تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال هفتم، شماره ۱، زمستان و بهار ۹۰- ۱۳۸۹
Volume 7, No. 1, Winter & Spring 2011 (IR-WRR)
۲۶-۳۷

بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر روش ماسکینگام-کانژ در مقایسه با روش روندیابی دینامیکی

محمود فتوحی [۱] و محمود فغفور مغربی [۲*]

چکیده

یکی از موارد ضروری برای طراحی و ارزیابی سازه‌های هیدرولیکی و نیز برنامه‌ریزی منابع آب، پیش‌بینی شدت جریان و تراز آب در رودخانه است. برای این منظور از روشهای روندیابی برای تخمین تراز آب و شدت جریان هنگام حرکت موج سیلاب در طول رودخانه استفاده می‌شود. در این مطالعه روش روندیابی دینامیکی و روش ماسکینگام-کانژ با پارامترهای ثابت و متغیر مورد مقایسه واقع شده‌اند. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که اختلاف دو روش در شیب‌های کم بیشتر است و بنابراین در کاربرد روش ماسکینگام-کانژ در شیب‌های کم باید احتیاط نمود. انجام تحلیل حساسیت روی پارامترهای مدل دینامیکی نشان می‌دهد که مهمترین عوامل مؤثر روی دبی اوج هیدروگراف خروجی به ترتیب شامل دبی اوج هیدروگراف ورودی، ضریب زبری و شیب بستر کانال می‌باشند. همچنین پارامترهای مهم مؤثر بر زمان وقوع دبی اوج هیدروگراف خروجی به ترتیب شامل طول کانال و ضریب زبری هستند.

کلمات کلیدی: جریان غیردائمی، معادلات سنت- ونان، مدل پریسمن، روش ماسکینگام-کانژ.

تاریخ دریافت مقاله: ۲۹ دی ۱۳۸۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۷ آذر ۱۳۸۹

۱- دانشجوی دکتری عمران-آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
۲- دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
*- نویسنده مسئول

The Impact of Effective Parameters on Muskingum-Cunge in Comparison with Dynamic Routing

M. Fotuhi [1] and M. F. Maghrebi [2]*

Abstract

River stage or flow rates are required for the design and evaluation of hydraulic structures and water resources management systems. Accordingly flood routing techniques are used to predict the river stage and flow rates while flood wave propagates along the river. The aim of this paper is to compare the Muskingum–Cunge method with constant and variable parameters with Dynamic flow routing. The results showed that the errors in application of Muskingum-Cunge method in rivers with low slope are high and therefore some concerns should be taken when using Muskingum-Cunge in low slopes rivers. Sensitivity analysis showed that the most dominant parameters on the peak outflow are orderly the peak inflow rate, the roughness coefficient, and the bed slope. Also, the most important parameters on peak timing of outflow are orderly the channel length and the roughness coefficient.

Keywords: Unsteady Flow, St. Venant Equations, Priessman Model, Muskingum-Cunge method.

Received: January 18, 2009
Accepted: December 8, 2010

1- PhD candidate in Hydraulics, Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, Email: mahmood_fotuhi@yahoo.com
2- Associate professor, Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, Email: maghrebi@ferdowsi.um.ac.ir
*- Corresponding Author

Archive of SID

www.SID.ir

۱- مقدمه

سیلاب ممکن است به دنبال بارش‌های کوتاه مدت با شدت زیاد و یا بارش‌های بلند مدت با شدت کم شکل بگیرد. هنگام ورود سیلاب به بازه مشخصی از یک رودخانه بر اثر اصطکاک کف و جداره رودخانه و ذخیره شدن بخشی از حجم جریان، تغییراتی در شکل موج به وجود می‌آید. این تغییرات می‌تواند شامل فروکش کردن دبی اوج و پخشیدگی هیدروگراف سیل باشد. بررسی تغییرات به وجود آمده در موج سیلاب در طی حرکت موج در مسیر رودخانه، روندیابی سیلاب نامیده می‌شود. چنین پیش‌بینی‌هایی در برنامه‌ریزی‌های لازم برای توسعه سیستم‌های منابع آب به کار می‌آید.

روش‌های روندیابی سیلاب را به سه گروه روش‌های روندیابی گسترده، روندیابی نیمه گسترده و روندیابی متمرکز تقسیم‌بندی می‌کنند (Nourani and Mano, 2007). روش‌های گسترده روندیابی سیلاب بر پایه حل همزمان معادلات سنت- ونان بنا نهاده شده‌اند. در این روش‌ها خصوصیات مسیر نظیر شیب کف، ضریب زبری و عرض کف در نظر گرفته می‌شوند و می‌توان مشخصات جریان شامل دبی، عمق و سرعت را در هر نقطه دلخواه از مسیر جریان و در زمانهای مختلف به دست آورد. این روشها شامل روش روندیابی موج دینامیکی، موج پخشیدگی و موج سینماتیک می‌باشند. در روش روندیابی دینامیکی معادلات پیوستگی و اندازه‌حرکت به طور کامل مورد استفاده قرار می‌گیرند. معادله دینامیکی جریان از نظر دارا بودن تعداد ترم‌های ظاهر شده، دارای بیشترین تعداد است. این ترم‌ها شامل شتاب لحظه‌ای، شتاب جابجایی، ترم گرادیان فشار، شیب خط انرژی و شیب بستر کانال می‌باشند. در روش‌های روندیابی پخشیدگی و روندیابی سینماتیک معادلات سنت- ونان با اعمال فرضیاتی و حذف برخی عبارات، معادله اندازه حرکت ساده شده و لذا این روش‌ها تقریبی می‌باشند. در روندیابی پخشیدگی، عبارات اینرسی شامل شتاب لحظه‌ای و شتاب جابجایی از معادله اندازه حرکت حذف می‌شوند. در روندیابی سینماتیک علاوه بر حذف جملات اینرسی، ترم تغییرات فشار هیدرواستاتیک نیز از معادله اندازه حرکت حذف شده و فقط عبارات شیب خط انرژی و شیب بستر کانال مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در روش‌های روندیابی متمرکز نه تنها مشخصات مسیر در نظر گرفته نمی‌شوند، بلکه مشخصات جریان تنها در انتهای بازه رودخانه قابل محاسبه می‌باشند. به عبارت دیگر در روشهای روندیابی متمرکز فقط به تغییرات زمانی مشخصات در ابتدا و انتهای بازه کانال توجه می‌شود. اساس روش‌های روندیابی متمرکز، حل معادله پیوستگی به صورت متمرکز بر روی زمان بوده و در آنها به جای استفاده از معادله مومنتوم از رابطه ذخیره در بازه رودخانه استفاده می‌شود. روش ماسکینگام جزء روش روندیابی متمرکز به شمار می‌رود.

برای ارزیابی پارامترهای روش ماسکینگام به عنوان یک روش روندیابی متمرکز، در روش ماسکینگام-کانژ براساس خصوصیات بستر جریان نظیر شیب, زبری و ... محاسبه می‌شود. بنابراین چون روش ماسکینگام-کانژ از ژئومورفولوژی و فیزیک جریان نیز بهره می‌گیرد می‌توان آن را جزو روش‌های روندیابی نیمه گسترده طبقه‌بندی نمود (Nourani and Mano, 2007). از طرفی چون روش ماسکینگام-کانژ از روش ماسکینگام بدست آمده, نسبت به روش روندیابی گسترده ساده‌تر بوده و در آن مشخصات تنها در انتهای بازه کانال تعیین می‌شود. هدف این تحقیق بررسی نقش پارامترهای موثر در روش ماسکینگام-کانژ در مقایسه با روش روندیابی دینامیکی می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، در ادامه روش‌های روندیابی دینامیکی، ماسکینگام و ماسکینگام - کانژ توضیح داده می‌شوند. سپس مقایسه بین روش روندیابی دینامیکی و ماسکینگام - کانژ در قالب شکل‌ها و جدول‌های انجام شده و روی آنها بحث می‌گردد. بعد از انجام تحلیل حساسیت پارامترهای روندیابی دینامیکی، نتایج این تحقیق و پیشنهادات ادامه کار آورده می‌شوند.

