

روندیابی سیل در رودخانه‌ها با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS دوبعدی و مقایسه آن با روش ماسکینگام غیرخطی

مجید امیری، الهام فاضل نجف‌آبادی و محمد شایان‌نژاد^{۱*}

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۱۳)

چکیده

یکی از مسائل مهم در مهندسی رودخانه روندیابی سیل است. به‌طور کلی از دو دسته روش برای روندیابی سیلاب در رودخانه‌ها استفاده می‌شود. دسته اول روش‌های هیدرولیکی مانند روش موج دینامیکی که مبتنی بر حل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت یا معادلات سنت - ونانت است. دسته دوم روش‌های هیدرولوژیکی مانند روش ماسکینگام غیرخطی است. در این پژوهش از هر دو روش برای روندیابی آبنمودهای سیل در رودخانه پلاسجان که از سرشاخه‌های اصلی زاینده‌رود به شمار می‌آید، استفاده شده است. ضرایب روش ماسکینگام غیرخطی از طریق بهینه‌سازی و حل معادله مربوط به آن با روش عددی رانگ - کاتای مرتبه چهارم با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و روش موج دینامیکی با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS دوبعدی به دست آمد. در این مطالعه از چهار رویداد سیل استفاده شد که در روش ماسکینگام غیرخطی از رویداد اول برای واسنجی مدل و از سه رویداد دیگر برای صحت‌سنجی استفاده شد. براین اساس میزان خطا در این روش برای رویدادهای دوم، سوم و چهارم به ترتیب برابر با $6/21$ و $5/4$ ، $87/3$ ، $17/58$ و $7/96$ درصد و میزان خطا در روش موج دینامیکی برای این چهار رویداد به ترتیب برابر با $17/58$ ، $87/3$ ، $5/4$ و $6/21$ درصد بود؛ بنابراین روش موج دینامیکی دقت بیشتری در تخمین آبنمود خروجی دارد. باین حال روش ماسکینگام غیرخطی نیز از دقت قابل‌قبولی برخوردار بوده و به لحاظ هزینه، اطلاعات موردنیاز، سادگی و سرعت عمل در انجام محاسبات، در شرایطی که اطلاعات کافی در دسترس نیست توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: روندیابی سیل، ماسکینگام غیرخطی، مدل موج دینامیکی، نرم‌افزار HEC-RAS

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: shayannejad@iut.ac.ir

مقدمه

کنترل سیلاب یکی از مسائل مهم در مهندسی رودخانه است. برای مدیریت و مهندسی سیلاب نیاز به روش‌های سازه‌ای است که این روش‌ها مبتنی بر روندیابی سیل است. به مجموعه عملیاتی که به وسیله آن‌ها آبنمود جریان پایین دست توسط آبنمود جریان معلوم بالادست تعیین می‌شود، روندیابی سیلاب می‌گویند.

طبق پژوهش‌های مسلمی و همکاران (۹) لزوم توجه به روش کار، عملکرد و نتایج حاصله در پژوهش‌های اجرا شده در خصوص مسائل و مشکلات موجود در اجرای طرح‌های پژوهشی پخش سیلاب، امری ضروریست. آن‌ها دریافته‌اند که در ۳۵ ایستگاه و عرصه پخش سیلاب، افزایش سطح آب و بالآمدن سطح ایستابی در چاه‌های پیزومتری و کشاورزی و همچنین افزایش دبی قنوت رخ داده است. روندیابی سیل در رودخانه، نوعی محاسبات ریاضی برای پیش‌بینی تغییرات سرعت و شکل موج سیل به صورت تابعی از زمان در یک یا چند نقطه در طول رودخانه محسوب می‌شود (۱۶). به اختلاف زمانی وقوع اوج دبی در بالادست تا رسیدن نقطه پایین دست به اوج جابه‌جایی می‌گویند (۱۴). با وجود تکنیک‌های روندیابی و داشتن آبنمود سیل یک نقطه، می‌توان ارتفاع سیل مورد نظر را در هر نقطه از مسیر رودخانه محاسبه کرد. روند پیش‌بینی سیلاب در بخش‌های مختلف رودخانه از نظر طراحی سازه‌های حفاظتی و بهره‌برداری از جریان رودخانه‌ها بسیار مهم است. داشتن این قابلیت در رودخانه‌ها به بهره‌برداران و مجاوران آن کمک می‌کند تا راه حل‌های فنی و اقتصادی برای مقابله با امواج سیلاب در اختیار داشته باشند (۴). در مناطق کوهستانی اقلیم‌های خشک و نیمه خشک، معمولاً به دلیل پوشش گیاهی کم و سنگلاخی بودن مسیر رودخانه، بخش زیادی از بارش‌ها بلافاصله تبدیل به رواناب و در برخی مواقع باعث ایجاد سیل می‌شود (۳).

در حالت کلی دو روش عمده برای پیش‌بینی سیلاب در رودخانه‌ها وجود دارد. دسته اول روش‌های هیدرولیکی هستند که در کامل‌ترین شکل خود مبتنی بر حل معادلات پیوستگی و

اندازه حرکت هستند و دسته دوم روش‌های هیدرولوژیکی بوده که با ایجاد رابطه بین جریان‌های ورودی - خروجی و ذخیره سیلاب در بازه رودخانه حل می‌گردند (۵). روندیابی هیدرولیکی به خصوص در رودخانه‌های با آبراهه‌های زیاد در بالادست بسیار متداول است، ولی برای این منظور نیاز به تهیه مقاطع عرضی و تعیین شیب‌ها در کلیه بازه‌های رودخانه بوده که روش ماسکینگام با صرفه‌جویی در زمان، هزینه آماربرداری و تهیه اطلاعات را کاهش می‌دهد (۱۹). مدل ماسکینگام یکی از رایج‌ترین مدل‌های محاسبه روندیابی سیل است که البته برای حل آن نیاز به انجام محاسبات زیادی است. برای حل پارامترهای مسیریابی، بیشتر روش‌های ایجاد شده نیازمند دانش کافی در مورد برنامه‌های کامپیوتری مختلف و مدل‌های پیچیده هستند (۱۸). هنگامی که اطلاعات ایستگاه بالادست رودخانه در دسترس باشد، جریان آب سیل را می‌توان به پایین دست هدایت کرده و مطالعات طغیان سیل را انجام داد. اما در موارد خاص ممکن است داده‌های جریان بالادست در دسترس نباشد، جایی که می‌توان از روش مسیریابی سیل معکوس برای تعیین آبنمود سیل بالادست، از داده‌های جریان پایین دست موجود استفاده کرد (۶).

