

ارزیابی هیدرولیکی حرکت سیل و پهنه‌بندی آن توسط مدل‌سازی عددی معادله سنت ونانت در رودخانه بستانک

محمدرضا گودرزی*

استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت الله بروجردی (ره).

پست الکترونیک:

goodarzi6mr@gmail.com

امیر حسینی

دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت الله بروجردی (ره).

پست الکترونیک:

eca.hoseini@yahoo.com

معادلات حرکت جریان‌های غیردائمی در آبراهه‌های روباز، معادلات پیوستگی و اندازه حرکت بوده و به معادلات سنت ونانت معروف هستند. برحسب ساده‌سازی‌هایی که در این معادلات صورت می‌گیرد، دسته‌بندی مدل‌های روندیابی عددی سیلاب صورت می‌پذیرد. از جمله روش‌های روندیابی سیلاب، مدل‌های امواج دینامیکی، سینماتیکی و مدل‌های هیدرولوژیکی کانوکس و ماسکینگام می‌باشند. در این تحقیق، علاوه بر تشریح اصول معادلات سنت ونانت و مدل‌های عددی امواج دینامیکی، سینماتیکی و مدل‌های کانوکس و ماسکینگام، نتایج مورد مقایسه قرار گرفته است. برای این مهم، از بازه رودخانه بستانک بین ایستگاه‌های هیدرومتری بادامک تا خانمین در استان فارس بهره برده شد و با ارائه یک رابطه ریاضی نوین با استفاده از خروجی MIKE11 و اکسل به پیش‌بینی دبی سیلاب، پهنه سیل‌گیر رودخانه و بیشینه عرض جریان سیل اقدام گردید. نتایج نشان داد که مدل موج دینامیکی MIKE11 با اختلاف دبی ۰/۰۴۴ مترمکعب بر ثانیه نسبت به دبی اوج مشاهداتی، مقدار دبی حداکثر را با دقت بالایی تخمین زده و نتایج بهتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. همچنین روندیابی و پهنه‌بندی ریاضی سیل در میان روش‌های هیدرولوژیکی، حاکی از نزدیکی نتایج هیدرولوژیکی ماسکینگام به کمک الگوی حداقل مربعات به مقدار ۱۴۳۸۴/۷ مترمربع و کمترین خطا با مقادیر عددی MIKE11 و سیل مشاهداتی بوده است.

واژگان کلیدی: بستانک، سنت ونانت، MIKE11، روندیابی، بیشینه عرض و پهنه‌بندی سیلاب.

۱- مقدمه

بنابراین برای سیلاب‌ها، پیش‌بینی عمق و دبی اوج سیلاب برای طراحی پروژه‌های کنترل سیل، مهم می‌باشد. جهت این امر از حل معادلات جریان‌های غیردائمی بهره برده می‌شود. روندیابی سیلاب، مجموعه عملیاتی است که به وسیله آنها مشخصات هیدرولیکی جریان پایین‌دست توسط مشخصات معلوم جریان بالادست تعیین می‌گردد [۱]. در یک دسته‌بندی کلی، روش‌های حل معادلات جریان‌های غیردائمی به دو دسته هیدرولیکی و هیدرولوژیکی تقسیم می‌گردد [۱]. در روش‌های هیدرولیکی، معادلات یک‌بعدی پیوستگی و اندازه حرکت،

سیل از جمله جریان‌های غیردائمی متغیر تدریجی است که با زمان و مکان متغیر است. برای سازه‌های هیدرولیکی نظیر پل‌ها، تونل‌ها، خاکریزها، سدها و سرریزها یکی از اولین مشکلات این است که آیا این سازه‌ها قادر خواهند بود اوج سیلاب را از خود عبور دهند. همچنین در کنترل سیل و کاهش خسارات ناشی از آن، پیش‌بینی عمق سیلاب از اهمیت خاصی برخوردار است.

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۲۶، بازنگری: ۱۳۹۶/۰۴/۲۰، پذیرش: ۱۳۹۶/۰۵/۰۸.

(DOI): 10.22091/cer.2017.1611.1065 شناسه دیجیتال

سیلاب در رودخانه تاپی^{۱۰} در هند پرداختند. برای این منظور، آنها چهار ایستگاه هیدرومتری کاکراپور^{۱۱}، منداوی^{۱۲}، روستای قلا^{۱۳} و ایستگاه پل نهرو^{۱۴} را به‌عنوان ایستگاه‌های معرف و بزرگترین سیلاب به‌وقوع پیوسته را بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ انتخاب نمودند. سپس با تعریف مقاطع عرضی مساحی شده به مدل MIKE11 با کمک مدل موج دینامیکی سیل به شبیه‌سازی جریان سیلاب پرداختند. نتایج خروجی ایشان با نتایج واقعی مقایسه و کالیبراسیون نتایج صورت پذیرفت. نتایج، در این بازه از رودخانه تاپی، حاکی از برتری مشهود مدل حداقل مربعات در شبیه‌سازی هیدرودینامیکی سیل بود [۶]. شوای^{۱۵} و همکاران، به عملیات روندیابی سیل در رودخانه دگو^{۱۶} در چین پرداختند. هدف از این مطالعه، بررسی میزان تعدیل سیلاب محاسباتی با مقادیر مشاهداتی بود. نتایج، حاکی از دقت بالای مدل موج دینامیکی در عملیات روندیابی سیل در بازه مطالعاتی رودخانه مذکور بود؛ به‌نحوی که میزان خطای محاسباتی کمتر از ۱۰ درصد برآورد گردید [۷]. شوالتز^{۱۷} و همکاران، به بررسی مدل موج سینماتیکی^{۱۸} در حوضه آبریز کولیچ فورک^{۱۹} در تگزاس ایالات متحده پرداختند. هدف از این مطالعه، شبیه‌سازی سیل، تعیین دبی اوج سیلاب و تغییرات هیدروگراف سیل در بازه مطالعاتی بود. آنان از تلفیق مدل‌های هیدرولوژیکی سیل با مدل امواج سینماتیکی و مدل‌سازی میدانی مدل به این نتیجه رسیدند که استفاده هم‌زمان روش‌های توزیعی و متمرکز و استفاده تلفیقی هر دو در دقت و بهبود نتایج، تأثیر چشم‌گیری خواهد داشت [۸].

که همان معادلات سنت ونانت^۱ هستند، به‌طور هم‌زمان توسط روش‌های مختلف عددی حل می‌شوند و می‌توان هیدروگراف جریان را در هر فاصله‌ای از نقطه‌ای که هیدروگراف بالادست آن معلوم است، محاسبه کرد و هم‌زمان دبی، عمق آب و سایر مشخصات جریان سیلاب را براساس تابعی از زمان و مکان تعیین نمود [۱]. از جمله روش‌های روندیابی سیلاب، مدل امواج کامل دینامیکی در شبیه‌سازی عددی معادله سنت ونانت می‌باشد. تلاش‌های گسترده‌ای در ارائه الگوهای متنوع از روش‌های عددی در مدل‌سازی معادلات سنت ونانت، توسط محققین مختلف صورت پذیرفته است. استوکر^۲، اولین روش عددی را برای حل معادلات جریان غیردائمی که همان روش صریح شبکه ثابت است، ارائه نمود [۲]. پرایزمن^۳، به‌واسطه حساسیت روش صریح به گام زمانی محدود، به روش غیرصریح روی آورد [۳]. آبت^۴، روش غیرصریحی به کوشش جمعی از محققین در دانشگاه صنعتی دلف^۵ هلند ارائه داد که مبنای الگوی عددی تفاضلات محدود در مدل مایک^۶ است [۴]. کوراتول^۷ و همکاران، به بررسی تغییرات سرعت، تراز ارتفاعی جریان، رابطه دبی اشل و همچنین تغییرات دبی حداکثر جریان در رودخانه تیبر^۸ در ایتالیا پرداختند. آنها پس از تحلیل حساسیت بر نحوه ایجاد و روندیابی هیدروگراف سیل، دریافتند که میزان تغییرات ضریب زبری مانینگ در طول آبراهه براساس معیار نش، تفاوت قابل‌توجهی در نتایج خروجی مدل در مقایسه با مقادیر واقعی ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری پایین‌دست دارد [۵]. تیمبادیا^۹ و همکاران، به بررسی یک‌بعدی مدل هیدرودینامیکی سیل و تراز هیدروگراف

