



Characterization of Double-Averaged Velocity Profile in an Open-Channel With Intermediate Relative Roughness

Kh. Kashmari¹, S.H. Mohajeri^{2*}, A.R. Zarrati¹, M. Azarpira¹

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

²Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

ABSTRACT: Flow with intermediate relative roughness (the ratio of roughness height to water depth higher than 1/80 and lower than 1/40) is common in most of the mountainous streams. Despite this fact and numerous studies on flow with intermediate relative roughness, it is still unclear how the profile of the streamwise velocity varies along with water depth. In this study, the instantaneous velocity of flow in an open-channel with the rough bed has been measured using Particle Image Velocimetry (PIV). In order to analyze the profile of streamwise velocity, double averaging method (spatial averaging of time-averaged values in a thin slab parallel to the channel bed) was used. It was observed that near the rough bed, vectors of instantaneous velocity showed strong spatial variations that make extraction of unique behavior for velocity profile impossible without double averaging. Results also showed that values of double averaged velocity were not sensitive to priority in averaging (i.e. time and then spatial averaging or spatial and then time averaging); thus double averaging regardless of priority can be used. To investigate double averaged velocity profile, three approaches including a logarithmic profile with a variable parameter, linear profile and mixing layer profile were employed. Results showed that all three profiles could be fitted properly to our experimental data. However, logarithmic profile with variable Von-Karman constant and integration constant that was supported by strong scientific background was the most suitable profile and therefore can be recommended.

Review History:

Received: 6/29/2018

Revised: 8/18/2018

Accepted: 8/18/2018

Available Online: 8/25/2018

Keywords:

Open-channel

Intermediate relative roughness

Particle image velocimetry (PIV)

Double averaging

Streamwise velocity profile

1. INTRODUCTION

A rough bed is a sort bed geometry condition in which protrusions of bed elements on flow structure cannot be neglected. Concerning rough bed flow in open-channels, Nikora et al. [1] identified four flow types depending on the relative submergence (or relative roughness). Based on this approach, four types of flow can be considered which are low relative roughness flow ($H/\Delta < 1/80$), intermediate relative roughness flow ($1/80 < H/\Delta < 1/5$), high relative roughness flow ($1/5 < H/\Delta < 1$), and partially inundated flow. Although intermediate relative roughness flow is common in nature, the knowledge on such flows remains limited in spite of the recent advances [2, 3].

Previous studies showed that in intermediate relative roughness flow, spatial variation of near-bed flow characteristics is too high, which makes extraction of unique behavior almost impossible. To resolve this problem, the time averaging of the governing equations should be supplemented by spatial averaging in a plane parallel to the mean bed surface. After such an averaging, a new system of equations will be obtained which are known as double averaged, or spatially averaged Navier-Stokes equations [1].

*Corresponding author's email: hossein.mohajeri@khu.ac.ir

Concerning double-averaged streamwise velocity profile in intermediate relative roughness flow, three approaches are common. The first approach is based on the logarithmic profile with variable Von-Karman constant and constant of integration [2]. In the second approach, a linear profile is fitted to the double-averaged velocity values [1]. Finally, in the third approach, the double-averaged velocity is considered as a mixing layer profile [4]. In the present study, we studied the velocity profile in intermediate relative roughness flow. To this end, the instantaneous velocity was measured in an open-channel. The details of these measurements will be explained in the following section.

2. METHODOLOGY

Laboratory measurements were conducted in an open-channel 14 m long, 0.75 m wide and 0.7 m deep in Hydraulic laboratory of Amir Kabir University. The flow depth and discharge at the flume inlet were controlled by an inverter for pump speed regulation and was measured by an electromagnetic flowmeter.

Hydraulics characteristics of these measurements are summarized in Table 1. As reported in this table, three experimental runs cover an appropriate range of flow with



Table 1. Hydraulic characteristics of the present study.

H (m)	Run1	Run2	Run3
$\Delta=D$ (m)	0.1	0.12	0.15
R (m)	0.015	0.015	0.015
Fr	0.079	0.091	0.107
Rr	0.08	0.06	0.04
D/H (-)	8000	8000	8000
B/H (-)	0.15	0.125	0.1
Q (lit/s)	7.5	6.25	5
L_{FD} (m)	6	6	6
S_f (-)	3.46	3.29	2.88
u^* (m/s)	0.00005	0.00004	0.000046
H (m)	0.008	0.007	0.007

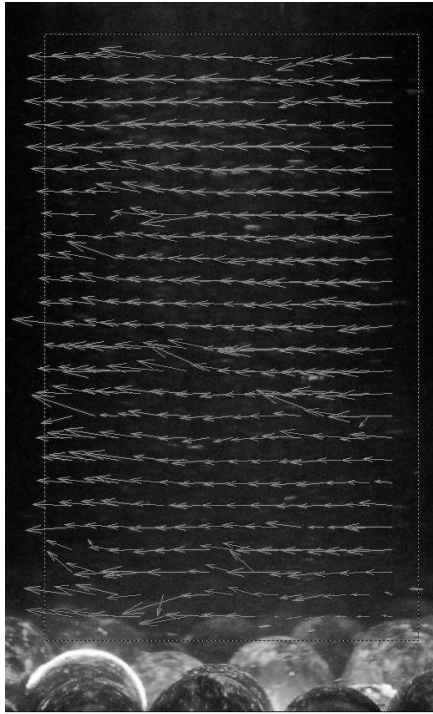


Fig. 1. Instantaneous velocity vectors, flow from right to left.

intermediate relative roughness. The channel bed was roughened using crushed stone (in an area far from the measurement section) and glass sphere with a diameter of 15 mm. In this study, roughness height and vertical bed origin were respectively considered as glass sphere diameter and the crest of the glass sphere.

Measurements were performed in a region at least 150 mm far from both sidewalls at the distance of 7.0 m from the entrance of the channel, where the velocity profile is fully developed. To measure streamwise velocity, PIV measurements in vertical planes were carried out. The

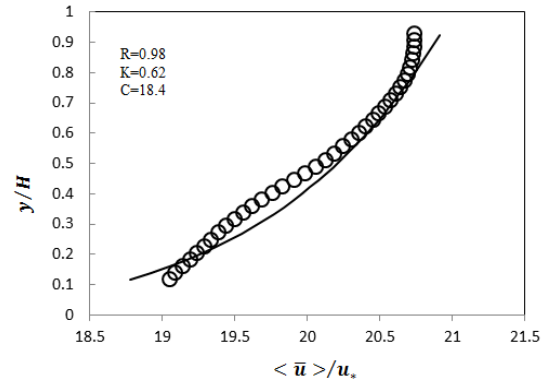


Fig. 2. Results of fitting logarithmic profile to Run1.

image analysis and processing were performed with PIVLab software. The flow was sampled for 3 min with a frequency of 60 Hz. The acquisition area was approximately 360 px long and 360 px wide which leads to 5 mm vector spacing.

3. DISCUSSION AND RESULTS

In Figure 1, vector maps of instantaneous velocity in the vertical measurement plane are shown. This figure shows that velocity vectors of the near-bed region show strong spatial variations, while in a region far from rough bed such strong variation attenuates. This observation is in agreement with previous studies that also showed that the near-bed velocity field is highly affected by bed topography [2].

We also compared the profiles of space-time and time-space double-averaged streamwise velocity. According to this comparison (not shown in English abstract), the double averaged velocity profile was not sensitive to the priority of averaging and time-space averaged and space-time-averaged profiles were almost identical to each other.

In the next step, double-averaged profiles of streamwise velocity explored. In Figure 1, the results of fitting logarithmic profile to Run1 data are shown. As reported in this Figure, the profile is fitted very well to the experimental data with near one value of determination coefficient (R). However, it was observed that obtained value for Von-Karman constant (k) and integration constant (C) was different from common values. Similar results were also seen for Run2 and Run3. These observations are in agreement with observations of Koll et al. [4] and Mohajeri et al. [2] who also reported similar observation. Indeed, previous studies showed that these parameters for flow with intermediate relative submergence are variable respect to relative roughness. Comparison of observed values for Von-Karman constant in this study with previous studies showed that except Run2, the observed values are in the range of the reported values in the literature.

We also explore the accuracy of the linear profile and mixing layer profile in intermediate relative roughness flows. It was notified that both of these approaches could fit perfectly with our experimental data. However, fitting linear to this type of flow suffers from a good scientific background and it is not rational to consider this profile at least for lower values

of relative roughness. As regards of mixing layer profile, it was observed that the profile could fit properly to our data with not acceptable values for parameters of this equation such as characteristic energetic eddy size. Therefore, it can be recommended that in future studies the logarithmic approach should be followed for this type of flow.

4. CONCLUSIONS

The present study focused on the flow structure of intermediate relative roughness flow using the double-averaging method. The main finding in this study can be itemized as:

1- Near the rough bed, flow showed strong spatial variation which makes the study of this type of flow without double-averaging almost impossible.

2- Comparison of space-time averaged and time-space averaged velocity profiles showed that there was no any advantageous in priority of space or time averaging.

3- This study also showed that the logarithmic layer approach with variable Von-Karman constant and integration constant was the best approach for double-averaged velocity profile of flow with intermediate relative roughness.

REFERENCES

- [1] V. Nikora, D. Goring, I. McEwan, G. Griffiths, Spatially Averaged Open-Channel Flow over Rough Bed, *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(2) (2001) 123-133.
- [2] S. Mohajeri, S. Grizzi, M. Righetti, G. Romano, V. Nikora, The structure of gravel-bed flow with intermediate submergence: A laboratory study, *Water Resources Research*, 51(11) (2015) 9232-9255.
- [3] J.R. Cooper, S.J. Tait, The spatial organisation of time-averaged streamwise velocity and its correlation with the surface topography of water-worked gravel beds, *Acta Geophysica*, 56(3) (2008) 614-641.
- [4] G. Katul, P. Wiberg, J. Albertson, G. Hornberger, A mixing layer theory for flow resistance in shallow streams, *Water Resources Research*, 38(11) (2002) 32-31-32-38.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Kh. Kashmiri, S.H. Mohajeri, A.R. Zarrati, M. Azarpira, Characterization of Double-Averaged Velocity Profile in an Open-Channel With Intermediate Relative Roughness, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(1) (2020) 39-42.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14673.5714](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14673.5714)





مطالعه پروفیل متوسط دوگانه سرعت طولی در کانال روباز با زبری نسبی متوسط

خاطره کاشمیری^۱، سید حسین مهاجری^{۲*}، امیررضا زراتی^۱، مریم آذرپیرا^۱

^۱ دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
^۲ گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۴-۰۸
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۵-۲۷
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۵-۲۷
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۶-۰۳

کلمات کلیدی:

کانال مستطیلی روباز
زبری نسبی متوسط
سرعت سنجی تصویری ذرات
متوسط گیری دوگانه
پروفیل سرعت طولی

خلاصه: جریان با زبری نسبی متوسط (نسبت ارتفاع زبری به عمق جریان بزرگتر از $1/80$ و کوچکتر از $1/5$) در رودخانه های کوهستانی دیده می شود. با وجود مطالعات فراوان، شکل پروفیل سرعت طولی در عمق برای این نوع جریان ناشناخته باقی مانده است. در مطالعه حاضر، سرعت لحظه ای جریان در یک کانال مستطیلی روباز با بستر زبر به روش سرعت سنجی تصویری ذرات اندازه گیری شد. به منظور تحلیل نتایج از روش متوسط گیری دوگانه (متوسط گیری مقادیر لحظه ای سرعت در زمان و در یک صفحه نازک موازی با بستر کانال) بهره برده شد. مشاهده شد که در نزدیکی بستر، بردارهای سرعت به شدت در مکان تغییر می نماید، لذا نمی توان رفتار مشخصی را بدون متوسط گیری مکانی برای این سرعت در نظر گرفت. همچنین بررسی ها نشان داد که مقادیر متوسط دوگانه سرعت نسبت به متوسط گیری زمانی-مکانی یا مکانی-زمانی حساس نبوده و می توان بدون توجه به اولویت متوسط گیری زمانی و یا مکانی مقادیر متوسط دوگانه را حساب کرد. به منظور بررسی پروفیل سرعت جریان از سه رویکرد پروفیل لگاریتمی، پروفیل خطی و نیز معادله لایه اختلاطی بهره برده شد. بررسی ها نشان داد که با وجود تطابق نسبی هر سه دیدگاه، پروفیل لگاریتمی، به جهت بهره گیری از یک پشتوانه تئوری مستحکم و تطبیق مناسب با نتایج آزمایشگاهی، مناسب ترین دیدگاه برای این نوع جریان می باشد. البته در این دیدگاه ثابت ون-کارمن و ثابت انتگرال گیری معادله لگاریتمی با زبری نسبی تغییر می نمایند. براین اساس توصیه می گردد در مطالعات آتی از این رویکرد جهت تحلیل و مطالعه جریان با زبری نسبی متوسط بهره برده شود.