۲- ساختار کلی مدل روندیابی دینامیکی

حرکت موج سیلاب در رودخانه‌ها از نوع جریان غیر دائمی متغیر تدریجی می‌باشد. در جریانهای متغیر تدریجی شتاب قائم ناچیز و قابل صرفنظر کردن بوده، ولی اثر اصطکاک کانال قابل ملاحظه بوده و می‌بایست در محاسبات مد نظر قرار گیرد. معادلات حاکم بر جریانهای غیر دائمی متغیر تدریجی، شامل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت هستند که به معادلات سنت- ونان معروف می‌باشند. در به دست آوردن این معادلات از فرض‌های زیر استفاده شده است (Chow et al., 1988):

۱- جریان یک بعدی است، بدین معنی که سرعت فقط در راستای طولی کانال تغییر می‌کند.

۲- تغییرات فشار به صورت هیدرواستاتیکی است و از شتاب قائم ذرات آب صرف‌نظر می‌شود.

۳- شیب کف کانال نسبتاً کم بوده و بستر کانال ثابت در نظر گرفته می‌شود.

Archive of SID
www.SID.ir

۴- معادله مانینگ معادله مقاومت جریان میباشد.
۵- سیال غیر قابل تراکم بوده و چگالی سیال ثابت می‌باشد.
معادله پیوستگی بین دو مقطع به فاصله Δx از یکدیگر به شکل زیر بیان می‌شود که این رابطه بدون دبی جانبی ورودی و یا خروجی از کانال می‌باشد (Chow et al., 1988).

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}=0 \qquad (۱)$$

معادله اندازه حرکت، با استفاده از قانون دوم نیوتن و بر اساس تغییرات اندازه حرکت بین دو مقطع به فاصله Δx از یکدیگر به صورت رابطه زیر بیان می‌گردد (Chow et al., 1988).

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial\left(Q^2/A\right)}{\partial x}+g\,A\frac{\partial y}{\partial x}-g\,A\left(S_0-S_f\right)=0 \qquad (۲)$$

که در روابط (۱) و (۲)، x راستای طولی جریان، t زمان، Q دبی جریان، A سطح مقطع جریان، S_f شیب خط انرژی، S_0 شیب طولی مسیر جریان، y عمق جریان و g شتاب گرانش می‌باشند.

روش روندیابی دینامیکی سیلاب بر پایه حل همزمان معادلات سنت- ونان بنا نهاده شده است. روش‌های مختلفی برای حل عددی معادلات سنت- ونان مانند روش مشخصه‌ها، روش اجزاء محدود و روش تفاضل محدود به کار گرفته شده است. ازجمله روش‌های متداول روش تفاضل محدود چهار نقطه‌ای ضمنی (مدل پریسمن) می‌باشد (Akan, 2006). روش تفاضل محدود ضمنی شامل حل معادلات سنت- ونان از یک گام زمانی به گام زمانی دیگر می‌باشد که این عمل به طور همزمان برای تک‌تک گامهای زمانی انجام می‌شود. در این روش، تابع کلی f و مشتقات زمانی و مکانی آن در فضای گسسته زمانی ومکانی تفاضل‌های محدود توسط روابط زیر برآورد می‌شوند (Akan, 2006):

$$f=\theta\left(\frac{f_{i+1}^{\,j+1}+f_{i}^{\,j+1}}{2}\right)+\left(1-\theta\right)\left(\frac{f_{i+1}^{\,j}+f_{i}^{\,j}}{2}\right) \qquad (۳)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t}=\frac{f_{i}^{\,j+1}-f_{i}^{\,j}+f_{i+1}^{\,j+1}-f_{i+1}^{\,j}}{2\Delta t} \qquad (۴)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x}=\frac{\theta\left(f_{i+1}^{\,j+1}-f_{i}^{\,j+1}\right)}{\Delta x}+\frac{\left(1-\theta\right)\left(f_{i+1}^{\,j}-f_{i}^{\,j}\right)}{\Delta x} \qquad (۵)$$

دراین روابط، i و j به ترتیب گام‌های مکانی و زمانی و θ پارامتر وزنی است که بین صفر و یک متغیر می‌باشد.

از مسائل مهم در استفاده از مدلهای تفاضل محدود، پایداری و دقت مدل می‌باشد. برای پایداری مدل لازم است که θ در محدوده $۰/۵ \le \theta \le ۱$ باشد. با افزایش مقدار θ از ۰/۵ به سمت یک، موج محاسبه شده پخش‌تر می‌شود و به ازاء مقادیر نزدیک به ۰/۵ ضمن حفظ پایداری، شکل موج نیز حفظ می‌شود. بنابراین به عنوان بهترین مقدار برای این پارامتر عدد ۰/۶-۰/۵۵ پیشنهاد شده است (Chow et al., 1988). در این تحقیق مقدار ۰/۶ برای θ در نظر گرفته شده است.

نظیر هر معادله حاکمه جریان غیردائمی، برای حل معادلات سنت- ونان نیاز به شرایط اولیه و مرزی می‌باشد. شرایط اولیه وضعیت جریان قبل از ورود موج سیلاب می‌باشند و شرایط مرزی، ارتباط فیزیکی جریان را با مرزهای اطراف خود درنظر می‌گیرد. به عنوان شرایط اولیه یعنی مشخصات جریان در زمان صفر، فرض شده است که دبی پایه Q_0 با عمق نرمال متناظر با آن در کانال جریان دارد.

در جریان‌های زیر بحرانی یک شرط مرزی در بالادست و یک شرط مرزی در پایین‌دست تعریف می‌شوند. شرط مرزی بالادست هیدروگراف ورودی به بازه تحت مطالعه دریک رودخانه است. برای تعیین شرط مرزی پایین‌دست، فرض شده است که در انتهای بازه تحت مطالعه، جریان به جریان نرمال تبدیل می‌شود و بنابراین در پایین دست، شرط مرزی به صورت $S_f = S_0$ تعریف شده که در آن S_f شیب خط انرژی و S_0 شیب کف رودخانه است.

توضیحات کامل درمورد چگونگی اعمال معادلات (۳) الی (۵) به معادلات (۱) و (۲) به همراه اعمال شرایط مرزی و اولیه در (Akan, 2006) آمده است. بر اساس موارد یاد شده، برنامه‌ای جهت روندیابی دینامیکی درفضای نرم‌افزار Matlab نوشته شده است.

۳- روش ماسکینگام و ماسکینگام-کانژ

روش ماسکینگام اولین بار در سال ۱۹۳۵ میلادی، توسط مک کارتی برای کنترل جریان سیلاب بر روی رودخانه ماسکینگام در اوهایو مورد مطالعه قرار گرفت (Singh, 1988). اصول این روش بر پایه ترکیب دو معادله می‌باشد که یکی رابطه پیوستگی را ارضاء می‌کند و دیگری رابطه حجم ذخیره شده را در بازه بیان می‌کند. رابطه

Archive of SID
www.SID.ir

پیوستگی و رابطه به کار رفته برای تعیین حجم ذخیره شده در بازه به صورت زیر تعریف می‌شوند (Singh, 1988):

$$\frac{dS}{dt} = I - Q \qquad (۶)$$

$$S = K\left[X\,I + (1-X)Q\right] \qquad (۷)$$

که در روابط فوق S حجم ذخیره شده در بازه مورد مطالعه در زمان t، I دبی ورودی به بازه و Q دبی خروجی از بازه می‌باشند. همچنین X و K پارامترهای روش ماسکینگام هستند که به صورت تابعی از مشخصات مسیر جریان و موج در نظر گرفته می‌شوند.