10- Tapi River

11- Kakrapar

12- Mandavi

13- Nehru Bridge

14- Ghala

15- Shuai

16- Dagu River

17- Shultz

18- Kinematic wave

19- Cowleech Fork

1- Saint-Venant

2- Stocker

3- Preissmann

4- Abbott

5- Delft University of Technology

6- MIKE

7- Corato I

8- Tiber River

9- Timbadiya

سیل‌گیر رودخانه (حداکثر مساحت سیل‌گیر رودخانه) توسط مدل‌های هیدرولوژیکی خواهیم بود؛ موضوعی که توسط نگارنده در مقالات مرتبط یافت نشده است. همچنین تاکنون پژوهشی که هم‌زمان روش‌های مختلف عددی روندیابی سیل را در بازه طبیعی رودخانه بستانک مورد کنکاش قرار دهد و توسط یک رابطه ریاضی، پهنه و بیشینه عرض جریان سیلاب در رودخانه‌ها را بتواند پیش‌بینی نماید؛ توسط مؤلفین یافت نشده است. هدف از این پژوهش، ارزیابی هم‌زمان روش‌های روندیابی و پهنه‌بندی سیل در آبراهه طبیعی بستانک و ارائه یک رابطه ریاضی نوین جهت پیش‌بینی بیشینه عرض جریان و پهنه سیل‌گیر رودخانه بستانک می‌باشد. روش‌هایی که در این تحقیق بررسی می‌شوند شامل روش‌های موج سینماتیکی، موج دینامیکی MIKE11 و مدل‌های هیدرولوژیکی کانوکس و ماسکینگام می‌باشند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه بختگان و طشک با مساحت ۲۸۲۳۴ کیلومترمربع، پرآب‌ترین حوضه آبریز استان فارس می‌باشد. رودخانه بستانک به‌عنوان یکی از شاخه‌های اصلی رودخانه کر در استان فارس محسوب شده و حوضه آبریز آن بین طول شرقی (۴۵ و ۵۱ تا ۳۰ و ۵۴) و عرض شمالی (۲۲ و ۲۹ تا ۱۵ و ۳۱) قرار گرفته است. موقعیت جغرافیایی رودخانه کر در شکل ۱ قابل مشاهده است. این رودخانه تا سد درودزن، جریان طبیعی دارد و سپس براساس آب تنظیمی یا سرریز شده و پیوستن چندین سرشاخه دیگر، نهایتاً به دریاچه بختگان می‌ریزد [۱۱]. از میان سرشاخه‌های رودخانه کر، رود بستانک در نزدیکی محل تلاقی با رودخانه آب بالنگان به‌صورت سامانه رودخانه‌های شریانی بوده و دارای سیلاب‌دشت مشخص در حاشیه می‌باشد. پس از مسافتی، این شرایط به هم خورده، رودخانه از میان نواحی نیمه‌کوهستانی عبور کرده

از طرفی، روش هیدرولوژیکی ماسکینگام^{۲۰} از جمله روش‌های متمرکز می‌باشد که کاربرد گسترده‌ای در روندیابی سیل دارد. ظهیری و همکاران، به بررسی تأثیر بهینه‌سازی ضرایب روش ماسکینگام در روندیابی سیل در کانال مرکب پرداختند. در این مقاله، راه‌حل ساده و بهینه‌ای مبتنی بر روش ماسکینگام برای روندیابی سیل در کانال‌های مرکب ارائه شده است. برای افزایش سرعت محاسبات، ضرایب این روش به کمک الگوریتم ژنتیک، به‌صورت بهینه محاسبه شده‌اند. به‌منظور ارزیابی نتایج این روش، از داده‌های آزمایشگاه روندیابی سیل در کانال مرکب همگن استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش ماسکینگام به‌خوبی تغییرات دبی و عمق جریان را در طول کانال، شبیه‌سازی نموده است. اجرای مدل ریاضی یک‌بعدی نشان داد که هر دو روش محاسباتی دارای کارایی مناسب و دقیق می‌باشد [۹]. میرزازاده و همکاران، هفت الگوی مختلف از روش‌های متمرکز کانوکس^{۲۱} و آت‌کین^{۲۲} اصلاح شده را به‌همراه هشت الگوی مختلف از روش ماسکینگام در بازه‌ای از آبراهه طبیعی مورد بررسی قرار دادند. مطالعات آنان نشان داد که روش‌های مختلف متمرکز را می‌توان از لحاظ دقت، به‌ترتیب به‌صورت ماسکینگام، آت‌کین اصلاحی و کانوکس طبقه‌بندی نمود. همچنین این مطالعات حاکی از آن بود که اگر رابطه بین ذخیره تجمعی و دبی وزن‌دار تقریباً خطی باشد، نتایج مدل ماسکینگام برتری مشهودی نسبت به سایر روش‌ها دارد [۱۰].

در این میان، یافتن مناسب‌ترین روش عددی که هم‌زمان، بهترین نتایج روندیابی و پهنه‌بندی سیلاب را در مقایسه با نتایج مشاهداتی در بازه مطالعاتی ارائه دهد و با استفاده یک رابطه ریاضی، بیشینه پهنه و عرض جریان سیل را پیش‌بینی نماید؛ بزرگ‌ترین چالش محسوب می‌شود. در این موضوع پیشنهادی، به‌دنبال یافتن پهنه

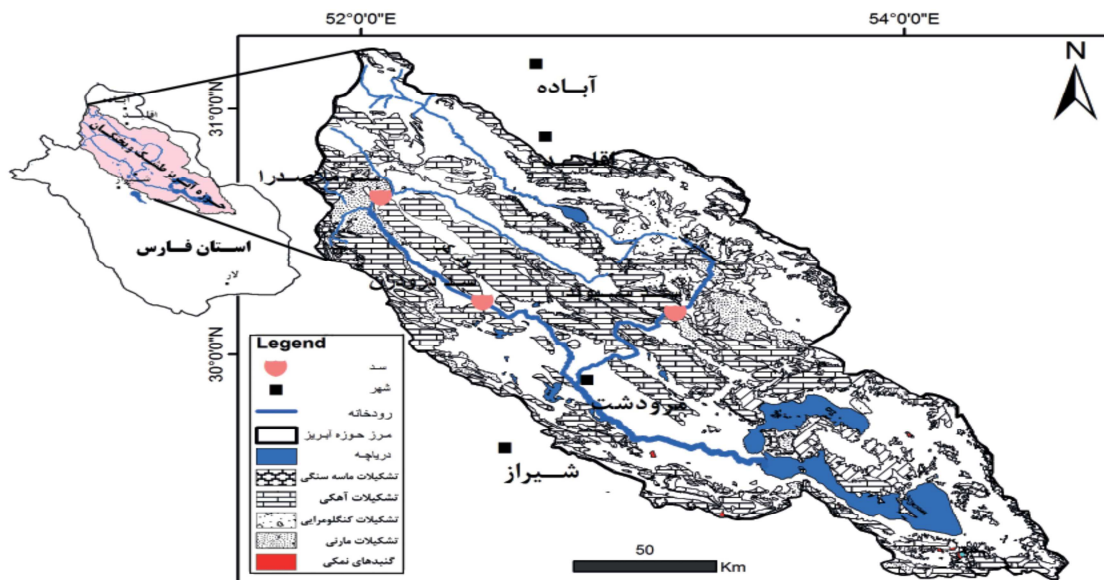
20- Muskingum

21- Convex

22- Atkin

آن از سازمان آب منطقه‌ای فارس و شرکت‌های مشاور سنگاب زاگرس و حاسب فارس استخراج شد، بهره برده شده است.