۱- مقدمه

جریان برقرار است و لایه بینابینی ناحیه بین این دو لایه می باشد که از هر دو این نواحی تأثیر می پذیرد [۱].

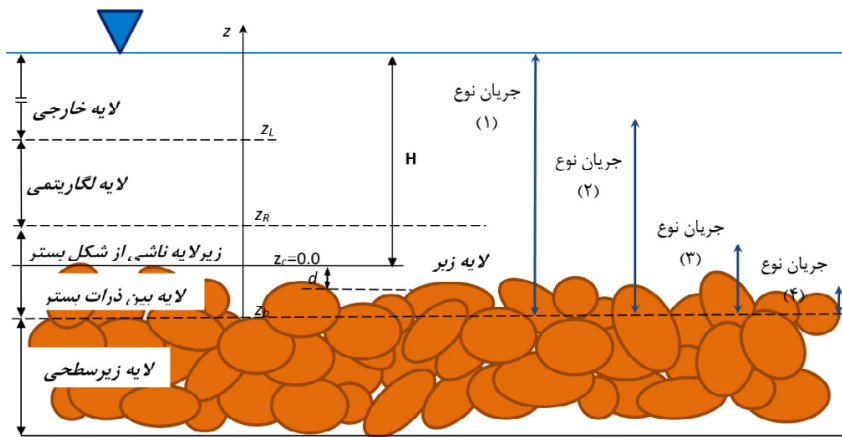
بستر زبر به بستری گفته می شود که نتوان از اثر ناهمواری های آن در میدان جریان نزدیک به بستر صرف نظر نمود. به بیان دقیق تر در بسترهای زبر به جهت تشکیل بی نظمی ناشی از ناهمواری های بستر، زیر لایه ی لزوج از لایه ی بینابینی قابل تفکیک نبوده و این دو لایه با یکدیگر ناحیه ای جدیدی از جریان را تشکیل می دهند که به لایه جریان زبر^۱ معروف می باشد. به منظور بررسی میزان اثر

جریان سیال در کانال های روباز و آنها از نوع جریان های لایه مرزی می باشد که در آن قانون جداره با متغیرهایی مانند ویسکوزیته، سرعت برشی (موسوم به متغیرهای داخلی) معادله حاکمه است. چنان چه در این جریان بستر کانال صاف باشد، جریان در عمق از ۳ ناحیه تشکیل می شود. این ۳ ناحیه عبارتند از لایه لزوج که لایه چسبیده به جداره که در آن به جهت برقراری شرط عدم لغزش جریان آرام برقرار است، لایه لگاریتمی که در آن معادله لگاریتمی

* نویسنده عهده دار مکاتبات: hossein.mohajeri@khu.ac.ir

1 Roughness layer





شکل ۱. تقسیم بندی جریانهای زیر در کانال روباز براساس زبری نسبی [۵]
 Fig. 1. Rough bed open-channel classification based on relative roughness

در چنین شرایطی روش های تحلیلی از طریق متوسط گیری زمانی چندان کارا نمی باشند و معادله های حرکت سیال در هیدرولیک (یعنی معادله متوسط زمانی ناویر-استوکس^۱) را نمی تواند به خوبی رفتار سیال توصیف نماید [۱۲-۱۰]. عدم کارایی این معادله ها در جریان های آشفته با استغراق نسبی کم (اصطلاحاً جریانات کم عمق^۲) یا جریان با زبری متوسط و زیاد، به جهت بیشتر بودن میزان نوسان های مکانی در نقاط نزدیک به بستر و نیز امکان تشکیل جریان های ثانویه نوع دوم نیز گزارش شده است [۵، ۶ و ۱۱]. به منظور حل این مشکل، محققین پیشنهاد متوسط گیری مجدد معادله های متوسط زمانی رینولدز در مکان را ارائه نموده اند [۲ و ۱۳]. معادله حاصل از متوسط گیری مکانی معادله متوسط زمانی رینولدز اصطلاحاً معادله متوسط دوگانه^۳ نامیده می شود [۱۴].

مبنای معادله های متوسط دوگانه، متوسط گیری آماری در حجم^۴ می باشد که برای نخستین بار در مطالعه جریان آب های زیرزمینی به کار برده شده است [۱۵]. این حجم یک محدوده موازی با بستر می باشد که ارتفاع آن بسیار کم است و سطح آن براساس ابعاد زبری بستر و خصوصیات توپوگرافی ناحیه مورد مطالعه تعیین می شود [۲]. این معادله ها اولین بار در علم هیدرولیک در سال ۱۹۷۷ توسط اسمیت و مک لین برای مطالعه ی سطوح موجی ناشی از تلماسه مورد استفاده گرفت [۱۶]. در جریان های حول بسترهای زبر مانند بسترهای شنی یا پوشش گیاهی که جریان رفتار بسیار

اجزای زیر تشکیل دهنده بستر در ساختار جریان، عامل زبری نسبی به صورت نسبت اندازه متوسط ارتفاع زبری ناهمواری بستر به عمق جریان تعریف می گردد. مطالعات پیشین نشان داده است که جریان براساس زبری نسبی (Δ/H) همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، به چهار دسته کلی تقسیم می شود [۲]. جریان نوع یک، جریانی با زبری نسبی کم است ($\Delta/H < 1/80$) که در آن لایه با توزیع سرعت لگاریتمی به طور کامل تشکیل شده و ناحیه بیرونی از ناحیه ی داخلی به خوبی قابل تفکیک می باشد. جریان نوع دوم، جریان با زبری نسبی متوسط می باشد ($1/5 < \Delta/H < 1/80$). باید توجه گردد که عدد $1/80$ عدد دقیقی نیست و در برخی از منابع این عدد معادل $1/40$ در نظر گرفته شده است [۳].

در جریان نوع دوم به جهت فاصله نسبتاً کم مابین بستر صلب و سطح آزاد آب، اثر سطح آب در بخشی از جریان که به طور همزمان تحت تأثیر اجزای زبر بستر نیز قرار دارد، قابل مشاهده می باشد. لذا لایه لگاریتمی تشکیلی در این شرایط با لایه لگاریتمی رایج در شرایطی که زبری نسبی کم می باشد، متفاوت می باشد [۴-۷]. جریان نوع سوم جریان با زبری نسبی زیاد ($1 < \Delta/H$) می باشد و در آن لایه ی با توزیع سرعت لگاریتمی امکان تشکیل نمی یابد و نهایتاً جریان نوع چهار از نوع نیمه غرقابی ($\Delta/H < 1$) می باشد که در آن در برخی موقعیت ها سنگدانه ها از سطح آب بالا زده و در تماس با سطح آزاد قرار می گیرند.

مطالعه های انجام شده در بسترهای زبر بیانگر این واقعیت است که مؤلفه های سرعت نزدیک بستر زبر نه تنها در زمان، بلکه در مکان نیز نوسان های قابل توجهی را از خود نشان می دهد [۱-۲ و ۹-۷].

- 1 Reynolds averaged Navier-Stokes Equation
- 2 Shallow flow
- 3 Double-averaged Navier-stokes Equation
- 4 Volume averaging

آزاد و هم به واسطه اثر زبری های بستر، تأثیر می پذیرد و لذا جریان لایه مرزی استاندارد که در آن معادله لگاریتمی برقرار است در این شرایط تشکیل نمی شود. مطابق تحقیقات گذشته در این شرایط تنها یک پروفیل خطی برای سرعت در عمق تشکیل می گردد [۲۲]. بر اساس این رویکرد نیز معادله ی سرعت به صورت زیر می باشد [۲۳]:

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{y}{l_c} + C \quad (2)$$

در این رابطه 'C' عرض از مبدا رابطه خطی و l_c معکوس شیب خط تغییرات سرعت می باشد.

در نهایت دیدگاهی وجود دارد که براساس آن گردابه های شکل بالای المان های زبر به اندازه بزرگ و با اهمیت هستند که اثر آن ها از اثر جریان مرزی تشکیلی بیشتر خواهد بود. بر همین اساس کاتول و همکاران در سال ۲۰۰۲ بیان داشتند که این نوع جریان متفاوت از جریان لایه ی مرزی بوده و از نوع جریان لایه اختلاطی^۲ می باشد [۲۴]. در چنین شرایطی اندازه گردابه های اختلاطی تشکیلی در مرز لایه اختلاطی پارامتر تعیین کننده می باشد و معادله ی سرعت در این شرایط به صورت زیر می باشد [۲۴]:

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = 1 + \tanh\left(\frac{y - y_c}{l_s}\right) \quad (3)$$

در این رابطه y_c موقعیت قائم نقطه عطف و l_s اندازه گردابه تشکیلی در مرز بین دولایه اختلاطی می باشد.

با توجه به اطلاعات ارائه شده، می توان عنوان داشت که بسیاری از جنبه های جریان با زبری نسبی متوسط هنوز مورد شک و تردید می باشد که باید با انجام آزمایش های مناسب این موارد مورد بررسی قرار گیرند. در مطالعه حاضر به منظور بررسی پروفیل سرعت طولی در جریان آشفته با زبری نسبی متوسط در یک کانال مستقیم آزمایش هایی به روش سرعت سنجی تصویری ذرات انجام شد و برای تحلیل نتایج آزمایشگاهی از معادله متوسط دوگانه ناشی از متوسط گیری مکانی معادله متوسط زمانی حرکت استفاده شد.

