

Estimating Stage-Discharge Curves in Unsteady Flows Using the Concept of Isovel Contours in Natural Rivers

Mohammad Mohammadi¹ and Mahmoud F. Maghrebi^{2*}

1. Ph.D. Candidate, Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad.
2. Professor, Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad.

* maghrebi@um.ac.ir

Received: 3 October 2022, Accepted: 28 January 2023 J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Investigating unsteady flows in compound channels and natural rivers is essential issue. Discharge measurements in the medium and large rivers are often based on the indirect methods of converting water level to discharge using stage-discharge curves of steady flow. However, these methods do not accurately estimate flow discharge in unsteady flow conditions. In the previous studies, many relationships have been proposed to modify the flow values in steady conditions to estimate the stage-discharge relations of unsteady flow. In most of the previous studies, the relationships are either oversimplified or have errors that make them not very generalizable. Considering the importance of the estimating the rating curves in natural rivers and compound channels and the shortcomings of the studies in this field, this research aims to evaluate the stage-discharge curve and the output hydrograph in natural rivers with unsteady flow using a proposed novel method based on isovel contours.

Methodology: In order to analyze the flood flows, the combination of momentum and continuity equations was used, known as Saint-Venant's equations. Saint-Venant equations do not have an analytical solution, and numerical models must be used to solve them. The numerical model used in this paper was the four-point finite difference model, which is conventionally called the Preissmann implicit model.

Using the Bio-Savart law, the Maghrebi's 2006 method simulates the effect of the wall on the velocity distribution in the flow cross-section by considering the effects of the electromagnetic forces on a particle with a static charge placed in the electric field of a wire with an electric current. In the SPM method, using the Bio-Savart law, a relationship for determining the isovel contours was presented, similar to the magnetic field law. In this method, to determine the effects of the entire flow section wall on a point (u_{SPM}), the value of u_{SPM} was computed by integrating the impact of all boundary elements on each flow point. Then, using the power-law velocity, a relationship was obtained to calculate the average value of u_{SPM} in the flow section known as U_{SPM} . In order to model the SPM method and estimate the parameters of this method, first, the values of the u_{SPM} in a series of selected points of the flow section should be computed. It is worth mentioning that the pattern of arrangement of points is important in the sections that do not have a regular geometric shape. One way to arrange the points was to cover the surfaces with triangular meshes. In this research, the Delaunay triangulation algorithm was used. The purpose of this was to maximize the angles of the triangles. After placing the triangular meshes on the flow section,

it was enough to obtain the values of u_{SPM} only in the centroid of each triangular element. In Wolfram Mathematica software, it is possible to use this grid type. The main effective parameters of the water discharge were listed as bed roughness (n), cross-sectional area (A), wetted perimeter (P), free water surface (T), bed slope (S_0), and cross-sectional flow velocity (U_{SPM}). First, the A , P , T , and U_{SPM} should be calculated at each observation level. Having obtained the characteristics of the sections and the discharge of each section at different levels, the coefficient and exponents of the proposed discharge relation were computed using the genetic algorithm process based on error minimization.

Results and Discussion: The negligible difference between the observed data and estimated flow discharge based on the SPM method confirm the accuracy of this method. It is worth mentioning that this method can consider the shape effect of the section with any complexity on the water flow using the Bio-Savart law. This work was done by simulating the cross-sectional wall and water flows, respectively, with the wire flowing the electric current and the magnetic field around it. This method estimates the stage-discharge curve and flood routing with proper accuracy, even in the flow entering the floodplain where considering the shape of the cross-section is of particular importance.

The field data used in this research has been provided from the Tiber River in Italy. In order to solve Saint-Venant's equations and determine the hydrograph of flood output, the system of equations consisting of numerical modeling should be resolved. The Gauss elimination method was used to solve this system of equations. In this research, instead of using Manning's relation to solve Saint-Venant's equations, the proposed discharge equation obtained based on the theory of the Maghrebi method was used to determine the flood output hydrograph. The final results of flood routing, based on the aforementioned method, showed that the values of Root Mean Square Error (RMSE), Normalized Root Mean Square Error (NRMSE) and Mean Absolute Percentage Error (MAPE) for the outflow stage hydrograph were 0.1196 (m³/s), 0.037 and 4.10%, respectively, and for the outflow discharge hydrograph were 10.12(m³/s), 0.029 and 11.97%, respectively. In addition, the error of the proposed method in estimating the peak discharge and the peak stage was less than 4% and also, in the case of their occurrence time, was about 2%.

Conclusion: In the proposed approach in this research, the common discharge relationships in the Saint-Venant equations have been substituted by the ones extracted from the Maghrebi method (equation 24). Based on this method, the error of the discharge estimation in natural rivers can be reduced compared to other methods, especially when the flow enters the floodplain. Finally, the estimated outflow hydrographs based on the proposed approach showed that the results were entirely consistent with the observation data at the beginning and end of the flood occurrence range. Also, the error of the considered method was negligible in the range of the peak stage and discharge and their occurrence time. Besides, the peak stage and discharge and the time of their occurrence, which are accounted as the essential indicators in hydrograph estimation, have been calculated using the proposed method with excellent accuracy.

Keywords: Unsteady flow, Isovel contours, Hydrograph, Stage-discharge, Natural rivers.



© 2023 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/>)

تخمین منحنی دبی- اشل در رودخانه‌های طبیعی با جریان غیردائمی با استفاده از روش مبتنی بر کنتورهای هم سرعت

محمد محمدی^۱ و محمود فغفور مغربی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- استاد، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

* maghrebi@um.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۸ و وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: برآورد دبی بر مبنای منحنی سنجه جریان دائمی است که مبتنی بر اندازه‌گیری همزمان تراز سطح آب و دبی می‌باشد. چنین رویکردی تنها در شرایط جریان پایدار و یا جریان ناپایداری که موج‌های سیل رفتار سینماتیک از خود نشان می‌دهند مناسب است، اما در اغلب موارد شیب انرژی متغیر، همراه با نیروهای فشار و اینرسی پویایی مربوط به دبی جریان ناپایدار، منجر به تشکیل منحنی سنجه حلقوی می‌شود و استفاده از نتایج ناشی از منحنی سنجه جریان دائمی می‌تواند خطای زیادی را به همراه داشته باشد. هدف این پژوهش، پیشنهاد و صحت‌سنجی روشی جدید و مبتنی بر ترازهای هم سرعت، در برآورد منحنی دبی-اشل و آب‌نگارهای عمق و دبی در رودخانه‌های طبیعی با جریان غیردائمی است. در این پژوهش به کمک الگوریتم ژنتیک و با بهره‌گیری از فراسنجه روش SPM و دیگر فراسنجه‌های مؤثر بر میزان دبی، رابطه‌ای برای برآورد دبی ارائه می‌شود که با استفاده از این رابطه و حل معادله‌های سنت-ونان می‌توان منحنی دبی-اشل و آب‌نگارهای عمق و دبی را محاسبه کرد. نتایج نشان داد که میزان‌های مجذور میانگین مربعات خطای عادی شده (NRMSE) و درصد میانگین خطای مطلق (MAPE) برای آب‌نگار خروجی عمق به ترتیب ۰/۳۷٪ و ۴/۱۰٪ و برای آب‌نگار خروجی دبی به ترتیب ۰/۲۹٪ و ۱۱/۹۷٪ و همچنین خطای روش پیشنهادی در برآورد میزان‌های دبی و تراز اوج کمتر از ۴٪ و در مورد زمان رخداد آن‌ها در حدود ۲٪ می‌باشد. از این روش با دقت بسیار مناسبی می‌توان منحنی دبی-اشل جریان ناپایدار و همچنین آب‌نگارهای عمق و دبی را برای رودخانه‌های طبیعی روندیابی کرد.

کلیدواژه‌گان: جریان غیردائمی، کنتورهای هم‌سرعت، هیدروگراف، دبی-اشل، رودخانه‌های طبیعی.

۱- مقدمه

کمترین برسد. در همین راستا، انتقال سیل از محیط‌های شهری به بیرون از شهرها از جمله مهم‌ترین موضوع‌ها در طراحی‌های هیدرولیکی آبراهه‌ها بوده است. از این‌رو بررسی جریان‌های غیردائمی (به سبب فصلی بودن سیلاب‌ها) در آبراهه‌های مرکب (به دلیل همانندی مقطع به رودخانه‌های طبیعی)، امری ضروری است. اندازه‌گیری دبی در رودخانه‌های متوسط و بزرگ اغلب بر پایه روش‌های نامستقیم تبدیل تراز آب به دبی با استفاده از منحنی‌های دبی-اشل جریان دائمی هستند. متأسفانه در شرایط جریان غیردائمی این روش‌ها برآورد دقیقی از دبی ارائه نمی‌دهند. در بررسی‌هایی که تاکنون انجام شده

سیل پدیده‌ای طبیعی است که جامعه‌های بشری آن را به عنوان یک رخداد اجتناب‌ناپذیر پذیرفته‌اند که در دسته رویدادهای طبیعی قرار می‌گیرد. اگر دست‌اندازی‌های انسانی مدیریت نشده، ضعف اختراع‌های بشر و جای گرفتن سکونت‌گاه و دارایی‌های بشر در معرض هجوم سیل نمی‌بود، این پدیده طبیعی آن قدر مخاطره‌آمیز نمی‌شد که در صدر فهرست مخاطره‌های طبیعی تهدید کننده حیات جمعی قرار گیرد. لذا لازم است با به‌کارگیری اصولی علمی و اجرایی، ابنیه، اماکن مسکونی و اراضی را در برابر سیل مصون کرده و یا آسیب و زیان ناشی از آن به

جریان غیردائمی را شرح داد. Perumal and Moramarco (2005) با تصحیح مشتق زمانی رابطه جونز توسط نیروهای اینرسی، رابطه منحنی سنجه جریان غیردائمی به دو صورت ارائه کرد که برآوردهای استخراج شده توسط این رابطه‌ها تنها در شرایط خاصی که شیب تراز سطح آب در طول جریان کمتر از نصف شیب بستر باشد، دقت مناسبی خواهند داشت. در کنار منحنی‌های سنجه دبی-اشل سنتی، رویکردهای دیگری برای ساخت منحنی دبی-اشل برای شرایط مختلف توسعه داده شده است، از جمله مدل چندبخشی (Reitan et al., 2009)، توسعه منحنی سنجه در رودخانه‌های اندازه‌گیری نشده، با استفاده از فراسنجه متغیر آب‌نگار تراز ماسکینگام (Perumal et al., 2011) و روش یادگیری ماشین برای مدل‌سازی رابطه دبی-اشل با استفاده از سامانه اطلاعات رودخانه‌ای (Ajmera and Goyal, 2012). منحنی‌های سنجه در آبراهه‌ها ممکن است هنگامی که طغیان در سیلابدشت رخ می‌دهد، به خوبی کار نکنند، زیرا یک تغییر پله‌ای رخ می‌دهد و منجر به عدم قطعیت زیاد در دبی‌های برآورد شده می‌شود (Heine and Pinter, 2012). Domeneghetti et al. (2012) عدم قطعیت منحنی‌های سنجه را تجزیه و تحلیل کردند و تأثیر قابل توجه خطاهای برون‌یابی و سوگیری‌ها را بر واسنجی مدل هیدرولوژیکی نشان دادند. Shao et al. (2014) روشی را برای برآورد عدم قطعیت و تصحیح سوگیری در رابطه‌های دبی-اشل ایجاد کردند، اما این روش همچنین از مسئله برون‌یابی رنج می‌برد. Shao et al. (2018) از یک مدل هیدرودینامیکی و با بهره‌گیری از تبدیل باکس-کاکس برای تولید یک رابطه دبی-اشل مصنوعی در ترازهای بالا استفاده کردند.