و شرایط زمین‌شناسی و هیدرولیکی اجازه تشکیل سیلاب‌دشت را به رودخانه نداده است. برای انجام این مطالعه، از یک سیلاب مشاهداتی ثبت شده در ایستگاه‌های هیدرومتری بادامک تا خانمین که اطلاعات



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی رودخانه کر در نقشه ایران و استان فارس [۱۱].

ونانت، مجموعه معادلات یک‌بعدی پیوستگی و اندازه حرکت می‌باشد که در شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان سیلاب، با صرف نظر کردن از جریان جانبی، تنش برشی باد و افت‌های گردابی، به فرم زیر که فرم پایدار این دسته معادلات می‌باشد؛ نوشته می‌شود:

(الف) معادله پیوستگی یک‌بعدی

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

(ب) معادله اندازه حرکت

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (2)$$

که در آن Q دبی جریان، A میانگین سطح مقطع عرضی آبراهه، g شتاب گرانش، S_0 شیب بستر و S_f شیب خط انرژی ناشی از مقاومت جریان است [۱].

۲-۴- مدل موج سینماتیکی

در مدل موج سینماتیکی، گرادیان فشار در مقایسه با عبارت شیب کف، ناچیز و نیروهای اصطکاکی و شرایط

۲-۲- اصول حاکم بر روش‌های هیدرولیکی (عددی)

معادلات تفاضل محدود با استفاده از تقریب‌های سری تیلور برای عبارت‌های دیفرانسیل جزئی معادلات سنت ونانت به دست آمده‌اند. به دلیل تقریب زدن سری‌های نامحدود و جایگزینی ترم‌های دیفرانسیل جزئی با خارج قسمت‌های تفاضل محدود، این تقریب‌ها باعث خطای کوتاه‌سازی می‌شوند. این خطای کوتاه‌سازی، به اندازه گام‌های مکانی و زمانی و طبیعت تقریب‌های استفاده شده در تبدیل معادلات حاکم، به معادلات گسسته‌سازی، وابسته می‌باشد. انباشته شدن خطاهای کوتاه‌سازی، به صورت بالقوه موجب ناپایداری روش عددی می‌گردد [۱۲].

۲-۳- معادلات سنت ونانت

این معادلات، اولین بار توسط باردی سنت ونانت در سال ۱۸۷۱ که جریان یک‌بعدی غیردائمی و غیریکنواخت را در آبراهه‌ها تشریح می‌کرد، مدل‌سازی گردید و در مجله آکادمی علوم فرانسه به چاپ رسید [۱]. سنت

$$C_k = \frac{dQ}{dA} = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{B} \frac{dQ}{dy} \quad (11)$$

رابطه (۱۰)، معادله مشخصه موج سینماتیکی است که متشکل از معادلات دیفرانسیل معمولی بوده و بر پایه معادلات پیوستگی و اندازه حرکت بنا نهاده شده است. همچنین معادله (۱۱)، تندی موج سینماتیکی است که موجب انتقال جریان از نقطه ورودی (بالادست) بازه آبراهه به مرز پایین دست می شود و واحد آن در سیستم SI، متر بر ثانیه می باشد [۱].

۲-۴-۱ حل عددی موج سینماتیکی - شمای خطی (صریح) روش دیفرانسیل پس رو، برای نوشتن معادلات تفاضل محدود استفاده شده است. فرم تفاضل محدود مشتقات زمانی Q_{i+1}^{j+1} ، با جایگذاری مقادیر Q در مرحله زمانی $j+1$ ام در مشتقات تفاضل محدود ضمنی به دست می آید. اگر مقدار Q_{i+1}^{j+1} ، جایگزین Q در عبارت $\alpha\beta Q^{\beta-1}$ در رابطه (۸) شود، معادله منتج شده نسبت به مقدار Q_{i+1}^{j+1} غیرخطی خواهد بود. برای ایجاد معادله صریح خطی، Q استفاده شده در $\alpha\beta Q^{\beta-1}$ از متوسط مقادیر قطری سلول محاسباتی بهره می برد، که نهایتاً فرم تفاضل محدود معادله موج سینماتیکی به فرم زیر حاصل می شود:

$$\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j}{\Delta x} + \alpha\beta \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_{i+1}^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} \left(\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j}{\Delta t} \right) = 0 \quad (12)$$

با حل این معادله برای Q_{i+1}^{j+1} خواهیم داشت:

$$Q_{i+1}^{j+1} = \frac{\left[\frac{\Delta t}{\Delta x} Q_{i+1}^{j+1} + \alpha\beta Q_{i+1}^j \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_{i+1}^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} \right]}{\left[\frac{\Delta t}{\Delta x} + \alpha\beta \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_{i+1}^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} \right]} \quad (13)$$

به این ترتیب می توان دبی در گره مجهول را با کمک رابطه (۱۳) محاسبه نمود [۱].

۲-۵- مدل سازی در MIKE11

مدل MIKE11، نرم افزاری است که در شبیه سازی جریان رودخانه و امواج سیلاب، تعیین مشخصات سیل و نهایتاً تعیین پهنه بندی سیل در رودخانه کاربرد روزافزونی

مرزی پایین دست بسیار پر کاربرد است. با باز نویسی معادله اندازه حرکت (رابطه ۲) و با صرف نظر از عبارت های شتاب محلی و انتقالی و همچنین عبارت نیروی فشاری خواهیم داشت [۱]:

$$S_0 = S_f \quad (3)$$

رابطه فوق را جهت استفاده در معادلات تفاضلات محدود، می توان به فرم زیر بیان کرد:

$$A = \alpha Q^\beta \quad (4)$$

با جایگذاری رابطه (۳) و رابطه شعاع هیدرولیکی در رابطه شزی و بر حسب دبی و سطح مقطع خواهیم داشت:

$$Q = CA\sqrt{RS} \quad (5)$$

$$A = \frac{Q}{C\sqrt{RS}} \quad (6)$$

بنابراین $\beta = 2/3$ و α برابر خواهد بود با:

$$\alpha = \left[\frac{\sqrt{P}}{C\sqrt{S}} \right]^{2/3} \quad (7)$$

معادله پیوستگی (رابطه ۱) دارای دو متغیر وابسته می باشد. برای حذف متغیر A ، با مشتق از رابطه (۴) و جایگذاری آن در رابطه (۱) خواهیم داشت:

$$\frac{\delta Q}{\delta x} + \alpha\beta Q^{\beta-1} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) = 0 \quad (8)$$

از آنجاکه مدل موج سینماتیکی در اثر تغییر در دبی ایجاد می گردد، با نوشتن تغییرات دبی بر حسب مشتقات جزئی و تقسیم بر dx خواهیم داشت:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{dt}{dx} \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \left(\frac{dx}{dt} \right) \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

در نهایت با مقایسه روابط (۱) و (۹) معادلات زیر نتیجه می شود:

$$\frac{dQ}{dA} = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{\alpha\beta Q^{\beta-1}} \quad (10)$$

کاربرپسندتر شده و انعطاف آن بیشتر شود. هریک از مدول‌ها عملیات خاصی را انجام می‌دهند. در جدول ۱، توضیح مختصری در مورد هریک از ویرایشگرها آورده شده است. مدول هیدرودینامیک در واقع، عنصر زیربنایی تمام نرم‌افزارهای شبیه‌ساز است و پایه‌ای برای سایر مدول‌های موجود در برنامه می‌باشد. در مدل هیدرودینامیک، ابتدا معادلات پیوستگی و اندازه حرکت به روش تفاضلات محدود و به فرم منقطع نوشته شده و سپس معادلات گسسته شده بر روی یک شبکه نقاط در طول و در زمان‌های مختلف، حل می‌گردند.