۲- مواد و روش ها

در این مطالعه، جریان آشفته به صورت آزمایشگاهی در یک کانال مستطیلی با بستر زبر مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش ها در

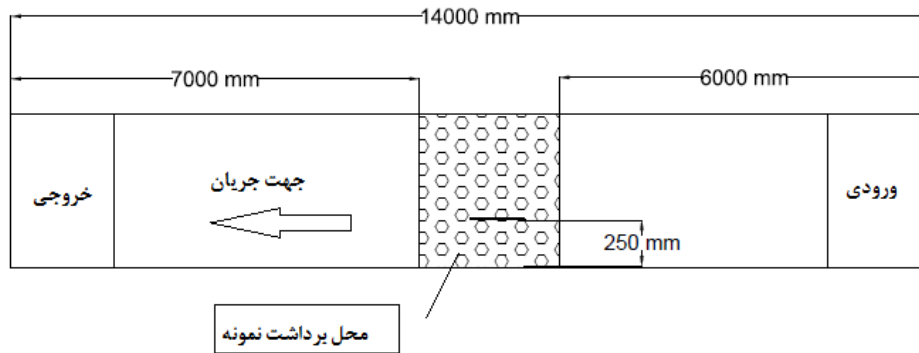
نا همگنی از خود نشان می دهد و در آن ها نمی توان از تغییرات خصوصیات جریان در مکان صرف نظر نمود، پروفیل های مختلفی برای سرعت در مکان های مختلف بدست می آید [۲، ۱۷-۱۵]. به همین خاطر استخراج یک نوع رفتار خاص و واحد از جریان سیال در این شرایط مشکل می باشد. به منظور غلبه بر این مشکل و آگاهی از رفتار متوسط این گونه جریان-ها نیز، از معادله های متوسط گیری دوگانه بهره برده می شود [۲، ۲۰-۱۸].

مطالعه ی جریان در بسترهای با زبری نسبی متوسط از اواخر دهه ی ۱۹۹۰ آغاز شده است. دیتریخت و کول در سال ۱۹۹۷ مشاهده نمودند که با افزایش زبری نسبی جریان آشفته رفتاری متفاوت از جریان لایه ی مرزی بستر زبر رایج را نشان می دهد [۱۱]. در ادامه کول در سال ۲۰۰۶ و کوپر در سال ۲۰۰۶ بیان داشتند که در این شرایط جریان را می توان از نوع لایه ی مرزی دانست، هر چند که بسیاری از فرض های رایج در این نوع جریان مانند ثابت بودن عدد ون-کارمن^۱ (k) و ثابت انتگرال گیری (C) مورد تردید می باشد [۵ و ۶]. براساس این رویکرد پروفیل سرعت از معادله ی زیر بدست می آید [۵]:

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{y - d}{k_s}\right) + C \quad (1)$$

در این رابطه u_* سرعت برشی، d میزان جابه جایی محل سرعت صفر، \bar{u} سرعت متوسط دوگانه y موقعیت قائم در عمق و k_s زبری معادل بستر می باشد. همچنین در این رابطه، نماد "—" بیانگر متوسط گیری زمانی و "<>" بیانگر متوسط گیری مکانی می باشد. این رویکرد توسط فرانکا و همکاران [۲۱] در مطالعه ی میدانی جریان در رودخانه های با بستر شنی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین گاودیو و همکاران [۲۲] با مطرح نمودن نموداری نشان داد که ثابت ون-کارمن در این نوع جریان بسته به زبری نسبی تغییر می کند. اخیراً مهاجری و همکاران [۵] نیز به مطالعه ی این جریان پرداخته اند. ایشان مشاهده نمودند که رابطه (۱) در جریان با زبری نسبی متوسط برقرار می باشد، هر چند که برقراری این رابطه با تغییرات شدید پارامترهای k و C همراه می باشد.

از طرف مقابل، برخی دیگر از محققین بر این باورند که در جریان با زبری نسبی متوسط، جریان در ناحیه میانی لایه مرزی هم از طرف سطح



شکل ۲. پلان کانال هیدرولیکی همراه با موقعیت برداشت سرعت لحظه‌ای (جهت جریان از راست به چپ است)
Fig. 2. Plan of experimental open-channel together with the instantaneous velocity measurement location



شکل ۳. اجزای تشکیل‌دهنده زبری بستر (الف) سنگدانه‌های شکسته پخش شده در سطح کانال (ب) گویهای کروی در مقطع برداشت سرعت.
Fig. 3. Rough bed elements a) crushed stones b) spherical particles in measurement section

در این سری برداشت‌های آزمایشگاهی، ۳ رویکرد جهت اندازه‌گیری برنامه ریزی شد. مشخصات جریان این ۳ رویکرد در جدول ۱ نشان داده شده است. همان طور که در این جدول گزارش شده است، عدد رینولدز (Re) تقریباً برابر با ۸۰۰۰ ثابت نگه داشته شد. مطالعات پیشین نشان داده است که تغییرات اثر رینولدز می‌تواند بر شرایط جریان در بستر زیر مانند پروفیل لگاریتمی اثر بگذارد [۱۹]. به جهت حذف این اثر و تمرکز بر اثر زبری نسبی، سعی گردید تا عدد رینولدز ثابت نگه داشته شود. همچنین با وجود این که عدد رینولدز انتخابی در شرایط مورد مطالعه کمی پایین می‌باشد، این عدد بیانگر این واقعیت است که جریان آشفتگی می‌باشد [۲۵]. لازم به ذکر است که در این مطالعه امکان انتخاب اعداد رینولدز بالاتر به علت عدم قابلیت سیستم سرعت سنجی تصویری ذرات فراهم نبود. اعداد فرود (Fr) گزارش شده در جدول ۱ بیانگر مقادیر کم و با محدوده تغییرات کم می‌باشد و لذا می‌توان از اثر این پارامتر نیز بر نتایج مشاهده شده صرف نظر نمود. در این مطالعه مقدار زبری بستر (Δ) برابر با قطر کره‌های چسبیده به بستر (D) در نظر گرفته شد که برابر

آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه امیرکبیر و در یک کانال مستقیم به طول ۱۴ متر، عرض ۷۵ سانتی متر و ارتفاع ۷۰ سانتی متر و شیب صفر انجام پذیرفت. این کانال که پلان آن در شکل ۲ نمایش داده شده است، دارای جداره‌های جانبی از جنس شیشه می‌باشد. دبی ورودی کانال توسط دبی سنج مغناطیسی کنترل و اندازه‌گیری شد. جهت ایجاد بستر زیر، ذرات ماسه‌ی تیز گوشه با قطر متوسط بین ۱/۱ تا ۱/۵ سانتی متر که در شکل ۳-الف نمایش داده شده است، در کف کانال به صورت تصادفی در کل طول کانال پخش گردیدند. به جهت ایجاد شرایطی که خصوصیات زبری بستر بهتر قابل تعیین باشد، در قسمت میانی کانال (که برداشت‌های میدان جریان در این محدوده انجام گرفت) گلوله‌های کروی شکل از جنس شیشه به قطر ۱/۵ سانتی متر در محدوده‌ای در حدود ۱ متر به صورت تصادفی در کف کانال پخش گردیدند که در شکل ۳-ب نمایش داده شده‌اند. توجه گردد که این گوی‌ها با استفاده از اسپری رنگ، به رنگ مشکی درآمده‌اند تا جلوی بازتاب نور در اندازه‌گیری سرعت به روش سرعت سنجی تصویری ذرات را بگیرد.

جدول ۱. مشخصات هیدرولیکی برداشتهای آزمایشی در مطالعه حاضر.
Table 1. Hydraulic characteristics of measurements in present study

رویکرد ۳	رویکرد ۲	رویکرد ۱	
۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۱	$H (m)$
۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	$\Delta=D (m)$
۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۸	Fr
۸۰۰۰	۸۰۰۰	۸۰۰۰	Rr
۰/۱	۰/۱۲۵	۰/۱۵	$D/H (-)$
۵	۶/۲۵	۷/۵	$B/H (-)$
۶	۶	۶	$Q (lit/s)$
۲/۸۸	۳/۲۹	۳/۴۶	$L_{FD} (m)$
۰/۰۰۰۰۴۶	۰/۰۰۰۰۴۸	۰/۰۰۰۰۵	$S_f (-)$
۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	۰/۰۰۸	$u^* (m/s)$

سرعت سنجی تصویری ذرات^۱ (PIV) بهره برده شده است. مبنای این روش براساس محاسبه همبستگی بین شدت رنگ در پیکسل های دو عکس متوالی است که از روی آن می توان جابه جایی سرعت ذراتی که سرعتی مشابه با سرعت جریان را دارند، برآورد نمود [۲۶]. از مهم ترین مزایای این روش می توان به این واقعیت اشاره کرد که الگوی جریان به علت عدم ورود سنسور به سیستم تغییر نمی کند، در حالی که در دیگر روش های اندازه گیری سرعت به طور معمول سنسور وارد جریان می شود. در روش PIV ابتدا ذرات ردیاب که در مقابل نور درخشش و بازتاب پیدا می کنند، با سیال مخلوط می شوند. این ذرات با جریان سیال حرکت می کنند و با گرفتن عکس های متوالی از ذرات در حال حرکت و با دانستن فاصله زمانی بین دو عکس متوالی، سرعت لحظه ای در هر نقطه از صفحه عکس برداری شده از سیال مشخص می شود [۲۷]. مزیت مهم دیگر این روش ارائه سرعت لحظه ای برداشتی به طور همزمان و در نقاط مختلفی از سیال در حال حرکت می باشد که این موضوع آن را به روشی مناسب در بررسی پدیده های مکانیک سیالات تبدیل کرده است [۲۷]. لیزر، دوربین و ذرات ردیاب اصلی ترین اجزای این روش می باشند. در بسیاری از مطالعه های پیشین نیز از این روش جهت بررسی جریان در بسترهای زبر و شنی بهره برده شده است [۴، ۵ و ۲۷]. دوربین مورد استفاده در این مطالعه از نوع نیکون می باشد که قادر به فیلم برداری از حرکت ذرات ردیاب با فرکانس ثابت ۶۰ هرتز در جریان آب می باشد. در این

با ۱۵ میلی متر می باشد. مقادیر زبری نسبی ($\Delta/H \cong D/H$) نشان داده شده در جدول ۱ بیان می دارد که اندازه زبری بستر در حدود ۱۰ الی ۲۰ درصد عمق جریان می باشد و لذا جریان از نوع جریان با زبری نسبی متوسط می باشد. نسبت بعد (نسبت عرض کانال به عمق آب یعنی B/H) گزارش شده در جدول ۱ بزرگتر از ۵ می باشد و می توان از اثر جریان های ثانویه در مقطع صرف نظر نمود [۱]. به منظور محاسبه شیب خط انرژی (S_p)، تراز سطح آب در ابتدا و انتهای کانال توسط دستگاه تراسونیک اندازه گیری شد و در ادامه براساس این اعداد شیب های خط انرژی در هر ۳ سری آزمایش ها محاسبه گردید که این مقادیر در جدول ۱ گزارش شده اند. در این مطالعه سرعت های برشی (u_p) براساس شیب خط انرژی به دست آمده اند. مقادیر محاسبه شده برای طول توسعه یافتگی (L_{FD}) در مقطع برداشت های سرعت لحظه ای که براساس فرمول نیکورا محاسبه شده اند [۲۶]، در جدول ۱ نمایش داده شده است. براساس نتایج به دست آمده حداکثر طول توسعه یافتگی برای شرایط هیدرولیکی آزمایش های حاضر ۳/۴۶ متر می باشد که این مقدار از موقعیت مقطع اندازه گیری سرعت (که در فاصله ۷ متری از ورودی کانال قرار دارد)، کوچکتر می باشد. بنابراین می توان فرض نمود که در مقطع اندازه گیری شرایط توسعه یافتگی برقرار می باشد. همچنین در این جدول مقدار دبی (Q) نیز گزارش شده است.

