

**An analysis of the accuracy of the peak flow branching coefficient of watersheds in line with planning for flood control  
(case example: Faresban watershed of Hamadan province)**

Alireza Gholami

Ph.D educated of hydraulic structures, Boali Sina University and member of the scientific faculty of Islamic Azad University of Shiraz

Email: [alirezagholami175@gmail.com](mailto:alirezagholami175@gmail.com) Cellphone :09173154938

Majid Heydari

Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bou Ali Sina University

**Bahram Rezaei:**

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bou Ali Sina University

**Abstract**

In watersheds without flood hydro-graph statistics, one of the most useful methods is trend analysis. One of the subcategories of trend analysis is the hydraulic method, which is used in multi-branched and non-statistical systems. In this regard, the dynamic wave method is one of the most complex and accurate hydraulic trending methods, which is done by fully numerically solving the Saint-Venant equations. Considering the output hydro-graph of a flow as the information of the problem and the characteristics of the flow path, Saint-Venant's equations are solved by the finite difference method and the input hydro-graph is calculated. In this research, the mentioned method was studied as reverse trending and its results were compared with observations. An unsustainable flow was created and withdrawals were made without considering the loss of the route. Then, the obtained data were controlled in the MATLAB coding environment and for trending. After this stage, the division coefficients of the branch for a number of hydro-graphs entering the branch were measured and the rest of the division coefficients were calculated by mathematical methods. After that, using statistical parameters mean square error, relative error percentage, maximum error percentage and minimum error percentage, the obtained results were analyzed and it was shown that the created model for calculating input hydro-graphs has high accuracy. The results of inverse trending in 9 created hydrographs showed that there is a good match between the outputs of the program and the observations, while the examination of the flow distribution coefficients indicated that these coefficients correspond to the percentage of permissible error. This issue was expressed by obtaining the maximum and minimum relative error of less than 10% in the division coefficients. The results of this research can be used after verification in the field in order to estimate the characteristics of floods in places without flood measuring stations.

**Keywords:** Inverse trend, partition coefficient, Saint-Venant equations, dynamic wave, flood

## Introduction

Flood is one of the phenomena that endangers the life and property of many people in every corner of the world. More than half of global flood damage occurs in Asia (Thingsanchal 2012). Since the flood discharge is very important in water resources utilization plans, flood control, dam construction, flood control operations and most hydrological studies, therefore, the accuracy of studies and the degree of safety in the design of water facilities and structures are highly dependent on the method of conducting studies. Depending on the conditions and available information about the river, solving the problems of the flood process can be done by hydraulic and hydrological methods. The lack of statistics in some basins practically makes it impossible to make the necessary forecasts to prevent flood damage. In some areas, due to the large distance between two stations, the information on intermediate points is not available. Therefore, in order to prevent flood damage, the flood hydrograph should be developed in these places. Estimating the downstream hydrograph using the characteristics of the upstream hydrograph or vice versa is considered a type of trending method. In some routes, the incoming or outgoing branches have a direct effect on the output hydrographs, so knowing the branching coefficient is a very good help for finding the flood hydrograph. Based on this, research is done in two ways, direct or reverse. The basis of trend finding is based on the theory of unsteady flows, assuming that the flow in rivers or flumes is one-dimensional, this problem can be analyzed based on the Saint and Nantes equations (flow continuity equation and momentum equation) (Abbasizadeh and colleagues, 1389).

## Methodology

First, the data collected from the Faresban watershed near Nahavand city in Hamedan province with geographical characteristics of 48 degrees, 7 minutes and 5 seconds east and 34 degrees, 14 minutes and 39 seconds north were modeled after mathematical calculations and matching with laboratory conditions. For modeling, the Saint-Venant equations were simplified by the four-point finite difference method and the boundary conditions of the model were considered in the water engineering department laboratory of Boali Sina University, Hamedan. This model was used in the form of a rectangular flume with a length of 11 meters, a width of 48 cm, and a slope of 0.003. At a distance of 6.5 meters from the beginning of the flume, there is a branch to the left with a width of 34 cm, a length of 490 cm, and a slope of 0.003 and it was built with a 39 degree deviation angle which was modeled according to the conditions of one of the rivers in the basin. The flow of water enters the flume by a pump from the ground tank through a 6-inch pipe on which a gate valve was installed and controlled by an electric motor, inverter and smart board. Also, a vectorino single-point sonic speedometer was used to measure the speed.

## Results and discussion

This research was carried out on 9 inlet and outlet hydrographs with different flow rates in the flume, and according to the measuring range of the speedometer device and the maximum height of the channel, the numerical values of the hydrographs were close to each other. The percentage of branching division was calculated from the ratio of output hydrograph to input hydrograph multiplied by percent and the average was calculated for each harvest. The outlet hydrograph in the branch and the main branch was considered as the downstream boundary condition, and then reverse trending was done up to the connection point, the division coefficient was calculated using trended hydrographs up to the point of division (odd hydrographs). Using the numbers obtained for the remaining hydrographs, the distribution coefficient was estimated by fitting the curve between the distribution coefficients and the volume of water entering the branch. The results of the inverse trending of the designed flood and the comparison of its results with the numerical methods obtained from the Saint-Venant equations are presented in the figures and tables below. These measurements were made on 9

hydrographs, which were considered as known for the accuracy of the odd-numbered hydrographs, and then using the simplified equations of continuity and movement size, the even-numbered hydrographs were calculated and the results The results were compared with the collected values.

### **Conclusion**

In this research, the inverse hydraulic trending equations were done with the four-point finite difference method. For the reverse trend, the exit hydrograph of the branches was used, and the hydraulic characteristics of the route were also considered. Considering the short distance of the branches to the connection point and from the connection point of the two branches to the input hydrograph measurement location, the rising slope, peak point and descending slope of the measured and calculated hydrographs were in good agreement with each other; Also, as seen in the presented tables, the maximum amount of maximum error is related to hydrograph number 4. In the graphs presented, which are related to the calculated and measured hydrographs, it is clearly stated that the prediction of the branching coefficient can be a good help in finding the entrance or exit hydrograph of the branch in cases where the branching information is not available.

## تحلیلی بر صحت سنجی ضریب انشعاب دبی اوج حوضه‌های آبخیز در راستای برنامه ریزی برای کنترل سیلاب نمونه موردی: حوضه آبخیز فارسبان

علیرضا غلامی<sup>۱</sup>

دانش‌آموخته دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه بوعلی سینا همدان و عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی شیراز

Email: alirezagholami175@gmail.com Cellphone :09173154938

مجید حیدری

دانشیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا

بهرام رضایی

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا

### چکیده

در حوضه‌های آبخیز با آمار ناقص هیدروگراف سیلاب، یکی از روش‌های بسیار کاربردی، روندیابی است. یکی از زیرمجموعه‌های روندیابی، روش هیدرولیکی بوده که در مسیل‌های چند شاخه و با آمار ناقص کاربرد دارد. در این رابطه روش موج دینامیک یکی از پیچیده‌ترین و دقیق‌ترین روش‌های روندیابی هیدرولیکی است که با حل عددی کامل معادلات سنت و نانت صورت می‌پذیرد. با در نظر گرفتن هیدروگراف خروجی یک جریان به عنوان معلومات مسئله و خصوصیات مسیر جریان، معادلات سنت و نانت با روش تفاضل محدود حل شده و هیدروگراف ورودی محاسبه می‌گردد. در این پژوهش، روش مذکور به عنوان روندیابی معکوس مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن با مشاهدات مقایسه شد. یک جریان به صورت غیرماندگار ایجاد گردید و بدون در نظر گرفتن تلفات مسیر، برداشت‌هایی انجام شد. سپس داده‌های بدست آمده در محیط متلب کدنویسی و جهت روندیابی، مورد کنترل قرار گرفت. پس از این مرحله، ضرایب تقسیم انشعاب برای تعدادی از هیدروگراف‌های ورودی به انشعاب، اندازه‌گیری و مابقی ضرایب تقسیم از روش‌های ریاضی محاسبه گردید. پس از آن با استفاده از پارامترهای آماری میانگین مربعات خطا، درصد خطای نسبی، درصد خطای ماکزیمم و درصد خطای مینیمم، نتایج بدست آمده مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد مدل ایجاد شده جهت محاسبه هیدروگراف‌های ورودی دقت بالایی دارد. نتایج روندیابی معکوس در ۹ هیدروگراف ایجاد شده نشان داد بین خروجی‌های برنامه با مشاهدات تطابق خوبی وجود دارد ضمن آنکه بررسی ضرایب تقسیم دبی بیانگر آن بود که این ضرایب با درصد خطای مجاز مطابقت دارد. این موضوع با بدست آمدن خطای نسبی ماکزیمم و مینیمم کمتر از ۱۰ درصد در ضرایب تقسیم بیان گردید. نتایج این پژوهش می‌تواند پس از صحت‌سنجی به صورت میدانی به منظور برآورد مشخصات سیل در یک مسیل که در ایستگاه‌های سیل‌سنجی آن در طول مسیر آماربرداری درستی انجام نشده مورد استفاده قرار گیرد.