دارد. این نرم‌افزار، توانایی مدل کردن و حل عددی معادلات سنت ونانت را دارا می‌باشد. این بسته نرم‌افزاری، توسط انیستوهیدرولیک دانمارک تهیه شده و قادر به شبیه‌سازی یک‌بعدی جریان، انتقال رسوب و کیفیت آب به‌صورت ناپایدار در رودخانه‌ها، مصب‌ها و شبکه‌های آبیاری می‌باشد. این برنامه از روش تفاضل محدود برای حل یک‌بعدی معادلات حاکم بر جریان، انتقال رسوب و کیفیت آب استفاده می‌کند [۱۳]. مدل MIKE11، دارای چهار ویرایشگر بوده که همه آنها در بهره‌گیری از یک مدول، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مدول‌ها به‌صورت مستقل از هم عمل کرده و این باعث می‌شود اجرای برنامه

جدول ۱- ویرایشگرهای مورد استفاده در نرم‌افزار MIKE11 جهت مدل‌سازی هیدرولیک جریان [۱۳].

عملکرد	ویرایشگر
شبیه‌سازی	شبیه‌سازی (Simulation)
تعریف شبکه رودخانه‌ای	شبکه رودخانه‌ها (Rivers Network)
تعریف مقاطع عرضی، محاسبه سطح مقطع و غیره	سطح مقطع‌ها (Cross Sections)
تعیین شرایط مرزی	شرایط مرزی (Boundary Conditions)
تعیین پارامترهای هیدرولیکی	پارامترهای هیدرولیکی (HD Parameter)

۱- ذخیره منشوری، که تنها تابع دبی خروجی است.

۲- ذخیره گوه‌ای، که به تفاضل دبی‌های ورودی و خروجی بستگی دارد. این موضوع توسط رابطه (۱۵) بیان می‌شود [۱۴]:

$$S = K[XI + (1-X)O] \quad (15)$$

در این رابطه، x فاکتور وزنی است که در رودخانه بین صفر تا ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود، k ثابت زمانی ذخیره و S ، I و O به ترتیب مقادیر ذخیره، دبی ورودی و دبی خروجی در یک زمان مشابه هستند. با جایگذاری رابطه (۱۵) در رابطه (۱۴) و ساده نمودن، در نهایت خواهیم داشت [۱۴]:

$$O_{j+1} = C_1 I_{j+1} + C_2 I_j + C_3 O_j \quad (16)$$

۲-۶- مدل هیدرولوژیکی ماسکینگام

این روش توسط مک‌کارتی^{۲۳} از گروه مهندسی ارتش آمریکا، برای طرح کنترل سیلاب رودخانه ماسکینگام در ایالت اوهایو ارائه شد. روش ماسکینگام برپایه معادله پیوستگی استوار است. این معادله به‌صورت زیر می‌باشد [۱۴]:

$$\frac{1}{\Delta t}(S_j - S_{j-1}) = \frac{1}{2}(I_j + I_{j-1}) - \frac{1}{2}(O_j + O_{j-1}) \quad (14)$$

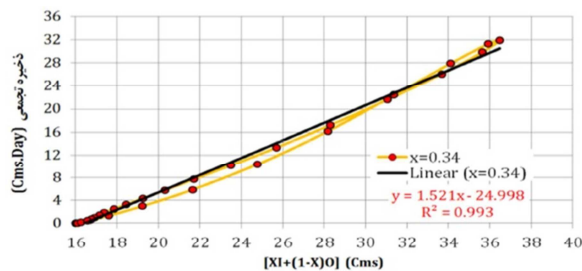
در این رابطه I ، O و S به ترتیب دبی ورودی، دبی خروجی و حجم ذخیره، j اندیس زمانی و Δt گام زمانی را نشان می‌دهند. در این روش، ذخیره کل، شامل دو بخش زیر است:

23- Mc Carthy

می‌شوند:

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2KX}{\Delta t + 2K(1-X)}, \quad C_2 = \frac{\Delta t + 2KX}{\Delta t + 2K(1-X)}, \quad C_3 = \frac{2K(1-X) - \Delta t}{\Delta t + 2K(1-X)} \quad (17)$$

شده (S) در طول بازه رودخانه در هر زمان، از انتگرال‌گیری معادله پیوستگی به‌دست می‌آید: $S(t) = \int_0^t (I - Q) dt$ اکنون با حدس اولیه برای مقادیر مختلف X ، مقادیر عبارت $[XI + (1-X)Q]$ برای زمان‌های مختلف در برابر مقدار ذخیره به‌دست آمده و همانند نمودارهای شکل ۲ ترسیم می‌گردد، که عمدتاً به‌صورت حلقه خواهند بود. از میان نمودارهای ترسیمی، هر کدام را که نزدیک به خط مستقیم بود، انتخاب و X آن خط، به‌عنوان X نهایی در نظر گرفته می‌شود [۱۰]. مقدار K نیز از روی شیب این خط، قابل‌محاسبه می‌باشد. در شکل ۲، نحوه برآورد پارامترهای ماسکینگام نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار X برابر ۰/۳۴ دارای بسته‌ترین حلقه بین مقادیر دبی وزن‌دار با ذخیره تجمعی می‌باشد.



(ب)

شکل ۲- نمودارهای ذخیره-دبی وزنی و برآورد ترسیمی پارامترهای K و X در بازه مطالعاتی، (الف) $X=0.1$ و (ب) $X=0.34$.

در این رابطه S_1 ذخیره آغازین و S و I و O به‌ترتیب ذخیره، دبی ورودی و دبی خروجی در زمان مشابه Z ام توسط رابطه (۱۴) قابل‌محاسبه است. آلداما^{۲۴} روش حداقل مربعات را با بهینه کردن رابطه (۱۸) به‌صورت روابط (۱۹) تا (۲۲) ارائه داد [۱۵].

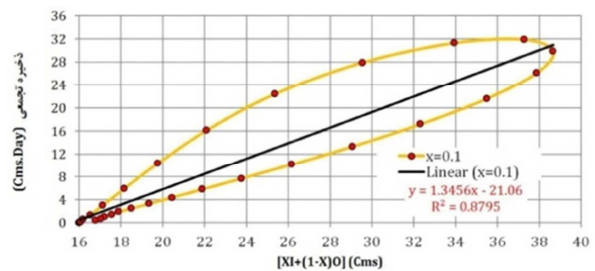
²⁴- Aldama

در رابطه (۱۶)، C_1 ، C_2 و C_3 ، ضرایب روش ماسکینگام هستند، ($C_1 + C_2 + C_3 = 1$) و به‌صورت معادله (۱۷) بیان

با داشتن مقادیر K ، X ، دبی خروجی در گام زمانی نخست و هیدروگراف بالادست، با استفاده از رابطه (۱۷) می‌توان هیدروگراف در پایین‌دست را به‌دست آورد. پارامتر K تقریباً برابر فاصله زمانی است که موج سیل از بازه رودخانه عبور می‌کند و واحد آن مشابه واحد گام زمانی بوده و به طول آبراهه و سرعت موج سیل وابسته است، در حالی که، پارامتر X بدون بعد بوده و به بخش ذخیره روندیابی وابسته می‌باشد [۱۴].