در این تحقیق به منظور برداشت مؤلفه های سرعت از روش

در عکس های منجر به فاصله 5×5 میلی متری در فایل ها نهایی بین نقاط می گردد. لذا فاصله بین بردارهای سرعت به دست آمده برابر ۵ با میلی متر گردید. به منظور تحلیل عکس ها و به دست آوردن بردارهای سرعت از الگوریتم تبدیل سریع فوری^۶ استفاده شده است [۲۸]. پس از استخراج نتایج و محاسبه بردارهای سرعت به منظور افزایش کیفیت نتایج از فیلترهای میانه بهره برده شد [۳۰]. تحقیق های پیشین نشان داده است که اگر نسبت قطر ذرات ردیاب به اندازه یک پیکسل در تصویر بزرگتر از ۳ تا ۴ باشد، عدم قطعیت در برآورد نتایج در مرتبه یک دهم تا یک بیستم قطر ذره خواهد بود [۳۱]. در مطالعه حاضر این شرایط برقرار گردید و لذا عدم قطعیت و خطای ناشی از برداشت الگوی جریان با این روش در مرتبه یک دهم تا یک بیستم قطر ذره می باشد.

۳- نتایج

۳-۱- بررسی متوسط گیری دوگانه

در شکل ۴ نتایج خروجی نرم افزار پی آی وی لب همراه با یکی از عکس های گرفته شده در طی انجام پژوهش ها نمایش داده شده است. در این شکل مشاهده می شود که تنها ناحیه ای در مرکز تصویر مورد بررسی و تحلیل واقع شده است. این بدان علت است که ناحیه ای نورانی شده توسط لیزر در این منطقه دارای شدت مناسب بوده است. توجه گردد که بردارهای نمایش داده شده در این شکل لحظه ای می باشند و به همین خاطر برخی از بردارها مقادیر بزرگی را از خود نشان می دهند که بیانگر مقادیر شدید نوسان ها در زمان می باشند. در شکل ۴ نقاط نزدیک به بستر نوسان های زمانی و مکانی شدیدتری را نشان می دهند. به بیان دیگر در هر اندازه گیری، دو ناحیه قابل تفکیک و مشاهده می باشد: (۱) ناحیه ای در نزدیکی بستر که بردارهای سرعت در این ناحیه به شدت نوسان می کنند و مؤلفه قائم سرعت مقدار قابل توجهی را دارا می باشد و (۲) ناحیه ای که در نواحی دور از بستر قرار دارد و در این ناحیه سرعت طولی بسیار کمتر از نواحی نزدیک به بستر نوسان می کند و در آن مؤلفه قائم نیز ناچیز است. نوسان های شدید مکانی سرعت جریان در نزدیکی بستر بیانگر این واقعیت است که نمی توان اثر این نوسان ها را در پروفیل جریان در نظر نگرفت و لذا تنها راه مطالعه این نوع

مطالعه، خاک اره پس از بررسی چند ماده مختلف به عنوان ذرات ردیاب انتخاب شد. این ماده سرعتی برابر با سرعت جریان داشته و همچنین می توان از سرعت سقوط این ذرات و اثر آن روی نتایج مشاهداتی صرف نظر نمود. لیزر نیز در مطالعه حاضر از نوع دیودی و با قدرت ۰/۰۵ وات می باشد. این لیزر با توجه به طول موج خروجی از آن (۵۳۲ nm) سبز رنگ می باشد که نور را به صورت پیوسته ساطع می کند. در طی برداشت های آزمایشگاهی جهت بالا بردن کارایی و راندمان در اطراف محل آزمایش، یک پارچه ی برزنتی مشکی رنگ قرار داده شد تا میزان نور نامطلوب در محیط به حداقل برسد.

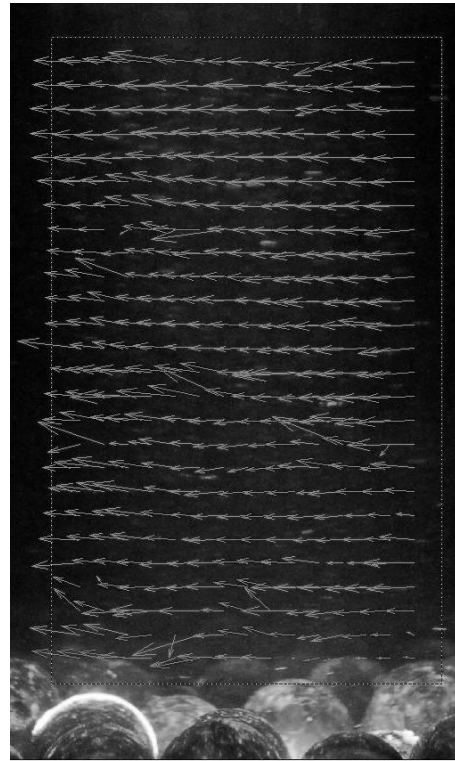
در طی برداشت های آزمایشگاهی این مطالعه، زمان تصویربرداری برای هر رویکرد در حدود ۳ دقیقه و با فرکانس برداشت ۶۰ هرتز در نظر گرفته شد. بررسی های صورت گرفته روی ساختارهای بزرگ آشفتگی نشان داد که فرکانس جریان در حدود ۲۰ هرتز می باشد. این فرکانس از برابر قراردادن سرعت انتقالی گردابه های بزرگ مقیاس با سرعت متوسط در مقطع و برابر قرار دادن ابعاد گردابه های بزرگ مقیاس با عمق جریان تعیین شده است [۱]. لذا برداشت با فرکانس ۶۰ هرتز شرایطی را فراهم می آورد که از هر یک از ساختارهای بزرگ آشفتگی حداقل ۳ نمونه در متوسط گیری ها حضور داشته باشد و مقادیر متوسط می توانند به خوبی خصوصیات جریان را توصیف نمایند. پس از اتمام برداشت یک رویکرد، فیلم ضبط شده توسط برنامه ای که در متلب نوشته شده است، به تعدادی عکس تبدیل شده که از آن ها جهت انجام تحلیل همبستگی و محاسبه سرعت لحظه ای بهره برده شد. جهت محاسبه تغییر مکان ها و محاسبه سرعت سیال از نرم افزار پی آی وی لب^۱ بهره برده شد [۲۸]. این برنامه یک برنامه متن باز می باشد که بارها توسط محققین گوناگون در مطالعه جریان های آشفتنه استفاده شده است [۵ و ۲۹]. در این نرم افزار، عکس های برداشتی توسط روش فیلتر بالاگذر^۲ و فیلتر متعادل سازی هیستوگرام کنتراست تطبیقی محدود^۳ موسوم به کلیه^۴ پاک سازی گردیدند. به منظور تحلیل نتایج ابعاد ناحیه جستجو^۵ 350×350 در نظر گرفته شد که با سه بار کوچک کردن، ابعاد نهایی پنجره های جستجو به 88×88 پیکسل رسید. این ابعاد

- 1 PIVLAB
- 2 High pass filter
- 3 Contrast adaptive histogram equalization
- 4 CLAHE
- 5 Interrogation area

6 Fast Fourier Transform (FFT)

رابطه چاق تری را شاهد خواهیم بود) و این پروفیل را پروفیل سرعت شدت یافته^۱ نامیدند. در ناحیه هایی که فاصله بین سنگدانه ها زیاد است، در پشت سنگدانه های شنی پروفیل سرعت جریان شبیه به لایه اختلاطی می باشد؛ و در نهایت در سایر مکان ها که خارج از منطقه جدایش پائین دست سنگدانه ها است، این پروفیل بسیار شبیه به پروفیل لگاریتمی^۲ سرعت می باشد. مشاهده نوسان های شدید مؤلفه های سرعت طولی در نزدیکی بستر در این مطالعه و نیز مطالعه های مشابه پیشین بیان می دارند که تنها راه مطالعه ی جریان در بسترهای زیر استفاده از متوسط گیری دوگانه می باشد.

در شکل ۵ پروفیل های سرعت طولی در شرایط متوسط گیری زمانی - مکانی بی بعد شده با سرعت برشی (\bar{u} / u_*)، نمایش داده شده است. در این مطالعه متوسط گیری مکانی در یک حجم به ارتفاع فاصله قائم بین نقاط اندازه گیری (تقریباً برابر با ۲ میلی متر) و کل طول عکس اندازه گیری که برداشت روی آن قابلیت داشت (تقریباً برابر با ۲۵ میلی متر بر روی تقریباً ۱۲ نقطه اندازه گیری سرعت) و به عرض واحد انجام پذیرفت (یعنی به جای متوسط گیری در طول و عرض کانال، تنها در طول عکس که در راستای کانال می باشد، متوسط گیری انجام شده است). این روش متوسط گیری در بسیاری از مطالعه های پیشین استفاده شده است [۲، ۵ و ۳۲]. شکل کلی این پروفیل از پروفیل لگاریتمی رایج در جریان با زبری نسبی کم متفاوت می باشد. در حقیقت به نظر می رسد که این پروفیل شبیه به یک پروفیل خطی است. تشکیل چنین پروفیلی می تواند از تغییر محسوس پارامترهای معادله لگاریتمی و یا برقراری پروفیل خطی در این شرایط نتیجه شده باشد. در همین ارتباط نیکورا و همکاران [۳۳] نیز برای جریان در شرایط زبری نسبی زیاد و متوسط پروفیل خطی را پیشنهاد نموده اند. البته باید توجه داشت که محدوده جریان با زبری نسبی زیاد و تفاوت آن با جریان با زبری نسبی متوسط تاکنون در هیچ مطالعه ای به صورت دقیق مشخص نشده است و تنها در مراجع به توضیحات کیفی در این رابطه اکتفا شده است. بنابراین، با وجودی که در این مطالعه، بستر از نوع با زبری نسبی متوسط در نظر گرفته شد، تشخیص این که شرایط جریان در مطالعه حاضر شرایط زبری نسبی متوسط و یا زیاد است به پروفیل جریان برمی گردد، که در زبری متوسط، بیشتر از پروفیل لگاریتمی با پارامترهای معادله متفاوت و یا