روش‌های مختلفی برای تعیین ضرایب مدل ماسکینگام ارائه شده است (۱، ۱۲، ۱۷ و ۲۲). پژوهش‌های زیادی در زمینه روندیابی سیل با استفاده از مدل ماسکینگام غیرخطی و با کاربرد الگوریتم‌های فراکاوشی انجام شده است. سینه‌ها و همکاران (۱۸) با کاربرد روش ماسکینگام، پژوهش‌های خود را روی کانال بان ساگار انجام دادند و نتایج آن‌ها را در مدیریت کنترل سیلاب و پیش‌بینی رویدادهای سیلاب در حوضه‌های مشابه مفید دانستند.

رجبی و همکاران (۱۳) نشان دادند که الگوریتم Imperialist Competition Algorithm (ICA) می‌تواند به عنوان یک روش مناسب به منظور تخمین پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام مورد استفاده قرار گیرد. اکبری فرد (۲) به تخمین پارامترهای معادله ماسکینگام غیرخطی با الگوریتم جستجوی گرگ Wolf Search Algorithm (WSA) روی رودخانه کارده

۳۴۸ مترمکعب بیشتر بود)، توصیه کردند برای تضمین کنترل در برابر سیل، لایروبی رودخانه برای دستیابی به ظرفیت طراحی شده انجام شود.

طی پژوهش موسوی و همکاران (۱۰)، تحلیل پارامترهای هیدرولوژیک رودخانه زاینده‌رود در مقیاس‌های کوتاه مدت و بلندمدت زمانی، نقش بسزایی در مطالعه‌های تولید و ذخیره‌سازی انرژی برقابی، کنترل سیلاب و خشکسالی دارد. در این پژوهش، با به کارگیری شاخص‌های آشوبی، وضعیت دینامیک سری زمانی جریان و تأثیر مقیاس زمانی بر رفتار جریان رودخانه زاینده‌رود طی ۴۳ سال (۱۳۹۲-۱۳۵۰) ارزیابی شده است. داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری اسکندری، قلعه شاهرخ، پل زمانخان و پل کله در رودخانه زاینده‌رود در دو مقیاس زمانی روزانه و ۱۹ روزه مورد بررسی قرار گرفتند. با استفاده از شاخص بُعد همبستگی، امکان وجود آشوب در دبی رودخانه بررسی شد. طبق نتایج، در مقیاس روزانه، برای ایستگاه‌های اسکندری، قلعه شاهرخ، پل زمانخان و پل کله، مقدار غیرصحیح بُعد همبستگی به ترتیب برابر ۳/۳۴، ۳/۶، ۳/۷۷ و ۳/۸۴ است که نشان از آشوبی بودن جریان در این ایستگاه‌ها دارد.

پژوهش‌های زیادی در رابطه با روندیابی سیل از طریق مدل ماسکینگام خطی و غیرخطی انجام شده است. مدل ماسکینگام خطی نسبت به مدل ماسکینگام غیرخطی از پیچیدگی بیشتری برخوردار است. هدف از این پژوهش روندیابی سیل با استفاده از نرم‌افزار دوبعدی و مقایسه آن با روش ساده‌تر ماسکینگام غیرخطی است. برای تعیین ضرایب این روش از تکنیک بهینه‌سازی و روش‌های آت - کین (Att-Kin) و ماسکینگام - کانژ (maskingam-cunge) نیز استفاده می‌شود. در سال ۲۰۲۳ توفیک با استفاده از نرم‌افزار یک‌بعدی اثر ضریب زبری، شیب کف و شیب جداره را روی شکل آبنمود پایین دست بررسی کرد. نتایج نشان داد که افزایش ضریب زبری، دبی اوج آبنمود پایین دست را کاهش و افزایش در شیب کف دبی اوج آن را افزایش می‌دهد.

پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که این الگوریتم در مقایسه با الگوریتم‌های ژنتیک (GA) (Genetic Algorithm)، گروه ذرات (PSO) (Particle Swarm Optimization) و جستجوی هارمونی (HS) (Harmony Search) می‌تواند برآورد مناسب‌تری ارائه دهد. خلیفه و همکاران (۷) با استفاده از الگوریتم فراکوشی سنجاقک، برآورد مناسبی از مقادیر بهینه پارامترهای مدل ماسکینگام غیرخطی ارائه نموده و نشان دادند که در مقایسه با الگوریتم‌های ژنتیک (GA) و الگوریتم جستجوی هارمونی (HS)، نتایج بهتری حاصل شده است.

در زمینه روش‌های هیدرولوژیکی، توسلی و همکاران (۲۱) خسارت حاصل از تجمع رواناب در مناطق پایین دست را با جانمایی مخازن استحصال آب باران با کمک مدل SWMM مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها در منطقه‌ای از شهر تهران با استفاده بهینه از آب نامتعارف، کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی و حفظ و نگهداری فضای سبز همراه بود. دسیلوا و همکاران (۴) مدل HEC-HMS را به منظور شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه رودخانه کلانتهی در سریلانکا به کار بردند. نتایج نشان داد مدل HEC-HMS توانایی بازتولید جریان در حوضه را با دقت زیاد با میانگین شاخص نش-ساتکلیف ۰/۹۱ برای شبیه‌سازی‌های مبتنی بر رویداد و ۰/۸۸ برای شبیه‌سازی‌های پیوسته نشان می‌دهد.

اوگبونا و همکاران (۱۱) نیز کاربرد مدل مسیریابی سیل برای کاهش سیل در رودخانه اوراشی واقع در جنوب شرقی نیجریه را مورد بررسی قرار داده و یک دوره مسیریابی فرضی که به بررسی سیل بیش از حد در بخش پایین دست رودخانه کمک کرد، در نظر گرفته شد. سه مجموعه مدل‌سازی ریاضی مسیریابی سیلاب رودخانه اوراشی بر اساس رویکرد رگرسیون - همبستگی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آن‌ها روش پالس اصلاح شده را دقیق‌ترین مدل برای برآورد خروجی پیش‌بینی شده در رودخانه اوراشی به دست آوردند و علاوه بر محاسبه ظرفیت طراحی به میزان ۳۵۴ مترمکعب (که از ظرفیت ذخیره‌سازی مسیریابی شده

آبریز رودخانه زاینده رود قرار گرفته و با حوضه‌های آبریز کارون و دریاچه نمک فاصله چندانی ندارد. طبق مطالعه‌های دفتر مدیریت منابع آبی ایران، طول این رودخانه دائمی ۷۵ کیلومتر بوده و وسعت حوضه آبریز آن بالغ بر ۱۸۰۰ کیلومترمربع است. این رودخانه دو سرشاخه مهم دارد. یکی از سرشاخه‌های اصلی این رودخانه از ارتفاعات دامنه - داران سرچشمه گرفته و به سمت رودخانه پلاسجان جریان دارد؛ سپس در نزدیکی روستای سواران به پلاسجان می‌پیوندد. تونل انتقال آب چشمه لنگان نیز یکی دیگر از سرشاخه‌های اصلی رودخانه پلاسجان است. رودخانه پلاسجان در حوضه آبریز گاوخونی قرار گرفته است. حوضه آبریز گاوخونی دارای ۴ زیر حوضه به نام‌های زاینده رود، شرق باتلاق، غرب باتلاق و باتلاق گاوخونی است. مساحت حوضه آبریز گاوخونی ۴۱۵۲۸ کیلومترمربع و ارتفاع متوسط آن ۲۳۴۹ متر از سطح دریا بوده که بخش وسیعی از آن در استان اصفهان واقع شده است.

