

## بررسی انتخاب پارامترهای روندیابی متفاوت بر روی دقت روندیابی سیل در رودخانه‌ها با استفاده از روش ماسکینگام کانژ

هادی نوروزی<sup>۱</sup>، جلال بازرگان<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۵

### چکیده

روندیابی سیلاب فرآیندی است برای بدست آوردن هیدروگراف سیلاب در نقاطی از پایین دست که دارای اهمیت می‌باشد. روش ماسکینگام کانژ از جمله روش‌های روندیابی سیل می‌باشد. در پژوهش حاضر، به بررسی دقت روش ماسکینگام کانژ در حد فاصل ایستگاه هیدرومتری ملاثانی در بالادست و ایستگاه هیدرومتری اهواز در پایین دست رودخانه کارون پرداخته شده است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که؛ چنانچه به جای استفاده از مقدار ثابت برای پارامترهای روش ماسکینگام کانژ، از سه مقدار متفاوت برای آن‌ها استفاده شود و همچنین از روابط مربوط به موج یک طرفه (منوکلینال) جهت محاسبه سرعت موج سینماتیکی استفاده گردد، دقت روش ماسکینگام کانژ در برآورد هیدروگراف خروجی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در پژوهش حاضر، هیدروگراف ورودی به سه ناحیه‌ی شروع، اوج و پایان سیل تقسیم‌بندی شده و برای هر یک از سه ناحیه مذکور مقادیر متفاوتی برای پارامترهای روش ماسکینگام کانژ محاسبه شده است و همچنین با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) مقدار گام زمانی ( $\Delta t$ ) مربوط به سه ناحیه مذکور نیز بهینه‌یابی شده است که این کار باعث افزایش دقت روش ماسکینگام کانژ در برآورد هیدروگراف خروجی شده است. به طوری که میانگین خطای نسبی و خطای نسبی دبی اوج در حالت استفاده از روش معمول ماسکینگام کانژ با پارامترهای ثابت و گام زمانی ۱ ساعت به ترتیب برابر با ۶/۱۵ و ۷/۶۳ درصد محاسبه شده است، در حالی که مقادیر مذکور با استفاده از روش ارائه شده در پژوهش حاضر به ترتیب برابر با ۱/۶۹ و ۴/۰۹ درصد به دست آمده است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، پارامترهای روندیابی متفاوت، روش ماسکینگام کانژ، روندیابی سیلاب، موج یک طرفه (منوکلینال).

### مقدمه

Ponce et al (1996) روش ماسکینگام کانژ را مورد بررسی قرار داده و با توجه به اینکه تطابق زیادی بین نتایج محاسباتی و هیدروگراف‌های مشاهداتی وجود داشت، به این نتیجه رسیدند که؛ این روش کارایی بالایی در بین روش‌های روندیابی سیلاب دارد. Garbrecht and Brunner (1991) روش ماسکینگام کانژ با پارامترهای متغیر را درون شبکه‌های زهکشی بزرگ با مقاطع مرکب را بررسی کردند. Tang et al (1999) روش ماسکینگام کانژ با پارامترهای متغیر را مورد بررسی قرار داده و نتایج آنها بیانگر این است که در شیب‌های ملایم مقدار دبی بیشینه و زمان اوج هیدروگراف خروجی بیشتر از شیب‌های تند است. Ponce and Lugom (2001) روش ماسکینگام کانژ را با روش موج دینامیکی مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد که روش ماسکینگام کانژ از دقت مناسبی برخوردار است. Barry and Bajracharya (1995) علی‌رغم اینکه پارامترهای روندیابی روش ماسکینگام کانژ ( $X, K$ ) بدون توجه به

سیل می‌تواند خسارات فراوانی از نظر اقتصادی و جانی برای انسان‌ها ایجاد نماید. از این رو به دست آوردن اطلاعاتی دقیق از سیل جهت طراحی سازه‌های هیدرولیکی مقابله با آن، اهمیت فراوانی دارد. به طور کلی روش‌های روندیابی سیل را می‌توان به دو گروه روندیابی هیدرولیکی و روندیابی هیدرولوژیکی تقسیم کرد. روش ماسکینگام کانژ جمله روش‌های هیدرولوژیکی می‌باشد که به دلیل سادگی آن، کاربرد گسترده‌ای در روندیابی سیلاب دارد. (Ponce and Yevjevich., 1978; Tang et al., 1999; Todini, 2007) روش ماسکینگام کانژ با پارامترهای متغیر دو، سه و چهار نقطه‌ای را مورد بررسی قرار دادند.

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

(Email: jbazargan@znu.ac.ir

\*) نویسنده مسئول:

ورودی، خروجی و ماهیت موج به وجود آمده و تاثیر آنها در بهینه‌یابی پارامترهای روندیابی روش ماسکینگام کانژ پرداخته نشده‌است. در حالی که در پژوهش حاضر، با توجه به خصوصیات جریان، هیدروگراف ورودی به سه ناحیه تقسیم بندی شده و از آن‌جایی که پارامترهای روندیابی روش ماسکینگام کانژ (X, K) به مقادیر دبی ورودی و عمق آب ورودی بستگی دارد، برای هر یک از سه ناحیه مذکور مقادیر متفاوتی برای پارامترهای روندیابی (X, K) محاسبه شده‌است. همچنین با توجه به خصوصیات هندسی آبراهه مورد بررسی، موج به وجود آمده از نوع موج یک طرفه بوده و استفاده از روابط مربوط به موج یک طرفه جهت محاسبه سرعت موج سینماتیکی، دقت روش مذکور را افزایش داده‌است و همچنین مقدار گام زمانی ( $\Delta t$ ) نیز با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) بهینه‌یابی شده و با دو معیار معمول روش ماسکینگام کانژ نیز مقایسه شده‌است.

