

روندیابی هیدرولیکی سیلاب به روش موج دینامیک و مقایسه با روندیابی هیدرولوژیکی ماسکینگام خطی و غیرخطی (مطالعه موردی : ليقوان چای)

ابوالفتح اولادغفاری¹، احمد فاخری فرد^{2*}، امیر حسین ناظمی² و محمد علی قربانی³

تاریخ دریافت: 87/10/10 تاریخ پذیرش: 88/2/9

1- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

2 و 3- دانشیار و استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبه Email: fakhari@tabrizu.ac.ir

چکیده

روندیابی جریان یک روش ریاضی برای پیش‌بینی تغییرات حجم، سرعت و شکل یک موج سیل در یک کانال به صورت تابعی از زمان می‌باشد که اهمیت زیادی در مهندسی رودخانه، کنترل و کاهش خطرات سیل، حفاظت رودخانه، مدل‌سازی جریان در مخازن و سرریزها دارد. حل مسئله روندیابی سیلاب بسته به شرایط و اطلاعات موجود از رودخانه می‌تواند به روش‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی انجام پذیرد. در تحقیق حاضر روندیابی هیدرولیکی با استفاده از روش تفاضلات محدود 4 نقطه‌ای ماسکینگام بر مبنای معادله موج دینامیک سنت-ونانت انجام پذیرفت. بعلاوه، روش‌های هیدرولوژیکی ماسکینگام به صورت مدل‌های خطی و غیرخطی به منظور مقایسه بکار گرفته شد که در آن برای تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام از روش کمترین مربعات خطاها استفاده شد. در مسیر مهران رود بین ایستگاه‌های هیدرومتری ليقوان و هروی با استفاده از هیدروگراف‌های ورودی بالادست (ایستگاه ليقوان) و هیدروگراف‌های خروجی پایین دست (ایستگاه هروی) سه رویداد سیل برای روندیابی سیلاب انتخاب گردید. در روندیابی هیدرولیکی با استفاده از هیدروگراف ورودی و مشخصات هیدرولیکی مسیر، هیدروگراف خروجی بدست آمد. مشخصات هیدرولیکی بکار گرفته شده در این روش شامل شیب طولی، شیب دیواره‌های جانبی، عرض کف و طول مسیر می‌باشد. در روندیابی هیدرولوژیکی یکی از هیدروگراف‌های سیلاب ورودی به انضمام هیدروگراف سیلاب خروجی مربوطه جهت محاسبه پارامترهای مدل‌های خطی و غیرخطی ماسکینگام بکارگرفته شد. سپس پارامترهای نتیجه شده برای ارزیابی برآزش نکویی مدل‌ها با بکارگیری دو رویداد دیگر سیلاب ورودی و خروجی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که هیدروگراف‌های خروجی بدست آمده از روندیابی هیدرولیکی به روش موج دینامیک (روش تفاضلات محدود 4 نقطه‌ای ماسکینگام) سازگاری و تطبیق بیشتری با هیدروگراف خروجی مشاهداتی در مقایسه با روش‌های هیدرولوژیکی ماسکینگام دارند. همچنین کارایی ضعیف مدل خطی در مقایسه با مدل‌های غیرخطی ماسکینگام مشاهده گردید.

واژه‌های کلیدی: روندیابی هیدرولیکی، روندیابی هیدرولوژیکی، مدل ماسکینگام، موج دینامیک

Hydraulic Flood Routing Using Dynamic Wave Method and Comparison with Linear and Nonlinear Hydrologic Muskingum Routing Methods (Case Study: Lighvan-Chai)

A Oladghaffari¹, A Fakheri-Fard², AH Nazemi² and MA Ghorbani³

Received: 30 December 2008 Accepted: 29 April 2009

1- Former MSc Student, Dept. of Water Engin., Univ. of Tabriz, Iran.

2,3- Assoc. and Assist. Prof., Dept. of Water Engin., Univ. of Tabriz, Iran.

* Corresponding author: Email: fakhari@tabrizu.ac.ir

Abstract

Flow routing is a mathematical procedure for predicting volume change, speed, and shape of a flood wave in a channel as a function of time which is of great importance in river engineering, flood control and hazard reduction, river conservation, and modeling of flow in weirs and reservoirs. The solution of flood routing can be carried out using hydrologic or hydraulic procedure depending on conditions and existing information. In this research, hydraulic routing was carried out using 4-point finite difference Muskingum method based on St Venant dynamic wave equations. Furthermore, Muskingum linear and nonlinear hydrological approaches were applied for the purpose of comparing results of the methods and the parameters of Muskingum models were estimated using least square errors procedure. Along the reach of Mehranrood between Lighvan and Hervi hydrometer stations using upstream input hydrographs (Lighvan station) and downstream output hydrographs (Hervi station) 3 flood events were selected for flood routing. In hydraulic routing procedure, output hydrograph was obtained using input hydrograph and hydraulic characteristics of the reach. Hydraulic characteristics used in this method were longitudinal slope, side slope, bottom width and length of reach. In hydrologic routing procedure, one of the input flood hydrographs associated with the related output one were used for estimation of linear and nonlinear Muskingum models parameters. The resulted parameters then were used to evaluate the goodness of fit of the models by application of the two other input and output flood hydrographs. Results showed that hydraulic flood routing using dynamic wave method (4-point finite difference Muskingum method) was more compatible with the observed output hydrograph than Muskingum hydrological methods. Weak efficiency of the linear Muskingum model was also observed in comparison with the nonlinear one.

Keywords: Dynamic wave, Hydraulic routing, Hydrological routing, Muskingum model

مقدمه

یکی از معضلات کشور در زمینه مطالعات روندیابی سیلاب، عدم دسترسی به آمار و اطلاعات کامل در مورد رودخانه‌ها و تعداد محدود ایستگاه‌های هیدرومتری است که استفاده از روش‌های نیازمند آمار کامل و دقیق را با مشکلاتی مواجه می‌سازد. سیل یک جریان غیردائمی است که برای حل مسائل مربوط به آن می‌توان از روش‌های مختلف هیدرولیکی و هیدرولوژیکی استفاده نمود. اهمیت و لزوم استفاده از روش‌های هیدرولیکی را می‌توان در عدم نیاز این روش‌ها به آمار و داده‌های مقاطع خروجی بیان کرد. اگر مشخصات و اطلاعات هیدرولیکی به دقت تعیین شوند، نیازی به داده‌های مقطع خروجی نخواهد بود و از طریق روندیابی هیدرولیکی در هر مقطعی این داده‌ها قابل حصول است و داده‌های خروجی یک مقطع صرفاً برای صحت‌سنجی کاربرد خواهند داشت.