اندازه‌گیری دبی برای ارزیابی تعادل آبی در مقیاس حوضه آبریز، برای طراحی سازه‌های کنترل و انتقال آب، واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌های بارندگی و روندیابی سیلاب دارای اهمیت زیادی است. با این که چندین روش مستقیم اندازه‌گیری وجود دارد، اما در رودخانه‌های متوسط و بزرگ، در عمل بیشتر از روش‌های نامستقیم استفاده می‌شود.

رابطه‌های زیادی برای اصلاح میزان‌های دبی در شرایط دائمی برای برآورد رابطه‌های دبی-اشل جریان غیردائمی پیشنهاد شده است. در بیشتر این روش‌ها، روند اصلاح مبتنی بر اندازه‌گیری تراز آب در یک سطح مقطع واحد که در آن منحنی دبی-اشل جریان در دسترس است، می‌باشد و غالب رابطه‌های موجود در بررسی‌های پیشین یا بیش از حد ساده شده‌اند یا دارای خطاهایی هستند که باعث شده است خیلی قابل تعمیم نباشند (Dottori et al., 2009). Jones (1916) شناخته‌شده‌ترین رابطه در میان همه رابطه‌های موجود جریان غیردائمی را ارائه کرد که در این رابطه از شیب اصطکاکی معادله شزی و یک تحلیل هندسی برای برآورد شیب سطح آب برپایه سرعت سطحی و نرخ تغییرپذیری‌های تراز استفاده کرد. این رابطه از زمان انتشار تاکنون موضوع بسیاری از کارهای تحقیقاتی بوده است. Henderson (1966) با اضافه کردن یک ترم به رابطه جونز، بر مبنای تقریب سهموی موج سیل یک رابطه برای دبی جریان‌های غیردائمی ارائه کرد. Di Silvio (1969) با استفاده از تقریب مثلثی موج سیل و فرض منحنی سنجه حلقوی باریک رابطه‌هایی برای شاخه صعودی و نزولی موج سیل ارائه کرد. Fread (1975) با استفاده از تقریبی همانند مشتق مکانی رابطه هندرسون، یک مدل منحنی سنجه از معادله‌های کامل جریان غیردائمی یک بعدی استخراج کرد که در شرایط جریان سینماتیکی و در آبراهه‌های عریض با عرض تاحدودی ثابت برقرار است. Faye and Cherry (1980) از ترکیب معادله اندازه حرکت و پیوستگی که در آن گرادیان فشار با استفاده از برآورد موج سینماتیکی و با فرض ثابت بودن نیمرخ موج در مسیر پایین‌دست، جایگزین شده و همچنین با بهره‌گیری از روش تفاضل محدود یک رابطه واحد ارائه کردند. Lamberti and Pilati (1990) دو رابطه را برای محاسبه تفاوت بین منحنی‌های سنجه جریان دائمی و غیردائمی ارائه کردند که این معادله‌ها را می‌توان در شرایط سینماتیکی و در صورتی که منحنی سنجه حلقوی باریک باشد، اعمال کرد. Fenton (1999) با فرض معادله‌های ساده آب کم عمق و جایگزین کردن مشتقات مکانی و زمانی با سری چندجمله‌ای تیلور رابطه‌های

که ممکن است به شدت بر واسنجی و درستی مدل‌های هیدرولوژیکی تاثیرگذار باشد. اگر واسنجی با استفاده از میزان‌های دبی به‌دست‌آمده از منحنی سنجه جریان دائمی انجام شود، برآورد زمان دبی اوج دچار خطا خواهد شد، زیرا در شرایط جریان غیردائمی، دبی بیشینه پیش از تراز آب بیشینه رخ می‌دهد و این تاخیر می‌تواند در شرایط شیب ملایم رودخانه تا چندین ساعت نیز ادامه داشته باشد. برای غلبه بر مسئله‌های یاد شده روش‌های متفاوتی استفاده شده است. این روش‌ها بیشتر شامل تعدیل تجربی منحنی سنجه است که از داده‌های تجربی به‌دست آمده است. این تعدیل تجربی منحنی سنجه به‌ویژه در رودخانه‌هایی که اثرگذاری‌های پس‌زدگی آب وجود دارد نتایج دقیقی نخواهند داشت (Schmidt and Garcia, 2003). گذشته از روش‌های کم و بیش تجربی، چندین فرمول بر مبنای معادله‌های ساده شده یا کامل پویایی جریان برای محاسبه رابطه دبی-اشل ارائه گردیده است. برخی از این روش‌ها صراحتاً برای محاسبه شیب سطح آب، از اندازه‌گیری تراز سطح آب در دو مقطع مرجع استفاده می‌کنند اما بیشتر محققان به دلیل کاربردی‌تر بودن، شیب سطح آب را به مشتق زمانی تبدیل می‌کنند و با استفاده از اندازه‌گیری‌های پی‌درپی تراز آب در همان مقطعی که منحنی سنجه در دسترس است، برآورد می‌شود. با این حال بیشتر فرمول‌های ارائه شده، تحت تاثیر فرضیه‌های محدودکننده جریان و هندسه مقطع رودخانه به دست آمده‌اند و محدوده اعتبار آن‌ها کمتر مورد آزمایش قرار گرفته است. بنابراین امکان کاربردهای عملیاتی آن در طبیعت را کاهش می‌دهد (Perumal et al., 2004). روش‌هایی برای کاهش و یا حذف فرضیه‌های محدودکننده معادله‌های پویایی جریان، مبتنی بر اندازه‌گیری همزمان تراز در دو مقطع پیشنهاد شده که این روش مستلزم داشتن ویژگی‌های هندسی در دو مقطع مورد نظر است و منجر به بهبود دقت برآورد دبی و کاهش خطاهای برآورد شده است (Dottori et al., 2009). Perumal et al. (2010) روشی بر پایه روندیابی ماسکینگام برای برآورد منحنی دبی-اشل در شرایط غیردائمی ارائه کرد که به‌رغم داشتن دقت نسبی مناسب،

اغلب برآورد دبی بر مبنای رابطه یک به یک دبی-اشل و یا منحنی سنجه جریان دائمی است که بر پایه اندازه‌گیری همزمان تراز سطح آب و دبی می‌باشد و تراز اندازه‌گیری شده مستقیماً با استفاده از منحنی سنجه به دبی تبدیل می‌شود. چنین رویکردی را می‌توان برای رودخانه‌ها در شرایط جریان پایدار و یا جریان ناپایداری که موج‌های سیل رفتار سینماتیک از خود نشان می‌دهند مناسب دانست که به طور عمده در رودخانه‌هایی با شیب زیاد این‌گونه است. در اغلب موارد دیگر شیب انرژی متغیر، همراه با نیروهای فشار و اینرسی پویایی مربوط به دبی جریان ناپایدار، منجر به تشکیل منحنی سنجه حلقوی می‌شود (Fread, 1975). این بدان معناست که منحنی سنجه جریان دائمی برای توصیف رابطه واقعی دبی-اشل کافی و مناسب نمی‌باشد. نمونه‌ای از منحنی‌های سنجه حلقوی که شامل شاخه صعودی و نزولی سیلاب، نقطه دبی اوج (A) و نقطه تراز بیشینه (B) است، در شکل ۱ آورده شده است.

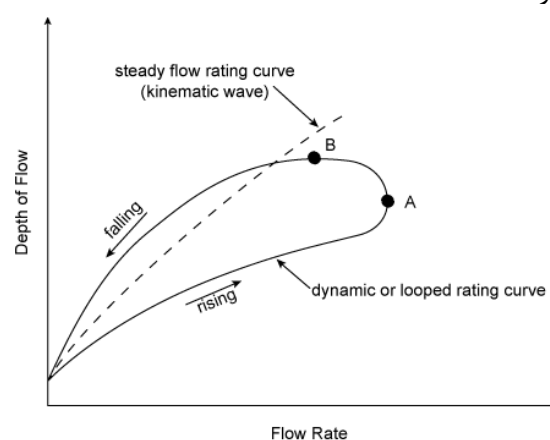


Fig. 1 Loop rating curve (Fread, 1975)
شکل ۱ منحنی سنجه حلقوی (Fread, 1975)

بررسی و ارزیابی‌های عددی نشان داده است که استفاده از منحنی سنجه جریان دائمی ممکن است منجر به خطاهای قابل توجهی در حدود بیش از ۱۵٪ در برآورد دبی زمان رخداد سیل شود. همچنین برون‌یابی منحنی سنجه، بیرون از محدوده اندازه‌گیری‌های مورد استفاده برای تهیه این منحنی نیز خود عامل خطاهای عمده‌ای می‌باشد (Baldassarre and Montanari, 2009). افزون بر خطاهای گفته شده در بالا، خطای دیگری نیز وجود دارد

در شرایط وجود جریان ورودی جانبی ناچیز هم قابل بهره‌برداری نبود.

ترازهای هم‌سرعت را برای برآورد منحنی سنجه جریان‌های دائمی در آبراهه‌های مرکب به کار گرفتند و رابطه‌ای بر مبنای اطلاعات دبی در یک تراز دلخواه و اطلاعات هندسی مقطع، ارائه کردند که منحنی سنجه جریان‌های دائمی را به خوبی برآورد می‌کند. قابل یادآوری است مهم‌ترین برتری روش ارائه شده در تحقیق یادشده این است، در شرایطی که جریان وارد سیلابدشت شده باشد دیگر روش‌های برآورد منحنی دبی-اشل جریان دائمی، دارای خطای به نسبت بالایی بوده، در شرایطی که روش ترازهای هم‌سرعت در این حالت نیز دارای دقت بسیار خوبی است.

۲-۱- معادله‌های حاکم

معادله‌های حاکم بر جریان غیردائمی که به معادله‌های سنت-ونان یا معادله‌های موج پویایی معروف هستند از معادله‌های دیفرانسیل جزئی پیوستگی و اندازه حرکت به دست آمده‌اند. برای استخراج این معادله‌های دیفرانسیل از یک حجم کنترل در طول کوچک و مشخص dx استفاده می‌شود. هنگامی که dx به سمت صفر میل کند، معادله‌های دیفرانسیل نهایی به دست می‌آیند. در ادامه به تبیین معادله‌های پیوستگی، اندازه حرکت و سنت-ونان پرداخته می‌شود.

۲-۱-۱- معادله پیوستگی

در شکل ۲ یک حجم کنترل به گستره مقطع A و طول dx در نظر گرفته شده است. قانون بقای جرم برای جریان یک سیال تراکم ناپذیر درون حجم کنترل یادشده، بیان شده است، که در آن، تغییرپذیری‌های جرم در بازه زمانی dt برابر با جریان خالص خروجی است.

