

## 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<sup>۱\*</sup>

(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 جهت روندیابی آبنمودهای سیل در رودخانه پلاسجان که از سرشاخه‌های اصلی زاینده‌رود به شمار می‌آید، استفاده شده است. ضرائب روش ماسکینگام غیرخطی از طریق بهینه‌سازی و حل معادله مربوط به آن با روش عددی رانگ - کاتای مرتبه چهار با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و روش موج دینامیکی با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS دوبعدی به‌دست 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. بر این اساس میزان خطا در این روش برای رویدادهای دوم، سوم و چهارم به‌ترتیب برابر با ۶/۲۳، ۵/۴۸۷/۳، ۱۷/۵۸ درصد و میزان خطا در روش موج دینامیکی برای این چهار رویداد به‌ترتیب برابر با ۱۷/۵۸، ۵/۴۸۷/۳ و ۶/۲۱ درصد بود. بنابراین روش موج دینامیکی دقت بیشتری در تخمین آبنمود خروجی دارد. با این حال روش ماسکینگام غیرخطی نیز از دقت قابل قبولی برخوردار بوده و به لحاظ هزینه، اطلاعات مورد نیاز، 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: koupai@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 را روندیابی سیلاب می‌گویند.

طبق پژوهش‌های مسلمی و همکاران (۹) لزوم توجه به روش کار، عملکرد و نتایج حاصله در تحقیقات اجرا شده در خصوص مسائل و مشکلات موجود در اجرای طرح‌های تحقیقاتی پخش سیلاب، امری ضروریست. آن‌ها دریافتند 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). اختلاف زمانی وقوع اوج دبی در بالادست تا رسیدن نقطه پایین دست به اوج را 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 عظیمی 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 مخصوصاً در رودخانه‌های با آبراه‌های زیاد در بالادست بسیار متداول است، ولی به 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 اکثر 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).

تحقیقات زیادی در زمینه روندیابی سیل با استفاده از مدل ماسکینگام غیرخطی و با کاربرد الگوریتم‌های فراکاوشی انجام شده است. سینها و همکاران (۱۸) با کاربرد روش ماسکینگام تحقیقات خود را روی کانال بان ساگار انجام دادند. آن‌ها نتایج تحقیقاتشان 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. اکبری‌فرد (۲) به تخمین پارامترهای معادله ماسکینگام غیرخطی با الگوریتم جستجوی گرگ (Wolf Search Algorithm (WSA) بر روی رودخانه کارده پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که این الگوریتم در مقایسه با الگوریتم‌های ژنتیک (Genetic Algorithm) (GA)،

ظرفیت طراحی شده انجام شود.

طی تحقیق موسوی و همکاران (۱۰) تحلیل پارامترهای هیدرولوژیک رودخانه زاینده‌رود در مقیاس‌های کوتاه مدت و بازه بلندمدت زمانی، نقش به‌سزایی در مطالعات تولید و ذخیره‌سازی انرژی برقایی، 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 (۱۳۵۰-۹۲) 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 غیرصحيح 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 غیر خطی انجام شده است. مدل ماسکینگام خطی نسبت به مدل ماسکینگام غیرخطی از پیچیدگی بیشتری برخوردار است. هدف از این تحقیق روندیابی سیل با استفاده از نرم‌افزار دوبعدی و مقایسه آن با روش ساده‌تر ماسکینگام غیرخطی است. برای تعیین ضرائب 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 یک بعدی اثر ضریب زبری، شیب کف و شیب جداره را بر روی شکل آبنمود پائین دست بررسی کرد. ایشان نتیجه گرفتند که افزایش ضریب زبری، دبی اوج آبنمود پائین دست را کاهش و افزایش در ضریب کف دبی اوج آن را افزایش می‌دهد. همچنین افزایش در شیب جداره، سبب کاهش بسیار کم در دبی اوج آبنمود پائین دست داشته است (۲۰). در سال ۲۰۲۴

