

Estimating flood discharge in compound river channels using minimum gauging data

Abdolreza Zahiri^{1*} , Javad Gholinejad² 

¹ Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

² Ph.D. Student of Water Science and Engineering, Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Extended Abstract

Introduction

Floods are among the most complex hydrological phenomena which are known to be the main factor of natural disasters and costs in many river basins, especially in regions with arid and semi-arid climate. Due to the nonlinear nature, high intensities and low durations of floods, there are large uncertainties in their predicting, forecasting, modeling, and managing. Therefore, it is necessary to have measured characteristics of flood flows that occurred in the river to calibrate and validate mathematical and hydraulic models. However, measuring river flow during floods and inundation of floodplains is very difficult, costly, and dangerous. For this reason, methods based on extrapolation of stage-discharge rating curve are usually used to estimate river flood discharge. Different methods can be used for this purpose, most of which require a lot of field data. For example, in most of these methods, the Manning roughness coefficients of the main channel and floodplains must be known, which has many limitations in this regard.

Materials and Methods

To estimate flood discharges from stage–discharge curve, three methods were evaluated and compared. The first is the rating curve extension, which fits $Q=a(h-h_0)^b$ to non-flood measurements data and then extrapolated to higher water levels. This method introduces considerable errors in rivers with wide and rough floodplains. The second method is the conveyance-slope approach, which is specifically developed for compound sections. The cross-section is divided into the main channel and floodplains and then the conveyance factor $K_i=A_iR_i^{2/3}/n_i$ is computed for each water level. The river energy slope $S_f=(Q/K)^2$ is then derived and extrapolated to flood stages. A major limitation of this method is the need for reliable Manning's roughness coefficients for both the main channel and the floodplains. To obtain these coefficients, the quasi-2D model of Shiono and Knight (1991) was employed. The third method is the alpha (α) method, which combines energy slope and Manning's n into one parameter as $\alpha=Q/(AR^{2/3})$. The Manning formula is usually faced with many uncertainties in riverbed Manning roughness coefficient and energy slopes, especially for compound channels with natural features or dense vegetation. This study discusses flood discharge estimation using a calibrated α parameter for alluvial rivers in Iran (Golestan province) and England. Parameter α accounts for the simultaneous effects of energy slope and Manning's roughness. The method computes α from measured discharges and geometric properties (area A , hydraulic radius R), then fits a regression curve to α - R . From this curve, predicted for any flood stage, and flood discharge is subsequently calculated.

Results and Discussion

To evaluate three flood discharge extrapolation methods, some statistical metrics (RMSE, MAE, and R^2) were used. For the new alpha method, the mean absolute errors were 7.4%, 12.4%, and 5.2% at Arazkooseh, Aghghala, and River Severn, respectively, which are quite acceptable for flood control engineering applications. The conveyance slope method yields MAE values of 20.7%, 42.1%, and 20.8%, while the stage-discharge curve extension method gives 26.3%, 6.0%, and 10.3% for these three river stations. The alpha coefficient method performs more accurately than the other two methods. Its superiority is confirmed by higher R^2 and lower RMSE error measure, demonstrating better reproduction of actual stage-discharge behavior under floods. The high errors of the conveyance slope method reflect its inability to capture nonlinearity during high flows and floodplain

inundation. The rating curve extension method works acceptably only at some stations (e.g., Aghghala). From a hydraulic perspective view, the alpha parameter simultaneously considers variations in discharge (Q), cross-sectional area (A), and hydraulic radius (R), providing a more consistent physical description. Its superiority comes from incorporating concurrent changes in A , R and the nonlinear Q - h curve. When the floodplains become inundated, abrupt changes in velocity distribution and effective roughness occur. Methods relying on slope of rating curve or energy slope extension cannot fully represent this nonlinearity. The alpha parameter accounts for the rate of change of Q with respect to hydraulic cross-section characteristics, offering greater flexibility in modeling flow regime transitions. Therefore, the alpha-based method is proposed as a reliable framework for extrapolating stage-discharge curves, particularly for flood-prone rivers.

Conclusion

- (1) In this study, a simple method proposed for flood discharge prediction in alluvial rivers with floodplains conveying flood flows which overtax the main river channel. The main reason behind the development of this method is its requirement for minimum river data recorded at the time of river flood flows, including river bathymetry (even before flood passage), flood stage and the common stage-discharge rating curve (and independent to riverbed Manning roughness coefficients of main channel and floodplains).
- (2) The obtained results of flood flow discharges based on the new developed method are quite satisfactory for all three selected gauge stations in comparison with the classic available methods for flood prediction.
- (3) The proposed method may face with physical limitations or problem in rivers with prismatic or manmade main channel and in these cases, at least one data or record of flood flow (stage and discharge) should be given.
- (4) The implication of this new method is recommended for flood flow prediction in meandering compound river channels and in multi-stage compound channels which have recently become a topic of interest to researchers.

Keywords: Energy slope-conveyance method, Floodplains, Manning roughness coefficient, Rating curve extrapolation

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the National Elites Foundation of Golestan province for the financial support (Shahid Ahmadi Roshan's plan) and to the Omran Ab Persian Consulting Engineers for logistical support.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

Some of the datasets are presented in the form of graphs within the manuscript and the rest are available at a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Abdolreza Zahiri: Writing- original draft preparation, Visualization, Supervision, Software; **Javad Gholinejad:** Resources, Software, Manuscript editing, Formal analysis and investigation

*Corresponding Author, E-mail: azahiri@gau.ac.ir

Citation: Zahiri, A., & Gholinejad, J. (2026). Estimating flood discharge in compound river channels using minimum gauging data. *Water and Soil Management and Modeling*, 6(3), 235-258.

doi: 10.22098/mmws.2026.19574.1801

Received: 18 April 2026, Received in revised form: 29 May 2026, Accepted: 11 June 2026, Published online: 27 August 2026.

Water and Soil Management and Modeling, Year 2026, Vol. 6, No. 3, pp. 235-258.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





تخمین دبی سیلاب در مقاطع مرکب رودخانه‌ای با حداقل داده‌های میدانی

عبدالرضا ظهیری^{۱*}، جواد قلی‌نژاد^۲

^۱دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
^۲دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

چکیده

اندازه‌گیری مستقیم دبی جریان رودخانه‌ها در زمان سیلاب و ورود جریان به دشت‌های سیلابی پرهزینه و خطرناک است. به همین دلیل معمولاً از روش‌های برون‌یابی از منحنی دبی-اشل برای تخمین دبی سیلاب استفاده می‌شود. اغلب این روش‌ها به داده‌های میدانی زیادی نیاز دارند. در این مطالعه، از یک روش ساده و کاربردی به نام ضریب آلفا برای تخمین دبی سیلاب مقاطع مرکب رودخانه‌ای استفاده شده است که به حداقل داده‌های میدانی (هندسه رودخانه، تراز سیلاب و منحنی دبی-اشل رودخانه در شرایط غیرسیلابی) نیاز دارد. پایه و اساس این روش، فرمول مانینگ است. در این روش، ابتدا بر اساس داده‌های منحنی دبی-اشل رودخانه (دبی و تراز سطح آب) و نیز هندسه رودخانه، ضریب آلفا (نسبت شیب انرژی به ضریب زبری مانینگ) محاسبه می‌شود. سپس منحنی تغییرات این ضریب نسبت به شعاع هیدرولیکی برازش داده می‌شود. به کمک این برازش، دبی جریان در هر تراز سطح آب دلخواه قابل برآورد است. کاربرد این روش در چند رودخانه مرکب طبیعی در استان گلستان (ایستگاه‌های هیدرومتری ارازکوسه و آق‌قلا) و رودخانه سورن در انگلستان نشان داد که دقت نتایج این روش در مقایسه با روش‌های معمول برون‌یابی منحنی دبی-اشل قابل قبول‌تر است. نتایج روش فاکتور انتقال-شیب انرژی همواره با بیش‌برآوردی همراه بوده و روش امتداد شیب منحنی دبی-اشل نیز فقط در ایستگاه آق‌قلا دارای دقت مناسبی است. میانگین خطای (MAE) روش آلفا در این رودخانه‌ها به ترتیب ۷/۴، ۱۲/۴ و ۵/۲ درصد به دست آمد که در مباحث مهندسی و صنعت آب قابل قبول است. برای این سه ایستگاه، میانگین خطا برای روش فاکتور انتقال-شیب انرژی به ترتیب ۲۰/۷، ۴۲/۱ و ۲۰/۸ درصد و برای روش امتداد منحنی دبی-اشل به ترتیب ۲۶/۳، ۶ و ۱۰/۳ درصد است. از روش پیشنهادی این تحقیق می‌توان برای تخمین دبی سیلاب رودخانه‌های با مقطع مرکب استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: برون‌یابی از منحنی دبی-اشل، دشت‌های سیلابی، روش شیب انرژی، ضریب زبری مانینگ

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: azahiri@gau.ac.ir

استناد: ظهیری، عبدالرضا، و قلی‌نژاد، جواد (۱۴۰۵). تخمین دبی سیلاب در مقاطع مرکب رودخانه‌ای با حداقل داده‌های میدانی. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳۶(۳)، ۲۳۵-۲۵۸.

doi: 10.22098/mmws.2026.19574.1801

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۵، دوره ۶، شماره ۳، صفحه ۲۳۵ تا ۲۵۸.

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان



۱- مقدمه

سیلاب یکی از پیچیده ترین پدیده های هیدرولوژیکی است که در بسیاری از حوضه های رودخانه ای جهان، به ویژه در مناطق با اقلیم خشک و نیمه خشک، به عنوان اصلی ترین عامل بروز خسارات طبیعی شناخته می شود. ماهیت غیرخطی، شدت بالا و زمان وقوع کوتاه مدت سیلاب ها موجب شده است که پیش بینی و مدیریت آن همواره با عدم قطعیت قابل توجهی همراه باشد (Shirazi et al., 2024). در ایران نیز طی دهه های اخیر، وقوع سیلاب های ناگهانی و پرشدت در حوضه های مختلف کشور، خسارات گسترده ای به زیرساخت ها، سکونت گاه ها و سامانه های بهره برداری منابع آب وارد کرده است که نشان دهنده ضرورت توجه ویژه به این پدیده است (Rajabizadeh et al., 2019). با توجه به شدت گیری خطرات سیلاب در پی تغییرات اقلیمی و گسترش فعالیت های انسانی در حوضه های آبخیز، نیاز به ابزارهای مطمئن و کاربردی برای تخمین دبی جریان سیلاب در هر نقطه از رودخانه بیش از پیش احساس می شود (IPCC, 2021). این نیاز در کشورهایی که با کمبود شبکه های اندازه گیری هیدرومتری مواجه هستند، به یک ضرورت عملی تبدیل شده است (Modarres, 2008). برآورد دقیق دبی جریان رودخانه ها به ویژه در شرایط سیلابی، یکی از مسائل ضروری در مدیریت منابع آب و کاهش ریسک سیلاب است. آگاهی از دبی سیلاب نقش تعیین کننده ای در طراحی سازه های هیدرولیکی، پهنه بندی سیلاب، مدیریت بحران و برنامه ریزی بهره برداری از منابع آب دارد. سیلاب یکی از حالات جریان پرابی رودخانه ها است که در طی آن، جریان مجرای اصلی رودخانه را پر کرده و وارد دشت های سیلابی می شود. در این شرایط، اندازه گیری سرعت های جریان به کمک سرعت سنج برای محاسبه دبی سیلاب بسیار دشوار، زمان بر، پرهزینه و توأم با خطرات جانی است. همچنین اندازه گیری مستقیم سرعت در جریان های شدید و سیلابی از نظر فنی و تجهیزاتی غالباً امکان پذیر نیست. در بسیاری از ایستگاه های هیدرومتری، داده های موجود تنها بخشی از دامنه تغییرات جریان را پوشش می دهند و در نتیجه، نیاز به روش های

برون یابی از منحنی دبی-اشل احساس می شود (Rantz, 1982). به همین دلیل امروزه تأکید می شود که دبی سیلاب رودخانه ها بهتر است به کمک فن آوری های نوین و بدون تماس افراد با جریان رودخانه برآورد شود (Bjerklie et al., 2003; Tarpanelli et al., 2013; Feyisa et al., 2014; Moramarco et al., 2017; Zakharova et al., 2020; Paoletti et al., 2023; Elmi et al., 2024; Paris et al., 2024; Lin et al., 2024; Pumo et al., 2025). تئوری آنتروپی (Ammari and Chen, 1998; Remini, 2010; Moramarco and Singh, 2010; Ardicioglu et al., 2012; Omori et al., 2021) سطوح بازتاب مشترک^۱ (Perroud and Tygel, 2005)، منحنی های هم-سرعت به کمک یک سرعت نقطه ای (Maghrebi and Ball, 2006)، سامانه پهپاد راداری^۲ (Moramarco et al., 2015)، اندازه گیری سرعت های نقطه ای محدود (Stosic et al., 2016)، سامانه هواپیمای سبک وزن هدایت پذیر از راه دور^۳ (Bolognesi et al., 2017)، حسگر رادار داپلر ارزان قیمت^۴ (Alimenti et al., 2020)، و سرعت مشخصه^۵ یا سرعت سطحی رودخانه به کمک پهپاد، رادار، تصاویر ماهواره ای، فیلم برداری، و ... (Genç et al., 2015; Cipolla et al. 2018; Bahmanpouri et al., 2022) از جمله موضوعاتی است که هم اکنون توسط محققین مرتبط با بحث هیدرومتری رودخانه ها در حال مطالعه است. با این حال تاکنون این فن آوری ها به دلایل مختلف کاربرد گسترده عملی و میدانی نداشته اند. بنابراین ارائه راه حل های ساده و کاربردی مبتنی بر اصول هیدرولیک رودخانه ها و نیز الگوریتم های محاسباتی هوش مصنوعی کماکان مطرح هستند (Zakwan et al., 2017; Afzal et al., 2022; Musilu et al., 2025; Roohi et al., 2025; Chimata et al., 2025). این روش ها نیز با محدودیت عمده ای روبرو هستند. مدل سازی سیلاب (یک بعدی یا دوبعدی) در رودخانه های با مقطع مرکب نیازمند معلوم بودن ضرایب زبری مجرای اصلی و دشت های سیلابی^۶ است که با توجه به محدودیت داده های هیدرولیکی اندازه گیری شده در دشت های سیلابی و نیز وجود پوشش های گیاهی