با نوشتن فرم تفاضل محدود روابط (۶) و (۷) و ترکیب آنها و درنهایت ساده‌سازی به معادله زیر می‌رسیم که براساس آنها می‌توان روندیابی را انجام داد (Akan, 2006):

$$Q_2 = C_1 I_2 + C_2 I_1 + C_3 Q_1 \qquad (۸)$$

$$C_1 = \frac{0.5\Delta t - KX}{K - KX + 0.5\Delta t} \qquad (۹)$$

$$C_2 = \frac{0.5\Delta t + KX}{K - KX + 0.5\Delta t} \qquad (۱۰)$$

$$C_3 = \frac{K - KX - 0.5\Delta t}{K - KX + 0.5\Delta t} \qquad (۱۱)$$

طبق توصیه (Tewolde and Smithers, 2006) از مقادیر منفی C_1 باید اجتناب شود، اما مقادیر منفی C_2 روی هیدروگراف روندیابی شده تأثیری نمی‌گذارد. با ارضاء رابطه زیر می‌توان از مقادیر منفی C_1 جلوگیری کرد.

$$\Delta t > 2KX \qquad (۱۲)$$

از طرف دیگر Δt باید کوچکتر از یک پنجم زمان اوج هیدروگراف ورودی باشد که بتواند بازوی بالارونده هیدروگراف را به خوبی نشان دهد (Akan, 2006).

یک مسئله مهم و اساسی در روش ماسکینگام این است که پارامترهای X و K مفهوم فیزیکی ندارند و تنها در صورتی می‌توان آنها را برآورد کرد که یک هیدروگراف ورودی و خروجی از یک واقعه سیلاب در بازه کانال موجود باشد. این مشکل در روش ماسکینگام- کانژ برطرف شده است و در آن پارامترهای X و K براساس خصوصیات فیزیکی بازه کانال بیان شده‌اند:

$$X = 0.5\left[1 - \frac{Q_0}{a\,T_0\,S_0\,\Delta x}\right] \qquad (۱۳)$$

$$K = \frac{L}{a} \qquad (۱۴)$$

که در روابط فوق Q_0 دبی مرجع، T_0 عرض سطح آب مربوط به دبی مرجع، S_0 شیب طولی کانال، Δx طول بازه کانال و a سرعت موج سینماتیک می‌باشند. برای محاسبه سرعت موج سینماتیک به دو روش می‌توان عمل نمود. در روش اول فرض می‌شود که دبی Q و مساحت جریان A از طریق معادله زیر باهم رابطه دارند (Akan, 2006):

$$Q = e\,A^m \qquad (۱۵)$$

که در آن e و m ثابت هستند. اگر منحنی دبی- اشل در یک مقطع از کانال موجود باشد (داده‌های مشاهداتی Q و A)، می‌توان مقادیر ثابت e و m را با برازش دادن رابطه (۱۵) به منحنی دبی- اشل محاسبه نمود. در صورتی که این داده‌ها موجود نباشند، با پذیرفتن رابطه جریان یکنواخت می توان مقادیر e و m را از روابط زیر بدست آورد:

$$Q = \left(\frac{k_n\,S_0^{1/2}}{n\,P^{2/3}}\right)A^{5/3} \qquad (۱۶)$$

k_n در سیستم SI برابر یک و در سیستم انگلیسی برابر ۱/۴۸۶ می‌باشد. از روابط (۱۵) و (۱۶) واضح است که $m = 5/3$ و

$$e = \frac{k_n\,S_0^{1/2}}{n\,P^{2/3}} \qquad (۱۷)$$

محیط خیس شده P با عمق جریان تغییر می‌کند و برای اکثر شکل‌های سطح مقطع، معادله (۱۷) مقدار ثابتی را برای e ارائه نمی‌کند. در این شرایط مقدار ثابت P در معادله (۱۷) استفاده می‌شود و در نتیجه این روش (روش اول) تقریبی خواهد بود. در این صورت مقدار سرعت موج سینماتیک از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$a = mV_0 = \frac{5}{3}V_0 \qquad (۱۸)$$

در روش دوم که دقیق‌تر از روش اول می‌باشد، سرعت موج سینماتیک از رابطه (۱۹) تعیین می‌شود که در آن dQ/dy شیب منحنی دبی- اشل است.

$$a = \frac{dQ}{dA} = \frac{1}{T}\frac{dQ}{dy} \qquad (۱۹)$$

با استفاده از رابطه مانینگ و قرار دادن مشخصات مقطع ذوزنقه‌ای در آن، مقدار سرعت موج از رابطه زیر قابل تعیین است.

Archive of SID

www.SID.ir

$$a=\left(\frac{5}{3}-\frac{4}{3}\frac{R_0}{T_0}\sqrt{1+z^2}\right)V_0 \qquad (۲۰)$$

همانطور که مشاهده می‌شود ضریب V_0 در معادله (۲۰) با تغییر عمق تغییر می‌کند و همانند ضریب V_0 در رابطه (۱۸) مقدار ثابتی نیست. در این تحقیق از رابطه (۲۰) برای محاسبه سرعت موج استفاده شده است. دبی مرجع Q_0 را می‌توان از رابطه (۲۱) محاسبه نمود که در آن I_{min} و I_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر دبی هیدروگراف ورودی می‌باشند (Tewolde and Smithers, 2006):

$$Q_0 = I_{min} + 0.5\left(I_{max} - I_{min}\right) \qquad (۲۱)$$

روند کار به این ترتیب است که ابتدا دبی مرجع از رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود و سپس از رابطه مانینگ مقدار عمق نرمال Y_0 تعیین شده و از آنجا مقادیر T_0، A_0، P_0 و R_0 بدست می‌آیند. با این داده‌ها سرعت موج از معادله (۲۰)، پارامترهای ماسکینگام X و K به ترتیب از روابط (۱۳) و (۱۴) محاسبه می‌شوند. آنگاه ضرایب C_1، C_2 و C_3 از روابط (۹) الی (۱۱) تعیین شده و در نهایت مقدار دبی خروجی از معادله (۸) بدست می‌آید. عیب این روش در این است که مقدار دبی مرجع و در نتیجه سرعت موج ثابت است، در حالی‌که با حرکت روی شاخه بالارونده هیدروگراف، دبی زیاد شده و سرعت موج هم افزایش می‌یابد. این وابستگی به دبی مرجع را می‌توان با به کار بردن پارامترهای متغیر از بین برد، به این ترتیب که دبی مرجع در هر گام زمانی توسط رابطه (۲۲) تجدید نظر می‌شود و با این دبی تجدید نظر شده دوباره متغیرهای T_0، A_0، P_0، R_0، a، X، K، C_1، C_2 و C_3 محاسبه می‌شوند (Ponce and Yevjevich, 1978):

$$Q_0 = \frac{I_{t-1} + I_t + Q_{t-1} + Q_t}{4} \qquad (۲۲)$$

که در آن Q_t خود نیز مجهول بوده و با آزمون و خطا تعیین می‌شود. هرچند که با این عمل محاسبات دقیق‌تر می‌شود، اما چون در هرگام زمانی مقادیر پارامترها عوض می‌شود درصدی خطا در معادله پیوستگی ایجاد می‌شود که مقدار آن به شیب، زبری، طول، عرض و ... بستگی دارد (Tang et al., 1999). برای رفع این مشکل، بعد از محاسبه هیدروگراف خروجی با روش پارامترهای متغیر یک ΔQ_i متغیر با زمان مطابق روابط (۲۳) و (۲۴) محاسبه شده و به داده‌های هیدروگراف خروجی اضافه می‌شود. ΔQ_i بگونه‌ای محاسبه شده است که اولاً مقدار آن با افزایش دبی زیاد شده و در لحظه اوج به حداکثر مقدار ΔQ_p می‌رسد و ثانیاً اختلاف حجم هیدروگراف خروجی بعد از اضافه کردن ΔQ_iها به آن و هیدروگراف خروجی با پارامترهای متغیر با اختلاف حجم هیدروگراف ورودی و هیدروگراف خروجی به دست آمده با پارامترهای متغیر برابر باشد. مقدار ΔQ_p را می‌توان از رابطه (۲۵) محاسبه نمود.

$$\Delta Q_i = \Delta Q_p \left(\frac{Q_i - Q_1}{Q_p - Q_1}\right) \qquad 1 \le i \le N_p \qquad (۲۳)$$

$$\Delta Q_i = \Delta Q_p \left(\frac{Q_i - Q_N}{Q_p - Q_N}\right) \qquad N_p \le i \le N \qquad (۲۴)$$

$$\Delta Q_p = \frac{\Delta V/\Delta t}{\sum_{i=1}^{N_p}\left(\frac{Q_i - Q_1}{Q_p - Q_1}\right) + \sum_{i=N_p+1}^{N}\left(\frac{Q_i - Q_N}{Q_p - Q_N}\right)} \qquad (۲۵)$$