گروه ذرات (Particle Swarm Optimization) (PSO) و جستجوی هارمونی (Harmony Search) (HS) می‌تواند برآورد مناسب‌تری ارائه دهد. خلیفه و همکاران (۷) با استفاده از الگوریتم فراکاوشی سنجاکک 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 پایین‌دست را با جانمایی مخازن استحصال آب باران با کمک مدل SWMM مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات 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. دیسلوا و همکاران (۴) مدل HEC-HMS را به منظور شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه رودخانه کلانتهی در سریلانکا به کار بردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد مدل HEC-HMS توانایی بازتولید جریان در حوضه را با دقت بالا 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 اصلاح‌شده را دقیق‌ترین مدل جهت برآورد خروجی پیش‌بینی‌شده در رودخانه اوراشی به دست آوردند؛ و ضمن محاسبه ظرفیت طراحی به میزان ۳۵۴ متر مکعب (که از ظرفیت ذخیره‌سازی مسیریابی شده ۳۴۸ متر مکعب بیشتر بود)، توصیه کردند برای تضمین کنترل در برابر سیل، لایروبی رودخانه برای دستیابی به

۷۵ کیلومتر بوده و وسعت حوضه آبریز آن بالغ بر ۱۸۰۰ کیلومتر مربع 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 زاینده‌رود، شرق باتلاق، غرب باتلاق و باتلاق گاوخونی است. مساحت حوضه آبریز گاوخونی ۴۱۵۲۸ کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط آن ۲۳۴۹ متر از سطح دریا بوده که بخش وسیعی از آن در استان اصفهان واقع شده است.

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

**روندیابی به روش مدل ماسکینگام غیرخطی و تعیین ضرائب**

**آن با تکنیک بهینه‌سازی**

یکی از ساده‌ترین معادلات دیفرانسیلی مورد استفاده در منابع

مقلدنا و همکاران برای بررسی تغییرات سرعت جریان در مجاری روباز، معادلات سنت-نانت را با تکنیک عددی (Forward time Centered Space) FTCS حل و نتایج را با 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 جمع بندی سابقه تحقیق می‌توان گفت که مقایسه بین روش‌های ساده هیدرولوژیکی 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. لازم به ذکر است که کمبود داده‌ها مربوط به آبمورد سیل در حوزه مورد نظر جزء محدودیت‌های این تحقیق بوده و چنانچه داده‌های بیشتری در اختیار بود ایستگاه‌ها و بازه‌های متعدد دیگری نیز مورد تحقیق 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 زاینده‌رود 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 آب و هوایی اغلب سرد و برف‌گیر است. رودخانه پلاسجان در حوضه آبریز رودخانه زاینده‌رود قرار گرفته و با حوضه‌های آبریز کارون و دریاچه نمک فاصله چندانی ندارد. طبق مطالعات دفتر مدیریت منابع آبی ایران، طول این رودخانه دائمی

آب، معادله پیوستگی است که در روندیابی سیل در رودخانه‌ها به روش ماسکینگام استفاده می‌شود (۱).

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} = I - O \quad (1)$$

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 منفصل می‌شود:

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

که در آن  $n$  و  $n+1$  دو زمان متوالی به فاصله  $\Delta t$  است. برای حل معادله فوق 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:

$$S = K[xI + (1-x)O] \quad (3)$$

در حالت غیرخطی، حجم ذخیره به صورت زیر است:

$$S = K[xI + (1-x)O]^m \quad (4)$$

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

$$O = \frac{1}{1-X} \left( \frac{S}{K} \right)^{\frac{1}{m}} - \left( \frac{X}{1-X} \right) I \quad (5)$$

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

$$\frac{ds}{dt} = \left( \frac{-1}{1-x} \right) \left( \frac{S}{K} \right)^{\frac{1}{m}} + \left( \frac{1}{1-x} \right) I \quad (6)$$