به منظور انجام مطالعه‌های سیلاب در رودخانه پلاسجان دو نقطه در فواصل هشت کیلومتری این رودخانه به عنوان بازه روندیابی سیلاب در نظر گرفته شده‌اند. نقطه شروع بازه (آب‌نمود ورودی)، محل پل روستای سواران از توابع شهرستان فریدن در بالادست رودخانه پلاسجان و محل اتصال سرشاخه‌های سواران و فریدونشهر با مختصات جغرافیایی $32^{\circ} 42' 10''$ شمالی و $50^{\circ} 30' 10''$ شرقی و با ارتفاع ۲۱۶۸ متر از سطح دریا قرار گرفته است. نقطه پایانی بازه (آب‌نمود خروجی) مطالعاتی نیز در محل ایستگاه هیدرومتری نزدیک پل روستای اسکندری با مختصات جغرافیایی $32^{\circ} 49' 23''$ شمالی و $50^{\circ} 25' 47''$ شرقی و ارتفاع ۲۱۲۵ متری از سطح دریا در نظر گرفته شده است. هیچ سازه و تأسیساتی در مسیر مطالعه وجود نداشته و همچنین آمار استفاده شده در این پژوهش مربوط به سیل سال ۱۳۹۴ بوده است. در این پژوهش از چهار آب‌نمود ورودی و چهار آب‌نمود خروجی این رودخانه استفاده شده است.

افزایش در شیب جداره، دبی اوج آب‌نمود پایین دست را اندکی کاهش می‌دهد (۲۰). در سال ۲۰۲۴ مقلدنا و همکاران برای بررسی تغییرات سرعت جریان در مجاری روباز، معادلات سنت - ونانت را با تکنیک عددی نرم‌افزار HEC-RAS مقایسه کردند. در این مطالعه تغییرات سرعت جریان در طول مسیر کانال و در زمان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش زمان تفاوت بین دو روش در مجاری با مقطع منظم کمتر و در مقاطع نامنظم بیشتر می‌شود (۸). به عنوان جمع‌بندی سابقه پژوهش می‌توان گفت که مقایسه بین روش‌های ساده هیدرولوژیک و روش پیچیده موج دینامیکی آن هم در حالت دوبعدی با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS انجام نشده است. این مشاهده ما را به سمت شرایطی که می‌توان روش ماسکینگام را جایگزین روش موج دینامیکی کرد، رهنمون می‌سازد؛ زیرا روش اخیر اطلاعات زیادی که اندازه‌گیری آن وقت‌گیر و هزینه‌بر است، لازم دارد. گفتنی است که کمبود داده‌های مربوط به آب‌نمود سیل در حوزه مدنظر جزء محدودیت‌های این پژوهش بوده و چنانچه داده‌های بیشتری در اختیار بود، ایستگاه‌ها و بازه‌های متعدد دیگری نیز مورد پژوهش و بحث قرار می‌گرفت.

مواد و روش‌ها

معرفی رودخانه مورد مطالعه

رودخانه پلاسجان در شمال غربی استان اصفهان واقع شده و سرشاخه‌های آن نیز در شهرستان‌های فریدونشهر و فریدن و از مناطق بسیار مرتفع جریان پیدا کرده و سپس با گذر از شهرستان چادگان در روستای کمیتک به زاینده رود می‌ریزد. به نحوی می‌توان گفت مسیر رودخانه پلاسجان، شمالی به جنوبی بوده و بیشتر در مناطق سردسیر و کوهستانی استان جریان دارد. سرشاخه‌های این رودخانه دارای آب‌وهوایی اغلب سرد و برف‌گیر است. رودخانه پلاسجان در حوضه

استفاده شده است (۱۵):

$$S^{n+1} = S^n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (۷)$$

که

$$K_1 = \Delta t \left(\frac{-1}{1-x} \right) \left(\frac{S^n}{K} \right)^{\frac{1}{m}} + \left(\frac{1}{1-x} \right) \Delta t \cdot I^n$$

$$K_2 = \Delta t \left(\frac{-1}{1-x} \right) \left(\frac{S^n + 0.5k_1}{K} \right)^{\frac{1}{m}} + \left(\frac{1}{1-x} \right) \left(\frac{I^{n+1} + I^n}{2} \right) + \Delta t$$

$$K_3 = \Delta t \left(\frac{-1}{1-x} \right) \left(\frac{S^n + 0.5k_2}{K} \right)^{\frac{1}{m}} + \left(\frac{1}{1-x} \right) \left(\frac{I^{n+1} + I^n}{2} \right) + \Delta t$$

$$K_4 = \Delta t \left(\frac{-1}{1-x} \right) \left(\frac{S^n + k_3}{K} \right)^{\frac{1}{m}} + \left(\frac{1}{1-x} \right) \Delta t \cdot I^{n+1}$$

برای محاسبه O^{n+1} به صورت زیر عمل می‌شود:

$$۱- \text{ محاسبه } S^n \text{ به ازای } I = I^n \text{ و } O = O^n \text{ از معادله (۴)}$$

$$۲- \text{ محاسبه } S^{n+1} \text{ از معادله ۷}$$

$$۳- \text{ محاسبه } O^{n+1} \text{ به ازای } I = I^{n+1} \text{ و } S = S^{n+1} \text{ از معادله ۵}$$

با تکرار محاسبات یادشده آبنمود خروجی کامل می‌شود. همچنین می‌توان با داشتن آبنمودهای ورودی و خروجی، ضرایب مدل را با استفاده از بهینه‌سازی به دست آورد. در تکنیک بهینه‌سازی، تابع هدف خطای بین آبنمود خروجی محاسباتی و مشاهداتی بوده و ضرایب K ، m و x متغیرهای تصمیم‌گیری هستند. بهینه‌سازی و به دنبال آن روندیابی با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB انجام شد. در این پژوهش با استفاده از یکی از آبنمودهای ورودی و خروجی، ضرایب برای رودخانه پلاسجان به دست آمد. از این ضرایب برای روندیابی سه آبنمود ورودی دیگر استفاده شد.