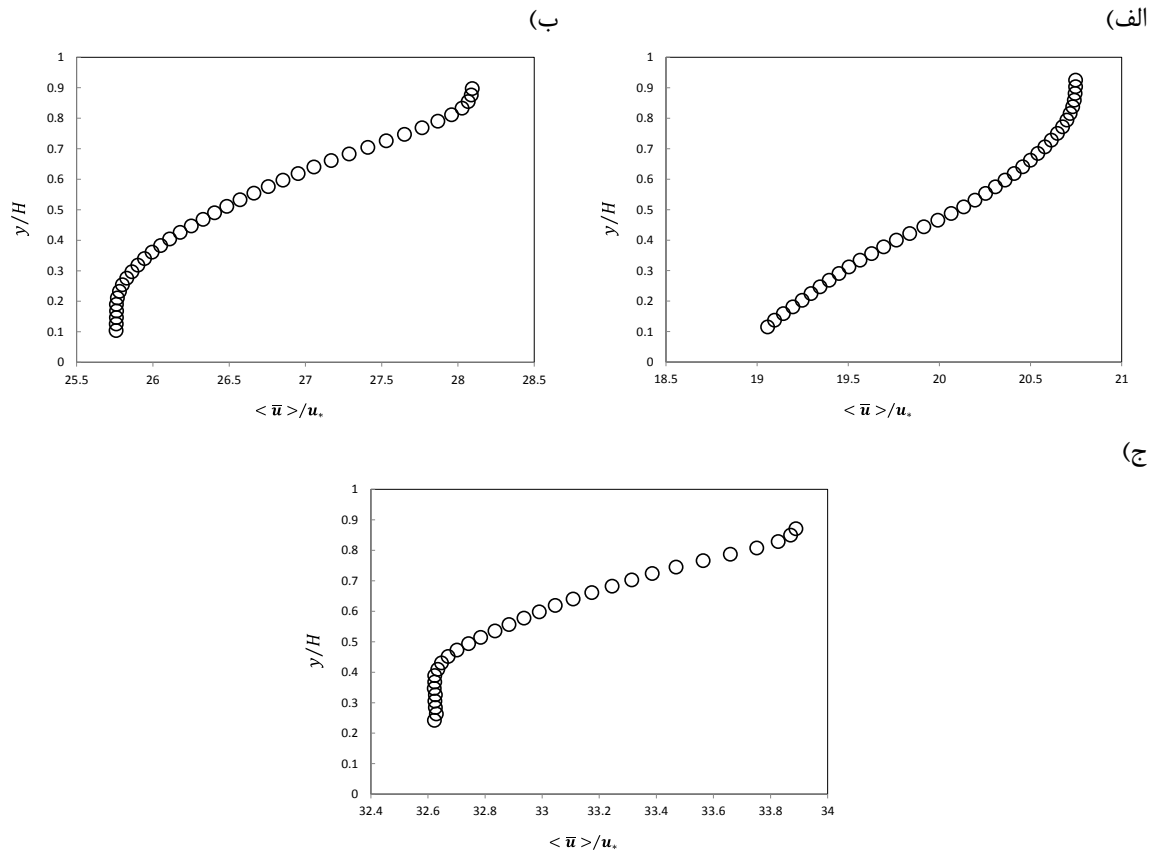


شکل ۴. بردارهای سرعت لحظه‌ای
Fig. 4. Instantaneous velocity vectors

جریان استفاده از متوسط گیری دوگانه می باشد. البته در مناطق دور از بستر تعداد محدودی بردارهای با مؤلفه بزرگ غیر طولی نیز دیده می شوند که این بردارها اغلب به واسطه کمبود ذرات ردیاب و مشکلات آزمایشگاهی تا وقوع یک پدیده فیزیکی در نقاط دور از بستر زیر مربوط می باشند.

مشابه این نتایج در پژوهش ها پیشین نیز گزارش شده است. بافین بلانژر و روی [۹] با بررسی کلاسترهای شنی مشاهده نمودند که بردارهای سرعت در محدوده ی اطراف کلاسترها در مکان های مختلف مانند جلوی کلاسترها، پشت کلاسترها و وجه های جانبی مقادیر مختلفی را از خود نشان می دهد. هوور و اکرمین [۱۷] نیز در یک مطالعه میدانی مشاهده نمودند که جریان در شرایطی که اثر زبری نسبی محسوس می باشد، در مکان به شدت تغییر می نماید. ایشان براساس این مشاهده و با روش انتگرال گیری دوگانه سه نوع پروفیل سرعت متوسط طولی مختلف را مشاهده نمودند. آن ها بیان داشتند که در نواحی بالای سنگدانه ها (و نه در حفره بین سنگدانه های شنی)، پروفیل سرعت از پروفیل لگاریتمی سرعت رشد شدیدتری را نشان می دهد (یعنی نسبت به پروفیل لگاریتمی،

1 Accelerated velocity profile
2 Logarithmic profile



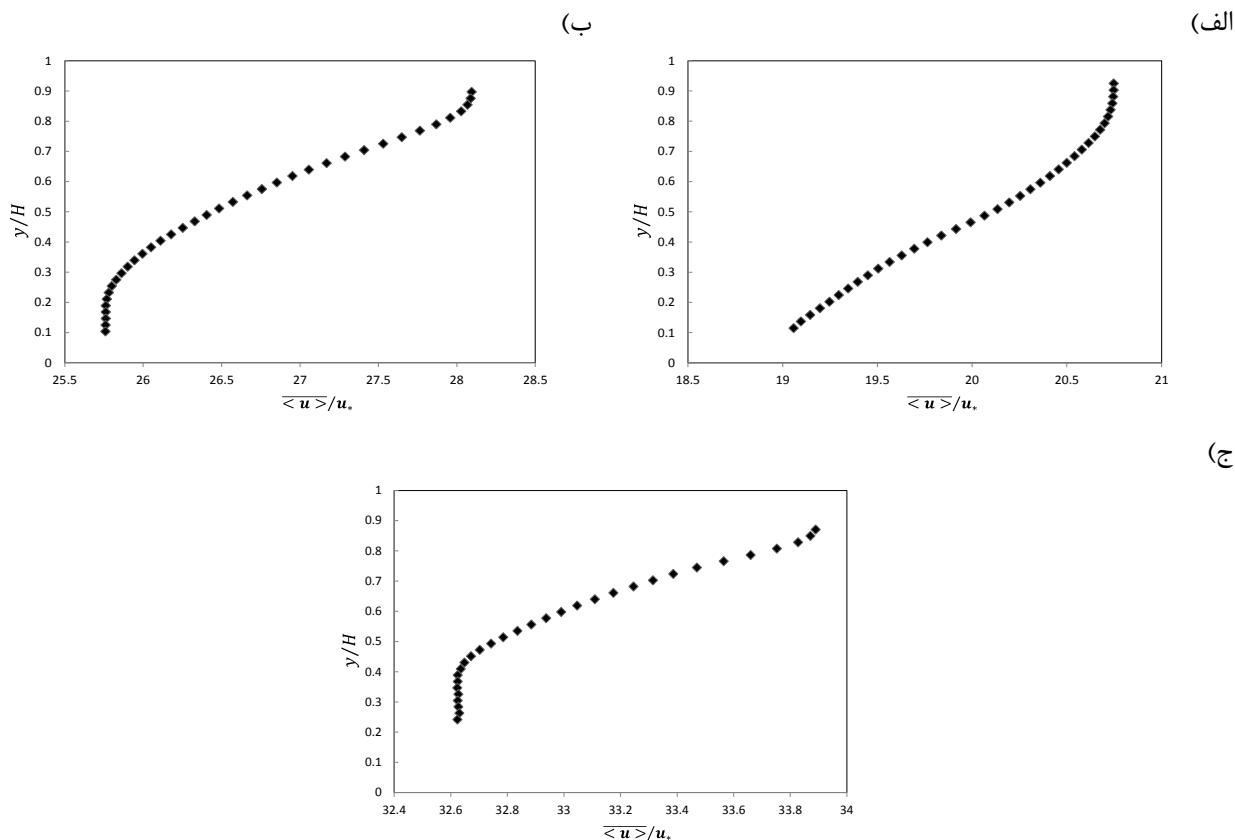
شکل ۵. پروفیل‌های سرعت طولی متوسط دوگانه زمانی-مکانی بیبعد شده با سرعت برشی در الف) رویکرد ۱ ب) رویکرد ۲ ج) رویکرد ۳.
Fig. 5. Profiles of time-space double-averaged streamwise velocity normalized with shear velocity a) Approach 1 b) Approach 2 c) Approach 3

پیشنهاد نموده اند.

در مرحله بعدی اثر متوسط گیری مکانی-زمانی بر پروفیل های سرعت طولی بررسی شده است. با وجود این که متوسط گیری زمانی- مکانی در مطالعه این نوع جریان رایج می باشد، از نظر تئوری با روش متوسط گیری مکانی-زمانی هم باید به نتایج صحیح برسیم [۱۴] و [۳۳]. به این منظور در شکل ۶، پروفیل های سرعت طولی متوسط مکانی-زمانی نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، پروفیل های نمایش داده شده رفتاری مشابه با پروفیل های سرعت طولی متوسط زمانی-مکانی از خود نمایش می دهند. لذا می توان عنوان داشت که نتایج هر دو روش متوسط گیری یکسان می باشد. دلیل یکسان شدن این دو نوع متوسط گیری را می توان در ذات متوسط گیری دوگانه جستجو نمود. در حقیقت متوسط گیری دوگانه همان فیلترکردن مکانی نوسان های آشفتگی در مکان می باشد که این فیلتر در کل حجم متوسط گیری اعمال می گردد [۳۳]. در

لایه اختلاطی بهره برده می شود، و در زبری زیاد پروفیل خطی به توزیع سرعت آن برزاش داده می شود. بررسی های دقیق تر در شکل ۵ نشان می دهد که در هر ۳ سری رویکرد، در نزدیکی بستر $y/H=0.6$ (توجه گردد که مبدأ مختصات در راستای قائم روی تاج گلوله های کروی در نظر گرفته شده است)، یک نقطه عطف تشکیل شده است که در بالای آن تقعر به سمت بالا و در زیر آن تقعر به سمت پائین تغییر جهت می دهد. این شکل پروفیل، می تواند نشانی از تشکیل پروفیل جریان اختلاطی^۱ در این شرایط باشد. چنین پروفیلی قبلاً توسط کاتول و همکاران [۲۴] پیشنهاد شده است. در حقیقت آن ها استفاده از تابع تانژانت هیپربولیک را که دارای نقطه عطف می باشد و در جریان اختلاطی استفاده از آن رایج می باشد را به جای پروفیل لگاریتمی برای طیف وسیعی از زبری های نسبی (از ۰/۹ تا ۰/۱)

