

Research Article

Estimation of Open Channel Flow Resistance Coefficient Under the Effect of Slope and Discharge Variation Using Gradually Varied Flow

Reza Farzanpour¹, Salah Kouchakzadeh², and Shabnam Moghispour³

1-Ph.D. candidate, Kish International Campus, University of Tehran.

Corresponding Author: 2-Professor, Irrigation and Reclamation Engrg. Dept., University college of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran.

3-Ph.D. Hydraulic structure, formerly graduate student, Irrigation and Reclamation Engrg. Dept., University college of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, P.O.

(✉ **Corresponding Author:** skzadeh@ut.ac.ir)

ARTICLE INFO

Received: 5 July 2026

Revised: 11 July 2026

Accepted: 15 July 2026

Available Online: 29 July 2026

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Farzanpour, R., Kouchakzadeh, S., Moghispour, Sh., (2026). Estimation of open channel flow resistance coefficient under the effect of slope and discharge variation using gradually varied flow.

V.26, No.100, P: 1-16

<https://doi.org/10.22092/idser.2026.373436.1652>

Extended Abstract

Introduction

Historically, the determination of Manning's roughness coefficient, n , has relied on two approaches: (1) field measurements, and (2) laboratory experiments in flumes where quasi-uniform flow is artificially established. While field data are most realistic, they suffer from uncontrolled variables and high costs. Laboratory studies offer controlled conditions but face a fundamental challenge: establishing truly uniform flow in a flume requires a long channel length, precise slope adjustment, and a downstream control that balances friction losses—a condition that is rarely achieved in practice.

Studies by Tracy and Lester (1961) and Kazemipour and Apelt (1979, 1982, 1999) demonstrated that even in relatively long flumes, achieving true uniform flow is difficult and time-consuming. Moreover, in natural rivers, uniform flow is the exception rather than the rule; gradually varied flow dominates due to changes in cross-section, slope, and roughness along the channel.

This study proposes a paradigm shift: instead of forcing uniform flow in the laboratory—which introduces uncertainty and limits repeatability—the GVF was used as the basis for estimating Manning's coefficient. The M2 profile provides a well-defined water-surface profile that can be accurately measured and compared with theoretical GVF solutions. By optimizing n to minimize the discrepancy between observed and computed profiles, we obtain a robust estimate of the roughness coefficient that is both physically meaningful and practically reproducible.

The primary objectives of this research were: To develop and validate a GVF-based methodology for estimating Manning's n in a laboratory flume; To investigate the effects of three different bed roughness types on n ; to quantify the influence of longitudinal slope and discharge on n ; to compare the experimental results with theoretical resistance laws and assess the flow regime (hydraulically smooth, transitional, or rough); to perform a sensitivity analysis regarding the choice of reference depth for roughness-height estimation.

Methodology

Experimental Setup

Experiments were conducted in a rectangular flume located at the Central Water Research Laboratory of the University of Tehran. The flume has a length of 12 m, a width of 0.8 m, and a depth

of 0.6 m. The flume is mounted on an adjustable platform capable of setting longitudinal slopes. Water-surface profiles were measured using data-acquisition system designed for the current research. Three bed materials, 9 longitudinal slopes, and 9 discharges were tested.

Experimental Procedure and Data Analysis

For each bed roughness the desired slope was set, and the flow was established. The downstream gate was fully opened to create a free overfall, generating an M2 gradually varied profile. After steady-state conditions were reached, the water surface elevations along the flume were recorded.

Manning's n was determined by solving the standard GVF equation for a prismatic channel. For each experimental profile, the value of n was optimized to find the best match between the observed and the computed profiles. The equivalent roughness height, k_s , was then calculated.

Results and Discussion

The optimized Manning's n values for all 81 runs are summarized in Tables 1–3 of the main. Contrary to some previous studies (e.g., Merry, 2017; Yilmaz *et al.*, 2023), which reported a decreasing trend of n with increasing discharge, the results did not show a systematic or monotonic relationship. For most roughness–slope combinations, n remained approximately consistent across the discharge range. Small fluctuations (typically ± 0.002) were observed but did not follow a consistent pattern. This suggests that within the tested range of relative submergence, the effect of discharge on bulk resistance is secondary to the geometric roughness characteristics. Similarly, slope variations produced only minor changes in n .

Computed shear Reynolds numbers (Re^*) revealed that both bed materials of C2 and C3 operated in the fully rough turbulent regime ($Re^* > 100$), confirming that viscous effects were negligible. In contrast, the galvanized bed (C1) fell within the transitional regime.

Because the piezometers were connected to the flume floor (i.e., below the installed mesh covers), measured depths included the physical thickness of the roughness elements. To assess whether this introduced systematic bias, the reference depth was artificially reduced by 0.5 cm, 1.0 cm, and 1.5 cm, and the entire optimization was repeated. The resulting changes in k_s were consistently less than 1%, and the flow regime classification remained unchanged. This demonstrates that the methodology is robust and insensitive to minor uncertainties in vertical datum selection.

Conclusions

This study validates a novel experimental approach for estimating Manning's n using gradually varied flow (M2 profiles), which offers a practical, repeatable, and lower-uncertainty alternative to conventional uniform-flow methods in laboratory flumes. By leveraging gradually varied flow—which prevails in natural channels—this approach bridges the gap between laboratory studies and field applications, offering a physically relevant framework for river engineering and flood modeling.

Keywords: Equivalent roughness, Longitudinal slope, Manning's roughness coefficient, Open Channels, Shear Reynolds number

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest. All authors have read and approved the final manuscript.

Funding

The corresponding author conducted this study as an extension of the research project entitled “Experimental Investigation of the Effects of Hydraulic Crossing Structure Geometry on the Trapping of Large Woody Debris and the Aggravation of Flood Hazards,” carried out at the Soil Conservation and

Watershed Management Research Institute. The present research was undertaken to develop practical measures for reducing flood risks associated with woody debris accumulation at bridges. No financial support was received from any public, commercial, or non-profit organization for conducting, writing, or publishing this study.

Data Availability Statements

All relevant data and results supporting the findings of this study are presented within the article. The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Author Contribution

All authors contributed to the study conception and design. Material preparation, data collection and analysis were performed by all authors. The first draft of the manuscript was written by R.F. and all authors commented on previous versions of the manuscript (R.F., S.K., and S.M.). The final revisions have been applied by S.K. and Moreover, all authors have read and approved the final manuscript.

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Acknowledgement

The vice dean for research affair of the University of Tehran is Acknowledged for providing the research facility of the Central Lab for Water Research



© 2026, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

[https:// 10.22092/idser.2026.373436.1652](https://10.22092/idser.2026.373436.1652)

نوع مقاله: پژوهشی

برآورد ضریب مقاومت جریان روباز تحت اثر تغییرات شیب و دبی با بهره‌گیری از جریان متغیر تدریجی

رضا فرزانه پور^۱، صلاح کوچک زاده^{۲*}، شبنم مغیث پور^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۴ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۲۰ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۴ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۰۷

