

Extraction of an Analytical Solution for Flood Routing in the River Reaches (Case Study of Simineh River)

Jafar Chabokpour ^{1*}, Yaghoob Azhdan ²

1- Assistant Professor of Civil engineering Department, Faculty of Engineering, University of Maragheh.

2- Ph. D Graduate in Water Structures Engineering, Water Resources Engineer, Miandoab Township Office, Iran.

* j.chabokpour@maragheh.ac.ir

Received: 4 May 2020, Accepted: 29 July 2020  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Accurate flood routing through the river reaches is one of the essential issues in the river training activities and flood warning systems. Specially, when the river passes near residential areas of cities, it is vital to have enough information about the maximum flow that can flow through the river without damaging its surroundings. Due to the complexity of the complete solution process of Saint-Venant equations, over the years, many researchers have tried to provide alternative models that, in addition to simplicity, have the necessary accuracy. Previous models usually have two significant drawbacks. First, the process of solving most of them is step-by-step, and to calculate the outflow discharge at each time step, the estimated flow in the previous step is required. Second, sometimes the model coefficients change during the resolution process. Therefore, in the present study, an attempt was made to provide a clear and direct relationship. Also, if the coefficients are known for determining the flow rate in each time step, there is no need for the values of the previous steps.

Methodology: In order to prove the prevailing analytical relationship, in this research, first, the two processes of flood transfer and flood dispersion in the river reaches were conceptually separated. For this purpose, the river reach was divided into three interconnected reservoirs. The first reservoir is an index of the flood convection, and the next two reservoirs were the index of flood propagation process. The runoff volume which is obtained from the upper basin, was calculated using multiplying the runoff coefficient to the rainfall height. Then, it was suddenly applied to upstream of the river reach by using the Dirac delta function. By adding the spatial flow variation coefficient to the reservoirs of the propagation operation as well as applying the mass equilibrium and inclining the dimensions of the reservoirs to zero, the differential equations governing each reservoir were obtained. The outflow of each reservoir was used as the boundary condition of the next one, and the final equation, obtained from the interconnected reservoir system, was used as the output hydrograph relationship. In order to evaluate the performance of the introduced model, the data of four flood events that were recorded on (19 - 3 - 2017), (15 - 4 - 2017), (29 - 1 - 2019), and (31 - 3 - 2019) in Simineh River were used. Simineh River is located south of Lake Urmia and provides 11% of the lake's water. The flood data was recorded at three stations of BUCKAN Bridge, DASHBAND BUCKAN, and MIANDOAB Bridge with two-hours interval.

Results and discussion: The proposed model is a four-parameter model that works directly

by operation of its parameters. Therefore, firstly the model parameters were estimated and then the output hydrograph was simulated at the end of the river reach. The simulated hydrographs by the proposed model were consistent with the measured data at the end of the interval, indicating its efficiency. Statistical indicators of coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), and Nash-Sutcliffe (DC) were used to quantify the desirability of the model. The above-mentioned statistical parameters for all flood events were calculated as triple sets of (0.86, 0.07, 0.95), (0.82, 0.11, 0.8), (0.97, 0.07, 0.94), and (0.93, 0.1, 0.9), respectively which also proves its quantitative suitability. By creating linear relationships between the residence times of the flood in each of the interconnected reservoirs, the relevant volumes were calculated. It was also found that the length of each reservoir can be calculated separately by applying a mean cross-sectional area in the river reach. The flood volume was calculated to be 30, 50, 63 and 37 million cubic meters for events of 1 to 4, respectively. This value is equal to the total volume of the assumed reservoirs in the river reach. Ratio (V/T) (V is the flood volume, and T is the sum of flood residence time in the connected reservoir system) was calculated for all reach lengths and flood events. It was found that its value decreases with the increasing of reach length, but its value for larger floods is higher than for smaller ones. Besides, it was found that the position of the dispersion reservoirs in the river reach can be exchanged with each other, and the total volume of them is the diffusion index.

Conclusion: It was observed that the proposed model has good compatibility with observational hydrographs, except in the initial points of raising limb. Optimization or numerical methods can also be used to obtain model parameters. Moreover, the explicitness and directness of the discharge calculation by this method is the most crucial advantage of this model. This model also has the capability of reconstructing hydrographs affected by the spatially varied flow.

Keywords: Flood Routing, Spatially Varied Flow, Analytical model, Mechanism Separation.



© 2020 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

روندیابی سیلاب در بازه‌های رودخانه‌ای بر مبنای استخراج یک رابطه تحلیلی جدید (مطالعه موردی رودخانه سیمینه‌رود)

جعفر چابک‌پور^{۱*}، یعقوب آژدان^۲

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه مراغه.

۲- دانش آموخته دکتری سازه‌های آبی، کارشناس امور منابع آب شهرستان میاندوآب.

*j.chabokpour@maragheh.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۵، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۸  وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: به دلیل پیچیدگی‌های موجود در فرآیند حل کامل معادله‌های سنت-ونانت برای روندیابی سیلاب، محققان مختلفی در این زمینه پژوهش نموده و سعی کرده‌اند تا روش‌های ساده‌تر و با دقت قابل قبولی را ارائه دهند. در این تحقیق سعی شد تا بر مبنای جداسازی فرآیندهای انتقال و انتشار موج سیلاب از همدیگر و همچنین اعمال مفهوم مخزن‌های هیبریدی، یک رابطه جدید تحلیلی که با استفاده از فراسنجه‌های خود و حجم سیلاب خروجی از حوضه آبریز مدل‌سازی حرکت موج سیلاب را انجام می‌کند، ارائه شود. رابطه استخراجی دارای فراسنجه تغییرپذیری‌های مکانی سیلاب نیز است که می‌تواند تغییرات مکانی حجم جریان عبوری از بازه رودخانه (افزایش جریان به دلیل اضافه شدن شاخه‌های فرعی و یا کاهش جریان به دلیل برداشت جریان از بازه رودخانه) را مدل‌سازی کند. مدل تحلیلی ارائه شده در حالت کلی یک مدل چهار فراسنجه‌ای است که با مشخص بودن میزان آن‌ها، می‌تواند به صورت صریح مقادیر سیلاب خروجی را محاسبه نماید. به منظور آزمون کارایی مدل تحلیلی استخراج شده، از چهار سیلاب که در سال‌های ۹۵، ۹۶، ۹۷ و ۹۸ در رودخانه سیمینه‌رود رخ داده بود استفاده شد و نتایج نشان‌دهنده شبیه‌سازی مطلوب موج سیلاب در این بازه‌ها توسط مدل بود. نکوئی برازش شبیه‌سازی مدل با محاسبه فراسنجه‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص نش-ساتکلیف (DC) به ترتیب به صورت مجموعه‌های سه‌تایی (۰/۸۶، ۰/۰۷، ۰/۹۵)، (۰/۸۲، ۰/۱۱، ۰/۸) و (۰/۹۷، ۰/۰۷، ۰/۹۴) و (۰/۹۳، ۰/۱، ۰/۹) برای سیلاب‌های سال‌های ۹۵ تا ۹۸ به اثبات رسید. افزون بر آن، میزان مربوط به احجام توزیع شده و زمان ایستائی سیلاب در مخزن‌های به هم پیوسته نیز محاسبه و مشاهده شد که در حالت کلی با افزایش طول بازه رودخانه، مقدار مجموع زمان ایستائی سیلاب در مخزن‌های به هم پیوسته افزایش یافته ولی نسبت (V/T) کاهش می‌یابد. در این نسبت V نشان‌دهنده حجم سیلاب ورودی به بازه رودخانه بوده و T نیز مبین زمان کل ایستائی سیلاب در سامانه سه مخزنی به هم پیوسته در مدل است.

کلید واژگان: روندیابی سیلاب، جریان متغیر مکانی، مدل تحلیلی، جداسازی فرآیندها

۱- مقدمه

هیدروگراف رودخانه در مقطع‌های مختلف رودخانه با استفاده از روش‌های روندیابی سیلاب از اقدام‌های ضروری است که برای به کمترین رساندن آسیب و زیان‌های ناشی از سیل انجام می‌گیرد (Safavi, 2011). در سده نوزدهم تحقیقات زیادی برای استفاده از روش‌های ریاضی در روندیابی سیل انجام گرفت. معادله‌های سنت-ونانت نخستین بار توسط باری سنت-ونانت در سال ۱۸۷۱ توسعه یافت که جریان یک بعدی غیردایمی را در آبراه‌ها تشریح

یکی از مسنله‌های مهم و بنیادی در مهندسی رودخانه، مدیریت سیلاب‌های رودخانه‌ای می‌باشد. سیلاب‌های رودخانه‌ای ممکن است پیامدهای زیانباری را در منطقه‌های شهری، صنعتی و کشاورزی داشته باشد. برای جلوگیری از پیامدهای ویرانگر و زیانبار سیل، شناخت ویژگی‌های سیل، به ویژه میزان دبی اوج آن بسیار مهم است. پیش‌بینی چگونگی طغیان و فروکش سیل یا صعود و نزول آب‌نگار

زمینه انجام شده است. بر مبنای آنچه در بالا اشاره شد، به شماری از بررسی‌هایی که در زمینه‌های مختلف انجام شده است به صورت زیر می‌توان اشاره کرد.

- مدل‌های هیدرولوژیکی

مدل‌های ماسکینگام خطی و غیرخطی مهم‌ترین و شناخته‌ترین روش‌های هیدرولوژیکی می‌باشند. مدل ماسکینگام بر مبنای عبور حجم ثابتی از جریان در یک بازه واحد رودخانه‌ای با استفاده از مفهوم‌هایی مانند ذخیره‌های منشوری و تیغه‌ای استخراج شده است. (Koussis (2009 بررسی‌های زیادی در زمینه چگونگی استخراج فراسنجه‌های مدل خطی و غیرخطی انجام داد و نتیجه‌گیری کرد که عدم قطعیت زیادی در زمینه این فراسنجه‌ها وجود دارد.

