



## Analysis for the Different Schemes of the Muskingum-Cunge Method in the Natural Waterways

G. H. Akbari<sup>1</sup>, R. Barati<sup>2\*</sup>  
and A. R. Hosseinnazhad<sup>3</sup>

### Abstract

The Muskingum-Cunge method is still frequently used for flood routing. During the last decade different modifications were proposed for this method to increase its accuracy. However, difficulties arise in the selection of an appropriate "reference" discharge for evaluating the routing parameters and in the small volume loss that can occur. In this research in order to study the applicability of the different schemes of the Muskingum-Cunge method in field conditions, some observed flood events of Karoon River, Western Iran, have been routed by these schemes and the results were compared with that of the observed values of the downstream end of the reach as well as outputs obtained by the dynamic wave model. The results indicated that the studied schemes generally provided reasonable output in comparison with the observed hydrographs. Also the discrepancy among the results of these schemes was not significant. In addition, the computed results reasonably concurred with that of dynamic wave model. Finally, the sensitivity analysis of computational grid size is performed. The results showed that the effect of changing the time step rather than the space step is bigger on the output of models.

**Keywords:** Flood Routing, Muskingum-Cunge Method, Hydrodynamic Model, Dynamic Wave, Kinematic Wave.

Received: July 13, 2009  
Accepted: January 30, 2011

## بررسی شمای مختلف روش ماسکینگام کونژ در آبراهه‌های طبیعی

غلامحسین اکبری<sup>۱</sup>، رضا براتی<sup>۲\*</sup> و  
علیرضا حسین نژاد دوین<sup>۳</sup>

### چکیده

روش ماسکینگام کونژ به طور گسترده‌ای برای روندیابی سیل استفاده می‌شود. اصلاحات متفاوتی برای افزایش دقت این روش طی دهه گذشته پیشنهاد شده است. با این وجود مشکلاتی از قبیل انتخاب دبی مرجع مناسب برای محاسبه پارامترهای روندیابی و رخ دادن تلفات ناچیز حجم وجود دارد. در تحقیق حاضر به منظور مطالعه قابلیت کاربرد شمای مختلف روش ماسکینگام کونژ در شرایط میدانی، تعدادی سیل مشاهده‌ای از رودخانه کارون به وسیله این شمای روندیابی گردیده و نتایج حاصل از آنها با مقادیر مشاهده‌ای پایین دست و همچنین نتایج حاصل از مدل موج دینامیکی مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که شمای مورد مطالعه عموماً خروجی قابل قبولی در مقایسه با هیدروگراف مشاهده‌ای از خود نشان می‌دهند. همچنین اختلاف بین نتایج این شمای قابل ملاحظه نمی‌باشد. علاوه بر نتایج محاسبه شده توسط روش‌های مورد مطالعه به طور قابل قبولی مشابه روش موج دینامیکی می‌باشد. در نهایت تحلیل حساسیت ابعاد شبکه محاسباتی انجام شده است. نتایج این بخش نشان می‌دهد که اثرات تغییر گام زمانی نسبت به تغییر گام مکانی روی نتایج خروجی مدل‌ها بیشتر می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** روندیابی سیل، روش ماسکینگام کونژ، مدل هیدرو دینامیکی، موج دینامیکی، موج سینماتیکی.

تاریخ دریافت مقاله: ۲۵ آذر ۱۳۸۸  
تاریخ پذیرش مقاله: ۱ تیر ۱۳۹۰

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran, E-mail: gakbari@hamoon.usb.ac.ir  
2 M. Sc. in Civil Engineering, Islamic Azad University, Mashhad Branch, Member of Youngster Researchers Club, Mashhad, Iran, E-mail: r88barati@gmail.com  
3- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran, E-mail: nezhad@hamoon.usb.ac.ir  
\*- Corresponding Author

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران  
۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، عضو باشگاه پژوهشگران جوان، مشهد، ایران  
۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران  
\*- نویسنده مسئول

مساله انتشار موج سیل در طول یک رودخانه و تعیین دبی سیلاب در مقاطع و زمان‌های مشخص کاربردهای متعددی در کاهش خسارات سیل، طراحی سازه‌های هیدرولیکی و برنامه ریزی منابع آب دارد. برای پیش بینی حرکت موج سیل می‌توان از روندیابی سیل استفاده نمود. روندیابی سیل عبارت است از عملیات محاسباتی که تغییرات مقدار سرعت و شکل موج سیل را به عنوان تابعی از زمان در یک یا چند نقطه در طول آبراهه‌ها<sup>۱</sup> پیش‌بینی می‌کند (Maidment, 1993).

مطالعات روندیابی سیل بر اساس روش‌های که به طور مستقیم یا غیر مستقیم از معادلات سنت‌ونانت<sup>۲</sup> حاصل شده‌اند، انجام می‌گردد. عملیات روندیابی سیل به کمک روش‌های هیدرولیکی و هیدرولوژی قابل بررسی است. در روندیابی هیدرولوژی از معادله حرکت صرف نظر شده و فقط معادله پیوستگی یک بعدی مد نظر قرار می‌گیرد. در صورتی که در روندیابی هیدرولیکی هر دو معادله پیوستگی و اندازه حرکت در محاسبات دخیل می‌باشند (Sturm, 2001). روش ماسکینگام، از جمله روش‌های هیدرولوژی می‌باشد که کاربرد گسترده‌ای برای روندیابی سیل دارد. در این روش پارامترهای روندیابی بر اساس هیدروگراف بالادست و پایین دست یک سیل که قبلاً در منطقه رخ داده است، تعیین می‌گردند. Cunge (1969) نشان داد روش ماسکینگام به معادله انتقال پخشیدگی شباهت دارد و نتایج آن با روش موج سینماتیکی خطی مشابه است. او با منفصل کردن معادله موج سینماتیکی و تطبیق پخشیدگی عددی با پخشیدگی فیزیکی روش ماسکینگام را اصلاح نمود. به این ترتیب پارامترهای روش ماسکینگام کوئز براساس مشخصات فیزیکی رودخانه محاسبه می‌گردند. Ponce and Yevjevich (1978) روش ماسکینگام کوئز را با پارامترهای متغیر دو، سه و چهار نقطه‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد روش دو نقطه‌ای دقت مناسبی برای محاسبه دبی اوج و زمان رخ دادن آن از خود نشان نمی‌دهد. در مقابل، روش‌های سه و چهار نقطه‌ای مناسب می‌باشند. Ponce (1989) پیشنهاد کرد برای جلوگیری از پراکندگی عددی، در روش ماسکینگام کوئز، تا حد ممکن عدد کورانت<sup>۳</sup> نزدیک به یک نگه داشته شود. به این ترتیب کاربرد روش ماسکینگام کوئز به روندیابی امواج دیفیوژن که علامتی از اثرات دینامیکی نظیر پس زدن آب در آنها مشاهده نمی‌شود، محدود می‌گردد. Tang et al. (1999) طی یک سری آزمایشات عددی در کانال مصنوعی به بررسی و مقایسه شمهای مختلف روش ماسکینگام کوئز با پارامترهای متغیر پرداختند.

آنها نشان دادند که تلفات حجم برای کانال‌های با شیب تند، کم و برای کانال‌های با شیب ملایم، زیاد می‌باشد. این در حالی است که روش پارامترهای ثابت تلفات حجم قابل توجهی ندارد. همچنین در این تحقیق بر اساس مطالعات (Cappelaere, 1997)، که در آن به بررسی اثرات نادیده گرفتن مولفه گرادیان طولی فشار هیدرواستاتیک در ارزیابی ضریب پخشیدگی<sup>۴</sup> معادله دیفیوژن در مسئله بقای حجم پرداخته شده بود، شمای عددی جدیدی برای روش ماسکینگام کوئز ارائه شده است. Perumal (1994a,b) با استفاده از فرضیاتی پارامترهای روش ماسکینگام را به طور مستقیم از معادلات سنت وونانت استخراج نمود. این روش، به روش ماسکینگام با پارامترهای متغیر مشهور است و برتری عمده آن امکان محاسبات همزمان عمق و دبی می‌باشد. Tewolde and Smithers (2006) با استفاده از روش‌های ۱- معادله مانینگ و ۲- منحنی دبی‌های اندازه‌گیری شده<sup>۵</sup> عمق جریان مورد نیاز در طی محاسبات روش ماسکینگام کوئز را برآورد نمودند. نتایج آنها نشان داد که این دو روش با دقت مشابهی عمل می‌کنند و می‌توان از آنها برای محاسبه عمق در حوضه‌های آبریز فاقد آمار استفاده نمود.