**واژه های کلیدی:** روندیابی معکوس، ضریب تقسیم، معادلات سنت و نانت، موج دینامیک، سیلاب

### مقدمه

سیل از جمله پدیده‌هایی است که هر ساله در گوشه و کنار جهان، جان و مال بسیاری از مردم را به مخاطره می‌اندازد. بیش از نیمی از خسارات سیل جهانی در آسیا رخ می‌دهد (Thingsanchal 2012). از آنجایی که در طرح‌های بهره‌برداری از منابع آب، کنترل سیلاب، سدسازی، عملیات آبخیزداری و اکثر مطالعات هیدرولوژیکی، دبی سیلاب اهمیت بسزایی دارد، لذا دقت مطالعات و درجه ایمنی طراحی تأسیسات و سازه‌های آبی بستگی زیادی به روش انجام مطالعات دارد. حل مسائل روندیابی سیلاب بسته به شرایط و اطلاعات موجود از رودخانه می‌تواند به روش‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی انجام پذیرد. عدم وجود آمار در بعضی حوضه‌ها، عملاً انجام پیش‌بینی‌های لازم جهت جلوگیری از خسارات سیل را غیرممکن می‌سازد. در بعضی از منطقه‌ها بعلاوه فاصله زیاد دو ایستگاه، اطلاعات نقاط میانی موجود نمی‌باشد. بنابراین برای پیشگیری از خسارات سیل باید هیدروگراف سیل در این نقاط روندیابی شود. تخمین هیدروگراف پایین‌دست با استفاده از مشخصات

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته دکتری دانشگاه بوعلی سینا همدان- نویسنده مسیول

هیدروگراف بالادست و یا بالعکس، یک نوع روش روندیابی تلقی می‌گردد. در بعضی از مسیرها انشعابات وارد شده یا خارج شده تاثیر مستقیمی بر هیدروگراف‌های خروجی دارد لذا دانستن ضریب انشعاب، کمک بسیار خوبی برای روندیابی هیدروگراف سیل می‌باشد. بر این مبنا روندیابی به دو روش مستقیم یا معکوس انجام می‌گردد. اساس روندیابی بر تئوری جریان‌های غیردائمی استوار بوده که با فرض یک بعدی بودن جریان در رودخانه‌ها و یا فلوم‌ها می‌توان بر مبنای معادلات سنت و نانت (معادله پیوستگی<sup>۱</sup> جریان و معادله اندازه حرکت<sup>۲</sup>) این مسئله را تحلیل نمود، Abbasizadeh et al 2009 روندیابی مستقیم سیل به این صورت است که با استفاده از هیدروگراف ورودی یک رودخانه در بالادست (جریان ورودی)، هیدروگراف پایین‌دست (جریان خروجی) تولید می‌شود Tsaghafian et al 2014 Beh Ain. 2002 در پژوهشی با استفاده از روش تفاضل محدود و با به‌کار بردن تکنیک حل تلویحی چهار نقطه‌ای به حل کامل معادلات سنت و نانت پرداخت و همچنین از طریق مقایسه این روش با روش‌های دیگر، کارایی این روش را اثبات نمود. Taifor et al 2022 در پژوهشی با استفاده از حل عددی معادله سنت و نانت به روش پیرسون معادلات موج سینماتیکی را ساده سازی نمود و مشخصه‌های سیل را محاسبه کرد. Qabadian et al 2013 عملکرد روش برنامه‌ریزی بیان ژن را در روندیابی سیلاب رودخانه زنگمار با مدل موج دینامیکی مقایسه نمودند. Mohammad-Wali-Samani et al 2013 روندیابی هیدرولوژیکی ماسکینگام را در رودخانه‌های چندشاخه را با بهینه الگوریتم ژنتیک بررسی نمودند. Ferdows Ema et al 2013 به حل عددی معادله موج سینماتیک به روش تفاضل محدود (کرانک نیکلسون) و الوان محدود پرداختند و نتیجه گرفتند که تئوری امواج سینماتیک برای وفق دادن شرایط عمومی مناسب‌تر است. در کاربردهای خاص، هیدروگراف بالادست در یک بازه رودخانه، نیاز به هیدروگراف اندازه‌گیری شده‌ی مشخص در پایین‌دست ایستگاه هیدرومتری و در فاصله‌ای دور دارد. علاوه بر این، اغلب، هیدروگراف‌های طراحی سیل باید در مکان‌های مختلف رودخانه فاقد آمار، تنها با یک هیدروگراف محاسبه‌شده در پایین‌دست ایستگاه اندازه‌گیری جریان تولید شود. این کاربرد خاص به‌عنوان مسئله روندیابی معکوس مطرح می‌شود، که ممکن است از طریق روش‌های بهینه‌سازی<sup>۳</sup> حل گردد. مسئله روندیابی معکوس در تعداد محدودی از مقالات مطالعه شده است. Shamma et al 2014 برای پیش‌بینی جریان بالادست با توجه به نیاز هیدروگراف جریان پایین‌دست، از یک طرح معکوس تفاضل محدود ضمنی بر اساس طرح ۴ نقطه‌ای استفاده کردند. Tsaghafian et al 2014 از مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک جهت روندیابی معکوس هیدروگراف سیل بر اساس روش موج سینماتیک بهره گرفتند. Artichowicz et al 2009 به مطالعه روندیابی معکوس سیلاب از طریق حل معادلات سنت و نانت و معادلات ذخیره پرداختند. Spada et al 2017 مدل موج پخشیدگی را برای روندیابی معکوس بر روی رودخانه‌ای در ایتالیا مورد بررسی قرار داد. از ویژگی‌های مدل موج دینامیکی این است که تمامی مرزهای زمانی و مکانی موج سیل با هم در نظر گرفته می‌شود، لذا می‌توان دقت بالایی در روندیابی داشت. لازم به ذکر است که مدل موج دینامیکی یکی از زیرمجموعه‌های روندیابی هیدرولیکی می‌باشد که نسبت به روندیابی هیدرولوژیکی دقت بالاتر دارد در این زمینه Olad Ghafari et al 2009 به مقایسه روش موج دینامیک و روندیابی هیدرولوژیکی ماسکینگام خطی و غیرخطی بر روی رودخانه لیقوانچای پرداختند و نتیجه گرفتند که دقت روش هیدرولیکی بالاتر است. Pirnia et al 2011 به بررسی ترم‌های مختلف معادله مومنتوم در روندیابی سیل پرداختند که در آن اختلاف میان روش‌های مختلف موج دینامیک، پخشیدگی و سینماتیک، در رودخانه مارون بررسی گردید و بیان کردند که مدل موج دینامیکی نسبت به سایر روش‌های روندیابی هیدرولیکی برتری دارد. یکی از پژوهش‌های مهم در این زمینه Bharali et al 2022 بر روی رودخانه کولسی در هند برای پیش‌بینی سیل در ایستگاه‌های فاقد آمار مدل بارش-رواناب را بررسی کرد و به این نتیجه رسید که می‌توان با روندیابی، هیدروگراف سیل مشابه با مدل بارش-رواناب با دقت بالاتری بدست آورد. Abdol Hamid et al 2014 مسئله روندیابی معکوس موج دینامیکی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دو مدل برای حل معکوس تفاضل محدود معادلات سنت و نانت، از جمله طرح صریح و ضمنی در نظر گرفتند و سپس به بررسی فاکتورهای وزنی مؤثر بر راه حل پایداری و دقت نتایج پرداختند. در این پژوهش مشاهده شد که پایداری طرح ضمنی نسبت به طرح صریح بیشتر است. بررسی منابع یاد شده نشان داد، بیشتر پژوهشگران به روندیابی در مسیر فاقد انشعاب پرداخته‌اند، ولی در بیشتر موارد رودخانه‌ها یا فلوم‌های دارای انشعاب هستند، در حوضه‌های آبخیز داخل کشور رودخانه‌های فصلی و دایمی موجود، دارای انشعاب بوده و اغلب این انشعاب‌ها فاقد آمار دقیق می‌باشد که در این موارد روندیابی با حالت معمول متفاوت خواهد بود. برای پیش‌بینی سیلاب‌های عبوری از این مناطق باید علاوه بر روندیابی سیل، در ایستگاه‌های فاقد آمار رفتار سیل را نیز مورد ارزیابی قرار داد لذا در پژوهش حاضر سعی بر آن است به مسئله روندیابی معکوس در فلوم دارای یک انشعاب پرداخته شود. بدین منظور برنامه‌ای در محیط متلب جهت روندیابی معکوس