(Fotuhi and Maghrebi (2011 به مقایسه روش روندیابی دینامیکی و روش ماسکینگام-کونژ با فراسنجه‌های ثابت و متغیر پرداختند. نتایج بررسی آنان نشان داد که اختلاف دو روش در شیب‌های کم بیشتر بوده، لذا لازم است در کاربرد روش ماسکینگام-کونژ در شیب‌های کم احتیاط شود. آنان با انجام آنالیز حساسیت روی فراسنجه‌های مدل موج دینامیکی نتیجه‌گیری کردند که مهم‌ترین عامل‌های موثر روی دبی اوج هیدروگراف خروجی به ترتیب شامل دبی اوج آب‌نگار ورودی، ضریب زبری و شیب بستر کانال می‌باشد. همچنین فراسنجه‌های مهم و موثر بر زمان رخداد دبی اوج آب‌نگار خروجی به ترتیب شامل هندسه آبراهه و ضریب زبری هستند.

(Akbari et al. (2011 به منظور بررسی قابلیت کاربرد شما-های مختلف روش ماسکینگام-کونژ در شرایط میدانی به روندیابی شماری سیل مشاهده‌ای از رودخانه کارون پرداخته و نتایج حاصل از آن‌ها را با مقادیر مشاهده‌ای پایین دست و همچنین نتایج حاصل از مدل موج دینامیکی مقایسه کردند. نتایج تحقیق آنان نشان داد که شماهای مورد بررسی اغلب خروجی قابل قبولی در مقایسه با آب‌نگار مشاهده‌ای از خود نشان می‌دهند. همچنین اختلاف بین نتایج این شماها قابل توجه نمی‌باشد، بعلاوه نتایج محاسبه شده توسط روش‌های مورد بررسی به طور قابل قبولی

و مدل‌سازی می‌کند (Patricia and Raimundo, 2005). در حالت کلی روش‌های روندیابی سیلاب به دو گروه عمده روش‌های هیدرولوژیکی و روش‌های هیدرولیکی طبقه‌بندی می‌شوند. روش‌های هیدرولیکی بر مبنای بقای جرم و ارتباط آن با دخیره جریان در بازه رودخانه بوده ولی روش‌های هیدرولیکی بر مبنای حل معادله‌های پیوستگی و مومنتم استوار است. روش ماسکینگام در هر دو نوع خطی و غیرخطی خود به عنوان یک روش هیدرولوژیکی شناخته شده و روش موج دینامیک نیز به عنوان کلی‌ترین حالت معادله‌های سنت-ونانت بوده و از روش‌های هیدرولیکی به شمار می‌آید. البته با توجه به میزان ساده‌سازی انجام شده در معادله‌های سنت-ونانت، روش‌های دیگری نیز در میان روش‌های هیدرولیکی استخراج شده‌اند. افزون بر این دو گروه شناخته شده، معادله‌های انتقال-انتشار نیز برای روندیابی جریان گاهی استفاده می‌شود که نسبت به روش‌های دیگر، کمتر شناخته شده است. این معادله‌ها بیشتر در زمینه انتقال و انتشار آلاینده‌ها استفاده می‌شوند ولی به دلیل شباهت شکل آب‌نگار جریان به منحنی‌های رخنه آلودگی، می‌توان از این روش‌ها نیز استفاده کرد (Fenton, 2019).

شماری از تحقیقات بر مبنای روش‌های حل کامل معادله‌های پیوستگی و مومنتم متمرکز شده و شمار دیگری نیز بر روش‌های برآورد فراسنجه‌های مدل‌های مختلف توجه نموده‌اند. افزون بر آن، شماری از این روش‌ها بر مبنای محاسبه جریان در گام‌های زمانی مختلف و گروه دیگری از آن‌ها نیز بر مبنای محاسبه عمق جریان در گام‌های مختلف زمانی استوار شده‌اند و به دلیل اینکه محاسبه عمق جریان در موقعیت‌های مختلف از دیدگاه ساماندهی رودخانه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد، لذا روش حل بر مبنای عمق جریان، اهمیت بیشتری دارد ولی به دلیل ضعف اطلاعات هندسی رودخانه‌ها در قسمت‌های مختلف، این روش‌ها کمتر توسعه پیدا کرده‌اند (Bhabagrahi et al., 2019). افزون بر بحث‌های یاد شده، برآورد دقیق و ساده فراسنجه‌های روش‌های مختلف ارائه شده در این زمینه نیز اهمیت زیادی دارد که در سال‌های اخیر با توسعه محاسبات نرم و روش‌های هوش مصنوعی تحقیقات جدیدی در این

مختلف ارائه شده با ساده‌سازی‌های انجام شده در بخش‌های مختلف آن ارائه شده‌اند. فرآیند انتقال سیلاب در یک بازه رودخانه یک فرآیند غیرخطی است، محققان مختلف سعی کردند که با استفاده از روش‌های دیگر و ساده‌تری، روند غیرخطی عبور سیلاب از بازه رودخانه را تبدیل به روش‌های ساده‌تر خطی کنند.

مدل‌های چندسلولی توسط (Perumal (1994 به عنوان یک روش جایگزین برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی موج سیلاب در مجاری مستطیلی ارائه شده که شامل دو فراسنجه است. (Camacho and Lees (1999 با اضافه کردن فراسنجه زمان تاخیر به این مدل و تبدیل آن به یک مدل سه فراسنجه‌ای، توسعه بیشتری روی آن انجام داد و نام مدل به مدل چندسلولی تاخیری تغییر پیدا کرد. بعدها مشخص شد که آب‌نگارهای روندیابی شده توسط این مدل در پیرامون نقطه اوج آب‌نگار گاهی دارای نوسان می‌باشند. مدل‌های چندسلولی بر مبنای تقسیم آب‌نگار ورودی با مشخصه‌های دینامیکی و غیرخطی به چندین بخش خطی است که ترکیب آن‌ها قادر به بازسازی رفتار غیرخطی آب‌نگار را دارد. در مرحله‌های اولیه توسعه این نوع مدل‌ها بخش‌های مختلف آب‌نگار ورودی جریان به شماری المان عمودی تقسیم‌بندی شده و هرکدام به صورت جداگانه درون بازه رودخانه روندیابی شدند. در نهایت ترکیب این المان‌های روندیابی شده باعث تشکیل آب‌نگار خروجی از بازه رودخانه می‌شود (Perumal et al., 2007). همچنین بر مبنای نحوه تقسیم‌بندی المان‌های آب‌نگارهای ورودی به صورت افقی و یا عمودی، روش‌های چندسلولی به دو گروه عمده روش‌های مبتنی بر دامنه و روش‌های مبتنی بر زمان تقسیم می‌شوند (Keefer and McQuivey, 1974; Becker 1976; Becker and Kundzewicz, 1987). در روش چندسلولی ماسکینگام که توسط (Perumal 1992, 1994) ارائه شد، فراسنجه‌های مدل با تغییر زمان روندیابی تغییر می‌کنند و نتیجه امر منجر به ارائه روش روندیابی با پارامترهای متغیر گردید که در هر لحظه از زمان، اول فراسنجه‌های جدید محاسبه شده و سپس المان دبی ورودی به تنهائی روندیابی می‌شود. البته استفاده از روش‌های روندیابی با فراسنجه‌های متغیر در سامانه‌های هشدار سیل و یا بازه‌های شامل تجهیزات

همانند روش موج دینامیکی می‌باشد. آنان با تحلیل حساسیت ابعاد شبکه محاسباتی، نتیجه‌گیری کردند که اثرات تغییر گام زمانی نسبت به تغییر گام مکانی روی نتایج خروجی مدل‌ها بیشتر می‌باشد.

(Bazargan and Norouzi 2018) سیل ورودی را به سه ناحیه آغاز، اوج و پایانی تقسیم کرده و برای هر ناحیه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) میزان‌های متفاوتی برای فراسنجه‌های روش ماسکینگام خطی ارائه کردند.

(Norouzi and Bazrgan (2019 با استفاده از روش ماسکینگام خطی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) به جای محاسبه آب‌نگار خروجی (پایین‌دست)، تغییرات عمق آب خروجی (پایین دست) نسبت به زمان در حداقل ایستگاه‌های هیدرومتری ملاثانی (بالادست) و اهواز (پایین دست) رودخانه کارون را محاسبه کردند. روش ارائه شده توسط آنان علاوه بر برخورداری از دقت مناسب در مقایسه با روش‌های هیدرولیکی، ساده‌تر و کم هزینه‌تر اعلام شد.

(Bayrami et al. (2019 مدل جدیدی بر مبنای رابطه ماسکینگام ارائه کردند که در آن از معادله خطی ذخیره و معادله دیفرانسیل پیوستگی از مرتبه کسری استفاده شده است. آنان با مدل جدید هم سیلاب‌هایی با رفتار خطی و غیرخطی را شبیه‌سازی کردند. مدل پیشنهادی ماسکینگام از مرتبه کسری برای سه مجموعه از داده‌های سیل اجرا و آزمون شد. نتایج شبیه‌سازی آنان با مدل ماسکینگام پیشنهادی منجر به بهبود نتایج شده و ویژگی‌های موج سیلاب را در مقایسه با مدل‌های سنتی ماسکینگام بهتر برآورد می‌کند. با این وجود هنوز مسائل زیادی وجود دارد که در فرآیند مدل‌سازی لحاظ نشده‌اند و فرضیه‌هایی مانند فرض توزیع هیدرواستاتیکی فشار، نحوه محاسبه ضریب زبری جریان و ... هنوز محل بحث هستند که به طور معمول از روی منحنی‌های دبی-اشل محاسبه می‌شوند.