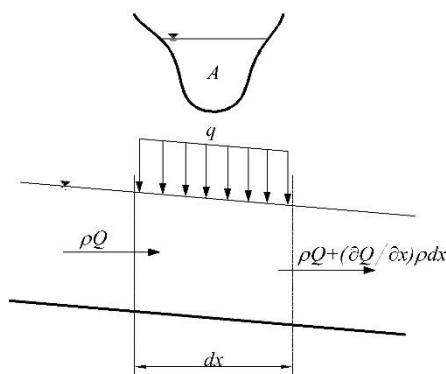


Fig. 2 Control volume of continuity equation
شکل ۲ حجم کنترل برای استخراج معادله پیوستگی

اگر دبی جانبی صفر فرض شود و دو طرف رابطه بر $dx dt$ تقسیم شود، معادله پیوستگی جریان در آبراهه‌های باز با

در شرایط وجود جریان ورودی جانبی ناچیز هم قابل بهره‌برداری نبود.

ترازهای هم‌سرعت را برای نخستین بار روش (Ahmadi and Maghrebi, 2021) برای برآورد منحنی سنجه جریان‌های دائمی در آبراهه‌های مرکب به کار گرفتند و رابطه‌ای بر مبنای اطلاعات دبی در یک تراز دلخواه و اطلاعات هندسی مقطع، ارائه کردند که منحنی سنجه جریان‌های دائمی را به خوبی برآورد می‌کند. قابل یادآوری است مهم‌ترین برتری روش ارائه شده در تحقیق یادشده این است، در شرایطی که جریان وارد سیلابدشت شده باشد دیگر روش‌های برآورد منحنی دبی-اشل جریان دائمی، دارای خطای به نسبت بالایی بوده، در شرایطی که روش ترازهای هم‌سرعت در این حالت نیز دارای دقت بسیار خوبی است.

شناخت عملکرد هیدرولیکی و تعیین منحنی دبی-اشل در مقطع‌های مرکب که شامل آبراهه اصلی و سیلابدشت‌ها هستند در شرایط جریان غیردائمی از مهم‌ترین مسئله‌ها در مهندسی هیدرولیک است. از همین رو با توجه به اهمیت موضوع روندیابی سیلاب و برآورد منحنی‌های دبی-اشل در رودخانه‌های طبیعی و آبراهه‌های مرکب، و کاستی‌های بررسی و ارزیابی‌های صورت گرفته در این زمینه، این پژوهش به برآورد منحنی دبی-اشل و آب‌نگار خروجی در آبراهه‌های با جریان غیردائمی در مقطع‌های مرکب با استفاده از روشی جدید و مبتنی بر ترازهای هم‌سرعت خواهد پرداخت.

روش پیشنهادی در این تحقیق که نخستین بار توسط (Maghrebi, 2006) ارائه شده، با عنوان روش ترازهای هم‌سرعت یا SPM نیز شناخته می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

جریان آب در طبیعت اغلب به شکل غیردائمی است، یعنی ویژگی‌های جریان نسبت به زمان ثابت نیست. علت این تغییرپذیری‌ها گاهی عامل‌های طبیعی و گاهی عامل‌های انسانی می‌باشد. سیلاب‌ها، ذوب شدن برف‌ها و عملکرد دریاچه‌ها در سازه‌های هیدرولیکی نمونه‌هایی از جریان‌های غیردائمی هستند. موج به صورت تغییر زمانی و یا مکانی

به صورت زیر نوشت:

$$-\rho g \frac{\partial(A\bar{h})}{\partial x} dx + \rho g A dx S_0 - \tau_0 P dx + \rho q v_l dx \cos \phi = \rho dx \frac{\partial VA}{\partial t} + \frac{\partial(\beta \rho V^2 A)}{\partial x} dx \quad (3)$$

که در آن q دبی جانبی در واحد طول در جهت جریان، v_l سرعت جریان ورودی جانبی که زاویه ϕ با جهت x دارد، \bar{h} فاصله عمودی سطح آزاد تا مرکز ثقل سطح مقطع جریان، A گستره سطح مقطع، P پیرامون مرطوب، S_0 شیب بستر آبراهه، ϕ زاویه بستر با افق، τ_0 تنش برشی میانگین مرزی، $\beta = \frac{A}{Q^2} \int u_x^2 dA$ ضریب تصحیح اندازه حرکت، V سرعت میانگین سطح مقطع و u_x مؤلفه سرعت در جهت x می‌باشند. معادله ۳ را بر ρdx تقسیم کرده و ساده‌سازی کرده تا معادله ۴ که موسوم به معادله اندازه حرکت است، حاصل شود:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (gA\bar{h}) = gA(S_0 - S_f) + qv_l \cos \phi$$

if $q=0 \Rightarrow$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (gA\bar{h}) = gA(S_0 - S_f) \quad (4)$$

۲-۱-۳- معادله‌های سنت-ونان و روش حل عددی آن

به منظور تحلیل جریان‌های سیلابی از ترکیب معادله‌های اندازه حرکت و پیوستگی استفاده می‌شود که با عنوان معادله‌های سنت-ونان نامیده می‌شوند. معادله‌های سنت-ونان، معادله‌های کلی حرکت جریان‌های غیردائمی هستند. این معادله‌ها دارای فرضیه‌های توزیع فشار هیدرواستاتیک، بستر آبراهه دارای شیب کم، توزیع سرعت یکنواخت و تراکم‌ناپذیر بودن جریان می‌باشند. این معادله‌ها در دسته معادله‌های دیفرانسیل جزئی از نوع هذلولی طبقه‌بندی می‌شوند. این معادله‌ها به صورت رابطه‌های ۵ و ۶ نمایش داده می‌شوند که به ترتیب بیان کننده معادله‌های پیوستگی و مومنوم هستند. (Sturm, 2001):

ثابت فرض کردن ρ به صورت زیر ارائه می‌شود (Sturm, 2001).

$$Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx dt - Q - q dx dt = -dx \frac{\partial A}{\partial t} dt \quad (1)$$

if $q=0 \Rightarrow \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$

که در آن Q دبی جریان، A سطح مقطع جریان، dx طول حجم کنترل در راستای x و q شدت جریان جانبی ورودی در واحد طول است.

۲-۱-۲- معادله اندازه حرکت

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود نیروهای فشار، گرانشی، اصطکاکی و نیروهای برشی بر حجم کنترل نشان داده شده تأثیر می‌گذارند. این نیروها بایستی معادل تغییرپذیری‌های اندازه حرکت در زمان در درون حجم کنترل و دبی خالص اندازه حرکت خروجی از حجم کنترل باشند که به شکل رابطه زیر نوشته می‌شود:

$$\sum F_x = \frac{\partial}{\partial t} \oint_{cv} u_x \rho dV + \oint_{cs} u_x \rho (u_x \cdot dA) \quad (2)$$

که در آن $\sum F_x$ برایند نیروهای وارد بر حجم کنترل که شامل نیروهای فشاری، گرانشی، برشی و اصطکاکی می‌باشند، در راستای x و عبارت‌های سمت راست به ترتیب از چپ به راست تغییرپذیری‌های اندازه حرکت با زمان در درون حجم کنترل و دبی خالص خروجی اندازه حرکت از حجم کنترل می‌باشند.

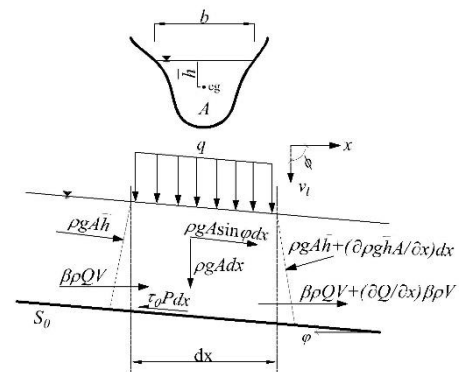


Fig. 3 Control volume of momentum equation
شکل ۳ حجم کنترل برای استخراج معادله اندازه حرکت

با توجه به توضیح‌های بالا و شکل ۳ می‌توان معادله ۲ را

میزان ضریب وزنی θ مناسب را برای جریان‌های سیلابی، برابر ۰/۵۵ پیشنهاد می‌کند.

روش‌های تفاضل محدود ضمنی برخلاف روش‌های تفاضل محدود صریح دارای شرط پایداری نمی‌باشند. روش تفاضل محدود ضمنی کمترین حساسیت را نسبت به تغییرپذیری‌های Δt در برابر ثابت Δx دارد. اما اگر Δt و Δx به گونه‌ای انتخاب شوند که عدد کورانت $\left(\frac{\Delta t / \Delta x}{|V \pm C|}\right)$ به یک نزدیک باشد، میزان خطای محاسبه‌ها به کمینه می‌رسد (Sturm, 2001)، یعنی:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{|V \pm C|} \quad (9)$$

که در آن V سرعت جریان و $C = \sqrt{gD}$ می‌باشد و D عمق هیدرولیکی است.

توضیح‌های تکمیلی در رابطه با جزئیات حل عددی به طور کامل توسط (Akan, 2006) و (Szymkiewicz, 2010) ارائه شده است.

۲-۲- روش SPM (مغربی)

ساختار جریان عبوری از مقطع‌های هیدرولیکی روباز تحت تأثیر فراسنجه‌های مختلفی هستند. روش‌های چندی برای مرتبط کردن الگوی ترازهای سرعت با میزان جریان عبوری از مقطع ارائه شده است. (Maghrebi, 2006) با استفاده از مفهوم ترازهای بی‌بعد سرعت، روش اندازه‌گیری تک نقطه‌ای سرعت (SPM) را ارائه کرد. در ادامه به تشریح معادله‌های حاکم در روش SPM و برآورد رابطه دبی با استفاده از روش SPM پرداخته شده است.

روش SPM با استفاده از قانون بیو-ساوار، تأثیر جدار بر چگونگی توزیع سرعت در مقطع عبوری جریان را با در نظر گرفتن اثرگذاری‌های ناشی از نیروی الکتریکی وارد بر یک ذره با بار ساکن که در میدان الکتریکی سیمی با جریان الکتریکی قرار می‌گیرد، شبیه‌سازی می‌کند. قانون بیو-ساوار یک معادله در الکترومغناطیس است که میدان مغناطیسی ناشی از جریان را محاسبه می‌کند. این معادله میدان مغناطیسی را به بزرگی، جهت، طول و مجاورت جریان الکتریکی مربوط می‌کند (Jackson, 1999).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (6)$$

معادله‌های سنت-ونان حل تحلیلی ندارند و بایستی برای حل آنها از مدل‌های عددی استفاده شود (Akan, 2006). مدل عددی مورد استفاده در این مقاله، مدل تفاضل محدود چهار نقطه‌ای می‌باشد که به طور مرسوم با عنوان الگوی ضمنی پریسمن نامیده می‌شود (Fread, 1993). نمایی از شبکه محاسبه‌ای الگوی پریسمن در شکل ۴ نمایش داده شده است (Szymkiewicz, 2010).