روندیابی به روش موج دینامیکی و با کمک نرم‌افزار

HEC-RAS دوبعدی

با توجه به اینکه نرم‌افزار HEC-RAS روندیابی سیل را با حل معادلات سنت - ونانت انجام می‌دهد، این مطالعه‌ها از نتایج دقیقی برخوردار هستند؛ بنابراین از این نرم‌افزار برای تولید

روندیابی به روش مدل ماسکینگام غیرخطی و تعیین ضرایب

آن با تکنیک بهینه‌سازی

یکی از ساده‌ترین معادلات دیفرانسیلی مورد استفاده در منابع آب، معادله پیوستگی است که در روندیابی سیل در رودخانه‌ها به روش ماسکینگام استفاده می‌شود (۱):

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = I - O \quad (۱)$$

که در این معادله:

I = دبی جریان ورودی، O = دبی جریان خروجی، S = حجم آب ذخیره شده و t = زمان است.

معادله (۱) به صورت زیر مفصل می‌شود:

$$\frac{S^{n+1} - S^n}{\Delta t} = \frac{I^n + I^{n+1}}{2} - \frac{O^n + O^{n+1}}{2} \quad (۲)$$

که در آن n و $n+1$ دو زمان متوالی به فاصله Δt است. برای حل معادله یادشده نیاز به رابطه‌ای برای حجم ذخیره است. ماسکینگام این حجم را به صورت تابعی از جریان ورودی و خروجی دانست و آن را مجموع حجم گوه‌ای (تیغه‌ای) و منشوری در نظر می‌گیرد. وی حجم منشوری را تابعی از O و حجم گوه‌ای را تابعی از $I - O$ در نظر گرفت؛ بنابراین در حالت خطی می‌توان نوشت:

$$S = K [xI + (1-x)O] \quad (۳)$$

در حالت غیرخطی، حجم ذخیره به صورت زیر است:

$$S = K [xI + (1-x)O]^m \quad (۴)$$

در ادامه می‌توان از معادله (۴) معادله زیر را استخراج نمود:

$$O = \frac{1}{1-x} \left(\frac{S}{K} \right)^{\frac{1}{m}} - \left(\frac{x}{1-x} \right) I \quad (۵)$$

با ترکیب معادلات ۵ و ۱ معادله زیر به دست می‌آید:

$$\frac{ds}{dt} = \left(\frac{-1}{1-x} \right) \left(\frac{S}{K} \right)^{\frac{1}{m}} + \left(\frac{1}{1-x} \right) I \quad (۶)$$

معادله (۶) یک معادله دیفرانسیلی مرتبه اول است که می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف عددی حل نمود. در این پژوهش از روش رانگ کاتای مرتبه چهارم به صورت زیر

سپس در قسمت RUN سایر شرایط برای اجرای برنامه به نرم افزار معرفی شد. در شکل ۳ نمونه‌ای از تصویر شبیه‌سازی جریان توسط نرم افزار HEC-RAS دیده می‌شود.

برای محاسبه میزان خطا، از مقادیر دبی آنمودهای خروجی روندیابی شده و مشاهده شده، و معادله زیر استفاده شد:

$$RMSE = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_T)^2}{N} \quad (8)$$

که Q_o = دبی مشاهده شده، Q_T = دبی روندیابی شده و N = تعداد داده‌ها است.

از تقسیم RMSE بر میانگین مقادیر مشاهداتی زمان رسیدن آب به نقاط مختلف مزرعه، NRMSE به دست می‌آید.

نتایج و بحث

نتایج روندیابی با استفاده از روش ماسکینگام غیر خطی

پس از انجام محاسبات با استفاده از کدنویسی در نرم افزار متلب، ضرایب معادله ماسکینگام غیر خطی با استفاده از اولین آنمود ورودی و خروجی برای رودخانه پلاسجان به صورت زیر تعیین شد:

$$x=0.173 \quad K=3.42 \quad m=1.02$$

با استفاده از این ضرایب آنمودهای ورودی شماره ۲، ۳ و ۴ روندیابی و با آنمودهای خروجی مشاهداتی آن‌ها مقایسه شد (شکل‌های ۴ تا ۶). با مقایسه مقادیر دبی آنمودهای خروجی روندیابی شده و مشاهده شده، میزان خطای آن‌ها محاسبه و در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به این جدول درصد خطا برای همه آنمودها کمتر از ۱۰ درصد بوده که نشان می‌دهد نتایج روش ماسکینگام غیر خطی قابل قبول است. همچنین جدول ۱ و شکل‌های ۴ تا ۶ نشان می‌دهد که با افزایش دبی آنمود ورودی، درصد خطا نیز افزایش می‌یابد؛ بنابراین هرچه سیلاب بزرگتر شود، درصد خطا بیشتر می‌شود. در پژوهشی که توسط شایان‌نژاد و همکاران (۱۵) انجام گرفت، این ضرایب برای رودخانه دو آب صمصامی واقع در غرب استان چهارمحال و بختیاری که از سر شاخه‌های اصلی رودخانه کارون است، به دست آمد. برای رودخانه یادشده ضریب x بین ۰/۰۶ تا ۱/۲، ضریب k بین ۰/۶۷ تا ۳/۰۲ و ضریب m بین ۱ تا ۱/۳ محاسبه شد.

آنمودهای خروجی استفاده شد. مراحل استخراج آنمودهای خروجی از روی آنمود ورودی در ادامه توضیح داده می‌شود.

گام ۱: تهیه رقوم ارتفاعی در بازه طرح

برای تهیه خطوط تراز یک منطقه، داشتن رقوم ارتفاعی آن منطقه الزامیست. بدین منظور با استفاده از نقشه برداری داده‌های اولیه تهیه شد.

گام ۲: تهیه خطوط تراز و نقشه TIN

سپس به کمک نرم افزار GIS، نقاط نقشه برداری شده را فراخوانی کرده و به فرمت شیپ فایل تبدیل شد. در شکل ۱ رقوم ارتفاعی نقشه برداری شده با دامنه ارتفاعی یک متر در نرم افزار GIS فراخوانی شده است.