روندیابی سیلاب با روش‌های هیدرولوژیکی تقریباً ساده بوده و از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشند ولی نیاز به داده‌های هیدروگراف ورودی و خروجی متعدد دارند. روندیابی در مخزن و رودخانه دو کاربرد مهم روندیابی هیدرولوژیکی می‌باشند. در روندیابی مخزن از روش‌هایی استفاده می‌گردد که تغییرات دبی سیل ضمن عبور از یک مخزن مورد مطالعه قرار می‌گیرد و در روندیابی رودخانه حرکت سیل ضمن عبور از رودخانه بررسی می‌گردد (لینسلی و همکاران 1982). روش‌های متعددی برای روندیابی رودخانه‌ای وجود دارد که مشهورترین و پرکاربردترین آنها روش ماسکینگام است (چاو 1973). این روش ابتدا توسط مکارتی (1938) برای مطالعات کنترل سیلاب در حوضه رودخانه ماسکینگام ایالت اوهایو آمریکا بکار گرفته شد که یک مدل خطی است. لینسلی و همکاران (1982) مدل غیرخطی¹ و گیل (1978) مدل غیرخطی² ماسکینگام را ارائه کرده‌اند. روش نخستین برای تخمین پارامترها در مدل خطی براساس روش آزمون و خطای

ترسیمی می‌باشد که در بسیاری از مراجع از قبیل ویلسون (1985) ارائه شده است. برای مدل‌های غیرخطی، گیل (1978) از تکنیک تخمین سه نقطه‌ای استفاده کرده است که مستلزم حل یک دستگاه معادلات روندیابی غیرخطی چند مجهولی در هر نقطه زمانی می‌باشد و انتخاب این سه نقطه زمانی برای تخمین پارامتر اختیاری است. تونگ (1985) سه روش: 1- رگرسیون خطی (LR)، 2- شیب ترکیبی (CG) و 3- داویدون-فلنتچر-پاول (DFP) را برپایه تحقیقات الگویی هوک و ژیوز (HJ) برای تخمین پارامترهای مدل غیرخطی² پیشنهاد کرده است. یون و پادمانابهان (1993) از یک روشی استفاده کردند که مجموع باقیمانده مربعات بین ذخیره واقعی و ذخیره وزنی جریان را کمینه می‌کند و این روش NONLR¹ نامیده می‌شود. برای تخمین پارامترها در مدل‌های غیرخطی، موهان (1997) روش الگوریتم ژنتیک (GA) را بکار برد. داس (2004) برای مدل‌های خطی و غیرخطی از تابع هدف و ضریب لاگرانژ استفاده کرد و گیم (2006) برای تخمین پارامترهای مدل‌های غیرخطی روش BFGS² را بکار برده است. نیازی و همکاران (1387) با مقایسه روش‌های کلارک و ماسکینگام نشان دادند که هر دو روش، مقادیر دبی اوج و زمان رسیدن به آن را نسبت به مقادیر مشاهده شده کمتر پیش‌بینی می‌کنند و روندیابی با روش ماسکینگام عملکرد بهتری از حیث شبیه‌سازی هیدروگراف خروجی نسبت به روش کلارک دارد.

روندیابی سیلاب با روش‌های هیدرولیکی پیچیده بوده و دارای مراحل زیادی می‌باشند. در این روندیابی به اطلاعات سالهای قبل نیاز نیست ولی اطلاعات هیدرولیکی کانال مورد نیاز است. سه قانون بقاء جرم، اندازه حرکت و انرژی معرف هیدرولیک جریان در کانالهای باز می‌باشند که مجموعه این معادلات در

¹ Non Linear² Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno

(1992) روش ماسکینگام با پارامترهای متغیر برای روندیابی سیل در یک کانال را پیشنهاد کردند. در این روش گام زمانی از ساده‌سازی معادلات سنت-ونانت بدست آمده است. پونس و لاگو (2001) مدل مدرج حلقوی¹ را در روندیابی ماسکینگام - کونج ارائه دادند. در این تحقیق با معرفی یک روش جدید برای روندیابی سیل به نام روش 4 نقطه‌ای تفاضلات محدود ماسکینگام (موج دینامیک) و مقایسه آن با روندیابی هیدرولوژیکی ماسکینگام خطی و غیرخطی، یک دید کلی از عملکرد روش‌ها حاصل خواهد شد. با توجه به تعداد محدود ایستگاه‌های هیدرومتری و رودخانه‌های فاقد آمار کشور روندیابی با این روش کارآمدی زیادی خواهد داشت و همچنین با توجه به شباهت روش 4 نقطه‌ای تفاضلات محدود ماسکینگام به روش ماسکینگام، استفاده آن برای جامعه مهندسی کشور آسان‌تر از دیگر روش‌های هیدرولیکی خواهد بود.

مواد و روش‌ها

روندیابی هیدرولیکی به روش موج دینامیک

معادلات سنت-ونانت شامل معادله پیوستگی (رابطه 1) و اندازه حرکت (رابطه 2) می‌باشد و با توجه به اینکه چه تعداد از عبارتهای معادله اندازه حرکت در معادلات سنت-ونانت به هنگام روندیابی سیلاب استفاده می‌شوند، سه روش برای حل مسائل روندیابی سیل در رودخانه وجود دارد که عبارتند از: 1- موج سینماتیک، 2- موج پخشیدگی و 3- موج دینامیک.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad [1]$$

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$$

$$\text{Kinematic} \rightarrow [2]$$

$$\text{Diffusion} \rightarrow$$

$$\text{Dynamic} \rightarrow$$

حالات غیرماندگار بصورت معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی و تحت عنوان معادلات سنت-ونانت نامیده شده و روندیابی هیدرولیکی سیلاب براساس این معادلات انجام می‌شود (صالحی و تقدیسیان 1376). مرتی (1979) الگوی لامبدا را پیشنهاد کرد که در آن ابتدا معادلات حاکم به شکل λ تبدیل شده و سپس براساس علامت جهت‌های مشخص منقطع می‌شوند که در نتیجه آن علامت جهت صحیح بر آنها تحمیل می‌شود. این روش امکان محاسبه جریانهای زیر بحرانی و فوق بحرانی را می‌دهد. الگو لامبدا توسط فنما و چادری (1986) برای تحلیل جریانهای غیردائم در کانالهای باز مورد استفاده قرار گرفت. وانگ و چن (2003) برای حل عددی معادلات سنت-ونانت از نماد I استفاده کردند. در این روش معادلات کامل سنت-ونانت برای تخمین سرعت جریان و عمق آب در کانالهایی با طولهای مختلف، با فرض زبری و شیب‌های متفاوت حل می‌شوند. نتایج آنها نشان داد که عدد فرود تنها از زبری و شیب کانال تأثیر می‌پذیرد و مستقل از سرعت و عمق جریان می‌باشد. کونج (1969) با استفاده از روش تفاضلات محدود 4 نقطه‌ای معادله موج پخشیدگی را درست کرد که بسیار شبیه به مدل ماسکینگام می‌باشد. او نشان داد که تفاوت بین تقریب تفاضلات محدود معادله دیفرانسیلی و معادله خودش می‌تواند با استفاده از بسط سری تیلور تعیین شود و با تطبیق پخشیدگی عددی و فیزیکی، می‌توان روش ماسکینگام را به نحوی اصلاح کرد که در آن پارامترهای روندیابی از روی مشخصات فیزیکی رودخانه محاسبه شوند که این روش به نام ماسکینگام - کونج مشهور است. کوسیسی (1980) محاسبات مکانی منقطع کردن را بوسیله باقیمانده تابع پیوستگی برای مشتق‌های زمانی، با استفاده از نماد وزنی برای مشتق زمان، و فرض تغییرات خطی جریان در گام زمانی، انجام داد و یک شکل عمومی از روش ماسکینگام را بدست آورد که پارامترها با دبی جریان تعریف می‌شوند. وانگ و سینگ