همانطور که از عنوان پژوهش حاضر مشخص است هدف بررسی الگوهای مختلف روش ماسکینگام کوئز در آبراهه‌های طبیعی است. اکثر تحقیقات گذشته در این زمینه مربوط به بررسی این شمها در کانال مصنوعی می‌باشد (Ponce and Yevjevich, 1978; Tang et al., 1999; Perumal and Sahoo, 2007). این در صورتی است که مشکلات موجود و فیزیک مساله در میدان و دنیای واقعی نیازمند شبیه‌سازی با داده‌های حقیقی و رودخانه‌های طبیعی است. بنابراین بر اساس نتایج این تحقیق درک صحیحی از قابلیت روش ماسکینگام کوئز در شرایط میدانی حاصل خواهد شد. در این شمهای مختلف روش ماسکینگام کوئز شامل: دو شمای روش پارامترهای ثابت، هفت شمای روش پارامترهای متغیر سه و چهار نقطه‌ای و همچنین روش ماسکینگام با پارامترهای متغیر، در رودخانه کارون که دارای سیلاب‌های مشاهداتی در بالادست و پایین دست می‌باشد، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. همچنین نتایج حاصل با نتایج روش موج دینامیکی صحت سنجی شده‌اند. بعلاوه برای بررسی قابلیت روش ماسکینگام کوئز نسبت به دیگر روش‌های ساده شده روندیابی سیل، نتایج با روش موج سینماتیکی که در آن از مولفه‌های شتاب و گرادیان فشار معادله اندازه حرکت صرف نظر شده است، مقایسه شده‌اند. برای محاسبه عمق در روش ماسکینگام کوئز مطابق نتایج Tewolde and Smithers (2006) از رابطه مانینگ استفاده شده است. همچنین برای تحلیل نتایج از چهار معیار معتبر شامل معیارهای: ۱- واریانس تشریح شده، ۲- میزان پایین افتادگی دبی

اوج، ۳- میزان تاخیر دبی اوج و ۴- بقای جرم، استفاده شده است. کلیه روش‌های استفاده شده به کمک برنامه نویسی در فضای نرم‌افزار MATLAB مدل شده‌اند.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۱-۲- روش ماسکینگام کونژ

معادلات حاکم بر جریان‌های غیردائمی متغیر تدریجی، معادلات سنت‌ونانت، شامل معادله پیوستگی و معادله اندازه حرکت می‌باشند (به ترتیب روابط ۱ و ۲).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (2)$$

در این روابط: A سطح جریان، Q دبی جریان، t و x به ترتیب متغیرهای زمانی و مکانی، g شتاب گرانشی و S<sub>f</sub> شیب اصطکاکی را نشان می‌دهند. همچنین h تراز سطح آب اندازه گیری شده از سطح مبنای افقی، h = y + Z<sub>b</sub> است. که در آن y عمق جریان و Z<sub>b</sub> تراز کف کانال بالای سطح مبنای افقی می‌باشند (Akan, 2006).

در بیشتر آبراهه‌های طبیعی مولفه‌های شتاب در مقایسه با شیب کف در معادله اندازه حرکت قابل چشم پوشی کردن هستند (Henderson, 1966). در نبود جریان جانبی معادلات پیوستگی و ممتنم در جریان غیردائمی برای مقاطع منشوری به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C \frac{\partial Q}{\partial x} = D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (3)$$

در این رابطه C سرعت موج سینماتیکی است که در صورت استفاده از رابطه مانینگ به صورت رابطه (۴) بیان می‌گردد و D = Q/(2BS<sub>0</sub>) ضریب پخشیدگی است که در آن B عرض فوقانی جریان و S<sub>0</sub> شیب کف را نشان می‌دهند.

$$C = \frac{dQ}{dA} = \left( \frac{5}{3} - \frac{2}{3} \frac{A}{BP} \frac{dP}{dy} \right) V \quad (4)$$

در رابطه (۴) P محیط خیس شده، y عمق جریان و V سرعت جریان را نشان می‌دهند. اگر از هر دو نیروی اینرسی و فشاری صرف نظر شود، معادلات سنت و نانت به صورت معادله مشهور موج سینماتیکی ساده می‌شوند:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

Cunge (1969) اثبات کرد که معادله مرسوم ماسکینگام مشابه معادله انتقال-پخشیدگی بیان شده در رابطه (۳) است. او رابطه (۶) را

به صورت تقریبی و مقایسه‌ای از معادله موج سینماتیک با جایگزین کردن تقریب‌ها تفاضل محدود استاندارد بجای 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 مقدار ثابت ۰/۵ در نظر گرفته شد) و تطبیق پخشیدگی عددی با پخشیدگی فیزیکی، بدست آورد.

$$Q_{i+1}^{n+1} = C_0 Q_i^{n+1} + C_1 Q_i^n + C_2 Q_{i+1}^n \quad (6)$$

در این رابطه n اندیس زمانی و i اندیس مکانی را نشان می‌دهند (شکل ۱). ضرایب رابطه (۶) به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$C_0 = \frac{-KX + 0.5\Delta t}{K(1-X) + 0.5\Delta t}, \quad C_1 = \frac{KX + 0.5\Delta t}{K(1-X) + 0.5\Delta t} \quad (7)$$

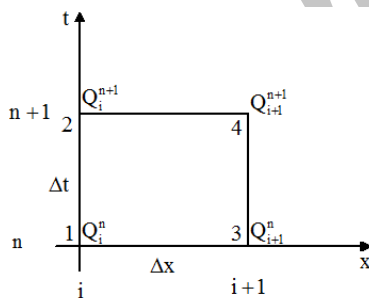
$$C_2 = \frac{K(1-X) - 0.5\Delta t}{K(1-X) + 0.5\Delta t}$$

در این روابط Δt گام زمانی است. همچنین K و X پارامترهای روندیابی هستند و مطابق روابط (۸) و (۹) محاسبه می‌گردند.

$$K = \frac{\Delta x}{C_r} \quad (8)$$

$$X = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{Q_r}{BS_0 C_r \Delta x} \right] \quad (9)$$

در این روابط Q<sub>r</sub> دبی مرجع، C<sub>r</sub> سرعت موج و Δx گام مکانی را نشان می‌دهند. منظور از دبی مرجع دبی است که بتوان با استفاده از آن پارامترهای روندیابی را به نحو صحیحی تخمین زد. پارامترهای روش ماسکینگام کونژ (روابط ۸ و ۹) وابسته به مقدار دبی مرجع اتخاذ شده می‌توانند به صورت ثابت یا متغیر محاسبه گردند.



شکل ۱- سلول محاسباتی روش ماسکینگام کونژ

### ۱-۱-۲- روش ماسکینگام کونژ با پارامترهای ثابت

در روش ماسکینگام کونژ با پارامترهای ثابت، CPMC<sup>A</sup> دبی مرجع در تمامی سلول‌های محاسباتی ثابت می‌باشد، بنابراین پارامترهای روندیابی در تمام مراحل تغییری نمی‌کنند. در روش پارامترهای ثابت می‌توان از شمای زیر استفاده نمود (Wilson and Ruffini 1988; Akan 2006).

الف) الگوی CPMC1

$$Q_r = Q_b + 0.5(Q_{pi} - Q_b) \quad (10)$$

$$C_r = f(Q_r)$$

ب) الگوی CPMC2

$$Q_r = \sum_{n=1}^M Q_{in} / M \quad (11)$$

$$C_r = f(Q_r)$$

در این روابط  $Q_b$  و  $Q_{pi}$  به ترتیب دبی پایه و دبی اوج هیدروگراف ورودی،  $Q_{in}$  مقادیر دبی هیدروگراف ورودی در مرحله زمانی  $n$ ام و  $M$  تعداد عرض‌های هیدروگراف ورودی را نشان می‌دهند. مطابق این روابط، سرعت موج تابعی از دبی می‌باشد و برای محاسبه آن از رابطه (۴) استفاده شده است. همچنین می‌توان از روابط ساده شده نیز بر اساس نوع مقطع سرعت موج را محاسبه نمود. به عنوان نمونه برای کانال‌های مستطیلی عریض  $C = (5/3)V$  در نظر گرفته می‌شود (Maidment, 1993).

ج) الگوی VPMC3-1

$$C_r = \left( \sum_{j=1}^3 C_j \right) / 3 = \left( \sum_{j=1}^3 f(Q_j) \right) / 3 \text{ for } K \quad (14)$$

$$\left( \frac{Q}{C} \right)_r = \left( \sum_{j=1}^3 \frac{Q_j}{C_j} \right) / 3 \text{ for } X$$

در روش چهار نقطه‌ای در تخمین دبی مرجع علاوه بر دبی‌های گره‌های معلوم شبکه محاسباتی از دبی در گره مجهول سلول محاسباتی،  $(Q_{i+1}^{n+1})$ ، نیز استفاده می‌شود (شکل ۱). بنابراین در حالت اخیر از یک روند سعی و خطا برای محاسبات استفاده خواهد شد. برای تعیین حدس اولیه در روش چهار نقطه‌ای از مقادیر روش سه نقطه‌ای استفاده شده است. در این روش از شمای زیر می‌توان استفاده نمود (Ponce and Yevjevich, 1978):

الف) الگوی VPMC4

$$Q_r = \left( \sum_{j=1}^4 Q_j \right) / 4 \quad (15)$$

$$C_r = \left( \sum_{j=1}^4 C_j \right) / 4 = \left( \sum_{j=1}^4 f(Q_j) \right) / 4$$

ب) الگوی MVPMC4

$$Q_r = \left( \sum_{j=1}^4 Q_j \right) / 4 \quad (16)$$

$$C_r = f(Q_r)$$

ج) الگوی VPMC4-1

$$C_r = \left( \sum_{j=1}^4 C_j \right) / 4 = \left( \sum_{j=1}^4 f(Q_j) \right) / 4 \text{ for } K \quad (17)$$

$$\left( \frac{Q}{C} \right)_r = \left( \sum_{j=1}^4 \frac{Q_j}{C_j} \right) / 4 \text{ for } X$$

همچنین Tang et al. (1999) به منظور در نظر گرفتن اثرات مولفه گرادین فشار و کاهش تلفات حجم الگوی زیر را ارائه نموده‌اند.