که در روابط (۲۳)، (۲۴) و (۲۵)، Q_1، Q_i، Q_p و Q_N به ترتیب دبی هیدروگراف خروجی محاسبه شده با پارامترهای متغیر در شماره‌های 1، i، N_p و N از داده‌های ثبت شده بر روی زمان می‌باشند و N_p شماره‌ای است که در آن دبی اوج Q_p اتفاق می‌افتد و N تعداد کل داده‌های هیدروگراف خروجی است. در روش ماسکینگام – کانژ X به عنوان فاکتور وزنی تفسیر نمی‌شود و لذا می‌تواند دارای مقادیر منفی نیز باشد (Szel and Gaspar, 2000). Tang et al. (1999) مدلی ارائه داده‌اند که با درنظر گرفتن گرادیان فشار هیدرواستاتیک، پارامترهای روش ماسکینگام–کانژ با پارامترهای متغیر اصلاح می‌شوند. مدل آنها نه تنها باعث بهبود هیدروگراف‌های روندیابی شده می‌شود، بلکه خطای برآورد حجم را نیز به کمتر از ۰/۵ درصد کاهش می‌دهد، ولی معادلات (۲۳) تا (۲۵) خطای پیوستگی را به طور کامل حذف می‌کنند.

طول بازه کانال در این روش برای تولید نتایج صحیح به شکل زیر محدود می‌شود (Ponce and Theurer, 1982):

$$L \le 0.5\left[a\,\Delta t + \frac{Q_0}{a\,T_0\,S_0}\right] \qquad (۲۶)$$

Archive of SID

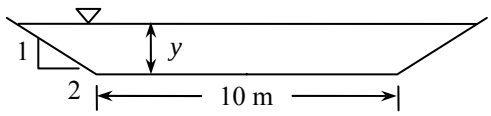
www.SID.ir

اگر طول کانال از طول مجاز رابطه فوق بیشتر باشد، می‌بایست بازه کانال را به تعدادی بازه‌های کوچکتر تقسیم کرد. برای این مراحل نیز برنامه‌ای در فضای نرم‌افزار Matlab نوشته شد که با استفاده از آن می‌توان روندیابی به روش ماسکینگام-کانژ را با پارامترهای ثابت *(MC-CP)* و پارامترهای متغیر (MC-VP) انجام داد. برنامه قادر است تا طول مورد نظر را به تعداد بازه دلخواه تقسیم کند و روندیابی را در هر بازه انجام دهد.

خاطر نشان می‌شود گرچه معادلات روش روندیابی ماسکینگام- کانژ بطریقی مشابه روش ماسکینگام مرتب شده‌اند، اما این دو روش اساساً با یکدیگر تفاوت دارند. روش ماسکینگام یک روش روندیابی هیدرولوژیکی است، در حالیکه روش ماسکینگام- کانژ یک روش نیمه هیدرولیکی است که بر اساس تقریبی از معادلات سنت- ونان بنا شده است.

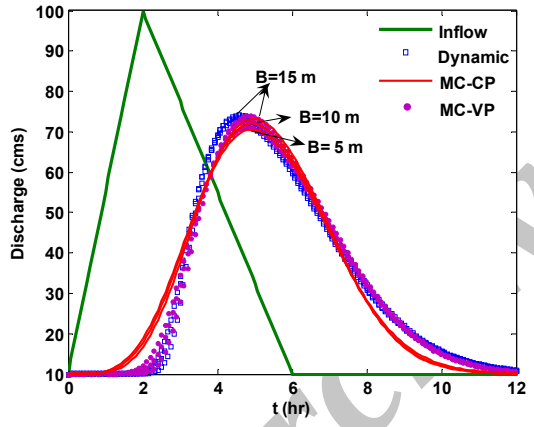
۴- مقایسه ماسکینگام-کانژ و روندیابی دینامیکی

به منظور مقایسه روش ماسکینگام-کانژ و روندیابی دینامیکی لازم است تا پارامترهای پایه تعریف شده و سپس پارامترها را در یک محدوده مشخصی تغییر داد و نتایج هر دو روش را بازاء این پارامترها بدست آورد. پارامترهای ورودی پایه که در این تحقیق از آنها استفاده شده است، دریک محدوده منطقی انتخاب شده‌اند. براین اساس طول ۱۵ کیلومتر، عرض ۱۰ متر، ضریب زبری ۰/۰۳، شیب ۰/۰۰۰۵، دبی اوج ورودی ۱۰۰ مترمکعب در ثانیه و زمان وقوع دبی اوج ورودی ۲ ساعت درنظر گرفته شدند. هیدروگراف ورودی به شکل مثلثی بوده و در زمان دو ساعت به دبی اوج ۱۰۰ مترمکعب برثانیه و در مدت ۶ ساعت به مقدار دبی پایه اولیه می‌رسد. در ضمن مقطع کانال به شکل ذوزنقه‌ای با شیب جانبی برابر 2H:1V است. در شکل ۱ مقطع عرضی کانال ذوزنقه‌ای برای پارامترهای پایه آورده شده است.

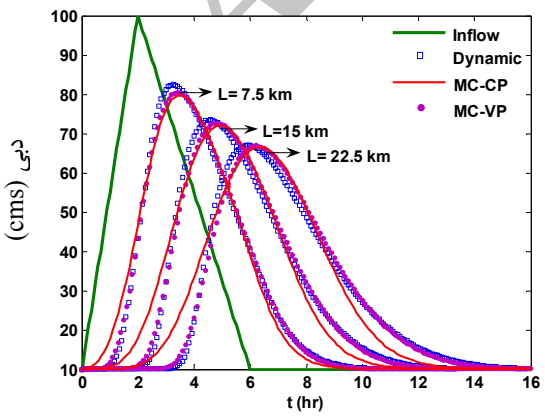


شکل ۱- مقطع عرضی کانال ذوزنقه‌ای

بر این اساس، مدل روندیابی دینامیکی و روش ماسکینگام-کانژ برای ۱۳ حالت اجرا شدند که یکی از این حالتها، استفاده از پارامترهای پایه به منظور روندیابی است. برای ۱۲ حالت دیگر، هریک از پارامترهای ورودی به اندازه ۵۰ درصد کم و زیاد شدند. براین اساس، مدلهای ذکر شده برای طول ۲۲/۵ و ۷/۵ کیلومتر، عرض ۱۵ و ۵ متر، ضریب زبری ۰/۰۴۵ و ۰/۰۱۵، شیب ۰/۰۰۰۷۵ و ۰/۰۰۰۲۵، دبی اوج ورودی ۱۵۰ و ۵۰ مترمکعب در ثانیه (هیدروگراف ورودی مثلثی در زمان ۲ ساعت به دبی اوج ۱۵۰ و ۵۰ مترمکعب بر ثانیه رسیده و سپس در مدت ۶ ساعت به صفر می‌رسد) و زمان دبی اوج ورودی ۳ و ۱ ساعت (هیدروگراف ورودی مثلثی در زمان ۳ و ۱ ساعت به دبی اوج ۱۰۰ مترمکعب بر ثانیه رسیده و بعد در مدت ۶ ساعت به صفر می‌رسد) با دیگر پارامترهای ثابت برابر همان مقادیر پایه‌شان نیز اجرا شدند. برای کلیه محاسبات در روندیابی دینامیکی مقادیر Δx و Δt به ترتیب برابر ۱۰۰ متر و ۰/۱ ساعت در نظر گرفته شدند. همچنین گام زمانی برای روش ماسکینگام-کانژ برابر ۰/۱ ساعت درنظر گرفته شد. شکلهای ۲ تا ۷ هیدروگرافهای خروجی تولید شده با روندیابی دینامیکی و روش ماسکینگام-کانژ با پارامترهای ثابت و متغیر را نشان می‌دهند و در هر شکل نتایج برای مقادیر پایه به منظور مقایسه بهتر تکرار شده است.