- مدل‌های هیدرولیکی

مبنای همه مدل‌های هیدرولیکی ارائه شده به نوعی وابسته به معادله‌های یک‌بعدی موج طویل است و روش‌های

پپیچیدگی‌های حاکم از لحاظ زمانی و هزینه‌ای در حل کامل معادله‌های سنت-ونانت است. با تمرکز بر این هدف‌ها، در این پژوهش بر مبنای توزیع آنی حجم سیلاب به‌دست آمده از حوضه آبریز (که معمولاً با استفاده از اعمال ضریب رواناب در عمق بارش به‌دست می‌آید) در بالادست بازه رودخانه‌های مورد بررسی، سعی در ارائه یک رابطه تحلیلی گردید. در عین حال سعی شد تا روش ارائه شده به صورت گام به گام نبوده و به صورت مستقیم به محاسبه دبی خروجی از بازه رودخانه در گام زمانی مدنظر بپردازد. افزون بر آن در مدل مفهومی در نظر گرفته شده، سعی شد تا تغییرات مکانی دبی سیلاب نیز لحاظ شود. مدل ارائه شده در این پژوهش بر مبنای تشابه آب‌نگار سیلاب با منحنی‌های غلظت-زمان آلاینده استخراج شده است و بر مبنای تقسیم بازه رودخانه به چندین مخزن به هم پیوسته که هر کدام از آن‌ها وظیفه خاصی اعم از انتقال و یا انتشار سیلاب در بازه رودخانه استخراج شده است. معادله استخراج شده برای مدل یادشده، به لحاظ فیزیکی توانائی لازم برای شبیه‌سازی آب‌نگار سیلاب را نیز دارد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- استخراج معادله تحلیلی

در این پژوهش، با استفاده از حجم رواناب به‌دست آمده از حوضه آبریز و توزیع آن در بازه رودخانه‌ای بر مبنای مدل مخزن‌های به هم پیوسته، دو معادله دیفرانسیل حاصل شده و پس از حل آن‌ها، معادله تحلیلی روندیابی سیلاب به‌دست می‌آید. سیستم چند مخزنی استفاده شده در آغاز توسط (Ghosh et al. 2004, 2008) بر مبنای انتقال آلاینده‌ها در بازه‌های رودخانه‌ای استفاده شد و بعداً توسط (Chabokpour 2019) برای انتقال املاح در مصالح لایه‌ای نیز استفاده شد. در این روش، دو عمل انتقال و انتشار سیلاب به صورت جداگانه در مخزن‌های جدا از یک واحد طولی از بازه رودخانه انجام می‌شود. یک مخزن برای شبیه‌سازی عمل انتقال سیلاب در بازه رودخانه و دو مخزن برای شبیه‌سازی عمل انتشار سیلاب در بازه رودخانه در نظر گرفته می‌شود. افزون بر آن، به منظور شبیه‌سازی تغییرپذیری‌های مکانی دبی در بازه رودخانه به واسطه ورود

اتوماتیک کنترل جریان و سطح آب مطلوب نیست و اکثر محققان استفاده از روش‌های با فراسنجه‌های ثابت را کارا تر می‌دانند. به منظور مدل‌سازی حرکت موج سیلاب در بازه‌های رودخانه‌های، روش‌های جایگزین زیادی که بیشتر آن‌ها از دقت مطلوبی نیز برخوردار هستند، ارائه شده است (Romanowicz et al., 2006). همانطوری که پیشتر اشاره شد، روش‌های مختلف روندیابی جریان در رودخانه‌ها، هم بر مبنای محاسبه جریان و هم بر مبنای محاسبه ارتفاع جریان در نقطه‌های مختلف ارائه شده‌اند. در بسیاری از بخش‌های بازه‌های رودخانه‌ای، برای انجام عملیات ساماندهی رودخانه‌ای و یا در سامانه‌های پیش‌بینی سیلاب، محاسبه ارتفاع جریان مهم‌تر از میزان عددی دبی جریان است (Cimorelli et al., 2018). البته در صورتی که رابطه‌ها یا منحنی‌های دبی-اشل در محل‌های مورد نظر بازه رودخانه‌ای وجود داشته باشد، تبدیل ارتفاع جریان به مقادیر دبی ممکن است ولی به دلیل اینکه استخراج این رابطه‌ها و یا منحنی‌ها نیازمند اندازه‌گیری‌های قبلی است، در بسیاری از مواقع، این منحنی‌ها و رابطه‌های در دسترس نیستند (Spada et al., 2017).

افزون بر موارد یادشده، مدل‌های داده‌محور مبتنی بر تشابه شکلی آب‌نگارهای سیلاب با منحنی‌های رخنه آلاینده نیز در زمینه پیش‌بینی سیلاب رودخانه‌ها استفاده شده و کارائی بسیار مطلوبی از خود نشان داده‌اند ولی متأسفانه این مدل‌ها بر مبنای فراسنجه‌های فیزیکی و هندسی بازه‌های رودخانه‌ای استوار نبوده و تفسیر فراسنجه‌های آن‌ها دشوار است (Chabokpour and Zabihi, 2019).

با دقت در نتایج بررسی‌های پیشین چنین دریافت می‌شود که دستیابی به روش‌هایی با دقت کافی و در عین حال ساده‌تر از حل کامل معادله‌های سنت-ونانت، از دیرباز مورد توجه مهندسان هیدرولیک و هیدرولوژیست‌ها بوده است. به طور کلی محققان پیشین سعی در حل دو مشکل داشتند نخست اینکه از حل کامل معادله‌های سنت-ونانت پرهیز کنند و همچنین روش‌هایی را ارائه دهند تا وابسته به گام‌های زمانی پیشین نباشد. به بیان دیگر تمرکز برای ارائه روش‌های ساده‌تر و در عین حال با دقت قابل قبول بیشتر بر مبنای کمبود اطلاعات هندسی رودخانه‌ها و در پی آن

که در آن γ برابر با زمان ایستائی سیلاب در مخزن انتقالی می‌باشد. با اعمال جریان خروجی از مخزن اول به عنوان جریان ورودی به مخزن دوم و همچنین میل دادن ابعاد مخزن به سمت صفر، معادله دیفرانسیل (۱) به دست می‌آید.

$$\frac{dQ_1(t)}{dt} + Q_1(t) \left(\frac{1}{T_1} + \varphi \right) = \frac{V \times \text{Dirac}(t - \gamma)}{T_1} \quad (1)$$

که در رابطه بالا، $Q_1(t)$ دبی لحظه‌ای در مخزن انتشاری اول، T_1 زمان ایستائی سیلاب در مخزن انتشاری اول و φ ضریب تغییرپذیری‌های مکانی به دلیل افزایش و یا کاهش مکانی جریان در سلول اول است.

رابطه بالا با اعمال شرط اولیه جریان پایه‌ای بازه رودخانه به صورت $Q_1(\gamma) = Q_b$ که در آن Q_b جریان پایه‌ای سیلاب در بازه رودخانه می‌باشد، معادله‌های دیفرانسیل بالا حل شده و جواب آن به صورت رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$Q_1(t) = \left(\frac{V \times \text{Heaviside}(t - \gamma) e^{\frac{\gamma(T_1\varphi+1)}{T_1}}}{T_1} + \frac{Q_b}{e^{-\frac{\gamma(T_1\varphi+1)}{T_1}}} \right) e^{-\frac{t(T_1\varphi+1)}{T_1}} \quad (2)$$

رابطه به دست آمده به عنوان ورودی به مخزن انتشاری دوم اعمال شده و معادله دیفرانسیل حاکم بر آن به صورت رابطه (۳) تشکیل می‌شود.

$$\frac{dQ_2(t)}{dt} + Q_2(t) \left(\frac{1}{T_2} + \varphi \right) = \frac{\left(\frac{V \times \text{Heaviside}(t - \gamma) e^{\frac{\gamma(T_1\varphi+1)}{T_1}}}{T_1} + \frac{Q_b}{e^{-\frac{\gamma(T_1\varphi+1)}{T_1}}} \right) e^{-\frac{t(T_1\varphi+1)}{T_1}}}{T_2} \quad (3)$$

رودخانه جدا کرده و میزان آن برابر با صفر فرض می‌شود ($Q_b = 0$) و در نهایت پس از ساده‌سازی رابطه (۴) بدست می‌آید. جزئیات بیشتری در زمینه استخراج رابطه (۴) در پیوست (۱) ارائه شده است.

رابطه (۴) برای محاسبه آب‌نگار خروجی از بازه رودخانه با مشخص بودن چهار فراسنجه زمانی مشخصه بازه رودخانه می‌تواند استفاده شود. با علم به اینکه حجم کل سیلاب

و یا خروج سیلاب از آن، ضریب تغییرپذیری‌های مکانی در نظر گرفته می‌شود. این ضریب در صورت اضافه شدن سیلاب به بازه رودخانه‌ای دارای مقدار منفی و در صورت برداشت جریان از آن مقدار مثبت خواهد داشت. نمای کلی مدل مخزن‌های به هم پیوسته برابر با شکل (۱) است. قابل ذکر است که به منظور استخراج معادله‌های دیفرانسیل حاکم بر مخزن‌ها، ابتدا بقای حجم سیلاب در هر سلول لحاظ شده و در سلول‌های انتشاری نیز با اعمال جریان متغیر مکانی معادله‌های حاکم استخراج می‌شود. در نهایت با فرض کوچک بودن ابعاد مخزن‌ها، شکل دیفرانسیلی آن‌ها استخراج می‌شود. افزون بر آن، در فرآیند حل معادله‌های مربوط به هر مخزن، جریان خروجی از هر مخزن به عنوان جریان ورودی به مخزن مجاور لحاظ می‌شود.

برابر با شکل (۱)، با اعمال حجمی از سیلاب به میزان V که از حوضه آبریز خارج شده است به نخستین مخزن و همچنین استفاده از تابع Dirac، می‌توان گفت که خروجی جریان از مخزن اول برابر با $V \times \text{Dirac}(t - \gamma)$ خواهد بود

که در رابطه بالا Heaviside برابر با تابع پله‌ای بوده و از انتگرال‌گیری از تابع Dirac به دست آمده است.