د) الگوی VPMC4-H

$$Q_r = \sqrt{1 - \mu \frac{2D}{CQ_r} \frac{\partial Q}{\partial x}} \left( \sum_{j=1}^4 Q_j \right) / 4 \quad (18)$$

$$C_r = \left( \sum_{j=1}^4 C_j \right) / 4 = \left( \sum_{j=1}^4 f(Q_j) \right) / 4$$

در این رابطه  $D$  ضریب پخشیدگی را نشان می‌دهد. همچنین  $\mu$  ضریب تعدیل حجم است و به اندازه و شکل مقطع کانال وابسته می‌باشد. Tang et al. (1999) طی یک سری آزمایشات نشان دادند برای عرض بستر ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ متر مقدار ضریب تعدیل حجم به ترتیب ۰/۶۵، ۰/۴ و ۰/۳ مناسب می‌باشد. همچنین آنها نشان دادند حساسیت نتایج نسبت به تغییرات  $\mu$  برای مقادیر کوچکتر شیب بستر

۲-۱-۲- روش ماسکینگام کونژ با پارامترهای متغیر

در روش ماسکینگام کونژ با پارامترهای متغیر، VPMC<sup>۹</sup>، ضرایب روش بر اساس تغییرات غیرخطی دبی مرجع در هر سلول محاسباتی تعیین می‌گردند. این روش را می‌توان به صورت سه نقطه‌ای و چهار نقطه‌ای انجام داد.

در روش سه نقطه‌ای برای تعیین ضرایب روندیابی در گره مجهول سلول محاسباتی از دبی در گره‌های معلوم شبکه،  $(Q_i^n, Q_{i+1}^n)$  و  $(Q_{i+1}^n)$ ، استفاده می‌گردد (شکل ۱). در این روش از شمای زیر می‌توان استفاده نمود (Ponce and Yevjevich, 1978):

الف) الگوی VPMC3

$$Q_r = \left( \sum_{j=1}^3 Q_j \right) / 3 \quad (12)$$

$$C_r = \left( \sum_{j=1}^3 C_j \right) / 3 = \left( \sum_{j=1}^3 f(Q_j) \right) / 3$$

ب) الگوی MVPMC3

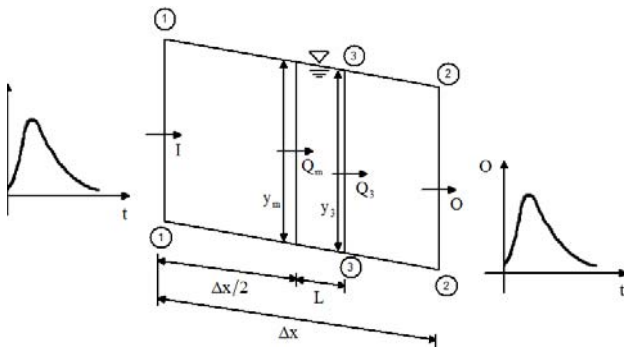
$$Q_r = \left( \sum_{j=1}^3 Q_j \right) / 3 \quad (13)$$

$$C_r = f(Q_r)$$

در صورت استفاده از رابطه مانینگ به عنوان قانون اصطکاکی از رابطه (۲۳) برای این منظور می‌توان استفاده نمود.

$$y_{i+1}^{n+1} = y_m + \frac{(Q_{i+1}^{n+1} - Q_m)}{\frac{\partial A}{\partial y} \Big|_m \left[ 1 + \frac{2}{3} \left( \frac{P \partial R / \partial y}{\partial A / \partial y} \right)_m \right]} v_m \quad (23)$$

در این رابطه R شعاع هیدرولیکی و اندیس m نشان دهنده پارامتر مورد نظر در مقطع میانی بازه مورد مطالعه می‌باشد.



شکل ۲- بازه مورد استفاده در روش ماسکینگام با پارامترهای متغیر

### ۲-۳- روش موج دینامیکی<sup>۱۲</sup>

روش‌های مختلفی برای حل عددی معادله‌های سنت‌ونانت مانند روش مشخصه‌ها، روش اجزای محدود و روش تفاضل محدود به کار گرفته شده‌اند. در اینجا از روش پریسمن که یک روش ضمنی چهار نقطه‌ای با تقریب‌های تفاضل محدود می‌باشد، برای حل معادلات حاکم با در نظر گرفتن تمامی مولفه‌های معادله اندازه حرکت استفاده شده است. در این روش، از تقریب‌های تفاضل محدود زیر برای بازه‌ی بین گره‌های i و i+1 استفاده شده است:

$$f = \frac{1}{2} \theta (f_{i+1}^{n+1} + f_i^{n+1}) + \frac{1}{2} (1 - \theta) (f_{i+1}^n + f_i^n) \quad (24)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\theta (f_{i+1}^{n+1} - f_i^{n+1})}{\Delta x} + \frac{(1 - \theta) (f_{i+1}^n - f_i^n)}{\Delta x} \quad (25)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{(f_{i+1}^{n+1} + f_i^{n+1}) - (f_{i+1}^n + f_i^n)}{2\Delta t} \quad (26)$$

در روابط اخیر  $\theta$  فاکتور وزنی و f بیان کننده دبی یا سطح مقطع در مشتقات جزئی می‌باشد. این روش برای  $\theta$  بین ۰/۵ تا ۱ پایدار است. با جایگزاری روابط (۲۴) تا (۲۶) در معادلات پیوستگی و اندازه حرکت (روابط ۱ و ۲)، شکل تفاضل محدود این معادلات بدست می‌آید. معادلات حاصل که به صورت یک دستگاه معادلات غیرخطی می‌باشند، در هر گام زمانی با استفاده از تکنیک‌های تکراری مثل

بیشتر می‌باشد. در حالت کلی می‌توان  $\mu$  را با انجام آزمایشات عددی و سعی و خطا محاسبه نمود، به عنوان مقدار اولیه مقدار ۰/۴ مناسب می‌باشد. در اکثر موارد همین مقدار نتایج مناسبی از خود نشان می‌دهد. برای اطلاعات بیشتر در ارتباط با ضریب تعدیل حجم می‌توان به Tang et al. (1999) مراجعه نمود. همچنین برای تخمین تغییرات مکانی دبی در رابطه (۱۸) از تقریب تفاضل محدود زیر استفاده شده است:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q_{i+1}^{n+1} + Q_{i+1}^n - Q_i^{n+1} - Q_i^n}{2\Delta x} \quad (19)$$

### ۲-۲- روش ماسکینگام با پارامترهای متغیر

در روش ماسکینگام با پارامترهای متغیر، VPM<sup>۱۰</sup>، پارامترهای روش ماسکینگام به طور مستقیم از معادلات سنت‌ونانت برای روندیابی سیل در کانال‌های منشوری با هر سطح مقطعی بدون استفاده از مفهوم تطبیق پخشیدگی عددی با پخشیدگی فیزیکی، محاسبه می‌شوند (Perumal, 1994a,b). در این روند می‌توان از هر یک از قوانین اصطکاکی شزی یا مانینگ استفاده نمود. کلیات این روش در بازه‌ای به طول  $\Delta x$  در شکل ۲ نشان داده شده است. با استفاده از دو فرض شامل: ۱- در هر لحظه از زمان در طی عبور موج سیل از یک بازه کوتاه کانال، شیب سطح آب و شیب ناشی از شتاب‌های محلی و انتقالی ثابت باقی می‌ماند. و ۲- بین عمق در وسط بازه و دبی عبوری در نقطه‌ای به فاصله L در پایین دست (مقطع ۳ در شکل ۲) جریان ماندگار<sup>۱۱</sup> برقرار است، پارامترهای روندیابی به صورت زیر برآورد می‌شوند:

$$K = \frac{\Delta x}{C_3} \quad (20)$$

$$X = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{Q_3}{S_0 (\partial A / \partial y)_3 C_3 \Delta x} \right] \quad (21)$$

در رابطه (۲۱)، y عمق جریان و  $C_3$  و  $Q_3$  به ترتیب سرعت موج و دبی وزن‌دار عبوری از مقطع ۳ می‌باشند. این دبی وزن‌دار به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q_3 = XI + (1 - X)O = XQ_i^{n+1} + (1 - X)Q_{i+1}^{n+1} \quad (22)$$

در این رابطه I و O به ترتیب دبی در ابتدا و انتهای بازه می‌باشند. پس از یافتن پارامترهای روندیابی در هر گام زمانی دبی با کمک رابطه (۶) قابل محاسبه است (Perumal, 1994a). این روش در دو شمای ۳ و ۴ نقطه‌ای مدل شده است.

یکی از مزایای عمده روش VPM نسبت به شمهای دیگر روش ماسکینگام کوثر امکان انجام محاسبات همزمان عمق و دبی می‌باشد.

نیوتن رافسون<sup>۱۳</sup> قابل حل هستند. به عنوان حدس اولیه در هر گام زمانی از مقادیر گام زمانی قبل استفاده شده است. توضیحات کامل روند حل معادلات در Chow et al. (1988) و Akan (2006) بیان شده است.

#### ۴-۲- روش موج سینماتیکی<sup>۱۴</sup>

در روش موج سینماتیکی از مولفه‌های شتاب و گرادیان فشار معادله اندازه حرکت صرف نظر شده است. به عبارت دیگر در این روش از معادله اندازه حرکت دائمی و یکنواخت استفاده می‌شود (رابطه ۲۷).

$$S_0 = S_f \quad (27)$$

این رابطه به معنای موازی بودن سطح آزاد با کف کانال می‌باشد. حل عددی این روش با استفاده از شمای خطی و غیرخطی میسر می‌باشد. در اینجا از شمای غیرخطی که مستلزم یک روند سعی و خطا برای محاسبه دبی در گام زمانی مجهول است، استفاده شده است. حدس اولیه با نتایج الگوی خطی تهیه شده است. توضیحات کامل روند محاسبات این روش در Chow et al. (1988) ارائه شده است.