در این روابط t زمان، S_f شیب خط انرژی که از رابطه شزی، رابطه [8]، بدست می‌آید، S_0 شیب کف کانال، h ارتفاع سطح آب، g شتاب ثقل زمین، Q دبی جریان، q دبی جانبی ورودی یا خروجی در طول کانال و x طول، a شیب جانبی، B_0 عرض کف کانال، Fr عدد فرود، c ضریب شزی است و پارامتر p در رابطه [6] بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$p = 1 - \frac{Fr^2}{4} \frac{B_0 + ah}{B_0 + 2ah} \quad [7]$$

$$S_f = \frac{Q^2}{c^2 h^3 (B_0 + ah)^2} \quad [8]$$

معادله [6] نوعی از معادله سهموی انتقال-پخش غیرخطی است که دو شرط مرزی در هر بازه از کانال دارد. هیدروگراف ورودی بجای شرایط مرزی بالادست و $\frac{\partial Q}{\partial x}(L, t) = 0$ بجای شرایط مرزی پایین دست بکار برده می‌شود. با استفاده از روش سلول-مخلوط² (وانگ و همکاران 2003) معادله فوق در مکان منقطع شده و با نگهداری زمان بصورت پیوسته، معادله دیفرانسیلی معمولی نتیجه می‌شود و Δx جزء خصوصیات کانال می‌گردد. معادله حاصله از روش تفاضلات محدود 4 نقطه‌ای با وزن‌های متغیر روی پلان $x-t$ منقطع و شکل تفاضلات محدود 4 نقطه‌ای ماسکینگام که بصورت رابطه [9] است، بدست می‌آید (وانگ و همکاران 2006).

$$Q_i^{k+1} = C_1 Q_i^k + C_2 Q_{i-1}^{k+1} + C_3 Q_{i-1}^k + C_4 q \quad [9]$$

در این روابط i موقعیت نقاط نسبت به x ، k موقعیت زمانی نقاط (شکل 1)، Q دبی جریان، q دبی جانبی ورودی یا خروجی در طول کانال و ضرایب C به صورت زیر تعریف می‌شوند:

که در آن A سطح مقطع، t زمان، V سرعت جریان، S_f شیب انرژی، S_0 شیب کف کانال، h ارتفاع سطح آب، g شتاب ثقل زمین، Q دبی جریان، q دبی ورودی یا خروجی در طول کانال و x طول کانال است (مایز 2001). عدد فرود می‌تواند از شیب و زبری کانال محاسبه گردد که در نتیجه معادله اندازه حرکت و پیوستگی سنت-ونانت برای یک کانال نوردقه‌ای به ترتیب بصورت زیر خواهند بود (وانگ و همکاران 2006):

$$\left(1 - \frac{Fr^2}{4} \frac{B_0 + ah}{B_0 + 2ah}\right) \frac{\partial h}{\partial x} = S_0 - S_f \quad [3]$$

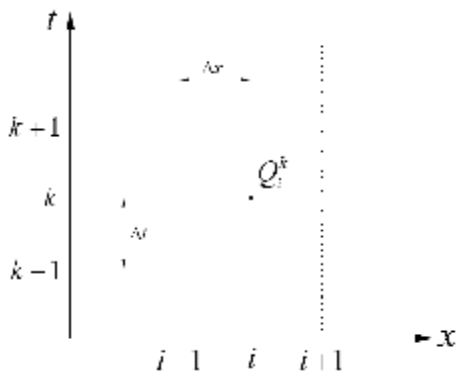
$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{q}{B_0 + 2ah} - \frac{1}{B_0 + 2ah} \frac{\partial Q}{\partial x} \quad [4]$$

با مشتقگیری از رابطه [4] نسبت به x و فرض $\frac{\partial q}{\partial x} = 0$ و $(\partial h / \partial x)(\partial Q / \partial x) = 0$ خواهیم داشت:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right) = - \frac{2aq}{(B_0 + 2ah)^2} \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{(B_0 + 2ah)} \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad [5]$$

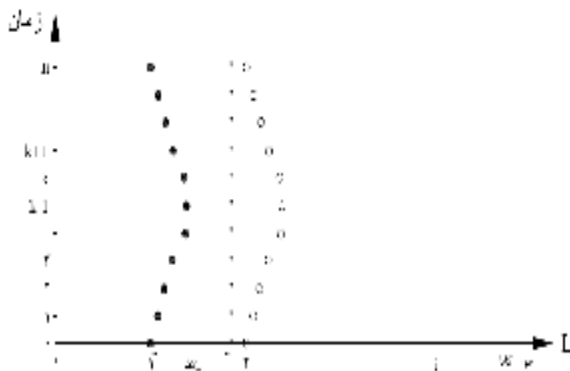
با مشتقگیری از رابطه‌ی [3] نسبت به زمان t و جاگذاری در رابطه [5]، رابطه [6] که یک معادله انتقال-پخش¹ غیرخطی است، بدست خواهد آمد.

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} &= \frac{pQ}{2(B_0 + 2ah)S_f} \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \\ &- \left(\frac{Fr^2 a B_0 Q}{8p(B_0 + 2ah)^2} \frac{S_f - S_0}{S_f} + \frac{3Q}{2h} + \frac{aQ}{B_0 + ah} \right) \\ &\times \frac{1}{B_0 + 2ah} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{(3B_0 + 5ah)Qq}{2h(B_0 + 2ah)(B_0 + ah)} \\ &+ \frac{aQ}{(B_0 + 2ah)^2} \frac{S_0 - S_f}{S_f} \left(q - \frac{Fr^2 B_0 q}{8p(B_0 + 2ah)} \right) \end{aligned} \quad [6]$$



شکل 1- موقعیت مکانی و زمانی دبی جریان در طول کانال

بدلیل اینکه مقادیر Δx بدست آمده برای مقادیر جریان در زمانهای مختلف (یعنی k های مختلف) یکی نیستند با درونیابی خطی روی پلان $x-t$ به یک هیدروگراف خروجی در مقطعی به فاصله Δx_{av} از مقطع هیدروگراف ورودی می‌رسیم (شکل 2) که در تکرار محاسبات به هیدروگراف خروجی در مقطع پایین دست مورد نظر خواهیم رسید.