چکیده

تخمین درست ضریب زبری مانینگ برای طراحی کانال‌های روباز، روندیابی سیلاب و مهندسی رودخانه ضروری است. با این حال، روش‌های متداول آزمایشگاهی برای تعیین این ضریب، مبتنی بر برقراری جریان شبه یکنواخت هستند که وقت‌گیر و همراه با عدم قطعیت بالاست. در اینجا یک رویکرد جایگزین مبتنی بر جریان متغیر تدریجی برای تخمین ضریب مانینگ در شرایط آزمایشگاهی ارائه شده است. آزمایش‌ها در فلوم مستطیلی به طول ۱۲ متر با استفاده از سه زبری بستر شامل آهن گالوانیزه، کف پوش‌های مشبک از جنس پلی‌وینیل کلراید (PVC) با پایه‌های کوتاه و مشبک متراکم با پایه‌های بلند به اجرا درآمدند. شیب‌های طولی مختلف و با ۹ دبی (۱۰ تا ۹۰ لیتر بر ثانیه با گام‌های ده لیتر بر ثانیه) آزمون شدند. نیمرخ‌های سطح آب با استفاده از یک شبکه متراکم پیزومتری و سامانه خودکار حسگرهای فشار اندازه‌گیری شدند. به جای ایجاد جریان شبه یکنواخت، با باز کردن کامل دریچه پایین‌دست، نیمرخ‌های M2 برقرار شد و ضریب زبری مانینگ با کمینه‌سازی مجموع مربعات اختلاف بین نیمرخ‌های مشاهده‌شده و محاسبه‌شده از معادله جریان متغیر تدریجی تعیین شد. نتایج تحقیق نشان داد که تأثیر دبی بر ضریب زبری به‌طور کلی جزئی و نامنظم است و تأثیر شیب نیز در محدوده آزمون‌شده در درجه دوم اهمیت قرار دارد. عدد رینولدز برشی نشان داد که هر دو بستر مشبک در رژیم کاملاً متلاطم و زبر قرار دارند در حالی که بستر گالوانیزه در ناحیه انتقالی است. تحلیل حساسیت نشان داد که تعدیل عمق جریان تا ۱ سانتی‌متر برای لحاظ کردن ضخامت فیزیکی پوشش‌ها تغییری کمتر از ۱ درصد در اندازه زبری معادل محاسبه شده ایجاد می‌کند که گویای استواری نتایج است. روش پیشنهادی مبتنی بر جریان متغیر تدریجی، جایگزینی عملی، تکرارپذیر و با عدم قطعیت کمتر برای تخمین ضرایب زبری در فلوم‌های آزمایشگاهی فراهم می‌آورد و کاربرد مستقیمی در مجاری طبیعی دارد که جریان متغیر تدریجی در آنها قاعده است نه استثنا.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع زبری معادل، شیب بستر، ضریب زبری مانینگ، عدد رینولدز برشی، کانال‌های روباز

مقدمه

(1963; Yen, 2002). اثر بسیاری از عوامل مؤثر در مقاومت

جریان در جریان‌های با سطح آزاد، که ناشناخته مانده‌اند یا مطالعه آنها با دشواری زیاد همراه است، به ضرایب زبری منسوب می‌شوند. راوس (Rouse, 1965) با طرح دیدگاه‌های متعدد و تحلیل مقاومت جریان در مجاری روباز بین زبری

طراحی کانال‌ها و مجاری روباز و تعیین رقوم سطح آب در طرح‌های ساماندهی رودخانه‌ها مستلزم انتخاب درست ضریب زبری است. این انتخاب معمولاً دارای عدم قطعیت است زیرا مقاومت جریان به عواملی مانند هندسه مقطع، شرایط فیزیکی بستر، شیب طولی، دبی و هیدرولیک جریان منسوب شده است (Chow, 1959; Rouse, 1965; ASCE,)

^۱ گروه علوم و مهندسی آب، پردیس بین المللی کیش، دانشگاه تهران

^۲ گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

([Email: skzadeh@ut.ac.ir](mailto:skzadeh@ut.ac.ir)) نویسنده مسئول

^۳ دکتری سازه‌های آبی، دانشجوی سابق دکتری گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

صاف فولادی، دانه بندی شنی، و موج دار و در دو شیب ۱/۲۰۰ و ۱/۵۰۰ و دبی‌های مختلف بررسی کرد و نشان داد ضریب زبری مانینگ در بستر موج دار بیشینه و برای بستر صاف کمینه است. او همچنین نتیجه گیری می‌کند در یک شیب ثابت و یک بستر ضریب زبری با افزایش دبی کاهش می‌یابد، اگرچه این تغییرات چشمگیر نیست. اما نقد اساسی به این پژوهش در این است که تکرار پذیری آزمایش‌ها به دلیل روشن نبودن روش برداشت داده‌ها، بود یا نبود عمق یکنواخت و گزارش نکردن خطاهای برداشت داده‌ها است.

ییلماز و همکاران (Yilmaz et al., 2023) در مطالعه‌ای آزمایشگاهی تأثیر به کارگیری اندازه مختلف قطر دانه‌های بستر بر ضریب زبری و تغییرات شیب کانال بر آن را بررسی و گزارش کرده‌اند با افزایش اندازه دانه‌ها و شیب کانال، ضریب زبری مانینگ افزایش می‌یابد. این مطالعه همچنین تأیید می‌کند که ضریب زبری با افزایش دبی کاهش می‌یابد. لاو و افشار (Lau and Afshar, 2013)، ابراهیم و عبدالمجید (Ebrahim and Abdel-Mageed, 2014) نیز در مطالعات دیگر، تأثیر زبری بستر و شیب کانال بر ضریب زبری را در شرایط مختلف جریان بررسی کردند و نشان دادند که ضریب زبری رابطه‌ای معکوس با دبی و رابطه‌ای مستقیم با شعاع هیدرولیکی دارد. اما به این دلیل که این محققان پژوهش خود را در یک فلوم آموزشی و با مقیاس بسیار کوچک و حداکثر دبی حدود سه لیتر به انجام رسانده‌اند، نتایج ارائه شده آنها پرسش‌برانگیز است. اما ابراهیم و عبدالمجید (Ebrahim and Abdel-Mageed, 2014) در پژوهش‌ها از زبری‌های مصنوعی استفاده کرده‌اند که در کف یک فلوم با شیب طولی ثابت نصب کرده‌اند. آنها با ایجاد جریان شبه نرمال اندازه‌گیری‌ها را ادامه دادند و با این همه نتیجه‌گیری‌های آنها در مواردی با مطالب نظری در تعارض است.

جارت (Jarrett, 1984) اشاره می‌کند که نتایج مطالعات نظری و آزمایشگاهی در خصوص تأثیر غوطه‌وری نسبی بر زبری همیشه با داده‌های میدانی سازگار نبوده است. این

فیزیکی و مقاومت کل تمایز قائل شد و خاطرنشان کرد که n مانینگ (و C_z شزی) معیارهای زبری بستر یا مزر هستند که همواره صرفاً به عنوان تابعی از ترکیب بستر جدول بندی می‌شوند به شکلی که n طوری در نظر گرفته می‌شود که گویی یک ویژگی فیزیکی از ماده بستر است، در حالی که با این نگرش در واقع ضریب تجربی است که اثر چندین پدیده را با هم جمع می‌کند. دیدگاه دوم راوس (Rouse, 1965) این است که علاوه بر زبری بستر، مقاومت تابع پارامترهای دیگر وابسته به هم است مانند اثرهای ویسکوزیته، شکل مقطع عرضی، غیریکنواختی مرز و ناپایداری جریان.

با وجود تأکید راوس (Rouse, 1965) بر ضرورت بررسی مقاومت جریان در مجاری با سطح آزاد با تکیه بر مفاهیم اساسی مکانیک سیالات، هنوز هم در کارهای مهندسی از ضرایب زبری مانینگ، n ؛ شزی، C_z ؛ و دارسی وایسباخ، f به عنوان نماینده مقاومت در برابر جریان به طور گسترده استفاده می‌شود. شواهد این امر کاربرد ضرایب زبری در جریان‌های یکنواخت، متغیر مکانی، متغیر تدریجی و حتی جریان‌های غیردائمی بسیار گسترده است (برای مثال Hager, 1983; Sturm, 2021; Akan and Iyer, 2021).