1. Continuity Equation

2. Momentum Equation

3. Optimization model

با استفاده از روش تفاضل محدود و حل معادلات سنت و نانت تهیه گردید که با روش معکوس مدل موج دینامیکی برای نقاط فاقد آمار هیدروگراف سیل را محاسبه و نهایتاً خروجی این مدل با نتایج مشاهدات مقایسه شد.

## مواد و روش‌ها

### معادله حاکم بر جریان و حل آن

معادله سنت و نانت (معادلات پیوستگی و اندازه حرکت) شامل یک دسته معادلات تفاضلات جزئی هذلولی به شکل زیر است:

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

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

که در این معادلات،  $g$  شتاب جاذبه ( $m/s^2$ )،  $S_f$  شیب اصطکاکی،  $S_0$  شیب کف فوم،  $t$  بازه زمانی ( $s$ )،  $x$  بازه مکانی ( $m$ )،  $Q$  دبی جریان ( $m^3/s$ )،  $y$  عمق جریان ( $m$ )،  $V$  سرعت جریان ( $m/s$ )،  $A$  سطح مقطع جریان ( $m^2$ ) می باشد. حل مستقیم معادله سنت و نانت و حمل رسوب بعلت ماهیت غیرخطی این معادلات امکانپذیر نبوده و جهت حل آنها بایستی از روش‌های تحلیلی، تریسمی و یا عددی استفاده شود. در تحقیق حاضر جهت گسسته‌سازی معادله سنت و نانت از روش عددی تفاضلات محدود (روش گسسته سازی چهارنقطه وزنی) با رویکرد ضمنی استفاده شده است. استفاده از این رویکرد، موجب پایداری بی‌قید و شرط حل مسئله خواهد شد. در این روش گسسته‌سازی طبق الگوی زیر می باشد:

$$\frac{\partial u}{\partial t} \approx \frac{u_i^{j+1} + u_{i+1}^{j+1} - u_i^j - u_{i+1}^j}{2\Delta t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} \approx \theta \frac{u_{i+1}^{j+1} - u_i^{j+1}}{\Delta x} + (1 - \theta) \frac{u_{i+1}^j - u_i^j}{\Delta x} \quad (4)$$

$$\bar{u} = \theta \frac{u_i^{j+1} + u_{i+1}^{j+1}}{2} + (1 - \theta) \frac{u_i^j + u_{i+1}^j}{2} \quad (5)$$

در این معادلات  $u$  یک پارمتر است که می‌تواند با یکی از پارامترهای سرعت، عمق، دبی یا مساحت جایگزین گردد و  $\theta$  ضریب وزنی است، که مقدار آن می‌تواند با در نظر گرفتن فرم صریح یا ضمنی معادلات بین صفر و یک باشد. برای حالت صریح  $\theta = 0$  می باشد اما با توجه به ضمنی بودن روش حل، مقدار  $\theta = 1$  در نظر گرفته شده است. بالانویس ( $j$ ) گام زمانی معلوم و ( $j+1$ ) گام زمانی مجهول و ( $i+1$ ) گام مکانی در راستای افق می باشند. با گسسته‌سازی معادلات مومنتم و پیوستگی با استفاده از معادلات (۳ تا ۵) و ساده سازی آن به معادلات زیر میرسیم.

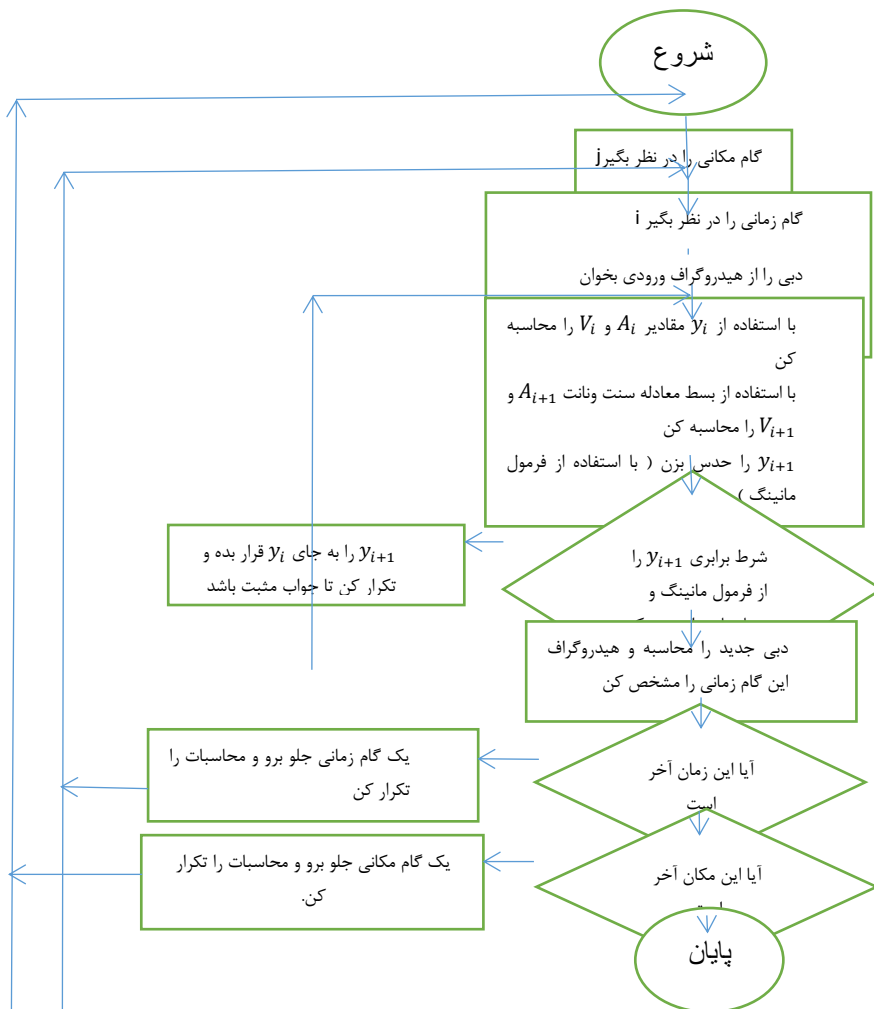
$$\frac{V_i^{j+1} - V_i^j}{\Delta t} + \frac{V_i^{j+1} + V_{i+1}^{j+1}}{2} * \frac{V_{i+1}^{j+1} - V_i^{j+1}}{\Delta x} + g * \frac{A_{i+1}^{j+1} - A_i^{j+1}}{\Delta x} - g * (s - \frac{(V_i^{j+1})^2}{n^2}) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{A_i^{j+1} - A_i^j}{\Delta t} + \frac{V_{i+1}^{j+1} * A_{i+1}^{j+1} - V_i^{j+1} * A_i^{j+1}}{\Delta x} = 0 \quad (7)$$