شکل 2 - پلان $x-t$ برای درونیابی خطی

فلوچارت روندیابی هیدرولیکی به روش 4 نقطه‌ای تفاضلات محدود ماسکینگام (موج دینامیک) در شکل 3 نشان داده شده است.

$$C_1 = \frac{(X/\Delta t) + ((1-Y)f(Q,h))/\Delta x}{(X/\Delta t) - (Yf(Q,h))/\Delta x} \quad [10]$$

$$C_2 = \frac{(-(1-X)/\Delta t) - (Yf(Q,h))/\Delta x}{(X/\Delta t) - (Yf(Q,h))/\Delta x} \quad [11]$$

$$C_3 = \frac{((1-X)/\Delta t) - ((1-Y)f(Q,h))/\Delta x}{(X/\Delta t) - (Yf(Q,h))/\Delta x} \quad [12]$$

$$C_4 = \frac{G(Q,h)}{(X/\Delta t) - (Yf(Q,h))/\Delta x} \quad [13]$$

که در روابط فوق Δt گام‌های زمانی هیدروگراف، X فاکتور وزنی برای زمان و Y فاکتور وزنی برای مکان می‌باشند و مقادیر این دو فاکتور بین 0 تا 0/5 انتخاب می‌شود. Δx ، $f(Q,h)$ و $G(Q,h)$ نیز به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\Delta x = -\frac{pQ}{(B_0 + 2ah)S_f f(Q,h)} \quad [14]$$

$$f(Q,h) = -\left(\frac{Fr^2 B_0 a Q}{8p(B_0 + 2ah)^2} \frac{S_f - S_0}{S_f} \right) \frac{1}{B_0 + 2ah} + \frac{3Q}{2h} + \frac{aQ}{B_0 + ah} \quad [15]$$

$$G(Q,h) = \frac{(3B_0 + 5ah)Qq}{2h(B_0 + 2ah)(B_0 + ah)} + \frac{aQ}{(B_0 + 2ah)^2} \times \frac{S_0 - S_f}{S_f} \left(q - \frac{Fr^2 B_0 q}{8p(B_0 + 2ah)} \right) \quad [16]$$

اگر دبی جانبی ورودی یا خروجی نداشته باشیم ($q=0$) در این صورت $C_4 q = 0$ شده، اگر $a=0$ ، کانال تبدیل به مستطیلی و اگر $B_0=0$ ، کانال تبدیل به مثلثی شده و معادلات ساده‌تر می‌شوند.

$$S = K[xI^m + (1-x)O^m] \quad [19]$$

$$S = K[xI + (1-x)O]^m \quad [20]$$

در این روابط K ضریب ذخیره زمانی، x فاکتور وزنی بدون بعد و m نمای وابستگی می‌باشند و مقادیر x بین 0 تا 0/5 خواهد بود. این معادلات در ترکیب با معادله پیوستگی هیدرولوژیکی و در شکل تفاضلات محدود کرانک نیکلسون به ترتیب به صورت زیر در می‌آیند:

$$K[xI_{k+1} + (1-x)O_{k+1}] - K[xI_k + (1-x)O_k] - (\Delta t/2)[(I_{k+1} + I_k) - (O_{k+1} + O_k)] = 0 \quad [21]$$

$$K[xI_{k+1}^m + (1-x)O_{k+1}^m] - K[xI_k^m + (1-x)O_k^m] - (\Delta t/2)[(I_{k+1} + I_k) - (O_{k+1} + O_k)] = 0 \quad [22]$$

$$K[xI_{k+1} + (1-x)O_{k+1}]^m - K[xI_k + (1-x)O_k]^m - (\Delta t/2)[(I_{k+1} + I_k) - (O_{k+1} + O_k)] = 0 \quad [23]$$

روابط [18] و [21] برای مدل خطی، روابط [19] و [22] برای مدل غیرخطی 1 و روابط [20] و [23] برای مدل غیرخطی 2 می‌باشند که در آنها k موقعیت زمانی را نشان می‌دهد. مدل خطی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

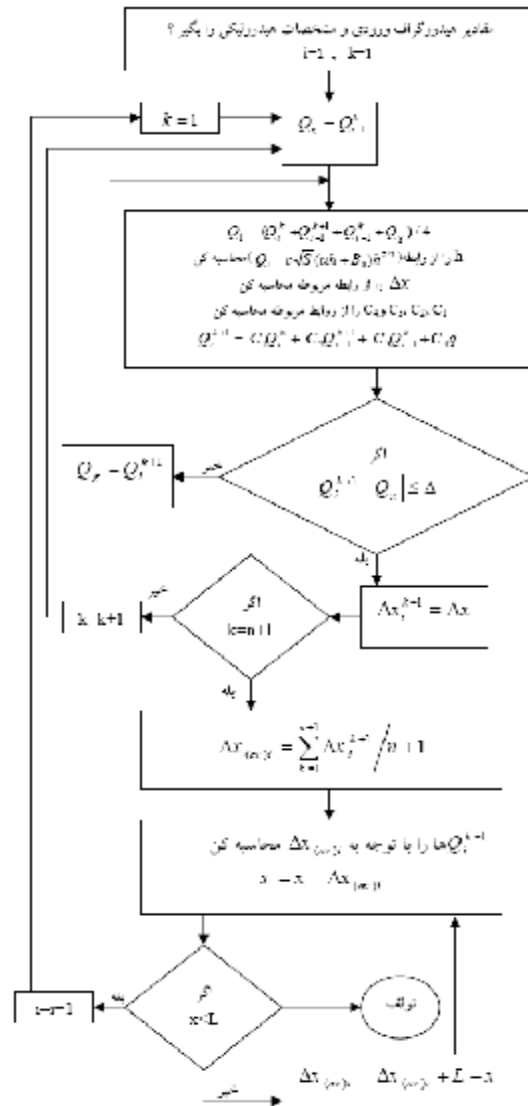
$$Q_{i+1}^{k+1} = C_1 Q_{i+1}^k + C_2 Q_i^{k+1} + C_3 Q_i^k \quad [24]$$

که در آن C_1 ، C_2 و C_3 بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$C_1 = \frac{K - Kx - 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad [25]$$

$$C_2 = \frac{-Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad [26]$$

$$C_3 = \frac{Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad [27]$$



شکل 3 - فلوچارت روندبایی هیدرولوژیکی

روندبایی هیدرولوژیکی به روش ماسکینگام

در روندبایی هیدرولوژیکی از اصل پیوستگی جریان و رابطه بین دبی و ذخیره آب استفاده می‌شود:

$$I - O = \frac{dS}{dt} \quad [17]$$

که در آن I دبی ورودی، O دبی خروجی، S ذخیره کانال و t زمان می‌باشند.

مدل‌های ذخیره ماسکینگام بصورت زیر می‌باشند (داس 2004):

$$S = K[xI + (1-x)O] \quad [18]$$

است که ابتدا ذخیره کل (Sc) از رابطه [28] محاسبه می‌شود.

$$Sc = \sum_{k=0}^n (I_k + I_{k+1} - O_k - O_{k+1}) \Delta t / 2 \quad [28]$$

که در آن n تعداد مقادیر هیدروگراف‌های ورودی یا خروجی، Δt گام زمانی اندازه‌گیری هیدروگراف‌های ورودی یا خروجی، $O_0 = I_0 = Q_B$ و O_B دبی پایه است. سپس به ازای هر x و m فرضی (m برای مدل خطی برابر یک می‌باشد)، ذخیره ماسکینگام به ازای ضریب واحد برای مخزن (Sm) از روابط [18]، [19] یا [20] با توجه به کاربرد مدل و با در نظر گرفتن ضریب $K=1$ محاسبه می‌گردد. تغییرات Sm در مقابل تغییرات Sc در یک دستگاه مختصات رسم می‌شود. مقدار ضریب K برابر با شیب خط برازش داده شده بین مقادیر Sm و Sc، خواهد بود. هیدروگراف خروجی از روابط [21]، [22] یا [23]، و x و m فرضی و K بدست آمده محاسبه می‌شود. x و m و K ای مورد قبول است که هیدروگراف خروجی پیش‌بینی شده از روی آن کمترین مربعات خطا را با هیدروگراف خروجی مشاهداتی داشته باشد. فلوجارت این روش در شکل 4 نشان داده شده است.