از میان سه ضریب زبری یادشده، اگر چه ضریب دارسی- وایسباخ بدون بعد و از بستر مستحکم مطالعات مکانیک سیالاتی برای مجاری بسته برخاسته است، کاربرد آن در مجاری با سطح آزاد کمتر از ضرایب تجربی مانینگ و شزی است. ضریب زبری مانینگ، به عنوان یک پارامتر تجربی، اثر زبری بستر را به پارامترهای جریان ارتباط می‌دهد. در نظر گرفتن مقادیر ثابت ضرایب زبری مانینگ و شزی در مجاری با سطح آزاد به منزله برقراری تلاطم کامل و زیر بودن بستر از نظر هیدرولیکی است.

مطالعات متعددی به بررسی رابطه میان تغییرات ضریب زبری مانینگ با عواملی مانند جنس، شکل و شیب بستر جریان در کانال‌های طبیعی یا کانال‌های آزمایشگاهی صورت گرفته است. مری (Merry, 2017) اثر نوع بستر بر ضریب زبری مانینگ را در یک کانال مستطیلی در سه نوع بستر

از ضرورت‌های پژوهش‌های آزمایشگاهی است. به عبارت دیگر چنانچه پارامترهای هندسه، زبری و طول فلوم تغییر نکند برقراری جریان متغیر تدریجی برای دبی معین به سرعت رخ می‌دهد و تکرار پذیری آن بی‌نقص خواهد بود. از طرفی دیگر، در مطالعات آزمایشگاهی جریان‌های غیردائمی، اصولاً رخداد جریان یکنواخت و تعیین ضریب مقاومت برای آن موضوعیت نخواهد داشت. از این رو به نظر می‌رسد تعیین ضرایب مقاومت به کمک جریان متغیر تدریجی در آزمایشگاه علاوه بر امکان‌پذیر بودن، می‌تواند به نتایجی منجر شود که افزون بر مرتفع کردن برخی از عدم قطعیت‌ها، قابلیت تکرار پذیری بالایی دارند. در این پژوهش با استفاده از سه نوع زبری مصنوعی، و با اعمال شیب‌های مختلف در هر زبری ضرایب مقاومت جریان تعیین و گزارش شده است.

مواد و روش‌ها

تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در یک فلوم مستطیلی به طول ۱۲ متر، عرض ۰/۸ متر و عمق ۰/۶ متر به اجرا در آمد. آب از مخزن هوایی با هد ثابت به لوله‌های آزمایشگاه منتقل می‌شود. روی لوله ورودی به فلوم، شیر کنترل و فلومتر مغناطیسی با خطای حداکثر ۰/۵ درصد نصب شده است. از لوله تغذیه کننده، آب به مخزن بالادست فلوم وارد و پس از کاهش تلاطم وارد فلوم می‌شود. در پایین دست فلوم، مخزن جمع‌آوری آب خروجی از فلوم قرار دارد. آب جمع‌آوری شده در مخزن پایین دست به شبکه زهکشی آزمایشگاه می‌ریزد و از آنجا به مخزن زیرزمینی وارد می‌شود. آب مخزن زیرزمینی با تعدادی پمپ به مخزن هوایی با هد ثابت پمپاژ می‌شود تا به این ترتیب حلقه گردش آب کامل شود. فلوم مستطیلی روی یک سکوی شیب‌پذیر قرار دارد. شکل (۱) پلان و مقطع تجهیزات آزمایشگاهی را نشان می‌دهد که در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، قرار دارد.

برای اندازه‌گیری عمق آب در طول کانال، ۱۲۰ پیژومتر در طول و عرض کانال نصب شد که ۶۰ عدد از آنها به صورت

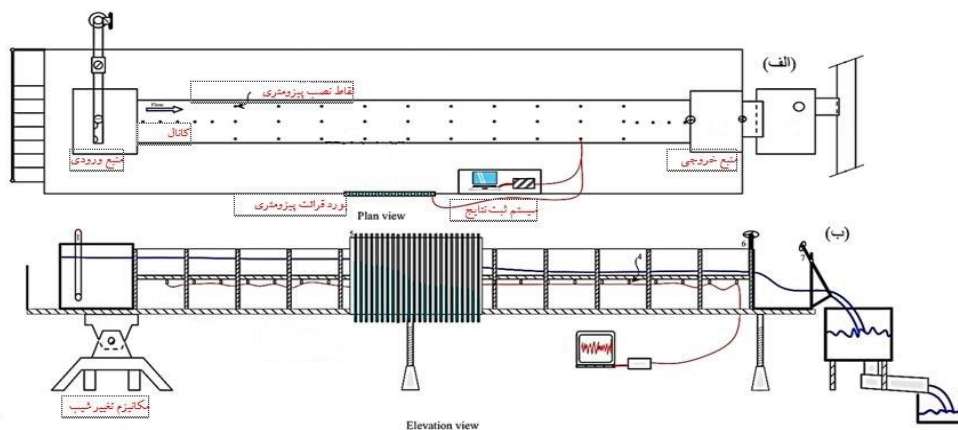
تفاوت بین ضرایب زبری آزمایشگاهی و میدانی، ضرورت پرداختن به آزمایش‌های کنترل شده با پوشش‌های مصنوعی را برای برآورد ضریب زبری معادل و درک بهتر رفتار جریان در شرایط واقعی و در شیب‌های متفاوت برجسته می‌کند. بنابراین در این پژوهش، با استفاده از یک کانال آزمایشگاهی بزرگ‌مقیاس و اعمال شیب‌های مختلف و سه نوع زبری به برآورد ضریب زبری معادل برای پوشش‌های مصنوعی و ارزیابی تأثیر شیب پرداخته شد.

بسیاری از مطالعاتی که تاکنون در آزمایشگاه‌ها به اجرا در آمده است با ایجاد جریان شبه یکنواخت در طولی نسبتاً کوتاه بوده است. ایجاد جریان شبه یکنواخت دارای عدم قطعیت است از این رو که تصمیم‌گیری در خصوص برقراری آن وابسته به قضاوت پژوهشگر است. در واقع جریانی که در فلوم‌های آزمایشگاهی تحت عنوان جریان یکنواخت ایجاد می‌شود، جریان یکنواخت نیست بلکه به تعبیر هندرسن (Henderson, 1966) نه نیم‌رخ M1 است و نه نیم‌رخ M2. بررسی ادبیات موضوع پژوهش نشان می‌دهد که معدودی از محققان که به دنبال جمع‌آوری داده‌های با کیفیت برای مطالعه مقاومت جریان بوده‌اند مثل تریسی و لستر (Tracy, 1961) و کاظمی‌پور و اپلت (Kazemipour and Apelt, 1979, 1980, 1982, 1999) ناگزیر شدند که این شیوه ایجاد جریان شبه یکنواخت را حتی در فلوم‌های آزمایشگاهی نسبتاً طولانی به کار برند. اما ایجاد چنین جریانی در آزمایشگاه علاوه بر وقت‌گیر بودن، همچنان می‌تواند با عدم قطعیت قابل توجه همراه باشد.