۲-۶-۱- برآورد پارامترها به روش ترسیمی

در برآورد پارامترها به روش ترسیمی، جهت تخمین مقادیر K و X از دبی هیدروگراف‌های ورودی (I) و خروجی (Q) اندازه‌گیری شده در طول یک بازه از رودخانه استفاده می‌شود. زمانی که $I > Q$ است، به مقدار حجم ذخیره افزوده می‌گردد و هنگامی که $I < Q$ باشد، از حجم آن کاسته می‌شود. بنابراین، حجم آب ذخیره



(الف)

۲-۶-۲- برآورد پارامترها به روش حداقل مربعات

رابطه (۱۸) بیان می‌کند که اختلاف بین ذخیره مشاهداتی و محاسباتی، باید حداقل گردد. می‌توان پارامترهای K و X را با بهینه کردن رابطه (۱۸)، محاسبه نمود. این محاسبات، معادل بیشینه‌سازی ضریب تصحیح بین ذخیره و دبی وزنی در روش ترسیمی است [۸].

$$\text{Minimize}_{KX} E = \sum_{j=1}^M [K[XI_j + (1-X)O_j] + S_1 - S_j]^2 \quad (18)$$

$$X = \frac{E}{E + F} \quad , \quad K = E + F \quad (19)$$

$$Z = M \left[(\sum I_j^2)(\sum Q_j^2) - (\sum I_j Q_j)^2 \right] + 2(\sum I_j)(\sum Q_j)(\sum I_j Q_j) - (\sum I_j)^2 (\sum Q_j^2) - (\sum I_j^2)(\sum Q_j)^2 \quad (20)$$

$$E = \frac{1}{Z} \left\{ \left[(\sum I_j Q_j)(\sum Q_j) - (\sum I_j)(\sum Q_j^2) \right] (\sum S_j) + \left[M(\sum Q_j^2) - (\sum Q_j)^2 \right] (\sum I_j S_j) + \left[(\sum I_j)(\sum Q_j) - M(\sum I_j Q_j) \right] (\sum Q_j S_j) \right\} \quad (21)$$

$$F = \frac{1}{Z} \left\{ \left[(\sum I_j)(\sum I_j Q_j) - (\sum I_j^2)(\sum Q_j)(\sum S_j) \right] + \left[(\sum I_j)(\sum Q_j) - M(\sum I_j Q_j) \right] (\sum I_j S_j) + \left[M(\sum I_j^2) - (\sum I_j)^2 \right] (\sum Q_j S_j) \right\} \quad (22)$$

می‌باشد. برای بیان این روش، ابتدا رابطه (۱۴) را به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم:

۳-۶-۲- برآورد پارامترها به روش تحلیل رگرسیون

تحلیل رگرسیون خطی، برای داده‌هایی که رابطه بین دبی وزنی و ذخیره در آنها خطی است، مناسب

$$\frac{O_{j+1} - O_j}{I_{j+1} - I_j} = \frac{\Delta t}{K(1-X) + 0.5\Delta t} \times \frac{I_j - O_j}{I_{j+1} - I_j} + \frac{0.5\Delta t - kx}{k(1-x) + 0.5\Delta t} \quad (23)$$

را با به‌کار بردن تحلیل رگرسیون خطی محاسبه نمود. براین اساس خواهیم داشت [۱۶]:

در رابطه (۲۳)، ارتباط خطی بین $(O_{j+1} - O_j)/(I_{j+1} - I_j)$ ، مشاهده می‌شود. این موضوع بدین مفهوم است که می‌توان ضرایب

$$Y_j = AX_j + B \quad , \quad X_j = \frac{I_j - O_j}{I_{j+1} - I_j} \quad , \quad Y_j = \frac{O_{j+1} - O_j}{I_{j+1} - I_j} \quad (24)$$

$$A = \frac{M \sum X_j Y_j - [\sum X_j][\sum Y_j]}{M \sum X_j^2 - [\sum X_j]^2} \quad , \quad B = \frac{\sum Y_j - A \sum X_j}{M} \quad (25)$$

۴-۶-۲- برآورد پارامترها به روش ضریب همبستگی در این روش، با توجه به محدود بودن بازه فاکتور وزنی X ، می‌توان ضریب همبستگی و جمع مجذور باقیمانده‌ها را برای داده‌های ذخیره و دبی وزنی محاسبه نمود و براساس بیشترین مقدار ضریب همبستگی و یا

که در آن A و B ضریب هستند. با مقایسه روابط (۲۴) و (۲۵) پارامترهای روش ماسکینگام به صورت زیر قابل محاسبه خواهند بود [۱۶]:

$$K = \frac{(1-B)\Delta t}{A} \quad , \quad X = \frac{0.5A-B}{1-B} \quad (26)$$

افزایشی مشخص، مقادیر ضریب همبستگی و جمع مجذور باقیمانده‌ها را محاسبه نمود. پس از انتخاب مناسب‌ترین X می‌توان K را از شیب نمودار دبی و ذخیره محاسبه کرد [۱۶]:

$$R^2 = \frac{[\sum SW_f - (\sum S \sum W_f) / M]^2}{[\sum S^2 - (\sum S)^2 / M][\sum W_f^2 - (\sum W_f)^2 / M]} \quad (27)$$

در رابطه فوق S ذخیره تجمعی، W_f دبی وزن دار و M تعداد داده‌های هیدروگراف ورودی است.

با توجه به روابط ارائه شده ضرایب روش‌های عددی در رودخانه بستانک به صورت جدول ۲ محاسبه شده است.

جدول ۲- ضرایب روش‌های عددی در رودخانه بستانک.

مدل	روش	C	$K_{(day)}$	X	C_1	C_2	C_3
کانوکس	تحلیل رگرسیونی	۰/۸۳۲	-----	-----	----	-----	-----
ماسکینگام	ترسیمی	-----	۱/۵۲۱	۰/۳۴	-۰/۳۴	۰/۵۶	۰/۷۷
ماسکینگام	حداقل مربعات	-----	۱/۵۲۱	۰/۳۲۷	-۰/۳۲	۰/۵۴	۰/۷۸
ماسکینگام	ضریب همبستگی	-----	۱/۵۲۱	۰/۳۳	-۰/۳۲	۰/۵۴	۰/۷۸
ماسکینگام	رگرسیون	-----	۱/۲۸	۰/۵۰۵	-۰/۶۸	۱/۰۱	۱/۶۷۱

دبی اوج مشاهده شده و روندیابی شده^{۲۵}، برابر صفر است [۱۰].

۲- معیار اختلاف بین زمان دبی اوج مشاهده شده و روندیابی شده (DPOT):

$$DPOT = |T_{po} - T_{pc}| / \Delta t \quad (29)$$

در این رابطه، T_{po} زمان رخ دادن دبی اوج هیدروگراف خروجی مشاهداتی، T_{pc} زمان رخ دادن دبی اوج هیدروگراف خروجی محاسباتی و Δt گام زمانی را نشان می‌دهند. مقدار مطلوب برای معیار اختلاف بین زمان دبی اوج مشاهده شده و روندیابی شده^{۲۶}، برابر صفر می‌باشد [۱۰].

۲-۷- معیارهای ارزیابی مدل‌ها

برای آنالیز نتایج مدل‌سازی روش‌های مذکور با یکدیگر، از معیارهای زیر بهره برده شده است:

۱- معیار اختلاف دبی اوج مشاهده شده و روندیابی شده (DPO):

$$DPO = |Q_{po} - Q_{pc}| \quad (28)$$

در این رابطه، Q_{po} دبی اوج هیدروگراف خروجی مشاهداتی و Q_{pc} دبی اوج هیدروگراف خروجی محاسباتی را نشان می‌دهند. مقدار مطلوب برای معیار اختلاف بین

²⁵- Deviations of Peak of Routed and Actual Flows

²⁶- Deviations of Peak Time of Routed and Actual Outflow

۳- معیار میزان پایین افتادگی (تعدیل) دبی اوج (ε):

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

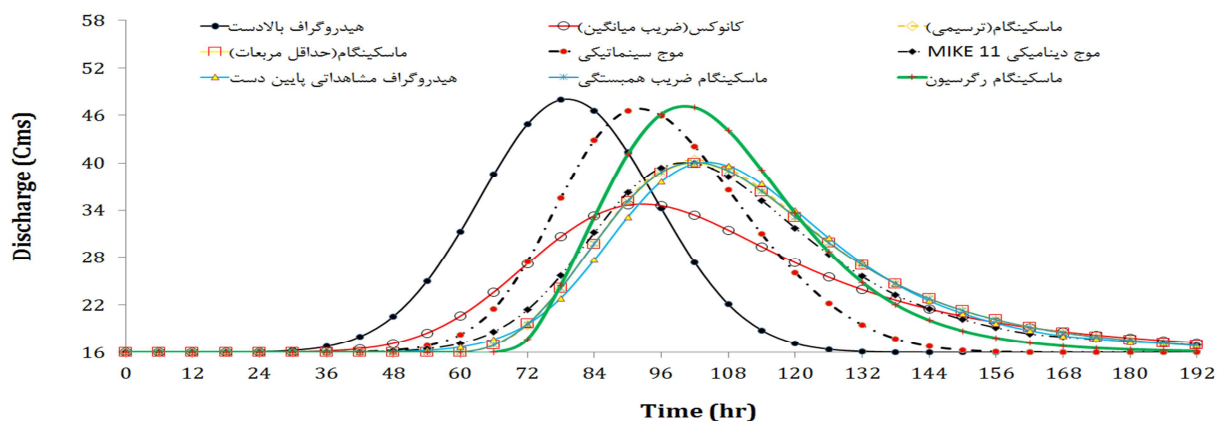
$$\xi(\%) = \left(1 - \frac{T_{pi}}{T_{po}}\right) \times 100 \quad (31)$$