که در آن T_2 زمان ایستائی سیلاب در مخزن انتشاری دوم بوده و $Q_2(t)$ تغییرپذیری‌های دبی خروجی از بازه رودخانه می‌باشد. بقیه فراسنجه‌ها هم قبلاً معرفی شده‌اند. معادله (۳) نیز با اعمال شرایط اولیه $Q_2(\gamma) = Q_b$ حل شده و نتیجه نهائی که معادله آب‌نگار خروجی از بازه رودخانه می‌باشد به دست می‌آید، به منظور ساده‌سازی بیشتر، در رابطه نهائی به دست آمده، آب‌نگار سیلاب را از دبی پایه بازه

$$Q_2(t) = \frac{V \times \text{Heaviside}(t - \gamma) e^{-\frac{t(T_2\phi+1)}{T_2}} \left(-e^{\frac{\gamma(T_2\phi+1)}{T_2}} + e^{\frac{tT_1+T_2(T_1\phi\gamma+\gamma-t)}{T_1T_2}} \right)}{T_1 - T_2} \quad (4)$$

مخزن را محاسبه کرد. به عنوان مثال حجم کل مخزن‌ها که برابر با حجم کل سیلاب می‌باشد برابر است با $V = L \times A$ است. بنابراین می‌توان گفت که با فرض عرض مقطع متوسط و عمق متوسط جریان در بازه رودخانه، احجام مربوطه از رابطه‌های (۵) تا (۸) قابل محاسبه خواهد بود.

$$V_\gamma = L_\gamma \times A \quad (5)$$

$$V_1 = L_1 \times A \quad (6)$$

$$V_2 = L_2 \times A \quad (7)$$

$$V_\phi = L_\phi \times A \quad (8)$$

خروجی از حوضه آبریز برابر با V است و زمان ایستائی این حجم از سیلاب در مخزن‌های به هم پیوسته مدل (هر کدام از آن‌ها در بازه رودخانه می‌توانند یک مخزن جدا باشند) برابر با $T = \gamma + T_1 + T_2 + \frac{1}{\phi}$ است. بنابراین می‌توان با استفاده از نسبت $\left(\frac{V}{T} = \frac{V_\gamma}{\gamma} = \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \frac{V_\phi}{\frac{1}{\phi}}\right)$ حجم هر کدام از مخزن‌های به هم پیوسته در بازه رودخانه را محاسبه نموده و همچنین با فرض مساحت مقطع عبوری جریان همسان در همه‌ی سلول‌ها، احجام مربوط به هر

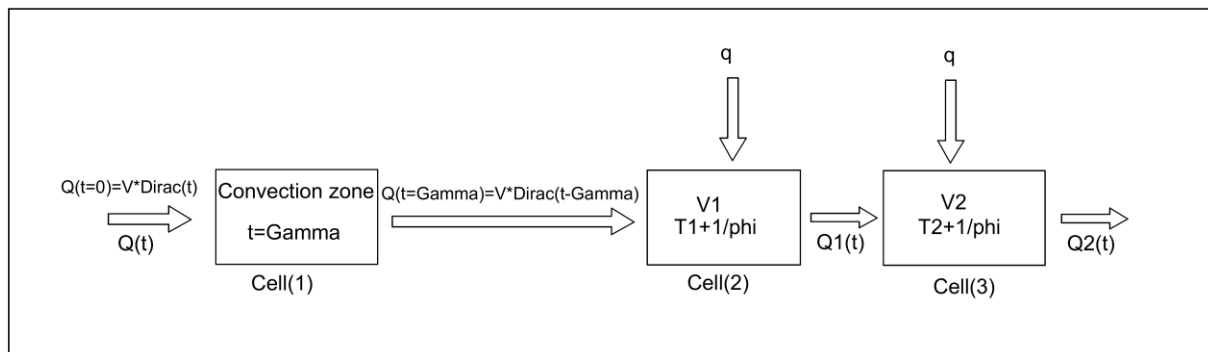


Fig. 1 schematic of the conceptual model for derivation of the mathematical model

شکل ۱ نمای کلی مدل سلولی استفاده شده برای استخراج مدل تحلیلی

ارتفاعی محدوده مطالعاتی سیمینه‌رود نیز برابر با شکل (۲) - (b) است (Sarkeshi, 2018).

داده‌های سیلاب استفاده شده در این پژوهش مربوط به چهار رخداد سیلاب در تاریخ‌های ۱۳۹۵/۱۲/۲۹، ۱۳۹۶/۰۱/۲۶، ۱۳۹۷/۱۱/۰۹ و ۱۳۹۸/۱۱/۱۱ می‌باشد که همگی تحت تاثیر بارش باران در ارتفاعات بالادست ایجاد شده‌اند. در روند بررسی‌ها، به منظور تدقیق کارکرد مدل ریاضی استفاده شده، در آغاز دبی پایه به صورت مقدار ثابت فصلی از آب‌نگارها کسر شده و تنها آب‌نگارهای سیلاب‌ها بررسی شدند. در طول این سیلاب‌ها، مقادیر دبی جریان در فواصل دو ساعته به ترتیب در ایستگاه‌های پل بوکان، داشبند بوکان و پل میاندوآب اندازه‌گیری شده‌اند (شکل ۲- c). در بخش بعدی، آب‌نگارهای سیلاب اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های یاد شده نمایش داده شده‌اند.

۲-۲- موقعیت محدوده مورد بررسی و بازه‌های رودخانه سیمینه‌رود

رودخانه سیمینه رود از کوهستان‌های منطقه‌های سقز، بانه و کردستان عراق سرچشمه گرفته و از شهرستان‌های بوکان و میاندوآب عبور کرده و زمین‌های کشاورزی در محدوده شهرستان میاندوآب را آبیاری می‌کند و در نهایت از سمت جنوب وارد دریاچه می‌شود. گستره حوضه آبریز این رودخانه ۴۰۰۰ کیلومترمربع می‌باشد. این رودخانه ۱۱٪ از آب دریاچه ارومیه را تامین می‌کند موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز رودخانه‌های زرينه رود و سیمینه رود، مسیر این دو رودخانه و رودخانه‌های منتهی به این دو رودخانه‌ها در شکل (۲- a) نشان داده شده است. محدوده مورد بررسی بر مبنای شرایط توپوگرافی نیز از روی نقشه مدل ارتفاعی منطقه به زیرحوضه‌های کوچکتر تقسیم شده است. مدل

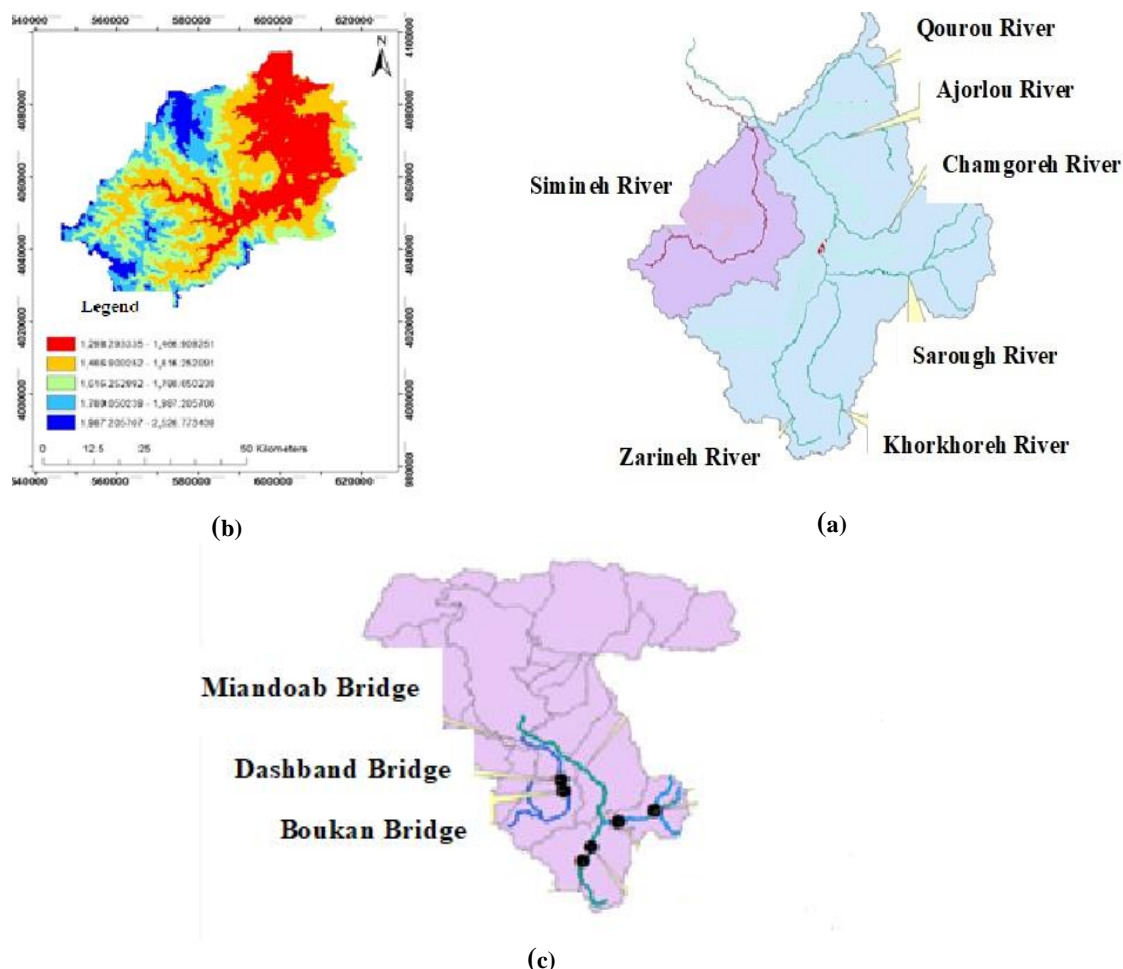


Fig. 2 (a) Location of Simineh River at south of lake Urmia, (b) Digital terrain model of Simineh basin, and (c) Location of hydrometric stations

شکل ۲. (a) موقعیت جغرافیایی رودخانه سیمینه رود در جنوب دریاچه ارومیه، (b) نقشه مدل ارتفاعی زیرحوضه سیمینه رود، (c) موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری در روی رودخانه سیمینه رود

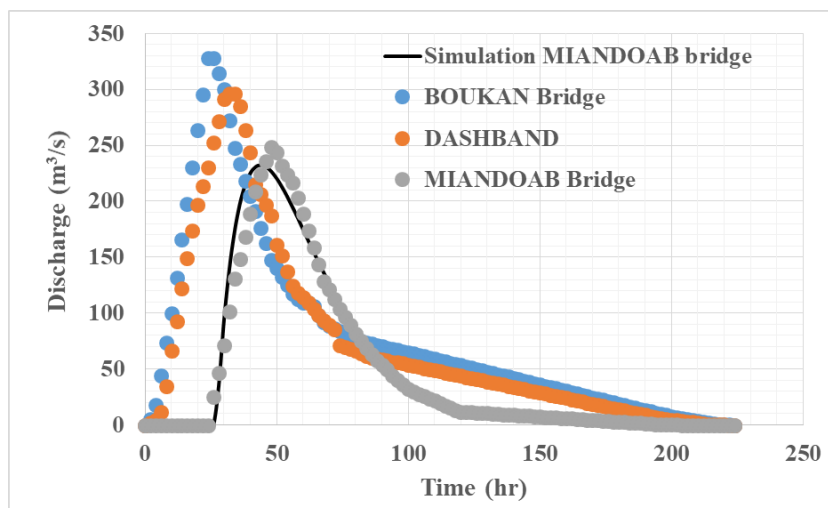
۳- نتایج و بحث

با استفاده از رابطه (۴)، شبیه‌سازی سیلاب‌های ورودی و خروجی از انتهای بازه انجام شد و نتایج آن برای سیلاب‌های رخ داده در بازه‌های یک تا سه به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های پل بوکان، داشبند بوکان و پل میاندوآب در بخش‌های (a) تا (c) شکل (۳) نمایش داده شده است. همان‌طوری که مشخص است، مدل ارائه شده به خوبی در محل پل شهرستان میاندوآب سیلاب را در انتهای بازه پیش‌بینی کرده است. به منظور ارزیابی دقت شبیه‌سازی نیز از فراسنجه‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص نش-ساتکلیف (DC) استفاده شده و میزان آن‌ها برای انتهای بازه مطالعاتی برای هر چهار سیلاب رخ داده در سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۸ به