⁴ Low-Cost Doppler Radar Sensor (L-CDRS)

⁵ Velocity Index Method

⁶ Overbank flow

¹ Common-Reflection-Surface (CRS)

² Radar Drone System (RDS)

³ Lightweight Remotely Piloted Aircraft System (LRPAS)

منحنی دبی-اشاره برای برآورد دبی جریان به ازاء ترازهای خارج از محدوده اندازه‌گیری شده، استفاده از روش‌های فاکتور انتقال-شیب انرژی، روندیابی سیل و محاسبات نیمرخ سطح آب را برای برون‌یابی از منحنی دبی-اشاره و تخمین دبی جریان در رودخانه‌های سیلابی را پیشنهاد نمودند. (Perret et al., 2019) با انجام مدل‌سازی هیدرولیکی، اثر توسعه زمانی پوشش گیاهی بر منحنی دبی-اشاره یک ایستگاه هیدرومتری در فرانسه را شبیه‌سازی نموده و از آن برای استخراج منحنی دینامیکی دبی-اشاره استفاده نمودند. (Mansanarez et al., 2019) در تحقیق خود برای استخراج سریع و دقیق سری زمانی دبی جریان در دو ایستگاه هیدرومتری کشور سوئد در شرایط کم‌آبی و جریان پایه و با توجه به اینکه این کار نیازمند وجود یک منحنی دبی-اشاره مطمئن و بلندمدت، وجود داده-های فراوان دبی و اشل و نیز لزوم برون‌یابی از منحنی دبی-اشاره با احتمال بالای عدم قطعیت است، از مدل‌سازی هیدرولیکی استفاده نمودند. برای مدل‌سازی هیدرولیکی، رابطه بین تراز و شیب سطح آب لازم است. (Lee et al., 2021) با استفاده از یک مدل روندیابی هیدرولوژیکی توزیعی مبتنی بر حل معادلات سن‌وان در حالت موج کینماتیک (فرمول مانینگ)، دبی سیلاب در رودخانه جزر و مدی اولسان در کره جنوبی را با دخالت اثر بارندگی محاسبه نمودند. منحنی دبی-اشاره رودخانه در این تحقیق به صورت توانی در نظر گرفته شد. (Shirazi et al., 2024) با استفاده از یک راهکار هیدرولیکی مبتنی بر حل فرمول مانینگ، دبی جریان در بیش از ۲۰ ایستگاه هیدرومتری واقع در رودخانه‌های استان گلستان را مدل‌سازی نمودند. آنها در این مدل‌سازی، ابتدا ضریبی به نام آلفا را به صورت نسبت شیب انرژی (اصطلاحی) به ضریب زبری مانینگ را در فرمول مانینگ تعریف نموده و سپس به کمک داده‌های منحنی‌های موجود دبی-اشاره رودخانه‌ها، رفتار این ضریب در عمق‌های مختلف جریان را مدل‌سازی نمودند. برای ارتقاء دقت مدل‌سازی از تلفیق روش‌های یادگیری ماشین با الگوریتم‌های بهینه‌ساز استفاده نمودند. (Lin et al., 2024) روشی منطقه‌ای مبتنی بر استخراج مناطق حساس به سیل‌گیری از تصاویر ماهواره سنتینل ارائه کردند. نتایج این تحقیق در ۱۴ رودخانه در سراسر

متفاوت در این بخش، بسیار دشوار است (Corato et al., 2014; Hajikandi and Hatami, 2010; Takata et al., 2024; Shirazi et al., 2024). به همین دلیل، ارائه روش‌های مبتنی بر فیزیک مسئله و متکی بر حداقل داده‌های میدانی دارای اهمیت بوده و می‌تواند کاربرد مناسبی در رودخانه‌های سیلابی داشته باشد. با ورود جریان در دشت‌های سیلابی، تغییرات عمده‌ای در هیدرولیک جریان اتفاق می‌افتد. تفاوت هندسی و هیدرولیکی مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی باعث می‌شود که شیب منحنی دبی-اشاره رودخانه در مرز ورود جریان به دشت‌های سیلابی تغییر کند. بنابراین، در این شرایط، برون‌یابی از این منحنی که عمدتاً بر اساس داده‌های همزمان تراز و دبی در جریان‌های کم تا متوسط رودخانه استخراج شده است، برای تخمین دبی جریان سیلاب رودخانه قابل قبول نبوده و ممکن است با خطای زیادی توأم باشد (Sivapragasam and Muttill, 2005; Lowe and Webb, 2017). بدیهی است مقدار این خطا، به میزان تفاوت هندسی و هیدرولیکی مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی و به‌ویژه نسبت زبری، نسبت عرض و نسبت عمق این دو بخش بستگی دارد. در زمینه برآورد دبی سیلاب رودخانه‌ها، مطالعات متعددی انجام شده است. به‌طور مثال، (Lang et al., 2010) ضمن تبیین و تحلیل مشکلات روش‌های برون‌یابی از منحنی دبی-اشاره برای تخمین دبی سیلاب از قبیل عدم دخالت تغییرات سریع هندسه مقطع ناشی از وقوع رسوبگذاری و فرسایش در زمان سیلاب، اثر پروفیل برگشتی پایین‌دست، اثر پوشش گیاهی دشت‌های سیلابی، اثر حلقه‌ای شدن^۱ منحنی دبی-اشاره، و ... از راهکار مدل‌سازی هیدرولیکی مبتنی بر حل عددی معادلات یک‌بعدی جریان غیردائمی سن‌وان همراه با واسنجی ضریب زبری مانینگ به ازاء ترازهای سطح آب حداکثر در زمان سیلاب در ۸ حوضه رودخانه‌ای مدیریت‌شده استفاده نمودند. (Rainville et al., 2016) روش‌های مختلف استخراج منحنی دبی-اشاره در شرایط مختلف جریان و رسوب رودخانه‌ها و نیز توسعه و برون‌یابی آن در شرایط کم‌آبی و سیلاب را بررسی نموده و راهکارهای مناسبی برای اطمینان از صحت آن در طول زمان ارائه نموده‌اند. آنها ضمن تأکید بر عدم قطعیت فراوان روش امتداد شیب

¹ Hysteresis effect

جهان، دقت قابل توجهی را در برآورد دبی جریان رودخانه‌های منتخب نشان داد. Paris et al., (2024) بدون نیاز به داده‌های میدانی رودخانه و فقط با استفاده از ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، ابتدا شیب طولی آبراهه را محاسبه نموده و سپس با تلفیق فرمول مانینگ و یک رابطه تجربی تخمین ضریب زبری مانینگ بر اساس قطر مصالح بستر رودخانه، دبی جریان در ۲۷ رودخانه از سراسر جهان را با خطای متوسط ۱۲ درصد برآورد کردند. Elmi et al., (2024) ابزاری مبتنی بر رویکردهای سنجش از دور را توسعه دادند و به کمک آن، سری زمانی ماهانه دبی جریان را برای بیش از ۳۳۰۰ ایستگاه هیدرومتری در دنیا همراه با عدم قطعیت برآورد نمودند. نتایج نشان داد که این راهکار به‌ویژه برای حوضه‌های فاقد آمار یا بدون ایستگاه‌های هیدرومتری، کارآمد و قابل اطمینان است. Roohi et al., (2025) با تلفیق مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS، یادگیری جمعی و شبکه عصبی U-Net، چارچوبی کارآمد برای پیش‌بینی دبی سیلاب و ارزیابی وضعیت دشت‌های سیلابی در حوضه رودخانه دز ارائه دادند. پیشرفت روش‌های نوین، به‌ویژه در حوزه یادگیری ماشین و مدل‌های ترکیبی، توانسته است دقت مناسب نتایج این تحقیق در برآورد دبی سیلاب این رودخانه و کاهش چشمگیر عدم قطعیت در شرایط سیلابی، کارایی موثر روش‌های نوین یادگیری ماشین و مدل‌های ترکیبی را نشان داد. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که روش‌های مبتنی بر سنجش از دور می‌توانند جایگزین قابل اعتمادی برای روش‌های سنتی در پهنه‌بندی سیلاب و تخمین دبی باشند. Chimata et al., (2025) با استفاده از داده‌های راداری ماهواره EOS-04 و مدل ارتفاعی، چارچوبی خودکار برای برآورد عمق سیلاب در رودخانه‌های ۴ استان هند ارائه دادند که با خطای کمتر از ۰/۸۰ متر، به مراتب بهتر از روش‌های متداول است. اهمیت تخمین نسبتاً دقیق دبی سیلاب رودخانه‌ها از یک طرف و وجود منحنی دبی-اشل به عنوان یک ابزار مناسب و دقیق در بسیاری از رودخانه‌ها از طرف دیگر، باعث شده است که برون‌یابی از این منحنی مورد توجه بسیاری از محققین هیدرولوژی و هیدرولیک رودخانه قرار گیرد. روش‌های برون‌یابی از منحنی دبی-اشل علی-رغم سادگی، دارای محدودیت‌های متعددی بوده و فرضیات آنها

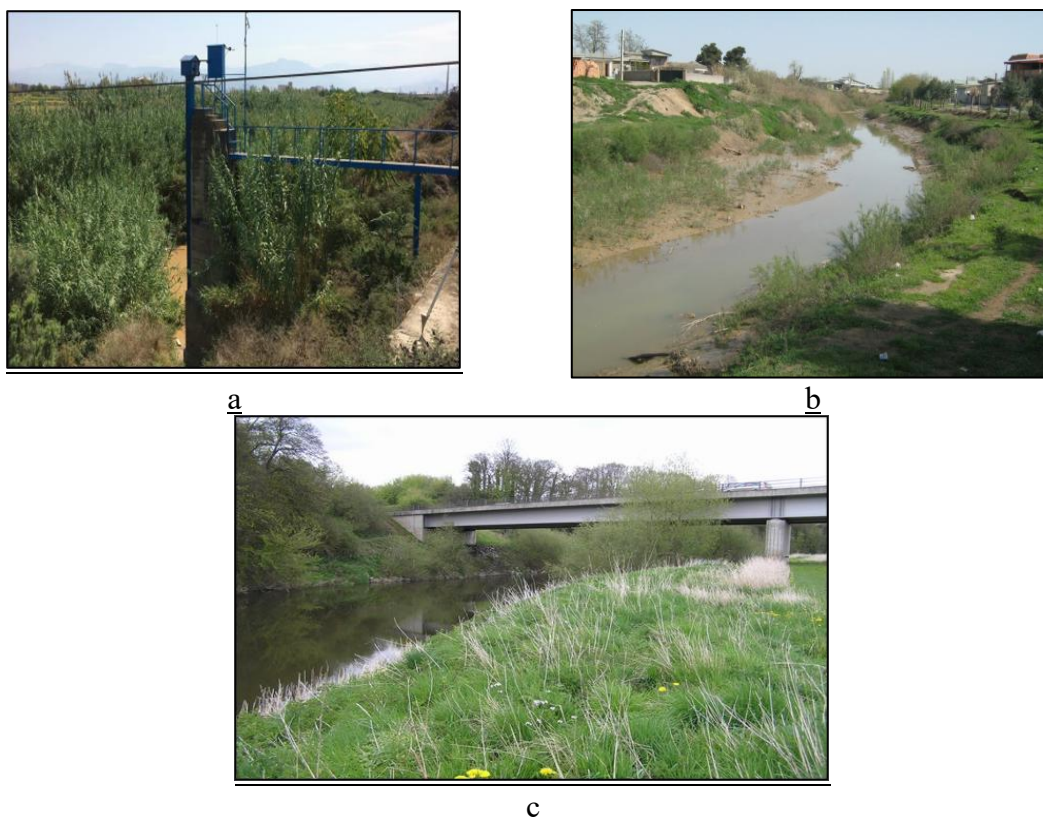
برای کاربرد در رودخانه‌های با مقطع مرکب قابل قبول نیستند (Torsten et al., 2002; Sivapragasam and Muttill, 2005). همچنین به داده‌های میدانی زیادی نیاز دارند که تعیین آن‌ها در شرایط عملی و به‌ویژه در زمان سیلاب بسیار دشوار است. برای کاهش این محدودیت‌ها، در این مطالعه روش فیزیک‌محور جدیدی بر اساس معادله مانینگ برای مقاطع مرکب رودخانه‌ای ارائه شده است که با کمترین داده‌های میدانی و صرفاً با معلوم بودن هندسه رودخانه و تراز سیلاب، دبی سیلاب رودخانه قابل تخمین است. نتایج این روش با دو روش معمول در مهندسی رودخانه شامل امتداد شیب منحنی دبی-اشل و روش فاکتور انتقال-شیب انرژی مقایسه شده و تحلیل این مقایسه‌ها در سه ایستگاه هیدرومتری در رودخانه‌های گرگانرود (استان گلستان) و سورن (انگلستان) ارائه شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

حوضه رودخانه گرگانرود با مساحت بیش از ۱۰ هزار کیلومتر مربع یکی از حوضه‌های شمال شرق کشور بوده و بخش وسیعی از آن در استان گلستان واقع است. این حوضه از مهم‌ترین حوضه‌های آبخیز دریای خزر است. رودخانه گرگانرود دارای پتانسیل سیل‌خیزی فراوانی بوده و در طول سال‌های اخیر با وقوع سیلاب‌های متعدد و تلفات انسانی و خسارت اقتصادی مواجه شده است. در زمان سیلاب، بعضی از ایستگاه‌های هیدرومتری این رودخانه زیر آب رفته و امکان ثبت داده‌های سیلاب را ندارند. در این شرایط، وجود یک روش ساده، علمی و مبتنی بر کمترین داده میدانی از شرایط سیلاب، برای تخمین دبی سیلاب رودخانه دارای ارزش زیادی است. در این مطالعه از دو ایستگاه هیدرومتری به نام ارازکوسه و آق‌قلا در رودخانه گرگانرود و نیز ایستگاه مونت‌فورد بریج در رودخانه سورن^۱ در انگلستان برای ارزیابی روش پیشنهادی استفاده شده است. نمایی از این رودخانه‌ها در محل ایستگاه هیدرومتری در شکل ۱ نشان داده شده است.