به دلیل تغییرات مکرر مقطع، پلان، شیب طولی، و زبری مجرا در امتداد آبراهه‌های طبیعی، به جای جریان یکنواخت جریان متغیر تدریجی برقرار است. از طرفی، فلوم‌های آزمایشگاهی می‌توانند عاری از چنین تغییراتی باشند، اما این فلوم‌ها نوعاً کوتاه هستند و بنابراین جریان متغیر تدریجی به صورت طبیعی در آنها رخ می‌دهد و نیازی به اعمال تمهید خاص برای برقراری آن نیست. در این صورت مزیت چنین جریان‌هایی تکرار پذیری بسیار زیاد آنهاست که

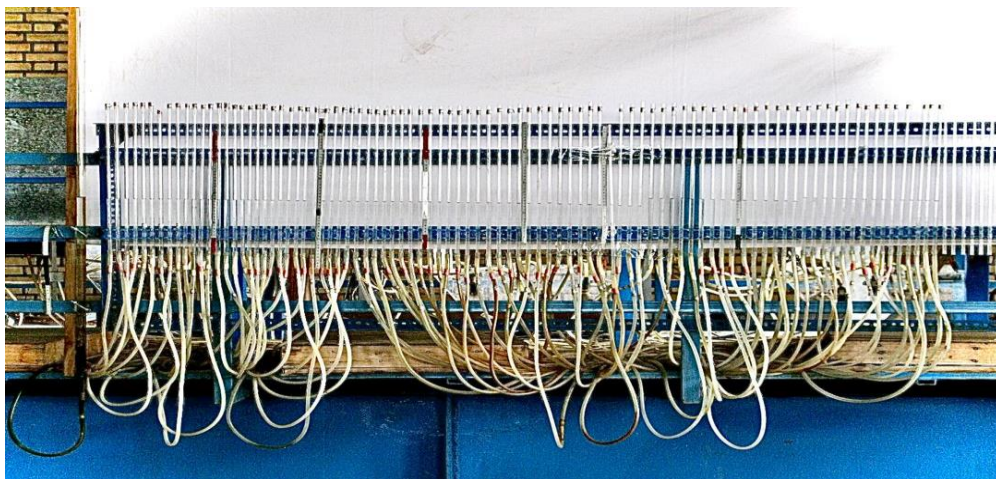
برآورد ضریب مقاومت جریان روباز تحت اثر تغییرات شیب و دبی با بهره‌گیری از جریان متغیر تدریجی

طولی و ۶۰ عدد به صورت عرضی قرار گرفتند. این پیزومترها امکان ثبت تغییرات عمق آب در نقاط مختلف کانال را فراهم کرده‌اند. تابلو پیزومتری متصل به پیزومترهای کف کانال در شکل (۲) ارائه شده است. علاوه بر صفحه پیزومتری یک سامانه ثبت داده‌های خودکار برای این پژوهش طراحی و ساخته شد. این سامانه از حسگرهای فشار با خطای ۰/۵ درصد، کارت مبدل آنالوگ به دیجیتال، و برنامه قرائت و ثبت داده‌های رقومی شده تشکیل شده است. تمام ترانسیمترهای فشار پیش از اجرای آزمایش‌های اصلی درجا واسنجی شدند.



شکل ۱- شکل شماتیک تجهیزات مورد استفاده در آزمایش - (الف) پلان، (ب) مقطع طولی

Fig. 1-Schematic presentation of the experimental setup (a) plan view; (b) longitudinal section



شکل ۲- تابلو پیزومتری

Fig. 2- Piezometric board

پوشش‌های به کار رفته در پژوهش

پایه بلند هستند. کف پوش‌های مشبک از جنس PVC ساخته شدند. شکل (۳) پوشش‌های مختلف به کار رفته در پژوهش را نشان می‌دهد. شرایط جریان روی هریک از این پوشش‌ها در سه شیب آزمون شد.

در این مطالعه سه نوع پوشش برای کف کانال به نحوی در نظر گرفته شده است که بتوان زبری‌های متمایزی ایجاد کرد. این پوشش‌ها به ترتیب شامل بستر آهن گالوانیزه، کف پوش مشبک پایه‌دار کوتاه و کف پوش مشبک متراکم با



شکل ۳- پوشش‌های به کار رفته در پژوهش، الف-گالوانیزه، ب-پوشش مشبک پایه کوتاه، ج- پوشش مشبک متراکم
Fig. 3- Tested Bed roughness: (a) Galvanized iron; (b) Short height mesh; and (c) High-dense mesh

- پوشش آهن گالوانیزه
سانتی متر دارد و پایه‌های آن به صورت زائده‌هایی برجسته به ارتفاع $0/4$ سانتی متر تشکیل شده است. ضخامت کلی این پوشش نیز معادل $0/4$ سانتی متر است. ضخامت و زائده‌هایی تعبیه شده در این کفپوش می‌تواند موجب ایجاد زبری در کف کانال شود و بر مشخصات جریان عبوری تاثیرگذار باشد. شکل (۴) تصویری از پوشش مشبک پایه کوتاه را نشان می‌دهد. آزمون‌های اجرا شده با این پوشش با علامت اختصاری $C_{2, Si}$ نشان داده می‌شود که به جای i در ارجاع به آزمایش شماره شیب طولی قرار می‌گیرد.

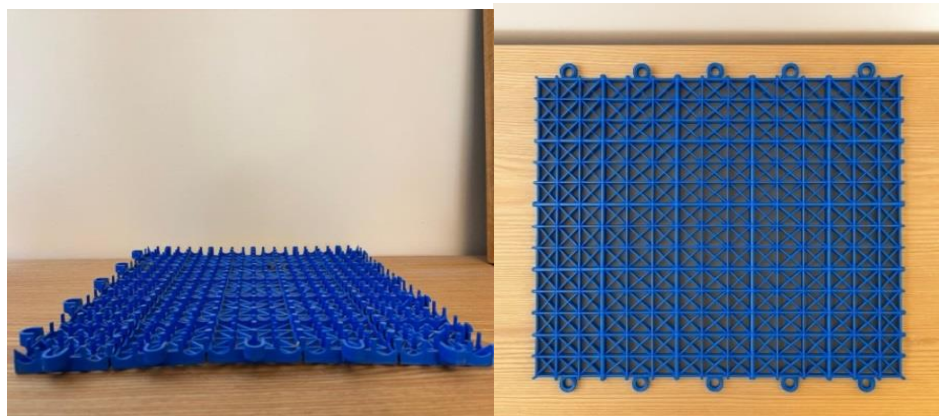
پوشش متداولی است که در ساخت تجهیزات آزمایشگاهی از آن استفاده می‌شود و نوعاً بستری نسبتاً صاف را نمایندگی می‌کند. ارجاع به آزمایش‌های این پوشش در شیب‌های مختلف با نماد $C_{1, Si}$ صورت می‌گیرد که i نشان دهنده شماره شیب آزمون شده است.
- پوشش مشبک پایه‌دار PVC با پایه کوتاه
پوشش مشبک پایه‌کوتاه از ورقه‌های مشبک PVC ساخته شده است. شبکه آن چشمه‌هایی به فاصله‌های $0/5$



شکل ۴- پوشش مشبک پایه دار نصب شده در کف کانال
Fig. 4- Short height mesh roughness

ضخامت این کف پوش نیز $0/7$ سانتی متر است (شکل ۵). ارجاع به آزمون‌های اجرا شده با این پوشش با نماد $C_{3, Si}$ نشان داده می‌شود که اینجا نیز i با شماره شیب در آزمایش جایگزین می‌شود.

- پوشش مشبک متراکم PVC با پایه بلند
این پوشش نیز از جنس کف پوش قبل است اما تعداد زائده‌های آن در واحد سطح نسبت به پوشش قبل بیشتر است. زائده‌های این کف پوش به ارتفاع 1 سانتی متر و در فاصله‌های چشمه‌های $0/5$ سانتی متری از یکدیگر قرار دارند.



شکل ۵- پوشش مشبک متراکم با پایه بلند

Fig. 5- High-dense mesh roughness

روش محاسبه ضریب زبری

در این پژوهش به جای برقراری جریان شبه نرمال در کانال آزمایشگاهی، که برقراری آن معمولاً بسیار زمان‌بر و همراه عدم قطعیت است، از جریان متغیر تدریجی بهره گرفته شد. یعنی با بازکردن کامل دریچه کشویی انتهای پایین‌دست کانال و تشکیل عمق لبریزی در آن مقطع منحنی‌های M2 برقرار شد. داده‌های مربوط به هر دبی در شیب طولی و زبری معین ثبت شد. با حل معادله جریان متغیر تدریجی در کانال‌های منشوری (معادله ۱)، ضریب‌های زبری تعیین شد (Henderson, 1966).