گام ۳: تهیه نقشه رستر برای اجرا در HEC-RAS

سپس شیپ فایل به دست آمده از GIS با کمک دستور ساختن تین (create TIN) به حالت رستر (RASTER) تبدیل شد. این فرایند در شکل ۲ نشان داده شده است.

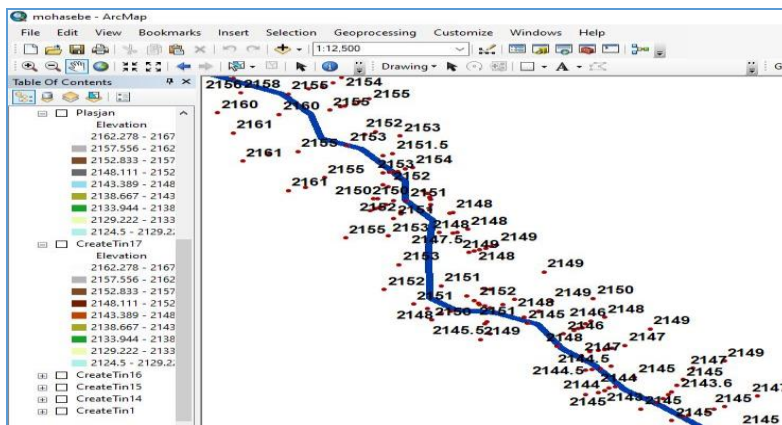
گام ۴: اجرای فایل خطوط تراز در HEC-RAS

در نرم افزار HEC-RAS ابتدا بایستی یک پروژه تعریف شود، سپس تمامی نقشه‌های تهیه شده و داده‌های رودخانه در آن وارد شود. این کار با تعریف منطقه به نرم افزار و به اصطلاح ژئورفرنس کردن تکمیل می‌شود. در این مرحله اطلاعاتی که از GIS وارد پروژه شده، در محل واقعی خود لحاظ می‌شود.

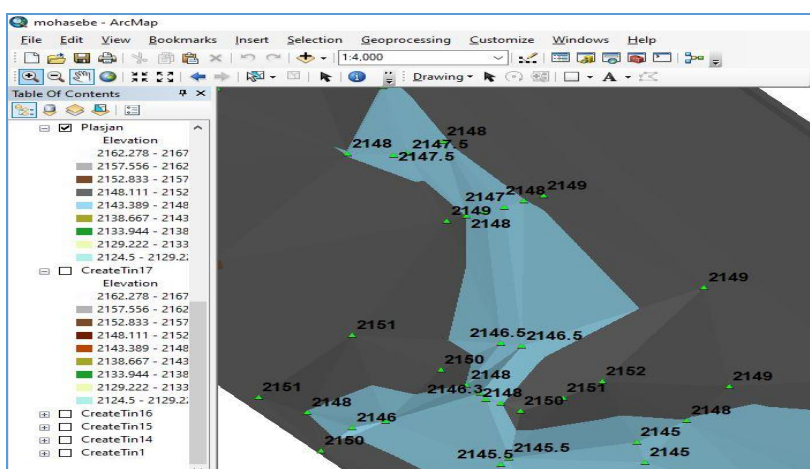
در مرحله بعد با استفاده از نوار ابزار RAS-MAPER فایل نهایی رقوم تراز فراخوانی شد. محیط ابزار RAS-MAPER برای استفاده از خطوط تراز به منظور شبیه سازی جریان آب در رودخانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. از دیگر ویژگی‌های این نوار ابزار، تحلیل مقطعی جریان در مسیر رودخانه است. بدین معنی که در هر نقطه می‌توان آنمود جریان آب در آن مقطع و همچنین سطح جریان (A) و دبی لحظه‌ای را دید.

گام ۵: ورود داده‌های آنمود ورودی و به دست آوردن آنمود خروجی

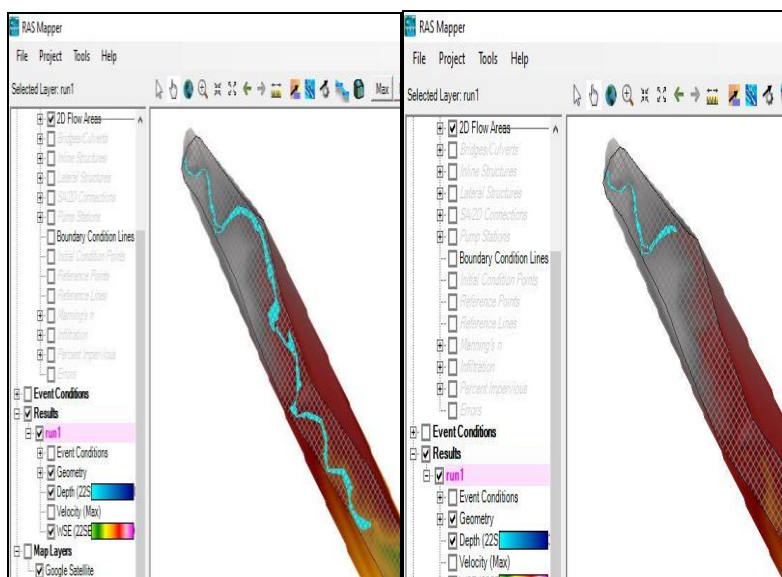
در این مرحله در قسمت EDIT و با کمک ابزار Unsteady Flow data، آنمود ورودی به نرم افزار معرفی شد.



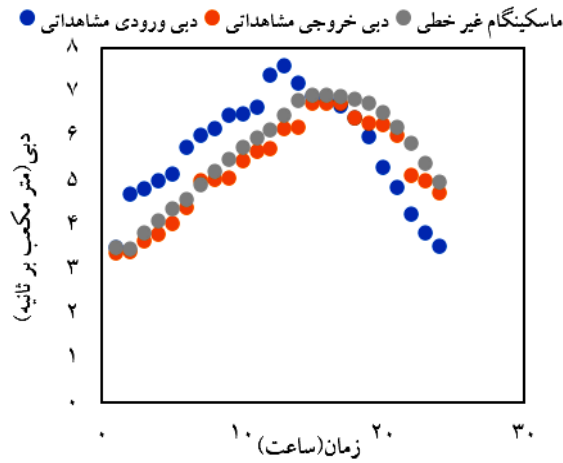
شکل ۱. انتقال رقم ارتفاعی نقشه‌برداری شده در نرم‌افزار GIS