زمان رسیدن به نقطه اوج هیدروگراف پایین دست دیرتر از زمان رسیدن به نقطه اوج هیدروگراف بالادست می‌باشد. معادله (۳۱)، درصد این میزان تأخیر، ξ، را نشان می‌دهد. در این حالت، میزان تأخیر سیل برای هیدروگراف‌های محاسباتی و مشاهداتی با هم مقایسه می‌گردند. در این رابطه، T_{po} زمان رخ دادن دبی اوج هیدروگراف خروجی مشاهداتی و T_{pi} زمان رخ دادن دبی اوج هیدروگراف ورودی را نشان می‌دهند [۱۰].

شکل ۳، هیدروگراف‌های ورودی و روندیابی شده توسط تمامی روش‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی را نشان می‌دهد.

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 (۳۰)، درصد این فروکش سیل، ε، را نشان می‌دهد. در این حالت، میزان فروکش سیل برای هیدروگراف‌های محاسباتی و مشاهداتی با هم مقایسه می‌گردند. در این رابطه، دبی اوج هیدروگراف خروجی مشاهداتی یا محاسباتی و Q_{pi} دبی اوج هیدروگراف ورودی است [۱۰].

۴- معیار میزان تأخیر بین هیدروگراف‌های بالادست و پایین دست (ξ):



شکل ۳- هیدروگراف‌های ورودی و روندیابی شده توسط تمامی روش‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی.

مقدار دبی حداکثر را کمتر از مقدار واقعی، تخمین زده است. در نهایت، این روش با دو گام زمانی، زودتر از مقدار واقعی، زمان دبی اوج را پس از وقوع سیل پیش‌بینی کرده است.

۲- تحلیل نتایج روش ماسکینگام ترسیمی نشان می‌دهد که این روش با درصد فروکش و میزان تأخیر دبی اوج مناسب، هیدروگراف سیلاب پایین دست را پیش‌بینی نموده است. همچنین این روش با اختلاف دبی ۰/۵۰۸ مترمکعب بر ثانیه نسبت به دبی اوج مشاهداتی مقدار دبی

۳- نتایج

۳-۱- نتایج روندیابی سیل در بازه مطالعاتی رودخانه بستانک

با توجه به جدول ۳، نتایج زیر قابل مشاهده است:

۱- روش کانونکس با درصد فروکش دبی اوج بیشتر و میزان تأخیر دبی اوج کمتری، هیدروگراف سیلاب پایین دست را پیش‌بینی نموده است. همچنین این روش با اختلاف دبی ۵/۲۰۸ مترمکعب بر ثانیه نسبت به دبی اوج مشاهداتی

مترمکعب بر ثانیه نسبت به دبی اوج مشاهداتی مقدار دبی حداکثر را با دقت مناسبی تخمین زده است. در نهایت مشاهده می شود، این روش زمان تأخیر دبی اوج سیل را مطابق مقدار واقعی پیش‌بینی نموده است.

۶- روش موج سینماتیکی صریح با درصد فروکش دبی اوج و میزان تأخیر دبی اوج به مراتب کمتر، هیدروگراف سیلاب پایین‌دست را پیش‌بینی نموده است. همچنین این روش با اختلاف دبی $۶/۶۳۴$ مترمکعب بر ثانیه نسبت به دبی اوج مشاهداتی، مقدار دبی حداکثر را با اختلاف زیادی، کمتر از مقدار واقعی تخمین زده است. بنابراین، این روش با دو گام زمانی زودتر از مقدار واقعی، زمان دبی اوج سیلاب را پیش‌بینی کرده است.

۷- روش عددی موج دینامیکی نرم‌افزار MIKE11 با درصد فروکش و میزان تأخیر دبی مناسب، هیدروگراف سیلاب پایین‌دست را پیش‌بینی نموده است. همچنین این روش با اختلاف دبی $۰/۰۴۴$ مترمکعب بر ثانیه نسبت به دبی اوج مشاهداتی مقدار دبی حداکثر را با دقت بالایی تخمین زده است. در نتیجه، این روش مقدار واقعی زمان دبی اوج را منطبق بر زمان سیل مشاهداتی پیش‌بینی کرده است.

حداکثر را تقریباً مطابق مقدار واقعی، تخمین زده است. در نتیجه، این روش مقدار واقعی زمان دبی اوج را دقیق و بدون خطا پیش‌بینی کرده است.

۳- روش ماسکینگام- رگرسیون خطی با درصد فروکش دبی اوج کمتری، هیدروگراف سیلاب پایین‌دست را پیش‌بینی نموده است. همچنین این روش با اختلاف دبی $۷/۰۱۲$ مترمکعب بر ثانیه نسبت به دبی اوج مشاهداتی مقدار دبی حداکثر را به مراتب بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده است. بنابراین، این روش زمان تأخیر دبی اوج سیل را مطابق مقدار واقعی تخمین زده است.

۴- روش ماسکینگام- حداقل مربعات با درصد فروکش دبی اوج اندکی کمتر، هیدروگراف سیلاب پایین‌دست را پیش‌بینی نموده است. همچنین این روش با اختلاف دبی $۰/۰۸۷$ مترمکعب بر ثانیه نسبت به دبی اوج مشاهداتی مقدار دبی حداکثر را با دقت مناسبی تخمین زده است. نهایت آنکه این روش زمان تأخیر دبی اوج سیل را مطابق مقدار واقعی پیش‌بینی نموده است.

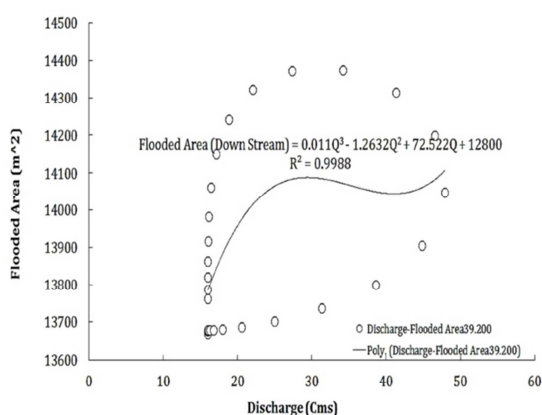
۵- روش ماسکینگام- ضریب همبستگی با درصد فروکش دبی اوج اندکی کمتر، هیدروگراف سیلاب پایین‌دست را پیش‌بینی کرده است. همچنین این روش با اختلاف دبی $۰/۱۷۸$

جدول ۳- نتایج معیارهای مختلف در عملیات روندیابی سیل در مقایسه با سیل مشاهداتی.