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S - S_f}{1 - Fr^2} \quad (1)$$

در این رابطه: S شیب طولی مجرا، S_f شیب خط انرژی (که به کمک فرمول‌های مانینگ یا شزی محاسبه می‌شود)، و Fr عدد فرود است. در این پژوهش برای محاسبه S_f از فرمول مانینگ یعنی $S_f = Qn / (AR^{2/3})$ استفاده شد. که در آن، Q دبی جریان، n ضریب زبری مانینگ، A سطح مقطع جریان و R شعاع هیدرولیکی است. برای تعیین مقدار بهینه ضریب زبری مانینگ، برنامه رایانه‌ای توسعه یافت تا با کمینه کردن مجموع مربعات اختلاف داده‌های مشاهده شده و محاسبه شده ضریب زبری برای بهترین انطباق تعیین شود. تعداد تکرارها برای رسیدن به نتیجه مطلوب حدود پانزده بود اما معمولاً برای نیم‌رخ‌های مختلف کمی متفاوت بود.

شیب‌های طولی و دبی‌های آزمون‌شده

برای بررسی اثر تغییرات شیب، آزمایش‌ها در دامنه‌ای وسیع از شیب‌های طولی صورت گرفت که از یک شیب معکوس برابر با ۰/۰۰۲۶۱- تا تندترین شیب ۰/۰۱۲۸۴ تشکیل شده است. انتخاب شیب‌های طولی با این هدف صورت گرفت که دامنه‌ای وسیع پوشش دهد. آزمایش‌ها با یکی از شیب‌های طولی تکرار شد تا تکرار پذیری آزمایش‌ها کنترل شود. دامنه تغییرات دبی از ۱۰ تا ۹۰ لیتر بر ثانیه با گام‌های ده لیتر بر ثانیه آزمون شد. به این ترتیب ۸۱ آزمایش اجرا گردید.

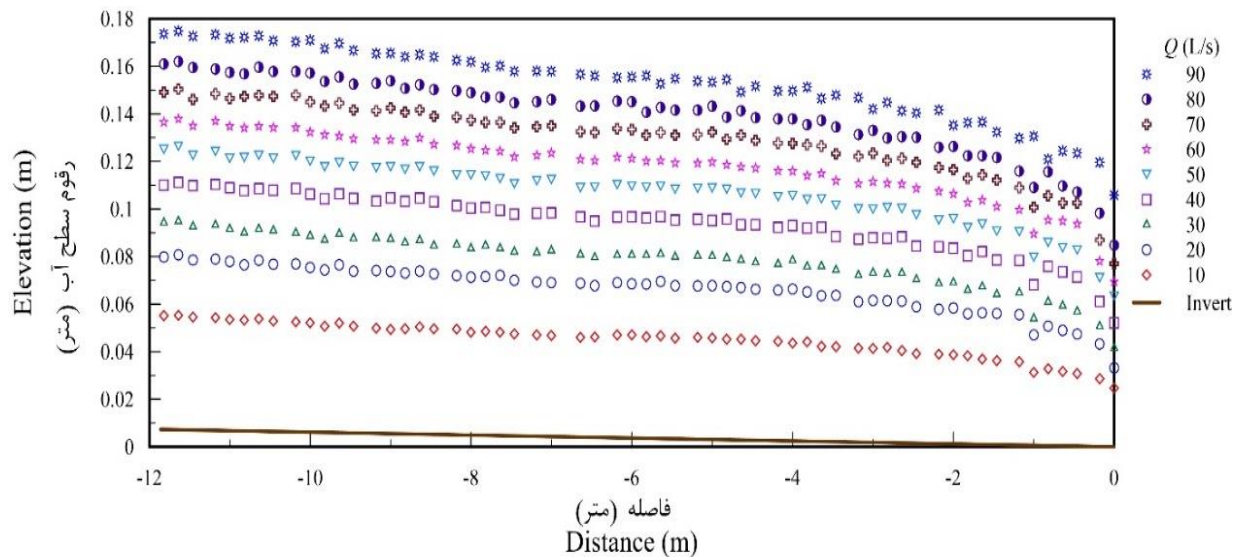
روش آزمایش

برای اجرای آزمایش‌ها روی بستر گالوانیزه فقط شیب کانال تنظیم و آزمایش‌ها دنبال شد. اما برای دو بستر دیگر، ابتدا زبری مورد نظر در کف کانال طوری نصب شد که بلوک‌های زبری به همدیگر متصل و در جای خود تثبیت شوند. پس از آن سکوی شیب‌پذیر برای تولید شیب مورد نظر تنظیم شد. پس از تثبیت زبری و تنظیم شیب مورد نظر، دبی جریان برقرار گردید و پس از تثبیت جریان از صفحه پیزومتری با قدرت تفکیک زیاد عکس‌برداری شد. سامانه ثبت داده‌ها سطح آب را ثبت می‌کرد. برای واسنجی حسگرها در شروع آزمایش‌ها از عکس‌برداری صفحه پیزومتری استفاده شد.

نتایج

محاسبه شده با بهینه‌سازی ضریب زبری مانینگ در شکل

نمونه داده‌های نیم‌رخ‌های مشاهده شده در دبی‌های مختلف مربوط آزمایش‌های $C_{2,S3}$ در شکل (۶) رسم شده است. نمونه‌ای از نمودارهای انطباق داده‌های مشاهده شده و



شکل ۶- نمونه‌ای از نیم‌رخ‌های ثبت شده سطح آب (آزمایش‌های $C_{2,S3}$)

Fig. 6-Samples of longitudinal water-surface profiles (Tests $C_{2,S3}$)