1 Mixing layer



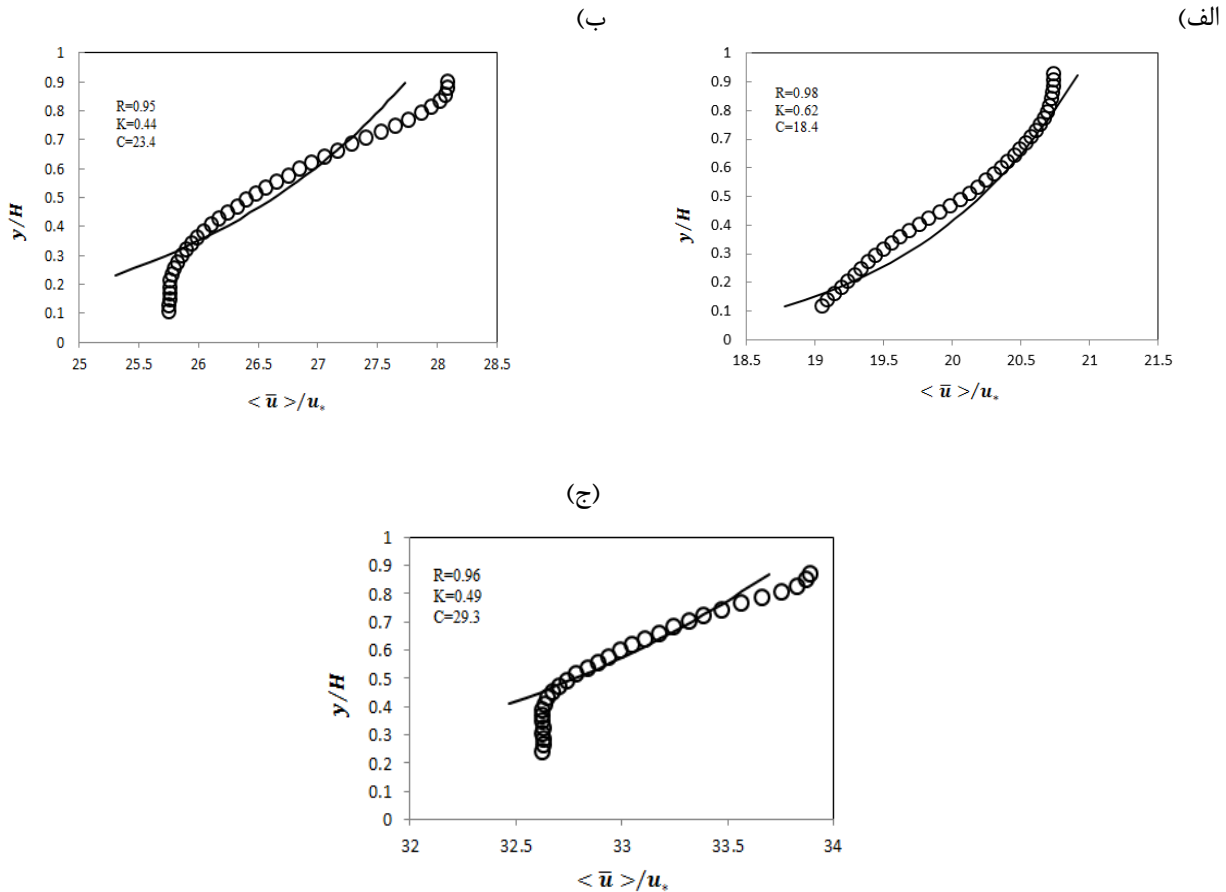
شکل ۶. پروفیل‌های سرعت طولی متوسط دوگانه مکانی-زمانی بی‌بعد شده با سرعت برشی در الف) رویکرد ۱ ب) رویکرد ۲ ج) رویکرد ۳.
Fig. 6. Profiles of space-time double-averaged streamwise velocity normalized with shear velocity a) Approach 1 b) Approach 2 c) Approach 3

و ثابت ون-کارمن و نیز ضریب تعیین به دست آمده از برازش خط گزارش شده است. این مقادیر نشان می‌دهد که ثابت انتگرال گیری و ثابت ون-کارمن با زبری نسبی به شدت تغییر می‌نمایند و لذا مقدار آنها ثابت نیست. مشابه یافته در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است [۳-۵]. همچنین ضریب همبستگی خطی R^2 گزارش شده مقداری بیش از ۰/۹ نشان می‌دهد که این موضوع بیانگر این واقعیت است که این نوع پروفیل به خوبی به اطلاعات آزمایشگاهی برازش داده شده است. چنین نتایجی در بسیاری از مطالعه‌های پیشین نیز مشاهده شده است. کول و همکاران [۴]، کوپر [۵] نیز رفتاری مشابه این پروفیل‌ها را گزارش نموده‌اند. مک لین و نیکورا [۱۰] نیز با کمک روش متوسط گیری دوگانه چنین رفتاری را در یک مطالعه آزمایشگاهی در شرایط زبری نسبی ۰/۵۰ و ۰/۱ مشاهده نموده‌اند. اخیراً نیز مهاجری و همکاران [۳] در شرایط زبری نسبی بین ۰/۹ تا ۰/۱۳ رفتار مشابهی را مشاهده نموده‌اند. ایشان مشاهده نمودند

این نگاه می‌توان متوسط گیری دوگانه را حالت خاصی از روش شبیه سازی گردابه ای بزرگ دانست که در آن فیلتر استفاده شده در کل محدوده حل اعمال شده است [۳۳].

۳-۲- بررسی پروفیل سرعت

در این بخش به بررسی دقیق سه نوع پروفیل سرعت پیشنهاد شده در قیاس با نتایج آزمایشگاهی پرداخته می‌شود. در شکل ۷ نتایج حاصل از برازش معادله ی لگاریتمی (معادله ی (۱)) به نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده است. باید توجه گردد که در پژوهش حاضر در معادله (۱) ضریب زبری (k_s) برابر با قطر کره و جابه جایی بستر صفر (d) برابر با نصف قطر کره های چسبیده به کف کانال در نظر گرفته شد [۴ و ۳۴]. به منظور بدست آوردن پارامترهای معادله ی لگاریتمی (ثابت انتگرال گیری و ثابت ون-کارمن) از روش برازش حداقل مربعات بهره برده شد. در شکل ۷، مقادیر ثابت انتگرال گیری



شکل ۷. برازش پروفیل لگاریتمی به نتایج برداشته‌های آزمایشگاهی (الف) رویکرد ۱ (ب) رویکرد ۲ (ج) رویکرد ۳
Fig. 7. Logarithmic profile regression of experimental data a) Approach 1 b) Approach 2 c) Approach 3

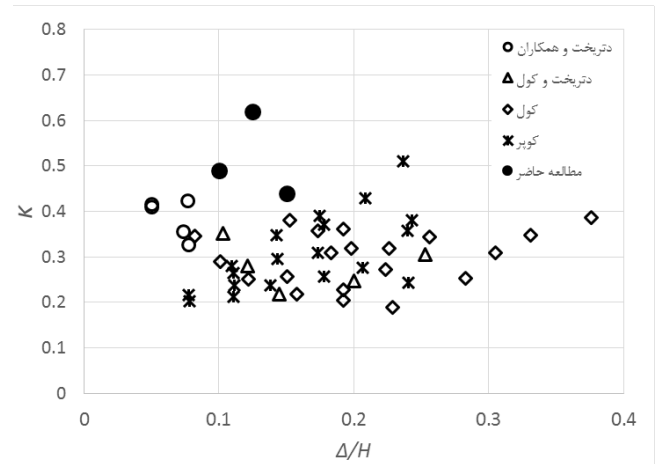
در رویکرد ۲، مقدار $0/61$ برای ثابت ون-کارمن به دست آمده است که این عدد در مطالعات پیشین مشاهده نشده است. علت مشاهده چنین عددی برای ثابت ون-کارمن نیاز به بررسی‌های عمیق‌تر میدان جریان آشفته‌شکلی در این شرایط دارد. به علاوه برای بررسی‌های دقیق‌تر نیاز به اندازه‌گیری با دستگاه‌هایی با قدرت بیشتر منبع لیزر می‌باشد. براساس اطلاعات آزمایشگاهی مطالعه حاضر و اطلاعات گزارش شده در شکل ۸ می‌توان چنین عنوان نمود که در محدوده زبری نسبی بزرگتر از $0/05$ ، ثابت ون-کارمن عددی متفاوت از $0/41$ می‌باشد. این عدد در اغلب مطالعه‌های عددی کوچکتر از $0/41$ می‌باشد، هر چند که در برخی موارد مانند مطالعه حاضر ثابت ون-کارمن از $0/41$ بزرگتر می‌باشد. علت چنین مشاهده می‌توان از دو عامل ناشی شده باشد. اولاً مقدار ثابت ون-کارمن در این مطالعه و مطالعه‌های پیشین از روش برازش خط به دست آمده است و خود این برازش دارای عدم قطعیت می‌باشد که نتایج را

که تغییرات پارامترهای معادله لگاریتمی با زبری نسبی بسیار شدید می‌باشد، اما تغییرات ثابت فون کارمن در این دو مطالعه تا حدودی با یکدیگر متفاوت می‌باشد. هر چند که در هر دو مطالعه پارامترهای معادله لگاریتمی براساس زبری نسبی تغییر می‌نمایند، مک لین و نیکورا [۱۰] و مهاجری و همکاران [۳] بر این عقیده اند که در این محدوده زبری نسبی، پروفیل جریان از نوع لگاریتمی می‌باشد.

در شکل ۸ عدد ون-کارمن مشاهده شده در این مطالعه در مقابل زبری نسبی نمایش داده شده و با مقادیر مشاهده شده در مطالعه‌های پیشین مقایسه شده است. مقدار ثابت ون-کارمن در شرایط زبری کم و بسترهای صاف برابر با $0/41$ می‌باشد. اما همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، با افزایش زبری نسبی در محدوده اعداد $0/1$ الی $0/4$ ، ثابت ون-کارمن براساس مطالعه‌های پیشین مقادیری متفاوت از $0/41$ را نشان می‌دهد. محدوده تغییرات ثابت ون-کارمن در مطالعه حاضر در محدوده گزارش شده در مطالعات پیشین می‌باشد. البته

تعیین نمود. در شکل ۹ مقادیر به دست آمده از برازش معادله ۲ برای ثابت معادله و مقیاس مشخصه دینامیکی همراه نمودار مربوطه گزارش شده است. ضریب همبستگی به دست آمده در هر ۳ رویکرد مقدار بالایی می باشد که بیانگر مناسب بودن این پروفیل برای جریان می باشد. با وجود بالا بودن ضریب همبستگی گزارش شده، برخلاف معادله لگاریتمی (معادله (۱)) نمی توان از نظر تئوری این نوع پروفیل را برای این شرایط جریان مناسب دانست. این نوع پروفیل برای زمانی مناسب است که اجزای زبر به حدی بزرگ هستند که اندازه آن ها در حدود عمق آب است و دنباله های تشکیلی ناشی از زبری بستر در نواحی دور از بستر نیز قابل احساس می باشد [۲۳]. در این شرایط چون زبری بزرگ است و در حد عمق جریان می باشد، به طبع اثر نیروی ناشی از برخورد آب به المان زبر تا سطح آب قابل حس می باشد. اما چون شرایط هیدرولیکی ما چندان با این شرایط در تطبیق نیست، پس برای شرایط هیدرولیکی مطالعه حاضر این پروفیل مناسب نیست.