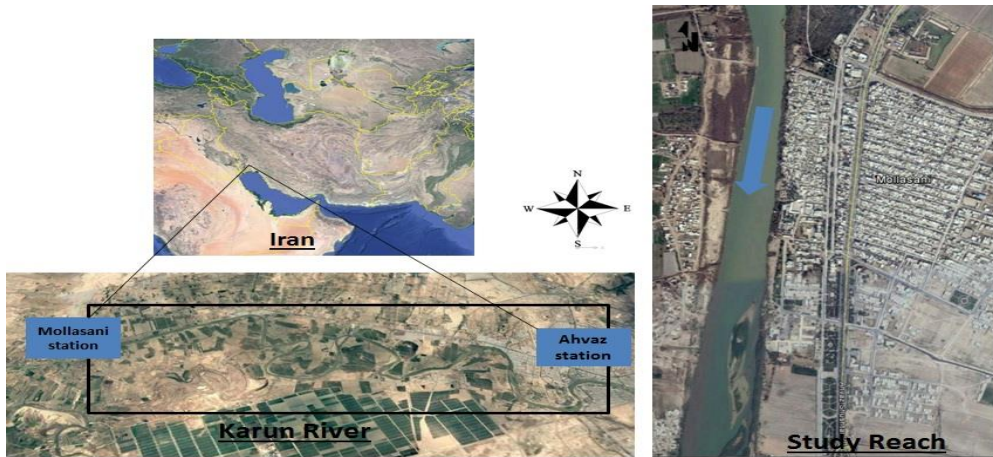
## مواد و روش‌ها

### معرفی محدوده مطالعاتی

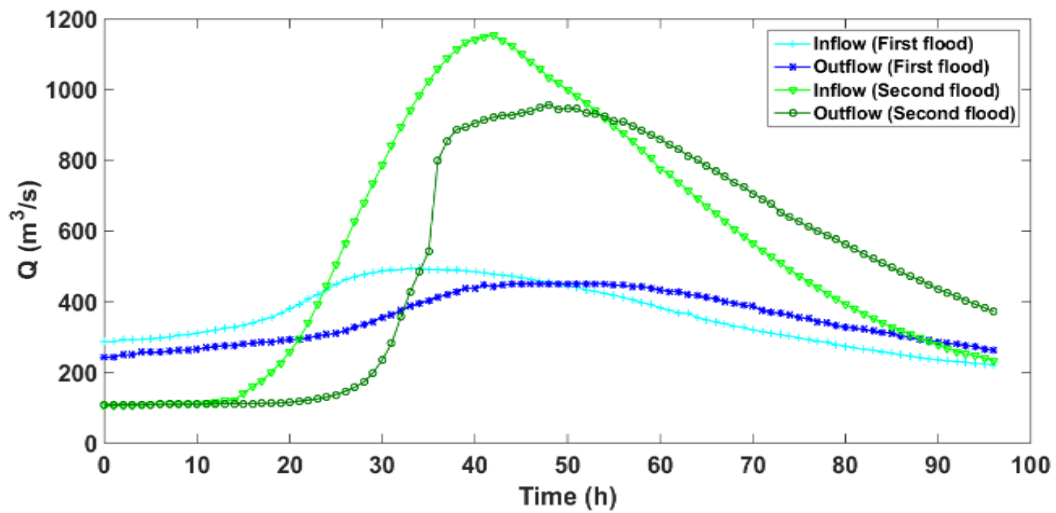
در پژوهش حاضر، از داده‌های ثبت شده مربوط به دو ایستگاه هیدرومتری ملاثانی و اهواز که به ترتیب در بالادست (Station no 21-307, 48°53' E, 31°35' N) و پایین دست (Station no 309, 48°40' E, 31°20' N) ایران می باشند، استفاده شده‌است (شکل ۱). از داده‌های سیل با دامنه تغییرات دبی ورودی ۲۲۲ الی ۴۹۴ ( $m^3/s$ ) (شکل ۲) و دامنه تغییرات عمق آب ورودی ۱/۳۲ الی ۲/۵۴ متر (شکل ۳) که مربوط به بازه مذکور بوده و در تاریخ ۱۳۹۰/۱۱/۱۳ الی ۱۳۹۰/۱۱/۱۶ (سیل اول) توسط واحد مطالعات مدیریت منابع آب ایران ثبت شده‌است، جهت بررسی روندیابی سیل به روش ماسکینگام کانژ استفاده شده‌است. همچنین از داده‌های سیل دیگری که در تاریخ ۱۳۸۷/۰۹/۱۰ الی ۱۳۸۷/۰۹/۱۳ (سیل دوم) در بازه مذکور رخ داده و دامنه تغییرات دبی ورودی آن ۱۰۵ الی ۱۱۵۴ ( $m^3/s$ ) (شکل ۲) و دامنه تغییرات عمق آب ورودی آن ۰/۸۲ الی ۴/۶۳ متر (شکل ۳) می‌باشد نیز در پژوهش حاضر استفاده شده‌است (جزئیات محاسبات مربوط به سیل اول در ادامه بیان شده‌است). فاصله دو ایستگاه هیدرومتری مذکور از یکدیگر برابر با ۶۰/۵ کیلومتر ( $\Delta x = 60.5 \text{ Km}$ )، شیب متوسط بازه (حداقل فاصله ایستگاه هیدرومتری ملاثانی تا ایستگاه هیدرومتری اهواز) ۰/۰۰۰۱۱ ( $S_0 = 0.00011$ ) و گام زمانی مربوط به ثبت داده‌های مشاهداتی در ایستگاه‌های هیدرومتری ۱ ساعت ( $\Delta t = 1 \text{ h}$ ) و زمان اوج هیدروگراف ورودی سیل اول برابر با ۳۳ ساعت می‌باشد. تمامی داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر، توسط واحد مطالعات مدیریت منابع آب ایران ثبت شده‌است. شایان ذکر است که دامنه تغییرات دبی ورودی و عرض فوقانی جریان در جدول (۲) درج شده‌است.

شرایط مرزی محاسبه می‌شوند، روش مذکور از دقت بالایی نیز برخوردار است. فتوحی و فغفور مغربی (۱۳۸۹) به بررسی روش روندیابی دینامیکی و روش ماسکینگام کانژ پرداخته‌اند. آنها در پژوهش خود نشان دادند که دو روش مذکور نتایج نزدیک به هم داشته و روش ماسکینگام کانژ در شرایطی که شیب آبراهه کم باشد نسبت به روندیابی دینامیکی از دقت کمتری برخوردار است. Ponce (1989) روش ماسکینگام کانژ در محدوده روندیابی امواج دیفیوژن که در آن علامتی از اثرات دینامیکی نظیر پس زدن آب مشاهده نمی‌شود، کارایی مناسبی دارد. در پژوهش‌های صورت گرفته توسط محققان بیان شده، (Ponce and Yevjevich, 1978; Barry and Bajracharya, 1995; Tang et al. 1999; Perumal and Sahoo, 2008; Reshma et al. 2010; Wang et al. 2018) بررسی روش ماسکینگام کانژ در کانال مصنوعی پرداخته شده‌است و نتایج آنها بیانگر دقت مناسب روش مذکور در روندیابی سیل می‌باشد. (Chu and Chang (2009) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) به بهینه‌یابی پارامترهای روش ماسکینگام غیرخطی پرداخته‌اند. مقایسه این الگوریتم با رگرسیون خطی، الگوریتم ژنتیک و چند روش دیگر بهینه‌یابی، بیانگر سرعت و دقت بالای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در برآورد پارامترهای روش ماسکینگام است. (Moghaddam et al (2016) یک مدل جدید که دارای چهار پارامتر می‌باشد را برای روش ماسکینگام غیر خطی ارائه کرده‌اند. مدل ارائه شده برای روندیابی چهار سیل مورد استفاده قرار گرفته و نتایج بیانگر آن است که الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) چهار پارامتر مدل ارائه شده را با دقت بالا و نرخ سریع همگرایی بهینه‌یابی کرده‌است. از مزیت‌های الگوریتم PSO، کدنویسی نسبتاً ساده و زمان محاسباتی کم آن است (Chau, 2007). به‌طور کلی، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) یک الگوریتم تکاملی مبتنی بر جمعیت است و در حال حاضر در مسائل بهینه‌سازی مهندسی عمران و مهندسی منابع آب مانند عملکرد مخزن (Nagesh Kumar and Janga Reddy, 2007)، مدیریت کنترل سیل (Meraji, 2004)، مدیریت کیفیت آب (Afshar et al. 2011; Lu et al. 2002; Chau) (2005) و بهینه‌یابی ضرایب روش ماسکینگام (Chu and Chang, 2009; Moghaddam et al. 2016; Bazargan and Norouzi, 2018) کاربرد دارد.