برای حل همزمان معادلات ۶ و ۷ در گام زمانی بعدی (j+1) با توجه به غیرخطی بودن آن‌ها، نیازمند یک شرط اولیه (جریان پایه) و دو شرط مرزی (هیدروگراف ورودی برای روندیابی مستقیم و هیدروگراف خروجی برای روندیابی معکوس) است. نتیجه بسط معادلات، سیستمی از معادلات جبری غیرخطی با توجه به تعداد گره‌ها خواهد بود. بدین منظور برنامه‌ای در محیط برنامه نویسی متلب تهیه شد و دستگاه معادلات غیرخطی بر اساس روش تکراری ژاکوبین حل گردید. خروجی این برنامه مقادیر V و A در زمان (j+1) می‌باشد. فلوجارت حل معادلات و روندیابی در شکل شماره ۱ آمده است. برای بررسی صحت معادلات و برنامه نوشته شده از معادله ۸ و ۹ که به ترتیب خطای میانگین مربعات بین داده های واقعی و درصد خطای نسبی بین داده‌های واقعی و محاسباتی را بدست می آورد، استفاده شد. در این فرمول‌ها N تعداد داده‌های آماری استفاده شده،  $f_i$  داده‌های برداشت شده،  $y_i$  نتایج محاسباتی، MSE خطای میانگین مربعات و K درصد خطای نسبی می باشد:

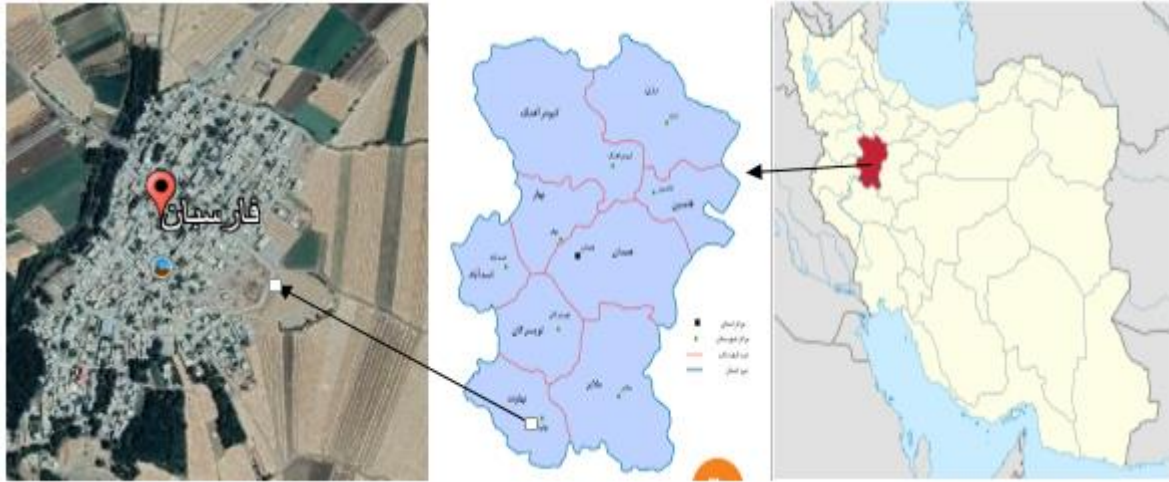
$$MSE = \frac{1}{N} \sum (f_i - y_i)^2 \quad (8)$$

$$K = \frac{f_i - y_i}{f_i} * 100 \quad (9)$$



شکل (۱) فلوجارت حل معادلات و روندیابی (نگارنده ۱۳۹۷)

حوضه آبخیز فارسبان<sup>۱</sup> در قسمت جنوبی استان همدان در نزدیکی شهرستان نهاوند با مشخصات جغرافیایی  $۷۵^{\circ} ۴۸'$  شرقی و  $۳۹^{\circ} ۱۴'$  شمالی که در شکل ۲ موقعیت آن مشخص است.



شکل (۲) موقعیت مکانی حوضه آبخیز فارسبان (گوگل ارث)

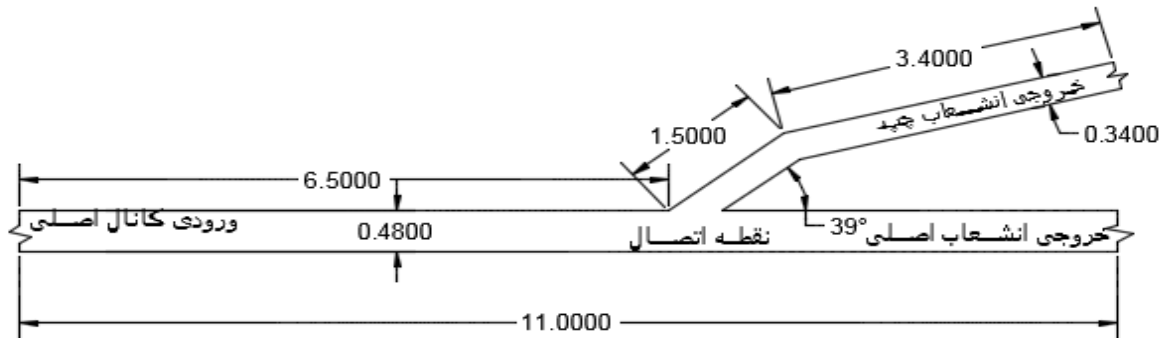
### روش جمع‌آوری داده‌ها

برای انجام این تحقیق ابتدا اطلاعات برداشت شده از حوضه آبخیز با استفاده از معادلات ساده سازی شده مدل گردید سپس در آزمایشگاه گروه مهندسی آب دانشگاه بوعلی سینا همدان از یک فلوم با طول ۱۱ متر، عرض ۴۸ سانتیمتر و شیب  $۰/۰۰۳$  استفاده شد که در فاصله  $۶/۵$  متری از ابتدای فلوم یک انشعاب به سمت چپ به عرض ۳۴ سانتیمتر، طول ۴۹۰ سانتی متر، شیب  $۰/۰۰۳$  و با زاویه  $۳۹$  درجه انحراف که با یکی از مسیلهای عبوری تطابق خوبی داشت ساخته شد. جریان آب توسط یک پمپ از مخزن زمینی از طریق یک لوله  $۶$  اینچ که بر روی آن یک شیر دروازه ای نصب گردیده بود و بوسیله یک موتور الکتریکی، اینورتر و تابلو هوشمند کنترل می‌شد، وارد فلوم می‌گردید. همچنین برای اندازه‌گیری سرعت از یک دستگاه سرعت‌سنج صوتی تک‌نقطه‌ای وکتورینو<sup>۲</sup> استفاده شد. پلان تقریبی فلوم مورد استفاده در شکل ۳ ارائه شده است. در تمامی حالت‌ها زمان داده‌برداری با توجه آزمایش  $۱۰$  دقیقه بوده، بدین ترتیب که ابتدا یک دبی پایه به مدت  $۲$  دقیقه وارد مدل شد سپس به کمک یک تابلو کنترل میزان دبی در مدت زمان  $۹۰$  ثانیه به ماکزیمم مقدار ممکن رسید بعد از آن به مدت  $۲$  دقیقه صبر کرده و سپس به کمک تابلو کنترل دبی را در مدت زمان  $۲$  دقیقه به دبی پایه می‌رساند. بعد از  $۲$  دقیقه پمپ را خاموش کرده و تا تخلیه فلوم صبر کرده، که این مدت زمان  $۳۰$  ثانیه شد (شکل ۴). در مدت انجام، میزان سرعت جریان و عمق جریان در زمان‌های یکسان در شش نقطه ثابت، به ترتیب ابتدای ورودی فلوم اصلی، قبل از نقطه تقسیم، ابتدای ورودی انشعاب‌ها و خروجی انشعابات اندازه‌گیری گردید. سپس به کمک اعداد بدست آمده منحنی دبی اشل و هیدروگراف‌های ورودی و خروجی این نقاط بدست آمد. همچنین درصد تقسیم جریان در هریک از انشعاب‌ها و ضریب تقسیم محاسبه گردید.