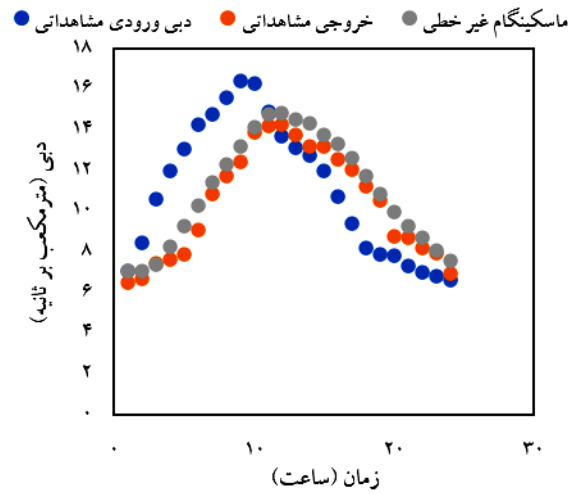
شکل ۲. تهیه نقشه تین در نرم‌افزار GIS



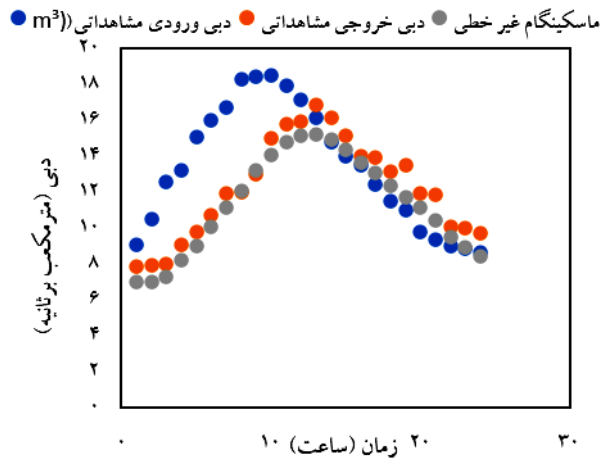
شکل ۳. نمونه ای از تصویر شبیه‌سازی جریان توسط نرم‌افزار HEC-RAS



شکل ۴. مقایسه آبنمود خروجی شماره ۲ مشاهداتی و روندیابی شده به روش ماسکینگام غیرخطی



شکل ۵. مقایسه آبنمود خروجی شماره ۳ مشاهداتی و روندیابی شده به روش ماسکینگام غیرخطی



شکل ۶. مقایسه آبنمود خروجی شماره ۴ مشاهداتی و روندیابی شده به روش ماسکینگام غیرخطی

جدول ۱. نتایج خطای روش ماسکینگام غیرخطی در روندیابی سه آبنمود

شماره آبنمود	جذر میانگین مربع خطا (مترمکعب بر ثانیه)	جذر میانگین مربع خطای نرمال شده (درصد)
۲	۰/۳۳۱	۶/۲۳
۳	۰/۷۱	۶/۸۴
۴	۰/۹۷	۷/۹۱

نوشته شده است و مشخصه‌های هیدرولیک جریان مورد توجه قرار نمی‌گیرد.

آنچه که لازم است در مورد تمام آبنمودهای روندیابی شده گفته شود، آن است که نقطه اوج آبنمود خروجی روی شاخه نزولی آبنمود ورودی قرار گرفته و این نشان‌دهنده آن است که در زمان برخورد دو آبنمود با هم، بیشترین ذخیره در رودخانه وجود داشته و بنابراین در این زمان دبی خروجی بیشینه است.

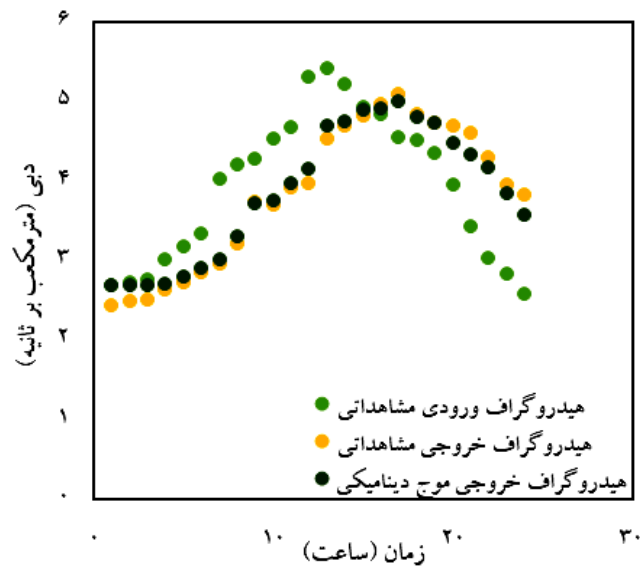
نتیجه‌گیری

روش موج دینامیکی در انجام روندیابی و همچنین تخمین دبی اوج آبنمود پایین‌دست و زمان وقوع آن دقت بیشتری نسبت به روش ماسکینگام غیرخطی دارد. اگر چه دقت هر دو روش برای همه آبنمودهای مورد مطالعه در رودخانه پلاسجان کمتر از ۱۰ درصد بود، می‌توان از روش ماسکینگام غیرخطی در شرایط خاص استفاده کرد؛ زیرا این روش ساده‌تر، دارای اطلاعات مورد نیاز کمتر و زمان کمتری برای اجرای آن است. با توجه به افزایش خطای این روش به‌ازای سیلاب‌های بزرگ، توصیه می‌شود این روش برای سیلاب‌های با دبی اوج کمتر از ۳۰ مترمکعب در ثانیه استفاده شود و برای دبی بزرگتر با احتیاط بیشتری باید بکار برده شود. به‌طور کلی برای انتخاب روش مورد استفاده برای روندیابی سیلاب و تخمین آبنمودهای خروجی یک رودخانه بایستی جنبه‌های فنی و اقتصادی مختلف یک طرح مورد بررسی

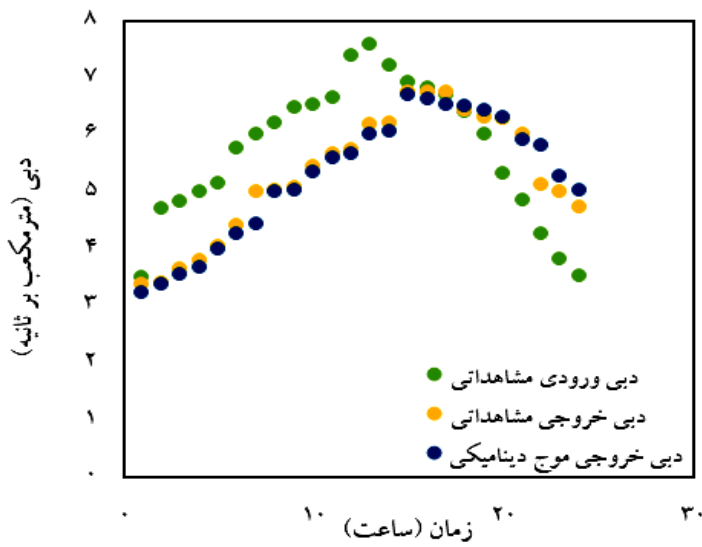
نتایج روش موج دینامیکی با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS

نرم‌افزار HEC-RAS یکی از نرم‌افزارهایی است که روندیابی سیلاب را بر مبنای موج دینامیکی انجام می‌دهد. در این مطالعه با استفاده از خطوط تراز رودخانه و با شبیه‌سازی جریان به صورت دوبعدی محاسبات صورت پذیرفت. نتایج روندیابی‌ها در شکل‌های ۷ تا ۱۰ ارائه شده است. با مقایسه مقادیر دبی آبنمودهای خروجی روندیابی شده و مشاهده شده، میزان خطای آن‌ها محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به این جدول درصد خطا برای همه آبنمودها کمتر از ۱۰ درصد و کمتر از روش ماسکینگام غیرخطی است؛ بنابراین دقت روش موج دینامیکی بیشتر از روش ماسکینگام غیرخطی است. همچنین جدول ۲ و شکل‌های ۷ تا ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش دبی آبنمود ورودی، درصد خطا نیز افزایش می‌یابد.

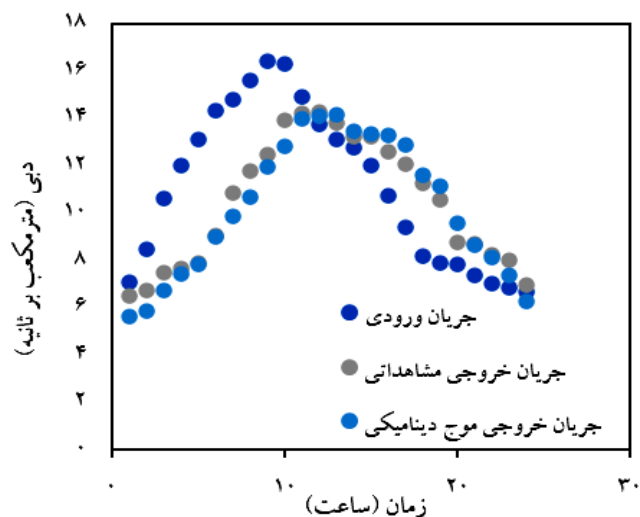
علاوه بر میزان خطای روندیابی دو روش، می‌توان دقت آن‌ها را در تخمین دبی اوج و زمان وقوع آن در آبنمودهای خروجی روندیابی شده مقایسه نمود. از شکل‌های ۴ تا ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت که خطای روش موج دینامیکی در محاسبه میزان و همچنین زمان وقوع دبی اوج کمتر از روش ماسکینگام غیرخطی است. علت دقت بیشتر مدل موج دینامیکی نسبت به روش ماسکینگام این است که روش اول مبتنی بر معادلات پیوستگی و اندازه حرکت است که در آن تغییرات زمانی و مکانی سرعت و عمق جریان مورد توجه قرار می‌گیرد. اما روش ماسکینگام بر مبنای بیلان حجم



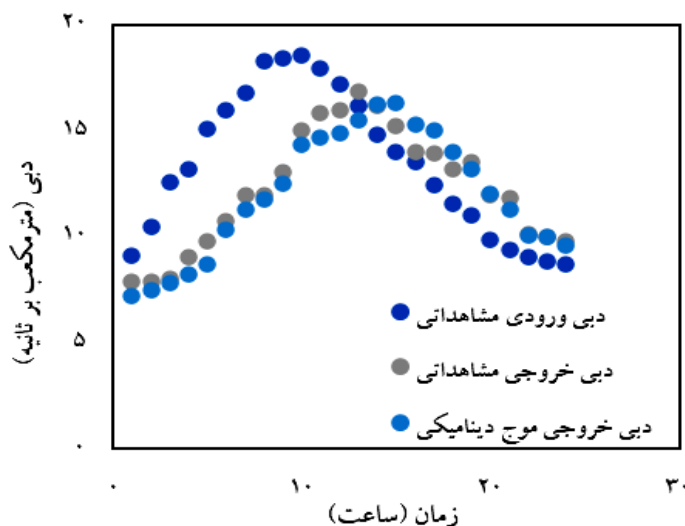
شکل ۷. مقایسه آبنمود خروجی شماره ۱ مشاهداتی و روندیابی شده به روش موج دینامیکی



شکل ۸. مقایسه آبنمود خروجی شماره ۲ مشاهداتی و روندیابی شده به روش موج دینامیکی



شکل ۹. مقایسه آبنمود خروجی شماره ۳ مشاهداتی و روندیابی شده به روش موج دینامیکی



شکل ۱۰. مقایسه آبنمود خروجی شماره ۴ مشاهداتی و روندیابی شده به روش موج دینامیکی

جدول ۲. نتایج خطای روش موج دینامیکی در روندیابی چهار آبنمود

شماره آبنمود	جذر میانگین مربع خطا (مترمکعب بر ثانیه)	جذر میانگین مربع خطای نرمال شده (درصد)
۱	۰/۱۳	۳/۵۸
۲	۰/۲۲	۴/۱۷
۳	۰/۶۱	۵/۸۷
۴	۰/۷۶	۶/۲۱

آب، از پیچیدگی خاصی برخوردار است؛ زیرا در صورت نداشتن رقوم ارتفاعی و شکل مقاطع جریان یک منطقه نمی‌توان از آن استفاده کرد. از محاسن و کاربردهای روش موج دینامیکی، روندیابی خشکه‌رود است. برای نمونه در رودخانه زاینده‌رود زمانی که آب از بالادست باز می‌شود، می‌توان زمان رسیدن به نقاط مختلف پایین‌دست و دبی قابل‌استحصال را محاسبه نمود.

