتایج حاصل از روندیابی سیل در مقایسه با داده‌های مشاهداتی (سیل‌های اول تا سوم رودخانه کارون)

رخداد	SSQ	MRE	R^2	NS	KG
سیل ۱ (واسنجی)	۱۱۰۶/۶۲۶	۰/۶۵	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
سیل ۲ (واسنجی)	۳۱۸/۶۹۷	۰/۵۵	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۹
سیل ۳ (صحت‌سنجی)	۳۳۷۶/۹۴۷	۱/۳۵	۱/۰۰	۰/۹۹	۰/۹۷

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، روندیابی سیل براساس دو روش ماسکینگام خطی تک بازه‌ای و چند بازه‌ای مورد مقایسه قرار گرفت. برای افزایش دقت روندیابی، دبی جانبی نیز در محاسبات دخیل داده شد. برای

تخمین پارامترهای ماسکینگام تک بازه‌ای و چند بازه‌ای از الگوریتم شکارچیان دریایی که یک الگوریتم جدید محسوب می‌شود، بهره گرفته شد. در روش چندبازه‌ای ماسکینگام، پارامتر r (=تعداد بازه) علاوه بر پارامترهای χ ، k و α با استفاده از روش

چندبازه‌ای نسبت به حالت تک بازه‌ای داشته است. مسأله سوم مورد استفاده خود شامل سه واقعه سیل ثبت شده در رودخانه کارون (حداصل ایستگاه‌های ملاتانی تا اهواز) می‌باشد. در این مسأله به منظور ارزیابی مدل ماسکینگام چندبازه‌ای، دو واقعه آن برای تخمین پارامترهای ماسکینگام شامل k ، α و r مورد استفاده قرار گرفت که در واقع مرحله واسنجی مدل مذکور را شکل می‌داد و برای صحت‌سنجی روش، از واقعه سوم سیل استفاده شد. میانگین پارامترهای بدست آمده سیل اول و دوم در مرحله واسنجی برای مرحله صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت. تطابق هیدروگراف‌های خروجی با داده‌های مشاهداتی و معیارهای ارزیابی محاسبه شده (هم در مرحله واسنجی و هم در مرحله صحت‌سنجی) همه حاکی از دقت بسیار بالای مدل ماسکینگام خطی و توانایی الگوریتم شکارچیان دریایی در یافتن مقادیر بهینه پارامترها دارد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

بهینه‌سازی مذکور تعیین شد که از جمله نوآوری‌های تحقیق حاضر محسوب می‌گردد. قابل ذکر است برای تمامی بازه‌ها (یا زیر بازه‌ها) مقادیر پارامترهای k ، α و r یکسان بوده و با تعیین تعداد بازه بهینه (r) که از مشخصه‌های رودخانه و بزرگی سیل است، می‌توان کارایی روش ماسکینگام خطی را تا حد زیادی افزایش داد. به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، از سه مسأله شامل سه رودخانه متفاوت استفاده شد. دو مسأله اول شامل دو مسأله معیار Wilson و رودخانه Wye می‌باشد که پس از اجرای مدل ماسکینگام تک بازه‌ای و چند بازه‌ای، نتایج آن‌ها مورد مقایسه قرار گرفت. برای هر دو مسأله مذکور تعداد بازه بهینه ۳ به دست آمد و نتایج ماسکینگام چندبازه‌ای براساس تعداد بازه بهینه باعث کاهش قابل ملاحظه مقدار SSQ نسبت به حالت تک بازه‌ای شد، به‌گونه‌ای که برای داده‌های Wilson و رودخانه Wye این میزان کاهش به ترتیب برابر ۷۰ و ۷۳ درصد بوده است. سایر معیارهای ارزیابی و همچنین تطابق بصری هیدروگراف‌های خروجی ثبت شده با محاسباتی نیز نشان از برتری قابل توجه ماسکینگام