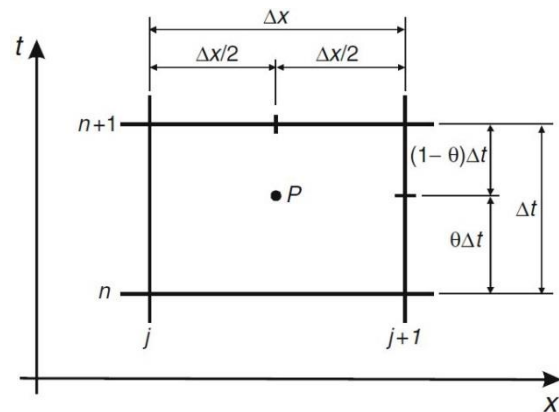


Fig. 4 Computational grid (Szymkiewicz, 2010)

شکل ۴ شبکه محاسبه‌ای روش پریسمن (Szymkiewicz, 2010)

تابع پیوسته f و مشتقات مکانی و زمانی برای شبکه نشان داده شده در شکل ۴ و ضریب‌های وزنی θ و ψ بر حسب عبارت‌های تفاضل محدود، به ترتیب برابر با رابطه‌های ۷ و ۸ تعریف می‌شوند (Szymkiewicz, 2010):

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\theta(f_{i+1}^{n+1} - f_i^{n+1}) + (1-\theta)(f_{i+1}^n + f_i^n)}{\Delta x} \quad (7)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\psi(f_{i+1}^{n+1} - f_i^{n+1}) + (1-\psi)(f_{i+1}^n + f_i^n)}{\Delta t} \quad (8)$$

که در این رابطه‌ها میزان ψ برابر با ۰/۵ می‌باشد (Szymkiewicz, 2010) و از سوی دیگر (Fread, 1974)

آشفته روی مرز صاف و برای اعداد رینولدز پایین m را معادل γ و Nikuradse (1933) برای لوله‌های صاف m را وابسته به عدد رینولدز و بین ۶ تا ۱۰ پیشنهاد کردند. قابل به یادآوری است که به علت بی‌نهایت شدن گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره، نیمرخ ناشی از قانون توانی در نزدیکی دیواره معتبر نیست، با این وجود نیمرخ ناشی از قانون توانی در محدوده قابل قبولی اعتبار دارد (Munson et al., 1995).

۲-۲-۲- روند استخراج ترازهای هم سرعت با استفاده از روش مغربی

اندیشه اصلی روش مغربی برگرفته از قانون بیو-ساوار در علم الکترومغناطیس است که این قانون در سال ۱۸۲۰ ارائه شد. باور بر این است که جنبه‌های همانند بیشتری بین جریان الکترومغناطیس و جریان آب وجود دارد که توجه چندانی به آن‌ها نشده است. در روش مغربی از همانندی میدان مغناطیسی برای تعیین رابطه و محاسبه ترازهای هم‌سرعت جریان استفاده شده است (Maghrebi, 2006).

با توجه به شکل ۵ فرض می‌شود اگر سیمی تحت تأثیر عبور جریان الکتریکی با شدت جریان برابر با I باشد، این امر سبب ایجاد میدان مغناطیسی در پیرامون آن خواهد شد. حال برای تولید میدان مغناطیسی در پیرامون سیم، عنصری از آن به طول dL در نظر گرفته می‌شود. آنگاه با توجه به قانون بیو-ساوار برای نقطه‌ای دلخواه مانند M ، بزرگی شدت میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط هر عنصر دیفرانسیلی متناسب با شدت جریان عبوری، طول عنصر سیم و زاویه مابین سیم و خط مرتبط کننده سیم به نقطه مورد نظر است. از لحاظ روند جهت‌گیری شدت میدان مغناطیسی، برابر شکل ۵ و با توجه به قانون دست

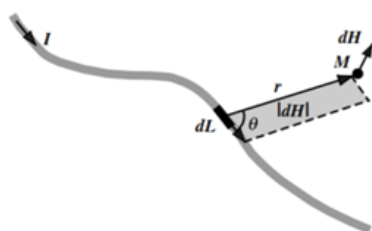


Fig. 5 Effect of magnetic field on charged particle

توزیع سرعت در مقطع عبوری جریان می‌تواند از دو قانون توانی یا لگاریتمی سرعت پیروی کند. در این پژوهش با توجه به آشفتگی جریان از روش توانی استفاده شده است که در ادامه بررسی می‌شود.

۲-۲-۱- توزیع سرعت

نظریه لایه مرزی در حالت عمومی برای حالت آشفته بر روی یک صفحه بیان می‌شود، اما این نظریه در آبراهه‌های باز با وجود وجه اشتراک زیاد با جریان لایه مرزی دوبعدی بر روی صفحه، تفاوت‌هایی را نشان می‌دهد. با ورود جریان به آبراهه، یک لایه نازک بر جدار تشکیل شده و تنش‌های اصطکاکی شدید در بستر ایجاد می‌شود. لایه مرزی ایجاد شده در بالادست، با حرکت به سمت پایین دست به سطح آب رشد کرده و در فاصله‌ای معین از ورودی، به توسعه یافتگی کامل می‌رسد. بر مبنای تقسیم‌بندی‌های کلی، تنش برشی به دو دسته تنش‌های آرام و آشفته تقسیم می‌شود. از سوی دیگر دو رویکرد کلی برای توزیع سرعت جریان ارائه شده است که این دو رویکرد تحت دو قانون لگاریتمی و قانون توانی سرعت بیان می‌شوند. قانون لگاریتمی که بر مبنای نظریه آشفتگی استخراج شده، در ناحیه‌ای جزئی در نزدیکی بستر دارای دقت کافی است و قانون توانی که مبنایی تجربی داشته، در محدوده بیشتری از عمق جریان کاربرد دارد. گرچه قانون لگاریتمی نمی‌تواند سرعت را بر روی جدار و قانون توانی گرادیان سرعت را در جدار ارزیابی کند اما به خاطر سادگی کار با رابطه جبری توانی سرعت، در این پژوهش از قانون توانی سرعت استفاده شده است.

۲-۲-۱-۱- قانون توانی

قانون توانی برای برآورد توزیع سرعت در آبراهه‌های باز عریض بر روی صفحه تخت برابر با رابطه ۱۰ است:

$$\frac{u}{u_{max}} = \left(\frac{z}{h} \right)^{1/m} \quad (10)$$

که در آن u سرعت در فاصله z از بستر، u_{max} سرعت بیشینه است که در سطح آب رخ می‌دهد و $1/m$ شاخص قانون توانی سرعت می‌باشد. (Prandtl 1933) برای جریان

مرزی بر روی هر نقطه از جریان میزان u_{SPM} محاسبه می‌شود:

$$u_{SPM} \mathbf{i} = \int_{\text{boundary}} f(\mathbf{r}) \times c_1 ds \quad (13)$$

که در آن \mathbf{i} بردار یکه موازی با جهت جریان یا به عبارت دیگر هم‌جهت با محور x است. از سویی مشخص است که حاصل ضرب بیرونی دو بردار $\mathbf{r} \times ds$ ، میدانی به بزرگی $r \cdot ds \cdot \sin \theta$ در جهت جریان ایجاد می‌کند، بنابراین خواهیم داشت:

$$u_{SPM} = \int_{\text{boundary}} c_1 \cdot \sin \theta \cdot f(\mathbf{r}) \cdot ds \quad (14)$$

که در آن θ زاویه بین بردار موقعیت و بردار عنصر مرزی است. گام بعدی این روش، جستجو برای تعیین بهترین تابع سرعت وابسته به r است. الگوی توزیع سرعت در آبراهه‌های باز برای جریان لایه‌ای یک توزیع سهمی شکل است درحالی‌که در حالت آشفته توزیع آن با استفاده از قانون توانی و لگاریتمی بیان می‌شود. به طور معمول در مجاری بسته و باز با توجه به آشفتگی جریان از قانون توانی سرعت برای برآورد توزیع نیمرخ سرعت استفاده می‌شود (Chen and Chiew, 2004). تابع سرعت در معادله ۱۴ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f(\mathbf{r}) = u_* \left(c_2 r^m \right) \quad (15)$$

که در آن c_2 ضریب مرتبط با آشفتگی و تنش برشی جدار و u_* سرعت برشی ($u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$) است. با جایگذاری معادله ۱۵ در معادله ۱۴ می‌توان در هر نقطه دلخواه با مختصات (y, z) میزان $u_{SPM}(y, z)$ را به دست آورد:

$$u_{SPM}(y, z) = \int_{\text{boundary}} c_1 \cdot c_2 \cdot \sin \theta \cdot u_* \left(c_2 r^m \right) \cdot ds \quad (16)$$

با در نظر گرفتن میزان $c_3 = c_1 \cdot c_2 \cdot u_*$ و $m=7$ رابطه بالا به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

(Maghrebi, 2006)

شکل ۵ تأثیر میدان مغناطیسی بر ذره باردار (Maghrebi, 2006)

راست، میدان عمود بر صفحه تشکیل شده از بردار عنصر سیم و بردار ترسیم شده از سیم تا نقطه مورد نظر است. قانون بیو-ساوار بر مبنای ساختار برداری به صورت زیر است:

$$d\mathbf{H} = \frac{Id\mathbf{L} \times \mathbf{r}}{4\pi r^3} \quad (11)$$

که در آن H شدت میدان مغناطیسی، r بردار موقعیت که عنصر را به نقطه مورد نظر متصل می‌کند. اکنون در روش SPM، برابر شکل ۶ از این مدل برای شبیه سازی مقطع جریان از یک آبراهه روباز استفاده می‌شود و رابطه ای برای تعیین ترازهای هم سرعت همانند با قانون میدان مغناطیسی ارائه می‌شود.

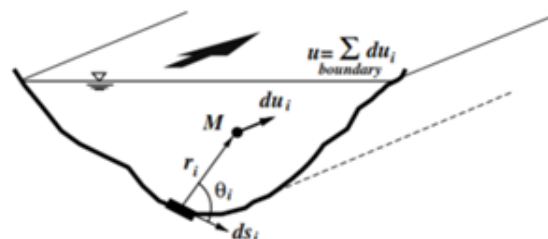


Fig. 6 Effect of the boundary element on a point in the flow section (Maghrebi, 2006)

شکل ۶ تأثیر عنصر مرزی بر نقطه‌ای دلخواه در مقطع جریان (Maghrebi, 2006)

بر این مبنا تأثیر طول محدودی از مرز (ds) بر روی نقطه‌ای دلخواه در مقطع از رابطه ۱۲ به دست می‌آید:

$$du_{SPM} = f(\mathbf{r}) \times c_1 ds \quad (12)$$

که در آن du_{SPM} انحراف تغییرپذیری‌های سرعت ناشی از عنصر مرزی مانند ds در روش مغربی، r برداری مابین عنصر مرزی و نقطه مورد نظر، $f(\mathbf{r})$ تابع سرعت حاکم بر میدان جریان، c_1 ثابت مرتبط با زبری و آشفتگی جدار است. در این روش برای تعیین اثرگذاری‌های کل جدار جریان بر یک نقطه (u_{SPM})، طول محیط تر شده از ساحل چپ تا ساحل راست به عنصرهای مرزی ds تقسیم می‌شود. با انتگرال‌گیری از اثرگذاری‌های همه‌ی عنصرهای

نقطه‌ها و خط‌پر در بخش بالایی شکل ۷ به ترتیب میزان‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده نسبت سرعت سطحی به سرعت میانگین مقطع رودخانه اونان می‌باشند. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود دقت روش مغربی در برآورد ترازهای هم‌سرعت بسیار مناسب است. اگرچه در نزدیکی دیواره‌ها خطای برآورد بیشتر است، اما در محدوده‌های میانی مقطع جریان خطای این روش در حدود $\pm 5\%$ است.