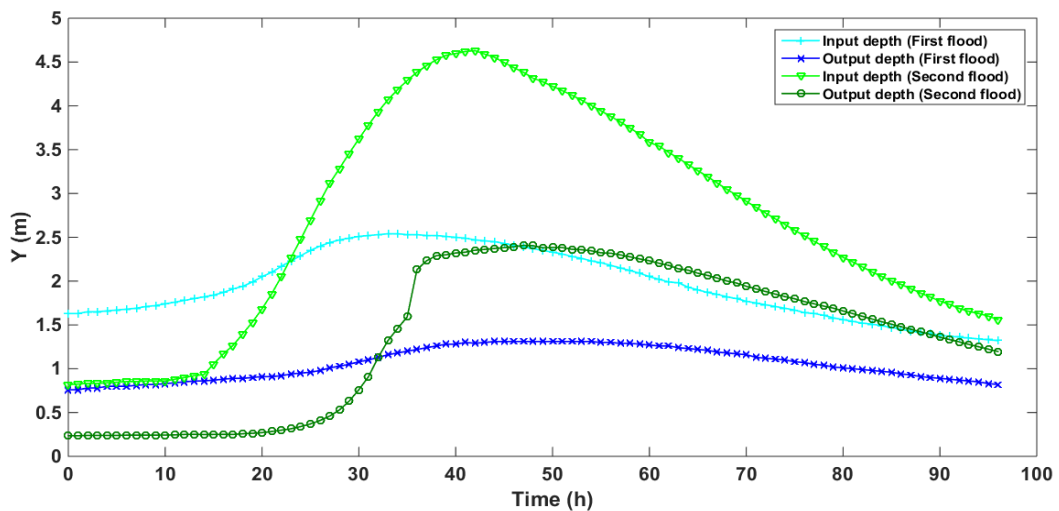
در اکثر پژوهش‌های قبلی به بررسی روش ماسکینگام کانژ در آبراهه‌های مصنوعی پرداخته شده‌است و پژوهش‌های محدودی در آبراهه‌های طبیعی صورت گرفته‌است. در حالی که روندیابی سیلاب در رودخانه‌ها از اهمیت بیشتری در کارهای مهندسی برخوردار بوده و نمی‌توان از روش‌هایی که در آبراهه‌های مصنوعی مورد بررسی قرار گرفته‌اند با اعتماد و دقت بالایی در آبراهه‌های طبیعی نیز استفاده کرد. همچنین در پژوهش‌های قبلی به ویژگی‌های هیدروگراف



شکل ۱- محدوده مطالعاتی (ایستگاه هیدرومتری اهواز تا ایستگاه هیدرومتری ملاتانی)



شکل ۲- هیدروگراف ورودی و خروجی (ایستگاه هیدرومتری ملاتانی) و خروجی (ایستگاه هیدرومتری اهواز)



شکل ۳- عمق آب ورودی (ایستگاه هیدرومتری ملاتانی) و عمق آب خروجی (ایستگاه هیدرومتری اهواز)

### روش ماسکینگام کانژ

بررسی‌های صورت گرفته توسط کانژ (۱۹۶۹) بیانگر آن است که معادله مربوط به روش ماسکینگام شباهت زیادی به معادله انتقال پخشیدگی دارد و همچنین نتایج آن به نتایج روش موج سینماتیک نزدیک است. او با منفصل کردن معادله مربوط به موج سینماتیک و همچنین با تطبیق پخشیدگی عددی با پخشیدگی فیزیکی، روش ماسکینگام را اصلاح کرد. به این ترتیب پارامترهای مربوط به روش ماسکینگام کانژ بر اساس مشخصات فیزیکی رودخانه محاسبه می‌گردند (Cunge, 1969). روش ماسکینگام کانژ به طور گسترده‌ای برای روندیابی سیل کاربرد دارد. از تفاوت‌های این روش با روش ماسکینگام می‌توان به تغییر اساس روش ماسکینگام با تعیین پارامترهای آن به طریق خاص توسط کانژ و همکاران بر اساس پخش و امکان در نظر گرفتن جریان‌های جانبی اشاره نمود (Cunge, 1969). در بیشتر آبراهه‌های طبیعی جمله‌های اینرسی و شتاب در مقایسه با شیب کف در معادله اندازه حرکت قابل صرف نظر کردن است (Henderson, 1999). در صورت عدم وجود جریان جانبی، معادلات پیوستگی و ممتنم در جریان غیردائمی برای مقاطع مستطیلی به صورت رابطه (۱) می‌باشد (Jain, 2001):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C_k \frac{\partial Q}{\partial X} = D \frac{\partial^2 Q}{\partial X^2} \quad (1)$$

در رابطه (۱): D ضریب پخشیدگی، Ck سرعت موج سینماتیک، Q دبی جریان و X بیانگر مکان است. روابط مربوط به ضریب پخشیدگی و سرعت موج سینماتیک به ترتیب به صورت روابط (۲) و (۳) بیان می‌شوند (Jain, 2001)

$$D = \frac{Q}{2BS_0} \quad (2)$$

$$C_k = \frac{dQ}{dA} = \left( \frac{5}{3} - \frac{2}{3} \frac{A}{BP} \frac{dP}{dy} \right) V \quad (3)$$

در روابط (۲) و (۳) B عرض فوقانی جریان، S<sub>0</sub> شیب کف، P محیط خیس شده، y عمق جریان و V سرعت جریان را نشان می‌دهند. در صورت استفاده از رابطه مانینگ، سرعت موج سینماتیک برای کانال‌های مستطیلی عریض به صورت رابطه (۴) در نظر گرفته می‌شود (Jain, 2001):

$$C_k = \left( \frac{5}{3} \right) V \quad (4)$$

در صورتی که از نیروهای اینرسی و فشاری صرف نظر شود، معادلات سنت ونانت به صورت رابطه (۵) که به معادله موج سینماتیک معروف است، ساده خواهند شد (Jain, 2001):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C_k \frac{\partial Q}{\partial X} = 0 \quad (5)$$

کانژ ثابت کرد که معادله ماسکینگام مشابه معادله انتقال-

پخشیدگی (رابطه ۱) بوده و رابطه (۶) را به صورت تقریبی و مقایسه‌ای از معادله موج سینماتیک با جایگزین کردن تقریب‌های تفاضل محدود استاندارد به جای مشتقات جزئی زمانی و مکانی در رابطه (۵) و استفاده از الگوی جعبه‌ای و همچنین انتخاب فاکتور وزنی مکانی X و فاکتور وزنی زمانی θ (که برابر با مقدار ثابت ۰/۵ در نظر گرفته شد) و همچنین تطبیق پخشیدگی عددی با پخشیدگی فیزیکی، بدست آورد که مشابه رابطه ماسکینگام می‌باشد (Cunge, 1969).

$$Q_{i+1}^{n+1} = C_1 Q_i^{n+1} + C_2 Q_i^n + C_3 Q_{i+1}^n \quad (6)$$

که در آن ضرایب C<sub>1</sub>، C<sub>2</sub> و C<sub>3</sub> به صورت زیر بیان می‌شوند (Chow, 1959):

$$C_1 = \frac{0.5\Delta t - KX}{K - KX + 0.5\Delta t} \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{0.5\Delta t + KX}{K - KX + 0.5\Delta t} \quad (8)$$

$$C_3 = \frac{K - KX - 0.5\Delta t}{K - KX + 0.5\Delta t} \quad (9)$$

در روابط فوق Δt گام زمانی بوده و X و K پارامترهای روندیابی بوده که به ترتیب به صورت روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شوند (Cunge, 1969):

$$X = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{Q_r}{BS_0 C_k \Delta x} \right] \quad (10)$$

$$K = \frac{\Delta x}{C_k} \quad (11)$$

در روابط فوق، Q<sub>r</sub> دبی مرجع و Δx گام مکانی را نشان می‌دهند. منظور از دبی مرجع، دبی است که بتوان با استفاده از آن پارامترهای روندیابی را به نحو صحیح تخمین زد (اکبری و همکاران ۱۳۹۰). پارامترهای روندیابی روش ماسکینگام کانژ وابسته به دبی مرجع اتخاذ شده می‌توانند به صورت ثابت یا متغیر محاسبه گردند. عبارتی با توجه به رابطه (۱۰) مقدار X رابطه مستقیم با مقدار دبی مرجع دارد و دبی مرجع نیز تابعی از دبی ورودی است. دبی ورودی نیز هنگام وقوع سیل، در زمان‌های مختلف، مقادیر متفاوتی داشته و نمی‌توان از هر یک از آنها به عنوان دبی مرجع استفاده کرد. در روش ماسکینگام کانژ با پارامترهای ثابت (CPMC)، دبی مرجع در تمامی سلول‌های محاسباتی ثابت می‌باشد، بنابراین در روش مذکور، پارامترهای روندیابی (X، K) ثابت می‌باشند. در پژوهش حاضر جهت محاسبه دبی مرجع از رابطه (۱۲) استفاده شده است

(Wilson and Ruffini, 1988; Akan 2006).