#### ۳- معیارهای ارزیابی کارایی مدل‌ها

برای بررسی دقیق نتایج از چهار معیار ارزیابی استفاده شده است. تمامی این معیارها بدون بعد بوده که سه معیار نخست برای بررسی کارایی نتایج مدل‌های بحث شده در مقایسه با هیدروگراف مشاهداتی و معیار آخر برای بررسی بقای حجم در طی روندیابی اتخاذ شده‌اند. این معیارها شامل موارد زیر می‌باشند:

**الف) معیار واریانس تشریح شده<sup>۱۵</sup> :** مشابه‌ترین هیدروگراف روندیابی شده به هیدروگراف مشاهداتی هیدروگرافی است که از لحاظ شکل و اندازه بیشترین شباهت را به آن داشته باشد. برای بررسی این موضوع می‌توان از معیار ارائه شده توسط Nash and Sutcliffe (1970) استفاده نمود. معیار واریانس تشریح شده،  $\eta_d$  از سوی ASCE Task Committee (1993) برای بررسی کارایی مدل‌های که برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیل استفاده می‌شوند، مورد حمایت قرار گرفته است.

$$\eta_d (\%) = \left[ 1 - \frac{\sum_{n=1}^M (Q_{on} - Q_{cn})^2}{\sum_{n=1}^M (Q_{on} - Q_{Oave})^2} \right] \times 100 \quad (28)$$

در این رابطه  $Q_{cn}$  و  $Q_{on}$  به ترتیب دبی هیدروگراف خروجی مشاهداتی و محاسباتی در مرحله زمانی  $n$ ام،  $Q_{Oave}$  متوسط دبی مشاهداتی و  $M$  تعداد داده‌های هیدروگراف ورودی را نشان می‌دهند. هر اندازه که

این معیار به یک نزدیک‌تر باشد، مقادیر مشاهداتی و محاسباتی همبستگی بالاتری خواهند داشت.

**ب) معیار میزان پایین افتادگی<sup>۱۶</sup> دبی اوج:** دبی اوج هیدروگراف در پایین دست در حالتی که جریان ورودی دیگری در میانه بازه وجود نداشته باشد، کمتر از دبی اوج هیدروگراف در بالادست می‌باشد که این حالت را پایین افتادگی یا فروکش دبی اوج می‌گویند. رابطه (۲۹) درصد فروکش سیلاب،  $\varepsilon$ ، را نشان می‌دهد. در این حالت میزان فروکش سیل برای هیدروگراف‌های محاسباتی و مشاهداتی با هم مقایسه می‌گردند.

$$\varepsilon (\%) = \left( 1 - \frac{Q_{po}}{Q_{pi}} \right) \times 100 \quad (29)$$

در این رابطه  $Q_{po}$  دبی اوج هیدروگراف خروجی محاسباتی یا مشاهداتی و  $Q_{pi}$  دبی اوج هیدروگراف ورودی را نشان می‌دهند.

**ج) معیار میزان تاخیر<sup>۱۷</sup> دبی اوج:** می‌توان گفت زمان رسیدن به نقطه اوج هیدروگراف پایین دست دیرتر از زمان رسیدن به نقطه اوج هیدروگراف بالادست می‌باشد. رابطه (۳۰) درصد این تاخیر زمانی،  $\xi$ ، را نشان می‌دهد. در این حالت میزان تاخیر سیل برای هیدروگراف‌های محاسباتی و مشاهداتی با هم مقایسه می‌گردند.

$$\xi (\%) = \left( 1 - \frac{T_{pi}}{T_{po}} \right) \times 100 \quad (30)$$

در این رابطه  $T_{po}$  زمان رخ دادن دبی اوج هیدروگراف خروجی محاسباتی یا مشاهداتی و  $T_{pi}$  زمان رخ دادن دبی اوج هیدروگراف ورودی را نشان می‌دهند.

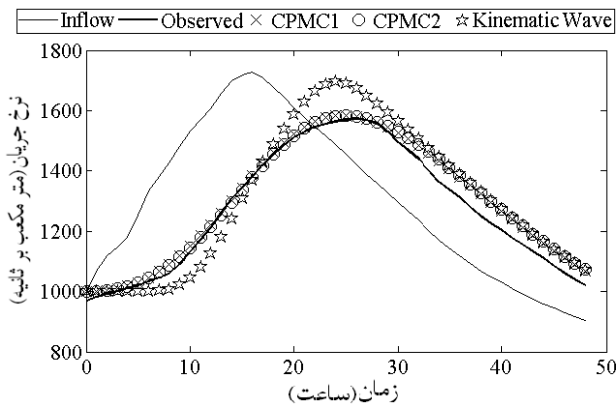
**د) معیار بقای جرم<sup>۱۸</sup> :** درصد خطای نسبی حجم جریان، EVOL، بین هیدروگراف‌های بالادست و پایین دست به صورت رابطه (۳۱) قابل بیان است:

$$EVOL (\%) = \left[ \frac{\sum_{n=1}^M Q_n}{\sum_{n=1}^M Q_{in}} - 1 \right] \times 100 \quad (31)$$

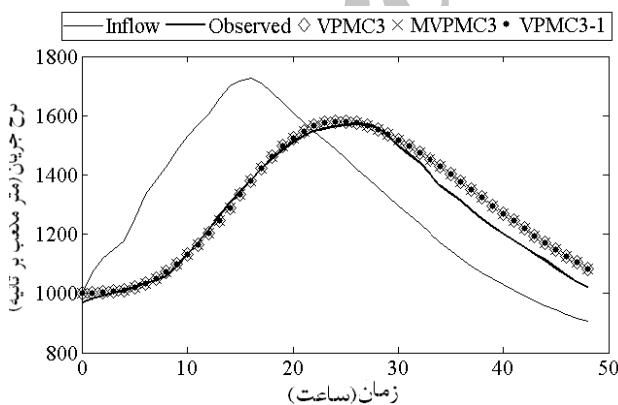
در این رابطه  $Q_n$  دبی هیدروگراف خروجی محاسباتی،  $Q_{cn}$ ، یا مشاهداتی،  $Q_{on}$ ، و  $Q_{in}$  دبی هیدروگراف ورودی در مرحله زمانی  $n$ ام را نشان می‌دهند. مقدار منفی این معیار مشخص کننده از دست دادن جرم و مقدار مثبت آن نشان دهنده بدست آوردن جرم است. مقادیر نزدیک صفر نیز نشان دهنده توانایی مناسب مدل در ارضا رابطه پیوستگی می‌باشد. این معیار توسط افراد مختلف از جمله Perumal and Sahoo (2007) مورد استفاده قرار گرفته است.

#### ۴- ساختار کلی مدل کردن روش‌های مختلف

روش ماسکینگام با پارامترهای متغیر به خوبی با هیدروگراف مشاهداتی مطابقت دارند. برای شمای پارامترهای ثابت اندکی هماهنگی با هیدروگراف مشاهداتی کاهش پیدا کرده است. این موضوع در حالی است که روش موج سینماتیکی هماهنگی پایینی با مقادیر مشاهداتی دارد. در شکل ۸ نمودار پراکندگی هیدروگراف روش موج دینامیکی در مقابل هیدروگراف‌های دیگر روش‌ها ارائه شده است. در این نمودار، مسلماً هر اندازه فاصله نقاط به یک خط با شیب ۴۵ درجه نزدیک‌تر باشد، اختلاف بین روش‌ها با روش معیار کمتر خواهد بود. با توجه به این شکل می‌توان گفت در میان شمای مختلف روش ماسکینگام کونژ در هر گام زمانی اختلاف بین نتایج شمای پارامترهای ثابت با روش موج دینامیکی بیشتر از دیگر روش‌ها می‌باشد، این در حالی است که سایر الگوها هماهنگی بالای با روش موج دینامیکی از خود نشان می‌دهند. بعلاوه اختلاف روش موج سینماتیکی با روش موج دینامیکی قابل توجه است.