منطقه مورد مطالعه

برای این تحقیق قسمتی از رودخانه مهران رود حد فاصل ایستگاه‌های هیدرومتری ليقوان و هروی استفاده شده است. ایستگاه هیدرومتری ليقوان در $37^\circ 50' 10''$ عرض جغرافیایی، $46^\circ 26' 8''$ طول جغرافیایی و در ارتفاع 2214 متری از سطح دریا قرار دارد. ایستگاه هیدرومتری هروی در $37^\circ 55' 17''$ عرض جغرافیایی، $46^\circ 28' 53''$ طول جغرافیایی و در ارتفاع 1928 متری از سطح دریا واقع شده است و فاصله این دو ایستگاه 12280 متر می‌باشد. مشخصات هیدرولیکی بکاربرده شده مسیر شامل عرض کف، شیب بستر، شیب دیواره-ها و طول کانال می‌باشند. برای این قسمت از مسیر

k گام زمانی و i گام مکانی را نشان می‌دهند. Q_i ها نشان دهنده دبی ورودی (I) و Q_{i+1} ها نشان دهنده دبی خروجی (O) می‌باشند (استارم 2001).

رویه استاندارد برای روندیابی به روش ماسکینگام مستلزم دو گام است: کالیبراسیون و پیش‌بینی. در گام کالیبراسیون پارامترها تخمین زده می‌شود که در آن مقادیر پارامترها برای مدل‌های ماسکینگام یک رودخانه با استفاده از داده‌های هیدروگراف ورودی- خروجی قبلی مشخص می‌شوند. در گام پیش‌بینی، هیدروگراف خروجی برای یک هیدروگراف ورودی با استفاده از معادلات روندیابی، تعیین می‌گردد.

برای تخمین پارامترها در مدل‌های ماسکینگام روش‌های متعددی توسط محققین پیشنهاد شده است که می‌توان به روش‌های گیل (1978)، تونگ (1985)، یون و پادمانابان (1993)، موهان (1997)، داس (2004) و گیم (2006) اشاره کرد. در واقع اکثر روش‌های تخمین پارامتر با استفاده از بعضی شکل‌های تجزیه رگرسیون تلاش می‌کنند تا روابط غیرخطی مابین S، I و O را با تعیین K، x و m بدست آورند. تجزیه رگرسیونی روی روابط [18]، [19] و [20] انجام شده است بدون اینکه وزنی برای روابط [21]، [22] یا [23] در نظر گرفته شود که این باعث ایجاد خطا در داده‌های هیدروگراف خروجی می‌شود. همچنین مقادیر رگرسیونی S قابل دسترس نخواهند بود (داس 2004).

در تحقیق حاضر برای تخمین پارامترهای مدل‌های خطی و غیرخطی از روش سعی و خطا برپایه کمترین مربعات خطا استفاده شده است که در عین سادگی از دقت بالایی برخوردار می‌باشد و ایرادات داس به روش‌های تخمین پارامتر محققین پیشین نیز در آن رفع شده است. در این روش بجای استفاده از مدل‌های ذخیره ماسکینگام، از ترکیب آنها با معادله پیوستگی هیدرولوژیکی و در شکل تفاضلات محدود کرانک نیکلسون استفاده شده است. روش مذکور بدین صورت

توابع عملکرد

عملکرد روش‌های روندیابی در پیش‌بینی هیدروگراف خروجی با استفاده از مجموع مربعات خطاها (SSE) و ضریب تبیین (R^2) سنجیده شده است. این مقادیر به ترتیب از روابط [29] و [30] بدست خواهند آمد (مونگومری و رانگر 2003):

$$SSE = \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \quad [29]$$

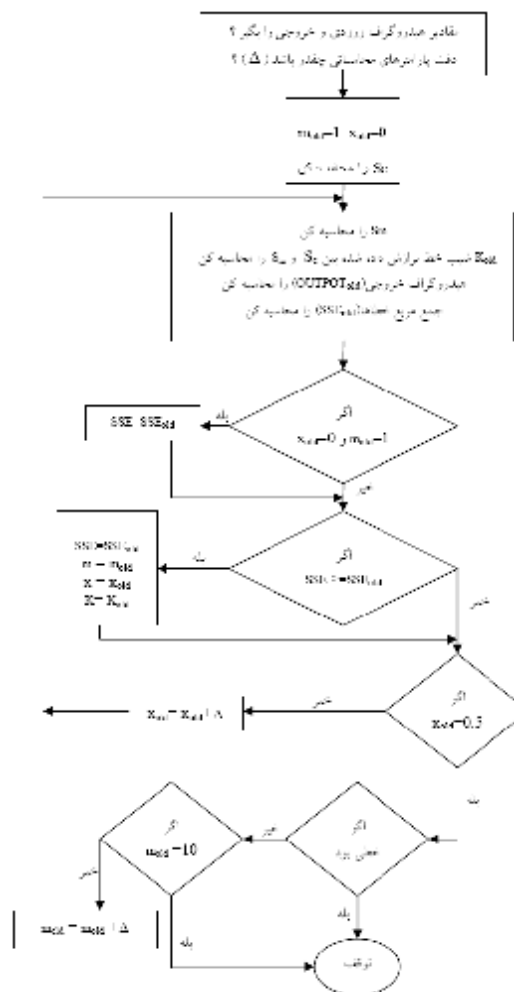
$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad [30]$$

که در آنها x_i مقادیر هیدروگراف مشاهداتی، y_i مقادیر هیدروگراف تخمین زده شده و n تعداد مؤلفه‌های هیدروگراف سیل می‌باشند.