۲-۲-۳- روند محاسبه فراسنجه U_{SPM}

در صورتی که مقطع جریان دارای پیچیدگی‌های هندسی نباشد، محاسبه‌های روش SPM به راحتی امکان‌پذیر است، اما هنگامی که مقطع هندسی دارای پستی، بلندی و خمیدگی در بستر باشد، نیاز به راهکاری برای ساده سازی مدل SPM وجود دارد. بدین منظور می‌بایست چگونگی تعیین نقطه‌های مورد نظر را بر روی مقطع جریان بررسی کرد.

برای مدل‌سازی روش مغربی و محاسبه‌های فراسنجه‌های این روش، در آغاز می‌بایست نقطه‌هایی در مقطع جریان در نظر گرفته شود که میزان‌های u_{SPM} در آن‌ها حساب شوند. این نقطه‌ها می‌توانند دارای ساختار منظمی باشند و شبکه‌بندی منظم داشته باشند، به عنوان مثال، همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، الگوی انتخاب نقطه‌ها به صورت ردیف و ستون‌هایی با فاصله‌های ثابت می‌باشد. محاسبه میزان U_{SPM} در این الگو از تقسیم مجموع میزان‌های U_{SPM} محاسبه شده برای همه‌ی نقطه‌ها بر شمار نقطه‌ها به دست می‌آید. این نکته لازم به یادآوری است که این الگوی چیدمان نقطه‌ها در مقطع‌هایی که شکل هندسی منظمی ندارند، مسئله‌ساز خواهد بود. در مقطع هیدرولیکی شکل ۸ که از الگوی نقطه‌های با فاصله‌های ثابت استفاده شده است، منطقه‌هایی از مقطع جریان وجود خواهند داشت که شمار نقطه‌های کمی در آن منطقه‌ها برای محاسبه‌ها در دسترس می‌باشد. همچنین به دلیل میانگین‌گیری میزان‌های u_{SPM} ، این میزان در نزدیکی مرز جریان نماینده مساحت کمتری خواهد بود و بنابراین باید تأثیرگذاری این فراسنجه در

$$u_{SPM}(y, z) = \int_{boundary} c_3 \left(\frac{1}{r^7} \right) \sin \theta ds \quad (17)$$

بزرگی میزان به دست آمده از معادله بالا به خودی خود معنایی ندارد اما میزان بی‌بعد شده آن نقش مهمی در روش تک نقطه‌ای سرعت ایفا می‌کند. میزان میانگین u_{SPM} در مقطع جریان (U_{SPM}) را می‌توان از معادله ۱۸ به دست آورد:

$$U_{SPM} = \frac{\int u_{SPM}(y, z) dA}{A} \quad (18)$$

در معادله ۱۸ اگر میزان $u_{SPM}(y, z)$ بر U_{SPM} تقسیم شود، فراسنجه مربوط به تراز بدون بعد سرعت Cn ، برای مختصات مورد نظر به دست می‌آید:

$$Cn(y, z) = \frac{u_{SPM}(y, z)}{U_{SPM}} \quad (19)$$

با داشتن میزان Cn در نقطه‌ای اندازه‌گیری سرعت u_M می‌توان میزان سرعت میانگین کل مقطع U را با استفاده از معادله زیر محاسبه کرد:

$$U = \frac{u_M(y, z)}{Cn(y, z)} \quad (20)$$

در شکل ۷ ترازهای هم‌سرعت بی‌بعد شده به دست آمده از این روش در مقطع رودخانه اونان نشان داده شده است.

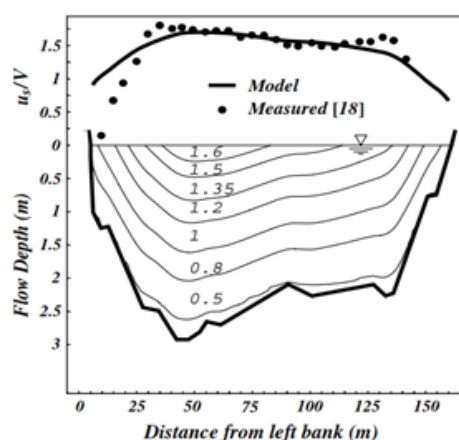


Fig. 7 Contours estimated by Maghrebi's method in Unon river section

شکل ۷ ترازهای به دست آمده از روش مغربی در مقطع رودخانه اونان (Maghrebi, 2006)

بین زاویه‌های مثلث‌ها را تولید کرده و با استفاده از مثلث‌های با نسبت‌های کوچک می‌تواند عنصرهای مثلثی را با تراکم دلخواه در فاصله‌های کوچک قرار دهد. این الگوریتم ارتباط بین عنصرهای بسیار ریز و با تراکم بالا و عنصرهای بزرگ و با تراکم کم را با افزایش تدریجی گستره عنصرها برقرار می‌کند.

به وسیله شبکه‌بندی ناساختارمند مثلثی دلونی در مقطع جریان، در عمل امکان استفاده از رابطه ۱۷ وجود خواهد داشت. در نرم‌افزار Wolfram Mathematica امکان استفاده از این نوع شبکه‌بندی فراهم شده است. نرم‌افزار Wolfram Mathematica یک سامانه محاسبه‌های فنی پیشرفته است که شامل بیشتر حوزه‌های محاسبه‌ها از جمله شبکه‌های عصبی، یادگیری ماشین، پردازش تصویر، هندسه، علم داده، مصورسازی داده و غیره می‌شود. این نرم‌افزار از جمله ابزار مهم در حوزه محاسبه‌های نمادین در ریاضیات است که قادر به انجام بسیاری از عملیات و محاسبه‌ها به صورت نمادهای ریاضیاتی می‌باشد و با تکیه بر زبان Wolfram برای انجام محاسبه‌های ریاضی و مهندسی به صورت عددی یا تحلیلی، از بهترین گزینه‌ها به شمار می‌آید. برابر شکل ۱۰ پس از قرار دادن شبکه بر روی مقطع جریان تنها کافی است میزان‌های u_{SPM} تنها در مرکز سطح (به عنوان نماینده‌ای از عنصر مثلثی) هر یک از عنصرهای مثلثی به دست آید.

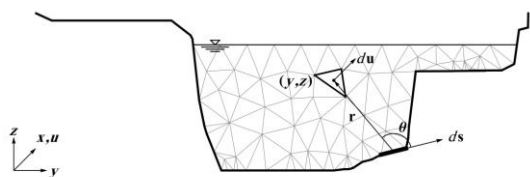


Fig. 10 Triangular elements on the flow section and parameters of Maghrebi's method

شکل ۱۰ نمایش عنصربندی مثلثی بر روی مقطع جریان و فراسنجه‌های روش مغربی

۲-۳- محاسبه رابطه دبی

فراسنجه‌هایی مانند زبری بستر n ، گستره مقطع جریان A محیط‌تر شده P ، طول سطح آزاد آب T ، شیب بستر S_0 و سرعت جریان در مقطع U_{SPM} ، در میزان دبی تأثیرگذار هستند. در واقع می‌توان گفت:

نزدیکی مرزها کمتر شود.

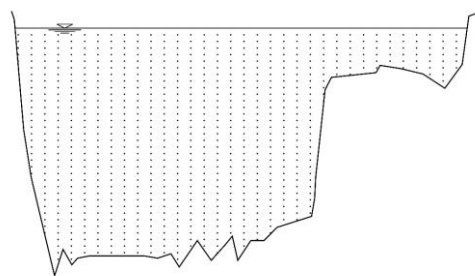


Fig. 8 Regular pattern of placing points on the compound flow section

شکل ۸ نمایش الگوی منظم قرارگیری نقطه‌ها بر روی مقطع مرکب

یک روش برای حل این چالش جایگزینی شبکه‌بندی منظم با شبکه‌بندی بی‌سازمان یا مثلث‌بندی سطح‌ها است. شبکه‌بندی بی‌سازمان اغلب در قالب الگوریتم مثلث‌بندی بیان می‌شود. مثلث‌بندی روشی برای تقسیم‌بندی سطح یا فضا به عنصرهای مثلثی یا هرمی شکل است که از مجموعه‌ای از نقطه‌های احاطه کننده بر آن سطح یا فضا استفاده می‌کند. الگوریتم‌های گوناگونی برای مثلث‌بندی سطح‌ها ارائه شده است. در این پژوهش از الگوریتم مثلث‌بندی دلونی که هدف بیشینه‌سازی زاویه‌های مثلث‌های شکل گرفته و یا کمینه‌سازی اختلاف زاویه‌ها نسبت به یکدیگر بوده که در عمل به معنای آنست که دایره محیطی هر مثلث، شامل نقطه‌های دیگری از مثلث‌های پیرامونی نشود. در شکل ۹ شرط دایره محیطی که رکن اصلی الگوریتم مثلث‌بندی دلونی است، نمایش داده شده است.

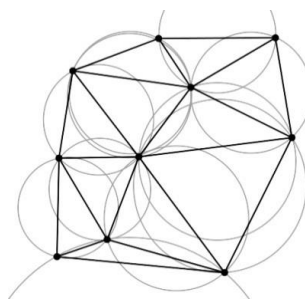


Fig. 9 The circle condition in Delaunay's triangulation algorithm
شکل ۹ شرط دایره در الگوریتم مثلث‌بندی دلونی

برای بهبود عملکرد روش مثلث‌بندی دلونی در فضای دوبعدی می‌توان از الگوریتم روپرت (Ruppert, 1995) استفاده کرد. این الگوریتم عنصرهایی با کمترین اختلاف

| a ₁ | a ₂ | a ₃ | a ₄ | a ₅ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1.0342 | 1.8018 | -0.2966 | -0.5089 | -0.0168 |

از تحلیل‌های صورت گرفته در جدول ۱ آمده است. که در نهایت رابطه پیشنهادی دبی به شکل رابطه ۲۴ خواهد بود:

$$Q = \frac{1.0342}{n} S^{1/2} (A)^{1.8018} (U_{SPM})^{-0.2966} (P)^{-0.5089} (T)^{-0.0168} \quad (24)$$

در شکل ۱۲ نمودار دبی مشاهده‌ای و دبی برآوردشده از روش SPM نشان داده شده است که دقت مناسب برآورد دبی به این روش قابل مشاهده می‌باشد.