می‌توان محاسبه کرد. به این ترتیب تعیین ماهیت جریان و

رژیم و مشخصات جریان

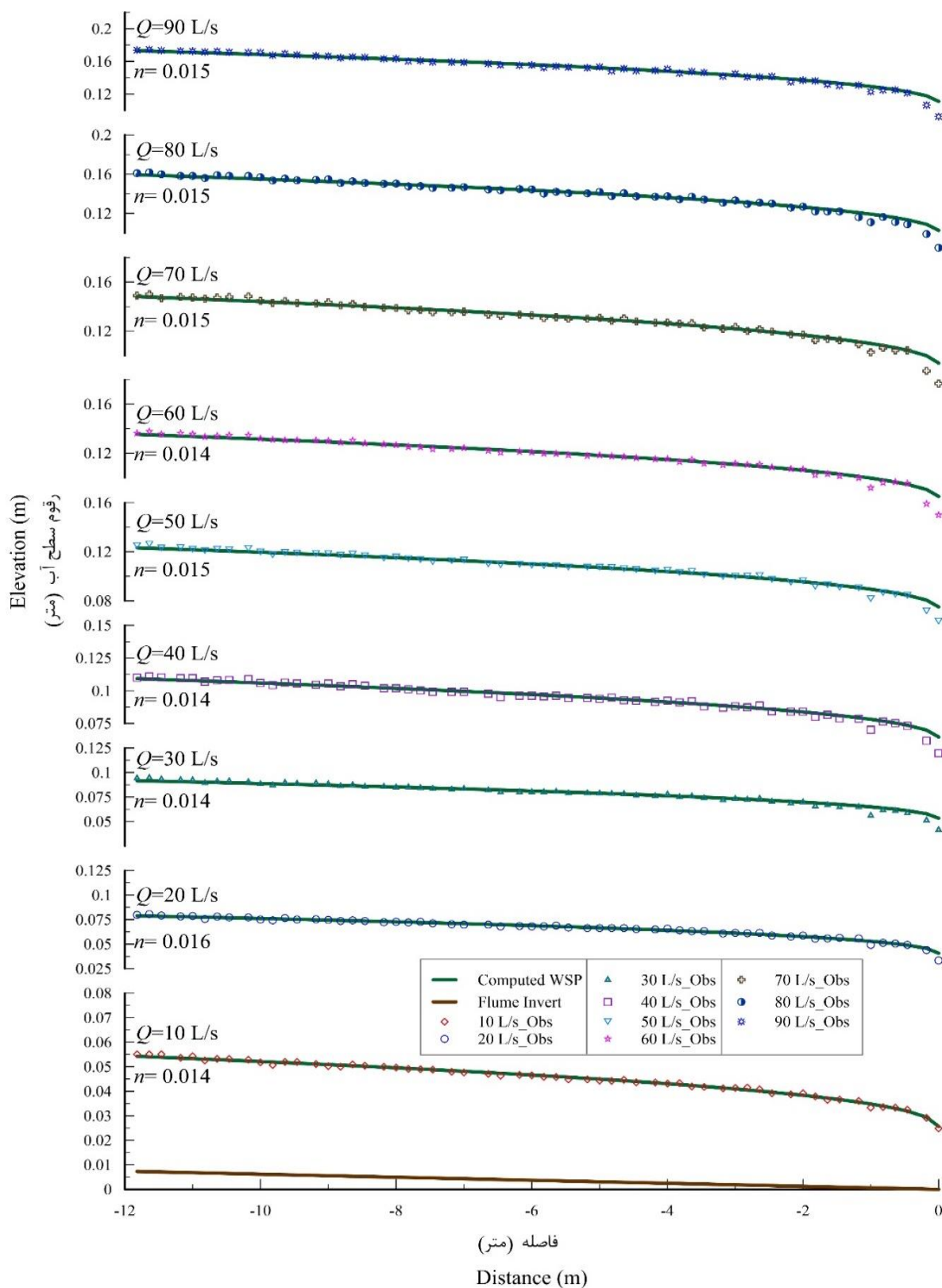
نوع بستر بر اساس مقادیر محاسبه شده عدد رینولدز برشی و توصیه هندرسن (Henderson, 1966) میسر شد. یعنی برای دامنه عدد رینولدز برشی بین ۴ تا ۱۰۰ بستر در حالت انتقالی، کوچک‌تر از ۴ صاف و بالاتر از ۱۰۰ جریان کاملاً متلاطم و بستر زبر خواهد بود. اگرچه در کتاب‌های مرجع دیگر عدد ۷۰ نیز برای کرانه بالایی پیشنهاد شده است (Yalin, 1972; Schlichting and Gersten, 2017; Sturm, 2021).

برای تعیین رژیم جریان و تاثیر آن بر بستر یعنی صاف‌بودن، انتقالی‌بودن یا زبر بودن، ابتدا ارتفاع زبری، k_s ، به کمک رابطه ۲ برای تمام برداشت‌ها تعیین شد (Henderson, 1966).

$$k_s = \frac{12R}{\frac{C_z}{10^{(2 \times 8g)^{0.5}}}} \quad (2)$$

که در آن: R شعاع هیدرولیکی، g شتاب ثقل، و $C_z = R^{1/6}/n$ ضریب شزی است. با در دست داشتن k_s ، سرعت برشی $V^* = (gRS\eta)^{0.5}$ و عدد رینولدز برشی $Re^* = V^*k_s/\nu$ را

برآورد ضریب مقاومت جریان روباز تحت اثر تغییرات شیب و دبی با بهره‌گیری از جریان متغیر تدریجی



شکل ۷- نمونه بهینه سازی ضریب زبری n برای تطابق داده‌های مشاهده شده و محاسبه شده برای آزمایش‌های $C_{2,S3}$
 Fig 7- Samples of optimized Manning's roughness coefficient, (n), for matching the observed and computed water-surface profiles (Tests $C_{2,S3}$)

جدول ۱- ضریب‌های زبری مانینگ برای کانال با پوشش آهن گالوانیزه، C_1 ، شیب‌ها و دبی‌های مختلف

Table 1-Manning's roughness coefficients for the Galvanized surface (C_1) different slopes and flow discharges

دبی (لیتر بر ثانیه) Discharge (L/s)	ضریب زبری مانینگ n ($S_1=0.00081$)	ضریب زبری مانینگ n ($S_2=0.00036$)	ضریب زبری مانینگ n ($S_3=0.00127$)
10	0.010	0.008	0.009
20	0.011	0.009	0.010
30	0.011	0.009	0.009
40	0.011	0.010	0.010
50	0.010	0.010	0.010
60	0.011	0.009	0.010
70	0.011	0.010	0.009
80	0.011	0.009	0.009
90	0.010	0.009	0.010

جدول ۲- ضریب زبری مانینگ برای کانال با پوشش مشبک پایه دار C_2 ، شیب‌ها و دبی‌های مختلف

Table 2- Manning's roughness coefficients for the Short height mesh (C_2) different slopes and flow discharges

دبی (لیتر بر ثانیه) Discharge (L/s)	ضریب زبری مانینگ n ($S_1=-0.00026$)	ضریب زبری مانینگ n ($S_2=0.00018$)	ضریب زبری مانینگ n ($S_3=0.00062$)
10	0.014	0.015	0.014
20	0.017	0.015	0.016
30	0.016	0.014	0.014
40	0.016	0.014	0.014
50	0.015	0.015	0.015
60	0.016	0.015	0.014
70	0.016	0.016	0.015
80	0.015	0.015	0.015
90	0.015	0.014	0.015

جدول ۳- ضریب‌های زبری مانینگ برای کانال با پوشش مشبک متراکم C_3 ، شیب‌ها و دبی‌های مختلف

Table 3- Manning's roughness coefficients for the High-dense mesh (C_3) different slopes and flow discharges

دبی (لیتر بر ثانیه) Discharge (L/s)	ضریب زبری مانینگ n ($S_1=0.00073$)	ضریب زبری مانینگ n ($S_2=0.00073$)	ضریب زبری مانینگ n ($S_3=0.00129$)
10	0.022	0.024	0.022
20	0.025	0.024	0.023
30	0.022	0.023	0.021
40	0.021	0.022	0.020
50	0.022	0.023	0.019
60	0.021	0.023	0.020
70	0.022	0.022	0.021
80	0.021	0.021	0.021
90	0.020	0.022	0.020

استریکلر، $n=0.041 k_s^{1/6}$ در سیستم SI رسم شده است. رابطه (۴) نشان می‌دهد که در جریان‌های کاملاً متلاطم زیر در دامنه بسیار وسیعی از نسبت R/k_s ، تغییرات تابع ϕ در جریان‌های کاملاً متلاطم خطای قابل‌توجه در تخمین k_s به اشتباه‌های بزرگ در تخمین n منجر نمی‌شود.

علاوه بر رابطه (۴) و رابطه استریکلر، نتایج این پژوهش برای زبری‌های آزمون شده نیز روی این شکل‌ها قرار داده شده است. این شکل به خوبی نشان می‌دهد که تغییر پارامترهای جریان اگرچه بر مقادیر ارتفاع زبری، k_s ، اثر گذار است اما مقادیر محاسبه شده زبری نسبی بر نمودار $\phi(R/k_s)$ انطباق دارد و اثر قابل‌توجهی بر ضریب زبری مانینگ نداشته است.

نکته قابل‌تأمل این است که پوشش‌های به کار رفته برای زبری‌های C_2 و C_3 دارای ضخامت هستند و پیژومترها عمق‌های جریان را از زیر این پوشش‌ها ثبت می‌کنند. این مطلب حساسیت سنجی نتایج را نسبت به انتخاب عمق مبنا، یعنی عمق مبنای محاسبه شعاع هیدرولیکی، ضروری می‌کند. از این‌رو عمق‌های جدید به میزان ۰/۵، ۱ و ۱/۵ برابر زبری معادل کاهش داده شد و مجدداً محاسبات تکرار گردید. نتایج نشان داد که تغییر در مقدار k_s کمتر از یک درصد است و این تغییر تأثیری بر طبقه‌بندی جریان و مشخصات آن نمی‌گذارد. نتایج حاصل از تعدیل عمق جریان به میزان ۱۰۰ درصد ارتفاع زبری معادل، k_s ، به عنوان نمونه روی شکل (۸) قرار داده شد. این شکل نشان می‌دهد که داده‌های عمق کامل و عمق تعدیل شده نتایج یکسانی ارائه کرده‌اند.