<sup>1</sup> Faresban

<sup>2</sup>Acoustic Doppler Velocimetry(vectrino)

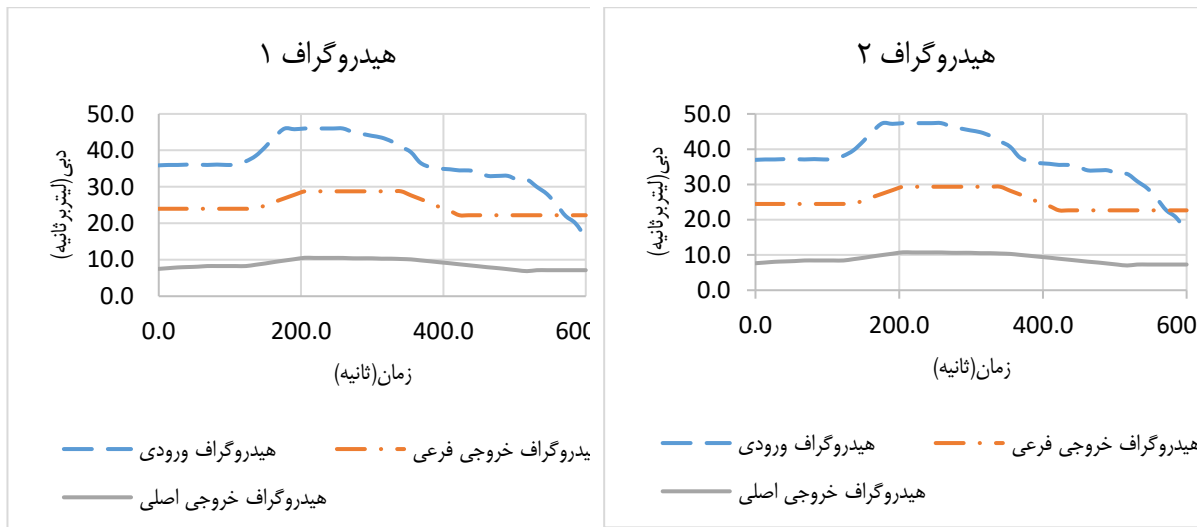




شکل ۳- نمایی از فلوم آزمایشگاهی (نگارنده ۱۳۹۷)

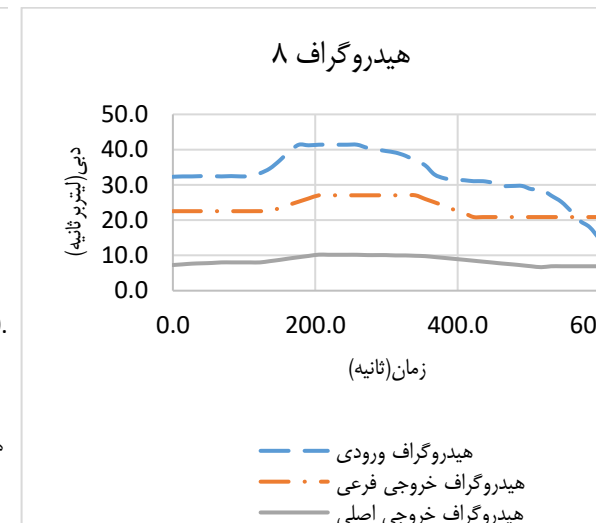
### نتایج و بحث

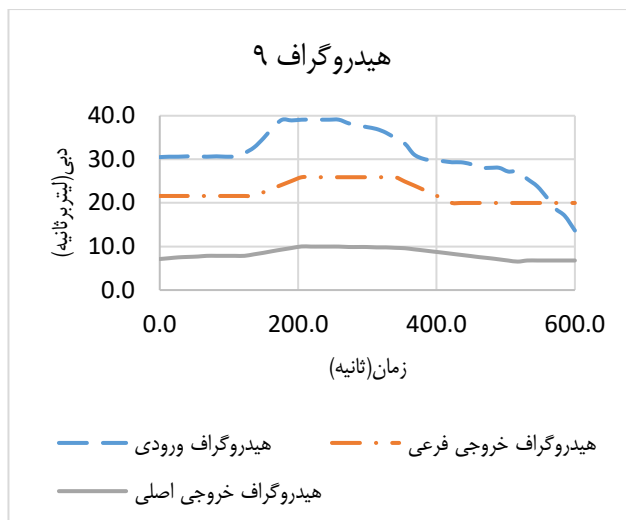
این تحقیق روی ۹ هیدروگراف ورودی و خروجی با دبی‌های مختلف در فلوم انجام گردید، که با توجه به بازه اندازه‌گیری دستگاه سرعت‌سنج و حداکثر ارتفاع کانال، مقادیر عددی هیدروگراف‌ها نزدیک به یکدیگر بوده است. میزان درصد تقسیم انشعاب را از نسبت هیدروگراف خروجی به هیدروگراف ورودی ضرب در صد محاسبه نموده و میانگین برای هر برداشت محاسبه شد.





شکل ۴ - هیدروگراف‌های اندازه گیری شده ورودی و خروجی در دبی های مختلف





ادامه شکل ۴- هیدروگراف‌های اندازه‌گیری شده ورودی و خروجی در دبی‌های مختلف (نگارنده ۱۳۹۷)

هیدروگراف‌های ورودی و خروجی کانال در شکل ۴ ارائه شده است. افت جریان و اختلاف ایجاد شده در هیدروگراف ورودی در ثانیه ۵۷۰ ناشی از مکش معکوس مسیر جریان در زمان خاموش کردن پمپ می باشد. هیدروگراف خروجی در شاخه فرعی و انشعاب اصلی را به عنوان شرط مرزی پایین دست در نظر گرفته و سپس روندیابی معکوس تا نقطه اتصال انجام شد، ضریب تقسیم با استفاده از هیدروگراف‌های روندیابی شده تا نقطه تقسیم محاسبه گردید (هیدروگراف‌های فرد)، با استفاده از اعداد بدست آمده در جدول ۱، برای هیدروگراف‌های باقی مانده ضریب تقسیم را با برازش منحنی بین ضرایب تقسیم و حجم آب وارد شده به انشعاب برآورد شد. شکل ۵ منحنی‌های برازش برای انشعابات اصلی و فرعی می باشد. سپس با روندیابی مستقیم هیدرولیکی هیدروگراف نقطه خروجی انشعاب را بدست آورده و با برداشت‌ها مقایسه شد که نتایج آن در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