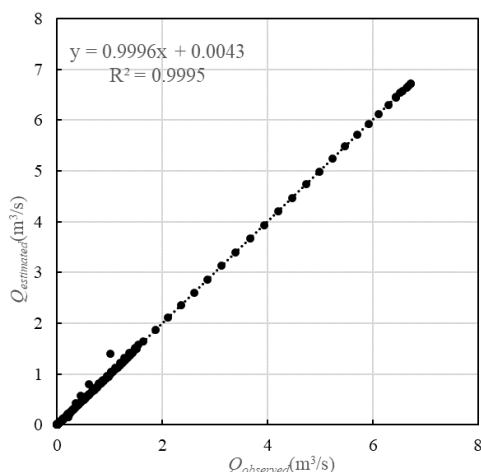


Fig. 12 Observed and estimated discharge

شکل ۱۲ دبی مشاهده‌ای و برآوردشده با رابطه پیشنهادی

میزان‌های مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، مجذور میانگین مربعات خطای عادی شده (NRMSE) و درصد میانگین خطای مطلق (MAPE) از رابطه‌های ۲۵ تا ۲۷ محاسبه می‌شوند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((Q_o)_i - (Q_e)_i)^2} \quad (25)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((Q_o)_i - (Q_e)_i)^2}}{(Q_o)_{\max} - (Q_o)_{\min}} \quad (26)$$

$$MAPE(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{(Q_o)_i - (Q_e)_i}{(Q_o)_i} \right| \quad (27)$$

$$Q = f(n, A, P, T, U_{SPM}, S_0) \quad (21)$$

همچنین شکل کلی رابطه پیشنهادی برای برآورد دبی به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$Q = \frac{a_1}{n} S_0^{1/2} (A)^{a_2} (U_{SPM})^{a_3} (P)^{a_4} (T)^{a_5} \quad (22)$$

برای تعیین ضریب a_1 و توان‌های a_2, a_3, a_4, a_5 از مقطع‌های مثلثی، مستطیلی، دایره‌ای و مرکب نمایش داده شده در شکل ۱۱ استفاده شد.

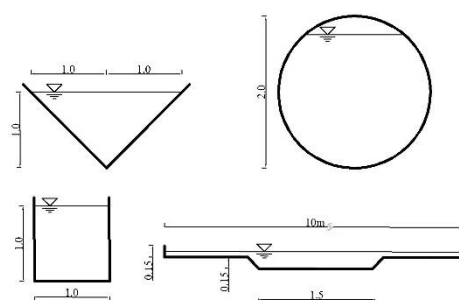


Fig. 11 Sections used to estimate the discharge relation
شکل ۱۱ مقطع‌های مورد استفاده برای محاسبه رابطه دبی

برای تعیین ضریب و توان‌های رابطه پیشنهادی در آغاز باید میزان‌های A, P, T, U_{SPM} در هر یک از ترازهای مشاهده‌ای محاسبه شود. با داشتن ویژگی‌های مقطع‌ها و دبی هر مقطع در ترازهای مختلف، ضریب a_1 و توان‌های a_2, a_3, a_4, a_5 با استفاده از فرآیند الگوریتم ژنتیک، بر مبنای کمینه سازی خطا محاسبه می‌شود. تابع خطای مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک برابر با رابطه ۲۳ می‌باشد:

$$Error = \sum_{i=1}^{i=w} |Q_o - Q_e| \quad (23)$$

که در این رابطه، Q_o دبی مشاهده‌ای و Q_e معرف دبی محاسبه شده بر مبنای رابطه پیشنهادی و w شمار بارهای اجرای برنامه می‌باشد. بر پایه الگوریتم ژنتیک و با سعی و خطا بهترین میزان‌ها برای توان‌ها به گونه‌ای محاسبه می‌شود که میزان خطا به کمینه برسد. نتایج به دست آمده جدول ۱ میزان‌های ضریب و توان‌های به دست آمده رابطه دبی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

Table 1 Coefficient and power values obtained from discharge relationship using genetic algorithm

در حل معادله‌های سنت-ونان نیاز به محاسبه $\frac{dS_f}{dQ}$ و $\frac{dS_f}{dh}$ می‌باشد که با توجه به مطالب یاد شده به جای مشتق‌گیری از رابطه مانینگ از رابطه ۲۸ مشتق‌گیری می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که در صورت استفاده از رابطه ۲۸ به جای رابطه مانینگ برای محاسبه شیب اصطکاکی در معادله‌های سنت-ونان، در صورت ورود جریان به بخش سیلاب‌دستی محدودیت‌های استفاده از رابطه مانینگ وجود نخواهد داشت.

۲-۴- به کارگیری رابطه دبی استخراج شده از روش SPM در جریان غیردائمی

داده‌های میدانی که در این پژوهش استفاده شده، داده‌های مربوط به رودخانه تایبر در کشور ایتالیا است. این داده‌ها مربوط به پژوهش (Perumal et al., 2007) می‌باشد. طول بازه مورد بررسی رودخانه تایبر که بین دو ایستگاه Pierantonio و Felcino قرار دارد، ۱۵ کیلومتر و میانگین شیب طولی آن ۰/۰۱۶ می‌باشد. بهترین میزان ضریب زبری مانینگ بر مبنای واسنجی برای این رودخانه در هر دو مقطع ۰/۰۴۹ برآورد شده است و ویژگی‌های مربوط به سطح مقطع این رودخانه در دو ایستگاه Pierantonio و Felcino و سطح مقطع معادل در این دو ایستگاه برابر با شکل ۱۳ است.

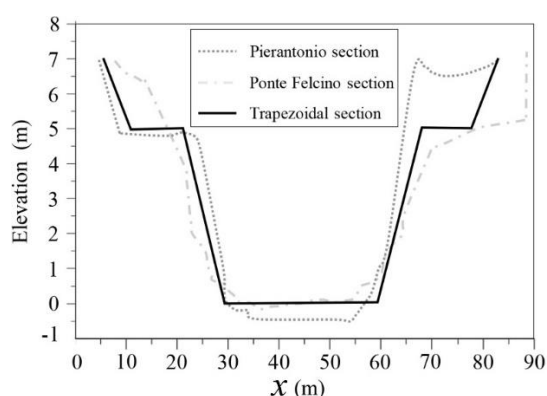


Fig. 13 Channel cross-section at Pierantonio and Felcino stations in Tiber River, Italy (Perumal et al., 2007)
 شکل ۱۳ سطح مقطع آبراهه در دو ایستگاه Pierantonio و Felcino در رودخانه تایبر ایتالیا (Perumal et al., 2007)

داده‌های مربوط به آب‌نگارهای عمق و دبی مربوط در دو

که در آن N شمار داده‌ها، نمایه o نشانگر داده‌های مشاهده‌ای و نمایه e نشانگر داده‌های محاسبه‌ای هستند. خطاهای یاد شده در رابطه‌های ۲۵ تا ۲۷ برای رابطه پیشنهادی به تفکیک نوع مقطع و در همه‌ی مقطع‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲ میزان‌های خطای RMSE، NRMSE و MAPE رابطه پیشنهادی

Table 2 The RMSE, NRMSE and MAPE error values of the proposed relationship

| Section | RMSE (m^3s^{-1}) | NRMSE | MAPE (%) |
|--------------|----------------------|---------------|--------------|
| TRI | 0.0139 | 0.0088 | 4.688 |
| REC | 0.0157 | 0.0105 | 2.720 |
| CIR | 0.0037 | 0.0006 | 0.354 |
| FCF S1 | 0.1270 | 0.1252 | 18.193 |
| Total | 0.0414 | 0.0062 | 4.10% |

بنا بر نتایج موجود در جدول بالا، هر ۳ خطای محاسبه شده نشان می‌دهد که دقت رابطه پیشنهادی برآورد دبی (رابطه ۲۴) که در آن از فراسنجه روش SPM استفاده شده است در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای که برگرفته از رابطه مانینگ می‌باشد بسیار مناسب و قابل اتکا می‌باشد.

۲-۳-۱- محاسبه رابطه شیب اصطکاکی

همان‌طور که در رابطه‌های سنت-ونان (رابطه‌های ۵ و ۶) نمایش داده شد، برای تحلیل جریان‌های غیردائمی نیاز به محاسبه شیب اصطکاکی است. بر پایه دانش کنونی هیدرولیک و در یک دیدگاه کاربردی، رابطه مورد استفاده در برآورد شیب اصطکاکی همان رابطه مانینگ است. اما این رابطه دارای محدودیت‌های زیادی است و در صورت ورود جریان به بخش سیلاب‌دستی، خطای استفاده از رابطه مانینگ برای محاسبه شیب اصطکاکی قابل توجه خواهد بود. لذا در این پژوهش، برای برطرف کردن این مسئله شیب اصطکاکی با توجه به رابطه ۲۴ محاسبه شده است و لذا می‌توان نوشت:

$$S_f = \frac{Q^2 n^2 U_{SPM}^{0.5932} P^{1.0178} T^{0.0336}}{1.0696 A^{3.6036}} \quad (28)$$

$$\frac{dS_f}{dQ} = \frac{2Qn^2 U_{SPM}^{0.5932} P^{1.0178} T^{0.0336}}{1.0696A^{3.6036}} \quad (32)$$

برای محاسبه $\frac{dU_{SPM}}{dh}$ بایستی رابطه‌ای بین U_{SPM} و تراز سطح آب در رودخانه تایبر استخراج کرد. برای این کار در ترازهای مختلف، U_{SPM} را همان‌طور که در بخش ۲-۲-۳ شرح داده شد، محاسبه و بهترین رابطه بین U_{SPM} و تراز به دست می‌آید. بهترین رابطه با کمترین خطا ($R^2=0.9997$) برای رودخانه تایبر به صورت زیر است:

$$U_{SPM} = -0.2336h^2 + 6.5894h + 0.4064 \quad (33)$$

پس با توجه با رابطه ۳۳ خواهیم داشت:

$$\frac{dU_{SPM}}{dh} = -0.4672h + 6.5894 \quad (34)$$

با داشتن مشتقات رابطه‌های ۲۹ تا ۳۴ و رابطه ۲۸ برای

محاسبه $\frac{dS_f}{dh}$ خواهیم داشت:

$$\frac{dS_f}{dh} = \frac{j'k - k'j}{k^2} \quad (35)$$

که در آن فراسنجه‌های j, k, j', k' به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$j = Q^2 n^2 U_{SPM}^{0.5932} P^{1.0178} T^{0.0336} \quad (36)$$

$$k = 1.0696A^{3.6036} \quad (37)$$

$$j' = 2Qn^2 (0.5932U_{SPM} \frac{dU_{SPM}}{dh} P^{1.0178} T^{0.0336} + 1.0178P^{0.0178} \frac{dP}{dh} U_{SPM}^{0.5932} T^{0.0336} + 0.0336T^{-0.9664} U^{0.5932} P^{1.0178} \frac{dT}{dh}) \quad (38)$$

$$k' = 3.8544A^{2.6036} \frac{dA}{dh} \quad (39)$$

۳- نتایج و بحث

برای حل معادله‌های سنت ونان و محاسبه آب‌نگار خروجی سیل بایستی دستگاه معادله‌های تشکیل شده از مدلسازی عددی حل شود. برای حل این دستگاه معادله از روش حذفی گوس استفاده می‌شود. در این روش از یک فرایند تکرار استفاده می‌شود. در این حالت پس از حل دستگاه و

ایستگاه Pierantonio و Felcino در دسترس می‌باشد که در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نمایش داده شده است.