نتایج تحقیق نشان داد که بسترها با زبری‌های C_2 و C_3 دارای جریان کاملاً متلاطم و زبر هستند در حالی که بستر گالوانیزه یا C_1 در ناحیه انتقالی قرار دارد. نکته قابل توجه این است که پیژومترها به کف فلوم متصل‌اند یعنی عمق‌های جریان از زیر پوشش اندازه‌گیری شده است. بنابراین، پارامترهای به کار رفته در تعیین رژیم و مشخصات جریان براساس عمق‌های یادشده تعیین شد. این امر ضرورت بررسی حساسیت رژیم جریان را برای کاهش عمق با در نظر گرفتن زبری معادل دیکته می‌کند.

بررسی اثر تغییرات شیب و دبی بر ضریب زبری مانینگ

چاو (Chow, 1959) با تلفیق فرمول جریان یکنواخت و معادله توزیع لگاریتمی سرعت در جریان‌های کاملاً متلاطم با بستر زبر رابطه زیر را ارائه کرد.

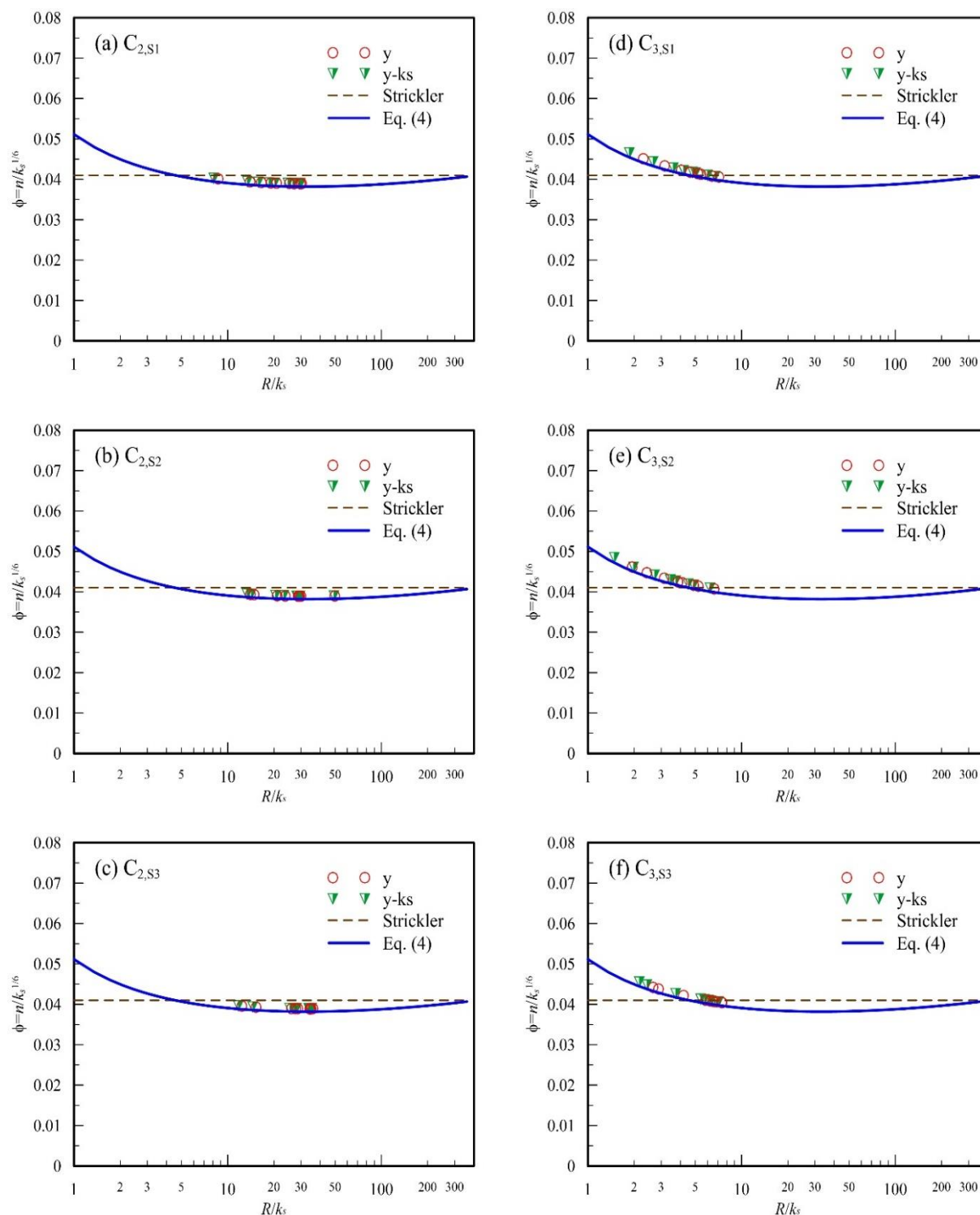
$$n = \phi \left(\frac{R}{k_s} \right) k_s^{1/6} \quad (3)$$

تابع $\phi = (R/k_s)$ در سیستم SI به صورت زیر در می‌آید:

$$\phi \left(\frac{R}{k_s} \right) = \frac{(R/k_s)^{1/6}}{18 \log \left(12.2 \frac{R}{k_s} \right)} \quad (4)$$

تمام پارامترهای رابطه قبلاً تعریف شده‌اند. همین رابطه با ضرایب اندکی متفاوت توسط آکان و استورم (Akan and Iyer, 2021; Sturm, 2021) ارائه شده است.

به منظور بررسی اثر تغییرات پارامترهای جریان در این پژوهش در هر دو زبری مشبک پایه دار، C_2 ، و مشبک متراکم، C_3 ، مقدار $\phi(R/k_s)$ محاسبه و در نمودارهای شکل (۸) رسم شد. در این شکل‌ها رابطه (۴) در کنار مقدار پیشنهادی



شکل ۸- تغییرات $\phi(R/k_s)$ برای زبری مشبک پایه دار (C_2) و مشبک متراکم (C_3) در شیب‌های آزمون شده

Fig. 8- Variations of $\phi(R/k_s)$ for the Short height mesh (C_2) and High-dense mesh (C_3) at the tested slopes

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر زبری بستر، شیب طولی و دبی بر ضریب زبری مانینگ با استفاده از یک چارچوب آزمایشگاهی مبتنی بر جریان متغیر تدریجی به‌جای روش مرسوم ایجاد جریان شبه‌یکنواخت، به‌طور سیستماتیک بررسی شد. نتیجه‌گیری کلی را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

۱. جریان متغیر تدریجی رویکردی عملی و استوار برای تخمین ضریب مانینگ در فلوم‌های آزمایشگاهی محسوب می‌شود. نیمرخ‌های M2 به‌سادگی و به سرعت برقرار می‌شوند، تکرارپذیری بالایی دارند و عدم قطعیت‌های مرتبط با برقراری و راستی‌آزمایی جریان شبه‌یکنواخت در فلوم‌های کوتاه را مرتفع می‌کنند. بهینه‌سازی انطباق نیمرخ‌های مشاهده‌شده و محاسبه‌شده، مقادیر سازگاری را برای ضریب زبری مانینگ با خطاهای باقی‌مانده اندک ارائه داد.