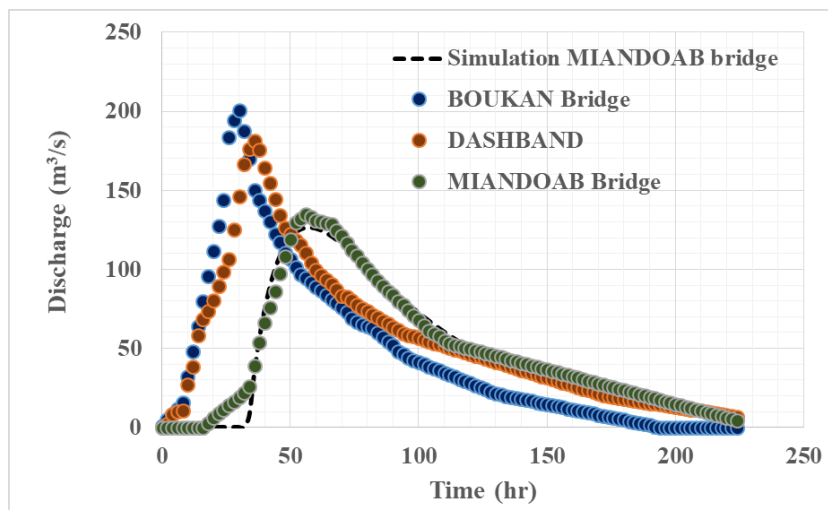
ترتیب برابر با مجموعه‌های سه‌تایی (۰/۸۶، ۰/۰۷ و ۰/۹۵)، (۰/۸۲، ۰/۱۱ و ۰/۱۸)، (۰/۹۷، ۰/۰۷ و ۰/۹۴) و (۰/۹۳، ۰/۱ و ۰/۹) محاسبه شد. میزان‌های محاسبه شده نشان‌دهنده دقت مطلوب مدل هستند. از دیگر برتری‌های این مدل، صریح و مستقیم بودن آن است که برخلاف روش‌های دیگر نیاز به محاسبه گام به گام دبی سیلاب در آن نمی‌باشد. به عنوان مثال در روش‌های خطی و غیرخطی ماسکینگام، نیاز به محاسبه دبی خروجی از بازه مطالعاتی بر اساس دبی ورودی و دبی خروجی در گام‌های پیشین است. البته به منظور محاسبه دبی خروجی از بازه رودخانه‌ای، در آغاز باید با استفاده از آب‌نگارهای سیل اندازه‌گیری شده، میزان‌های ضرایب آن‌ها محاسبه شود تا در مرحله‌های بعدی به منظور استخراج سیلاب خروجی استفاده شود. فراسنجه‌های مدل

معادله به‌دست آمده و منحنی‌های شبیه‌سازی شده در شکل (۱) مشخص می‌شود که به دلیل ظاهر شدن تابه پله‌ای (Heaviside) در معادله استخراج شده، شبیه‌سازی به صورت پله‌ای از یک زمان خاص آغاز می‌شود و در گام‌های زمانی پیش از آن میزان دبی خروجی از بازه برابر با صفر است. تابع پله-واحد ظاهر شده در فرآیند حل، به دلیل انتگرال‌گیری از تابع Dirac به‌دست آمده است. این مسئله تا اندازه‌ای با آغاز رشد آب‌نگار سیلاب ناسازگاری دارد ولی این مسئله صرفاً در یکی دو نقطه ابتدائی محاسباتی بوده و تاثیر آنچنانی در شکل و احجام سیلاب خروجی ندارد. جزئیات مربوط به احجام مخزن‌های به هم پیوسته در جدول شماره (۱) درج شده است و روند تغییرپذیری‌های احجام در بخش‌های مختلف شکل (۵) ترسیم شده است. به منظور استخراج فراسنجه‌های مدل، کد متلب نوشته شده و با استفاده از روش بهینه‌سازی کمترین مربعات (Least Square curve fitting)، بهینه‌ترین میزان‌ها در این زمینه استخراج شدند. شایان یادآوری است که چالش‌های مربوط به استخراج فراسنجه‌ها در همه‌ی مدل‌ها وجود دارد. البته این چالش با وجود چندین سری داده اندازه‌گیری شده و برقراری ارتباط مابین آن‌ها با توجه به میزان‌های مختلف سیلاب‌ها حل خواهد شد. میزان‌های حاضر در جدول ۱ و شکل‌های ۴ تا ۶ برای کل داده‌ها بوده است و این به منظور کشف روندها و برقراری ارتباط مابین فراسنجه‌ها بوده است. لذا پس از استخراج این رابطه‌های رگرسیونی، میزان برآوردی برای بازه با طول متفاوت بدست آمده و با استفاده از آن شبیه‌سازی سیلاب در انتهای بازه انجام شده است و با سیلاب مشاهده‌ای در آن قسمت مقایسه شده است. مشاهدات نشان می‌دهند که فراسنجه‌های مدل بر مبنای میزان سیلاب و طول بازه مطالعاتی متغیر است و کنکاش بیشتر در این زمینه لازم است. همچنین یکی از چالش‌های مهم در فرآیندهای پیش‌بینی سیلاب، پیش‌بینی میزان‌های مربوطه به بیشینه سیلاب و یا استخراج آب‌نگار سیلاب در نقطه‌هایی که در آن‌ها داده اندازه‌گیری شده وجود ندارد، است. برای این منظور نیز می‌بایستی میزان‌های مربوط به فراسنجه‌ها از روی همین رابطه‌های کالیبراسیون استخراج شود. افزون بر آن، در فرآیند استخراج مدل، از فراسنجه‌های

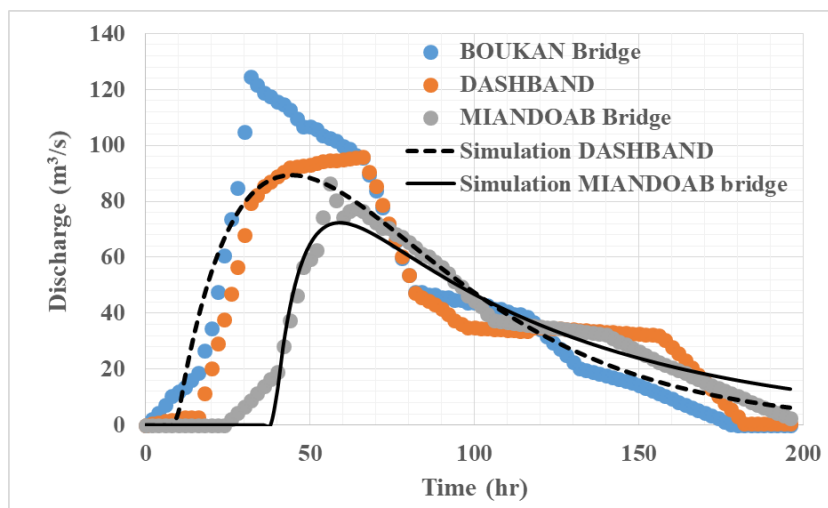
برای هر چهار سیلاب نیز محاسبه شد و جزئیات آن در جدول (۱) نمایش داده شده است. در این پژوهش، ابتدا با استفاده از فراسنجه‌های زمان ایستائی سیلاب در هر مخزن و با استفاده از نسبت‌های خطی $(\frac{V}{T} = \frac{V_Y}{\gamma} = \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2})$ ، حجم مخزن‌های جدا و به هم پیوسته محاسبه شد. شایان یادآوری است که مجموع حجم سیلاب توزیع شده در این مخزن‌ها می‌بایستی برابر با حجم کل سیلاب رخ داده باشد. به بیان دیگر ابتدا از روی آب‌نگار ورودی به بازه مطالعاتی، حجم سیلاب محاسبه شده و در مراحل بعدی این حجم در مخزن‌های به هم پیوسته تشکیل‌دهنده مدل توزیع می‌شود. بنابر محاسبات انجام شده، حجم سیلاب‌های سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۸ در رودخانه سیمینه‌رود به ترتیب برابر با ۳۰/۴، ۵۰/۳۵، ۶۳/۳ و ۳۷/۵ میلیون مترمکعب بوده است. در بخش (a) و (b) شکل (۴) نیز فراسنجه‌های زمان دبی اوج آب‌نگارهای برداشت شده و میزان‌های مربوط به دبی‌های اوج آب‌نگارها در مقابل طول بازه مطالعاتی نمایش داده شده است. همان‌طوری که در این شکل‌ها مشخص شده است. میزان‌های دبی اوج و زمان دبی اوج در مقابل طول بازه توزیع خطی دارند. همچنین میزان‌های مربوط به زمان دبی اوج در سیلاب‌های کوچکتر، بیشتر از سیلاب‌های بزرگتر است ولی میزان‌های دبی اوج سیلاب بزرگتر بیشتر می‌باشند. افزون بر آن، مجموع زمان ایستائی سیلاب در سه مخزن به هم پیوسته که به ترتیب مخزن اولی مسئول عمل انتقال سیلاب و دو مخزن بعدی معرف عمل انتشار سیلاب هستند، در مقابل طول بازه در بخش (c) شکل (۴) نمایش داده شده‌اند. همان‌طوری که مشخص شده است، مجموع زمان ایستائی سیلاب در مخزن‌های مجازی همه‌ی سیلاب‌ها، روند افزایشی داشته است ولی میزان زمان ایستائی در مخزن‌های مربوطه در سیلاب‌های کوچکتر بیشتر می‌باشد. به بیان دیگر سیلاب‌های بزرگتر سریع‌تر از این مخزن‌های عبور نموده و انتهای بازه می‌رسند. همان‌طوری که پیشتر بیان شد، مجموع حجم سیلاب توزیع شده در مخزن‌های سه‌گانه مدل معرفی شده در نهایت می‌بایستی برابر با سیلاب رخ داده باشند که در در ستون نهائی جدول (۱) مجموع همه‌ی آن‌ها محاسبه شده و برابر با سیلاب رخ داده شده می‌باشند. البته با دقت در شکل