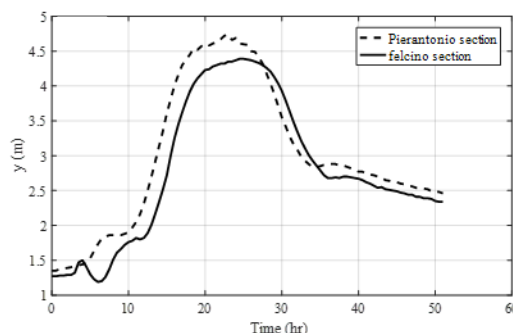


Fig. 14 Depth hydrograph at Pierantonio and Felcino stations

شکل ۱۴ آب‌نگار عمق در دو ایستگاه Pierantonio و Felcino

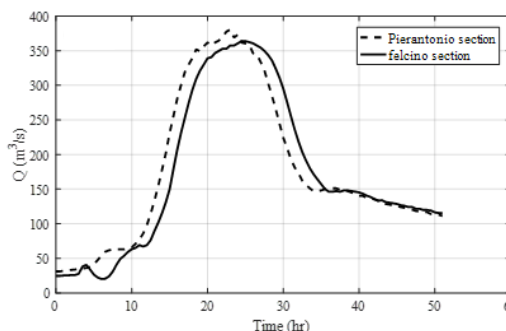


Fig. 15 Discharge hydrograph at Pierantonio and Felcino stations

شکل ۱۵ آب‌نگار دبی در دو ایستگاه Pierantonio و Felcino

فراسنجه‌های $\frac{dA}{dh}, \frac{dP}{dh}, \frac{dT}{dh}$ با توجه به هندسه دوزنقه‌ای

مفروض و با دانستن شیب کناره‌های S_c و عرض کف b مقطع رودخانه تایبر محاسبه می‌شود:

$$\frac{dT}{dh} = 2S_c \quad (29)$$

$$\frac{dP}{dh} = 2\sqrt{1+S_c^2} \quad (30)$$

$$\frac{dA}{dh} = b + 2S_c y \quad (31)$$

در بخش پیش عنوان شد که پس از محاسبه U_{SPM} و دبی به روش مغربی، به کمک این رابطه می‌توان S_f را برابر

رابطه ۲۸ نوشت. با استفاده از رابطه ۲۸ به شکل

رابطه ۳۲ خواهد بود:

به شکل ۱۶ باشد، فراسنجه‌های خطای رایج در تحقیقات شامل میزان‌های مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، مجذور میانگین مربعات خطای عادی شده (NRMSE) و درصد میانگین خطای مطلق (MAPE) در جدول ۳ ارائه شده است:

جدول ۳ میزان‌های خطای RMSE، NRMSE و MAPE

آب‌نگار خروجی عمق مشاهده‌ای و محاسبه‌ای سیلاب ۱۹۹۶ رودخانه تایبر

Table 3 The RMSE, NRMSE, and MAPE error values of the estimated outflow stage hydrograph in the Tiber River flood event in 1996

| Flood | RMSE (m) | NRMSE | MAPE (%) |
|----------------|----------|--------|----------|
| Tiber Dec.1996 | 0.1196 | 0.0374 | 4.10 |

همچنین با توجه به اهمیت تراز بیشینه و زمان رخداد آن که پیشتر بحث شد، خطاهای مرتبط با آن در جدول ۴ آورده شده است:

جدول ۴ میزان‌های خطای برآورد تراز بیشینه و زمان رخداد

آن در سیلاب ۱۹۹۶ رودخانه تایبر

Table 4 Peak stage error values and time of occurrence in the Tiber River flood event in 1996

| | Observed (O) | Estimated (E) | Error ((O-E)) | Error (%) |
|-------|--------------|---------------|---------------|-----------|
| h_p | 4.39 (m) | 4.55 (m) | 0.16 (m) | 3.64 |
| t_p | 24.5 (hr) | 24 (hr) | 0.5 (hr) | 2.04 |

در ادامه نتایج برآورد آب‌نگار دبی در شکل ۱۷ ارائه شده است.

توضیح‌هایی که در مورد دقت روش SPM پس از آب‌نگار تراز در شکل ۱۶ آورده شد، در رابطه با آب‌نگار شکل ۱۷ نیز صدق کرده که گواه دقت بالای روش پیشنهادی در برآورد آب‌نگار دبی می‌باشد. در ادامه میزان‌های خطای آب‌نگار خروجی دبی برآورد شده برای رودخانه تایبر در این سیلاب نیز به شرح زیر است:

تعیین همگی مجهول‌ها، در حلقه بعدی این میزان‌ها به عنوان حدس اولیه اعمال می‌شوند و میزان‌های جدیدی برای مجهول‌ها به دست می‌آید و بار دیگر این میزان‌ها به عنوان حدس اولیه به دستگاه معادله‌ها اعمال می‌شود. این فرایند تا هنگامی که پاسخ‌ها به میزان‌های حقیقی خود همگرا شوند ادامه پیدا می‌کند. رابطه‌های زیر این فرایند تکرار را بیان می‌کنند:

$$(Q_i^{(n+1)})^{(k+1)} = (Q_i^{(n+1)})^k + (\Delta Q)^k \quad (40)$$

$$(h_i^{(n+1)})^{(k+1)} = (h_i^{(n+1)})^k + (\Delta h)^k \quad (41)$$

با استفاده از فراسنجه‌های $\frac{dS_f}{dQ}$ ، $\frac{dA}{dh}$ ، $\frac{dP}{dh}$ ، $\frac{dT}{dh}$

و $\frac{dU_{SPM}}{dh}$ که در رابطه‌های ۲۹ تا ۳۹ برای

رودخانه تایبر محاسبه شده است و همچنین بهره‌گیری از کدنویسی حل معادله به روش پریسمن در نرم افزار MATLAB، دستگاه معادله‌های نام‌برده حل شده و نتایج برآورد آب‌نگار عمق در شکل ۱۶ آورده شده است:

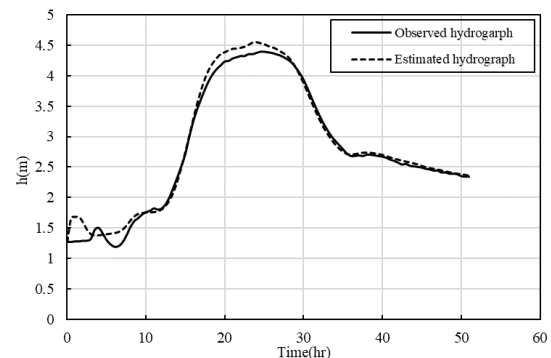


Fig. 16 Observed and estimated outflow stage hydrograph

شکل ۱۶ آب‌نگار مشاهده‌ای و محاسبه‌ای خروجی عمق

همان‌طور که از شکل ۱۶ پیداست افزون بر این که در آغاز و پایان رخداد سیلاب نتایج کامل همخوان با مشاهده‌ها می‌باشد، دیده می‌شود در محدوده زمان رخداد تراز بیشینه که یکی از شاخص‌های با اهمیت در برآورد آب‌نگار است نیز دقت روش پیشنهادی بسیار مناسب می‌باشد. همچنین برای ارائه شاخصی که نمایانگر دقت روش پیشنهادی SPM در طول کل زمان رخداد سیلاب مربوط

نمایش داده شده است.

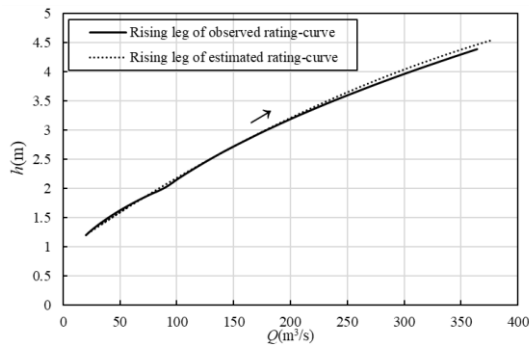


Fig. 18 Observed and estimated rising limb of outflow rating-curve

شکل ۱۸ شاخه صعودی منحنی دبی-اشل جریان خروجی مشاهده‌ای و برآوردشده

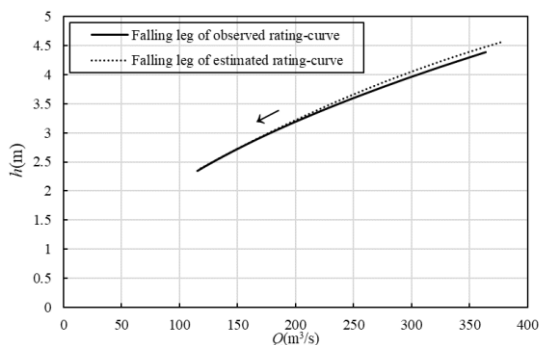


Fig. 19 Observed and estimated falling limb of outflow rating-curve

شکل ۱۹ شاخه نزولی منحنی دبی-اشل جریان خروجی مشاهده‌ای و برآوردشده

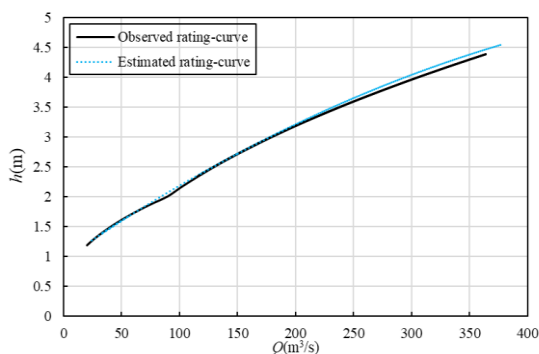


Fig. 20 Observed and estimated outflow rating-curve

شکل ۲۰ منحنی دبی-اشل جریان خروجی مشاهده‌ای و برآوردشده

با توجه به ویژگی‌های سیلاب مورد بررسی، در شکل فوق مشاهده می‌شود که شاخه‌های صعودی و نزولی منحنی دبی-اشل بسیار نزدیک به یکدیگر هستند.

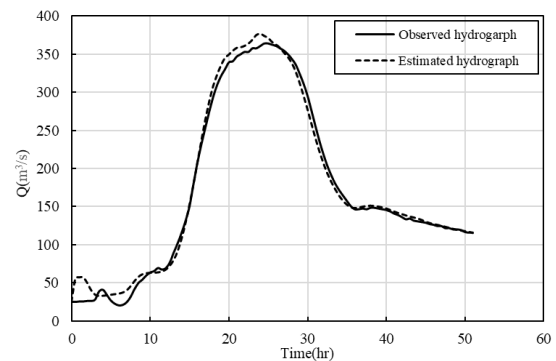


Fig. 17 Observed and estimated outflow discharge hydrograph

شکل ۱۷ آب‌نگار مشاهده‌ای و محاسبه‌ای خروجی دبی

جدول ۵ میزان‌های خطای RMSE، NRMSE و MAPE

آب‌نگار خروجی دبی محاسبه‌ای سیلاب ۱۹۹۶ رودخانه تایبر

Table 5 The RMSE, NRMSE, and MAPE error values of the hydrograph of the estimated discharge in the Tiber River flood event in 1996

| Flood | RMSE (m^3s^{-1}) | NRMSE | MAPE (%) |
|----------------|----------------------|-------|----------|
| Tiber Dec.1996 | 10.12 | 0.029 | 11.9774 |

همچنین خطاهای برآورد میزان دبی اوج و زمان رخداد آن برای این سیلاب در رودخانه تایبر در جدول ۶ محاسبه شده است:

جدول ۶ میزان‌های خطای برآورد دبی اوج و زمان رخداد آن

در سیلاب ۱۹۹۶ رودخانه تایبر

Table 6 Peak discharge error values and their occurrence time in the Tiber River flood event in 1996

| | Observed (O) | Estimated (E) | Error (O-E) | Error (%) |
|-------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------|
| Q_p | 363.9 (m^3s^{-1}) | 376.6 (m^3s^{-1}) | 12.7 (m^3s^{-1}) | 3.49 |
| t_p | 24.5 (hr) | 24 (hr) | 0.5 (hr) | 2.04 |

در ادامه منحنی دبی-اشل مشاهده‌ای و برآورد شده جریان غیر دائمی خروجی سیلاب برای رودخانه تایبر در شاخه‌های صعودی و نزولی در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نمایش داده شده است.