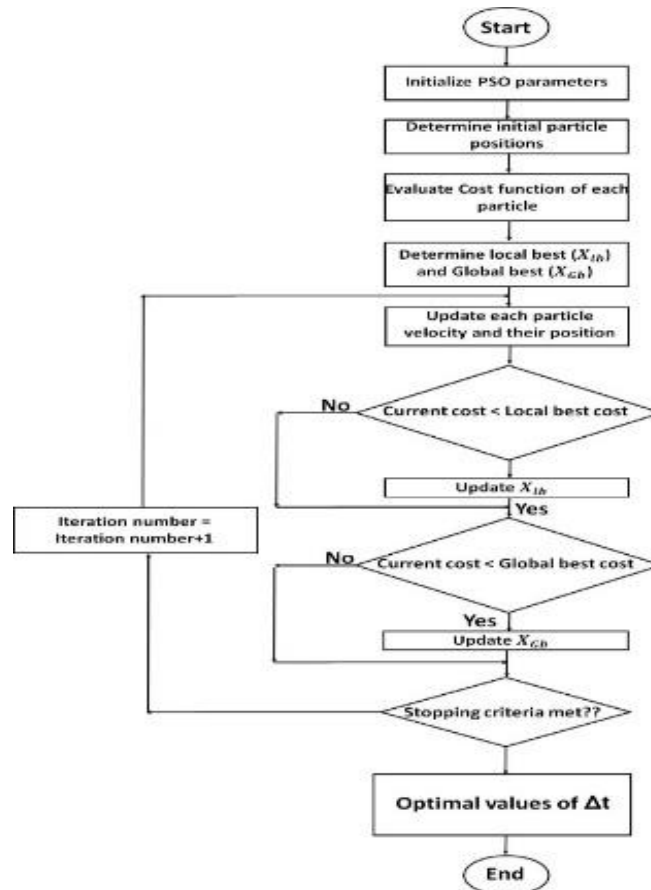
$$Q_r = Q_b + 0.5(Q_{pi} - Q_b) \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، Q<sub>b</sub> و Q<sub>pi</sub> به ترتیب بیانگر حداقل و حداکثر دبی ورودی می‌باشند.

طرح‌ریزی شده‌است. از مزایای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات می‌توان به ساختار و پیاده‌سازی ساده، تعداد کم پارامترهای قابل کنترل و سرعت همگرایی بالا و همچنین بازده محاسباتی بالا اشاره کرد. ابتدا فلوچارتی مطابق شکل (۴) طراحی شده و سپس با استفاده از آن، کد الگوریتم در متلب پیاده‌سازی شده است. به عبارت دیگر، فلوچارت روند کلی طرح (الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات) را در قالب نمودار (شکل ۴) نشان می‌دهد.

### الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)

این الگوریتم برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط Eberhart and Kennedy (1995) معرفی و ارائه گردیده است. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک الگوریتم جست‌وجوی مبتنی بر جمعیت است که همانند الگوریتم ژنتیک، الگوریتم کلونی مورچه‌ها، الگوریتم زنبور عسل و ... یک الگوریتم الهام گرفته از طبیعت می‌باشد که برای پایه هوش جمعی و رفتار اجتماعی پرندگان و ماهی‌ها



شکل ۴- فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)

حاضر معیارهای مورد بررسی برای گام زمانی ( $\Delta t$ ) به صورت زیر می‌باشد:

معیار اول: استفاده از گام زمانی ۱ ساعت ( $\Delta t = 1 \text{ h}$ )، زیرا هیدروگراف سيل مورد استفاده در این پژوهش، در گام‌های زمانی ۱ ساعت ثبت شده‌است.

معیار دوم: زمان اوج هیدروگراف ورودی برابر با ۳۳ ساعت می‌باشد، از یک بیستم زمان اوج که برابر با ۱/۶۵ ساعت است، به عنوان گام زمانی استفاده گردیده‌است.

معیار سوم: بهینه‌یابی بهترین گام زمانی که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) صورت گرفته‌است. به عبارت دیگر

مقادیر گام زمانی ( $\Delta t$ ) بر اساس سه معیار زیر مورد بررسی قرار گرفته و کوچکترین آن‌ها جهت انجام محاسبات انتخاب می‌گردد (Ponce, 1989):

۱) شبکه محاسباتی تعریف شده توسط کاربر

۲) زمان تا اوج هیدروگراف ورودی تقسیم بر ۲۰

۳) زمان انتقال در بازه کانال مورد نظر

در پژوهش حاضر، معیارهای ۱ و ۲ مورد ارزیابی قرار گرفته‌است ولی به دلیل آنکه زمان انتقال در بازه مورد نظر رودخانه کارون (حد فاصل ایستگاه‌های هیدرومتری ملاثانی و اهواز) در دسترس نمی‌باشد، معیار سوم مورد ارزیابی قرار نگرفته‌است. به طور کلی در پژوهش

کانژ (X, K) و  $\Delta t$  باعث افزایش دقت روش مذکور در برآورد هیدروگراف خروجی خواهد شد. به همین دلیل در پژوهش حاضر برای هر یک از ناحیه‌های نام برده شده در زیر یک مقدار متفاوت برای پارامترهای روندیابی (X, K) و همچنین پارامتر گام زمانی ( $\Delta t$ ) محاسبه شده‌است.

۱) ناحیه شروع سیل که دامنه تغییرات دبی ورودی آن بین ۲۸۷ الی ۳۸۰ ( $m^3/s$ ) و دامنه تغییرات عرض فوقانی جریان آن بین ۱۶۷/۳ الی ۱۸۵/۱ (m) می‌باشد که در محاسبات از عرض فوقانی متوسط ۱۷۶/۲ متر استفاده شده‌است.

۲) ناحیه اوج (پیک) سیل که دامنه تغییرات دبی ورودی آن بین ۳۹۲ الی ۴۹۴ ( $m^3/s$ ) بوده و به عبارتی دبی ورودی به بیشترین مقدار خود رسیده و همچنین به تبع آن دامنه تغییرات عرض فوقانی جریان نیز به بیشترین مقدار خود رسیده و بین ۱۸۵/۲ الی ۱۹۴/۲ (m) می‌باشد که از مقدار متوسط ۱۸۹/۷ متر در محاسبات استفاده گردیده‌است.

۳) ناحیه پایان سیل که دامنه تغییرات دبی ورودی آن بین ۲۲۲ الی ۳۸۳ ( $m^3/s$ ) بوده و همچنین دامنه تغییرات عرض فوقانی جریان نیز بین ۱۲۵/۰۵ الی ۱۸۵/۱۵ (m) می‌باشد که از مقدار متوسط ۱۵۵/۱ در محاسبات استفاده شده‌است.