معادله (۶) یک معادله دیفرانسیلی مرتبه اول است که می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف عددی حل نمود. در این تحقیق از روش رانگ کاتای مرتبه چهارم به صورت زیر استفاده شده است (۱۵):

$$S^{n+1} = S^n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (7)$$

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- محاسبه  $S^n$  به ازای  $I = I^n$  و  $O = O^n$  از معادله (۴)

۲- محاسبه  $S^{n+1}$  از معادله ۷

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

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

روندیابی به روش موج دینامیکی و با کمک نرم‌افزار

#### HEC-RAS دو بعدی

با توجه به اینکه نرم‌افزار HEC-RAS روندیابی سیل را با حل معادلات سنت-ونانت انجام می‌دهد، این مطالعات از نتایج دقیقی برخوردار هستند. لذا از این نرم‌افزار برای تولید آبنمودهای خروجی استفاده شد. مراحل استخراج آبنمودهای

نرم افزار معرفی شد. در شکل ۳ نمونه ای از تصویر شبیه سازی جریان توسط نرم افزار HEC-RAS مشاهده می شود.

برای محاسبه میزان خطا، از مقادیر دبی آبنمودهای 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،  $N$  = تعداد داده ها است.

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

## نتایج و بحث

### نتایج روندیابی با استفاده از روش ماسکینگام غیرخطی

پس از انجام محاسبات با استفاده از کدنویسی در نرم افزار متلب، ضرائب معادله ماسکینگام غیرخطی با استفاده از اولین آبنمود 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 ضرائب آبنمودهای ورودی شماره ۲، ۳ و ۴ روندیابی و با آبنمودهای خروجی مشاهداتی آن ها مقایسه شد (شکل های ۴ تا ۶). با مقایسه مقادیر دبی آبنمودهای خروجی روندیابی شده و مشاهده شده، میزان خطای آن ها محاسبه و در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به این جدول درصد خطا برای همه آبنمودها کمتر از ۱۰ درصد بوده که نشان می دهد نتایج روش ماسکینگام غیرخطی قابل قبول است. همچنین جدول ۱ و شکل های ۴ تا ۶ نشان می دهد که با افزایش دبی آبنمود ورودی، درصد خطا نیز افزایش می یابد. بنابراین هرچه سیلاب بزرگ تر شود درصد خطا بیشتر می شود. در تحقیقی که توسط شایان نژاد و همکاران (۱۵) انجام گرفت این ضرائب برای رودخانه دو آب صمصامی واقع در غرب استان چهارمحال و بختیاری که از سر شاخه های اصلی رودخانه کارون است به دست آمد. برای رودخانه مذکور 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.

خروجی از روی آبنمود ورودی در ادامه توضیح داده می شود.

### گام ۱: تهیه رقوم ارتفاعی در بازه طرح

جهت تهیه خطوط تراز یک منطقه، داشتن رقوم ارتفاعی آن منطقه الزامیست. بدین منظور با استفاده از نقشه برداری داده های 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 جهت 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.

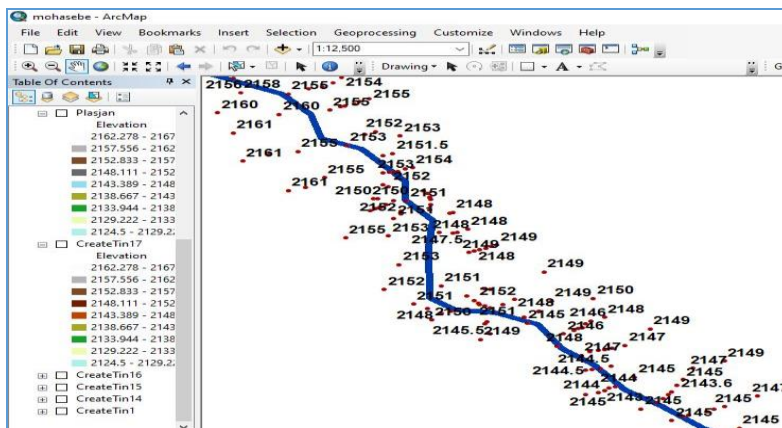
### گام ۴: اجرای فایل خطوط تراز در HEC-RAS