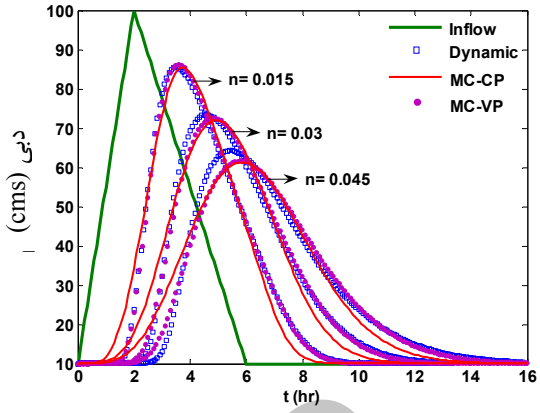
شکل ۲- اثر تغییر عرض بر هیدروگراف خروجی



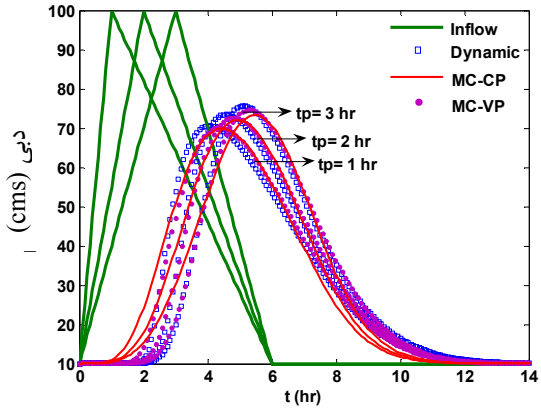
شکل ۳- اثر تغییر طول بر هیدروگراف خروجی

Archive of SID

www.SID.ir

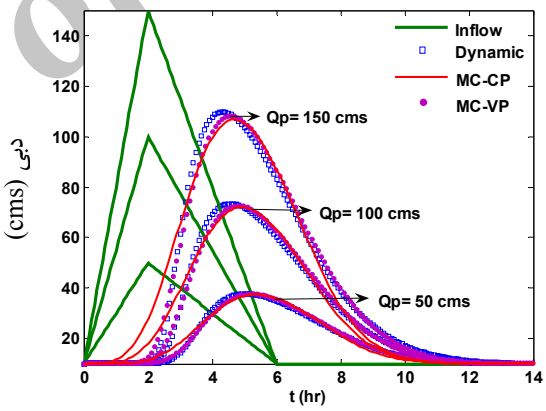


شکل ۴- اثر تغییر زبری بر هیدروگراف خروجی



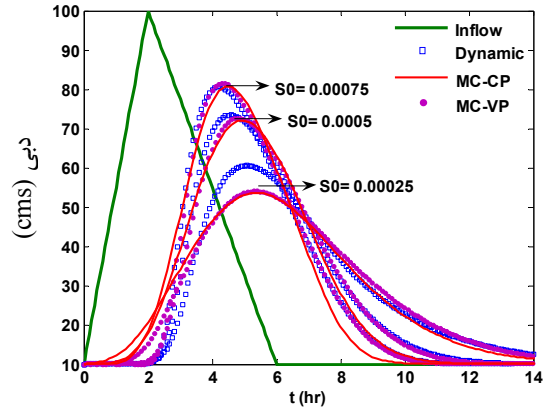
شکل ۷- اثر تغییر زمان اوج ورودی بر هیدروگراف خروجی

از شکل‌های رسم شده ۲ تا ۷ می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که در تمام حالت‌ها بجز در حالتی که شیب کم شده است، هیدروگراف خروجی روش ماسکینگام-کانژ با پارامترهای متغیر روی بازوی بالارونده هیدروگراف خروجی روندیابی دینامیکی حرکت کرده و در نزدیکی‌های رسیدن به اوج، به سمت هیدروگراف خروجی روش ماسکینگام-کانژ با پارامترهای ثابت متمایل شده و آنگاه روی بازوی پایین‌رونده روندیابی دینامیکی پایین می‌آید.



شکل ۵- اثر تغییر دبی اوج ورودی بر هیدروگراف خروجی

در شکل ۲ با کاهش عرض کانال و ثابت نگه داشتن دیگر پارامترها دبی خروجی از کانال کاهش یافته است، ولی زمان وقوع آن تغییری نکرده است. همچنین موج در زمان کمتری به نقطه خروجی رسیده است. در واقع کاهش عرض کانال باعث افزایش عمق و سرعت در کانال شده و در نتیجه هیدروگراف خروجی با کاهش عرض کانال زودتر شروع شده است. به علاوه افزایش عمق نشان دهنده ذخیره شدن بیشتر آب در کانال می‌باشد و این سبب می‌شود که دبی بیشتری از جریان ذخیره شده و دبی کمتری به خروجی برسد. در نتیجه با کاهش عرض کانال، دبی هیدروگراف خروجی کمتر شده است. البته همانطور که در شکل دیده می‌شود این تفاوت‌ها چندان مشهود نیست.



شکل ۶- اثر تغییر شیب بر هیدروگراف خروجی

در شکل ۳ مشاهده می‌شود که هرچه طول کانال بیشتر می‌شود دبی اوج کمتر شده و زمان وقوع آن بیشتر می‌گردد. افزایش طول کانال باعث می‌شود که موج، مسافت بیشتری را طی کند و در نتیجه زمان بیشتری را لازم دارد تا به خروجی برسد. دلیل فروکش کردن دبی اوج سیلاب نیز این است که هنگامی که هیدروگراف شروع می‌شود و یک طولی را طی می‌کند، مقداری از حجم سیلاب بسته به شکل کانال، مقدار ضریب زبری و شیب بستر در کانال ذخیره می‌شود و این باعث می‌شود که دبی اوج خروجی کاهش پیدا کند.

هرچه ضریب زبری کانال بزرگتر می‌شود، مطابق رابطه مانینگ، سرعت جریان کمتر شده و عمق آب زیاد می‌گردد. سرعت کمتر

Archive of SID

www.SID.ir

باعث می‌شود که موج در زمان بیشتری به نقطه خروجی برسد و در نتیجه مطابق شکل ۴، هیدروگراف خروجی با افزایش ضریب زبری دیرتر شروع می‌شود. به علاوه همانطور که بیان شد افزایش عمق باعث می‌شود که دبی بیشتری از جریان در کانال ذخیره شده و دبی کمتری به نقطه خروجی برسد. در نتیجه افزایش ضریب زبری دبی اوج هیدروگراف خروجی را کاهش می‌دهد.

کاهش شیب در کانال و افزایش ضریب زبری از نظر تأثیرشان بر دبی اوج هیدروگراف خروجی و زمان رخداد آن مشابه هستند، هرچند که اندازه اثر آنها یکسان نیست. به این معنی که کاهش شیب در کانال و افزایش ضریب زبری هر دو باعث کاهش دبی خروجی و افزایش زمان رخداد سیل می‌شوند. ولی از مقایسه شکلهای ۴ و ۶ در می‌یابیم که تأثیر کاهش شیب بستر کانال بر کاهش دبی خروجی بیشتر از تأثیر افزایش ضریب زبری بر کاهش دبی خروجی می‌باشد. همچنین بطور بالعکس می‌توان گفت که تأثیر کاهش شیب بستر بر افزایش دبی اوج خروجی کمتر از تأثیر افزایش ضریب زبری بر افزایش زمان رخداد دبی اوج خروجی است.

در شکل ۵ دیده می‌شود که هرچه بازوی بالارونده هیدروگراف ورودی دارای شیب تندتری باشد، بازوی بالارونده هیدروگراف خروجی مطابق با آن نیز دارای شیب تندتری خواهد بود. به علاوه چون در یک زمان مشابه، هیدروگراف دارای دبی بیشتر سرعت بالاتری هم دارد باعث می‌شود که موج شکل گرفته از آن نیز زودتر به محل خروجی برسد، بنابراین همانطور که در شکل دیده می‌شود هیدروگراف خروجی که دارای دبی اوج ورودی ۱۵۰ مترمکعب بر ثانیه بوده است در زمان زودتری به وقوع پیوسته است. به هر حال چون در این حالت حجم سیلاب در هریک از هیدروگراف‌ها متفاوت است، حجم سیلاب‌های خروجی هم متفاوت خواهد بود.