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Observed and simulated hydrographs for a) first flood event (2019 - 1 - 29), b) second flood event (2019-3-31), and (c) third flood event (2017-3-10)

شکل ۳ آب‌نگارهای مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده به ترتیب (a) برای سیلاب سال ۱۳۹۷، (b) برای سیلاب سال ۱۳۹۸ و (c) برای سیلاب سال ۱۳۹۵

جدول ۱ فراسنجه‌های مدل استخراج شده برای سیلاب‌های رخ داده در رودخانه سیمینه‌رود

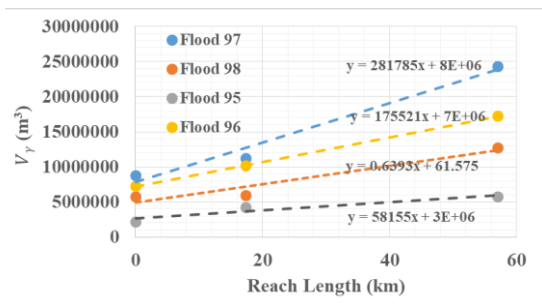
Table 1 Extracted mathematical model parameters for flood events through Simineh River

Flood Event Date	Reach No.	γ (hr)	T_1 (hr)	T_2 (hr)	$\phi \left(\frac{1}{s}\right)$	$(\gamma + T_1 + T_2)$ (hr)	$\frac{V}{T} \left(\frac{m^3}{s}\right)$	V_γ (m ³)	$(m^3)V_{T_1}$	V_{T_2} (m ³)	$V_\gamma + V_{T_1} + V_{T_2}$ (m ³)
2017-3-19	1	6.50	41.34	41.31	2.12E-06	89.15	94.97534	2222345	14136024	14122830.7	30481200
	2	9.33	48.20	47.73	2.11E-06	105.26	80.44175	11253420	13958112.6	13822072	30481200
	3	38.93	158.24	8.55	1.97E-06	205.72	41.1574	5768742	23445748.4	1266709.23	30481200
2017-4-15	1	25.75	38.55	38.53	2.34E-14	102.83	136.0067	12609762	18873398.7	18867159.8	50350320
	2	20.98	41.50	41.50	2.34E-14	103.98	134.5032	10160516	20095050.7	20094753	50350320
	3	24.39	43.10	43.12	2.34E-14	110.60	126.4563	11101610	19619656.9	19629053.1	50350320
2019-1-29	1	8.66	5.76	47.89	2.34E-07	62.30	282.4669	8804049	5852796	48698223	63355068
	2	8.18	9.59	43.53	6.30E-07	65.35	269.2981	11253420	9297090	42200336	63355068
	3	27.02	21.71	21.70	3.63E-06	70.43	249.8818	24302641	19529161	19523266	63355068
2019-3-31	1	9.69	10.75	42.13	6.34E-09	62.56	166.5763	5809178	6445611	25263501	37518289
	2	11.27	14.29	45.69	2.34E-14	71.25	146.2757	5933489	7526497	24058304	37518289
	3	33.54	12.80	52.10	2.34E-14	98.45	105.8582	12783499	4878970	19855820	37518289

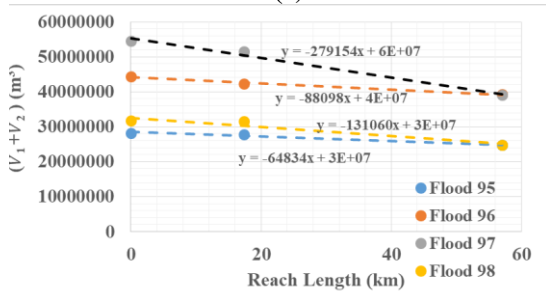
نظر قرار گیرد. ولی در صورت بررسی جدا از هم این دو مخزن، می‌توان اذعان کرد که در صورت افزایش بودن میزان حجم سلول انتشاری اول، حجم سلول انتشاری دوم کاهش خواهد بود. در نهایت می‌توان گفت که موقعیت این دو مخزن انتشاری قابلیت تعویض دارند و جابه‌جائی موقعیت آن‌ها هیچ تاثیری در آب‌نگار خروجی ایجاد نخواهد داشت. در شکل (۶-ا) نیز میزان‌های فراسنجه (حجم سیلاب به زمان ایستائی سیلاب) در مقابل طول بازه رودخانه ترسیم شده‌اند. همان‌طوری‌که در شکل مشخص شده است، میزان این کسر با افزایش طول بازه رودخانه روند کاهشی از خود نشان می‌دهد که با ثابت فرض کردن حجم کل هر سیلاب عبوری از بازه‌های رودخانه‌ای، می‌توان اذعان داشت که این امر به دلیل افزایش زمان کل ایستائی سیلاب در بازه‌های رودخانه (مجموع زمان ایستائی در دو مخزن انتشاری و مخزن انتقالی) می‌باشد. افزون بر آن، میزان این نسبت $\left(\frac{V}{T}\right)$ برای سیلاب‌های بزرگتر نیز بیشتر می‌باشد. در ضمن با توجه به زمان رخداد سیلاب در بازه‌های مورد مطالعه، که فعالیت‌های کشاورزی و برداشت آب از رودخانه هنوز فعال نمی‌باشد. حجم کل هر چهار سیلاب رخ داده از روی آب‌نگارهای محاسبه‌ای در بازه‌های مختلف میزان ثابتی را دارد (شکل ۶-ب). بنابراین میزان‌های مربوط به ضریب تغییرپذیری‌های مکانی محاسبه شده در جدول (۱) بسیار کوچک می‌باشند. ولی محاسبات مربوط به این ضریب نشان داد که تغییر میزان‌های مربوط به آن، باعث تغییر حجم سیلاب در بازه رودخانه می‌شود. و در صورت افزایش حجم سیلاب به دلیل اضافه شدن شاخه‌های فرعی در حد فاصل

هندسی مربوط به رودخانه استفاده نشده است. البته این به معنای تاثیرناپذیری این فراسنجه‌ها از مشخصات هندسی رودخانه نمی‌شود ولی این تاثیرات در میزان‌های مربوط به داده‌های زمان ماند در مخزن‌های به هم پیوسته بازه‌های رودخانه‌ای خود را نشان می‌دهد. به بیان دیگر، برای هر بازه رودخانه‌ای با توجه به شرایط مقاطع عرضی و زبری مسیر رودخانه و یا بازشدگی و جمع شدگی مقاطع رودخانه‌ای و به طور کلی جمیع شرایط هندسی رودخانه، این داده‌ها بایستی از طریق یک سری داده‌های اندازه‌گیری شده و رابطه‌های واسنجی استخراج شود.

همان‌طوری‌که مشخص شده است، با افزایش طول بازه رودخانه زمان ایستائی عمل انتقال سیلاب در مخزن مربوطه افزایش داشته است. البته شایان یادآوری است که میزان‌های مربوطه در سیلاب‌های بزرگتر بیشتر بوده و حتی شیب افزایش آن نیز در سیلاب‌های بزرگتر، بیشتر است. پس می‌توان نتیجه‌گیری کرد که طول بازه و حجم سیلاب ورودی به بازه رودخانه، هر دو تاثیر مستقیم در میزان حجم مخزن عمل انتقال سیلاب دارد. از سوی دیگر با بررسی حجم مخزن‌های دوگانه مربوط به عمل انتشار سیلاب در بازه رودخانه متوجه می‌شویم که به طور کلی با افزایش طول بازه رودخانه، مجموع احجام مخزن‌های انتشاری کاهش پیدا می‌کند و مجموع زمان ماند مخزن‌های انتشاری نیز برای سیلاب‌های کوچکتر، کمتر می‌باشد. (شکل ۵، ب). همچنین شایان یادآوری است که نقش این دو مخزن به هم پیوسته را نباید جدا از همدیگر متصور شد. به بیان دیگر مجموع احجام مخزن‌های انتشاری سیلاب است که می‌بایستی مورد

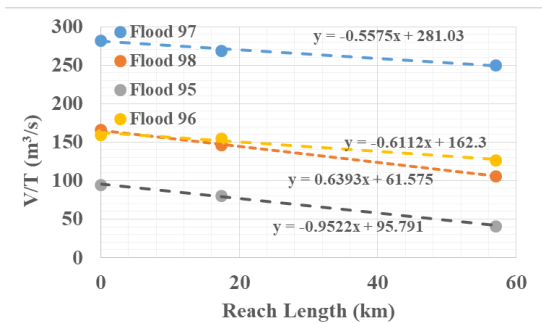


(a)

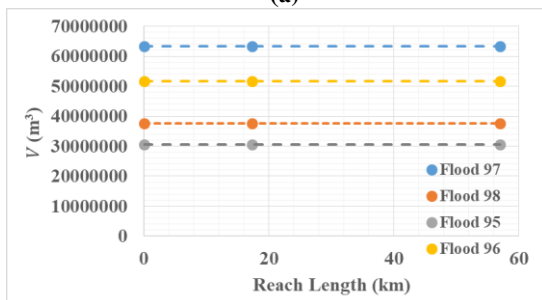


(b)

Fig. 5 (a) Convection volume versus reach length, (b) Sum of dispersion reservoir's volume versus reach length
شکل ۵ (a) حجم مخزن عمل انتقال سیلاب در مقابل طول بازه رودخانه و (b) مجموع احجام مخزن‌های انتشاری در مقابل طول بازه رودخانه



(a)

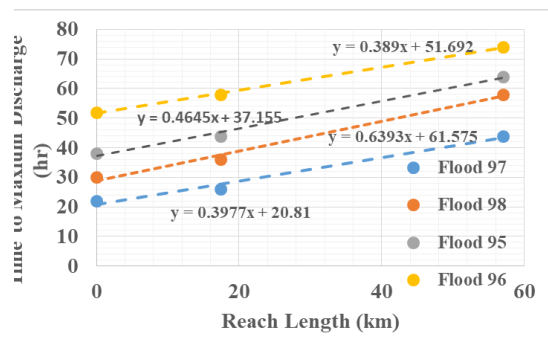


(b)