REFERENCES

- Akan, O. (2006). Open Channel Hydraulics. In *Open Channel Hydraulics*.
- Ayvaz, M. T., & Gurarslan, G. (2017). A new partitioning approach for nonlinear Muskingum flood routing models with lateral flow contribution. *Journal of Hydrology*, 553, 142–159.
- Barati, R. (2013). Closure to "Parameter Estimation of Nonlinear Muskingum Models Using Nelder-Mead Simplex Algorithm" by Reza Barati. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(3), 367–370.
- Bayrami, M., Vatankhah, A., & Nazi Ghameshlou, A. (2019). Flood Routing using Muskingum Model with Fractional Derivative. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(7), 1667–1676. (In Farsi)
- Bazargan, J., & Norouzi, H. (2018). Investigation the Effect of Using Variable Values for the Parameters of the Linear Muskingum Method Using the Particle Swarm Algorithm (PSO). *Water Resources Management*, 32(14), 4763–4777.
- Chagas, P., & Souza, R. (2005). Solution of Sanin Venant's Equation to Study Flood in Rivers, through Numerical Methods. *Hydrology Days*, 55, 205–210.
- Cunge, J. A. (1969). On the subject of a flood propagation computation method (muskingum method). *Journal of Hydraulic Research*, 7(2), 205–230.
- Faramarzi, A., Heidarnejad, M., Mirjalili, S., & Gandomi, A. H. (2020). Marine Predators Algorithm: A nature-inspired metaheuristic. *Expert Systems with Applications*, 152, 113377.
- Hadi Norouzi and Jalal bazargan. (2020). Flood routing by linear Muskingum method using two basic floods data using particle swarm optimization (PSO) algorithm. 1897–1908.
- Hasanpour, F., & Sheykhalipour, Z. (2014). Comparison of the Artificial Intelligence Techniques and the Muskingum Methods in Flood Routing Estimation. (In Farsi)
- Hosseini, S. M. (2009). Application of spreadsheets in developing flexible multiple-reach and multiple-branch methods of Muskingum flood routing. *Computer Applications in Engineering Education*, 17(4), 448–454.
- Karahan, H., Gurarslan, G., & Geem, Z. W. (2013). Parameter Estimation of the Nonlinear Muskingum Flood-Routing Model Using a Hybrid Harmony Search Algorithm. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(3), 352–360.
- Kim, J. H., Geem, Z. W., & Kim, E. S. (2001). Parameter estimation of the nonlinear muskingum model using harmony search 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1131–1138.
- Mahmoudinia, S., Javan, M., & Eghbalzade, A. (2014). Comparison of different objective function on estimation of linear and non-linear Muskingum model optimum parameters. *WEJ*, 7(20), 29–42. http://wej.miau.ac.ir/article%7B%5C_%7D498.html
- Mohammad Rezapour Tabari, M., & Emami Dehcheshmeh, S. A. (2018). Development of Nonlinear Muskingum Model Using Evolutionary Algorithms Hybrid. *Iran-Water Resources Research*, 14(1), 160–167. http://iwrr.sinaweb.net/article%7B%5C_%7D513

33.html

- Mohan, S. (1997). Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using genetic algorithm. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(2), 137–142.
- Norouzi, H., & Bazargan, J. (2020). Flood routing by linear Muskingum method using two basic floods data using particle swarm optimization (PSO) algorithm. *Water Supply*, 20(5), 1897–1908.
- O'donnell, T. (1985). A direct three-parameter Muskingum procedure incorporating lateral inflow. *Hydrological Sciences Journal*, 30(4), 479–496.
- Oladghaffari, A., Fakheri-Fard, A., Nazemi, A. H., & Ghorbani, M. A. (2010). Hydraulic Flood Routing Using Dynamic Wave Method and Comparison with Linear and Nonlinear Hydrologic Muskingum Routing Methods (Case Study: Lighvan-Chai). *Water and Soil Science*, 20(3), 47–60.
- Ponce, V. M., & Lugo, A. (2001). Modeling looped ratings in Muskingum-Cunge routing. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(2), 119–124.
- Rahmani, M. (2017). Comparative evaluation of linear and nonlinear hydrological methods for river flood routing. University of Lamali Gorgani, Gorgan.
- Samani HMV, S. G. (2004). Hydrologic flood routing in branched river systems via nonlinear optimization. *Journal of Hydraulical Researches*, 24(1), 55–59.
- Swief, R. A., Hassan, N. M., Hasanien, H. M., Abdelaziz, A. Y., & Kamh, M. Z. (2021). Multi-Regional Optimal Power Flow Using Marine Predators Algorithm Considering Load and Generation Variability. *IEEE Access*, 9, 74600–74613.
- Vijay P. Singh. (1988). *hydrologic systems*.
- Yang, W., Wang, J., Sui, J., Zhang, F., & Zhang, B. (2019). A Modified Muskingum Flow Routing Model for Flood Wave Propagation during River Ice Thawing-Breakup Period.
- Yoo, C., Lee, J., & Lee, M. (n.d.). *Parameter Estimation of the Muskingum Channel Flood-Routing Model in Ungauged Channel Reaches*. 1–9.
- Yoon, J., & Padmanabhan, G. (1993). Parameter estimation of linear and nonlinear Muskingum models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119(5), 600-610.