### پژوهش حاضر طی مراحل زیر به انجام رسیده است:

۱) محاسبه مقدار ثابت برای پارامترهای روندیابی روش ماسکینگام کانژ (X, K) و  $\Delta t$  با استفاده از داده‌های سیل مشاهداتی (شکل ۲ و ۳) و مشخصات هندسی ایستگاه هیدرومتری ملاثانی (جدول ۱) که مطابق روابط ارائه شده، جهت محاسبه سرعت موج سینماتیک ( $C_k$ ) از روابط (۴) و (۱۷) استفاده شده‌است. مقادیر سرعت موج سینماتیکی، دبی مرجع و پارامترهای روندیابی در جدول (۲) آورده شده است. همچنین با استفاده از پارامترهای روندیابی به دست آمده، هیدروگراف خروجی روندیابی شده و با مقدار مشاهداتی آن مقایسه گردیده‌است که مقادیر مربوط به میانگین خطای نسبی (MRE) و خطای نسبی دبی اوج (DPO) نیز در جدول (۳) بیان شده‌است.

۲) محاسبه سه مقدار متفاوت برای پارامترهای روندیابی روش ماسکینگام کانژ (X, K) و  $\Delta t$  برای هر یک از ناحیه‌های نام برده شده با استفاده از داده‌های مشاهداتی و مشخصات هندسی ایستگاه هیدرومتری ملاثانی که برای هر سه ناحیه مقادیر مربوط به تغییرات دبی و عمق ورودی، مشخصات هندسی و مقادیر مربوط به سرعت موج سینماتیکی، دبی مرجع و پارامترهای روندیابی در جدول (۱) و (۲) آورده شده‌است. همچنین مقادیر مربوط به میانگین خطای نسبی (MRE) و خطای نسبی دبی اوج (DPO) نیز محاسبه شده و در جدول (۳) بیان گردیده‌است.

مطابق روابط ۷ الی ۹ علاوه بر مقادیر پارامترهای روندیابی (X, K)، مقدار گام زمانی نیز در محاسبه ضرایب  $C_1$ ،  $C_2$  و  $C_3$  و در نتیجه در محاسبه هیدروگراف خروجی نیز تاثیر داشته و باید بهترین مقدار برای آن بهینه‌یابی گردد که این عمل با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) صورت گرفته‌است. شایان ذکر است که از کمینه کردن مقدار مجموع انحراف مطلق (SAD) که به صورت رابطه (۱۵) تعریف می‌شود، به عنوان تابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) استفاده شده‌است:

$$SAD = \sum_{i=1}^n |O_i - Q_i| \quad (15)$$

که در آن  $O_i$ ،  $Q_i$  به ترتیب دبی خروجی مشاهداتی و دبی خروجی روندیابی شده (محاسباتی) هستند.

### موج یک طرفه (منوکینال)

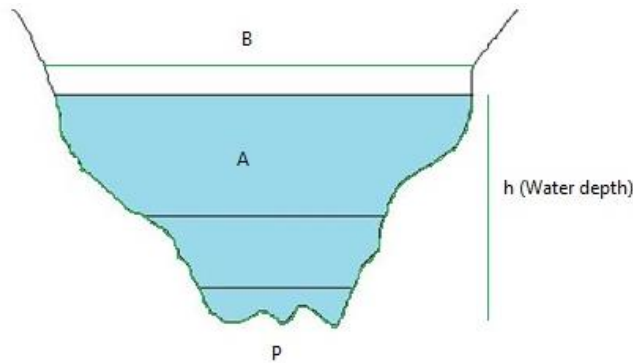
در یک کانال مستطیلی عریض با شیب ضعیف، یک جریان یکنواخت با عمق  $h_1$ ، سرعت  $V_1$  و دبی  $Q_1$  برقرار است. در اثر ورود یک موج دیگر، دبی جریان به طور ناگهانی به مقدار  $Q_2$  افزایش یافته و جریان یکنواخت با عمق  $h_2$  و سرعت  $V_2$  برقرار می‌گردد. گام افزایش دبی، با تشکیل یک موج انتقالی با شکل هندسی پایدار که تحت عنوان موج یک طرفه (منوکینال) گفته می‌شود، پس از مدت زمان شکل‌گیری آن، به طرف پایین دست منتشر می‌گردد. پس از مدت زمان  $\Delta t$ ، موج فاصله  $\Delta x = C_k \Delta t$  را طی می‌کند. با اعمال اصل بقای جرم به حجم کنترل که با سرعت موج سینماتیکی  $C_k$  حرکت می‌کند، خواهیم داشت (Henderson, 1966):

$$C_k A_2 - Q_2 = C_k A_1 - Q_1 \quad (16)$$

$$C_k = \frac{Q_2 - Q_1}{A_2 - A_1} = \frac{dQ}{dA} = \frac{1}{B} \frac{dQ}{dh} \quad (17)$$

رابطه (۱۷) سرعت موج سینماتیکی ( $C_k$ ) را بیان می‌کند. مطابق رابطه مذکور، سرعت موج سینماتیکی، با نرخ تغییر دبی (Q) و نرخ تغییرات عمق جریان (h) متناسب می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که موج سینماتیکی از معادله پیوستگی که در جریان‌های با سطح آزاد بیانگر اصل بقای جرم می‌باشد، منتج شده که به همین علت تحت عنوان موج سینماتیکی نامیده شده و تنها تابع عمق جریان می‌باشد.

با توجه به روابط (۴) و (۱۷)، سرعت موج سینماتیکی ( $C_k$ ) تابعی از عرض فوقانی جریان (B)، دبی جریان (Q) و عمق جریان (h) می‌باشد. اگر تغییرات عمق تنها در یکی از بازه‌های مشخص شده در شکل (۵) باشد، مقادیر پارامترهای مذکور و به تبع آن مقادیر پارامترهای روندیابی روش ماسکینگام کانژ (X, K) و  $\Delta t$  ثابت است. ولی اگر تغییرات عمق که ناشی از تغییرات دبی در زمان‌های مختلف وقوع سیل است، بین بازه‌های مشخص شده در شکل (۵) متغیر باشد، استفاده از مقادیر متفاوت برای پارامترهای روندیابی روش ماسکینگام



شکل ۵- تغییرات عمق با توجه به تغییرات دبی در رودخانه های سیلابی

مقادیر کمتر از  $77/6$  درصد حداکثر دبی ورودی در ناحیه صعودی هیدروگراف را به عنوان ناحیه شروع سیل و همین روند در شاخه نزولی به عنوان ناحیه پایانی سیل در نظر گرفته شده است و برای هر یک از ناحیه‌های مذکور، یک مقدار متفاوت برای پارامترهای روندیابی ( $X, K$ ) محاسبه شده است. مقادیر مربوط به مشخصات هندسی ایستگاه هیدرومتری ملاثانی، مطابق جدول (۱) می‌باشد. شایان ذکر است که با توجه به تقسیم‌بندی دبی ورودی به سه ناحیه مذکور که به تبع آن مقادیر مربوط به تغییرات عمق آب ( $h$ ) و عرض فوقانی جریان ( $B$ ) نیز تغییر کرده است که مقادیر مذکور به تفکیک سه ناحیه نیز در جدول (۱) آورده شده است.

در محاسبات مربوط به روش ماسکینگام کانز، مقدار گام مکانی برابر با فاصله دو ایستگاه از یکدیگر در نظر گرفته شده است، زیرا جهت صحت‌سنجی دقت نتایج به دست آمده برای هیدروگراف خروجی، تنها مقادیر مشاهداتی هیدروگراف خروجی در انتهای بازه (ایستگاه هیدرومتری اهواز) ثبت شده است. بنابر این مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در ایستگاه مذکور مورد بررسی قرار گرفته است.