قرار گیرد. اهداف مطالعه، هزینه‌های در نظر گرفته شده برای یک طرح، سرعت انجام مطالعات و اطلاعات در دسترس طرح مهم‌ترین دلایلی هستند که در انتخاب مناسب‌ترین روش روندیابی سیلاب باید مورد بررسی قرار گیرند. برای نمونه در صورت نداشتن آبنمودهای ورودی و خروجی از یک رودخانه نمی‌توان از روش ماسکینگام غیرخطی استفاده کرد. روش موج دینامیکی نیز باتوجه‌به نیازمند بودن به اطلاعات هندسی یک رودخانه مانند خطوط تراز بستر جریان

منابع مورداستفاده

1. Akbari, N., M. Shayannejad and M. Madahi. 2016. River slope changes and its effect on Muskingham's nonlinear model coefficients using genetic algorithm. The second national hydrology conference of Iran. Shahrekord, Iran (in Farsi).
2. Akbarifard, S. 2017. Parameters Estimation of the Nonlinear Muskingum Flood-Routing Model Using Wolf Search Algorithm (WSA) (Case Study: Kardeh River). *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research* 17(67): 95-112 (in Farsi).
3. Alizadeh, A. 2017. Principles of applied hydrology. Astan Quds Razavi Publications, Mashhad (in Farsi).
4. De Silva, M.M.G.T., S.B. Weerakoon and S. Herath. 2014. Modeling of event and continuous flow hydrographs with HEC-HMS: case study in the Kelani River Basin, Sri Lanka. *Journal of Hydrologic Engineering* 19(4): 800-806.
5. Ghobadian, R., M. Zare and S. M. Kashefipour. 2012. Using Nonlinear Programming for Flood Routing and Comparing the Results with those of Dynamic Wave Hydraulic and Muskingum Hydrological Methods. *Journal of Water and Soil Science* 16(60): 23-31 (in Farsi).
6. Jeslin, A.J. and K.S. Sumam. 2021. Upstream flood hydrograph prediction of Chalakkudy River. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Montreal, Canada.
7. Khalifeh, S., S. Khodashenas and K. Esmaili. 2021. Parameter Estimation of the Nonlinear Muskingum Flood-Routing Model Using The new dragonfly algorithm. *Sharif Journal of Civil Engineering* 37.2(2.1): 3-10 (in Farsi).
8. Magdalena, I., R. Imawan and M. A. Nugroho. 2024. Numerical investigation for water flow in an irregular channel using Saint-Venant equation. *Journal of Saud University-Science* 36(7): 103237.
9. Moslemi, H., A. J. abkar and S. choopani. 2015. Evaluation studies on the effect of flood spreading on the development of water resources. *Journal of Rainwater Catchment Systems* 3(3): 73-91 (in Farsi).
10. Mousavi, S. F., M. Boustani, H. karami and S. Farzin. 2018. Analysis of River Parameters Using Chaos-Theory Based Indices (Case Study: Zayandehrud River Flow). *Iran-Water Resources Research* 14(4): 253-256 (in Farsi).
11. Ogbonna, D., B. C. Okoro and J. C. Osuagwu. 2017. Application of flood routing model for flood mitigation in Orashi river, south-east Nigeria. *Journal of Geoscience and Environment Protection* 5(3): 31-42.
12. Orouji, H., O. Bozorg Haddad, E. Fallah-Mehdipour and M. A. Mariño. 2014. February. Flood routing in branched river by genetic programming. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* 167(2): 115-123).
13. Rajabi, D., H. Karami, K. Hosseini, S. F. Mousavi and S. A. Hashemi. 2015. Estimating Optimum Parameters of Non-Linear Muskingum Model of Routing using Imperialist Competition Algorithm (ICA). *Journal of Water and Soil Science* 19 (73): 321-334 (in Farsi).
14. Sarvari, S., M. pourreza and Z. zaraatkar. 2020. Estimation of Runoff using Modified SCS Models. *Journal of Rainwater Catchment Systems* 7(4): 11-20 (in Farsi).
15. Shayannejad, M., N. Akbari and A. Honarbakhsh. 2014. Development of non-linear Muskingum model and its comparison with HEC-RAS software in order to flood routing in river. *Journal of Ecohydrology* 1(2): 11-122 (in Farsi).
16. Shayannejad, M., N. Akbari and K. Ostad-Ali-Askari. 2015. Study of modifications of the river physical specifications on muskingum coefficients, through employment of genetic algorithm. *International Journal of Development Research* 5(3): 3782-3785.

17. Sil, B. S., A. Borah, S. Deb and B. Das. 2016. Development of river flood routing model using non-linear muskingum equation and excel tool 'ganetxl'. *Journal of Urban and Environmental Engineering* 10(2): 214-220.
18. Sinha, L. M., S. Narulkar and A. Keerti Chowdhary. 2019. Analysis of Flood Routing in Channels of Ban Sagar Project: A Case Study. Available online at <http://ssrn.com>.
19. Soltani, A. 2017. Feasibility of susceptible areas for rainwater harvesting, based on AHP in GIS environment (a case Study: Khosroabad watershed, Iran). *Journal of Rainwater Catchment Systems* 5(2): 65-76 (in Farsi).
20. Tawfic A. M. 2023. River flood routing using artificial neural networks. *Ain Sham Engineering Journal* 14(3): 101904.
21. Tavasoli, A., A. hoseinnia and A. shahbazi. 2017. Site selection for rainwater harvesting reservoirs in urban areas using the SWMM model (case study: Tehran's first district). *Journal of Rainwater Catchment Systems* 5(2): 13-28 (in Farsi).
22. Wilson, E.M. 1990. Engineering hydrology. Palgrave, London.

Flood Routing in Rivers Using Two-Dimensional HEC-RAS Software and its Comparison with the Non-Linear Muskingum Method

M. Amiri, E. Fazel Najafabadi and M. Shayannejad^{1*}

(Received: April 28-2024 ; Accepted: August 3-2024)

Abstract

One of the important issues in river engineering is flood trends. In general, two types of methods are used to determine the flood trends in rivers. The first group of hydraulic methods, such as the dynamic wave method, is based on solving continuity and momentum equations or Saint-Venant equations. The second category is hydrological methods like the non-linear Muskingum method. In this research, both methods have been used to determine the trends of flood hydrographs in the Plasjan River, one of the main tributaries of the Zayandehrud River. The coefficients of the non-linear Muskingum method were obtained by optimizing and solving the related equation with the fourth-order Runge-Katai numerical method using MATLAB software and the dynamic wave method using the two-dimensional HEC-RAS software. In this study, four flood events were used. In the non-linear Muskingum method, the first event was used for model calibration and the other three events were used for validation. The error rate in this method for the second, third, and fourth events was 84.23, 6.6, and 7.96 percent, respectively, and the error rate in the dynamic wave method for these four events was 17.58, 87.3, 5.4, and 6.21 percent, respectively. Therefore, the dynamic wave method is more accurate in estimating the output hydrograph. However, the non-linear Muskingum method has acceptable accuracy and is recommended in terms of cost, required information, simplicity, and speed of calculation in situations where sufficient information is not available.

Keywords: Flood routing, Non-Linear Muskingum, Dynamic wave model, HEC-RAS Software

1. Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

*: Corresponding author, Email: shayannejad@iut.ac.ir