نتایج و بحث

در تحقیق حاضر روندیابی به دو روش هیدرولیکی و هیدرولوژیکی انجام گرفته است. در روندیابی هیدرولیکی از روش تفاضلات محدود 4 نقطه‌ای ماسکینگام استفاده شده است. روندیابی هیدرولیکی با استفاده از هیدروگراف ورودی در ایستگاه ليقوان و مشخصات هیدرولیکی مسیر رودخانه تا ایستگاه هروی انجام شده است و هیدروگراف خروجی در این محل بدست آمده است. مشخصات هیدرولیکی بطور متوسط هر 54 متر در روندیابی وارد شده‌اند و فاکتورهای وزنی X,Y برابر 0/5 قرار داده شده است. روندیابی انجام شده با روش هیدرولیکی برای سه نمونه سیل در سال‌های مختلف در شکل 5 و نتایج آماری آن در جدول 1 نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که ضریب تبیین بین هیدروگراف‌های بدست آمده از روندیابی و هیدروگراف‌های مشاهداتی در ایستگاه هروی بزرگتر از 0/75 می‌باشد و در نتیجه بین هیدروگراف‌های مشاهداتی و بدست آمده از روندیابی،

رودخانه مهران رود 226 مقطع طولی از روی نقشه‌های سازمان آب با دقت 0/001 استخراج شده است که مشخصات هیدرولیکی در این مقاطع متفاوت می‌باشند. ضریب زبری مانینگ $n=0/12$ برای کل مسیر بصورت ثابت در نظر گرفته شده و ضریب شزی از روی آن و مشخصات هیدرولیکی هر مقطع محاسبه گردیده است. در روندیابی سعی شده است از داده‌های هیدروگراف‌های همزمانی استفاده شود که فقط سیلاب حاصل از بارش روی حوضه ليقوان بر آنها تأثیر گذارده است و گام‌های زمانی هیدروگرافها بکار برده شده 0/5 ساعت می‌باشند.



شکل 4 - فلوجارت تخمین پارامترهای مدل ماسکینگام

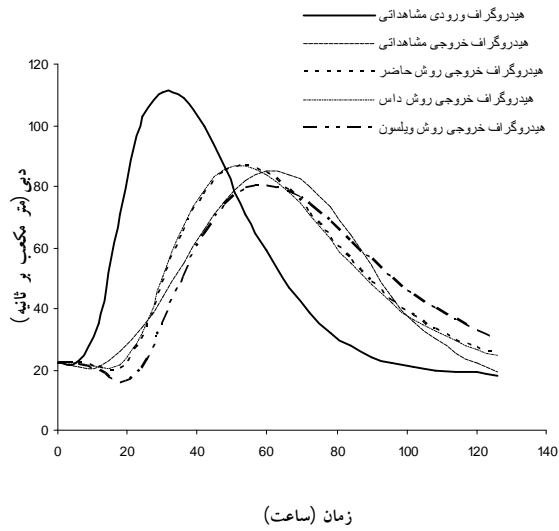
پارامترهای مدل‌های ماسکینگام در روندیابی استفاده شده است. روندیابی هیدرولوژیکی برای همان سه نمونه سیل انجام شده تا نتایج قابل مقایسه با روندیابی هیدرولیکی باشند. تخمین پارامترها برای هر سه مدل ماسکینگام از روی سیل تاریخ 82/1/18 انجام و مقادیر آن در جدول 4 آورده شده است. هیدروگراف‌های پیش‌بینی شده با پارامترهای جدول 4 برای سه نمونه سیل در شکل 9 و نتایج آماری در جدول 5 نشان داده شده است. نتایج تطبیق خوبی را برای مدل‌های غیر-خطی که پارامترها از روی سیل مشابه تعیین شوند، را نشان می‌دهند ولی در مدل خطی نتایج خوبی حاصل نشده است و کاربرد مدل خطی در روندیابی را زیر سوال می‌برد. همانطور که دیده می‌شود در روندیابی سیل با مدل‌های ماسکینگام در صورتی که پارامترهای آن از روی سیل غیر مشابه تخمین زده شده باشد، نتایج خوبی حاصل نمی‌شود و حتی گاهی هبستگی بین هیدروگراف‌های پیش‌بینی شده و مشاهداتی وجود نخواهد داشت. بنابراین از پارامترها تخمین زده شده باید برای سیل‌های مشابه استفاده شود و در بکار بردن پارامترها احتیاط کرد. همانطور که از جدول 5 مشاهده می‌شود در مورد سیل تاریخ 86/2/15 به علت مشابهت با سیلی که از روی آن پارامترها تخمین زده شده، نتایج بهتری حاصل شده است.

جدول 1- نتایج تست آماری روندیابی هیدرولیکی.

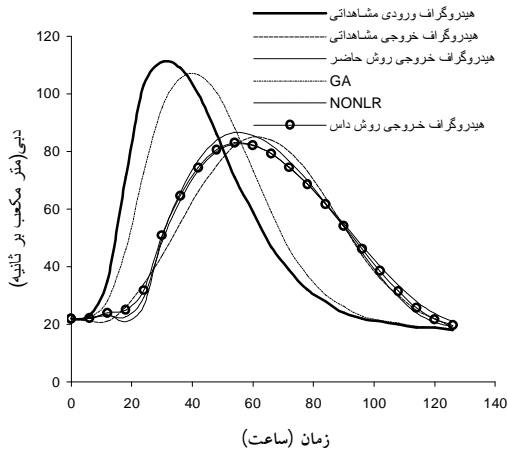
زمان وقوع سیل	مجموع مربع خطاها (SSE)	ضریب تبیین (R^2)
82/1/18	0/1551	0/9092
84/3/12	0/3100	0/9081
86/2/15	1/0929	0/8611

هبستگی وجود دارد و می‌توان روش مذکور را برای روندیابی بکار برد. همچنین زمان رسیدن به نقطه اوج در هیدروگراف‌های بدست آمده از روندیابی با هیدروگراف‌های مشاهداتی تقریباً یکی می‌باشند که این نشان دهنده دقت این روش می‌باشد. بدلیل اینکه در روندیابی هیدرولیکی به روش تفاضلات محدود 4 نقطه-ای ماسکینگام از حل کامل معادلات سنت-ونانت (موج دینامیک) استفاده شده است، انتظار تطبیق بهتری بود ($R^2 > 0/95$) ولی بدلیل خطاها در ثبت هیدروگراف‌های ورودی و خروجی، خطا در برداشت مشخصات هیدرولیکی، ثابت فرض کردن ضریب زبری مانینگ در کل مقاطع و ... این امر تحقق پیدا نکرده است. واضح است در صورت بکار بردن اطلاعات هیدرولیکی در مقاطع طولی کوچکتر (مثلاً هر ده متر) نتایج بهتری حاصل می‌شود. همچنین در این روش امکان وارد کردن دبی‌های ورودی یا خروجی جانبی در طول مسیر وجود دارد.

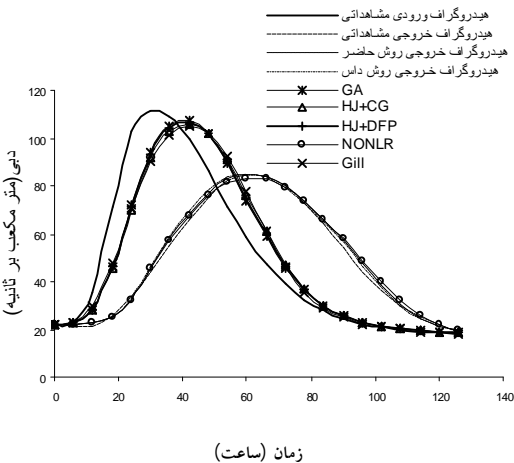
در روندیابی هیدرولوژیکی از روش ماسکینگام و برای تخمین پارامترهای آن از روش سعی و خطا برپایه کمترین مربعات خطاها استفاده شده است. جهت بررسی این روش و مقایسه با سایر روش‌های ارائه شده از داده‌های ویلسون (1985) استفاده شده است که این داده‌ها توسط اکثر محققین برای ارزیابی و مقایسه روش‌های پیشنهادی بکار رفته است. پارامترهای تخمین زده شده با روش‌های مختلف و روش مورد استفاده در جدول 2 و نتایج آماری در جدول 3 نشان داده شده‌اند. هیدروگراف‌های بدست آمده نیز در شکل‌های 6، 7 و 8 به ترتیب برای مدل خطی و مدل‌های غیرخطی 1 و 2 دیده می‌شوند. همانطور که مشاهده می‌شود در هر سه مدل، مجموع مربع خطاها در روش مورد استفاده از همه کمتر بوده و بیشترین ضریب تبیین را دارا می‌باشند. بین سه مدل بکار رفته، مدل غیرخطی 2 تطبیق بهتری را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده از روش سعی و خطا بر پایه کمترین مربعات خطاها برای تخمین