به عبارتی در پژوهش حاضر جهت افزایش دقت روندیابی سیل به روش ماسکینگام کانز، هیدروگراف ورودی به سه ناحیه شروع، اوج و پایانی تقسیم‌بندی شده است و برای هر ناحیه با توجه به اینکه مقادیر حداقل و حداکثر دبی ورودی و عمق جریان ورودی، عرض فوقانی جریان ( $B$ ) و به تبع آن مقادیر دبی مرجع ( $Q_r$ ) و سرعت موج سینماتیکی ( $C_k$ ) در ناحیه‌های مذکور بدلیل نا منظم بودن مقطع رودخانه دچار تغییر شده است، مقادیر متفاوتی برای پارامترهای روندیابی ( $X, K$ ) و  $\Delta t$  برای هر ناحیه محاسبه شده است.

## نتایج و بحث

با استفاده از داده‌های استفاده شده در پژوهش حاضر، در تقسیم‌بندی ناحیه‌های سه گانه شروع، اوج و پایانی سیل، گزینه‌های مختلفی برای شروع دبی ورودی ناحیه اوج انتخاب گردید و نتایج نشان داد که طبق داده‌های مشاهداتی هنگامی که مقدار شروع دبی ورودی ناحیه اوج  $77/6$  درصد حداکثر دبی ورودی در نظر گرفته شود، دقت محاسبات به بیشترین مقدار ممکن خواهد رسید. به عبارت دیگر

جدول ۱- مشخصات ایستگاه هیدرومتری ملاثانی (بالادست) سیل اول

پارامتر	حالت پارامترهای متفاوت			حالت پارامترهای ثابت	
	ناحیه پایانی سیل	ناحیه اوج سیل	ناحیه شروع سیل	کل سیل	
کمترین مقدار دبی ورودی ( $m^3/s$ )	۲۲۲	۳۹۲	۲۸۷	۲۲۲	
بیشترین مقدار دبی ورودی ( $m^3/s$ )	۳۸۳	۴۹۴	۳۸۰	۴۹۴	
کمترین مقدار عمق آب ورودی (m)	۱/۳۲	۲/۱۰	۱/۶۳	۱/۳۲	
بیشترین مقدار عمق آب ورودی (m)	۲/۰۷	۲/۵۴	۲/۰۵	۲/۵۴	
کمترین مقدار عرض فوقانی (m)	۱۲۵/۰۵	۱۸۵/۲	۱۶۷/۳	۱۲۵/۰۵	
بیشترین مقدار عرض فوقانی (m)	۱۸۵/۱۵	۱۹۴/۲	۱۸۵/۱	۱۹۴/۲	
مقدار متوسط عرض فوقانی (m)	۱۵۵/۱	۱۸۹/۷	۱۷۶/۲	۱۵۹/۶	

از هر یک از روابط (۴) و (۱۷) جهت محاسبه سرعت موج سینماتیکی، مقادیر مربوط به پارامترهای روندیابی ( $X, K$ ) نیز تغییر کرده است که

با توجه به این که روابط مربوط به پارامترهای روندیابی ( $X, K$ ) وابسته به سرعت موج سینماتیکی ( $C_k$ ) می‌باشند، در شرایط استفاده

استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، بهینه‌یابی شده‌است در جدول (۲) آورده شده‌است.

مقادیر مذکور در شرایط پارامترهای ثابت و سه پارامتر متفاوت (سه ناحیه شروع، اوج و پایان هیدروگراف ورودی) محاسبه و در جداول (۲) درج شده‌است. همچنین، مقادیر گام زمانی ( $\Delta t$ ) که با

جدول ۲- پارامترهای بهینه‌یابی روش ماسکینگام کانز و مقادیر گام زمانی بهینه‌یابی شده با استفاده از الگوریتم PSO (سیل اول)

پارامترها	حالت سه پارامتر متفاوت		
	ناحیه پایانی	ناحیه اوج	ناحیه شروع
$Q_r$ (m <sup>3</sup> /s)	۳۰۲/۵	۴۴۳	۳۳۳/۵
$C_k = \frac{1}{B} \frac{dQ}{dh}$	۱/۴۲۲	۱/۱۹۵	۱/۲۵۷
X	-۰/۳۹۷	-۰/۳۵۳	-۰/۳۸۷
K (h)	۱۱/۸۱۸	۱۴/۰۶۵	۱۳/۳۷۳
$\Delta t$ (h) (Optimized with PSO)	۱/۰۴۹	-۰/۸۵۲	-۰/۸۶۶
$C_k = \left(\frac{5}{3}\right) V$	۱/۹۰۷	۱/۶۷۸	۱/۷۰۹
X	-۰/۴۲۳	-۰/۳۹۵	-۰/۴۱۷
K(h)	۸/۸۱۱	۱۰/۰۱۳	۹/۸۳۱
$\Delta t$ (h) (Optimized with PSO)	-۰/۷۸۲	-۰/۵۹۹	-۰/۶۴۹

موج یک طرفه ( $C_k = \frac{1}{B} \frac{dQ}{dh}$ ) جهت محاسبه سرعت موج سینماتیکی ( $C_k$ ) استفاده گردد و همچنین مقدار گام زمانی برای هر سه ناحیه مذکور با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) بهینه‌یابی گردد، مقادیر مربوط به میانگین خطای نسبی (MRE) و خطای نسبی دبی اوج (DPO) به ترتیب برابر با ۱/۶۹ و ۴/۰۹ درصد به دست آمده‌است.

علت افزایش دقت در محاسبه هیدروگراف خروجی این است که؛ با توجه به توضیحات ارائه شده در قسمت موج یک طرفه و مشخصات مربوط به سیل مشاهداتی که در جدول (۱) ارائه گردیده‌است، موج به وجود آمده از نوع یک طرفه بوده و همین امر باعث شده‌است که در شرایطی که از رابطه مربوط به این بخش ( $C_k = \frac{1}{B} \frac{dQ}{dh}$ ) جهت محاسبات مورد نیاز استفاده شود، دقت روش ماسکینگام کانز افزایش یافته‌است. به عبارت دیگر از آنجاییکه عرض فوقانی جریان (B) نسبت به عمق جریان (h) دارای مقادیر بسیار بزرگتری بوده (جدول ۱) و همچنین شیب متوسط رودخانه کارون در بازه مورد بررسی بسیار ضعیف می‌باشد ( $S_0=0.00011$ )، می‌توان هر یک از ناحیه‌های شروع، اوج و پایان سیل را به صورت مقاطع مستطیلی عریض در نظر گرفت و طبق توضیحات و نتایج ارائه شده، موج به وجود آمده نیز از نوع موج یک طرفه بوده که این عوامل باعث افزایش دقت روش ماسکینگام کانز در برآورد هیدروگراف خروجی شده‌است.