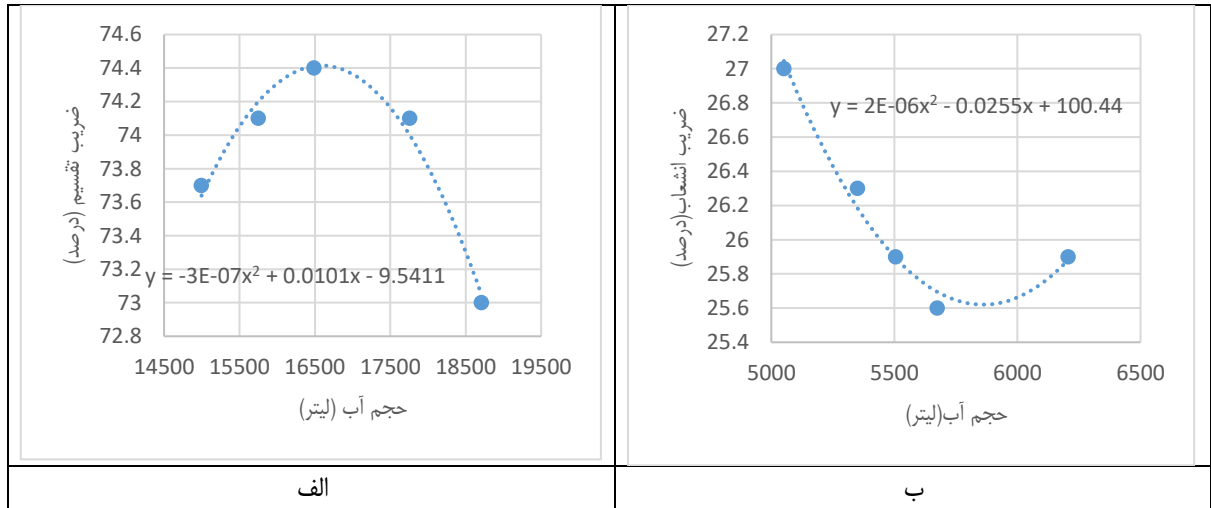
نتایج حاصل از روندیابی معکوس سیلاب طراحی شده و مقایسه نتایج آن با روش‌های عددی حاصل از معادلات سنت و نانت در شکل‌ها و جدول‌های زیر ارائه شده است. این برداشت‌ها بر روی ۹ هیدروگراف انجام گردید که برای صحت سنجی هیدروگراف‌های با شماره فرد را به صورت معلوم در نظر گرفته (جدول ۱) و سپس با استفاده از معادلات ساده شده هیدروگراف‌های با شماره زوج محاسبه گردید و نتایج بدست آمده با مقادیر برداشت شده مقایسه گردید (جدول ۲). در جدول ۱ مقادیر اندازه‌گیری شده برای ۵ هیدروگراف آورده شده است، برداشت‌ها شامل دبی پیک، زمان رسیدن به ماکزیمم دبی، حجم آب عبوری و ضریب تقسیم دبی در هر مسیر بوده است.

جدول ۱ مشخصات هیدروگراف اندازه‌گیری شده و ضریب تقسیم دبی محاسبه شده برای هیدروگراف‌های فرد (نگارنده ۱۳۹۷)

شماره هیدروگراف	نوع مسیر	دبی پیک (لیتر بر ثانیه)	زمان اوج (ثانیه)	حجم آب (لیتر)	ضریب تقسیم (درصد)
-	کانال اصلی	۴۶	۱۷۷	۲۱۲۵۶	-
۱	انشعاب فرعی	۲۸/۸	۲۰۵	۱۵۷۵۱	۷۴/۱
	انشعاب اصلی	۱۰/۵	۲۰۴	۵۵۰۵	۲۵/۹
۳	کانال اصلی	۴۸/۳	۱۷۸	۲۲۱۶۴	-
	انشعاب فرعی	۲۹/۹	۲۰۵	۱۶۴۹۰	۷۴/۴
۵	انشعاب اصلی	۱۰/۷	۲۰۴	۵۶۷۴	۲۵/۶
	کانال اصلی	۵۲/۹	۱۷۷	۲۳۹۶۳	-
۷	انشعاب فرعی	۳۱/۶	۲۰۴	۱۷۷۵۷	۷۴/۱
	انشعاب اصلی	۱۱/۶	۲۰۶	۶۲۰۶	۲۵/۹
۷	کانال اصلی	۴۳/۷	۱۷۷	۲۰۳۴۷	-
	انشعاب فرعی	۲۷/۶	۲۰۶	۱۴۹۹۶	۷۳/۷
	انشعاب اصلی	۱۰/۳	۲۰۵	۵۳۵۱	۲۶/۳

	۱۸۷۰۷	۱۷۶	۳۹/۹	کانال اصلی	
۷۳/۰	۱۳۶۵۶	۲۰۶	۲۵/۹	انشعاب فرعی	۹
۲۷/۰	۵۰۵۱	۲۰۶	۱۰/۰	انشعاب اصلی	

در این جدول همانگونه که مشاهده میگردد میزان حجم آب عبوری از کانال اصلی با جمع جبری حجم آب عبوری در انشعابها برابر است، به همین منظور با استفاده از حجم آب عبوری ضریب تقسیم جریان بین کانال اصلی و انشعاب را محاسبه گردید و منحنی برازش را برای انشعاب اصلی (شکل ۴-الف) و انشعاب فرعی (شکل ۴-ب) بدست آورده و بررسی گردید.



شکل ۵ منحنی‌های برازش ضریب تقسیم در شاخه های فرعی (الف) و اصلی (ب) (نگارنده ۱۳۹۷)

با استفاده از منحنی برازش بدست آمده در شکل ۴ مقادیر حجم آب و ضریب تقسیم جریان برای ۴ هیدروگراف با شماره زوج محاسبه گردید و با برداشتها مقایسه گردید و درصد خطای این دو مقدار با هم محاسبه و در جدول ۲ آورده شد. در جدول ۲ حجم آب اندازه گیری شده برداشت شده و حجم آب محاسباتی با استفاده از منحنی برازش (شکل ۵) محاسبه گردید.

جدول ۲ مقادیر درصد خطای محاسباتی و اندازه گیری حجم آب (نگارنده ۱۳۹۷)

شماره هیدروگراف	نوع مسیر	حجم آب (لیتر)		ضریب تقسیم (درصد)		میزان خطا حجم آب (درصد)
		اندازه گیری	محاسباتی	اندازه گیری	محاسباتی	
۲	انشعاب فرعی	۱۶۱۴۸	۱۵۷۰۵	۷۴/۱	۷۳/۹	۲/۷
	انشعاب اصلی	۵۶۴۴	۵۵۴۷	۲۵/۹	۲۶/۱	۱/۷
۴	انشعاب فرعی	۱۷۰۸۰	۱۶۴۲۰	۷۴/۶	۷۴/۲	۳/۸
	انشعاب اصلی	۵۸۱۶	۵۷۱۰	۲۵/۴	۲۵/۸	۱/۸
۶	انشعاب فرعی	۱۵۳۵۳	۱۴۹۸۸	۷۴/۱	۷۳/۸	۲/۳
	انشعاب اصلی	۵۳۶۶	۵۳۲۱	۲۵/۹	۲۶/۲	۰/۸
۸	انشعاب فرعی	۱۴۵۹۴	۱۴۳۰۰	۷۴/۴	۷۳/۶	۲/۰

۲/۱	۲۶/۴	۲۵/۶	۵۱۳۰	۵۰۲۱	انشعاب اصلی
-----	------	------	------	------	-------------

درصد خطای محاسبه شده در جدول ۲ نشان داد که مقادیر محاسباتی و اندازه‌گیری شده بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و دقت خوبی برای پیشبینی نقاط فاقد آمار می‌باشد. Qabadian et al 2013 در پژوهش بر روی رودخانه ليقوان چای به این نتیجه رسیدند که روندیابی هیدرولیکی معکوس می‌تواند ضرایب تقسیم سیل و همچنین هیدروگراف سیل را در ایستگاه‌های فاقد آمار با درصد خطای کمی محاسبه کند. Bharali et al 2022 در پژوهشی که روی رودخانه کوالسی هند انجام دادند نتیجه گرفتند که برای ایستگاه‌های فاقد آمار می‌توان از روندیابی معکوس استفاده کرد و ضرایب سیل را به دست آورد. که نتایج این پژوهش با هر دو مورد مطابقت دارد.