همان‌طور که از دقت روش SPM در برآورد آب‌نگارهای تراز و دبی برابر شکل‌های ۱۶ و ۱۷ انتظار می‌رفت، منحنی‌های دبی-اشل شاخه‌های صعودی و نزولی سیلاب نیز با دقت مناسبی در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ ارائه شد.

در نهایت منحنی دبی-اشل مربوط به کل زمان رخداد سیلاب شامل هر دو شاخه صعودی و نزولی در شکل ۲۰

۴- نتیجه‌گیری

در این بررسی و ارزیابی به ارائه یک روش نوین به منظور روندیابی سیلاب (محاسبه آب‌نگارهای خروجی تراز و دبی) و برآورد منحنی دبی-اشل برای مقطع‌های رودخانه‌ای و در جریان‌های غیردائمی پرداخته شد روش پیشنهادی برآورد منحنی دبی-اشل و روندیابی سیلاب را حتی در شرایط ورود جریان به سیلابدشت که در آن لحاظ کردن شکل مقطع دارای اهمیت ویژه‌ای است، با دقت مناسبی انجام می‌دهد. به عبارتی می‌توان گفت که رابطه استخراج شده از روش مغربی (رابطه ۲۴) به عنوان جایگزین رابطه‌های دبی در معادله‌های سنت-ونان، در این معادله‌ها قرار می‌گیرد. این امر سبب می‌شود که خطای ناشی از برآورد دبی در رودخانه‌های طبیعی نسبت به دیگر روش‌ها، به‌ویژه هنگامی که جریان وارد بخش سیلاب-دشتی می‌شود برطرف شود.

نتایج به‌دست آمده از این روش که بر روی رودخانه طبیعی تایبر بررسی شد، نشان داد که این روش می‌تواند دقت بسیار خوبی در رودخانه‌های طبیعی داشته باشد. بدین ترتیب افزون بر این که در آغاز و پایان رخداد سیلاب نتایج به‌طور کامل همخوان با مشاهده‌ها می‌باشد، در محدوده زمان رخداد تراز و دبی بیشینه نیز خطای روش پیشنهادی بسیار اندک است. در ضمن خطای روش پیشنهادی در برآورد دبی و تراز اوج کمتر از ۴٪ و همچنین در مورد زمان رخداد آن‌ها در حدود ۲٪ می‌باشد. مقایسه منحنی‌های دبی-اشل شاخه‌های صعودی و نزولی سیلاب با منحنی‌های مربوط به داده‌های مشاهده‌ای نیز همخوانی بسیار خوبی را نشان می‌دهد.

۴- فهرست نشانه‌ها

| | | | |
|---------------|---|-------------|---------------------------------------|
| $\sum F_x$ | برآیند نیروهای وارد بر حجم کنترل (N) | | |
| g | شتاب گرانش (ms^{-2}) | | |
| h | عمق جریان (m) | | |
| $\frac{h}{h}$ | فاصله عمودی سطح آزاد تا مرکز ثقل سطح مقطع جریان (m) | | |
| H | شدت میدان مغناطیسی (T) | | |
| i | بردار یکه موازی جهت جریان (-) | | |
| L | طول سیم (m) | | |
| m | شاخص قانون توانی سرعت (-) | | |
| n | ضریب زبری مانینگ ($ms^{-1/3}$) | | |
| P | پیرامون مرطوب (m) | | |
| q | شدت جریان جانبی در واحد طول ($m^3s^{-1}m^{-1}$) | | |
| Q | دبی (m^3s^{-1}) | | |
| r | بردار متصل‌کننده عنصر مرزی به نقطه موردنظر (-) | | |
| S_0 | شیب بستر آبراهه (-) | | |
| S_f | شیب اصطکاکی (s) | | |
| t | زمان (s) | | |
| T | طول سطح آزاد آب (m) | | |
| u_x | مؤلفه سرعت در جهت افقی (ms^{-1}) | | |
| u | سرعت نقطه‌ای (ms^{-1}) | | |
| u_{max} | سرعت بیشینه (ms^{-1}) | | |
| u_{SPM} | میزان تاثیر کل جدار جریان بر یک نقطه (-) | | |
| U | سرعت میانگین در مقطع در روش مغربی (ms^{-1}) | | |
| U_{SPM} | میزان میانگین u_{SPM} در مقطع جریان (-) | | |
| v_l | سرعت جریان ورودی جانبی (ms^{-1}) | | |
| V | سرعت میانگین سطح مقطع (ms^{-1}) | | |
| z | فاصله از بستر (m) | | |
| | نشانه‌های یونانی | | |
| β | ضریب تصحیح اندازه حرکت (-) | | |
| ϕ | زاویه جریان ورودی جانبی با افق (kgm^{-3}) | | |
| φ | زاویه بستر با افق (rad) | | |
| θ | ضریب وزنی روش عددی بین صفر و یک (-) | | |
| ρ | چگالی (kgm^{-3}) | | |
| τ_0 | تنش برشی میانگین مرزی (Nm^{-2}) | | |
| | زیرنویس‌ها | | |
| o | مشاهده شده | A | سطح مقطع جریان (m^2) |
| e | محاسبه شده | b | عرض کف رودخانه (m) |
| | | C | سرعت نسبی موج (ms^{-1}) |
| | | $c_{1,2,3}$ | ثابت مرتبط با زبری و آشفستگی جدار (-) |
| | | Cn | فراسنجه تراز بدون بعد سرعت (-) |
| | | D | عمق هیدرولیکی (m) |
| | | f(r) | تابع سرعت حاکم بر میدان جریان (-) |

۵- منابع

- Fread, D.L. (1975). Computation of stage-discharge relationships affected by unsteady flow. *American Water Resources Association*, 11(2), 213-228.
- Fread, D.L. (1993). Flow Routing, in: *Handbook of Hydrology*, Maidment, D.R. (Ed.), Chapter 10, McGraw Hill.
- Heine, R.A. and Pinter, N. (2012). Levee effects upon flood levels: an empirical assessment. *Hydrological Processes*, 26(21), 3225-3240.
- Henderson, F.M. (1966). *Open Channel Flow*, Mac Millan Publishing Co., USA, pp. 288-324.
- Jackson, J.D. (1999). *Classical Electrodynamics*. Wiley, USA, 842 p.
- Jones, B.E. (1916). A method of correcting river discharge for a changing stage. *US Geological Survey (No. 375-E)*.
- Lamberti, P. and Pilati, S. (1990). Quasi-kinematic flood wave propagation. *Meccanica*, 25(2), 107-114.
- Maghrebi, M.F. (2006). Application of the single point measurement in discharge estimation. *Advances in Water Resources*, 29(10), 1504-1514.
- Munson, B.R., Young, D.F. and Okiishi, T.H. (1995). *Fundamentals of fluid mechanics*. *Oceanographic Literature Review*, 10(42), 831.
- Nikuradse, L. (1933). *Laws of flow in rough pipes*, VDI Forsch. 361. English translation. NACA TM-1292.
- Perumal, M. and Moramarco, T. (2005). A reappraisal of discharge estimation methods using stage hydrographs. In: *Proceedings of the International Conference on Hydrological Perspectives for Sustainable Development*.
- Perumal, M., Moramarco, T., Barbetta, S., Melone, F. and Sahoo, B. (2011). Real-time flood stage forecasting by Variable Parameter Muskingum Stage hydrograph routing method. *Hydrology Research*, 42(2-3), 150-161.
- Perumal, M., Moramarco, T., Sahoo, B. and Barbetta, S. (2007). A methodology for discharge estimation and rating curve development at ungauged river sites. *Water Resources Research*, 43(2), <https://doi.org/10.1029/2005WR004609>.
- Perumal, M., Moramarco, T., Sahoo, B. and Barbetta, S. (2010). On the practical applicability of the VPMS routing method for rating curve development at ungauged river sites. *Water*
- Ahmadi, A. and Maghrebi, M.F. (2021). A robust approach for rating curves estimation in open channels using isovel contours. *International Journal of River Basin Management*, 19(3), 281-296.
- Ajmera, T.K. and Goyal, M.K. (2012). Development of stage-discharge rating curve using model tree and neural networks: an application to Peachtree Creek in Atlanta. *Expert Systems with Applications*, 39(5), 5702-5710.
- Akan, A.O. (2006). *Open Channel Hydraulics*. Elsevier. Canada, 384 p.
- Baldassarre, G.D. and Montanari, A. (2009). Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(6), 913-921.
- Chen, X. and Chiew, Y.M. (2004). Closure to "response of velocity and turbulence to sudden change of bed roughness in open-channel flow" by xingwei chen and yee-meng chiew. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(6), 589-590.
- Di Silvio, G. (1969). Flood wave modification along prismatic channels. *Journal of the Hydraulics Division*, 95(5), 1589-1614.
- Domeneghetti, A., Castellarin, A. and Brath, A. (2012). Assessing rating-curve uncertainty and its effects on hydraulic model calibration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(4), 1191-1202.
- Dottori, F., Martina, M.L.V. and Todini, E. (2009). A dynamic rating curve approach to indirect discharge measurement. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(6), 847-863.
- Faye, R.E. and Cherry, R.N. (1980). *Channel and dynamic flow characteristics of the Chattahoochee River, Buford Dam to Georgia Highway 141*. US Government Printing Office. USA. 66 p.
- Fenton, J.D. (1999). Calculating hydrographs from stage records. *Proc. of 28th Congress of IAHR.*, Graz, Austria.
- Fread, D.L. (1974). *Numerical properties of implicit four-point finite difference equations of unsteady flow (Vol. 18)*. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Office of Hydrology.

resources research, 46(3), <https://doi.org/10.1029/2009WR008103>.

Perumal, M., Shrestha, K.B. and Chaube, U.C. (2004). Reproduction of hysteresis in rating curves. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9), 870-878.

Prandtl, L. (1933). Recent results of turbulence research, NACA TM-720.

Reitan, T. and Petersen-Øverleir, A. (2009). Bayesian methods for estimating multi-segment discharge rating curves. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23(5), 627-642.

Ruppert, J. (1995). A Delaunay refinement algorithm for quality 2-dimensional mesh generation. *Journal of algorithms*, 18(3), 548-585.

Schmidt, A.R. and Garcia, M.H. (2003). Theoretical examination of historical shifts and adjustments to stage-discharge rating curves. In *World Water and Environmental Resources Congress*, Pennsylvania, United States.

Shao, Q., Lerat, J., Podger, G. and Dutta, D. (2014). Uncertainty estimation with bias-correction for flow series based on rating curve. *Journal of Hydrology*, 510, 137-152.

Shao, Q., Dutta, D., Karim, F. and Petheram, C. (2018). A method for extending stage-discharge relationships using a hydrodynamic model and quantifying the associated uncertainty. *Journal of Hydrology*, 556, 154-172.

Sturm, T.W. (2001). *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill. New York. 493 p.

Szymkiewicz, R. (2010). *Numerical modeling in open channel hydraulics*. Springer Science and Business Media. Germany.