آخرین روش، روش لایه ی اختلاطی براساس معادله ی (۳) می باشد که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. در این روش پارامترهای تأثیرگذار موقعیت نقطه ی عطف سرعت (v_c) و اندازه گردابه های تشکیل شده در مرز اختلاط دو لایه (L_c) می باشد. در این روش موقعیت نقطه عطف از مشاهده نقاط آزمایشگاهی، به صورت تقریبی از شکل ۱۰ به دست آمد. همچنین طول لایه ی اختلاطی از روش بهینه سازی خطی سیمپلکس که توسط ماژول سالور^۲ در نرم افزار اکسل انجام پذیرفت [۳۶]. سیمپلکس یکی از رایج ترین و ساده ترین الگوریتم ها برای برنامه ریزی خطی است. فرآیند سیمپلکس به جای در نظر گرفتن فرآیند حل مسأله به صورت خطی، آن را به صورت یک چرخه پیوسته ارائه می کند. به این معنا که با یک بار اجرای راه حل، فرآیند حل مسأله متوقف نمی شود، بلکه با طی کردن یک چرخه، جواب ها بهبود می یابد [۳۷]. در حقیقت، در این روش اندازه بهینه گردابه های تشکیل شده در ناحیه اختلاطی تعیین گشته و سپس معادله ی (۳) با اطلاعات آزمایشگاهی مقایسه شد و ضریب همبستگی آن بدست آمد. مقادیر به دست آمده برای اندازه گردابه ها و ضریب همبستگی در شکل ۱۰ گزارش شده است. مقادیر بدست آمده بیان می دارد که با وجود ضریب تعیین بالا در این

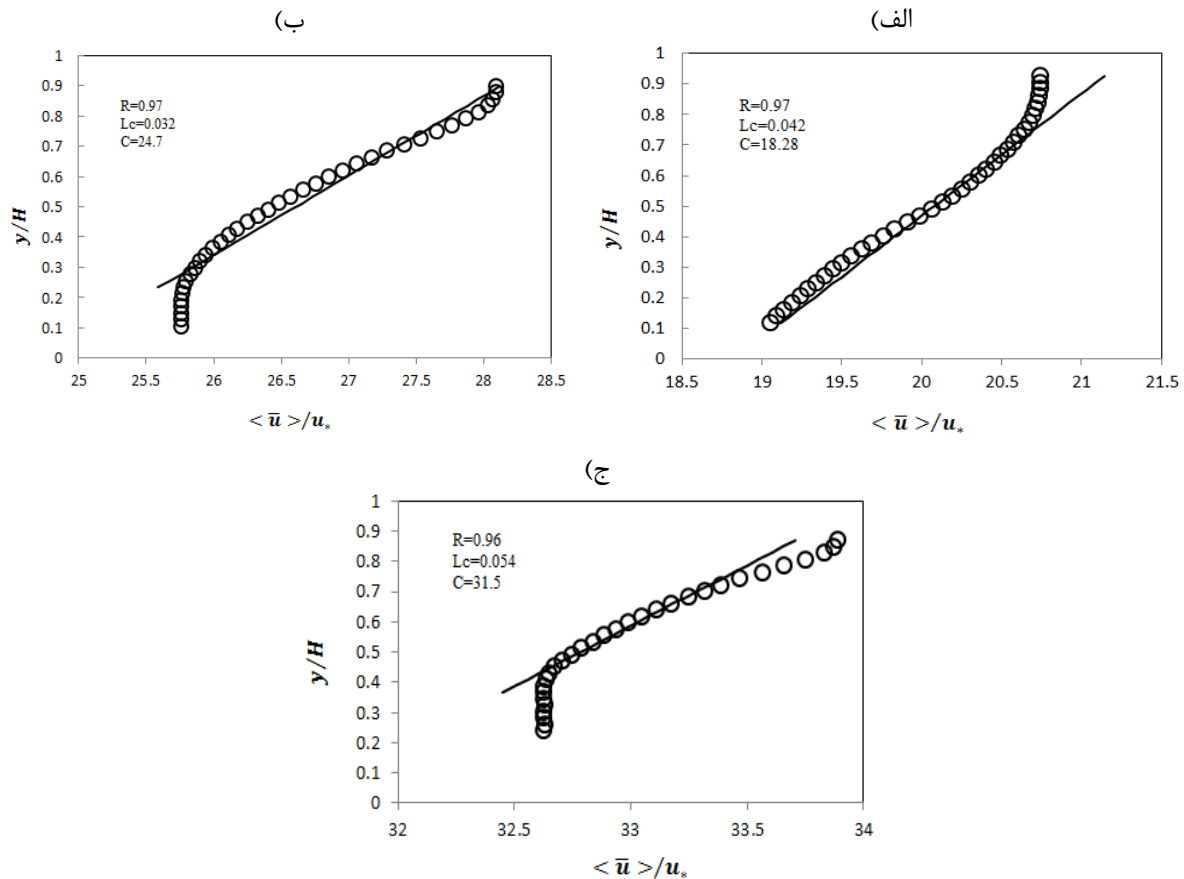


شکل ۸. تغییرات ثابت ون-کارمن نسبت به زبری نسبی در مطالعه حاضر و مطالعه های سایرین
Fig. 8. Van-Karman constant variation respect to relative roughness in present and previous studies

تحت تأثیر قرار می دهد. ثانیاً، مشاهده عدم رفتار ثابت در شکل ۸ این نظریه را تقویت می نماید که عامل دیگری (به عنوان نمونه عدد رینولدز یا عدد فرود) علاوه بر زبری نسبی می تواند ثابت ون-کارمن را تحت تأثیر قرار دهد.

در ارتباط با علت افزایش مقدار ثابت فون کارمن نسبت به افزایش زبری نسبی تاکنون دلیل محکمی ارائه نشده است. البته برخی بررسی ها حاکی از اثر ساختارهای پیوسته و به طور خاص گردابه سنجاقی در این تغییر می باشد [۳۵]. در حقیقت گردابه سنجاقی در حالت عادی با زاویه حدود ۳۰ درجه در یک کانال مستقیم قرار گرفته است. اما در شرایطی عمق جریان کم می باشد، زاویه قرارگیری گردابه سنجاقی نسبت به خط افق بیشتر می شود و این تغییر زاویه موجب تغییراتی در ساختار جریان با زبری نسبی متوسط می گردد که اثر خود را در معادله لگاریتمی بر تغییرات ثابت های این معادله می گذارد. با این وجود این نظریه تنها در حد حدس و گمان می باشد و باید صحت آن در مطالعات آتی مورد بررسی و مطالعه دقیق قرار گیرد.

در شکل ۹ نتایج برازش رابطه ی خطی (معادله ۲) به اطلاعات آزمایشگاهی نمایش داده شده است. به کمک برازش خط به اطلاعات آزمایشگاهی در این رویکرد می توان ثابت معادله (C') و مقیاس مشخصه ی دینامیکی^۱ (l_c) (رجوع شود به معادله (۲)) جریان را

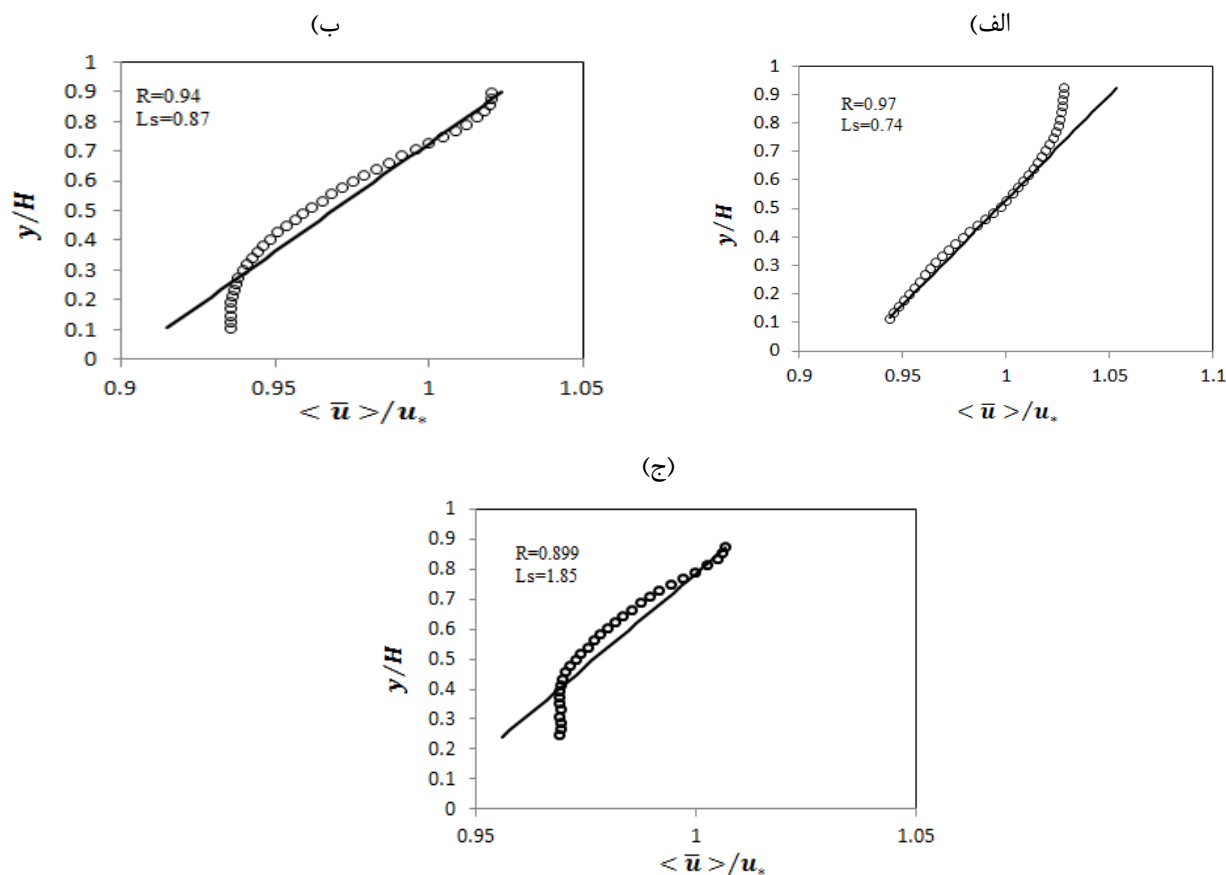


شکل ۹. برازش پروفیل خطی به نتایج برداشتهای آزمایشگاهی الف) رویکرد ۱ ب) Approach 2 ج) رویکرد ۳
Fig. 9. Linear profile regression of experimental data a) Approach 1 b) Approach 2 c) Approach 3

که هر ۳ دیدگاه پروفیل لگاریتمی با پارامترهای متغیر، پروفیل خطی و پروفیل لایه اختلاطی می توانند با ضریب همبستگی بالا به اطلاعات آزمایشگاهی مشاهده شده در این مطالعه برازش داده شوند. با این وجود ابعاد بسیار بزرگ و نامعقول به دست آمده برای اندازه گردابه های تشکیلی در لایه اختلاطی صحت کاربرد این دیدگاه را برای این شرایط دشوار می سازد. از طرف مقابل، عدم وجود دلیل علمی کافی و محکم در به کار بردن معادله خطی (معادله (۲)) برای شرایط جریان با زبری نسبی کم و متوسط مانند شرایط آزمایشگاهی در مطالعه حاضر، کاربرد این پروفیل را با چالش جدی مواجه می سازد. هرچند که این رابطه را در شرایطی که زبری نسبی افزایش می یابد و اثر نیروی درگ ناشی از اجزای زبر بستر در تمام عمق جریان قابل احساس است، می توان به کار برد. با توجه به بررسی های صورت گرفته در این مطالعه می توان نتیجه گیری نمود که معادله لگاریتمی با پارامترهای متغیر (یعنی ثابت انتگرال گیری و

رویکرد، مقدار طول لایه ی اختلاطی بدست آمده از بهینه سازی از عمق جریان بیشتر می باشد که از نظر فیزیکی چنین مشاهده ای غیرممکن می باشد. مطالعه های پیشین نشان داده است که طول لایه ی اختلاطی (محدوده ای از جریان بین دو لایه که اختلاط در آن صورت می گیرد)، در محدوده ی طول اجزای زبر بستر می باشد و اختلاط دو لایه در این لایه امکان پذیر است و نمی توان انتظار داشت تا نقاطی که دور از این ناحیه قرار دارند (مثلاً در نزدیکی سطح آب) اختلاط صورت پذیرد. براین اساس، هیچ گونه توجیه علمی برای مشاهده چنین مقادیر در حد عمق جریان و یا بیشتر برای طول لایه اختلاطی در نظر گرفت. بر این اساس می توان عنوان نمود که با توجه به مقادیر نامناسب به دست آمده برای طول لایه اختلاطی برازش معادله لایه اختلاطی به اطلاعات آزمایشگاهی این نوع پروفیل همانند معادله خطی (معادله (۲)) برای شرایط هیدرولیکی مطالعه حاضر مناسب نمی باشد.