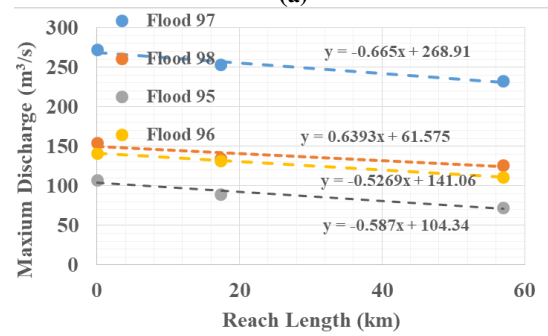
Fig. 6 (a) Variation of $\frac{V}{T}$ with reach length, (b) Variation of flood volume with reach length

شکل ۶ (a) تغییرپذیری‌های نسبت حجم سیلاب به زمان ایستائی در مقابل طول بازه رودخانه و (b) تغییرپذیری‌های حجم سیلاب در مقابل طول بازه رودخانه

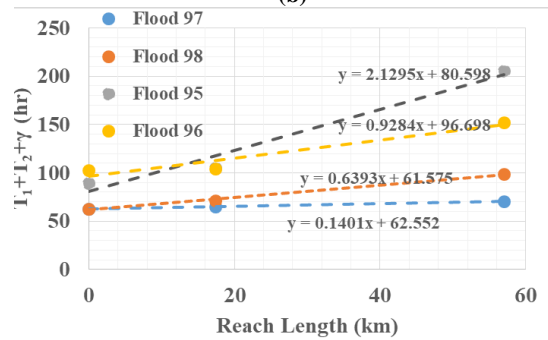
دو موقعیت اندازه‌گیری، میزان آن منفی خواهد بود. همان‌طوری‌که در شکل‌های ۴ تا ۶ مشخص شده است، این فراسنجه‌ها به طور کامل متأثر از طول بازه و حجم سیلاب خروجی از حوضه آبریز هستند. به همین دلیل مشخص است که میزان‌های فراسنجه‌ها با استفاده از درون‌یابی مابین سیلاب‌های مختلف و در طول‌های مختلف از طریق رابطه‌های رگرسیونی قابل استخراج خواهد بود.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 (a) Time of maximum discharge versus reach length, (b) Maximum discharge versus reach length, (c) Residence time of flood in the interconnected reservoirs for both flood events

شکل ۴ (a) فراسنجه زمان رخداد حداکثر دبی در مقابل طول بازه رودخانه، (b) فراسنجه بیشینه دبی در مقابل طول بازه رودخانه و (c) زمان ایستائی حجم سیلاب در هر سه مخزن مدل، در هر دو رخداد سیل

حجم سیلاب خروجی از حوضه آبریز و فراسنجه‌های مدل در بازه رودخانه‌ای مشخص، میزان آبنگار خروجی را استخراج کرد. مدل ارائه شده به سادگی قابل تعمیم به بازه‌های دیگر است. نخستین و بنیادی‌ترین دلیل این ادعا شکل منحنی شبیه‌سازی شده توسط مدل است که از لحاظ فیزیکی کاملاً با شکل آبنگارهای سیلاب همخوانی دارد. در صورتی‌که برای یک بازه خاص، ضرایب مدل از پیش استخراج شده باشد می‌تواند برای پیش‌بینی سیلاب‌های بعدی استفاده شود. میزان‌های عددی ضرایب به طور کامل وابسته به شرایط بازه رودخانه می‌باشند و محدوده خاصی را نمی‌توان برای آن متصور شد. میزان‌های عددی کاملاً وابسته به طول رودخانه، وضعیت پخشیدگی سیلاب در بازه رودخانه و همچنین تغییرپذیری‌های مکانی دبی در بازه است ولی در حالت کلی می‌توان گفت ویژگی‌های مربوط به انتقال سیلاب که وابسته به طول بازه رودخانه می‌باشد توسط فراسنجه (۷)، وضعیت پخشیدگی سیلاب در بازه رودخانه توسط فراسنجه‌های زمانی (T_1, T_2) و در نهایت وضعیت تغییرپذیری‌های مکانی سیلاب نیز توسط فراسنجه (φ) مشخص می‌شود. میزان‌های بدست آمده برای این فراسنجه‌ها تنها برای این بازه معتبر بوده و برای بازه‌های دیگر می‌بایستی بر طبق شرایط آن‌ها استخراج شوند. البته این در حالت کلی می‌توان گفت که کاربرد این مدل دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد. مهم‌ترین محدودیت آن وابسته بودن فراسنجه‌های آن به دبی و طول بازه است و کنکاش بیشتر در زمینه استخراج فراسنجه‌های آن را لازم دارد.

۵- فهرست نشانه‌ها

$Q_2(t)$	تغییرپذیری‌های زمان دبی در انتهای بازه یا آبنگار خروجی
V	حجم کل سیلاب
V_T	حجم سیلاب در مخزن انتقالی
V_1	حجم سیلاب در در مخزن انتشاری شماره ۱
V_2	حجم سیلاب در در مخزن انتشاری شماره ۲

البته می‌توان گفت که تفسیرهای دقیق‌تر هنگامی ممکن خواهد بود که در یک بازه رودخانه، شمار بیشتری از ایستگاه‌های هیدرومتری به صورت پشت سرهم وجود داشته باشد تا خطوط رگرسیونی به دست آمده دقیق‌تر بوده و تفسیر آن معنی‌دار باشد.

۴- نتیجه‌گیری

استفاده از مدل‌های صریح و ساده در زمینه روندیابی سیلاب بازه‌های رودخانه‌ای بسیار با اهمیت می‌باشد. از آنجائی که حل کامل معادله‌های سنت-ونانت برای روندیابی سیلاب دارای پیچیدگی‌هایی است، لذا ایجاد مدل‌های جایگزین که شامل ساده‌سازی‌هایی بوده و همچنین از دقت لازم برخوردار باشند، در این زمینه بسیار با اهمیت می‌باشد. در پژوهش حاضر با استفاده از جداسازی فرآیندهای موجود در زمینه روندیابی سیلاب رودخانه‌ها، در آغاز یک بازه به سه مخزن به هم پیوسته تقسیم‌بندی شد و با استفاده از توزیع آنی سیلاب به دست آمده از حوضه آبریز در بالادست این سه مخزن و همچنین میل دادن ابعاد آن‌ها به سمت صفر، ابتدا معادله‌های دیفرانسیل حاکم برای هر سه مخزن بدست آمد و پس از حل آن‌ها یک معادله صریح استخراج شد. نتایج به دست آمده از صحت سنجی مدل مزبور در چهار سیلاب اتفاق افتاده در رودخانه سیمینه‌رود بررسی شد و نتایج نشان‌دهنده کارائی آن در زمینه روندیابی سیلاب در رودخانه‌ها بود. مدل تحلیلی ارائه شده یک مدل چهار فراسنجه‌ای است که با استخراج میزان‌های فراسنجه‌ها برای یک بازه خاص از روی سیلاب‌های اندازه‌گیری شده، در سیلاب‌های بعدی می‌توان به خوبی در فرآیند مدل‌سازی از آن استفاده کرد. افزون بر آن، ضریب تغییرپذیری‌های مکانی دبی موجود در آن نیز می‌تواند برداشت آب و یا افزایش سیلاب در بخش میان‌حوضه‌ای را نیز مدل‌سازی نماید. به دلیل صریح بودن مدل می‌توان به خوبی از آن در سامانه‌های هشدار سیل استفاده کرد و تنها در یکی دو نقطه ابتدائی شبیه‌سازی به دلیل ظهور تابع پله‌ای تا اندازه‌ای ناسازگاری ایجاد شده است. این مدل توانائی محاسبه سیلاب خروجی از بازه رودخانه در هر گام زمانی بدون وابستگی به گام‌های پیشین را داشته و می‌توان با داشتن

Becker, A. (1976). Simulation of nonlinear flow systems by combining linear models. In: Moscow Symposium, Mathematical Models in Geophysics. Wallingford, UK: International Association of Hydrological Sciences, IAHS Publ. 116, 135-142.

Becker, A. and Kundzewicz, Z.W. (1987). Nonlinear flood routing with multilinear models. *Water Resources Res*, 23(6), 1043-1048.

Camacho, L.A. and Lees, M.J. (1999). Multilinear discrete lag-cascade model for channel routing. *Journal of Hydrology*, 226(1), 30-47.

Cimorelli, L., Cozzolino, L., D'Aniello, A. and Pianese, D. (2018). Exact solution of the linear Parabolic Approximation for flow-depth based diffusive flow routing. *Journal of Hydrology*, 563, 620-632.

Chabokpour, J. (2019). Application of the model of hybrid cells in series in the pollution transport through the layered material. *Pollution*. 5(3), 473-486.

Chabokpour, J. and Zabihi, M. (2019). Evaluation of the transfer function method in the flood routing of the river reaches. *Journal of Hydraulics*, 14(2), 145-158.

Fenton, J.D. (2019). Flood routing methods, *Journal of Hydrology*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.006>.

Fotuhi, M. and Maghrebi, M. (2011). The Impact of Effective Parameters on Muskingum-Cunge in Comparison with Dynamic Routing. *Iran Water Resources Research*, 7(1), 26-37. (In Persian)

Ghosh, N. C., Mishra, G. C., and Ojha, C. S. P. (2004). A hybrid-cells in-series model for solute transport in a river. *J. Environ. Eng.*, 13010, 1198-1209.

Ghosh, N.C., Mishra, G.C. and Kumarasamy, M. (2008). Hybrid-Cells-in-Series Model for Solute Transport in Streams and Relation of Its Parameters with Bulk Flow Characteristics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134, 497-502.

Keefer, T.N. and McQuivey, R.S. (1974). Multiple linearization flow routing model. *Journal of Hydraulic Division*, 100(HY7), 1031-1046.

Koussis, A.D. (2009). Assessment and review of the hydraulics of storage flood routing 70 years after the presentation of the Muskingum method. *Hydrological Sciences Journal* 54(1), 43-61.