طبق توضیحات ارائه شده، هیدروگراف خروجی در هر یک از حالت‌های مذکور محاسبه و با مقدار مشاهداتی آن مقایسه شده‌است که مقادیر مربوط به میانگین خطای نسبی (MRE) و خطای نسبی دبی اوج (DPO) در حالت استفاده از رابطه (۴) جهت محاسبه سرعت موج سینماتیکی ( $C_k$ ) و استفاده از گام‌های زمانی مذکور در جدول (۳) نمایش داده شده‌است. همچنین مقادیر مذکور در شرایطی که از رابطه موج یک طرفه (رابطه ۱۷) جهت محاسبه سرعت موج سینماتیکی ( $C_k$ ) استفاده شده‌است نیز در جدول (۳) بیان گردیده‌است. از آنجایی که زمان اوج هیدروگراف ورودی برابر با ۳۳ ساعت می‌باشد، از تقسیم مقدار مذکور بر ۲۰، گام زمانی محاسباتی برابر با ۱،۶۵ ساعت به دست می‌آید. چنانچه در جدول (۳) ملاحظه می‌شود، هنگامی که از رابطه ( $C_k = \left(\frac{5}{3}\right) V$ ) جهت محاسبه یک مقدار ثابت برای سرعت موج سینماتیکی ( $C_k$ ) استفاده گردد و مقدار گام زمانی ( $\Delta t$ ) برابر با ۱ ساعت در نظر گرفته شود، میانگین خطای نسبی (MRE) و خطای نسبی دبی اوج (DPO) به ترتیب برابر با ۶/۱۵ و ۷/۶۳ درصد به دست آمده‌است. مقادیر مذکور در حالت استفاده از رابطه (۴) جهت محاسبه  $C_k$  و استفاده از گام زمانی ۱/۶۵ ساعت، به ترتیب برابر با ۱۰/۳۵ و ۸/۵۷ درصد محاسبه شده‌است. در حالی که مطابق روش ارائه شده در پژوهش حاضر، اگر برای ناحیه شروع، اوج و پایانی سیل مقادیر متفاوتی برای پارامترهای روندیابی (X, K) و سرعت موج سینماتیکی ( $C_k$ ) محاسبه شود و از رابطه مربوط به



جدول ۳- مقایسه نتایج هیدروگراف خروجی محاسباتی با مقادیر هیدروگراف خروجی مشاهداتی برای گام‌های زمانی مختلف (سیل اول)

$C_k = \left(\frac{5}{3}\right)V$				$C_k = \frac{1}{B} \frac{dQ}{dh}$				گام زمانی ( $\Delta t$ )
میانگین خطای نسبی		خطای نسبی دبی اوج		میانگین خطای نسبی		خطای نسبی دبی اوج		
پارامترهای ثابت	پارامترهای متفاوت	پارامترهای ثابت	پارامترهای متفاوت	پارامترهای ثابت	پارامترهای متفاوت	پارامترهای ثابت	پارامترهای متفاوت	
۶/۱۵	۵/۵۱	۷/۶۳	۷/۱۵	۳/۴۵	۲/۴۰	۶/۲۹	۴/۹۹	(h)۱
۱۰/۳۵	۹/۸۹	۸/۵۷	۸/۴۲	۷/۹۳	۷/۲۷	۷/۹۹	۷/۲۲	(h)۱/۶۵
۳/۲۳	۲/۰۲	۶/۱۹	۴/۹۸	۳/۱۵	۱/۶۹	۵/۳۰	۴/۰۹	Optimized with PSO

به‌طور کلی نتایج پژوهش حاضر به شرح زیر می‌باشد:  
 - در تمامی حالت‌ها (استفاده از هر یک از روابط جهت محاسبه  $C_k$ )، چنانچه از سه مقدار متفاوت برای پارامترهای روندیابی روش ماسکینگام کانژ استفاده گردد، دقت روش مذکور در برآورد هیدروگراف خروجی افزایش یافته‌است.

- استفاده از رابطه موج یک طرفه ( $C_k = \frac{1}{B} \frac{dQ}{dh}$ ) به جای استفاده از رابطه ( $C_k = \left(\frac{5}{3}\right)V$ ) در هر دو حالت پارامترهای روندیابی ثابت و پارامترهای روندیابی متفاوت و در هر سه معیار گام زمانی، باعث افزایش دقت روش ماسکینگام کانژ در برآورد هیدروگراف خروجی شده‌است.

- میانگین خطای نسبی (MRE) سیل اول با استفاده از روش ارائه‌شده در پژوهش حاضر (استفاده همزمان از روابط موج یک طرفه، پارامترهای روندیابی متفاوت و مقدار بهینه گام زمانی) نسبت به روش ماسکینگام کانژ با پارامترهای ثابت و معیار اول ( $\Delta t = 1 \text{ h}$ ) ۷۲/۵۲ درصد و نسبت به معیار دوم ( $\Delta t = 1.65 \text{ h}$ ) ۸۳/۶۷ درصد بهبود یافته و مقدار خطای نسبی دبی اوج (DPO) نیز نسبت به معیار اول و دوم به ترتیب ۴۶/۴ و ۵۲/۲۸ درصد بهبود یافته‌است.

- محاسبات مذکور برای سیل دوم نیز بیانگر آن است که، چنانچه به جای استفاده از روش ماسکینگام کانژ با پارامترهای ثابت، از روش ارائه در پژوهش حاضر استفاده شود، میانگین خطای نسبی نسبت به معیار اول ۳۶/۴۴ درصد و نسبت به معیار دوم ۶۹/۰۹ درصد بهبود یافته‌است. همچنین خطای نسبی دبی اوج نیز نسبت به معیار اول و دوم به ترتیب ۵۵/۹۴ و ۶۶/۳۵ درصد بهبود یافته‌است.

### قدردانی

از واحد مطالعات شرکت مدیریت منابع آب ایران به‌دلیل کمک فراوانی که در جمع‌آوری و در اختیار گذاشتن داده‌های مورد نیاز در انجام پژوهش حاضر داشتند، تقدیر و تشکر به‌عمل می‌آید.

به‌طور کلی، چنانچه به‌جای استفاده از مقدار ثابت برای پارامترهای روندیابی روش ماسکینگام کانژ ( $X, K$ )، از سه مقدار متفاوت برای پارامترهای مذکور استفاده گردد و همچنین مقدار گام زمانی ( $\Delta t$ ) نیز با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) بهینه‌یابی شود، دقت روش ماسکینگام کانژ در برآورد هیدروگراف خروجی افزایش می‌یابد. عبارت دیگر چنانچه به‌جای استفاده از معیارهای ارائه شده در پژوهش‌های قبلی جهت محاسبه گام زمانی، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات جهت بهینه‌یابی پارامتر مذکور استفاده شود، روش ماسکینگام کانژ از دقت بالاتری برخوردار شده‌است. علت افزایش دقت این است که به‌دلیل نامنظم بودن سطح مقطع رودخانه کارون در ایستگاه هیدرومتری ملاثانی و روابط مربوط به پارامترهای روندیابی روش ماسکینگام کانژ ( $X, K$ ) که توابعی از تغییرات دبی ورودی، عمق آب ورودی، عرض فوقانی جریان و سایر پارامترهای هندسی مقطع می‌باشند، مقادیر مذکور در ناحیه شروع، اوج و پایانی هیدروگراف ورودی متغیر بوده و توجه به این نکات باعث افزایش دقت روش ماسکینگام کانژ در برآورد هیدروگراف خروجی شده‌است. همچنین با توجه به شرایط هندسی مقطع رودخانه و ویژگی‌های جریان، موج به وجود آمده از نوع موج یک طرفه (منوکلینال) بوده و چنانچه جهت محاسبه سرعت موج سینماتیکی ( $C_k$ ) از رابطه مربوط به موج یک طرفه ( $C_k = \frac{1}{B} \frac{dQ}{dh}$ ) به جای رابطه ( $C_k = \left(\frac{5}{3}\right)V$ ) استفاده گردد، دقت روش ماسکینگام کانژ در برآورد هیدروگراف خروجی افزایش می‌یابد.

### نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که؛ چنانچه به‌جای استفاده از روش معمول ماسکینگام کانژ، از راه‌کارهای ارائه شده در پژوهش حاضر جهت محاسبه پارامترهای روش مذکور ( $X, K$ ) و مقدار گام زمانی ( $\Delta t$ ) استفاده شود، دقت روش ماسکینگام کانژ در برآورد هیدروگراف خروجی به‌میزان قابل توجهی افزایش یافته‌است.

## منابع

- Kong applying neural network method with particle swarm optimization. *Environmental monitoring and assessment*. 79(3): 217-230.
- Maidment D.R. 1993. *Hand Book of Hydrology*. McGraw-Hill Pub. Co. USA, 1140p.
- Meraji, S.H. 2004. Optimum design of flood control systems by particle swarm optimization algorithm (Doctoral dissertation. M. Sc. thesis, Iran University of Science and Technology) (In Farsi).
- Moghaddam, A., Behmanesh, J. and Farsijani, A. 2016. Parameters estimation for the new four-parameter nonlinear Muskingum model using the particle swarm optimization. *Water resources management*. 30(7): 2143-2160.
- Nagesh Kumar, D. and Janga Reddy, M. 2007. Multipurpose reservoir operation using particle swarm optimization. *J Water Resour Plan Manag* 133, 192-201.
- Perumal, M. and Raju, K. G. R. 1998. Variable-parameter stage-hydrograph routing method. II: Evaluation. *Journal of Hydrologic Engineering*. 3(2): 115-121.
- Perumal, M. and Sahoo, B. 2008. Volume conservation controversy of the variable parameter Muskingum-Cunge method. *Journal of Hydraulic Engineering*. 134(4): 475-485.
- Ponce, V. M. 1989. *Engineering hydrology. Principles and practices (Vol. 640)*. Englewood Cliffs. NJ. Prentice Hall, 270p.
- Ponce, V. M. and Yevjevich, V. 1978. Muskingum-Cunge method with variable parameters. *Journal of the Hydraulics Division*. 104(12): 1663-1667.
- Ponce, V., M. Lohani, A. K. and Scheyhing, C. 1996. Analytical verification of Muskingum-Cunge routing. *Journal of Hydrology*. 174(3): 235-241.
- Ponce, V. M. and Lugo, A. 2001. Modeling looped ratings in Muskingum-Cunge routing. *Journal of Hydrologic Engineering*. 6(2): 119-124.
- Reshma, T., Kumar, P. S. Babu, M. R. K. and Kumar, K. S. 2010. Simulation of runoff in watersheds using SCS-CN and Muskingum-Cunge methods using remote sensing and geographical information systems. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 25(31): 31-42.
- Tang, X. N., Knight, D. W. and Samuels, P. G. 1999. Volume conservation in variable parameter Muskingum-Cunge method. *Journal of Hydraulic Engineering*. 125(6): 610-620.
- Todini, E. 2007. A mass conservative and water storage consistent variable parameter Muskingum-Cunge approach. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 4(3): 1549-1592.
- Wang, L., Lapin, S. Wu, J. Q. Elliot, W. J. and Fiedler, اکبری، غ، براتی، ر. و حسین نژاد دوین، ع. (۱۳۹۰). بررسی شماهای مختلف روش ماسکینگام کونژ در آبراهه‌های طبیعی. تحقیقات منابع آب ایران، ۷(۳)، ۶۲-۷۴.
- فتوحی، م. و فغفور مغربی، م. (۱۳۹۰). بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر روش ماسکینگام-کانژ در مقایسه با روش روندیابی دینامیکی. تحقیقات منابع آب ایران، ۷(۱)، ۲۶-۳۷.
- Afshar, A., Kazemi H. and Saadatpour, M. 2011. Particle swarm optimization for automatic calibration of large scale water quality model (CE-QUAL-W2). Application to Karkheh Reservoir, Iran. *Water Resour Manag* 25(10): 2613-2632.
- Akan, A.O. 2006. *Open Channel Hydraulics*. Chapter 8. Introduction to Unsteady Open-Channel Flow. Elsevier. 364p.
- Barry, D. A. and Bajracharya, K. 1995. On the Muskingum-Cunge flood routing method. *Environment International*. 21(5): 485-490.
- Bazargan, J. and 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.
- Cunge, J. A. 1969. On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). *Journal of Hydraulics Research*. 7 (2): 205-230.
- Chau, K. 2005. A split-step PSO algorithm in prediction of water quality pollution. In *International Symposium on Neural Networks*. Springer. Berlin. Heidelberg. 1034-1039.
- Chau, K.W., 2007. A split-step particle swarm optimization algorithm in river stage forecasting. *J. Hydrol*. 34, 131-135.
- Chow, Vente. 1959. *Open channel hydraulics*. Newyork. Macgraw-Hill Book Company, 680p.
- Chu, H. J. and Chang, L. C. 2009. Applying particle swarm optimization to parameter estimation of the nonlinear Muskingum model. *Journal of Hydrologic Engineering*. 14(9): 1024-1027.
- Garbrecht, J. and Brunner, G. 1991. Hydrologic channel-flow routing for compound sections. *Journal of Hydraulic Engineering*. 117(5): 629-642.
- Henderson, F. M. 1966. *Open channel flow (No. 532 H4)*. MACMILLAN PUBLISHING CO. INC. New York, 522p.
- Jain, S. C. 2001. *Open-channel flow*. John Wiley and Sons. INC, 352p
- Lu, W.Z., Fan, H.Y. Leung, A.Y.T. and Wong, J.C.K. 2002. Analysis of pollutant levels in central Hong

Wilson, B. N. and Ruffini, J. R. 1988. Comparison of physically-based Muskingum methods. Transactions of the ASAE. 31(1): 91-97.

F. R. 2018. Accuracy of the Muskingum-Cunge method for constant-parameter diffusion-wave channel routing with lateral inflow. ArXiv preprint arXiv. 1802.04429: 1-24

## Effects of Different Routing Parameters on the Accuracy of the River Flood Routing Using the Muskingum-Cunge Method

H. Norouzi<sup>1</sup>, J. Bazargan<sup>2\*</sup>

Received: Sep.05, 2019

Accepted: Nov.26, 2019

### Abstract

Flood routing is a technique to determine downstream flood hydrographs that is important. The Muskingum-Cunge method is one of the flood routing methods. In the present study, the accuracy of the Muskingum-Cunge method is investigated using the river reach located between the Mollasani hydrometric station in the upstream, and the Ahwaz hydrometric station in the downstream of the Karun River. The results indicated that using three different values for the parameters of the Muskingum-Cunge method instead of using a constant value as well as the monoclinal wave equations in calculation of the kinematic wave velocity, the accuracy of the Muskingum-Cunge method in estimation of the outflow hydrograph increased. In the present study, the inflow hydrograph was classified into the start, peak, and end of the flood sections, and different values for the parameters of the Muskingum-Cunge method were calculated for each of the three sections. In addition, using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, the time step ( $\Delta t$ ) of the three sections was also optimized, which in turn improved the calculation accuracy of the Muskingum-Cunge method in estimation of the outflow hydrograph. The Mean Relative Error (MRE) and Relative Error in estimation of the peak discharge (DPO) by using the conventional Muskingum-Cunge method with constant parameters and a time step of 1 hour was calculated as 6.15 and 7.63 percent, respectively. However, using the proposed method in the present study, the corresponding error values of 1.69 and 4.9 percent were obtained, respectively.

**Keywords:** Different Routing Parameters, Flood Routing, Monoclinal Wave, Muskingum-Cunge Method, Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm.

---

1- Ph.D. Student of Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran  
2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran  
(\*- Corresponding Author Email: jbazargan@znu.ac.ir)