¹ River Severn at Montford Bridge



شکل ۱- نمایشی از محل ایستگاه‌های هیدرومتری در رودخانه‌های مورد مطالعه، (a) ارازکوسه، (b) آق‌قلا، (c) سورن
 Fig. 1. Location of hydrometric stations in the studied rivers, a) Arazkoosheh, b) Aghghala, c) Severn

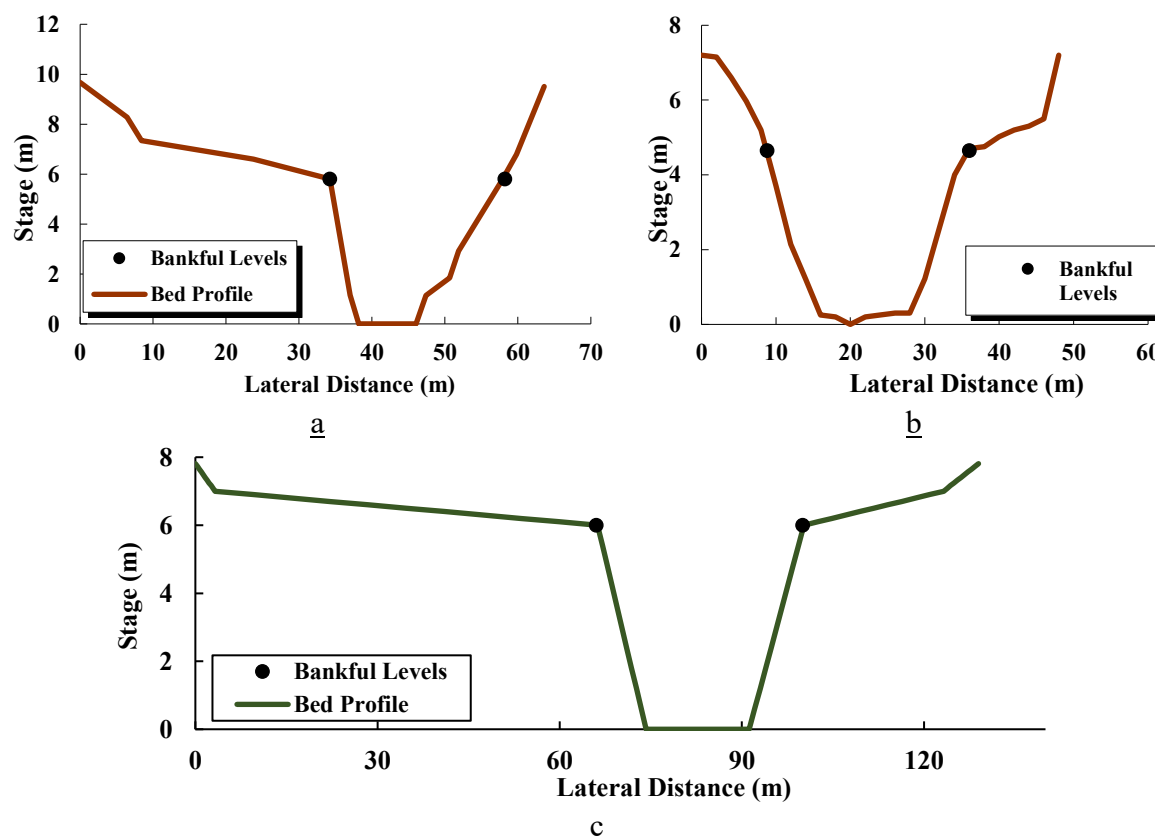
که در رودخانه سورن، وسعت دشت‌های سیلابی نسبت به مقطع اصلی بسیار زیاد بوده و از این نظر، تفاوت قابل توجهی با ایستگاه-های ارازکوسه و آق‌قلا دارد.

در شکل ۲، موقعیت ایستگاه‌های ارازکوسه و آق‌قلا در طول مسیر رودخانه گرگانرود نشان داده شده است. هندسه مقطع عرضی این ایستگاه‌ها در شکل ۳ ارائه شده است. در این شکل‌ها، تراز مقطع پر یا تراز لبریز^۱ رودخانه‌ها نیز نشان داده شده است. مشاهده می‌شود



شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری ارازکوسه و آق‌قلا در مسیر رودخانه گرگانرود در استان گلستان
 Fig. 2. Location of the Arazkoosheh and Aghghala hydrometric stations on the Gorganroud River in Golestan Province

¹ Bankfull Stage



شکل ۳- هندسه مقطع عرضی رودخانه در محل ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه، (a) اراز کوسه، (b) آق‌قلا، (c) سورن
Fig. 3. Cross-sectional geometry of the rivers at the location of the studied hydrometric stations, a) Arezkooseh, b) Aghghala, c) Severn

منحنی دبی-اشل رودخانه برای داده‌های دبی-اشل در مجرای اصلی رودخانه^۱ استخراج می‌شود. بهترین فرم این منحنی به صورت زیر است (ISO, 1982, 1998):

$$Q = a(h - h_0)^b \quad (1)$$

که Q دبی جریان، h تراز سطح آب، a و b ضریب و نمای ثابت و h_0 صفر اشل ایستگاه یا تراز است که در آن، دبی جریان صفر است. برای استخراج این منحنی، لازم است مقادیر بهینه a ، b و h_0 تعیین شوند. به این منظور از ابزار بهینه‌ساز موجود در نرم‌افزار اکسل (Solver Toolbox) استفاده شد. تابع هدف بهینه‌سازی، کمینه‌سازی مجموع مربعات خطای تخمین دبی جریان حاصل از

۲-۲. روش‌های برون‌یابی از منحنی دبی-اشل رودخانه‌ها

مهم‌ترین روش‌های برون‌یابی از منحنی دبی-اشل رودخانه‌ها عبارتند از رسم منحنی دبی-اشل در مختصات لگاریتمی دوگانه، امتداد شیب منحنی، روش سرعت-مساحت، روش فاکتور انتقال-شیب انرژی، روش تجزیه مقطع مرکب (فرمول مانینگ)، کاربرد مدل‌های دویعدی و روش‌های مبتنی بر هیدرولیک رسوب و اثر فرم بستر (ISO, 1982, 1998; Rants, 1982; Ramsbottom and Whitlow, 2003; Lang et al., 2010).

۲-۲-۱. روش امتداد شیب منحنی

در این روش ابتدا برای رودخانه در محل ایستگاه هیدرومتری موردنظر و بر اساس داده‌های تراز و دبی جریان اندازه‌گیری شده،

¹ Inbank flow

ترازهای سطح آب و امتداد آن برای ترازهای سیلاب حداکثر، دبی سیلاب رودخانه برای هر تراز قابل محاسبه است:

$$Q = KS_f^{1/2} \quad (۴)$$

مزیت روش فاکتور انتقال-شیب انرژی این است که برای مقاطع مرکب رودخانه‌ای نیز قابل استفاده است (ISO, 1982, 1998). محدودیت آن هم، وابستگی آن به ضریب زبری مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی است. در این روش برای محاسبه شیب انرژی باید حتماً ضریب زبری مانینگ مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی معلوم باشد که محدودیت مهمی بوده و در اغلب رودخانه‌ها ممکن است اطلاعات مناسبی از زبری بخصوص در دشت‌های سیلابی نباشد. روش‌های زیادی برای تخمین ضریب زبری مانینگ در رودخانه‌ها وجود دارند که بیانگر عدم قطعیت جواب‌ها است. مثلاً بعضی از روابط بر اساس جنس بستر رودخانه (قطر ذرات کف) تعریف شده‌اند که در آن‌ها فرض شده است که به ازاء عمق‌های مختلف رودخانه، ضریب زبری ثابت است. برای دخالت اثر عمق جریان بر زبری آبراهه باید از روابطی که علاوه بر قطر ذرات بستر، پارامترهای هیدرولیک جریان (مثل عمق یا شعاع هیدرولیکی) را نیز دخالت می‌دهند استفاده نمود (Hajikandi and Hatami, 2010). محدودیت دیگر این است که ممکن است این روابط جوابگوی شرایط واقعی رودخانه‌ها نباشند. مثلاً در مقطع اصلی یا دشت‌های سیلابی، پوشش گیاهی وجود داشته باشد که عملاً تخمین ضریب زبری را بسیار دشوار می‌کند. یکی از راهکارهای مناسب برای این شرایط، واسنجی ضریب زبری مانینگ رودخانه به کمک روابط مقاومت جریان از قبیل فرمول مانینگ، شزی، کالبروک-وایت اصلاح شده و ... است. این راهکار فقط برای رودخانه‌های با مقطع ساده قابل کاربرد است و در صورت وجود دشت‌های سیلابی به دلیل اثر تبادل دبی بین مقطع اصلی و این دشت‌ها، روابط مقاومت مذکور دچار خطا می‌شوند. در این حالت باید از مدل‌های شبه‌دوبعدی مثل Shiono, and Knight, Wark et.al (1990) (1991), Ervine et.al (2000) و ... استفاده نمود. استفاده از این مدل‌ها به تخصص و مهارت‌های خاصی نیاز دارد.

منحنی دبی-اشل نسبت به دبی جریان واقعی رودخانه در نظر گرفته شد:

$$Obj = Min \left(\sum_{i=1}^N (Q_{SDRC} - Q_{Meas})^2 \right) \quad (۲)$$

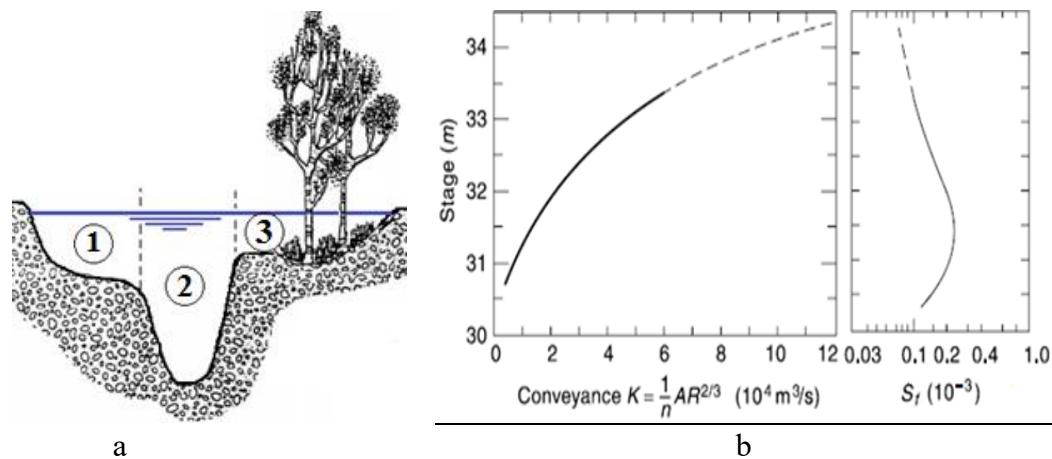
که Obj تابع هدف، N تعداد داده‌های موجود (داده‌های آموزش)، Q_{SDRC} دبی به دست آمده از منحنی دبی-اشل و Q_{Meas} دبی جریان واقعی رودخانه است. متغیرهای تصمیم هم ضریب a پارامتر h_0 و نمای b بود. برای بهینه‌سازی از الگوریتم تکاملی استفاده شد. این الگوریتم برای حل مسائل غیرخطی و نیز مسائل چندپارامتری با فضای جستجوی پیچیده مناسب است. بعد از بهینه شدن ضرایب و نمای معادله توانی (۱) در مقطع اصلی، معادله دبی-اشل با همان مقادیر برای کل رودخانه در شرایط سیلاب مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدیهی است اگر رودخانه در ترازهای بالا، دارای دشت‌های سیلابی عریض باشد و از نظر زبری با مجرای اصلی رودخانه تفاوت زیادی داشته باشد، خطای این روش قابل توجه خواهد بود. مزیت این روش این است که برای تخمین دبی سیلاب، فقط به تراز سطح آب نیاز دارد.