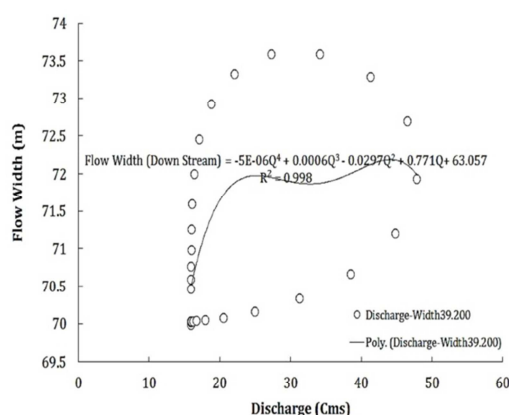
مدل	ϵ (%)	ξ (%)	DPO	DPOT
مشاهداتی	۱۶/۶۶۲	۲۳/۵۲۹	-----	-----
روش کانوکس (رگرسیون خطی)	۲۷/۶۸۴	۱۳/۳۳۳	۵/۲۰۸	۲
روش ماسکینگام (ترسیمی)	۱۵/۶۰۱	۲۳/۵۲۹	۰/۵۰۸	صفر
روش ماسکینگام (رگرسیون خطی)	۲/۰۲۶	۲۳/۵۲۹	۷/۰۱۲	صفر
روش ماسکینگام (حداقل مربعات)	۱۶/۴۷۴	۲۳/۵۲۹	۰/۰۸۷	صفر
روش ماسکینگام (ضریب همبستگی)	۱۶/۲۸۵	۲۳/۵۲۹	۰/۱۷۸	صفر
روش موج سینماتیکی صریح	۲/۸۱۶	۱۳/۳۳۳	۶/۶۳۴	۲
روش عددی (MIKE11)	۱۶/۵۷۱	۲۳/۵۲۹	۰/۰۴۴	صفر

۳-۲- نتایج پهنه‌بندی سیل در بازه مطالعاتی رودخانه بستانک

مساحت سیل‌گیر گردید. پس از استخراج رابطه رگرسیونی درجه سوم تا چهارم در پایین‌دست بازه مطالعاتی، امکان تخمین حداکثر عرض جریان و حداکثر مساحت تحت پوشش سیلاب (پهنه‌بندی سیل) به کمک روش‌های عددی فراهم شد. خاطر نشان می‌گردد، این عملیات برای اولین بار در مطالعات پهنه‌بندی سیل ارائه شده و سابقه انجام آن تاکنون توسط نگارنده مشاهده نشده است. روند استخراج رابطه رگرسیونی مربوطه با توجه به شکل ۴ (الف) و (ب) به تفصیل در ادامه آورده شده است:



(ب)



(الف)

شکل ۴- (الف) استخراج رابطه رگرسیونی درجه چهارم بین دبی و عرض و (ب) دبی و پهنه سیل‌گیر سیل در مقطع پایین‌دست بازه مطالعاتی.

مربعات باشد، ابتدا باید با انجام عملیات روندیابی سیل دبی اوج روندیابی شده توسط این روش محاسبه شود. مطابق جدول ۴، حداکثر دبی سیل، برابر با مقدار ۴۰/۰۱۳ در مقطع پایین‌دست استخراج گردید. اکنون کافی است برای محاسبه حداکثر عرض جریان سیل مقدار دبی مذکور را در رابطه رگرسیونی درجه چهارم به دست آمده در شکل ۴ جایگذاری نمود. از این‌رو داریم:

$$Flow\ Width\ (Down\ Stream) = -5E-06Q^4 + 0.0006Q^3 - 0.0297Q^2 + 0.771Q + 63.057 \quad (32)$$

مساحت تحت پوشش سیل (مساحت سیل‌گیر) را در روش حداقل مربعات، محاسبه کنیم؛ کافی است این عدد را به جای عبارت Q در رابطه رگرسیونی درجه سوم

همانطورکه در بخش قبل به روندیابی سیلاب پرداخته شد، با استخراج حداکثر دبی محاسباتی در هر روش، اقدام به انجام پهنه‌بندی سیل در مقاطع پایین‌دست بازه مطالعاتی رودخانه کر، توسط روش‌های مختلف گردید. به‌عنوان مثال، چنانچه هدف، محاسبه حداکثر عرض جریان سیل و حداکثر مساحت سیل‌گیر (پهنه سیل) به روش ماسکینگام به کمک الگوی حداقل

با جایگذاری مقدار دبی ۴۰/۰۱۳ به جای Q در رابطه (۳۲)، حداکثر عرض جریان سیل برابر با ۷۱/۹۷۶ متر به دست می‌آید. همچنین چنانچه بخواهیم حداکثر

به دست آمده در شکل ۴ جایگزین کنیم. در این حالت، خواهیم داشت:

$$Flooded Area (Down Stream) = 0.011Q^3 - 1.2632Q^2 + 72.522Q + 12800 \quad (33)$$

جدول ۴- نتایج دبی و زمان اوج روش های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی روندیابی سیلاب رودخانه بستانک.

هیدروگراف سیلاب	t_p (hr)	Q_p (Cms)
هیدروگراف بالادست	۷۸	۴۷/۹۱
هیدروگراف مشاهداتی پایین دست	۱۰۲	۳۹/۹۳
کانوکس	۹۰	۳۴/۶۴۷
ماسکینگام (ترسیمی)	۱۰۲	۴۰/۴۳۵
ماسکینگام (ضریب همبستگی)	۱۰۲	۴۰/۱۰۴
ماسکینگام (حداقل مربعات)	۱۰۲	۴۰/۰۱۳
ماسکینگام (رگرسیون خطی)	۱۰۲	۴۶/۹۳۹
سینماتیکی (صریح)	۹۰	۴۶/۵۶
موج دینامیکی ضمنی MIKE11	۱۰۲	۳۹/۹۷۱

خواهد بود. این عملیات برای تمامی روش ها انجام شد و در نهایت، نتایج مطابق جدول ۵ مشاهده می شود.

با این جایگذاری، مقدار $14384/07$ مترمربع به دست خواهد آمد که این مقدار، حداکثر مساحت تحت پوشش سیل (مساحت سیل گیر)، در روش حداقل مربعات

جدول ۵- نتایج دبی و زمان اوج روش های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی روندیابی سیلاب رودخانه کر.

هیدروگراف سیلاب	Q_p (Cms)	حداکثر عرض جریان سیل	حداکثر مساحت سیل گیر (پهنه بندی)
کانوکس	۳۴/۶۴۷	۷۱/۸۶۷	۱۴۲۵۳/۸۰۴
ماسکینگام (ترسیمی)	۴۰/۴۳۵	۷۱/۹۷۳	۱۴۳۹۴/۳۲
ماسکینگام (ضریب همبستگی)	۴۰/۱۰۴	۷۱/۹۷۶	۱۴۳۸۶/۲۸
ماسکینگام (حداقل مربعات)	۴۰/۰۱۳	۷۱/۹۷۶	۱۴۳۸۴/۰۷
ماسکینگام (رگرسیون خطی)	۴۶/۹۳۹	۷۱/۵۸۹	۱۴۵۵۸/۵۵
سینماتیکی (صریح)	۴۶/۵۶	۷۱/۶۳۳	۱۴۵۴۸/۴۹
موج دینامیکی ضمنی MIKE11	۳۹/۹۷۱	۷۳/۶۲۴	۱۴۳۸۰/۹۰۳

داشته است، مدل هیدرولوژیکی ماسکینگام به کمک الگوی حداقل مربعات می باشد. به عبارت دیگر، این روش، کمترین خطا را با مقادیر عددی MIKE11 داشته است.