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

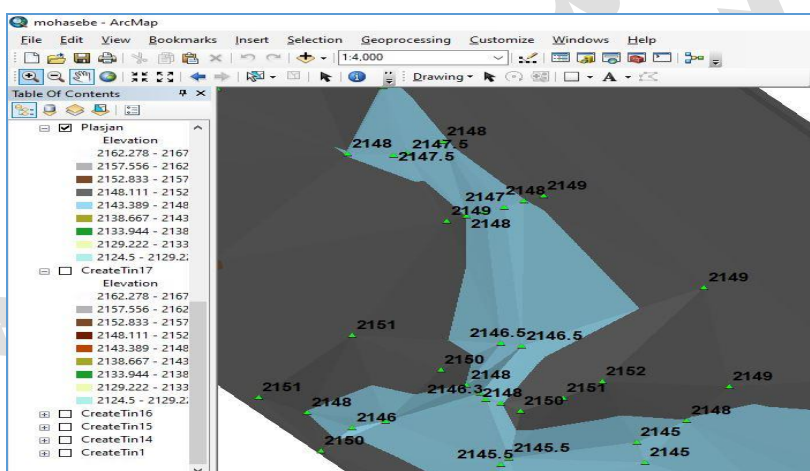
در مرحله بعد با استفاده از نوار ابزار RAS-MAPER فایل نهایی رقوم تراز فراخوانی شد. محیط ابزار RAS-MAPER برای استفاده از خطوط تراز به منظور شبیه سازی جریان آب در رودخانه مورد استفاده قرار می گیرد. از دیگر ویژگی های این نوار ابزار تحلیل مقطعی جریان در مسیر رودخانه است. بدین معنی که در هر نقطه می توان آبنمود جریان آب در آن مقطع و همچنین سطح جریان (A) و دبی لحظه ای را مشاهده کرد.

### گام ۵: ورود داده های آبنمود ورودی و به دست آوردن آبنمود خروجی

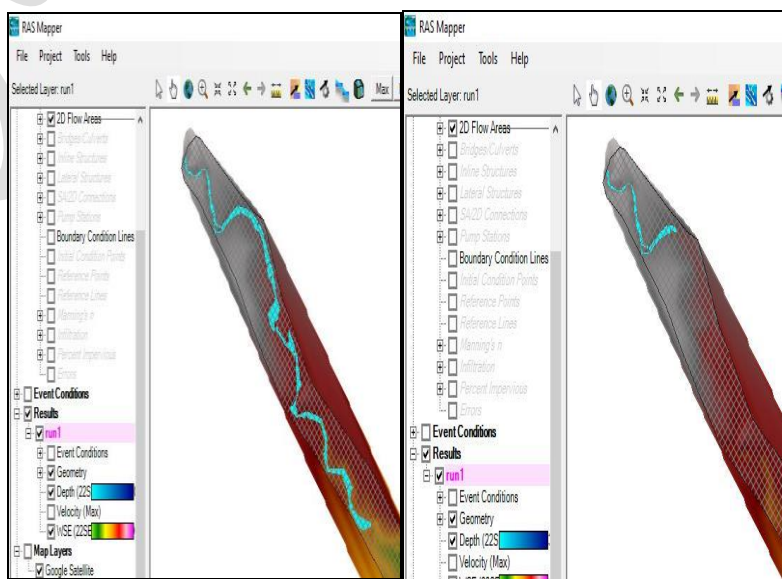
در این مرحله در قسمت EDIT و با کمک ابزار Unsteady Flow data آبنمود ورودی به نرم افزار معرفی شد. سپس در قسمت RUN سایر شرایط جهت اجرای برنامه به