۲-۲-۲. روش فاکتور انتقال-شیب انرژی

در این روش، مطابق شکل ۴-ا ابتدا هندسه رودخانه به مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی تجزیه شده و به ازاء هر تراز سطح آب (از کمترین تراز سطح آب تا تراز حداکثر سیلاب)، پارامترهای هندسی شامل مساحت جریان (A)، محیط مرطوب (P)، شعاع هیدرولیکی (R) و فاکتور انتقال (K) به صورت مجزا برای این دو بخش محاسبه شده و سپس شیب انرژی کل مقطع (S_f) تعیین می‌شود (شکل ۴-ب):

$$K_i = \frac{A_i R_i^{2/3}}{n_i}, \quad S_f = \left(\frac{Q}{K} \right)^2 \quad (۳)$$

که n ضریب زبری مانینگ و i متناظر با مقادیر پارامترها در مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی است. در این رابطه، K فاکتور انتقال برای کل رودخانه (مجموع ۳ فاکتور انتقال مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی) است. با رسم فاکتور انتقال و شیب انرژی به ازاء



شکل ۴- مراحل محاسباتی روش فاکتور انتقال-شیب انرژی برای تخمین دبی سیلاب مقاطع مرکب رودخانه‌ای، (a) تفکیک رودخانه به مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی، (b) ترسیم منحنی‌های فاکتور انتقال و شیب انرژی به ازاء عمق جریان

Fig. 4. Computational steps of the energy slope-conveyance method for estimating flood discharge in compound river section, a) Dividing the river into main channel and floodplains, b) Plotting River conveyance capacity and energy slope curves versus flow depth

ضریب آلفا به نوعی بیانگر مقاومت موثر جریان است؛ زیرا هر دو متغیر n و S_f مقاومت و افت انرژی جریان را نشان می‌دهند. هر دو این متغیرها روش دقیق و مشخصی برای اندازه‌گیری نداشته و تعیین آنها معمولاً با عدم قطعیت زیادی مواجه است. تلفیق این دو متغیر در یک ضریب، باعث کاهش عدم قطعیت کلی محاسبه دبی جریان خواهد شد. از طرف دیگر، مطالعات قبلی اثبات نمود که برای رودخانه‌های آبرفتی، رفتار این ضریب به ازاء عمق (یا تراز سطح آب) کاهشی بوده و در عمق‌های بالا تقریباً به یک عدد ثابت می‌رسد (Corato et al., 2014; Shirazi et al., 2024). این مقدار ثابت می‌تواند در برون‌یابی از منحنی دبی-اشل به‌ازاء مقادیر تراز سطح آب بزرگ‌تر مورد استفاده قرار گیرد، اما بهتر است با ایجاد ارتباط بین ضریب آلفا و عمق جریان (یا شعاع هیدرولیکی) به کمک یک معادله ریاضی رگرسیونی، تابع $\alpha(h)$ را مشخص نمود. در این صورت می‌توان به راحتی و با حداقل داده‌های میدانی (فقط مساحت جریان و شعاع هیدرولیکی که با دقت بالا از هندسه مقطع رودخانه قابل محاسبه هستند)، دبی جریان سیلاب در هر تراز دلخواه را برآورد نمود. البته چنانچه دامنه داده‌های مشاهداتی محدود باشد، برآورد مقدار ثابت ضریب آلفا با دقت کافی انجام نخواهد شد که در این صورت باعث افزایش عدم قطعیت در فرآیند برون‌یابی منحنی دبی-اشل می‌شود. مراحل محاسباتی روش آلفا عبارتند از:

همچنین باید توزیع عرضی سرعت جریان در عرض مقطع اصلی رودخانه و نیز دشت‌های سیلابی موجود باشد که رودخانه‌های موجود از این نظر دارای محدودیت جدی هستند. در این مطالعه برای تخمین ضرایب زبری مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی رودخانه‌های مورد مطالعه از مدل ریاضی پرکاربرد شیونو و نایت (۱۹۹۱) استفاده شده است (Abril and Knight, 2004; Gholinejad et al., 2012). به‌طور خلاصه، این مدل با حل توزیع عرضی سرعت جریان در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی، امکان مقایسه این نتایج با داده‌های سرعت اندازه‌گیری شده با مولینه و نیز واسنجی ضرایب زبری مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی رودخانه را فراهم می‌کند (Mc. Gahey et al., 2008; Jamali et al., 2025).

۳-۲-۲. روش آلفا (α)

هر دو روش امتداد شیب منحنی دبی-اشل و فاکتور انتقال-شیب انرژی دارای محدودیت‌های مهمی هستند. در این مطالعه، روش ساده‌ای معرفی شده است که تا حدود زیادی محدودیت‌های فوق را برطرف نموده است. این روش برای رودخانه‌های دارای دشت‌های سیلابی قابل استفاده بوده و برای محاسبه دبی جریان، نیازی به ضرایب زبری مانینگ مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی ندارد. در این روش بر اساس معادله مانینگ، نسبت متغیر S_f به n به‌عنوان

ضریب آلفا ($\alpha = \frac{\sqrt{S_f}}{n}$) تعریف می‌شود:

$$Q = \frac{AR^{2/3}S_f^{1/2}}{n} = \alpha AR^{2/3} \quad (5)$$

است. به کمک این داده‌ها، منحنی دبی-اشل رودخانه در شرایط عادی و سیلابی استخراج شده است.

د- برای تخمین ضریب زبری مانینگ در مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی رودخانه‌ها، از روشی خاص و کاربردی استفاده شده است. به این منظور، مدل ریاضی شبه‌دوبعدی شیونو و نایت (۱۹۹۱) به کمک داده‌های اندازه‌گیری شده سرعت‌های نقطه‌ای در عرض رودخانه (به کمک سرعت‌سنج مولینه) در دو حالت جریان عادی (محدود به مقطع اصلی) و سیلابی (ورود جریان به دشت‌های سیلابی) واسنجی شده است.

۴-۲. شاخص‌های آماری ارزیابی خطای مدل‌سازی

برای ارزیابی دقت مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش در تخمین دبی سیلاب رودخانه‌ها، از معیارها و شاخص‌های آماری ارزیابی عملکرد استفاده شده است. این شاخص‌ها شامل سه شاخص مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا (MAE)، و ضریب تعیین (R^2) است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \quad (۶)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_i - \bar{Q}_i}{\bar{Q}_i} \right| \quad (۷)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (۸)$$

که Q_i و $\bar{Q}_i$ به ترتیب مقادیر مشاهداتی و محاسباتی دبی سیلاب، N تعداد کل داده‌ها و $\bar{Q}$ مقدار میانگین داده‌های مشاهداتی دبی سیلاب هستند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱. نتایج روش امتداد شیب منحنی دبی-اشل

در شکل‌های ۵ تا ۷ نتایج روش امتداد شیب منحنی دبی-اشل برای هر سه رودخانه نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها نشان داده شده است، از داده‌های غیرسیلابی برای استخراج منحنی و از داده‌های سیلابی برای برون‌یابی منحنی استفاده شده است. برای ایستگاه ارازکوسه به دلیل این که تعداد داده‌های سیلابی بسیار کم بود، از دو داده

- بر اساس داده‌های دبی جریان و تراز سطح آب مشاهداتی رودخانه، ضریب آلفا از رابطه $\alpha = \frac{Q}{AR^{2/3}}$ و برای عمق‌های جریان در مجرای اصلی رودخانه محاسبه می‌شوند.
- با رسم تغییرات این ضریب نسبت به عمق جریان، تراز سطح آب و یا شعاع هیدرولیکی، تابع ریاضی منحنی رگرسیونی بهینه این تغییرات استخراج می‌شود.
- با استفاده از تابع ریاضی به دست آمده، مقدار این ضریب برای هر تراز سطح آب یا عمق سیلاب محاسبه است.
- به کمک ضریب آلفا و مشخصات هندسی رودخانه، دبی جریان در هر عمق سیلابی از رابطه $Q = \alpha AR^{2/3}$ قابل محاسبه است.

۳-۲. داده‌های میدانی

برای انجام محاسبات هر یک از روش‌های تخمین دبی سیلاب در رودخانه‌ها، به داده‌های هندسی و هیدرولیکی متعددی مورد نیاز است. این داده‌ها شامل هندسه مقطع عرضی رودخانه در محل ایستگاه هیدرومتری، داده‌های دبی-اشل رودخانه در شرایط عادی و سیلابی، یک یا چند نمونه از اندازه‌گیری توزیع عرضی سرعت در شرایط جریان عادی و سیلابی رودخانه و شیب طولی رودخانه می‌باشند. برای محاسبات روش فاکتور انتقال-شیب انرژی، ضرایب زبری مانینگ مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی هم مورد نیاز است. جمع‌آوری و تعیین این داده‌ها به صورت زیر بوده است:

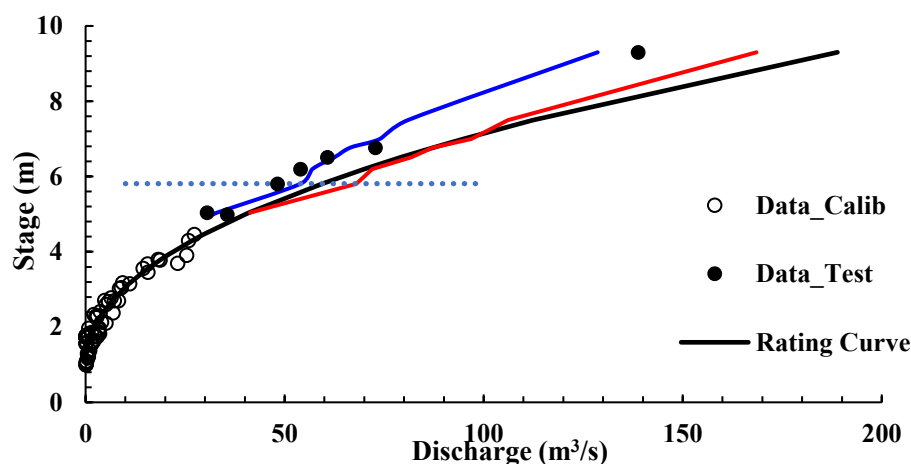
الف- هندسه رودخانه در هر ایستگاه هیدرومتری در حالت جریان-های عادی (غیرسیلابی) از اطلاعات عمق‌سنجی که هم‌زمان با اندازه‌گیری توزیع عرضی سرعت انجام می‌شود، قابل تعیین است. در حالت سیلابی و ورود جریان به دشت‌های سیلاب، هندسه رودخانه ممکن است در اثر وقوع فرسایش و رسوب‌گذاری تغییر کند. این تغییرات باعث ایجاد خطا در محاسبه پارامترهای هندسی مقطع (مثل مساحت، شعاع هیدرولیکی، فاکتور انتقال، و ...) می‌شود. به همین دلیل در این حالت هندسه رودخانه به کمک نقشه‌برداری مقطع عرضی در محل ایستگاه و بعد از عبور سیلاب استخراج می‌شود.

ب- اشل یا تراز سطح آب به کمک ترازسنج نصب شده در محل ایستگاه به دست آمده است.

ج- دبی جریان در حالت عادی و سیلابی به صورت برگه‌های اندازه-گیری سرعت جریان و عمق جریان در رودخانه جمع‌آوری شده

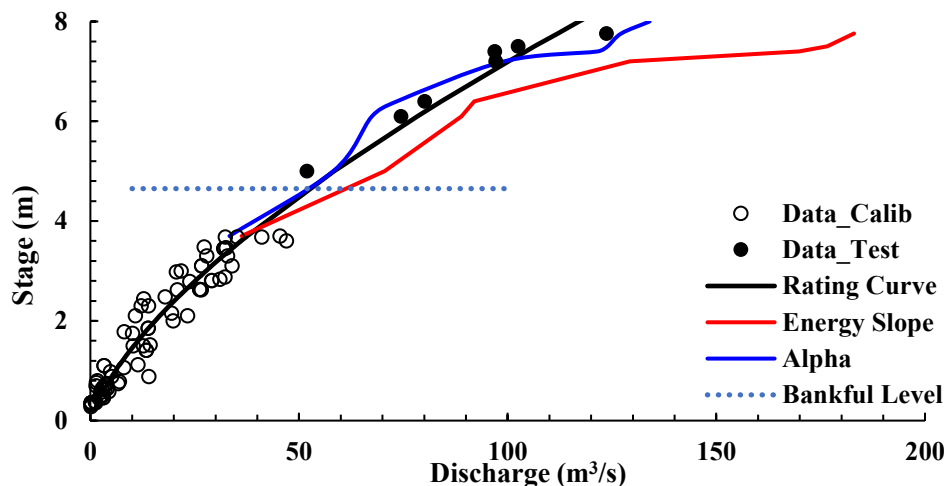
فرض وجود زبری یکسان برای عمق‌های بالاتر جریان، بزرگترین منشاء خطای روش برون‌یابی از منحنی دبی-اشل است. (Sharif and Farooq (2019) نیز نشان دادند که با افزایش نسبت زبری دشت سیلابی به مقطع اصلی از ۲ به ۵، خطای این روش از ۱۲ درصد به حدود ۴۷ درصد افزایش می‌یابد. این الگوی خطا کاملاً با نتایج این تحقیق در ایستگاه آرازکوسه (با نسبت زبری حدود ۴/۸) مطابقت دارد. به‌طور کلی، این روش برای تخمین دبی سیلاب در مراحل اولیه مطالعات مهندسی رودخانه (مثل پهنه‌بندی مقدماتی سیلاب) می‌تواند جواب نسبتاً خوبی ارائه نماید که با توصیه (Merz & Blöschl (2005) و Maleki et al. (2015) همسو است، اما برای مطالعات نهایی و طراحی سازه‌های حساس و به‌ویژه در شرایط ورود جریان به دشت‌های سیلابی زبر، قطعاً با خطای زیادی توأم است که با نتایج تحقیقات (Shojaeian, Hampel & Vázquez (2022) و Hosein zade (2010) & Bagheri (2024) همخوانی دارد. همچنین این خطا در حالتی که مشخصات هندسی و هیدرولیکی مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی رودخانه تفاوت زیادی با یکدیگر داشته باشند، افزایش می‌یابد. این نتیجه هم با یافته‌های تحقیقات (Di Baldassarre (2013) و (Jamali et al. (2025) قابل تأیید است.