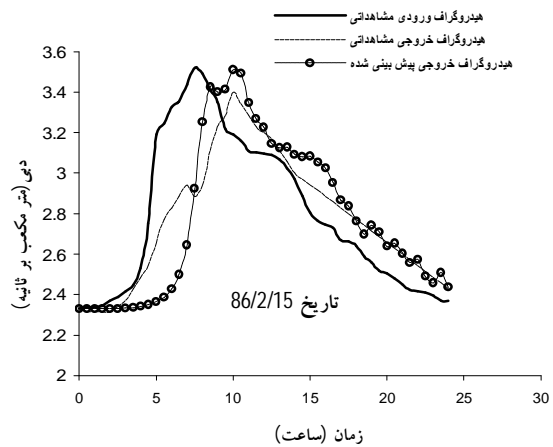
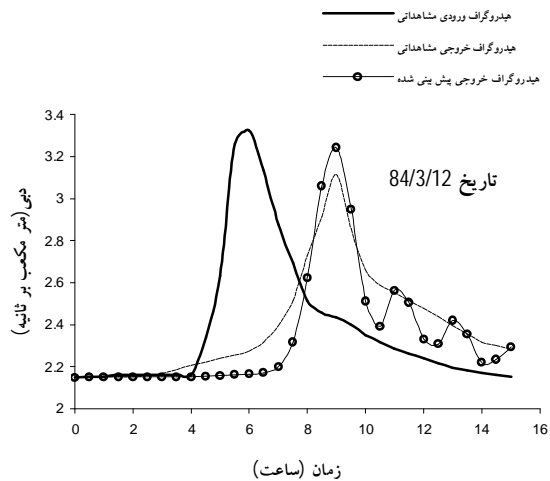
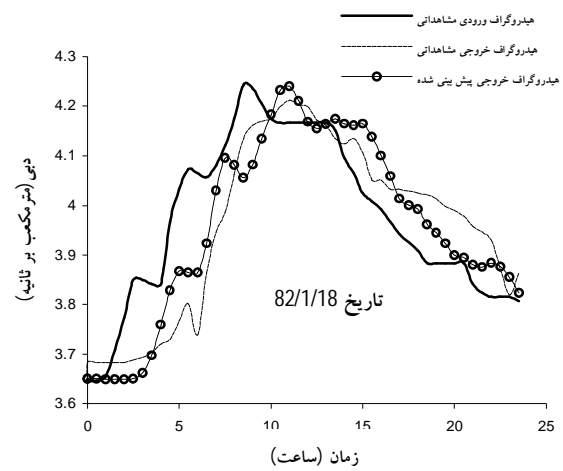
شکل 6- مقایسه هیدروگراف‌های خروجی مدل خطی



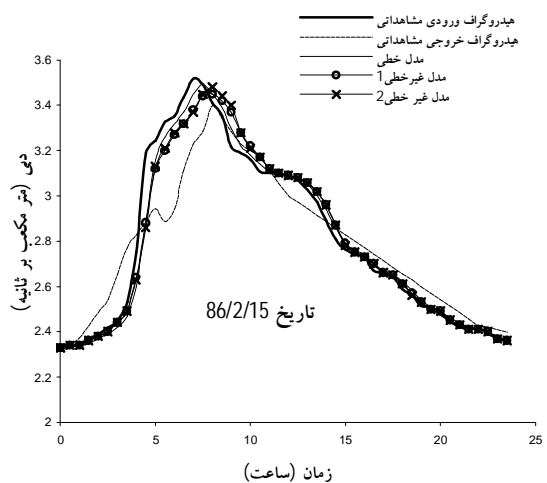
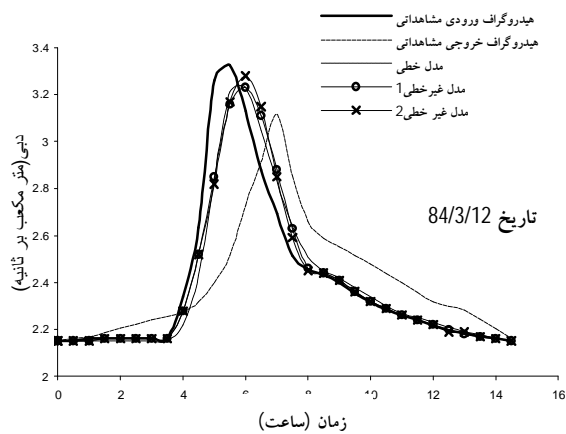
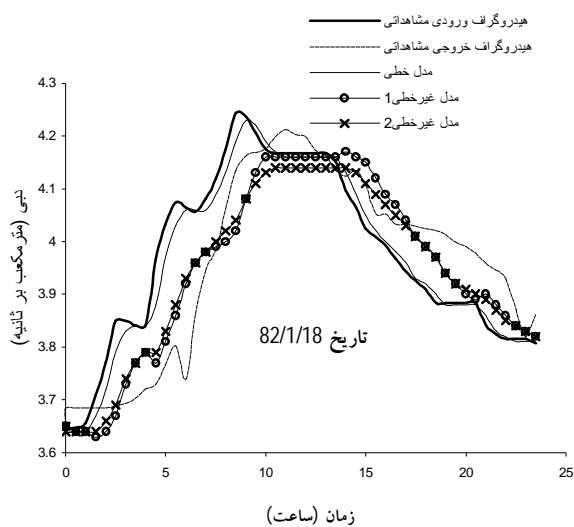
شکل 7- مقایسه هیدروگراف‌های خروجی مدل غیر خطی 1



شکل 8- مقایسه هیدروگراف‌های خروجی مدل غیر خطی 2



شکل 5- روندیابی هیدرولیکی به روش موج دینامیک (روش تفاضلات محدود 4 نقطه‌ای ماسکینگام) در سه تاریخ مختلف



جدول 2- پارامترهای ماسکینگام تخمین زده شده.