Norouzi, H. and Bazargan, J. (2019). Using the Linear Muskingum Method and the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm for calculating the depth of the rivers flood. *Iran Water Resources Research*, 15(3), 344-347. (In Persian)

V_{ϕ}	حجم مربوط به تغییرپذیری‌های مکانی سیلاب
A	مقطع متوسط رودخانه
L_{γ}	طول مخزن انتقالی مدل
L_1	طول مخزن انتشاری شماره ۱ مدل
L_2	طول مخزن انتشاری شماره ۲ مدل
L_{ϕ}	طول مخزن افزایشی و یا کاهش میکانی مدل
γ	زمان ایستائی سیلاب در مخزن انتقالی مدل
T_1	زمان ایستائی سیلاب در مخزن انتشاری شماره ۱ مدل
T_2	زمان ایستائی سیلاب در مخزن انتشاری شماره ۲ مدل
ϕ	ضریب افزایشی و یا کاهش میکانی سیلاب
t	زمان
Heaviside	تابع پله-واحد
Dirac	تابع دیراک

۶- منبع‌ها

Akbari, G.H., Barati, R. and Hosseinneshad, A.R. (2011). Analysis for the different schemes of the muskingum-cunge method in the natural waterways. *Iran Water Resources Research* (3), 62-74. (In Persian)

Bayrami, M., Vatankhah, A. and Nazi Ghameshlou, A., (2019). Flood Routing using Muskingum Model with Fractional Derivative. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(7), 1667-1676. (In Persian)

Bazargan, J. and Norouzi, H. (2018). Investigation the effect of using variable values for the parameters of the linear Muskingum method using the Particle Swarm Algorithm (PSO). *Water Resources Management*, 32(14), 4763-4777.

Bhabagrahi Sahoo, Muthiah Perumal, Tommaso Moramarco, Silvia Barbeta & Soumyaranjan Sahoo (2019). A multilinear discrete Nash-cascade model for stage-hydrograph routing in compound river channels, *Hydrological Sciences Journal*, DOI:10.1080/02626667.2019.1699243.

Romanowicz, R.J., Young, P.C. and Beven, K.J. (2006). Data assimilation and adaptive forecasting of water levels in the River Severn catchment. United Kingdom. *Water Resources Research*, 42(6), W06407.

Safavi, H.R. (2011). *Engineering Hydrology*. Arkan Danesh. Isfahan, 724p. (In Persian)

Spada, E., Sinagra, M., Tucciarelli, T., Barbeta, S., Moramarco, T. and Corato, G. (2017). Assessment of river flow with significant lateral inflow through reverse routing modeling. *Hydrological Processes*, 31, 1539-1557.

Patricia, C. and Raimundo, S. (2005). Solution of Saint-Venant Equation to Study Flood in Rivers through Numerical Methods. 25th Annual American Geophysical Union Hydrology Days, SA, Colorado, March.

Perumal, M. (1992). The cause of negative initial outflow with the Muskingum method. *Hydrological Sciences Journal*, 37(4), 391-401.

Perumal, M. (1994). Multilinear discrete cascade model for channel routing. *Journal of Hydrology*, 158(1-2), 135-150.

Perumal, M. and Sahoo, B. (2007). Applicability criteria of the variable parameter Muskingum stage and discharge routing methods. *Water Resources Research*, 43(5), 1-20. W05409.

پیوست ۱: استخراج رابطه تحلیلی مدل

زمانی جریان ورودی منهای نرخ زمانی جریان خروجی برابر با تغییرپذیری‌های جریان درون سلول خواهد بود لذا معادله حاصل به صورت (A1) خواهد بود.

$$\frac{V \times \text{Dirac}(t-\gamma)}{T_1} - \frac{\Delta Q_1(t)}{\Delta t} = \frac{Q_1(t)}{\left(\frac{1}{\varphi} + T_1\right)} \quad (A1)$$

و همچنین با میل دادن ابعاد مخزن به سمت صفر، معادله دیفرانسیل (A2) به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\frac{dQ_1(t)}{dt} + Q_1(t) \left(\frac{1}{T_1} + \varphi \right) = \frac{V \times \text{Dirac}(t - \gamma)}{T_1}$$

$Q_1(t)$ دبی لحظه‌ای در مخزن انتشاری اول، T_1 زمان ایستائی سیلاب در مخزن انتشاری اول (دومین مخزن از مخزن‌های به هم پیوسته) و φ ضریب تغییرپذیری‌های مکانی به دلیل افزایش و یا کاهش مکانی جریان در مخزن است. با توجه به اینکه در ابتدای ورود سیلاب از مخزن شماره ۱ (مخزن انتقالی)، دبی رودخانه تنها به صورت جریان پایه (Q_b) است، لذا می‌توان از شرط اولیه $Q_1(\gamma) = Q_b$ برای معادله دیفرانسیل بالا استفاده کرد. حل معادله دیفرانسیل (A2) با شرط مرزی بالا منجر به معادله (A3) می‌شود.

$$Q_1(t) = \left(\frac{V \times \text{Heaviside}(t - \gamma) e^{\frac{\gamma(T_1\varphi+1)}{T_1}}}{T_1} + \frac{Q_b}{e^{\frac{\gamma(T_1\varphi+1)}{T_1}}} \right) e^{-\frac{t(T_1\varphi+1)}{T_1}} \quad (A3)$$

تغییر دبی بین دو طرف مخزن نوشته شده و با میل دادن ابعاد آن به سمت صفر، معادله دیفرانسیلی (A4) به دست می‌آید.

$$\frac{dQ_2(t)}{dt} + Q_2(t) \left(\frac{1}{T_2} + \varphi \right) = \frac{\left(\frac{V \times \text{Heaviside}(t - \gamma) e^{\frac{\gamma(T_1\varphi+1)}{T_1}}}{T_1} + \frac{Q_b}{e^{\frac{\gamma(T_1\varphi+1)}{T_1}}} \right) e^{-\frac{t(T_1\varphi+1)}{T_1}}}{T_2} \quad (A4)$$

Q_b حل می‌شود و جواب‌نهایی به صورت (A5) بدست می‌آید.

با دقت در شکل ۱، می‌توان دریافت یک بازه رودخانه به عنوان یک واحد طولی بوده که به سه مخزن جدا از هم و به همدیگر مرتبط تقسیم شده است. مخزن اولی تنها وظیفه انتقال سیلاب را به عهده داشته ولی دو مخزن بعدی وظیفه انتشار سیلاب و زوال‌پذیری و یا تغییرپذیری‌های مکانی سیلاب را به عهده دارند. با اعمال حجمی از سیلاب به میزان V در بالادست مخزن اول که در آن تنها عمل انتقال سیلاب انجام می‌شود، انتقال زمانی در تابع رخ خواهد داد. برای توزیع آنی حجم سیلاب به دست آمده در بالادست سلول اول از یک تابع ریاضی به نام Dirac استفاده می‌شود. لذا ورودی سیلاب به مخزن اول برابر با $V \times \text{Dirac}(t)$ و خروجی سیلاب از آن برابر با $V \times \text{Dirac}(t - \gamma)$ است. فراسنجه γ نیز برابر با زمان ایستائی سیلاب در مخزن اول است. شایان یادآوری است که در این سیستم مخزن‌های به هم پیوسته، خروجی سیلاب از هر مخزن به عنوان ورودی سیلاب به مخزن بعدی بوده و معادله دیفرانسیل حاکم در مخزن‌های بعدی، با نوشتن تغییرپذیری‌های زمانی جریان استخراج می‌شود. با نوشتن تغییرپذیری‌های زمانی جریان در مخزن دوم (مخزن انتشاری اول) و با فرض اینکه زمان ایستائی سیلاب در آن برابر با T_1 باشد می‌توان گفت که نرخ

در رابطه بالا نیز تابع پله‌ای Heaviside از انتگرال‌گیری از تابع Dirac به دست آمده است. در ادامه در مخزن سوم (مخزن انتشاری دوم) نیز نرخ زمانی

معادله دیفرانسیل فوق نیز با اعمال شرط مرزی $Q_2(\gamma) =$

$$\begin{aligned}
 Q_2(t) = & \frac{1}{e^{-\frac{\gamma(T_2\phi+1)}{T_2}}} \left(e^{-\frac{(T_2\phi+1)t}{T_2}} \left(Q_b \right. \right. \\
 & + \frac{1}{T_1 - T_2} \left(\left(V e^{\frac{\gamma(T_2\phi+1)}{T_2}} - V e^{\frac{T_1 T_2 \gamma \phi + T_1 \gamma}{T_1 T_2}} \right. \right. \\
 & \left. \left. - T_1 e^{\frac{T_1 T_2 \gamma \phi + T_1 \gamma}{T_1 T_2}} Q_b \right) e^{-\frac{\gamma(T_2\phi+1)}{T_2}} \right) \left. \right) \\
 & - \frac{1}{T_1 - T_2} \left(\left(V \text{Heaviside}(t - \gamma) e^{\frac{\gamma(T_2\phi+1)}{T_2}} - V \text{Heaviside}(t \right. \right. \\
 & \left. \left. - \gamma) e^{\frac{T_1 T_2 \gamma \phi + t T_1 + T_2 \gamma - t T_2}{T_1 T_2}} \right. \right. \\
 & \left. \left. - T_1 e^{\frac{T_1 T_2 \gamma \phi + t T_1 + T_2 \gamma - t T_2}{T_1 T_2}} Q_b \right) e^{-\frac{(T_2\phi+1)t}{T_2}} \right)
 \end{aligned}
 \tag{A5}$$

شده و به رابطه نهائی (A6) می‌رسیم که در متن مقاله با رابطه (۴) نشان داده شده است.

به دلیل اینکه هدف اصلی بررسی رفتار آب‌نگار سیلاب به صورت جداگانه است و به طور معمول در این فرآیند دبی پایه حذف می‌شود، لذا با اعمال $(Q_b = 0)$ رابطه ساده‌تر

$$Q_2(t) = \frac{V \times \text{Heaviside}(t - \gamma) e^{-\frac{t(T_2\phi+1)}{T_2}} \left(-e^{-\frac{\gamma(T_2\phi+1)}{T_2}} + e^{\frac{tT_1+T_2(T_1\phi\gamma+\gamma-t)}{T_1 T_2}} \right)}{T_1 - T_2}
 \tag{A6}$$

با معلوم بودن میزان‌های فراسنجه‌های زمانی مدل در آن بازه رودخانه‌ای، استفاده قرار گردد.

این رابطه می‌تواند برای به‌دست آوردن دبی سیلاب در گام‌های مختلف زمانی بدون وابستگی به گام‌های پیشین و