غیرسیلابی در ترازهای بالای جریان هم به‌عنوان داده آزمون استفاده شد. این محدودیت در تحقیقات متعددی ذکر شده است (Di Baldassarre and Montanari, 2009). مشاهده می‌شود که این نتایج برای ایستگاه‌های آق‌قلا و سورن تا حدودی قابل قبول ولی برای ایستگاه آرازکوسه غیرقابل قبول است. تحلیل یافته‌های روش امتداد شیب منحنی دبی-اشل نشان می‌دهد که روش مذکور برای ایستگاه‌های آق‌قلا و سورن خطایی در حدود ۱۲ تا ۱۹ درصد داشته که در محدوده قابل قبول برای مطالعات مقدماتی است. این مقدار خطا با نتایج پژوهش Barati et al. (2021) برای رودخانه‌هایی با نسبت عرض دشت سیلابی به عرض مجرای اصلی کمتر از ۳ (مشابه آق‌قلا و سورن) که مقدار خطا را ۸ تا ۲۲ درصد گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد. این در حالی است که این روش برای ایستگاه آرازکوسه با خطایی بیش از ۴۵ درصد، عملکرد ضعیفی دارد. عامل اصلی این خطا، وجود دشت‌های سیلابی با زبری بسیار بالاتر از مجرای اصلی رودخانه است. این یافته با نتایج تحقیق (Pramanik et al., (2017 و Shirazi et al., (2024) مطابقت دارد که نشان دادند روش امتداد شیب منحنی دبی-اشل در رودخانه‌های دارای دشت سیلابی زبر خطایی بسیار بیشتر از رودخانه‌های با مقطع ساده یا منفرد دارد. همچنین Jones (2015) نشان داد که



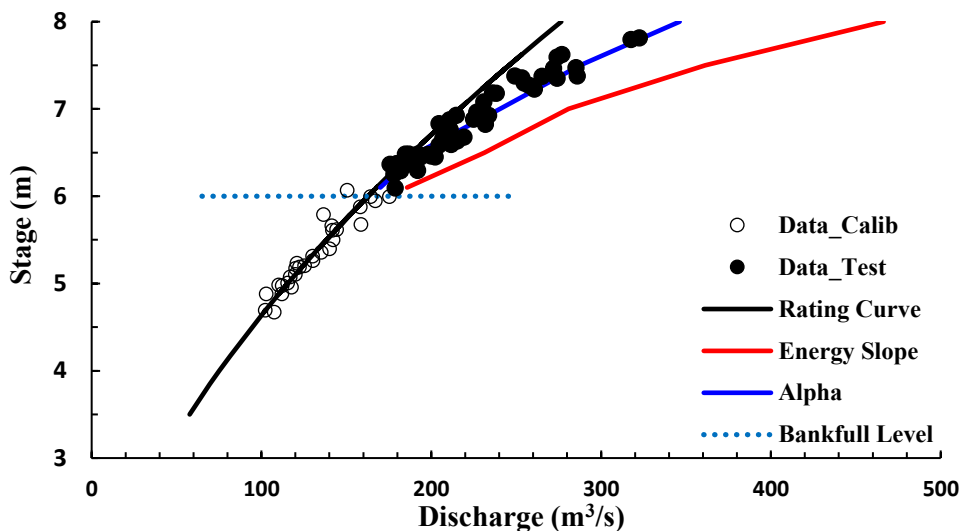
شکل ۵- مقایسه کارایی روش‌های تخمین دبی سیلاب در ایستگاه هیدرومتری آرازکوسه

Fig. 5. Comparison of the performance of flood discharge estimation methods at the Arazkooseh hydrometric station



شکل ۶- مقایسه کارایی روش‌های تخمین دبی سیلاب در ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا

Fig. 6. Comparison of the performance of flood discharge estimation methods at the Aghghala hydrometric station



شکل ۷- مقایسه کارایی روش‌های تخمین دبی سیلاب در ایستگاه هیدرومتری مانتفوردبریج-سورن

Fig. 7. Comparison of the performance of flood discharge estimation methods at the River Severn at Montford Bridge hydrometric station

نمونه‌ای از نتایج واسنجی ضرایب زبری مانینگ برای سه ایستگاه مورد مطالعه نشان داده شده است. بر اساس این واسنجی، ضریب زبری مقطع اصلی ارازکوسه، آق‌قلا و سورن به ترتیب 0.42 ، 0.38 و 0.38 به دست آمده است. بهترین انطباق توزیع سرعت‌های محاسباتی و اندازه‌گیری شده در دشت‌های سیلابی ارازکوسه و آق‌قلا به ترتیب با ضرایب زبری 0.28 و 0.1 و برای دشت‌های سیلابی سمت چپ و راست رودخانه سورن به ترتیب

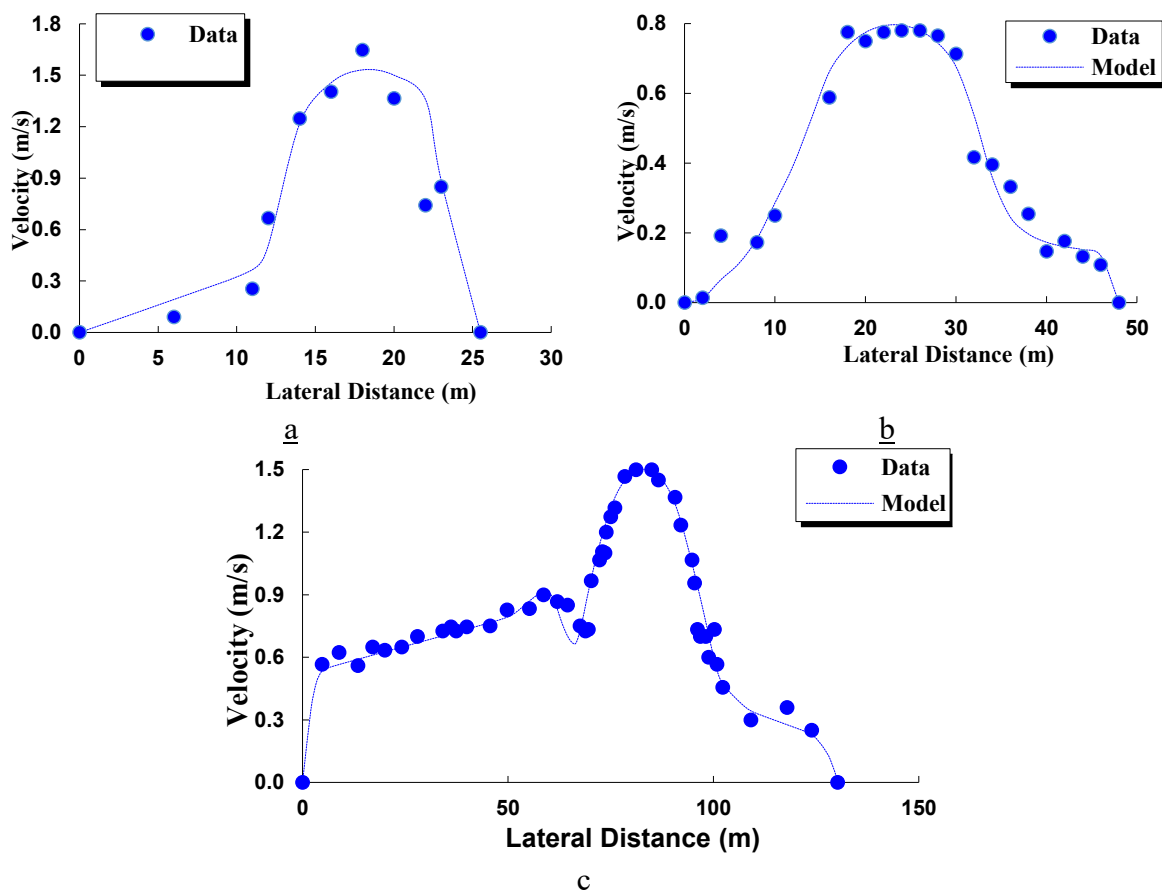
۳-۲. نتایج روش فاکتور انتقال-شیب انرژی

۳-۲-۱. واسنجی ضریب زبری مانینگ مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی

برای تخمین نسبتاً دقیق مقادیر ضرایب زبری مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی رودخانه‌ها، استفاده از مدل‌های ریاضی دوبعدی الزامی است. در این مطالعه از مدل شبه‌دوبعدی شیونو و نایت (۱۹۹۱) به این منظور استفاده شده است. در نمودارهای شکل ۸،

توجه به وجود پوشش گیاهی انبوه در این رودخانه‌ها، مقادیر به‌دست آمده منطقی است.

۰/۰۲۴ و ۰/۰۷۵ حاصل شد (جدول ۱). مشاهده می‌شود که در هر سه رودخانه، ضرایب زبری مانینگ تا حدودی بسیار بالا بوده و با



شکل ۸- حل توزیع عرضی سرعت در رودخانه‌های مورد مطالعه از مدل SKM برای تعیین ضرایب زبری مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی، (a) ارازکوسه ($h=6.44\text{m}$)، (b) آق‌قلا ($h=7.2\text{m}$)، (c) سورن ($h=7.81\text{m}$)

Fig. 8. Solving the lateral velocity distributions in the studied rivers using the SKM model for calibrating the roughness coefficients of the main section and floodplains

جدول ۱- ضرایب زبری مانینگ مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی رودخانه‌های مورد مطالعه

Table 1. Manning roughness coefficients of the main channel and floodplains of the studied rivers

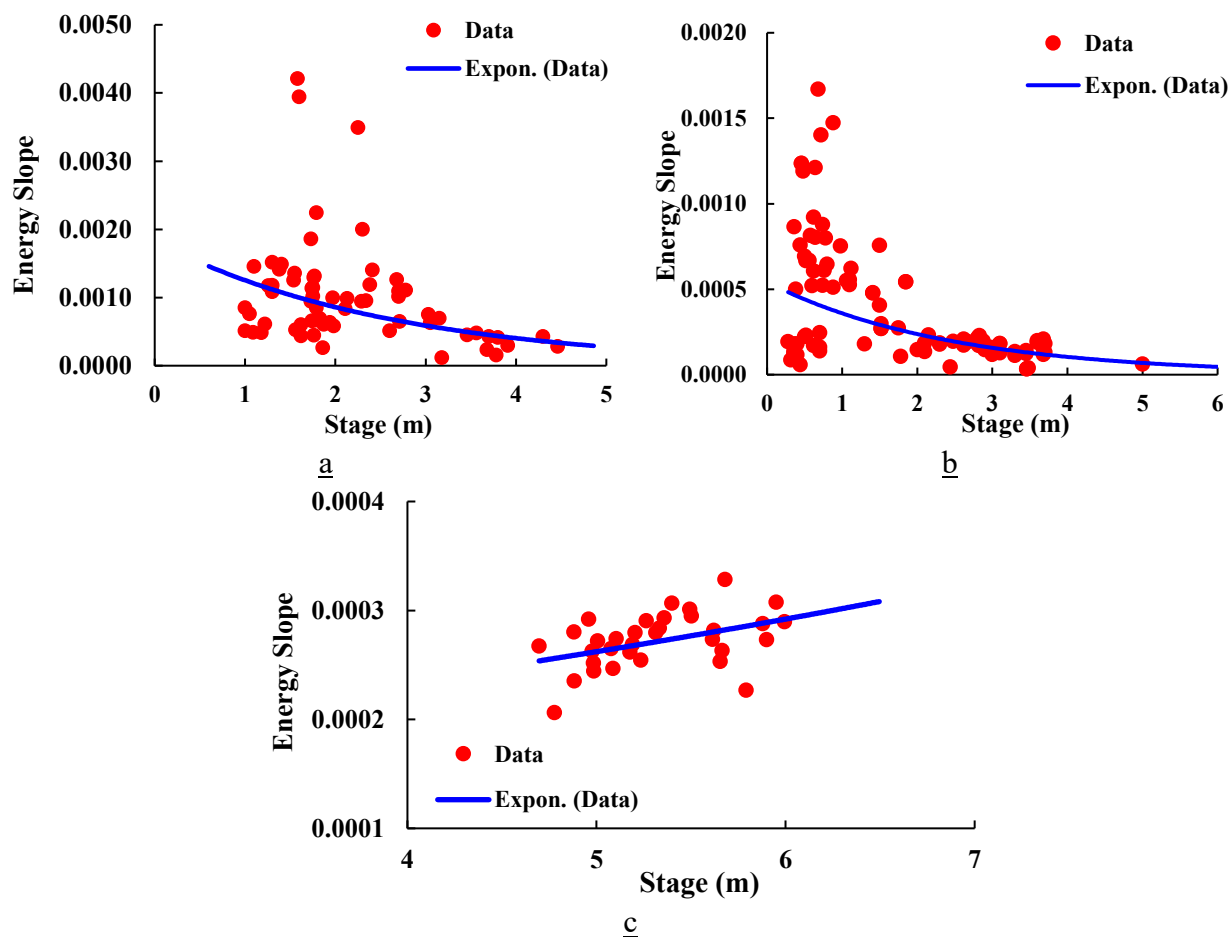
	Main Channel	Left Floodplain	Right Floodplain
Arazkoosch	0.042	0.28	0.28
Aghghala	0.038	0.10	0.1
Severn	0.038	0.024	0.075

انرژی برای مجرای اصلی رودخانه در ترازهای مختلف محاسبه می‌شود (شکل ۹). بر اساس روند تغییرات شیب انرژی، مقدار این متغیر در ترازهای سیلابی محاسبه شده و به کمک معادله (۳)، دبی جریان سیلابی برآورد می‌شود. نتایج این روش در شکل‌های ۵ تا ۷ ارائه

بعد از تعیین ضرایب زبری مانینگ مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی، محاسبات روش فاکتور انتقال-شیب انرژی قابل انجام است. بر اساس این محاسبات، فاکتور انتقال برای کل مقطع و شیب

al., (2021) در رودخانه‌های با پوشش گیاهی انبوه در دشت‌های سیلابی نشان داد که حتی پس از واسنجی دقیق نیز خطای این روش می‌تواند به ۳۰ درصد برسد که کاملاً با یافته‌های تحقیق حاضر تطابق دارد. بر اساس همین یافته‌ها است که در پژوهش Khalili and Khiadani (2019) توصیه شده است که برای تخمین دبی سیلاب در دشت‌های سیلابی باید از مدل‌های ریاضی دوبعدی یا روش انتقال-شیب اصلاح شده با در نظر گرفتن اندرکنش بین مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی استفاده شود

شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج این روش در هر سه ایستگاه دارای خطای قابل ملاحظه‌ای است. این خطا برای سه ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه، آق‌قلا و مونتفوردبریج (سورن) به-ترتیب حدود ۲۱، ۴۲ و ۲۱ درصد است. قابل توجه است که در هر سه ایستگاه، تخمین دبی سیلاب از این روش با بیش‌برآوردی همراه است. این یافته با تحقیق Knight and Shiono (1996) که بیان می‌کند اگر زبری دشت سیلابی به طور قابل توجهی بیشتر از زبری مجرای اصلی باشد، روش مذکور خطای سیستماتیک از نوع بیش-برآوردی ایجاد می‌کند، همخوانی دارد. همچنین پژوهش Liu et