در شکل ۷ حجم سیلاب در هریک از سه هیدروگراف ورودی با زمان‌های اوج متفاوت یکسان است. هیدروگراف با زمان وقوع یک ساعت دارای شیب بازوی بالارونده تندتری است، ولی بازوی بالارونده هیدروگراف‌های خروجی تغییر چندانی نکرده است. چون در یک زمان مشابه هیدروگراف ورودی که زودتر به وقوع پیوسته است دارای دبی بیشتری می‌باشد سرعت موج آن نیز بالاتر بوده و بنابراین زودتر به محل خروجی رسیده است. هیدروگرافی که پس از سه ساعت به اوج خود رسیده است حجم بیشتری از سیلاب را تا زمان وقوع اوج خود نسبت به هیدروگرافی که پس از یک ساعت به نقطه اوج خود رسیده است منتقل می‌کند و منتقل کردن حجم سیلاب بیشتر سب گردیده است که هیدروگراف خروجی ناشی از هیدروگراف ورودی با زمان اوج سه ساعت دارای دبی اوج بیشتری باشد.

در شکل‌های ۸ تا ۱۱ پارامترهای خروجی روش روندیابی دینامیکی و روش ماسکینگام–کانژ با پارامترهای ثابت و متغیر نسبت به یکدیگر به ترتیب مربوط به دبی اوج خروجی، زمان دبی اوج خروجی، زمان شروع هیدروگراف خروجی و زمان پایه آن رسم شده‌اند. مسلماً هر قدر شیب خط عبوری از بین نقاط به خط با شیب ۴۵ درجه نزدیکتر باشد، اختلاف دو روش کمتر است. همانطور که در شکل‌ها دیده می‌شود، روش ماسکینگام–کانژ با پارامترهای ثابت و متغیر قادر است دبی اوج خروجی و زمان آن و تا حدودی زمان پایه هیدروگراف خروجی را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کند. در ضمن با روش پارامترهای متغیر برآورد بهتری از زمان شروع هیدروگراف خروجی و شکل هیدروگراف خواهیم داشت.

چنانچه در شکل ۸ مشاهده می‌شود روش ماسکینگام– کانژ با پارامترهای متغیر توانسته است دبی اوج سیلاب را در مقایسه با روش دینامیکی با دقت قابل قبولی پیش‌بینی نماید، با این وجود بیشترین تفاوت‌ها در این دو روش به ترتیب مربوط به دو حالت $S_0 = 0.00025$ و $n = 0.045$ می‌باشند، یعنی موقعی که با ثابت نگه داشتن دیگر پارامترها، شیب بستر کانال و ضریب زبری به ترتیب نسبت به مقادیر پایه‌شان کم و زیاد شده‌اند. همچنین مطابق شکل در بعضی حالت‌ها هم مقدار دبی اوج خروجی در روش *MC-VP* بیشتر از روش دینامیکی به دست آمده است.

در شکل ۹ دیده می‌شود که در تمام حالت‌ها زمان وقوع دبی اوج سیلاب در روش *MC-VP* بیشتر از روش روندیابی دینامیکی می‌باشد. همچنین از مقایسه شکل‌های ۸ و ۹ درمی‌یابیم که دقت روش *MC-VP* در پیش‌بینی دبی اوج خروجی بیشتر از دقت آن در پیش‌بینی زمان وقوع دبی اوج سیلاب است.

در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که زمان شروع هیدروگراف خروجی (زمانی که طول می‌کشد تا موج به نقطه خروجی برسد) در تمام حالت‌ها در روش *MC-VP* کمتر از روش دینامیکی می‌باشد. باز هم بیشترین تفاوت بین دو روش در پیش‌بینی زمان شروع هیدروگراف خروجی به ترتیب مربوط به دو حالت $S_0 = 0.00025$ و $n = 0.045$ می‌باشند. به علاوه از مقایسه شکل‌های ۹ و ۱۰ در می‌یابیم که زمانی که موج به نقطه خروجی می‌رسد در روش

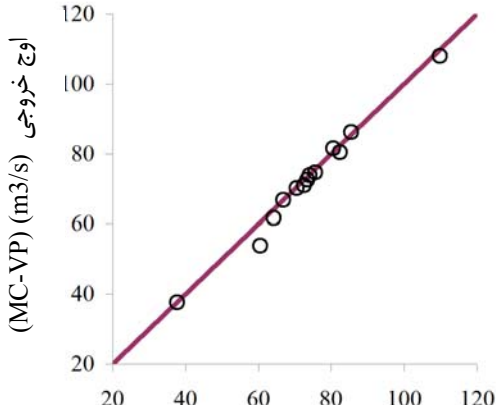
Archive of SID

www.SID.ir

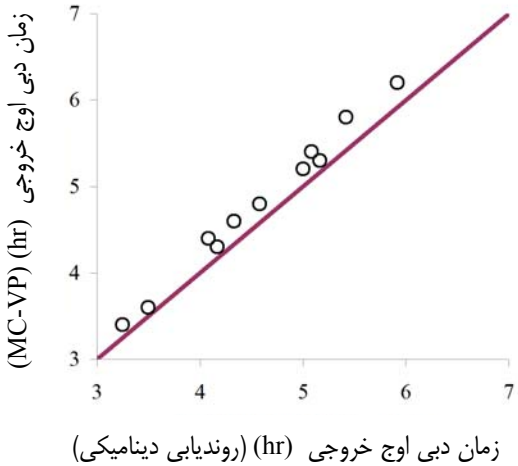
MC-VP کمتر از روش دینامیکی است و زمان وقوع دبی اوج سیلاب در روش *MC-VP* بیشتر از روش دینامیکی می‌باشد. این بدین معنی است که شیب بازوی بالارونده هیدروگراف خروجی در روش دینامیکی تند تر از روش *MC-VP* است و این اختلاف شیب برای حالت‌هایی که شیب بستر کاهش و ضریب زبری افزایش می‌یابند، بیشتر می‌شود.

مطابق شکل ۱۱ بازهم بیشترین تفاوت در پیش‌بینی زمان پایه هیدروگراف بین دو روش *MC-VP* و روش دینامیکی به ترتیب مربوط به دو حالت $S_0 = 0.00025$ و $n = 0.045$ می‌باشند و در بقیه حالت‌ها تفاوت چندانی از این نظر بین دو روش وجود ندارد. از این نکته چنین برداشت می‌شود که در مواردی که شیب بستر کاهش و ضریب زبری افزایش می‌یابند، هیدروگراف خروجی دچار پخشیدگی بیشتری می‌شود. البته این پخشیدگی در حالتی که شیب کم می‌شود بیشتر از حالتی است که ضریب زبری زیاد می‌گردد.

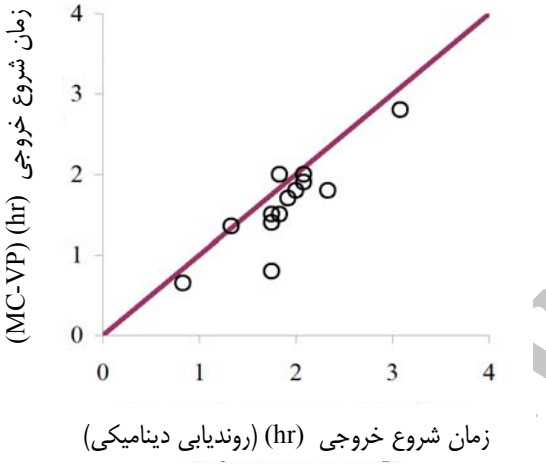
مقایسه‌ای از دبی اوج هیدروگراف خروجی بین روندیابی دینامیکی و روش ماسکینگام-کانژ با پارامترهای ثابت توسط Merkel (2002) انجام شده است. در این تحقیق بعد از انجام ۷۷ آزمایش از حالت‌های مختلف شکل کانال، شیب و زبری این نتیجه حاصل شده است که تنها سه آزمایش درصد خطای ۱۵ تا ۱۹ درصد و ۱۴ آزمایش نیز خطای ۱۰ تا ۱۴ درصد داشتند. خطای ۶۰ آزمایش باقیمانده کمتر از ۱۰ درصد بوده است.