۲. زبری بستر، عامل اصلی کنترل‌کننده ضریب زبری مانینگ است. پوشش مشبک متراکم بیشترین مقادیر و پوشش مشبک پایه‌دار مقادیر میانی و بستر گالوانیزه صاف کمترین مقادیر ضریب زبری را نشان دادند. این تفاوت‌ها با ارتفاع زبری معادل اندازه‌گیری‌شده سازگاری فیزیکی کامل دارد.

۳. تأثیر دبی بر ضریب زبری، n ، ناچیز است. نتایج این مطالعه روند کاهشی یا افزایشی یکنواختی را نشان نداد که بیانگر آن است که در محدوده زبری‌ها و شیب‌های آزمون‌شده، تغییرات عمق نسبی ناشی از دبی به‌اندازه کافی نبوده تا تغییرات معناداری در نتایج ایجاد کند.

۴. برای هر نوع زبری، مقادیر زبری در شیب‌های مختلف تقریباً ثابت ماند که نشان می‌دهد شیب‌های آزمون‌شده نتوانسته‌اند رژیم جریان یا مکانیزم برهم‌کنش زبری را به‌گونه‌ای تغییر دهند که بر ضریب مقاومت کلی اثر بگذارد.

۵. نتایج با رابطه نظری لگاریتمی در جریان‌های متلاطم زبر و تابع بی‌بعد زبری نسبی سازگاری دارد طوری که داده‌ها به‌خوبی بر منحنی نظری برای جریان‌های کاملاً متلاطم زبر منطبق شد. در شرایط تلاطم کامل، ضریب مانینگ را می‌توان با اطمینان از اندازه زبری معادل و شعاع هیدرولیکی

پیش‌بینی کرد.

۶. تحلیل حساسیت استواری نتایج را تأیید کرد. تعدیل عمق مینا به میزان ارتفاع زبری معادل (برای لحاظ کردن ضخامت فیزیکی پوشش‌های مشبک) تغییر کمتر از ۱ درصد در ضریب زبری ایجاد کرد و طبقه‌بندی رژیم جریان بدون تغییر باقی ماند. این موضوع نشان می‌دهد که روش نسبت به عدم قطعیت‌های جزئی در اندازه‌گیری عمق نسبت به بستر مرجع، حساسیت پایینی دارد.

۷. کاربردهای عملی رویکرد مبتنی بر جریان متغیر تدریجی به‌ویژه برای مجاری طبیعی مناسب است که جریان یکنواخت در آنها به‌ندرت رخ می‌دهد. این روش با حذف نیاز به فلوم‌های طولی و زمان‌های طولانی برای تثبیت جریان، امکان اجرای آزمایش‌های سریع‌تر و تکرارپذیرتر را روی مواد و هندسه‌های مختلف بستر فراهم می‌کند و نیز چارچوبی منطقی برای ارتباط دادن مقادیر ضریب زبری حاصل از آزمایشگاه با شرایط صحرایی از طریق پارامترهای فیزیکی بنیان مانند زبری معادل ارائه می‌دهد.

این پژوهش نشان می‌دهد که جریان متغیر تدریجی می‌تواند به‌طور مؤثر و قابل‌اطمینانی برای تخمین ضریب زبری مانینگ در فلوم‌های روباز به‌کار گرفته شود. نتایج مجدداً تأیید می‌کند که زبری بستر عامل اصلی تعیین‌کننده n است و شیب و دبی در محدوده‌های آزمون‌شده نقش تعیین‌کننده‌ای نداشته‌اند. روش پیشنهادی، عدم قطعیت آزمایشگاهی را کاهش می‌دهد، تکرارپذیری را افزایش می‌دهد و شکاف میان مطالعات آزمایشگاهی و کاربردهای واقعی در مجاری روباز را پر می‌کند که در آنها جریان غیریکنواخت حاکم است. اما برای رفع محدودیت آزمایش‌ها، مطالعه برای شیب‌های طولی یکسان در زبری‌های یکسان و همچنین مطالعه اثر دیگر منحنی‌های جریان متغیر تدریجی مثل M1 و M3 هم نیاز به آزمایش دارد.

تضاد منافع نویسندگان

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

منابع مالی

توسط همه نویسندگان انجام شد. پیش‌نویس اولیه مقاله

نویسنده (نویسندگان) هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است. مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان در طرح و ایده‌پردازی مطالعه مشارکت داشتند. تهیه مطالب، جمع‌آوری داده‌ها و تجزیه و تحلیل از دانشگاه تهران برای تامین شرایط پژوهش در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب تقدیر و تشکر می‌شود.

تقدیر و تشکر

منابع

- Akan, A. O. and Iyer, S. S. (2021) Open channel hydraulics. Butterworth-Heinemann.
- Chow, V.T. (1959) Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill.
- Hager, W. H. (1983) Open channel hydraulics of flows with increasing discharge, J. Hydraul. Res., vol. 21, no. 3, pp. 177–193, 1983.
- Henderson, F.M. (1966) Open channel flow. Macmillan.
- Ibrahim M. M. and Abdel-Mageed, N. B. (2014) Effect of bed roughness on flow characteristics, Int. J. Acad. Res., vol. 6, no. 5, pp. 169–178, 2014, doi: 10.7813/2075-4124.2014/6-5/A.24.
- Kazemipour, A K, and C J Apelt. (1999). Effect of shape on uniform flow through smooth rectangular open channels. Journal of Hydraulic Engineering 125 (2). [https://doi.org/doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:2\(208.x\)](https://doi.org/doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:2(208.x)).
- Kazemipour, A. K., and C. J. Apelt. (1979). Shape effects on resistance to uniform flow in open channels. Journal of Hydraulic Research 17 (2): 129–47. <https://doi.org/10.1080/00221687909499592>.
- Kazemipour, A. K., and C. J. Apelt. (1982). New Data on Shape Effects in Smooth Rectangular Channels. Journal of Hydraulic Research 20 (3): 225–33. <https://doi.org/10.1080/00221688209499487>.
- Kazemipour, and C. J. Apelt. (1980). Shape Effects on Resistance to Flow in Smooth Semi-Circular Channels. Institution of Engineers, Australia.
- Lau T. W. and Afshar, N. R. (2013) Effect of Roughness on Discharge,” J. Civ. Eng., vol. 4, no. 3, pp. 29–33, doi: 10.33736/jcest.124.2013.
- Merry, M. A. (2017) Experimental Study for Determine Manning's Coefficient with Different Slopes and Channel Bed Materials. Kufa J. Eng., vol. 8, no. 3, pp. 76–88, 2017, doi: 10.30572/2018/kje/8031160.
- Rouse, H. (1965) Critical analysis of open-channel resistance, J. Hydraul. Div., vol. 91, no. 4, pp. 1–2.
- Schlichting, H., and Gersten, K. (2017). Boundary-Layer Theory (9th ed.). Springer.
- Sturm, T.S. (2021) Open Channel Hydraulics, 3rd Edition. McGraw Hill.
- Tracy, H.J., Lester, C.M. (1961). Resistance coefficients and velocity distribution smooth rectangular channel. US GEOLOGICAL SURVEY, WATER-SUPPLY PAPER 1592-A. <https://doi.org/10.3133/wsp1592A>
- Yalin, M.S. (1977). Mechanics of Sediment Transport. 2nd Edition, Pergamon Press, Oxford, U.K.
- Yen, B. C. (2002) Open Channel Flow Resistance, J. Hydraul. Eng., vol. 128, no. 1, pp. 20–39, 2002.
- Yilmaz, D., Aras, E. and Vaheddoost, B. (2023) a Laboratory Scale Investigation of Manning Roughness Coefficient in Open Channel Bed with Different Grain Size and Slopes,” Uludağ Univ. J. Fac. Eng., vol. 28, no. 2, pp. 453–464 doi: 10.17482/uumfd.1183508.