روش	مدل	m	X	K
حاضر	خطی	1/0000	0/2182	25/3944
داس	خطی	1/0000	0/2010	24/3804
ویلسون	خطی	1/0000	0/2500	36/0000
حاضر	غیرخطی 1	2/213	0/1811	0/0997
داس	غیرخطی 1	2/3932	0/1702	0/0437
GA	غیرخطی 1	1/7105	0/2305	0/1773
NONLR	غیرخطی 1	2/3500	0/2200	0/0500
حاضر	غیرخطی 2	2/3786	0/2809	0/0533
داس	غیرخطی 2	2/2932	0/2769	0/0753
گیل	غیرخطی 2	2/3470	0/2500	0/0100
GA	غیرخطی 2	1/8282	0/2813	0/1033
NONLR	غیرخطی 2	2/3600	0/2700	0/0600
HJ+CG	غیرخطی 2	1/9291	0/2685	0/0699
HJ+DFP	غیرخطی 2	1/8978	0/2677	0/0764

جدول 3- مقایسه آماری روش های تخمین پارامترهای مدل

ماسکینگام

روش	مدل	مجموع مربع خطاها (SSE)	ضریب تبیین (R ²)
حاضر	خطی	805/1122	0/9365
داس	خطی	936/6484	0/9260
ویلسون	خطی	1104	0/8977
حاضر	غیرخطی 1	344/2943	0/9718
داس	غیرخطی 1	359/9315	0/9712
GA	غیرخطی 1	15330	0/3234
NONLR	غیرخطی 1	486/8565	0/9663
حاضر	غیرخطی 2	67/0323	0/9949
داس	غیرخطی 2	70/9332	0/9947
گیل	غیرخطی 2	14494	0/3533
GA	غیرخطی 2	15340	0/3277
NONLR	غیرخطی 2	87/2574	0/9931
HJ+CG	غیرخطی 2	14575	0/3537
HJ+DFP	غیرخطی 2	15074	0/3356

شکل 9- روندیابی هیدرولوژیکی به روش های ماسکینگام خطی و غیرخطی در سه تاریخ مختلف

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در کل نتایج حاصل از روندیابی هیدرولیکی به روش موج دینامیک بهتر از روندیابی هیدرولوژیکی ماسکینگام است. گرچه در روندیابی هیدرولیکی نیاز به مشخصات و اطلاعات هیدرولیکی مسیر رودخانه می‌باشد ولی این روش را می‌توان با اطمینان بکار برد و این روش بسیار مناسب برای رودخانه‌های فاقد آمار است و پیش‌بینی هیدروگراف در پایین دست در هر نقطه امکان‌پذیر می‌سازد. به علت شباهت ساختاری این روش به روش ماسکینگام که سالها مورد استفاده جامعه مهندسی بوده است، کاربرد آن در مقایسه با سایر روش‌های روندیابی دینامیکی، آسانتر خواهد بود. از لحاظ اقتصادی نیز فقط هزینه مشخصات هیدرولیکی مسیر نیاز است که در مقایسه با هزینه‌های تأسیس و نگهداری ایستگاه‌های هیدرومتری، استفاده از این روش به صرفه خواهد بود.

جدول 4- مقادیر پارامترهای تخمین زده شده برای مسیر

لیقوان - هروی.			
مدل	m	x	K
خطی	1/0000	0/0571	0/3689
غیرخطی 1	6/1211	0/1728	0/000296
غیرخطی 2	6/3911	0/3664	0/000203

جدول 5- نتایج آماری روندیابی با مدل‌های ماسکینگام.

مدل - تاریخ وقوع سیل	مجموع مربع خطاها (SSE)	ضریب تبیین (R^2)
خطی - 82/1/18	0/5207	0/6303
غیرخطی 1 - 82/1/18	0/1716	0/9012
غیرخطی 2 - 82/1/18	0/1642	0/9013
خطی - 84/3/12	1/2944	0/5899
غیرخطی 1 - 84/3/12	1/3035	0/5922
غیرخطی 2 - 84/3/12	1/3991	0/5738
خطی - 86/2/15	0/8126	0/9045
غیرخطی 1 - 86/2/15	0/6408	0/9295
غیرخطی 2 - 86/2/15	0/6775	0/9280

منابع مورد استفاده

صالحی نیشابوری ع ا و تقدیسیان س م، 1376. جریان در کانالهای باز (ترجمه). چاپ اول و انتشارات جزیل.

نیازی ف، فاخری فرد ا و حسین‌زاده دلیر ع، 1387. مقایسه روش‌های کلارک و ماسکینگام در روندیابی سیلاب رودخانه. دانش کشاورزی دانشگاه تبریز، شماره 2 جلد 18، صفحات 11 تا 25.

Chow VT, 1973. Open Channel Hydraulics. Third Edition. McGraw Hill Book Company. New York. Inc.

Cunge JA, 1969. On the subject of a flood propagate computational method. J Hydraul Res 7 (2), 205-230.

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

Fennema RJ and Chaudhry MH, 1986. Explicit numerical schemes for unsteady free surface flows with shocks. Water Resources Research. 22(13): 1923-30.

- Geem ZW, 2006. Parameter estimation for the nonlinear Muskingum model using the BFGS technique. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE. 132(5): 474-478.
- Gill MA, 1978. Flood routing by the Muskingum method. *Journal of Hydrology*. 36: 353-363.
- Koussis AD, 1980. Comparison of Muskingum method difference schemes. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. 106(HY5): 925-929.
- Linsely RK and Kohler MA and Paulhus JLH, 1982. *Hydrology for Engineers*. Third Edition. McGraw Hill Book Company. New York.
- Mays LW, 2001. *Water Resources Engineering*. First Edition. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- McCarthy GT, 1938. The unit hydrograph and flood routing. New London. Conference North Atlantic Division. US Army Corporation of Engineers.
- Mohan S, 1997. Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using genetic algorithm. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 123(2): 137-142.
- Montgomery DC and Runger GC, 2003. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Third Edition. John Wiley and Sons, Inc. Printed in the United States of America.
- Moretti G, 1979. The lambda scheme. *Journal of Computers and Fluids* 7: 191-205.
- Ponce VM and Lugo A, 2001. Modeling looped ratings Muskingum-Cunge routing. *ASCE* 6(2): 119-124.
- Sturm TW, 2001. *Open Channel Hydraulics*. MCGraw Hill Higher Education.
- Tung YK, 1985. River flood routing by nonlinear Muskingum method. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 111(12): 1447-1460.
- Wang GT and Chen S, 2003. A semianalytical solution of the Saint-Venant equations for channel flood routing. *Journal of Water Resources Research*. 39(4): SWC 1-10.
- Wang GT and Chen S, Boll J and Singh VP, 2003. Nonlinear convection-diffusion equation with mixing-cell method for channel flood routing. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 8(5): 259-265.
- Wang GT and Singh VP, 1992. Muskingum method with variable parameters for flood routing in channels. *Journal of Hydrology* 134: 57-76.
- Wang GT, Yao C, Okoren C and Chen S, 2006. 4-Point FDF of Muskingum method based on the complete St Venant equations. *Journal of Hydrology* 324: 339-349.
- Wilson EM, 1985. *Engineering Hydrology*. Third Edition. MACMILLAN Publishers LTD. Printed in Hong Kong.
- Yoon J and Padmanabhan G, 1993. Parameter estimation of linear and nonlinear Muskingum models. *Journal of Water Resources Planning and Management* ASCE 119(5): 600-610.