شکل ۳- شبیه‌سازی سیلاب شماره ۱ با مدل‌های پارامترهای ثابت ماسکینگام کونژ و موج سینماتیکی



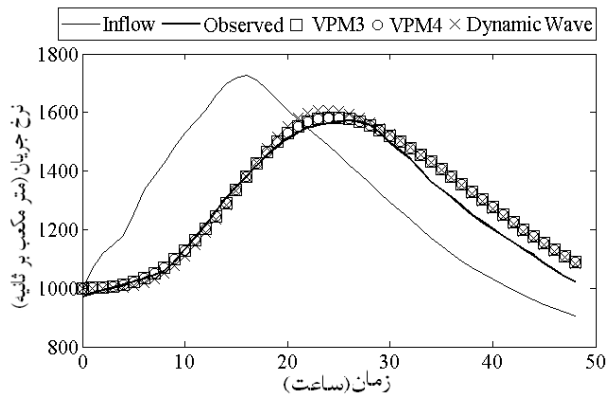
شکل ۴- شبیه‌سازی سیلاب شماره ۱ با مدل‌های پارامترهای متغیر سه نقطه‌ای ماسکینگام کونژ

تمامی شمای روش ماسکینگام کونژ شامل الگوهای پارامترهای ثابت، متغیر و روش ماسکینگام با پارامترهای متغیر و همچنین روش موج سینماتیکی فقط نیازمند شرایط آغازین و شرط مرزی بالادست می‌باشند. در کلیه این روش‌ها به عنوان شرایط آغازین جریان به صورت دائمی در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر در زمان شروع سیلاب در تمام نقاط بازه مورد نظر دبی پایه جریان دارد. برای شرط مرزی بالادست نیز از هیدروگراف دبی در این محل استفاده شده است. در روش موج دینامیکی شرایط آغازین و شرط مرزی بالادست مشابه دیگر روش‌ها در نظر گرفته شده‌اند. این روش برخلاف دیگر روش‌ها علاوه بر شرایط یاد شده نیازمند یک شرط مرزی دیگر نیز می‌باشد. در جریان‌های زیر بحرانی این شرط مرزی می‌بایست در پایین دست در نظر گرفته شود. برای تعیین شرط مرزی پایین دست فرض شده است که در انتهای بازه مورد مطالعه جریان از یک منحنی دبی اشل یک به یک تبعیت می‌کند. در این مقطع عمق و دبی با زمان تغییر می‌کنند و ارتباط آنها از طریق این منحنی برقرار می‌شود. بهترین تقریب برای منحنی دبی اشل در شرایط عدم وجود اطلاعات، استفاده از معادله‌های مقاومت جریان یکنواخت مانند معادله مانینگ می‌باشد که به مفهوم برابری تقریبی شیب اصطکاکی با شیب طولی کانال است. برای کاهش تاثیر شرط مرزی پایین دست بر روی رفتار جریان در درون بازه تحت مطالعه مقطع انتهایی محاسباتی در فاصله یک کیلومتری پس از مقطع انتهایی بازه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است.

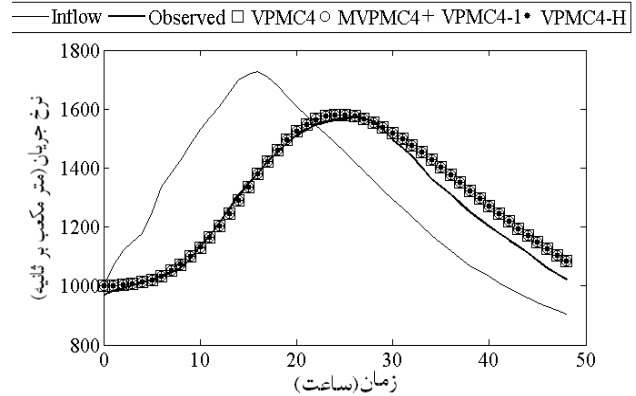
#### ۵- نتایج و بحث

##### ۵-۱- بررسی میدانی و نتایج

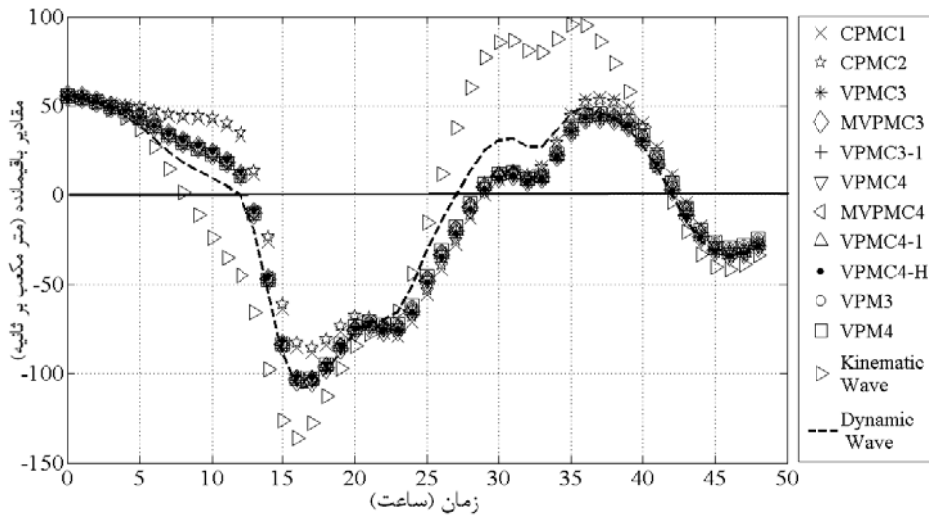
نتایج توصیفی ارائه شده در این بخش مربوط به ده حادثه سیلاب می‌باشد (براتی، ۱۳۸۹). در اینجا برای اختصار نتایج سه حادثه سیلاب از رودخانه کارون حد فاصل ایستگاه‌های هیدرومتری ملاثانی تا اهواز به طول ۶۰/۵ کیلومتر و شیب متوسط ۰/۰۰۱۱ به صورت کمی و گرافیکی ارائه شده‌اند. این سه سیلاب شامل سیلاب‌های ۲۲ تا ۲۳ آبان ماه ۱۳۷۶، ۱۰ تا ۱۱ بهمن ماه ۱۳۷۶ و ۱۹ تا ۲۱ دی ماه ۱۳۷۷ کارون (به ترتیب سیلاب‌های شماره ۱، ۲ و ۳) می‌باشند. نتایج شبیه‌سازی سیلاب‌های ۱ تا ۳ در شکل‌ها ۳ تا ۸ ارائه شده است. در شکل‌های ۳ تا ۶ هیدروگراف روندیابی شده و در شکل ۷ نمودار باقیمانده‌ها، تغییرات تفاضل دبی محاسباتی و دبی مشاهداتی در طول زمان، برای روش‌های مورد بحث نشان داده شده‌اند. با توجه به این شکل‌ها مشاهده می‌شود که شمای سه و چهار نقطه‌ای پارامترهای متغیر روش ماسکینگام کونژ و همچنین



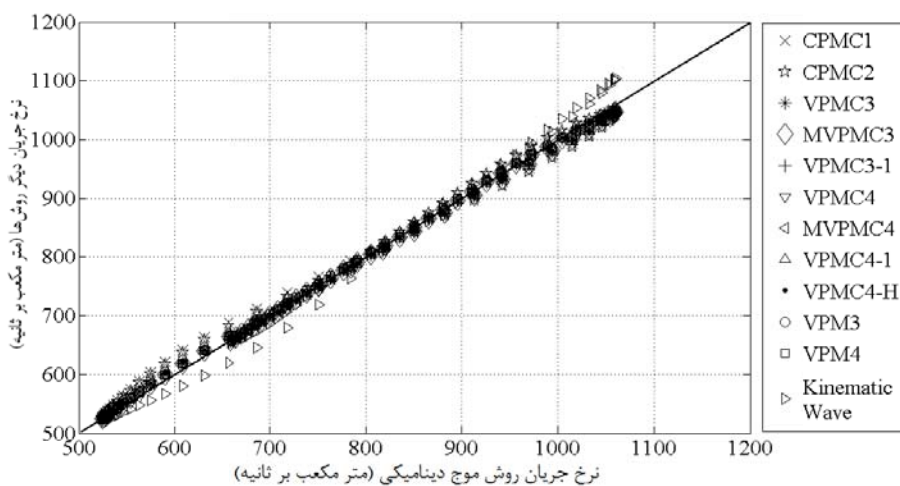
شکل ۶- شبیه‌سازی سیلاب شماره ۱ با مدل‌های ماسکینگام با پارامترهای متغیر و موج دینامیکی



شکل ۵- شبیه‌سازی سیلاب شماره ۱ با مدل‌های پارامترهای ماسکینگام کونژ متغیر چهار نقطه‌ای



شکل ۷- نمودار باقیمانده‌ها برای سیلاب ۲ با دبی اوج ۱۵۱۱ متر مکعب بر ثانیه



شکل ۸- نمودار پراکندگی نرخ جریان برای سیلاب شماره ۳



دارای کمترین تلفات حجم می‌باشد. این موضوع مطابق نتایج Tang et al. (1999) می‌باشد.