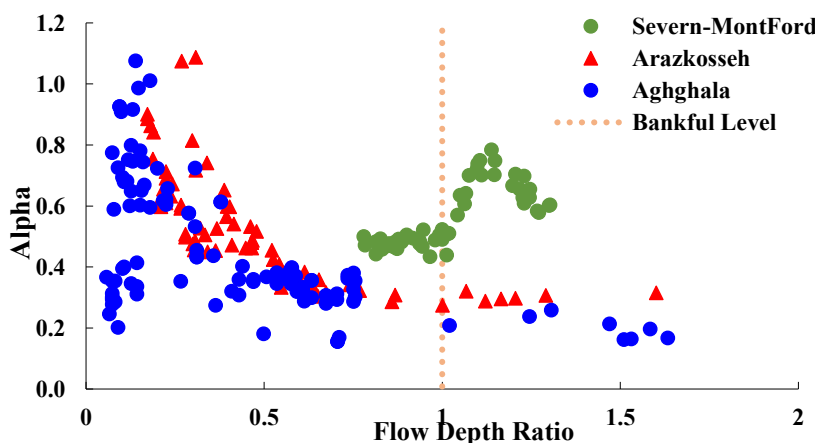
شکل ۹- تغییرات شیب انرژی به ازاء تراز سطح آب در رودخانه‌های مورد مطالعه، (a) ارازکوسه، (b) آق‌قلا، (c) سورن

Fig. 9. Changes in energy slope versus water level in the studied rivers, a) Arezkooseh, b) Aghghala, c) Severn

۳-۳. نتایج روش ضریب آلفا

تغییرات ضریب آلفا در هر سه ایستگاه هیدرومتری در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در رودخانه‌های طبیعی و آبرفتی (ارازکوسه و آق‌قلا)، رفتار ضریب α تا حدود زیادی یکسان است که این رفتار در رودخانه‌های دیگر هم مشاهده شده است (Corato et al., 2014; Shirazi et al., 2024). با افزایش عمق جریان، مقاومت هیدرولیکی جریان کاهش یافته و ضریب α نیز کاهش می‌یابد. این کاهش هم در مجرای اصلی رودخانه و هم در دشت‌های سیلابی به‌وضوح قابل مشاهده است. اما در رودخانه سورن، رفتار α کاملاً سه‌بخشی است، به‌گونه‌ای که در محدوده مجرای اصلی، روند تغییرات این ضریب تقریباً ثابت بوده، ولی پس از عبور از تراز لبریز و تا عمق یک متری جریان که اولین دشت سیلابی پر می‌شود (۶

تا ۷ متر)، روندی افزایشی دارد. دلیل ثابت بودن ضریب α در مقطع اصلی رودخانه سورن این است که این رودخانه دارای مقطعی منظم و مشابه یک کانال است. افزایش ضریب آلفا در اولین دشت سیلابی به دلیل تغییرات هندسی رودخانه مرتبط است. در این حالت، کاهش شعاع هیدرولیکی ناشی از دشت‌های سیلابی عریض و افقی نقشی اساسی دارد (شکل ۱۱). با افزایش بیشتر عمق جریان و ورود به دشت سیلاب دوم (بالتر از ۷ متر)، ضریب آلفا با کاهش مواجه می‌شود. دلیل این رفتار، افزایش شعاع هیدرولیکی مقطع است. روند کاهشی ضریب آلفا در این مرحله، در ایستگاه آق‌قلا نیز تا حدودی قابل مشاهده است، اما نرخ این کاهش در رودخانه سورن به دلیل ویژگی‌های مورفولوژیک مثل سیلاب‌دشت عریض و نسبتاً افقی شدیدتر است.



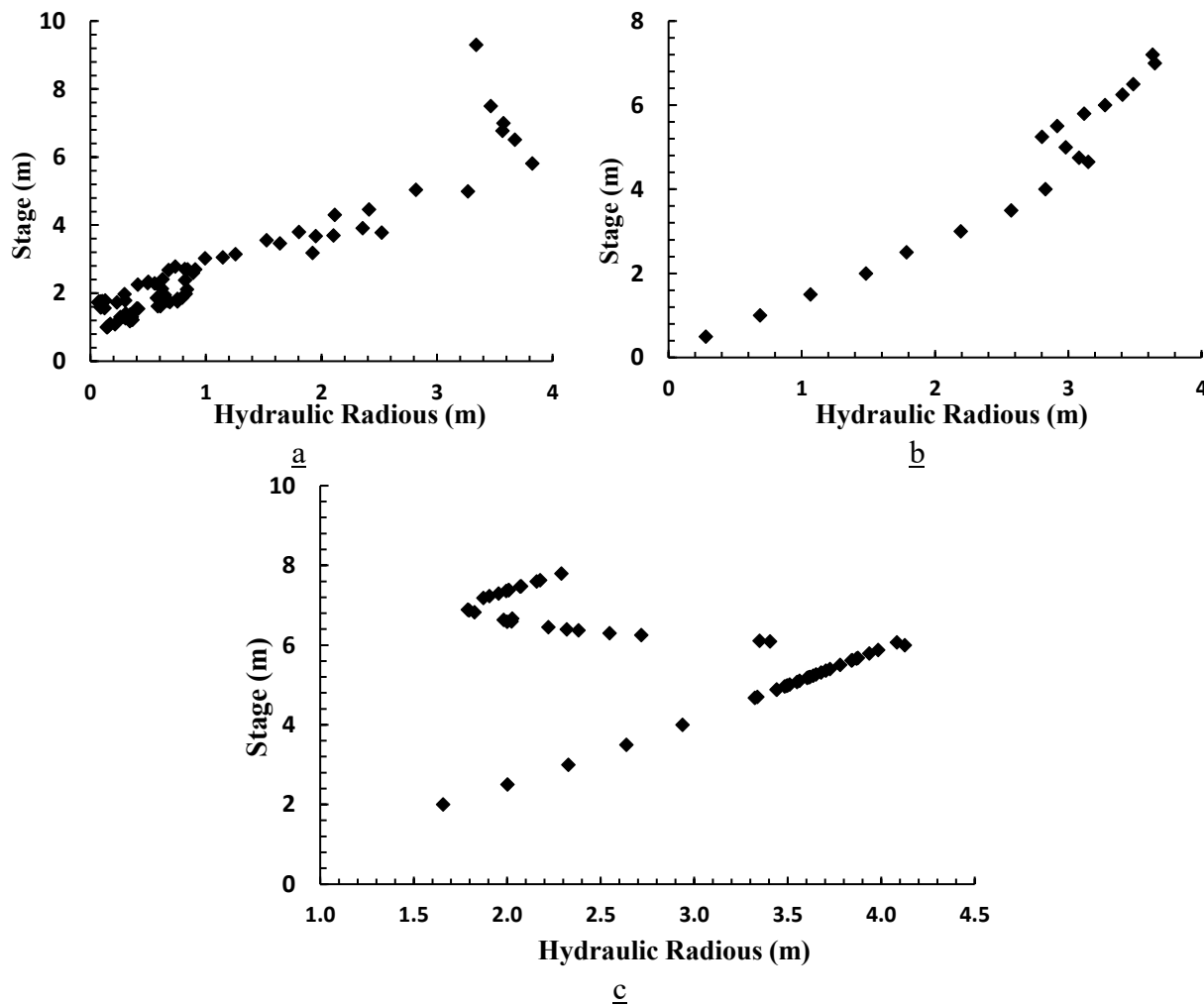
شکل ۱۰- تغییرات ضریب آلفا (α) در محل ایستگاه‌های مورد مطالعه به ازاء عمق نسبی جریان
Fig. 10. Changes in the alpha coefficient (α) at the studied locations versus relative flow depth

تقریباً ثابت است. بنابراین در این شرایط، منحنی رگرسیونی قابل برازش نیست. برای استخراج یک منحنی ریاضی، اولین عمق سیلابی مشاهداتی در رودخانه به لیست داده‌های مجرای اصلی اضافه شد تا امکان برازش یک منحنی برای این مجموعه نقاط جدید فراهم شود (شکل ۱۲- c). این راهکار تطبیقی در منابع معتبری مثل WMO (2018) و Farooq et al., (2022) نیز توصیه شده است. با استخراج این منحنی، مقادیر ضرایب آلفا برای سایر عمق‌های سیلابی موجود قابل محاسبه است. در نهایت، دبی جریان به ازاء هر عمق سیلاب در این رودخانه‌ها برآورد شده و در

بر اساس مراحل محاسباتی روش آلفا، ابتدا مقادیر این ضریب برای تمامی عمق‌های جریان حالت غیرسیلابی رودخانه محاسبه شده و نسبت به شعاع هیدرولیکی ترسیم شدند (شکل ۱۱). برای رودخانه‌های طبیعی و آبرفتی (ایستگاه‌های ارازکوسه و آق‌قلا)، تغییرات این ضریب مطابق با حالت کاهشی معمول در رودخانه‌ها است و یک منحنی به کمک برازش رگرسیونی قابل استخراج است. سپس به کمک این منحنی، مقادیر ضریب آلفا برای عمق‌های سیلابی به‌دست آمد (شکل‌های ۱۲- a و ۱۲- b). برای رودخانه منظم سورن (شکل ۱۲- c)، مقادیر ضریب آلفا در مجرای اصلی

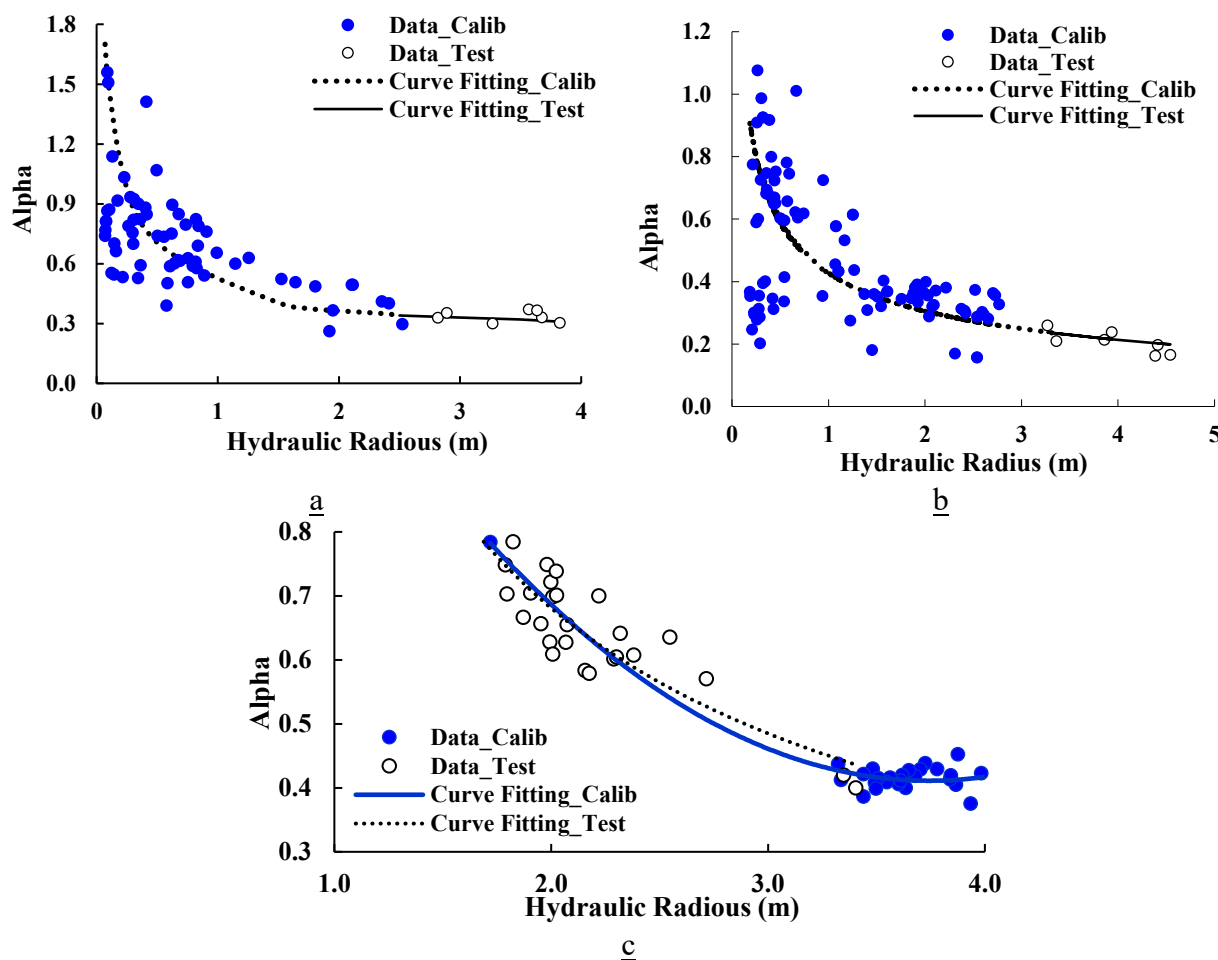
امتداد شیب منحنی دبی-اشل حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد کمتر است. این در حالی است که دقت نتایج روش آلفا در ایستگاه آق‌قلا قابل توجه نبوده و روش ساده امتداد شیب منحنی دبی-اشل دارای دقت مطلوب‌تری است. از دلایل این موضوع می‌توان به احتمال تغییرات کم هندسه مقطع عرضی این ایستگاه در ترازهای سیلاب نسبت به مجرای اصلی رودخانه اشاره نمود.

شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در ایستگاه ارازکوسه و رودخانه سورن، نتایج روش آلفا برتری قابل توجهی در مقایسه با روش‌های مرسوم برون‌یابی از منحنی دبی-اشل دارند. این یافته با نتایج تحقیق Shirazi et al., (2024) در ۲۰ ایستگاه هیدرومتری استان گلستان در جریان غیرسیلابی تا حدود زیادی مطابقت دارد. آنها نشان دادند که خطای تخمین دبی سیلاب رودخانه‌ها به روش آلفا در این رودخانه‌ها در مقایسه با روش



شکل ۱۱- تغییرات شعاع هیدرولیکی رودخانه‌های مورد مطالعه به ازاء تراز سطح آب، (a) ارازکوسه، (b) آق‌قلا، (c) سورن

Fig. 11. Changes in the hydraulic radius of the studied rivers versus water level, a) Arazkooseh, b) Aghghala, c) Severn



شکل ۱۲- تغییرات ضریب آلفا (α) برای هر یک از رودخانه‌های مورد مطالعه، (a) ارازکوسه، (b) آق‌قلا، (c) سورن
Fig. 12. Changes in the alpha coefficient (α) for studied rivers, a) Arezkooseh, b) Aghghala, c) Severn

روش شیب انرژی نشان‌دهنده عدم انطباق این رویکرد با رفتار غیرخطی منحنی دبی-اشل به‌ویژه در شرایط دبی‌های بالا و ورود جریان به دشت‌های سیلابی است. روش امتداد شیب منحنی اگرچه در برخی ایستگاه‌ها (آق‌قلا) نتایج قابل قبولی ارائه داده است، اما از پایداری بین‌ایستگاهی کافی برخوردار نیست. از دیدگاه هیدرولیکی، پارامتر آلفا با در نظر گرفتن همزمان تغییرات دبی جریان، سطح مقطع جریان و شعاع هیدرولیکی، توصیف فیزیکی سازگارتر و واقع‌بینانه‌تری از رفتار جریان به‌ویژه در شرایط سیلابی فراهم می‌آورد. برتری این روش را می‌توان ناشی از در نظر گرفتن تغییرات همزمان پارامترهای هندسی مقطع (A و R) و رفتار غیرخطی دبی به ازاء عمق جریان دانست. در شرایط سیلابی که جریان وارد دشت‌های سیلابی می‌شود، تغییرات ناگهانی در توزیع سرعت جریان

به‌منظور ارزیابی عملکرد سه روش مورد استفاده در این تحقیق، از سه شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین قدرمطلق خطا و ضریب تعیین استفاده شد. نتایج این ارزیابی برای سه ایستگاه ارازکوسه، آق‌قلا و سورن در جدول ۲ ارائه شده است. این نتایج برای داده‌های دبی سیلاب به‌دست‌آمده در مرحله آزمون روش‌های این تحقیق است. نتایج ارزیابی تطبیقی سه روش برون‌یابی نشان می‌دهد که روش مبتنی بر ضریب آلفا در مقایسه با روش‌های شیب انرژی و امتداد شیب منحنی، عملکرد دقیق‌تر و پایدارتری در ایستگاه‌های مورد مطالعه دارد. برتری این روش با مقادیر بالاتر ضریب تعیین و مقادیر کمتر شاخص‌های خطا تأیید می‌شود که بیانگر توانایی بیشتر آن در بازتولید رفتار واقعی منحنی دبی-اشل رودخانه‌ها در شرایط سیلابی است. در مقابل، مقادیر بالای خطا در

دبی جریان نسبت به مشخصات هیدرولیکی مقطع، انعطاف‌پذیری بیشتری در مدل‌سازی این تغییر رژیم جریان دارد.

و زبری مؤثر بستر رخ می‌دهد. روش‌هایی که تنها بر امتداد شیب منحنی یا شیب انرژی تکیه دارند، قادر به بازنمایی کامل این رفتار غیرخطی نیستند. در مقابل، پارامتر آلفا با لحاظ کردن نرخ تغییرات

جدول ۲- نتایج ارزیابی خطای روش‌های مورد استفاده در این تحقیق برای تخمین دبی سیلاب رودخانه‌ها

Table 2. Results of error assessment of methods used in this research to estimate river flood discharge

	Alpha Method			Conveyance-Slope Method			Rating Curve Extension		
	RMSE	MAE	R ²	RMSE	MAE	R ²	RMSE	MAE	R ²
Arazkooseh	5.1	7.4	0.99	18.4	20.7	0.99	22.6	26.3	0.99
Aghghala	13.2	12.4	0.81	47.9	42.1	0.82	6.4	6.0	0.94
Severn	13.1	5.2	0.98	75.8	20.8	0.99	31.1	10.3	0.93

تحقیق برای رودخانه‌هایی که هندسه مجرای اصلی آن‌ها منظم و منشوری است، دارای محدودیت بوده و برای استفاده از این روش، باید حداقل یک داده سیلابی با تراز و دبی جریان معلوم موجود باشد. همچنین وجود منحنی دبی-اشل مناسب، پیش‌نیاز محاسبات دبی جریان رودخانه به کمک این روش است.

سپاس‌گزاری

این مطالعه بخشی از طرح پژوهشی بنیاد ملی نخبگان استان گلستان (طرح شهید احمدی روشن) است که لازم است از حمایت مالی این بنیاد تشکر و قدردانی شود. همچنین از حمایت‌های معنوی مهندسین مشاور عمران و آب پارسیان در انجام مراحل مختلف پژوهش قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

بخشی از اطلاعات و داده‌های این تحقیق در بخش نتایج در متن مقاله و به صورت نمودار ارائه شده است. بقیه داده‌های این پژوهش نیز از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

عبدالرضا ظهیری: راهنمایی، مفهوم‌سازی، انجام محاسبات و تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله. **جواد**

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه روشی ساده و کاربردی به نام ضریب آلفا برای تخمین دبی سیلاب رودخانه‌ها در شرایط ورود جریان به دشت‌های سیلابی ارائه شده و به صورت کاربردی برای دو ایستگاه هیدرومتری در استان گلستان و یک ایستگاه در انگلستان مورد استفاده قرار گرفت. پایه و اساس این روش، فرمول مانینگ است که از نظر فیزیکی با شرایط رودخانه‌های طبیعی سازگار است. نتایج کاربرد این مدل، کارایی آن را نشان داد؛ به طوری که میانگین خطای تخمین دبی سیلاب در سه رودخانه مورد مطالعه حدود ۸ درصد است. متوسط این خطا در دو روش معمول در مهندسی رودخانه یعنی روش فاکتور انتقال-شیب انرژی حدود ۳۰ درصد و روش امتداد شیب منحنی دبی-اشل حدود ۱۵ درصد به دست آمد. مهم‌ترین مزیت روش ضریب آلفا، نیاز حداقل آن به داده‌های میدانی از شرایط هیدرولیکی رودخانه است. تقریباً همگی روش‌های تخمین دبی سیلاب رودخانه‌ها به داده‌های مهمی مثل ضریب زبری مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی نیاز دارند که این داده‌ها عموماً در دسترس نبوده و باید از مدل‌های ریاضی دویعدی برای تخمین نسبتاً دقیق آن‌ها استفاده نمود. روش پیشنهادی این تحقیق بدون نیاز به ضریب زبری دشت‌های سیلابی و صرفاً بر اساس داده‌های دبی و اشل رودخانه در شرایط جریان‌های غیرسیلابی، دبی سیلاب به ازاء هر تراز دلخواه رو برآورد می‌کند. بنابراین برای رودخانه‌های با داده‌های محدود و نیز شرایط پیچیده هیدرولیکی دشت‌های سیلابی (مثل وجود پوشش گیاهی متنوع و انبوه و ...) قابل توصیه است. روش پیشنهادی این

قلی‌نژاد: تهیه بخشی از داده‌های تحقیق، ویرایش و بازبینی مقاله، انجام محاسبات و تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، کنترل نتایج.

منابع

باقری، علی (۱۴۰۲). ارزیابی روش‌های محاسبه منحنی دبی-اشل بر اساس روابط مقاومت فرم بستر در ایستگاه هیدرومتری آبلو نکارود مازندران. *آبیاری و زهکشی/ایران*، ۱۷(۳): ۵۰۳-۴۹۳.
رجبی‌زاده، یوسف، ایوب‌زاده، سیدعلی، و ظهیری، عبدالرضا (۱۳۹۸). بررسی سیل استان گلستان در سال ۱۳۹۷-۱۳۹۸ و ارائه راه‌کارهای کنترل و مدیریت آن در آینده. *اکوهیدرولوژی*، ۶(۴): ۹۲۱-۹۴۲. doi:10.22059/IJE.2019.283004.1137

شجاعیان، زهرا. و حسین‌زاده دلیر، علی (۱۳۸۹). واسنجی روش‌های تجربی در برآورد رابطه دبی-اشل با توجه به فرم بستر (مطالعه موردی: ایستگاه هیدرومتری عبدالخان). پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.

قلی‌نژاد، جواد، ظهیری، عبدالرضا، و دهقانی، امیراحمد (۱۳۹۱). شبیه‌سازی یک و شبه‌دوبعدی جریان‌های سیلابی در رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه گرگان‌رود ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا). پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۹(۴): ۱۱۹-۱۰۳.
ملکی، پری، کتابداری، محمدجواد، صمدی، حسین، و ملکی، داریوش (۱۳۹۴). ارزیابی روش‌های محاسبه منحنی دبی-اشل در رودخانه‌های با فرم بستر ریپل. آب و خاک، ۲۹(۴): ۸۱۹-۸۱۰. doi: 10.22067/jsw.v0i0.30290

References

- Abril, J.B., & Knight, D.W. (2004). Stage-discharge prediction for rivers in floods applying a depth-averaged model. *J. Hydraulic Research*, 122(6), 616-629.
- Afzal, M.A., Ali, S., Nazeer, A., Khan, M.I., Waqas, M.M., Aslam, R.A., Cheema, M.J.M., Nadeem, M., Saddique, N., Muzammil, M., & Shah, A.N. 2022. Flood Inundation Modeling by Integrating HEC-RAS and Satellite Imagery: A Case Study of the Indus River Basin. *Water*, 14(19), 2984. doi:10.3390/w14192984
- Ahmad, M., Afzal, M.S., & Farooq, M. (2020). Effect of floodplain roughness on discharge estimation in compound channels using conventional methods. *Iranian J. Sci. Tech.-Trans. Civ. Eng.*, 44(4), 1345-1356. doi: 10.1007/s40996-020-00391-5
- Alawadi, W., & Devi, T.P. 2018. Depth-averaged simulation of flows in asymmetric compound channels with smooth and rough narrow floodplains. *Australasian J. Water Resources*, 22(2), 137-148. doi: 10.1080/13241583.2018.1509766
- Alimenti, F., Bonafoni, S., Gallo, E., Palazzi, V., Gatti, R.V., Mezzanotte, P., Roselli, L., Zito, D., Barbetta, S., & Corradini, C. 2020. Noncontact measurement of river surface velocity and discharge estimation with a low-cost Doppler radar sensor. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(7), 5195-5207. doi:10.1109/TGRS.2020.2974184
- Ammari, A., & Remini, B. (2010). Estimation of Algerian rivers discharges based one Chiu's equation. *Arabian J. Geosciences*, 3(1), 59-65. doi:10.1007/s12517-009-0056-y

- Ardiclioglu, M., Genc, O., Kalin, L., & Agiralioglu, N. (2012). Investigation of flow properties in natural streams using the entropy concept. *Water and Environment Journal*, 26(2), 147-154. doi:10.1111/j.1747-6593.2011.00273.x
- Ardiclioglu, M., Kisi, O., Hadi, A. M.W., Kuriqi, A., & Kulls, C. (2023). Estimation of mean velocity upstream and downstream of a bridge model using metaheuristic regression methods. *Water Resources Management*, 37(11), 5559-5580. doi:10.1007/s11269-023-03504-4
- Bagheri, A. (2023). Evaluation of stage-discharge curve calculation methods based on bed form resistance relations at Abloo hydrometric station of Nekarood, Mazandaran. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 17(3), 493-503[In Persian].
- Bahmanpouri, F., Barbetta, S., Gualtieri, C., Ianniruberto, M., Filizola, N., Termini, D., & Moramarco, T. (2022). Prediction of river discharges at confluences based on Entropy theory and surface-velocity measurements. *J. Hydrology*, 606:127404. doi:10.1016/j.jhydrol.2021.127404
- Barati, R., Akbari, G.H., & Rahimi, S. (2021). Performance evaluation of stage-discharge rating curve methods in compound channels with different floodplain width ratios. *Flow Measurement and Instrumentation*, 78: 101890. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2020.101890
- Bjerklie, D.M., Dingman, S.L., Vorosmarty, C.J., Bolster, C.H., & Congalton, R.G. (2003). Evaluating the potential for measuring river discharge from space. *J. Hydrology*, 278(1-4), 17-38. doi:10.1016/S0022-1694(03)00129-3
- Bolognesi, M., Farina, G., Alvisi, S., Franchini, M., Pellegrinelli, A., & Russo, P. (2017). Measurement of surface velocity in open channels using a