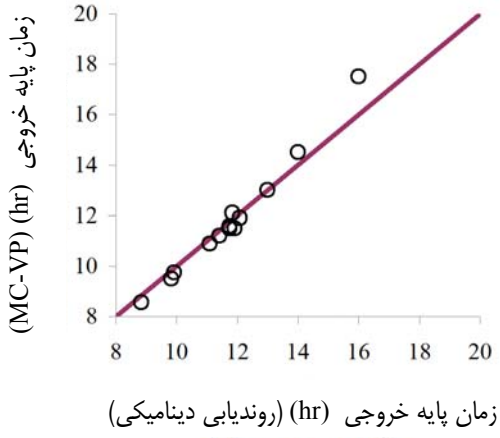
شکل ۸- مقایسه دبی اوج خروجی دو روش روندیابی دینامیکی و MC-VP



شکل ۹- مقایسه زمان وقوع دبی اوج خروجی دو روش روندیابی دینامیکی و MC-VP



شکل ۱۰- مقایسه زمان شروع هیدروگراف خروجی از دو روش روندیابی دینامیکی و MC-VP



شکل ۱۱- مقایسه زمان پایه هیدروگراف خروجی از دو روش روندیابی دینامیکی و MC-VP

www.SID.ir

۵- تحلیل حساسیت پارامترهای روندیابی دینامیکی

تحلیل حساسیت به منظور معرفی حساسیت نتایج خروجی مدل بر اساس تغییرات پارامترهای ورودی آن یکی از موضوعات قابل توجه است. همچنین تحلیل حساسیت برای معرفی سطح عدم قطعیت در پیش‌بینی مدل در مقایسه با عدم قطعیت موجود در تخمین پارامترها بکار می‌رود. شاخص حساسیت به شکل رابطه زیر می‌تواند برای تعیین میزان حساسیت نتایج خروجی مدل نسبت به تغییر در پارامترهای ورودی مورد استفاده قرار گیرد:

$$SI = \left(\frac{O_2 - O_1}{O_{ave}} \right) \Big/ \left(\frac{I_2 - I_1}{I_{ave}} \right) \qquad (۲۷)$$

که دراین رابطه SI شاخص حساسیت، I_1 و I_2 به ترتیب کوچکترین و بزرگترین مقدار پارامتر ورودی، I_{ave} متوسط I_1 و I_2، O_1 و O_2 مقادیر خروجی متناظر با I_1 و I_2 و بالاخره O_{ave} متوسط O_1 و O_2 می‌باشند. نتایج خروجی مدل در قالب دبی اوج هیدروگراف خروجی و زمان وقوع آن در نظر گرفته شده‌اند. مقادیر دبی اوج هیدروگراف خروجی و زمان رخداد آن برای روش روندیابی دینامیکی در جدول ۱ آمده است. نتایجی که از این جدول می‌توان برداشت کرد، عبارتند از:

۱- افزایش پارامترهای طول وضریب زبری نسبت به پارامتر پایه، باعث کاهش دبی اوج هیدروگراف خروجی و افزایش زمان وقوع آن شده است و برعکس کاهش آنها، دبی اوج هیدروگراف خروجی را افزایش و زمان رخداد آن را کاهش داده است.

۲- افزایش پارامترهای عرض، شیب و دبی اوج ورودی، دبی اوج خروجی را افزایش می‌دهد و برعکس کاهش این پارامترها دبی اوج خروجی را کم می‌کند.

۳- با کم و زیاد کردن عرض، زمان وقوع دبی اوج خروجی تغییری نمی‌کند.

۴- افزایش پارامترهای شیب و دبی اوج ورودی، زمان وقوع دبی اوج خروجی را کم می‌کند و برعکس کاهش آنها باعث افزایش زمان رخداد دبی اوج خروجی می‌شود.

۵- با افزایش زمان وقوع دبی اوج ورودی، دبی اوج خروجی و زمان رخداد آن نیز افزایش یافته و با کاهش آن، دبی اوج خروجی و زمان آن هردو کم می‌شوند.

جدول ۱- مقادیر دبی اوج هیدروگراف خروجی و زمان رخداد آن در روش روندیابی دینامیکی

مقادیر پارامترها	دبی اوج خروجی (مترمکعب در ثانیه)	زمان اوج خروجی (ساعت)
مقادیر پایه	۷۳/۴۲۹	۴/۵۸۳
طول ۲۲/۵ کیلومتر	۶۶/۹۱۴	۵/۹۱۷
طول ۷/۵ کیلومتر	۸۲/۴۱۷	۳/۲۵
عرض ۱۵ متر	۷۴/۰۸۶	۴/۵۸۳
عرض ۵ متر	۷۲/۶۰۷	۴/۵۸۳
زبری ۰/۰۴۵	۶۴/۲۵۷	۵/۴۱۷
زبری ۰/۰۱۵	۸۵/۴۸۹	۳/۵
شیب ۰/۰۰۰۷۵	۷۳/۴۲۹	۴/۵۸۳
شیب ۰/۰۰۰۲۵	۶۶/۹۱۴	۵/۹۱۷
دبی اوج ورودی ۱۵۰ مترمکعب برثانیه	۸۲/۴۱۷	۳/۲۵
دبی اوج ورودی ۵۰ مترمکعب بر ثانیه	۷۴/۰۸۶	۴/۵۸۳
زمان اوج ورودی ۳ ساعت	۷۲/۶۰۷	۴/۵۸۳
زمان اوج ورودی ۱ ساعت	۶۴/۲۵۷	۵/۴۱۷

برای بررسی تحلیل حساسیت نسبی هر یک از پارامترهای ورودی بر روی پارامترهای خروجی، شاخص حساسیت تعریف شده در رابطه (۲۷) نیز محاسبه شد. مقادیر این شاخص برای هریک از پارامترهای ورودی در جدول ۲ ارائه شده است. علامت منفی در جدول به منزله کوچکتر شدن مقدار خروجی به ازاء بزرگتر نمودن پارامتر ورودی می‌باشد. نتایج حاصل از جدول ۲ را می‌توان به شرح زیر ارائه نمود.

۱- تغییر در دبی اوج هیدروگراف ورودی بیشترین تأثیر را بر روی دبی اوج هیدروگراف خروجی می‌گذارد.

۲- پس از دبی اوج ورودی، پارامترهای ضریب زبری و شیب بستر تأثیر نسبتاً یکسانی را برروی دبی اوج خروجی نشان می‌دهند. البته افزایش ضریب زبری و شیب به ترتیب باعث کاهش و افزایش دبی اوج خروجی شده‌اند.

۳- پارامترهای عرض کانال و زمان وقوع دبی اوج ورودی اثر چندانی برروی دبی اوج خروجی نمی‌گذارند. البته این تأثیر کم برای زمان دبی اوج ورودی کمی بیشتر از عرض کانال است.

۴- بیشترین پارامترهای مؤثر برروی زمان وقوع دبی اوج خروجی، طول کانال و پس از آن ضریب زبری می‌باشند و افزایش هر یک، زمان رخداد دبی اوج خروجی را زیاد می‌کنند.

Archive of SID
www.SID.ir

۵- بعد از طول و ضریب زبری، پارامترهای زمان دبی اوج ورودی، شیب بستر و دبی اوج ورودی به ترتیب تأثیر بیشتری برروی زمان رخداد دبی اوج خروجی نشان می‌دهند.

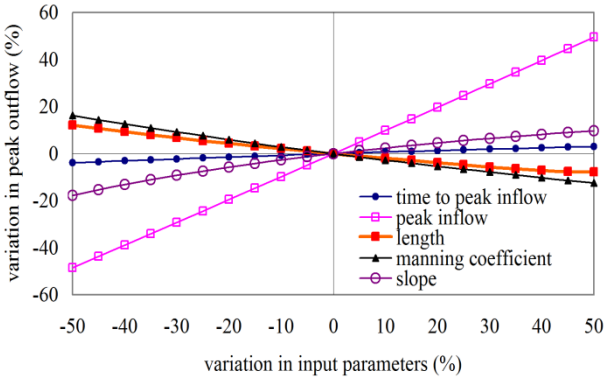
۶- تغییر در عرض کانال، زمان وقوع دبی اوج هیدروگراف خروجی را تغییر نمی‌دهد.