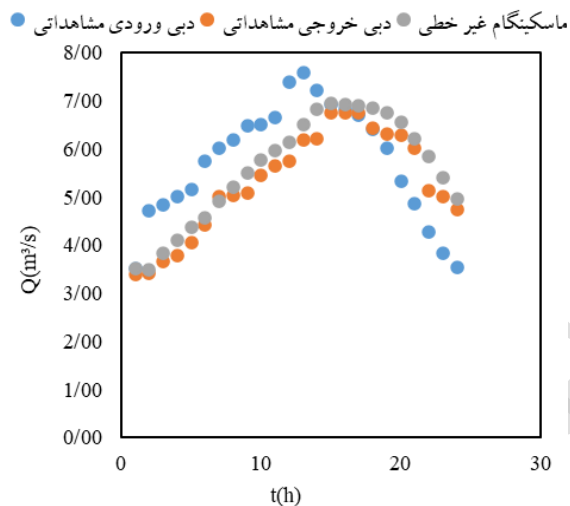
شکل ۱. انتقال رقوم ارتفاعی نقشه برداری شده در نرم‌افزار GIS



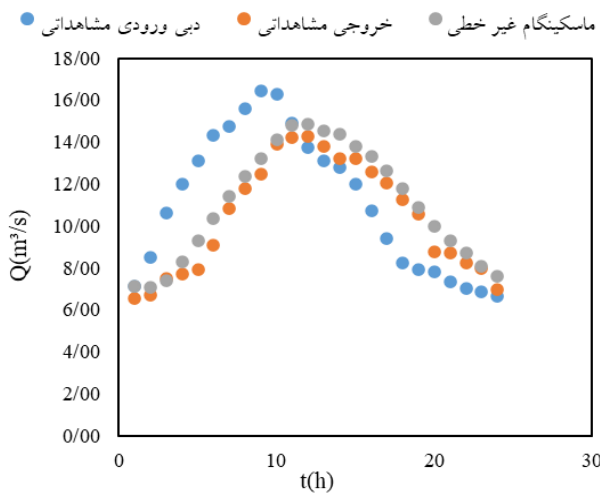
شکل ۲. تهیه نقشه تین در نرم‌افزار GIS



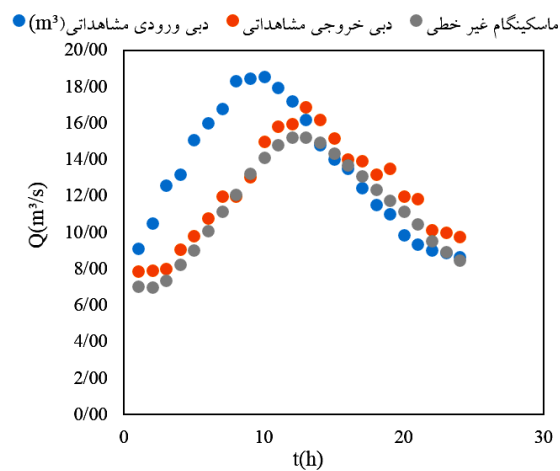
شکل ۳. نمونه ای از تصویر شبیه‌سازی جریان توسط نرم‌افزار HEC-RAS



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



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



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



جدول ۱. نتایج خطای روش ماسکینگام غیر خطی در روندیابی سه آبنمود

شماره آبنمود	جذر میانگین مربع خطا (متر مکعب 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 ذکر شود آن است که نقطه اوج آبنمود خروجی بر روی شاخه نزولی آبنمود ورودی قرار گرفته، و این نشان‌دهنده آن است که در زمان برخورد دو آبنمود با هم حداکثر ذخیره در رودخانه وجود داشته و بنابراین در این زمان دبی خروجی حداکثر است.