- lightweight remotely piloted aircraft system. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(1), 73-86. doi:10.1080/19475705.2016.1184717
- Chen, Y.-C., & Hsu, E.O.Z. (2022). Streamflow measurement using mean surface velocity: A non-contact approach. *Water*, 14(15), 2370. doi:10.3390/w14152370
- Chen, Y.-c. (1998). An efficient method of discharge measurement. University of Pittsburgh.
- Chimata, L.A., Venkata, A.S., Patlolla, S.B., Venkata, S.V.R., Kandrika, D.R., & Chauhan, P. (2025). Automated rapid estimation of flood depth using a digital elevation model and Earth Observation Satellite (EOS-04)-derived flood inundation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25(7), 2455–2470. doi:10.5194/nhess-25-2455-2025
- Chimata, R., Srivastava, P.K., Pandey, A., & Mall, R.K. (2025). Flood inundation depth estimation using satellite remote sensing and digital elevation models under data-scarce conditions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25(5), 2455–2474. doi:10.5194/nhess-25-2455-2025
- Cipolla, S., Nones, M., & Maglionico, M. (2018). Estimation of flow discharge using water surface velocity in reclamation canals: a case study. Proc. of the 5th IAHR Europe Congress-New Challenges in Hydraulic Research and Engineering, 623-624.
- Corato, G., Ammari, A., & Moramarco, T. (2014). Conventional point-velocity records and surface velocity observations for estimating high flow discharge. *Entropy*, 16(10), 5546-5559. doi:10.3390/e16105546
- Di Baldassarre, G., & Montanari, A. (2009). Uncertainty in river discharge observations: A quantitative analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(6), 913–921. doi:10.5194/hess-13-913-2009
- Di Baldassarre, G. (2013). Changes of stage–discharge rating curves. In *Floods in a Changing Climate: Inundation Modelling*. Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139084244
- Elmi, O., Gleeson, T., & Wagener, T. (2024). A global remote sensing-based monthly river discharge dataset with uncertainty estimates. *Scientific Data*, 11, 178. doi:10.1038/s41597-024-03001-3
- Elmi, O., Tourian, M.J., Saemian, P., & Sneeuw, N. (2024). Remote sensing-based extension of GRDC discharge time series- A monthly product with uncertainty estimates. *Scientific Data*, 11(1), 1–12. doi:10.1038/s41597-024-04095-1
- Ervine, D.A., Babaeyan-Koopaei, K., & Sellin, R.H.J. 2000. Two-dimensional solution for straight and meandering overbank flows. *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, 126:9, 653-669. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2000)126:9(653)
- Farooq, M., Shafique, M., & Khattak, M.S. (2022). Development of stage-discharge rating curves using limited data: A case study of Kabul River. *Water Supply*, 22(4), 4250–4263. doi: 10.2166/ws.2022.045
- Feyisa, G.L., Meilby, H., Fensholt, R., and Proud, S.R. 2014. Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23-35. doi: 10.1016/j.rse.2013.08.029
- Genç, O., Ardiçlioğlu, M., Ağralıoğlu, N. 2015. Calculation of mean velocity and discharge using water surface velocity in small streams. *Flow Measurement and Instrumentation*, 41, 115-120. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2014.10.009
- Gholinejad, J., Zahiri, A., & Dehghani, A.A. (2012). One and quasi-two-dimensional simulation of flood flows in rivers (Case study: Gorganroud River at Agh-Qala hydrometric station). *J. Water Soil Conserv.*, 19(4): 103-119 [In Persian].
- Hajikandi, H., and Hatami, M. 2010. Assessment of manning's resistance coefficient in compound channels. *J. Water Sciences Research*, 2(1), 9-20.
- Hampel, F., Krysanova, V., & Hattermann, F.F. (2022). Synthetic extension of rating curves using hydraulic models and uncertainty quantification for floodplain inundation mapping. *J. Hydrol.: Reg. Stud.*, 39: 100984. doi: 10.1016/j.ejrh.2021.100984
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate Change 2021: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- International Organization for Standardization (ISO). (1982). *Liquid flow measurement in open channels, Part 2: Determination of the stage–discharge relation (ISO 1100-2:1982 (E), Annex D4)*. Geneva, Switzerland.
- International Organization for Standardization ISO. 1998. *Measurement of liquid flow in open channels-Part 2: Determination of the stage–discharge relation*. ISO 1100–2.
- Jamali, A., Aminnejad, B., and Zahiri, A. (2025). Calibration of a 2D hydraulic model for flow discharge prediction in multi-stage compound channels. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, doi:10.1007/s40996-025-01932-0

- Jones, R.N. (2015). Uncertainty in discharge estimation due to variable floodplain roughness in rating curve extrapolation. *Journal of Hydrology*, 530: 402-412. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.10.012
- Khalili, M., & Khiadani, M. (2019). A modified slope-friction method for discharge estimation in compound channels considering channel-floodplain interaction. *J. Hydrology*, 572: 749-760. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.03.052
- Knight, D.W., & Shiono, K. (1996). River channel and floodplain hydraulics. In M.G. Anderson, D.E. Walling, & P.D. Bates (Eds.), *Floodplain processes*. Wiley. doi:9780470842582/10.1002
- Lang, M., Pobanz, K., Renard, B., Renouf, E., & Sauquet, E. (2010). Extrapolation of rating curves by hydraulic modelling, with application to flood frequency analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 55:6, 883-898, doi: 10.1080/02626667.2010.504186
- Lang, M., Pobanz, K., Renard, B., Renouf, E., & Sauquet, E. (2010). Extrapolation of rating curves by hydraulic modelling, with application to flood frequency analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 55:6, 883-898, doi: 10.1080/02626667.2010.504186
- Lee, M., Yoo, Y., Joo, H., Kim, K.T., Kim, H.S., & Kim, S. (2021). Construction of rating curve at high water level considering rainfall effect in a tidal river. *J. Hydrology: Regional Studies*, 37. doi:10.1016/j.ejrh.2021.100907
- Lin, H., Cheng, X., Liu, J., Shi, Q., Li, T., Zheng, L., Hou, X., & Du, J. (2024). Estimating river discharge across scales with a novel regional gauging method driven by Sentinel satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 311, 114266. doi:10.1016/j.rse.2024.114266
- Lin, J-Y., Cheng, C-T., & Chau, K-W. (2006). Using support vector machines for long-term discharge prediction. *Hydrological Sciences Journal*, 51(4), 599-612. doi:10.1623/hysj.51.4.599
- Lin, Y., Pavelsky, T.M., Allen, G.H., & Yang, X. (2024). Estimating river discharge using discharge-sensitive areas derived from Sentinel-1 and Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing of Environment*, 306, 114152. doi:10.1016/j.rse.2024.114152
- Liu, X., Liu, C., Shan, Y. Q., & Yang, K. J. (2021). Evaluation of energy slope methods in compound channels with vegetated floodplains. *Journal of Hydrology*, 598, 126245. doi:10.1016/j.jhydrol.2021.126245
- Maghrebi, M.F., & Ball, J.E. (2006). New method for estimation of discharge. *J. Hydraulic Engineering*, 132 (10), 1044-1051. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:10(1044)
- Maleki, P., Ketabdari, M.J., Samadi, H., & Maleki, D. (2015). Evaluation of stage-discharge curve calculation methods in rivers with ripple bed form. *Water and Soil*, 29(4), 810-819. doi: 10.22067/jsw.v0i0.30290[In Persian].
- Mansanarez, V., Westerberg, I.K., Lam, N., & Lyon, S.W. (2019). Rapid stage-discharge rating curve assessment using hydraulic modeling in an uncertainty framework. *Water Resources Research*, 55, 9765-9787. doi:10.1029/2018WR024176
- Mc Gahey, C., Samuels, P.G., Knight, D.W., & O'Hare, M.T. (2008). Estimating river flow capacity in practice. *J. Flood Risk Management*, 1, 23-33. doi:10.1111/j.1753-318X.2008.00004.x
- Merz, R., & Blöschl, G. (2005). Flood frequency estimation from data of different length. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9(5), 489-502. doi:10.5194/hess-9-489-2005
- Moramarco, T., Alimenti, F., Zucco, G., Barbetta, S., Tarpanelli, A., Brocca, L., Mezzanotte, P., Rosselli, L., Orecchini, G., & Virili, M. (2015). A prototype of radar-drone system for measuring the surface flow velocity at river sites and discharge estimation. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 12853.
- Moramarco, T., Barbetta, S., & Tarpanelli, A. (2017). From surface flow velocity measurements to discharge assessment by the entropy theory. *Water*, 9(2),120. doi:10.3390/w9020120
- Moramarco, T., Barbetta, S., Bjerklie, D.M., Fulton, J.W., & Tarpanelli, A. (2019). River bathymetry estimate and discharge assessment from remote sensing. *Water Resources Research*, 55(8), 6692-6711. doi:10.3390/w9020120
- Moramarco, T., Barbetta, S., & Tarpanelli, A. (2017). From surface flow velocity measurements to discharge assessment by the entropy theory. *Water*, 92-120. doi:10.1029/2018WR024220
- Moramarco, T., & Singh, V.P. (2010). Formulation of the entropy parameter based on hydraulic and geometric characteristics of river cross sections. *J. Hydrologic Engineering*, 15(10), 852-858. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000255
- Musilu, J.M., Gathanya, J.M., Raude, J.M., & Zeraebruk, K.N. (2025). Extension of the Enkare Narok river rating curve at RGS 2K03 to peak flows using HEC-RAS rainon-grid modeling. *J. Agriculture, Science and Technology*, 24(4), 90-125.

- Omori, Y., Fujita, I., & Watanabe, K. (2021). Application of an entropic method coupled with STIV for discharge measurement in actual rivers. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 1, IOP Publishing, 012036. doi:10.1088/1755-1315/712/1/012036
- Paoletti, M., Pellegrini, M., Belli, A., Pierleoni, P., Sini, F., Pezzotta, N., & Palma, L. (2023). Discharge monitoring in open channels: an operational rating curve management tool. *Sensors*, 23(4), 2035. doi:10.3390/s23042035
- Paris, A., & Calmant, S. (2024). Monitoring river discharge from space: An optimization approach with uncertainty quantification for small ungauged rivers. *Remote Sensing of Environment*, 315, 114434. doi: 10.1016/j.rse.2024.114434
- Paris, A., Biancamaria, S., & Durand, M. (2024). River discharge estimation for small ungauged rivers using satellite altimetry and uncertainty-aware optimization. *Remote Sensing of Environment*, 307, 114285. doi: 10.1016/j.rse.2024.114285
- Perret, E., Le Coz, J., Renard, B., & Lang, M. (2019). Stage-discharge rating curve model includes the effect of seasonal aquatic vegetation. *Geophysical Research Abstracts*, 21, EGU2019-13956
- Perroud, H., & Tygel, M. (2005). Velocity estimation by the common-reflection-surface (CRS) method: Using ground-penetrating radar data. *Geophysics*, 70(6), B43-B52. doi:10.1190/1.2122480
- Pramanik, N., Panda, R.K., & Sen, D. (2017). Development of a river width-discharge relationship using satellite altimetry and in-situ discharge data: A case study for the Brahmaputra River. *J. Hydrology*, 549: 178-191. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.03.063
- Pumo, D., Alongi, F., Nasello, C., & Noto, L.V. (2025). A simplified method for estimating the alpha coefficient in surface velocity-based river discharge measurements. *J. Hydrology*, 648, 132468. doi: 10.1016/j.jhydrol.2024.132468
- Rainville, F., Hutchinson, D., Stead, A., Moncur, D., & Elliott, D. (2016). Hydrometric manual- Data computations: Staged-discharge model development and maintenance. Water Survey of Canada.
- Rajabizadeh, Y., Ayyoubzadeh, S.A., & Zahiri, A. (2019). Flood Survey of Golestan Province in 2018-2019 and providing solutions for its control and management in the future. *J. Ecohydrology*, 6(4), 921-942 [In Persian]. doi:10.22059/IJE.2019.283004.1137
- Ramsbottom, D.M., & Whitlow, C.D. (2003). Extension of Rating Curves at Gauging Stations Best Practice Guidance Manual. R&D Manual W6-061/M. HR Wallingford and EdenVale Modelling Services.
- Rantz, S.E. (1982). Computation of discharge. US Geol. Survey Water Supply Paper 2175.
- Roohi, M., Ghafouri, H.R., Ashrafi, S.M., Motagh, M., & Haghshenas Haghighi, M. (2025). A hybrid approach for enhanced flood prediction and assessment: Leveraging physical models, deep learning and satellite remote sensing. *Big Earth Data*, 9(3), 439-472. doi:10.1080/20964471.2024.2437856
- Sharif, M., & Farooq, M. (2019). Assessment of discharge coefficients for compound channels with different roughness ratios. *Arabian J. Sci. Eng.*, 44(10): 8481-8492. DOI: 10.1007/s13369-019-03923-8
- Shiono, K., and Knight, D.W. 1991. Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *J. Fluid Mechanics*, 222: 617-646.
- Shirazi, F., Zahiri, A., Piri, J., & Dehghani, A.A. (2024). Estimation of river high flow discharges using friction-slope method and hybrid models. *Water Resources Management*, 38(3), 1099-1123. doi:10.1007/s11269-023-03645-6
- Shojaian, Z., & Hosseinzadeh, A. (2010). Calibration of experimental methods for estimating stage-discharge relation considering bed form (Case study: Abdolkhan hydrometric station). In Proceedings of the 5th National Congress of Civil Engineering, Mashhad, Iran, 14-16 May 2010. [In Persian].
- Sivapragasam, C., & Muttill, N. (2005). Discharge rating curve extension—a new approach. *Water Resources Management*, 19(5), 505-520. doi:10.1007/s11269-005-6811-2. doi:10.1007/s11269-005-6811-2
- Stosic, B., Sacramento, V., Filho, M.C., Cantalice, J.R.B., & Singh, V.P. (2016). Computational approach to improving the efficiency of river discharge measurement. *J. Hydrologic Engineering*, 21(12), 04016049. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001448
- Takata, H., Obata, S., Sato, T., & Shimatani, Y. (2024). Back-calculation of Manning's roughness coefficient by 2D flow simulation and influence of in-channel physical parameters in a mountain river, Japan. *Water*, 16(2), 320. doi:10.3390/w16020320
- Tarpanelli, A., Barbetta, S., Brocca, L., & Moramarco, T. (2013). River discharge estimation by using altimetry data and simplified flood routing modeling. *Remote Sensing*, 5(9), 4145-4162. doi:10.3390/rs5094145

- Torsten, D., Gerd, M., and Torsten, S. 2002. Extrapolating stage-discharge relationships by numerical modeling, Int. Conf. on Hydraulic Engineering, Warshaw, 1-8.
- Wark, J.B., Samuels, P.G. & Irvine, D.A. (1990). A practical method of estimating velocity and discharge in compound channels. International Conference on River Flood Hydraulics, London, 163-172.
- WMO (2018). Guide to Hydrological Practices (6th Ed.), Volume I: Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. World Meteorological Organization, No. 168: 295-310. doi: 10.25607/OBP-1512.
- Zakharova, E., Nielsen, K., Kamenev, G., & Kouraev, A. (2020). River discharge estimation from radar altimetry: Assessment of satellite performance, river scales and methods. *J. Hydrology*, 583, 124561. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.124561
- Zakwan, M., Muzzammil, M., & Alam, J. (2017). Application of data driven techniques in discharge rating curve-an overview. *Aquademia*, 1(1), 02. doi:10.20897/aquademia.201702