جدول ۳ میزان خطای محاسباتی و اندازه‌گیری شده دبی پیک (نگارنده ۱۳۹۷)

شماره هیدروگراف	نوع مسیر	دبی پیک (لیتر بر ثانیه)		ضریب تقسیم (درصد)		میزان خطای دبی پیک (درصد)
		اندازه‌گیری	محاسباتی	اندازه‌گیری	محاسباتی	
۲	انشعاب فرعی	۲۹/۳	۲۸/۵	۷۴/۱	۷۳/۹	۲/۷
	انشعاب اصلی	۱۰/۷	۱۰/۵	۲۵/۹	۲۶/۱	۱/۷
۴	انشعاب فرعی	۳۰/۵	۲۹/۳	۷۴/۶	۷۴/۲	۳/۹
	انشعاب اصلی	۱۰/۹	۱۰/۷	۲۵/۴	۲۵/۸	۱/۸
۶	انشعاب فرعی	۲۸/۲	۲۷/۵	۷۴/۱	۷۳/۸	۲/۵
	انشعاب اصلی	۱۰/۳	۱۰/۲	۲۵/۹	۲۶/۲	۱/۰
۸	انشعاب فرعی	۲۷/۰	۲۶/۵	۷۴/۴	۷۳/۶	۱/۹
	انشعاب اصلی	۱۰/۲	۱۰/۴	۲۵/۶	۲۶/۴	۲/۰

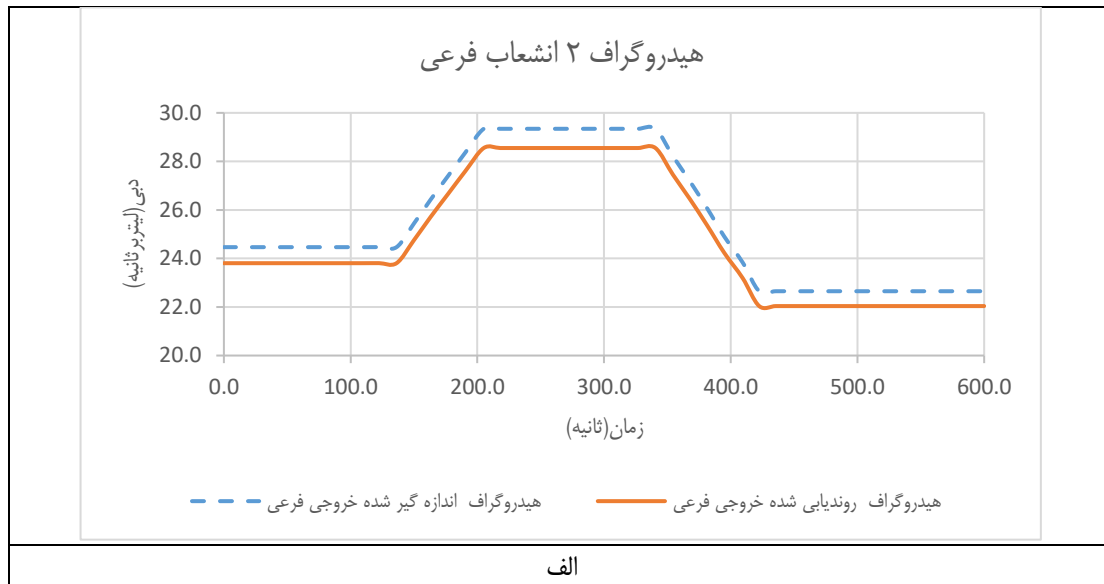
در جدول شماره ۳ میزان خطا را برای دبی پیک محاسباتی و اندازه‌گیری شده بدست آمد. Mohammad-Wali-Samani et al 2013 در پژوهشی روندیابی سیل به روش هیدرولوژیکی را در رودخانه‌های چند شاخه بررسی کرد و نتیجه گرفت هیدروگراف های خروجی روندیابی شده با استفاده از پارامترهای کالیبره شده از مدل پیشنهادی با هیدروگراف های خروجی واقعی مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده انطباق رضایت بخشی را نشان می‌دهد. که با نتایج این پژوهش هم مشابهت دارد.

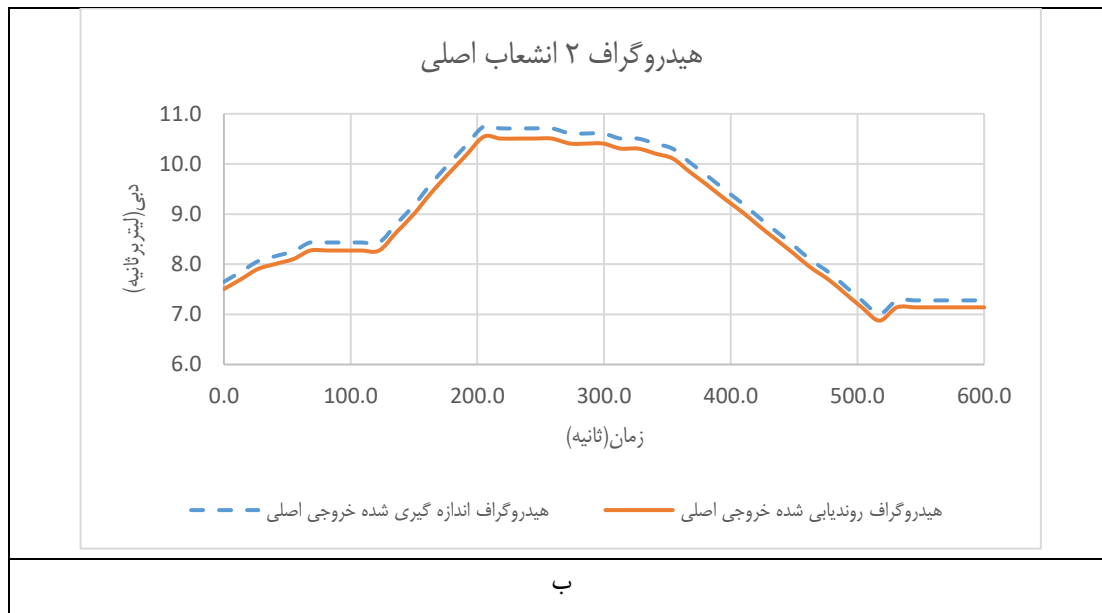
جدول ۴ مقادیر درصد خطای ضریب انشعاب در مسیر اصلی و فرعی (نگارنده ۱۳۹۷)

شماره برداشت	نوع مسیر	خطای ماکزیمم %	خطای مینیمم %
۱	انشعاب اصلی	۹	۸/۸
	انشعاب فرعی	۳/۱	۳/۱
۲	انشعاب اصلی	۹	۸/۸
	انشعاب فرعی	۳/۱	۳/۱
۳	انشعاب اصلی	۹	۸/۹
	انشعاب فرعی	۳	۳/۱

سال	شماره	انشعاب اصلی	انشعاب فرعی
۸/۹	۹/۱	۴	۳
۸/۸	۹	۵	۳/۱
۸/۸	۹	۶	۳/۱
۸/۸	۸/۹	۷	۳/۲
۸/۹	۸/۹	۸	۳
۸/۷	۸/۸	۹	۳/۲
۳/۲	۳/۲		

در جدول شماره ۴ مقادیر درصد خطای ماکزیمم و مینیمم برای ضریب انشعاب محاسبه گردید که تمامی این مقادیر کمتر از ۱۰ درصد بوده و با پژوهش Wang et al 2022 که بر روی رودخانه ژینگژیان<sup>۱</sup> چین انجام شد مشابهت دارد.