بررسی های صورت گرفته بر روی نتایج آزمایشگاهی نشان داد



شکل ۱۰. برازش پروفیل لایه اختلاطی به نتایج برداشتهای آزمایشگاهی الف) رویکرد ۱ ب) رویکرد ۲ ج) رویکرد ۳
Fig. 10. Linear layer profile regression of experimental data a) Approach 1 b) Approach 2 c) Approach 3

تغییرات قابل توجهی از خود نشان می دهند که این تغییرات در نقاط دور از بستر به طور محسوسی کاهش می یابند. از این مشاهده می توان نتیجه گرفت که استفاده از متوسط گیری دوگانه که در آن تحلیل ها بر مقادیر متوسط گیری شده در زمان و مکان انجام می شود، بهترین رویکرد برای مطالعه جریان در بسترهای زبر است. قیاس پروفیل های متوسط گیری شده زمانی-مکانی و مکانی-زمانی سرعت نشان داد که تقدم و تأخر متوسط گیری اثری در مقادیر متوسط گیری دوگانه سرعت نخواهد داشت. همچنین بررسی های صورت گرفته بر پروفیل سرعت متوسط گیری شده دوگانه نشان داد که از بین رویکردهای مطرح شده در مطالعه پروفیل جریان در بسترهای با زبری نسبی متوسط، رویکرد پروفیل معادله لگاریتمی با پارامترهای متغیر نسبت به زبری نسبی بهترین رویکرد می باشد. بر این اساس پیشنهاد گردید که مطالعه های آتی در ارتباط با این نوع جریان بر استفاده از پروفیل لگاریتمی متمرکز گردد و به طور خاص

ون-کار) بهترین دیدگاه در مطالعه این نوع جریان می باشد و توصیه می شود در مطالعه های آتی براساس این رویکرد پروفیل جریان با زبری نسبی متوسط مورد مطالعه قرار گیرد. در این مطالعه ها هدف اصلی باید در تعیین نحوه تغییرات عدد ون-کارمن نسبت به زبری قرار گیرد. همچنین توصیه می گردد در پژوهش های آتی با استفاده از مطالعه های ساختار جریان آشفته، علت فیزیکی و تئوری تغییر عدد ون-کارمن نسبت به زبری نسبی تعیین گردد.

۴-نتیجه گیری

در مطالعه حاضر به بررسی سرعت جریان در یک کانال روباز با زبری نسبی متوسط به کمک روش متوسط گیری دوگانه پرداخته شده است. به این منظور، سرعت لحظه ای به روش سرعت سنجی تصویری ذرات اندازه گیری شد. بررسی های انجام شده در این مطالعه نشان داد که مؤلفه های سرعت در نزدیکی بستر در مکان های مختلف

نحوه تغییرات پارامترهای معادله لگاریتمی نسبت به زبری نسبی و نیز علت این تغییرات تعیین گردد.

b بستر

بالانویس

* شرایط مرجع

فهرست علائم

علائم انگلیسی

H ارتفاع سطح آب (m)

\overline{u} سرعت طولی متوسط گیری دوگانه (m/s)

u^* سرعت برشی (m/s)

R شعاع هیدرولیکی

Fr عدد فرود

Re عدد رینولدز

Q دبی (lit/s)

L طول (m)

S شیب

D قطر (m)

y فاصله از سطح آب (m)

f نیرو (N)

A تابع بستر

علائم یونانی

ρ چگالی (kg/m^3)

Δ زبری

K ثابت ون کارمن

زیرنویس

FD توسعه یافتگی

S لایه ی اختلاطی

مراجع

- [1] I. Nezu and H. Nakagawa, "Turbulence in open-channel flows," 1993.
- [2] V. Nikora, D. Goring, and I. McEwan, "Spatially averaged open-channel flow over rough bed," J. Hydraul. Eng., vol. 127, pp. 123–133, 2001.
- [3] J. Jimenez, "Turbulent flows over rough walls," Annu. Rev. Fluid Mech., vol. 36, pp. 173–196, 2004.
- [4] C. Manes, D. Pokrajac, and I. McEwan, "Double-averaged open-channel flows with small relative submergence," J. Hydraul. Eng., vol. 133, pp. 896–904, 2007.
- [5] S. H. Mohajeri, S. Grizzi, and M. Righetti, "The structure of gravel-bed flow with intermediate submergence: A laboratory study," Water Resour., vol. 51, no. 11, pp. 9232–9255, 2015.
- [6] K. Koll, "Parameterisation of the vertical velocity profile in the wall region over rough surfaces," River flow Conference, pp. 0–415–40815–6, 2006.
- [7] J. Cooper and S. Tait, "The spatial organisation of time-averaged streamwise velocity and its correlation with the surface topography of water-worked gravel beds," Acta Geophys., vol. 56, pp. 614–641, 2008.
- [8] M. Bayazit, "Free surface flow in a channel of large relative roughness," J. Hydraul. Res., pp. 115–126, 1976.
- [9] T. Buffin-Bélanger and A. Roy, "Effects of a pebble cluster on the turbulent structure of a depth-limited flow in a gravel-bed river," Geomorphology, vol. 25, pp. 249–267, 1998.
- [10] V. Nikora, "Hydrodynamics of gravel-bed rivers: Scale issues, in Gravel Bed Rivers VI: From Process

- universality of von Kármán's κ in fluvial streams," *J. Hydraul. Res.*, vol. 48, no. 5, pp. 658–663, Oct. 2010.
- [23] V. Nikora, K. Koll, I. McEwan, and S. McLean, "Velocity distribution in the roughness layer of rough-bed flows," *J. Hydraul.*, vol. 30, pp. 1036–1042, 2004.
- [24] G. Katul, P. Wiberg, and J. Albertson, "A mixing layer theory for flow resistance in shallow streams," *Water Resour.*, vol. 38, no. 11, p. 1250, 2002.
- [25] M. Hosseini, J. Abrishamai, "Open-channel hydraulics", Imam Reza university Publication (36th Edition), 1394 (in Persian).
- [26] M. Raffel, C. Willert, S. Wereley, and J. Kompenhans, *Particle image velocimetry: a practical guide*. A Practical Guide Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [27] M. Detert, "Hydrodynamic processes at the water-sediment interface of streambeds," Univ. of Karlsruhe, Germany, 2008.
- [28] W. Thielicke and E. Stamhuis, "PIVlab—towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB," *J. Open Res. Softw.*, vol. 2, no. 1, p. e30, 2014.
- [29] M. Detert, V. Nikora, and G. Jirka, "Synoptic velocity and pressure fields at the water–sediment interface of streambeds," *J. Fluid Mech.*, vol. 660, pp. 55–86, 2010.
- [30] J. Westerweel and F. Scarano, "Universal outlier detection for PIV data," *Exp. Fluids*, vol. 39, pp. 1096–1100, 2005.
- [31] A. Prasad, R. Adrian, C. Landreth, and P. Offutt, "Effect of resolution on the speed and accuracy of particle image velocimetry interrogation," *Exp. Fluids*, vol. 13, pp. 105–116, 1992.
- [32] V. Nikora, K. Koll, S. McLean, A. Dittrich, "Zero-plane displacement for rough-bed open-channel flows," *Hydraul. River Flow Conference*, 2002.
- [33] V. Nikora, I. McEwan, S. McLean, and S. Coleman, "Double-averaging concept for rough-bed open-channel and overland flows: Theoretical Understanding to River Restoration," 2008.
- [11] S. McLean and V. Nikora, "Characteristics of turbulent unidirectional flow over rough beds: Double-averaging perspective with particular focus on sand dunes and gravel beds," *Water Resour. Res.*, vol. 42, p. W10409, 2006.
- [12] J. Aberle, K. Koll, and A. Dittrich, "Form induced stresses over rough gravel-beds," *Acta Geophys.*, vol. 55, pp. 23–32, 2008.
- [13] J. Finnigan, "Turbulence in plant canopies," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 32, pp. 519–571, 2000.
- [14] V. Nikora and P. Rowiński, "Rough-bed flows in geophysical, environmental, and engineering systems: Double-Averaging Approach and its applications," *Acta Geophys.*, vol. 56,3, pp. 529–533, 2008.
- [15] S. Whitaker, *The method of volume averaging*. Netherland: Springer, 1999.
- [16] J. Smith and S. McLean, "Spatially averaged flow over a wavy surface," *J. Geophys. Res.*, vol. 83, no. 12, pp. 1735–1746, 1977.
- [17] T. Hoover and J. Ackerman, "Near-bed hydrodynamic measurements above boulders in shallow torrential streams: Implications for stream biota," *J. Environ.*, vol. 3, pp. 365–378, 2004.
- [18] S. Mohajeri, M. Righetti, and G. Wharton, "On the structure of turbulent gravel bed flow: Implications for sediment transport," *Adv. Water*, vol. 92, pp. 90–104, 2016.
- [19] R. Hardy, J. Best, and S. Lane, "Coherent flow structures in a depth-limited flow over a gravel surface: The role of near-bed turbulence and influence of Reynolds number," *J. Geophys.*, 2009.
- [20] H. Nepf, "Hydrodynamics of vegetated channels," *J. Hydraul. Res.*, vol. 50, no. 3, pp. 262–279, 2012.
- [21] M. Franca, R. Ferreira, and U. Lemmin, "Parameterization of the logarithmic layer of double-averaged streamwise velocity profiles in gravel-bed river flows," *Adv. Water Resour.*, vol. 31, pp. 915–925, 2008.
- [22] R. Gaudio, A. Miglio, and S. Dey, "Non-

- turbulence.” *Physics of Fluids*, Vol. 19, No. 4, 41301, 2007.
- [۳۶] ل. احمدی پرگو، آموزش گام به گام اکسل ۲۰۱۶، انتشارات دیباگران تهران، ۱۳۹۵.
- [36] K. Murty, “Linear programming”. John Wiley & Sons Inc.1, 2000.
- background,” *J. Hydraul.*, vol. 133, pp. 884–895, 2007.
- [34] S. Bomminayuni, T. Stoesser, “Turbulence Statistics in an Open-Channel Flow over a Rough Bed“, *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 137, No. 11, pp. 1347-1358.
- [35] R. Adrian, “Hairpin vortex organization in wall

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Kh. Kashmari, S.H. Mohajeri, A.R. Zarrati, M. Azarpira, Characterization of Double-Averaged Velocity Profile in an Open-Channel With Intermediate Relative Roughness, Amirkabir J. Civil Eng., 52(1) (2020) 155-170.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14673.5714](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14673.5714)