جدول ۲- مقادیر شاخص حساسیت پارامترهای ورودی با دبی اوج خروجی و زمان وقوع آن

پارامترها	دبی اوج خروجی	زمان اوج خروجی
طول	-۰/۲۰۸	۰/۵۸۲
عرض	۰/۰۲	۰
زبری	-۰/۲۸۴	۰/۴۳۰
شیب	۰/۲۸۴	-۰/۱۹۸
دبی اوج ورودی	۰/۹۷۶	-۰/۱۴۳
زمان اوج ورودی	۰/۰۷	۰/۲۳۴

لازم به توضیح است که شاخص‌های حساسیت محاسبه شده، صرفاً شاخص‌هایی در فضای ریاضی است و نمی‌تواند معیار صحیحی از میزان عدم قطعیت نتایج خروجی بعلت عدم قطعیت موجود در پارامترهای ورودی ارائه کند. بررسی این موضوع نیاز به تجزیه وتحلیل عدم قطعیت و یا در شکل ساده‌تر آن تغییر پارامترها در محدوده قابل قبول وقوع‌شان دارد، که‌خود تحقیق جامع دیگری را طلب می‌کند. به هرحال، کسانی که در زمینه مدل‌سازی ریاضی این‌گونه پدیده‌ها کار می‌کنند به این موضوع واقف‌اند که اهمیت شاخص‌های جدول ۳ در این است که می‌بایست پارامترهای با شاخص حساسیت بالا را در فرآیند واسنجی پارامترها دخالت داد.

برای محاسبه مقادیر شاخص حساسیت جدول ۲، هریک از پارامترهای ورودی به میزان ۵۰ درصد کم و زیاد شدند. اما به منظور درک بیشتر، در این قسمت هریک از پارامترهای ورودی (به جز عرض که تأثیر چندانی روی دبی اوج هیدروگـــراف خروجی ندارد)، به اندازه ۵ درصد نسبت به مقادیر پایه‌شان کم و زیاد شده‌اند و تأثیر آنها روی دبی اوج هیدروگراف خروجی بررسی شده است. در شکل ۱۲ درصد تغییر در دبی اوج هیدروگراف خروجی نسبت به درصد تغییر در پارامترهای ورودی برای روش روندیابی دینامیکی رسم شده است.



شکل ۱۲- درصد تغییر در دبی اوج هیدروگراف خروجی نسبت به درصد تغییر در پارامترهای ورودی

چنانچه در شکل مشاهده می‌شود، تغییر دادن خطی پارامترهای ورودی باعث تغییرات خطی در دبی اوج هیدروگراف خروجی نمی‌شود و تغییرات آن به شکل منحنی است.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از حل عددی معادلات یک بعدی سنت-ونان، روش روندیابی دینامیکی به عنوان یک روش پیش‌بینی موج سیلاب انجام گردید. همچنین روش ماسکینگام-کانژ با پارامترهای ثابت و متغیر که درآن پارامترهای روش ماسکینگام براساس خصوصیات فیزیکی بازه کانال بیان می‌شوند نیز بکار گرفته شد و به عنوان یک روش ساده‌تر نسبت به روندیابی دینامیکی با آن مقایسه گردید. درنهایت این نتیجه حاصل گردید که روش ماسکینگام-کانژ بجز در شیب‌های کم در مقایسه با روش روندیابی دینامیکی می‌تواند دبی اوج هیدروگراف خروجی و زمان وقوع آنرا با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کند. همچنین، اگر از هیدروگراف خروجی، دبی اوج و زمان وقوع آن دارای اهمیت باشند، چنانچه مشاهده شد تفاوت چندانی بین این دو پارامتر از روش‌های *MC-CP* و *MC-VP* نیست و تنها برتری روش *MC-VP* در برآورد بهتر شکل هیدروگراف خروجی است.

انجام تحلیل حساسیت روی پارامترهای خروجی روندیابی دینامیکی یعنی دبی اوج هیدروگراف خروجی و زمان وقوع آن نشان می‌دهد که دبی اوج هیدروگراف ورودی و بعد از آن زبری و شیب تأثیر بسزایی روی دبی اوج هیدروگراف خروجی می‌گذارند. همچنین طول کانال و پس از آن زبری عوامل مؤثر در زمان وقوع دبی اوج خروجی بشمار می‌روند واین پارامترها باید در فرآیند کالیبراسیون پارامترها اعمال شوند.

Archive of SID
www.SID.ir

در نهایت، همانطور که بیان شد در تمام حالتهای بررسی شده در این تحقیق بجز در حالتی که شیب کم شده است، هیدروگراف خروجی روش ماسکینگام-کانژ با پارامترهای متغیر روی بازوی بالارونده هیدروگراف خروجی روندیابی دینامیکی حرکت کرده و در نزدیکیهای رسیدن به اوج، به سمت هیدروگراف خروجی روش ماسکینگام-کانژ با پارامترهای ثابت متمایل شده و آنگاه روی بازوی پایین‌رونده روندیابی دینامیکی پایین می‌آید. بنابراین به عنوان تحقیقات بیشتر می‌توان روی اصلاح روش ماسکینگام- کانژ با پارامترهای متغیر کار کرد ت اینکه اولاً در شیب‌های کم هم بتواند با دقت قابل قبولی هیدروگراف خروجی را برآورد نماید و ثانیاً در نزدیکیهای اوج هم روی هیدروگراف خروجی روندیابی دینامیکی حرکت نماید.

به علاوه در این تحقیق هیدروگراف‌های ورودی به صورت فرضی و به شکل مثلثی بر روی یک رودخانه فرضی درنظر گرفته شده‌اند. تحلیل هیدروگراف‌های مشاهداتی واقعی بر روی یک رودخانه واقعی می‌تواند نتایج این تحقیق را کامل‌تر و دقیق‌تر ارائه نماید.

در این تحقیق، اثر تغییر یک پارامتر با ثابت نگه داشتن دیگر پارامترها روی نتایج هیدروگراف خروجی تحلیل شده است. به عنوان مطالعات بیشتر می‌توان دو یا تعداد بیشتر پارامتر را بطور همزمان تغییر داد و تأثیر آن را روی شکل هیدروگراف خروجی بررسی نمود و در نهایت نتایج را از این نظر مورد تحلیل و بحث هیدرولیکی قرار داد.

در نهایت می‌توان روی ارائه یک رابطه برای تحلیل حساسیت پارامترها در حالتی که دو یا چند پارامتر بطور همزمان تغییر داده می‌شوند کار کرد.

۶- مراجع

Akan S. (2006). Open Channel Hydraulics, ButterWorth, Heinemann, Elsevier Ltd., Oxford, Burlington, MA01803.

Chow V.T., Maidment D.R. and Mays L.W. (1988). *Applied Hydrology*, McGraw-Hill International Editions.

Julien P.Y. (2002). River Mechanics, Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Cambridge CB2 2RU, UK.

Merkel W.H. (2002). "Muskingum-Cunge flood routing procedure in NRCS Hydrologic Models", Presented at the second Federal Intragency Hydrologic Modeling Conference.

Nourani, V. and Mano, A. (2007). "Semi-distributed flood runoff model at the sub continental scale for SouthWestern Iran", *Hydrological Processes*, Vol. 21, pp. 3173-3180.

Ponce, V.M. and Theurer, F.D. (1982). "Accuracy criteria in diffusion routing", *Journal of the Hydraulic Division*, *ASCE*, Vol. 108, pp. 747-757.

Ponce, V.M. and Yevjevich, V. (1978). "Muskingum-cunge method with variable parameters", *Journal of the Hydraulic Division, ASCE,* Vol. 104 (HY12), pp. 1663-1667.

Singh V.P. (1988). Hydrologic Systems: *Rainfall-Runoff Modelling*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Szel S. and Gaspar C. (2000). "On the negative weighting factors in the muskingum-cunge scheme", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 38 (4), pp. 299-306.

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

Tewolde M.H. and Smithers J.C. (2006). "Flood routing in unguagrd catchments using muskingum methods", Available on website http://www.wrc. org.za.

Archive of SID
www.SID.ir