شکل ۶ منحنی‌های هیدروگراف روندیابی شده با استفاده از ضریب تقسیم در شاخه‌های فرعی (الف) و اصلی (ب) (نگارنده ۱۳۹۷)

شکل ۶ مقایسه هیدروگراف‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده به روش روندیابی هیدرولیکی با استفاده از ضرایب تقسیم انشعاب می‌باشد. همانگونه که در شکل دیده می‌شود این دو هیدروگراف تطابق خوبی با یکدیگر دارند و با پژوهش Mohammad-Wali-Samani et al 2013 مشابهت کامل دارد. همچنین Tun Lee et al 2012 در پژوهش بر روی کانال تخلیه سیلاب در تایوان مدل موج دینامیکی و سینماتیکی را با هم مقایسه کردند و نتایج نشان داد که در مدل موج دینامیکی، تطابق هیدروگراف‌های محاسباتی و اندازه‌گیری شده بهتر از مدل موج سینماتیکی می‌باشد که با نتایج این پژوهش مشابهت دارد.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق روندیابی هیدرولیکی معکوس با روش تفاضل محدود چهار نقطه ای انجام شد. برای روندیابی معکوس از هیدروگراف خروجی انشعابات استفاده گردید و همچنین خصوصیات هیدرولیکی مسیر نیز در نظر گرفته شد. با توجه به فاصله کوتاه انشعابات تا نقطه اتصال و از نقطه اتصال دو انشعاب تا محل اندازه‌گیری هیدروگراف ورودی، شیب بالا رونده، نقطه اوج و شیب پایین رونده هیدروگراف‌های اندازه‌گیری شده و محاسباتی تطابق خوبی با یکدیگر داشتند؛ همچنین همانگونه که در جدول‌های ارائه شده (جدول ۴) مشاهده گردید، بیشینه میزان خطای ماکزیمم مربوط به هیدروگراف شماره ۴ می‌باشد. در نمودارهای ارائه شده در شکل ۴ که مربوط به هیدروگراف‌های محاسبه شده و اندازه‌گیری شده است به وضوح مشخص گردید که پیش‌بینی ضریب انشعاب می‌تواند در مواردی که اطلاعات انشعابات موجود نیست کمکی خوبی برای پیدا کردن هیدروگراف ورودی و یا خروجی از انشعاب باشد. از زمان شروع برداشت تا زمان خاموش کردن پمپ (ثانیه ۵۷۰) بیشترین خطای نسبی برای حجم آب عبوری از کانال در هیدروگراف شماره ۴ بین نتایج برداشت شده و محاسباتی ۳/۸ درصد می‌باشد (جدول ۳). در جدول ۴ همان‌گونه که مشاهده می‌گردد درصد خطای مینیمم و ماکزیمم برای ضرایب تقسیم جریان در حالت‌های مختلف ایجاد شده محاسبه گردیده که با توجه به اینکه همگی کمتر از ۱۰ درصد می‌باشند این ضرایب مورد قبول می‌باشد. در کل می‌توان گفت نتایج حاصل از روندیابی هیدرولیکی معکوس به روش موج دینامیک با وجودی که نسبت به سایر روش‌های روندیابی به اطلاعات هیدرولیکی بیشتری از مسیر رودخانه نیاز دارد اما اطمینان بالاتری در خروجی دارد که همین امر باعث شده تا با استفاده از این روش برای مسیرهای فاقد آمار بتوان هیدروگراف بالادست را با دقت بالاتری محاسبه کرد. از نتایج بدست آمده در این پژوهش می‌توان پس از صحت سنجی میدانی و منطقه‌ای برای ایستگاه‌های فاقد آمار استفاده نمود. همچنین می‌توان از تلفیق نتایج این پژوهش با تصاویر ماهواری برای مناطق مختلف میزان ریسک‌پذیری سیل در این نقاط را تعیین نمود.

### منابع

1. Olad Ghaffari, Abul Fatah, Fakheri Fard, Ahmed, Nazimi, Amir Hossein and Qurbani, Mohammad Ali (2009). "Hydraulic trending of flooding by dynamic wave method and comparison with linear and non-linear Muskingum hydrological trending (case study: Liqvan Chai)". Water Science Journal, Volume 1, Number 3, Page 48-60.
- 2.
- 3.

4. Baha'ain, Farzam (1380). "Flood trends of the Merg river using the four-point technique of the finite difference method". The 3rd Iranian Hydraulic Conference, November 15-17, Technical Faculty of Tehran University.
5. Qabadian, Rasoul, Qurbani, Mohammad Ali, Khalaj, Masoumeh (2013) "Investigation of the performance of the gene expression programming method in Zangmar River flood trends in comparison with the dynamic wave method". Water and soil journal, volume 27, number 3, page 592- 602.
6. Mohammad Wali Samani, Hossein, Hachik, Ali, Farhadi, Shaghaiq (2013) "Flood hydrological analysis using the linear Muskingum method in the system of multi-branch rivers with optimization by genetic algorithm". Scientific-Research Journal of Hydraulics, Volume 8, Number 1, page 83-92.
7. Pirnia, Ali, Rahimi Shoushtari, Mostafa, Mahmoudian Shoushtari, Mohammad and Rahimi Shoushtari, Mohsen (2011). "Investigating the effect of different terms of the momentum equation on flood trends in river engineering studies (case study of Maron river)". 9th International Congress of Civil Engineering, May 19 to 21. Isfahan University of Technology.
8. Abbaszadeh, Majid, Mahdavi, Mohammad and Selajgha, Ali (2009). "Evaluation of the effectiveness of flood hydrological trending methods in Dez River". Natural Geography Quarterly, third year, number 9, page 63-76.
9. Artichowicz, W., and Szymkiewicz, R. (2009). "Inverse Integration of the Open Channel Flow Equations". International Symposium on water Management and Hydraulic Engineering, 89- 96.
10. Chaudhry, M.H. (1993). "Open Channel Flow". Prentice-Hall Inc. New Jersey, 483 pp.
11. Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. (1988). "Applied hydrology". Mc Grew-Hill, 572p.
12. Hamid Abdulwahid, M., and NaiefKadhim, K. (2014). "Inverse Flood Wave Routing Using Saint Venant Equations". Journal of Babylon University, Engineering Sciences, Vol.(22): 60-66.
13. Hossain, M.M., and FerdousEma, J. (2013). "Soulation of Kinematic Wave Equation using Finite Difference Method and Finite Element Method". Global Journal of Science Frontier Ressearch Mathematics and Decision Sciences, Vol 13(6): 25-35.
14. Maidment, D.R. (1993). "Handbook of Hydrology." Chapter 10: Flood Routing, McGraw-Hill Book Company.
15. Saghafian, B., Jannaty, M.H., and Ezami. N. (2014). "Inverse hydrograph routing optimization model based on the kinematic wave approach". Engineering Optimization, University of Southern California, 04 October.
16. Eleonora Spada, Marco Sinagra, Tullio Tucciarelli, Silvia Barbeta, Tommaso Moramarco, Giovanni Corato, First published. ( 2017). "Assessment of river flow with significant lateral inflow through reverse routing modeling". Hydrol Process 31:1539-1557
17. Shamaa, M.T., and Karkuri, H.M. (2011). "Implicit Numerical Scheme For Regulating Unsteady Flow In Open Channel". Fifteenth International Water Technology Conference, Alexandria, Egypt.
18. Gokmen Tayfur , Tommaso Moramarco. (2022). " Kinematic reverse flood routing in natural rivers using stage data". Applied Water Science 12:182
19. Biswadeep Bharali, Utpal Kumar Misra. (2022). " Numerical Approach for Channel Flood Routing in an Ungauged Basin: a Case Study in Kulsi River Basin, India ". Water Conservation Science and Engineering
20. Kwan Tun Lee , Pin-Chun Huang. (2012). "Evaluating the adequateness of kinematic-wave routing for flood forecasting in midstream channel reaches of Taiwan "Journal of Hydroinformatics.
21. T. Tingsanchali, (2012). "Urban flood disaster management ".Procedia Engineering 32 : 25 – 37