#### ۲-۵- بحث در نتایج

#### ۲-۵-۱- اثرات منفی بودن پارامتر X

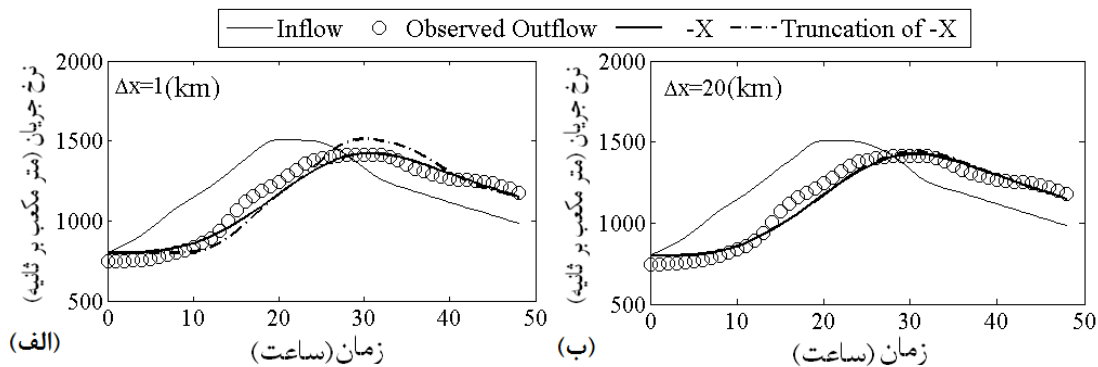
در روش ماسکینگام محدوده پارامتر وزنی X بین صفر تا ۰/۵ می‌باشد. این موضوع در حالی است که هنگامی که بازه روندیابی کوچک است احتمال منفی شدن پارامتر X در روش ماسکینگام کونژ وجود دارد (Perumal and Sahoo, 2007). (Tang et al. (1999). در طی آزمایشات عددی در کانال مصنوعی نشان دادند که در صورتیکه از رخ دادن این پدیده جلوگیری شود اثرات نامطلوب زیادی بر روی شکل هیدروگراف رخ می‌دهد. قانونی که آنها برای جلوگیری از رخ دادن این پدیده استفاده کردند شامل این موضوع بود که اگر  $X < 0$  سپس  $X = 0$  در نظر گرفته می‌شود. در این بخش این موضوع در رودخانه کارون برای سیلاب‌های مشاهده‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۹ اثرات نادیده گرفتن مقادیر منفی پارامتر X برای دو مقدار مختلف گام مکانی و الگوی VPMC4-1 و برای سیلاب شماره ۲ ارائه شده است. همانطور که مشخص است نادیده گرفتن مقادیر منفی این پارامتر به خصوص برای مقادیر کوچک گام مکانی اثرات منفی زیادی بر روی شکل هیدروگراف دارد. به طوری که هیدروگراف شبیه‌سازی شده در این شرایط اختلاف زیادی با مقادیر مشاهده‌ای از خود نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان گفتن نادیده گرفتن مقادیر منفی پارامتر X تحت هیچ شرایطی توصیه نمی‌شود.

مقادیر معیارهای ارزیابی کارایی مدل‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین برای هیدروگراف‌های مشاهده‌ای سیلاب‌های ۱ تا ۳ مقادیر درصد فروکش به ترتیب ۸/۹۱، ۶/۶۲ و ۷/۱۱ و مقادیر درصد تاخیر به ترتیب ۳۸/۴۶، ۳۷/۵۰ و ۲۲/۲۲ محاسبه شده‌اند.

بررسی معیار واریانس تشریح شده برای سیلاب‌های مختلف نشان می‌دهد که در بازه مورد مطالعه هماهنگی بین نتایج شمای‌های روش ماسکینگام کونژ با مقادیر مشاهده‌ای نسبت به روش موج دینامیکی بیشتر است. به هر حال همبستگی میان نتایج با مقادیر مشاهده‌ای در کلیه روش‌ها بجز روش موج سینماتیکی در حد بالایی می‌باشد. با در نظر گرفتن معیار فروکش دبی اوج مشاهده می‌شود که مقدار این معیار در بین شمای‌های مختلف روش ماسکینگام کونژ تغییر محسوسی نمی‌کند. همچنین نتایج این معیار برای الگوهای مختلف روش ماسکینگام کونژ و روش موج دینامیکی با مقادیر مشاهده‌ای از تطابق بالای برخوردار می‌باشد. در مقابل روش موج سینماتیکی از پیش‌بینی صحیح فروکش اوج سیلاب ناتوان است. بررسی معیار تاخیر حاکی از این موضوع است که تقریباً همه روش‌ها از جمله روش موج سینماتیکی به نحو مشابه و مناسبی زمان رخ دادن دبی اوج هیدروگراف پایین دست را پیش‌بینی نموده‌اند. بررسی معیار بقای جرم نشان می‌دهد که تمامی روش‌ها در طی روندیابی جرم از دست می‌رود. به عبارت دیگر حجم جریان هیدروگراف‌های روندیابی شده کمتر از حجم جریان هیدروگراف بالادست برآورد شده است. بر این اساس، همواره شمای‌های CPMC نسبت به دیگر روش‌ها در بقای حجم بهتر عمل می‌کنند. در رتبه بعد روش VPM قرار گرفته است. همچنین شمای VPMC4-H در میان شمای‌های مختلف VPMC

جدول ۱- خلاصه نتایج حاصل از تحلیل داده‌های رودخانه کارون

Criterion	$\eta_d$ (%)			$\epsilon$ (%)			$\xi$ (%)			EVOL (%)		
	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
Flood events												
CPMC1	۹۶/۴۳	۹۵/۸۵	۹۰/۴۹	۸/۲۷	۵/۸۰	۶/۷۷	۳۶/۰۰	۳۵/۴۸	۲۸/۲۱	-۰/۰۵	-۴/۶۸	-۲/۰۴
CPMC2	۹۵/۹۷	۹۶/۰۴	۸۹/۶۵	۸/۳۱	۵/۷۷	۶/۸۲	۳۶/۰۰	۳۵/۴۸	۲۸/۲۱	-۰/۰۸	-۴/۶۲	-۲/۰۹
VPMC3	۹۶/۲۵	۹۵/۹۰	۹۰/۸۹	۸/۴۶	۵/۸۵	۶/۸۳	۳۳/۳۳	۳۵/۴۸	۲۶/۳۲	-۰/۳۴	-۵/۲۴	-۲/۵۸
MVPMC3	۹۶/۲۵	۹۵/۹۰	۹۰/۸۹	۸/۴۶	۵/۸۵	۶/۸۳	۳۳/۳۳	۳۵/۴۸	۲۶/۳۲	-۰/۳۴	-۵/۲۴	-۲/۵۸
VPMC3-1	۹۶/۲۵	۹۵/۹۱	۹۰/۸۹	۸/۴۶	۵/۸۵	۶/۸۳	۳۳/۳۳	۳۵/۴۸	۲۶/۳۲	-۰/۳۴	-۵/۲۴	-۲/۵۸
VPMC4	۹۶/۲۲	۹۵/۹۴	۹۰/۸۸	۸/۴۴	۵/۸۴	۶/۸۱	۳۳/۳۳	۳۵/۴۸	۲۶/۳۲	-۰/۳۱	-۵/۲۱	-۲/۵۵
MVPMC4	۹۶/۲۲	۹۵/۹۴	۹۰/۸۸	۸/۴۴	۵/۸۴	۶/۸۱	۳۳/۳۳	۳۵/۴۸	۲۶/۳۲	-۰/۳۱	-۵/۲۱	-۲/۵۵
VPMC4-1	۹۶/۲۲	۹۵/۹۴	۹۰/۸۸	۸/۴۴	۵/۸۴	۶/۸۱	۳۳/۳۳	۳۵/۴۸	۲۶/۳۲	-۰/۳۱	-۵/۲۱	-۲/۵۵
VPMC4-H	۹۶/۲۳	۹۵/۹۸	۹۰/۹۰	۸/۴۷	۵/۹۰	۶/۸۳	۳۳/۳۳	۳۵/۴۸	۲۶/۳۲	-۰/۳۰	-۵/۱۹	-۲/۵۴
VPM3	۹۵/۵۹	۹۶/۰۴	۹۰/۳۴	۸/۳۴	۵/۷۷	۶/۷۰	۳۳/۳۳	۳۵/۴۸	۲۶/۳۲	-۰/۱۳	-۵/۱۰	-۲/۳۴
VPM4	۹۵/۵۹	۹۶/۰۴	۹۰/۳۴	۸/۳۴	۵/۷۷	۶/۷۰	۳۳/۳۳	۳۵/۴۸	۲۶/۳۲	-۰/۱۳	-۵/۱۰	-۲/۳۴
Kinematic wave	۸۷/۶۴	۹۱/۹۴	۸۲/۸۷	۱/۸۷	-۰/۸۷	۱/۷۸	۳۳/۳۳	۳۵/۴۸	۲۶/۳۲	-۰/۲۰	-۴/۹۱	-۲/۳۰
Dynamic wave	۹۵/۳۷	۹۵/۹۲	۸۹/۹۶	۶/۸۷	۴/۵۳	۵/۶۹	۳۳/۳۳	۳۵/۴۸	۲۶/۳۲	-۰/۱۳	-۵/۱۱	-۲/۴۲



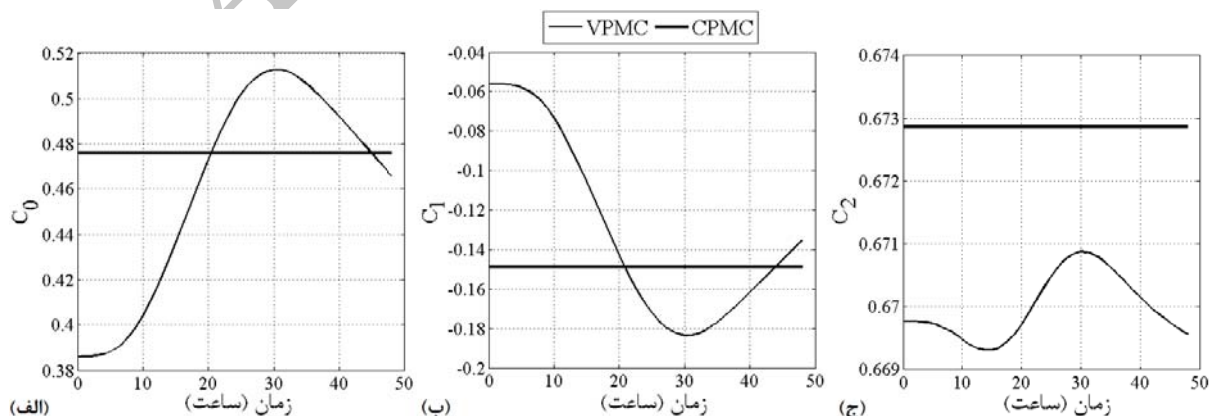
شکل ۹- اثرات نادیده گرفتن مقادیر منفی پارامتر X برای گام مکانی الف) یک و ب) بیست کیلومتر