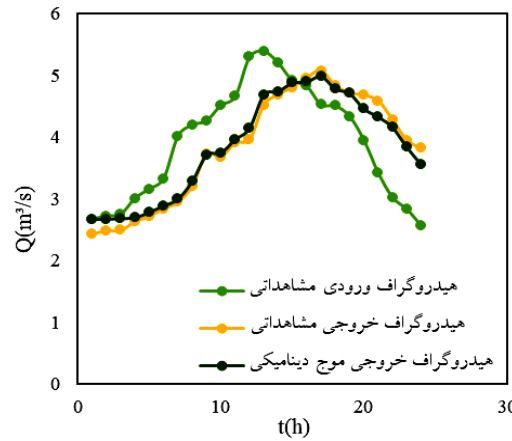
### نتیجه‌گیری

روش موج دینامیکی در انجام روندیابی و همچنین تخمین دبی اوج آبنمود پائین دست 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 به ازای سیلاب‌های بزرگ، توصیه می‌شود این روش برای سیلاب‌های با دبی اوج کمتر از ۳۰ متر مکعب در ثانیه استفاده شود، و برای دبی بزرگ‌تر با احتیاط بیشتری باید بکار برده شود. بطورکلی برای انتخاب روش مورد استفاده جهت روندیابی سیلاب و تخمین آبنمودهای خروجی یک رودخانه بایستی جنبه‌های فنی و اقتصادی مختلف یک طرح مورد بررسی

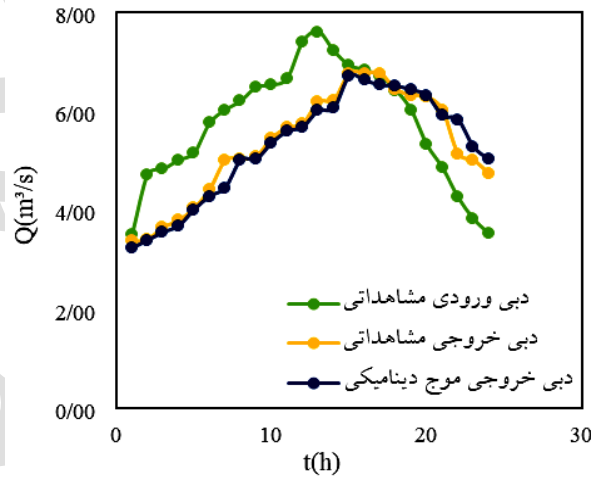
### نتایج روش موج دینامیکی با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS

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.

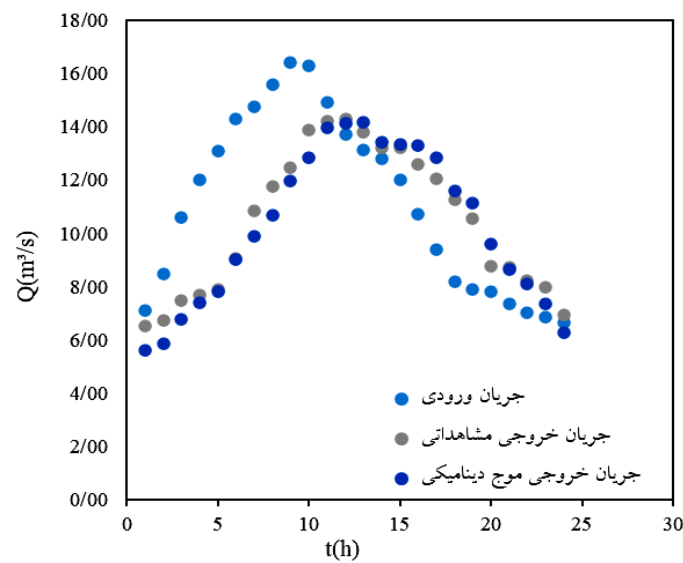
علاوه بر میزان خطای روندیابی دو روش، می‌توان دقت آن‌ها را در تخمین دبی اوج و زمان وقوع آن در آبنمودهای خروجی روندیابی شده مقایسه نمود. از شکل‌های ۴ تا ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت که خطای روش موج دینامیکی در محاسبه میزان و همچنین زمان وقوع دبی اوج کمتر از روش ماسکینگام غیرخطی است. علت دقت بیشتر مدل موج دینامیکی 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