۴- نتیجه گیری

در جدول ۵، در تمامی روش ها مقدار حداکثر عرض جریان سیل و حداکثر مساحت تحت پوشش سیل (منطقه سیل گیر) قابل مشاهده است. نتایج روش های مختلف، حاکی از آن است که در مقایسه با نتایج شبیه سازی عددی MIKE11، بهترین روش هیدرولوژیکی (تجربی) که بیشترین نزدیکی را با نتایج عددی مدل MIKE11

در مطالعه حاضر، با انتخاب بازه‌ای از رودخانه بستانک به بررسی چندین روش هیدرولوژیکی و هیدرولیکی روندیابی سیلاب شامل مدل‌های ماسکینگام، کانوکس، موج سینماتیکی و مدل عددی موج دینامیکی و همچنین مطالعات گسترده‌ای بر پهنه‌بندی و عرض سطح جریان سیل به کمک مدل MIKE11 و اکسل پرداخته شد. سپس با استفاده از معیارهای آماری، مقایسه‌ای بین نتایج روش‌های مختلف، صورت گرفت. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد در بین روش‌های هیدرولوژیکی، روش ماسکینگام با برآورد پارامترها براساس ضریب همبستگی و حداقل مربعات، بیشترین تطبیق را با نتایج مشاهداتی سیلاب داراست و کمترین میزان خطا را در پیش‌بینی هیدروگراف سیلاب، ارائه نموده است. همچنین نتایج حاکی از برتری مشهود مدل موج دینامیکی MIKE11 دارد. این مدل عددی، دقیق‌ترین شبیه‌سازی جریان سیلاب و پهنه‌بندی آن را انجام داده و دارای کمترین خطا در مقایسه با سایر روش‌های روندیابی سیلاب است. با توجه به نتایج این پژوهش، توصیه می‌شود چنانچه اطلاعات هیدرولیکی رودخانه موجود باشد، از مدل موج دینامیکی MIKE11 بهره برده شود. از این‌رو، با مطالعه هر دو فاز عملیات روندیابی سیلاب و عملیات پهنه‌بندی سیل که در این تحقیق به صورت مجزا انجام گردید، می‌توان به این نتیجه مهم رسید که چنانچه اطلاعات هندسی، فیزیکی و هیدرولیکی مقطع در دسترس نبوده و تنها اطلاعات موجود سابقه تاریخی سیلاب‌های گذشته، موجود باشد؛ توصیه می‌شود از روش ماسکینگام با برآورد پارامترها به ترتیب اولویت: ۱. حداقل مربعات یا ۲. ضریب همبستگی استفاده شود، تا بهترین نتیجه در مقایسه با مقادیر مشاهداتی و عددی حاصل گردد. همچنین در این مطالعه، برای اولین بار اقدام به استخراج رابطه رگرسیونی

درجه سوم و چهارم در بازه مطالعاتی گردید. با استخراج این رابطه، توانایی پیش‌بینی حداکثر عرض سیل‌گیر و حداکثر مساحت تحت پوشش سیلاب وجود دارد. نتایج این مطالعه نشان داد در مقایسه با نتایج عددی MIKE11 نیز، مدل‌های ماسکینگام براساس الگوهای حداقل مربعات و ضریب همبستگی بهترین روش هیدرولوژیکی (تجربی) می‌باشند. در این تحقیق، برای اولین بار روابط رگرسیونی درجه سوم و پنجم در تخمین عرض جریان سیل و سطح سیل‌گیر (مساحت تحت پوشش سیل) ارائه شد. متذکر می‌گردم نگارنده تاکنون استفاده از این شیوه را در جای دیگری مشاهده نکرده است. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود نظیر این عملیات برای بازه‌هایی از رودخانه‌های مهم ایران (در بین ایستگاه‌های هیدرومتری) تکرار شود و روابط رگرسیونی آنها استخراج گردد. بی‌شک، استخراج چنین روابطی، پیش‌بینی حداکثر عرض و سطح جریان سیل را به مراتب سرعت بخشیده و با دانستن دبی اوج بالادست، به راحتی می‌توان سیل را در پایین دست، پهنه‌بندی نمود.

در تحقیق حاضر، با کمک حل معادلات یک‌بعدی حاکم بر جریان‌های غیردائمی (معادلات سنت ونانت)، جریان سیلاب در آبراهه طبیعی رودخانه بستانک شبیه‌سازی گردید. از آنجاکه حرکت سیلاب‌ها سه‌بعدی است؛ پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از معادلات دوبعدی بوزینسک یا سه‌بعدی ناویراستوکس توسط نرم‌افزارهای مایک ۲۱ و مایک ۳ در مدل‌سازی عددی سیل بهره برده شود. با توجه به آنکه، این معادلات در شبیه‌سازی جریان‌های غیردائمی، پارامترهای بیشتری را تأثیر می‌دهند، انتظار می‌رود نتایج خروجی آنها با واقعیت، انطباق بیشتری داشته باشد.

مراجع

- [1] Safavi, H. (2015), Hydrology Engineering. Isfahan University of Technology, Iran.
 [2] Stocker, J. J. (1957). Water Waves. Inter Science Publishers .N.Y.

- [3] Preissmann, A., & Cunge, J. A. (1961). "Calcul du mascaret sur machine électronique", *La Houille Blanche*, (5), 588-596.
- [4] Abbott MB. (1979). *Computational Hydraulic*. Pitman, London.
- [5] Corato, G., Moramarco, T., & Tucciarelli, T. (2011). "Discharge estimation combining flow routing and occasional measurements of velocity", *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(9), 29-79.
- [6] Timbadiya, P. V., Patel, P. L., & Porey, P. D. (2014). "One-dimensional hydrodynamic modeling of flooding and stage hydrographs in the lower Tapi River in India", *Current Science*, 106(708).
- [7] Song, S., Zheng, X., Li, F., Tian, S., & Lin, G. (2012). "Flood routing simulation and system customization for a high-leakage river channel in China", *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(6), 656-663.
- [8] Shultz, M. J., Crosby, C. E., & McEnery, A. J. (2008). "Kinematic wave technique applied to hydrologic distributed modeling using stationary storm events: an application to synthetic rectangular basins and an actual watershed", *Hydrology Days*, 116-126.
- [9] Zahiri, A., Sharifian, H., Tamadoni, S., & Dehghani, A. (2011). "Investigation of the effect of optimization of Muskingum method coefficients in flood routing in composite channel", *The First International and the Third National Conference on Dams and Hydropower in Iran*, February 6-11, 2011, IRIB International Conference Center, Tehran, Iran.
- [10] Mirzazadeh, P., Akbari, G., & Ashkani, A. (2014). "Optimal Methods on Hydrologic Flow Routing Operations", http://www.civilica.com/Paper-NCCE08-NCCE08_0621.html.
- [11] FRRW, (2000). *Hydraulic and hydrology studies of the plan for organizing the river and the branches*. Fars Regional Water Authority.
- [12] Azimian A. (2011). *Computational Fluid Dynamics*, 4th Edition, Isfahan University of Technology.
- [13] MIKE 11 a modeling system for Rivers and Channels, (2011), User's Manual, 11 4.10.
- [14] Alizadeh (2013) *Principles of Applied Hydrology*, 26th Edition, Imam Reza University, Mashhad.
- [15] Aldama, A. A. (1990). "Least-squares parameter estimation for Muskingum flood routing", *Journal of hydraulic engineering*, 116(4), 580-586.
- [16] McCuen, R.H., (2011), *Hydrologic Analysis and Design*, Prentice -Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

M.R. Goodarzi*

Assistant Professor,
Department of Civil
Engineering, Ayatollah Ozma
Borujerdi University.

e-mail: Goodarzi6mr@gmail.com

A. Hoseini

M.Sc. Student, Department of
Civil Engineering, Ayatollah
Ozma Borujerdi University.

e-mail: eca.hoseini@yahoo.com

Numerical Modeling of Hydraulic Assessment of the Flood and Zoning by Saint-Venant in the River Bostanak

The equations governing transient open-channel flow are continuity and momentum equations that are known as Saint-Venant equation. Based on the simplifications of this equation, numerical models of flood routing are categorized. Flood routing models include dynamic wave models, kinematic models, hydrological Knox model and Maskingham model. In this research, basics of Saint-Venant equation and numerical dynamic wave model, kinematic, Knox and Maskingham models will be explained. Also, their results are compared. For this purpose, an interval of Bastanak River between Badamak and Khanimen Hydrology stations is studied and a new mathematical relationship for prediction of maximum flood flow rate, river flood plain and maximum width of flood flow is presented. MIKE11 dynamic wave model was solved by partial differential methods and showed a better result with respect to other models. Routing and mathematical zoning of flood using hydrological Maskingham method showed minimum error compared to numerical MIKE11 method and observed flood when min square method used to calculate error.

Keywords: Bastanak, Saint-Venant, MIKE11, Routing, Maximum Width and Flood Plain.

* Corresponding author