### ۵-۲-۳- اثرات متغیر بودن پارامترها

برای نشان دادن تفاوت میان شمای پارامترهای ثابت و متغیر روش ماسکینگام کونژ پدیده پایین آمدگی در شاخه صعودی هیدروگراف رخ می‌دهد. این پدیده شامل افت مقدار دبی در چند گام زمانی نخست نسبت به مقدار جریان دائمی که قبل از شروع سیلاب در جریان بوده است، می‌باشد. (Tang et al. (1999) برای جلوگیری از رخ دادن پدیده پایین آمدگی، در طی آزمایشات عددی در کانال مصنوعی، مقادیر دبی محاسباتی کمتر از دبی پایه را برابر دبی پایه در نظر گرفتند. نتایج آنها نشان داد که در صورتیکه از رخ دادن این پدیده جلوگیری شود تغییر قابل توجهی در نتایج هیدروگراف خروجی ایجاد نمی‌شود. (Perumal and Sahoo (2007) نشان دادند که می‌توان از رخ دادن این پدیده با اقداماتی چون انتخاب مناسب گام مکانی جلوگیری شود. بر اساس نتایج آنها می‌توان گفت مقادیر کم گام مکانی در مقایسه با طول بازه روندیابی از رخ دادن این پدیده جلوگیری می‌کند. بررسی پدیده پایین آمدگی در سیلاب‌های رودخانه کارون نشان می‌دهد که این پدیده نامطلوب برای مقادیر مختلف ابعاد شبکه محاسباتی در این سیلاب‌ها رخ نمی‌دهد.

### ۵-۲-۲- پدیده پایین آمدگی

برای نشان دادن تفاوت میان شمای پارامترهای ثابت و متغیر روش ماسکینگام کونژ پدیده پایین آمدگی در شاخه صعودی هیدروگراف رخ می‌دهد. این پدیده شامل افت مقدار دبی در چند گام زمانی نخست نسبت به مقدار جریان دائمی که قبل از شروع سیلاب در جریان بوده است، می‌باشد. (Tang et al. (1999) برای جلوگیری از رخ دادن پدیده پایین آمدگی، در طی آزمایشات عددی در کانال مصنوعی، مقادیر دبی محاسباتی کمتر از دبی پایه را برابر دبی پایه در نظر گرفتند. نتایج آنها نشان داد که در صورتیکه از رخ دادن این پدیده جلوگیری شود تغییر قابل توجهی در نتایج هیدروگراف خروجی ایجاد نمی‌شود. (Perumal and Sahoo (2007) نشان دادند که می‌توان از رخ دادن این پدیده با اقداماتی چون انتخاب مناسب گام مکانی جلوگیری شود. بر اساس نتایج آنها می‌توان گفت مقادیر کم گام مکانی در مقایسه با طول بازه روندیابی از رخ دادن این پدیده جلوگیری می‌کند. بررسی پدیده پایین آمدگی در سیلاب‌های رودخانه کارون نشان می‌دهد که این پدیده نامطلوب برای مقادیر مختلف ابعاد شبکه محاسباتی در این سیلاب‌ها رخ نمی‌دهد.



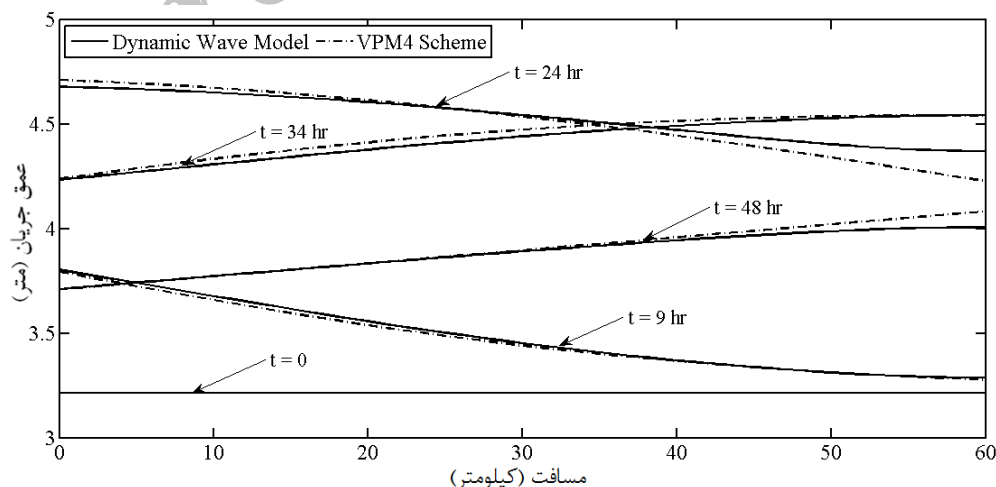
شکل ۱۰- تغییرات پارامترهای الف)  $C_0$ ، ب)  $C_1$  و ج)  $C_2$  در طول زمان

#### ۵-۲-۴- بررسی تغییرات عمق در طول بازه

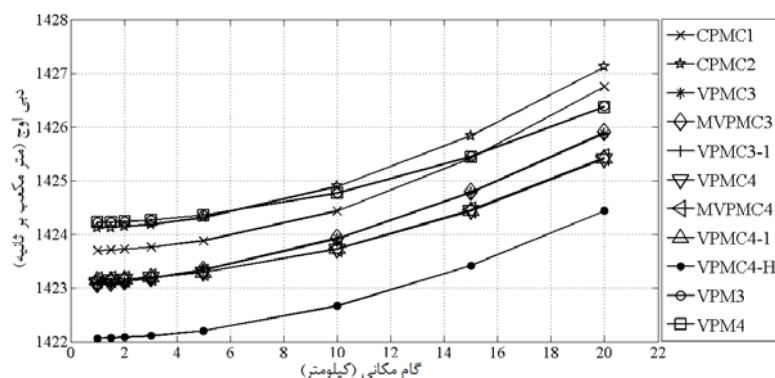
اهمیت آگاهی از تغییرات عمق در طول بازه برای پهنه‌بندی سیلاب روشن می‌باشد. همانطور که قبلاً اشاره شد روش ماسکینگام با پارامترهای متغیر همانند روش موج دینامیکی قابلیت روندیابی عمق همزمان با دبی را دارا می‌باشد (Perumal and Ranga Raju, 1998a,b). مقایسه این دو روش از نظر تغییرات عمق در طول بازه در شکل ۱۱ برای سیلاب شماره ۲ نشان داده شده است. طبق محاسبات صورت گرفته حداکثر اختلاف بین نتایج دو روش در حدود سه درصد می‌باشد. این میزان خطا در محاسبه عمق برای روش VPM در مقایسه با روش موج دینامیکی که محاسبات و روند مدل کردن به مراتب پیچیده‌تر و همچنین داده‌های ورودی بیشتری دارد، قابل اغماض است. با توجه به شکل ۱۱ می‌توان چگونگی تغییرات عمق را مورد بررسی قرار داد. به این ترتیب که در زمان صفر با توجه به شرط مرزی آغازین، جریان به صورت یکنواخت می‌باشد. سپس مقدار عمق در بالادست بر اثر وقوع سیل افزایش می‌یابد ( $t=9$  hr)، با افزایش ارتفاع آب مقداری از حجم آب وارد شده به بالادست در بازه مورد نظر ذخیره و لذا مقدار آب خروجی و ارتفاع آب در پایین دست در هر لحظه کمتر از مقادیر مشابه در بالادست خواهد بود ( $t=24$  hr). حال چنانچه مقدار دبی در بالادست شروع به کاهش نماید، دبی خروجی از پایین دست افزایش می‌یابد ( $t=34$  hr). هنگامی که مقدار دبی ورودی به منطقه و خروجی از آن مساوی یکدیگر گردیدند، حجم آب ذخیره شده بتدریج رها شده و لذا دبی و ارتفاع در پایین دست بیشتر از مقادیر مشابه در بالادست خواهند بود ( $t=48$  hr).