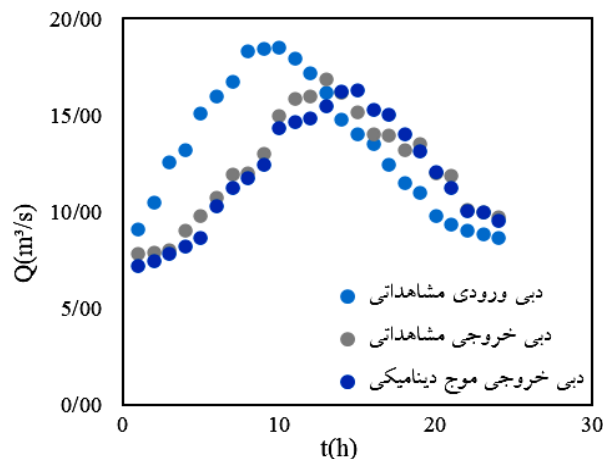
شکل ۷. مقایسه آبنمود خروجی شماره ۱ مشاهداتی و روندیابی شده به روش موج دینامیکی



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 (متر مکعب 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

تراز بستر جریان 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. به‌عنوان مثال در رودخانه زاینده رود زمانی که آب از بالادست باز می‌شود می‌توان زمان رسیدن به نقاط مختلف پائین دست و دبی قابل استحصال را محاسبه نمود.

قرار گیرد. اهداف مطالعات، 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. به‌عنوان مثال در صورت نداشتن آبنمودهای ورودی و خروجی از یک رودخانه نمی‌توان از روش ماسکینگام غیرخطی استفاده کرد. روش موج دینامیکی نیز با توجه به نیازمند بودن به اطلاعات هندسی یک رودخانه مانند خطوط

### منابع مورد استفاده

1. Akbari, N., M. Shayannejad, M. Madahi. 2016. River slope changes and its effect on Muskingum's nonlinear model coefficients using genetic algorithm. The second national hydrology conference of Iran. Shahrekord (In Persian).
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 Persian).
3. Alizadeh, A. 2017. Principles of applied hydrology. Astan Quds Razavi Publications. Mashhad (In Persian).

4. De Silva, M.M.G.T., S.B. Weerakoon, 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): 00-806.
5. Ghobadian, R., M. Zare, 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 Persian).
6. Jeslin, A.J., K.S. Sumam. 2021. Upstream flood hydrograph prediction of Chalakkudy River. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1114, No. 1, p. 012030). IOP Publishing.
7. Khalifeh, S., S. Khodashenas, 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 Persian).
8. Magdalena, I., R., Imawan, M. A., Nugroho. 2024. Numerical investigation for water flow in an irregular channel using Saint-Venant equation. *Journal of Saud University-Science*, 36, 103237.
9. Moslemi, H., A. J. abkar, 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 Persian).
10. Mousavi, S. F., M. Boustani, H. karami, 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 Persian).
11. Ogbonna, D., B. C. Okoro, 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, 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). Thomas Telford Ltd.
13. Rajabi, D., H. Karami, K. Hosseini, S. F. Mousavi, 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 Persian).
14. Sarvari, S., M. pourreza, Z. zaraatkar. 2020. Estimation of Runoff using Modified SCS Models. *Journal of Rainwater Catchment Systems* 7(4): 11-20 (In Persian).
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 Persian).
16. Shayannejad, M., N. Akbari, 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, 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, A. Keerti Chowdhary. 2019. Analysis of Flood Routing in Channels of Ban Sagar Project: A Case Study. Proceedings of Recent Advances in Interdisciplinary Trends in Engineering & Applications (RAITEA).
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 Persian).
20. Tawfic A. M. 2023. River flood routing using artificial neural networks. *Ain Sham Engineering Journal*, 14, 101904.
21. Tavasoli, A., A. hoseinnia, 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 Persian).
22. Wilson, E.M. 1990. *Engineering hydrology* (pp. 1-49). Macmillan Education UK.