#### ۵-۲-۵- اثرات تغییر فواصل گره‌های شبکه محاسباتی

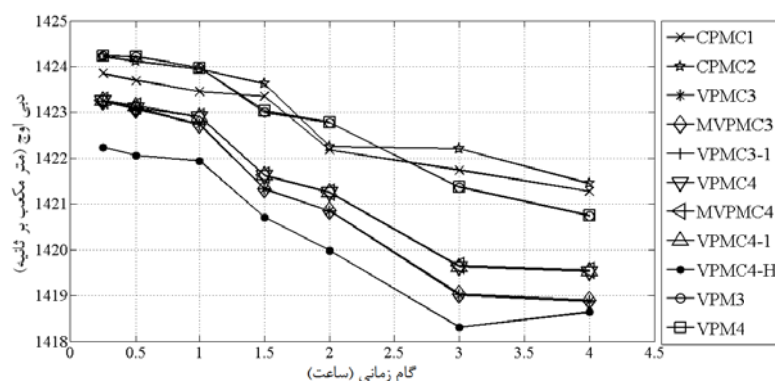
در این بخش اثرات تغییر گام‌های زمانی و مکانی بر روی نتایج شماهای مختلف روش ماسکینگام کونژ تعیین شده است. به این ترتیب که در ابتدا به ازای یک مقدار ثابت  $\Delta t$  و مقادیر مختلف  $\Delta x$  مدل‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند. در ادامه این کار به ازای یک مقدار ثابت  $\Delta x$  و مقادیر مختلف  $\Delta t$  تکرار شده است، نتایج برای گام‌های مکانی و زمانی مختلف برای سیلاب شماره ۲ به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج این آزمایشات می‌توان گفت: (۱) با افزایش گام مکانی مقدار دبی اوج،  $Q_{p0}$ ، افزایش می‌یابد. در حالی که با افزایش گام زمانی این مقدار به صورت نوسانی با کاهش روبرو می‌شود. (۲) در گام‌های مکانی مختلف شماهای مختلف VPM و VPMC مقادیر کاملاً یکسانی برای زمان تا اوج محاسبه می‌کنند. این در حالی است که برای گام‌های زمانی مختلف مقدار زمان تا اوج دارای تغییراتی هرچند اندک می‌باشد. (۳) حساسیت نتایج نسبت به تغییرات گام زمانی بیشتر از تغییرات گام مکانی است. (۴) با تغییر  $\Delta t$  تلفات حجم دچار نوساناتی می‌شود. این موضوع در حالی است که با تغییر  $\Delta x$  تلفات حجم تغییر محسوسی نمی‌کند. (۵) بررسی پدیده پایین آمدگی نشان می‌دهد برای هیچ یک از ترکیب‌های گام‌های مکانی و زمانی این پدیده نامطلوب رخ نمی‌دهد. (۶) بررسی تغییرات معیار واریانس تشریح شده (Nash and Sutcliffe, 1970) متناسب با تغییر  $\Delta t$  نشان می‌دهد که هماهنگی نتایج با مقادیر مشاهداتی در یک مقدار مشخص گام زمانی پهنه می‌باشد، به این صورت که با افزایش  $\Delta t$  تا مقدار معینی  $\eta d$  نیز افزایش می‌یابد و در ادامه با افزایش  $\Delta t$  معیار  $\eta d$  با کاهش روبرو می‌شود.



شکل ۱۱- نمودار تغییرات عمق در طول بازه به ازای زمان‌های مختلف



شکل ۱۲- مقایسه شمای مختلف روش ماسکینگام کوئز برای گام‌های مکانی مختلف



شکل ۱۳- مقایسه شمای مختلف روش ماسکینگام کوئز برای گام‌های زمانی مختلف

خصوصاً در پیش‌بینی مقدار فروکش اوج سیلاب برخوردار می‌باشد. تجزیه و تحلیل نتایج شمای مختلف روش ماسکینگام کوئز برای سیلاب‌های مشاهداتی رودخانه کارون نشان دهنده این موضوع است که نتایج شمای سه نقطه با هم و نتایج شمای چهار نقطه‌ای با هم تفاوت چندانی نمی‌کنند. با این وجود می‌توان گفت شمای چهار نقطه‌ای نسبت به شمای سه نقطه‌ای اندکی بقای حجم را بهبود می‌دهند. به‌علاوه روش VPM از لحاظ هماهنگی با روش موج دینامیکی بهترین نتایج را نسبت به تمامی روش‌ها از خود نشان می‌دهد. بررسی تغییرات ابعاد شبکه محاسباتی نشان می‌دهد که به طور کلی نتایج حساسیت کمی نسبت به تغییر گام‌های مکانی و زمانی دارند. با این حال حساسیت نتایج نسبت به تغییر گام زمانی بیشتر از تغییر گام مکانی می‌باشد. با در نظر گرفتن تمامی این مسائل باید این نکته را در نظر داشته باشیم که روش ماسکینگام کوئز روشی تقریبی است چرا که معادلات حاکم به صورت کامل در آن در نظر گرفته نشده‌اند. همچنین این روش نسبت به روش موج دینامیکی قادر به در نظر گرفتن اثرات آب برگشتی نمی‌باشد. در نهایت می‌توان گفت در حوضه‌های که داده‌های مورد نیاز برای روش موج دینامیکی در دسترس نمی‌باشد، مهندسین می‌توانند از شمای مختلف مورد بحث بخصوص الگوهای VPM با اطمینان قابل قبول، حداقل اطلاعات ورودی، بدون نیاز به واسنجی برای تعیین

برای سیلاب‌های مورد استفاده در این تحقیق مقدار گام زمانی برابر یک ساعت بهترین نتایج را از لحاظ این معیار نشان می‌دهد. با این وجود برای بقیه مقادیر گام زمانی نیز نتایج از دقت بالای برخوردار می‌باشند. (۷) یکی از مزایای عمده روش ماسکینگام کوئز نسبت به روش‌های همچون روش مشخصات، روش‌های المان محدود و تفاضل محدود موج دینامیکی، (براتی، ۱۳۸۹) کمتر بودن حساسیت نتایج نسبت به تغییر ابعاد شبکه محاسباتی می‌باشد.

## ۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر شمای مختلف روش ماسکینگام کوئز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. روش ماسکینگام کوئز نسبت به روش‌های هیدرولوژی روندیابی سیل مانند روش ماسکینگام، کانوکس و آت‌کین اصلاحی نیازی به واسنجی پارامترهای روندیابی بر اساس سیلاب‌های گذشته ندارد. از طرف دیگری روش ماسکینگام کوئز در قیاس با روش موج دینامیکی با اطلاعات ورودی کمتر و همچنین نداشتن محاسبات پیچیده کارایی مناسبی از خود نشان می‌دهد. به‌علاوه این روش نسبت به روش‌های ساده شده هیدرولیکی همانند روش موج سینماتیکی که از لحاظ داده‌های مورد نیاز و همچنین سطح محاسباتی تقریباً مشابه می‌باشند، از کارایی به مراتب بالاتری

Maidment, D. R., (1993), "Handbook of Hydrology." Chapter 10: Flood Routing, McGraw-Hill Book Company.

Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V., (1970), "River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles." *Journal of Hydrologic, Amsterdam*, 10(3), pp. 282–290.

Perumal, M., (1994a), "Hydrodynamic derivation of a variable parameter Muskingum method: 1. Theory and solution procedure." *Hydrological Sciences Journal*, 39(5), pp. 431–442.

Perumal, M., (1994b), "Hydrodynamic derivation of a variable parameter Muskingum method: 2. Verification." *Hydrological Sciences Journal*, 39(5), pp. 443–458.

Perumal, M., and Ranga Raju, K.G. (1998a). "Variable-parameter stage hydrograph routing method, I: Theory." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 3(2), pp. 109–114.

Perumal, M., and Ranga Raju, K.G. (1998b). "Variable-parameter stage hydrograph routing method, II: Evaluation." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 3(2), pp. 115–121.

Perumal, M., Sahoo, B., (2007), "Volume Conservation Controversy of the Variable Parameter Muskingum–Cunge Method." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 134(4), pp. 475–485.

Ponce, V. M and Yevjevich, V., (1978), "Muskingum Cunge method with variable parameters." *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, 104(12), pp. 1663–1667.

Ponce, V. M., (1989), "Engineering Hydrology." Principles and Practices. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 270p.

Sturm, T. W., (2001), "Open Channel Hydraulics." Chapter 9: Simplified Methods of Flow Routing, McGraw-Hill Book Company, 493p.

Tang, X.N., Knight, D.W and Samuels, P.G., (1999), "Volume conservation in variable parameter Muskingum-Cunge method." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(6), pp. 610–620.

Tewolde, M.H and Smithers, J.C., (2006), "Flood routing in ungauged catchments using Muskingum methods." *Water SA*, 32(3), pp. 379–388.

Wilson, BN., and Ruffini, JR., (1988), "Comparison of physically-based Muskingum methods." *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 31(1), pp. 91–97.

پارامترهای روندیابی براساس سیلاب‌های گذشته و سهولت محاسباتی بالا در طراحی‌ها استفاده نمایند.

## پی‌نوشت‌ها

- 1- Watercourse
- 2- Saint-Venant Equations
- 3- Courant Number
- 4- Diffusion Coefficient
- 5- Rating Curve
- 6- Matrix Laboratory
- 7- Reference Discharge
- 8- Constant Parameter Muskingum Cunge (CPMC)
- 9- Variable Parameter Muskingum Cunge (VPMC)
- 10- Variable Parameter Muskingum (VPM)
- 11- Steady Flow
- 12- Dynamic Wave
- 13- Newton–Raphson Method
- 14- Kinematic Wave
- 15- Variance Explained
- 16- Attenuation
- 17- Lag
- 18- Conservation of Mass
- 19- Dip

## ۷- مراجع

براتی، ر. (۱۳۸۹)، بررسی روش‌های روندیابی سیل در آبراهه‌های طبیعی، پایان نامه کارشناسی ارشد عمران-مهندسی آب، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

Akan, A.O., (2006), "Open Channel Hydraulics." Chapter 8: Introduction to Unsteady Open-Channel Flow, Elsevier, 364p.

ASCE Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models of the Watershed Management Committee, Irrigation and Drainage Division., (1993), "Criteria for evaluation of watershed models." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 119(3), pp. 429–442.

Cappelaere, B., (1997), "Accurate diffusive wave routing." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 123(3), pp. 174–181.

Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W., (1988), "Applied Hydrology." Chapter 10: Dynamic Wave Routing, McGraw-Hill International Editions, 572p.

Cunge, J. A., (1969), "On the subject of a flood propagation computational method (Muskingum method)." *Journal of Hydraulic Research, Delft, The Netherlands*, 7(2), pp. 205–230.

Henderson, F. M., (1966), "Open channel flow." Chapter 9: Flood Routing, Macmillan, New York, 522p.