

تأثیر بار معلق رسوب بر ضریب زبری و شدت آشفتگی جریان (مطالعه موردی: رودخانه‌های هراز، رستم‌آباد و بهشت‌آباد)

حسین افضل‌مهر، ساناز هادیان، احسان شهیری طبرستانی و میثم محمدی

دوره ۶، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۹، صفحات ۴۷۲ - ۴۵۹

Vol. 6(4), Winter 2020, 459 – 472

DOI: 10.22034/jewe.2020.243225.1403

**Influence of Suspended Sediment Load on
Roughness Coefficient and Intensity of Flow
Turbulence (Case Study: Haraz, Rostamabad
and Beheshtabad Rivers)**

Afzalimehr H., Hadian S., Shahiri Tabarestani
E. and Mohammadi M.



www.jewe.ir

OPEN ACCESS

ارجاع به این مقاله:

افضل‌مهر ح.، هادیان س.، شهیری طبرستانی ا. و محمدی م. (۱۳۹۹). تأثیر بار معلق رسوب بر ضریب زبری و شدت آشفتگی جریان (مطالعه موردی: رودخانه‌های هراز، رستم‌آباد و بهشت‌آباد). محیط‌زیست و مهندسی آب، دوره ۶، شماره ۴، صفحات: ۴۷۲-۴۵۹.

Citing this paper: Afzalimehr H., Hadian S., Shahiri Tabarestani E. and Mohammadi M. (2020). Influence of suspended sediment load on roughness coefficient and intensity of flow turbulence (case study: Haraz, Rostamabad and Beheshtabad Rivers). Environ. Water Eng., 6(4), 459–472. DOI: 10.22034/jewe.2020.243225.1403.

تأثیر بار معلق رسوب بر ضریب زبری و شدت آشفستگی جریان (مطالعه موردی: رودخانه- های هراز، رستم آباد و بهشت آباد)

حسین افضلی مهر^۱، ساناز هادیان^{۲*}، احسان شهیری طبرستانی^۳ و میثم محمدی^۳

استاد، گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
 دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
 کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

*نویسنده مسئول: sanaz_hadian@civileng.iust.ac.ir

مقاله اصلی

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۹/۰۷/۱۵]

تاریخ بازنگری: [۱۳۹۹/۰۷/۱۲]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۹/۰۵/۲۰]

چکیده

برآورد اثر انتقال رسوب به‌ویژه بار معلق در برنامه‌ریزی و مدیریت رودخانه‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار است. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر بار معلق رسوب در برآورد ضریب زبری و شدت آشفستگی جریان در رودخانه‌های هراز، رستم‌آباد و بهشت‌آباد بود. به‌منظور درک بهتر این روابط، اقدام به برداشت مشخصات هندسی مقاطع، اندازه‌گیری سرعت جریان و بار معلق در مقاطع گوناگون این رودخانه‌ها شد. سپس تنش برشی، ضریب مانینگ و ضریب ون کارمن با استفاده از روابطی در هر مقطع محاسبه شد. همچنین با اندازه‌گیری نوسانات سرعت، شدت آشفستگی تعیین شد. بررسی تأثیر بار معلق بر ضریب زبری و ضریب ون کارمن نشان داد که در اکثر مقاطع در اثر وجود بار معلق، ضریب زبری و ضریب ون کارمن کاهش یافته است. در رودخانه‌های هراز، رستم‌آباد و بهشت‌آباد نسبت ضریب زبری در شرایط وجود بار معلق به ضریب زبری بدون وجود بار معلق به‌طور میانگین به‌ترتیب ۰/۹، ۰/۹۴ و ۰/۶ به‌دست آمد. نتایج این پژوهش نشان داد که توزیع شدت آشفستگی مستقل از دبی جریان بوده و همواره شکل حاصل برای این توزیع همگرا است و حداکثر مقدار آن نه در بستر بلکه در بالای بستر رخ داده است. هم‌چنین توزیع شدت آشفستگی در حضور بار معلق در رودخانه‌های شنی-قلوه‌سنگی به‌صورت همگرا بوده و بر اساس معادله لایه‌مرزی قابل تحلیل است. با انجام آنالیز کوادرنانت پیشامدهای غالب در سه عمق جریان بررسی شدند. در نواحی نزدیک بستر پدیده‌های غالب به ترتیب درونی، بیرونی و پرتاب بودند و سهم پیشامد جاروب در این بخش قابل چشم‌پوشی بود.

واژه‌های کلیدی: آنالیز کوادرنانت؛ بار معلق؛ شدت آشفستگی؛ ضریب زبری؛ ضریب ون کارمن.

۱- مقدمه

بررسی تعامل بین بار معلق و آشفتگی در حضور شکل‌های بستر متحرک پرداختند. آن‌ها با انجام آزمایش در کانال با بستر ماسه‌ای دریافتند که مقدار و اندازه ذرات معلق، اثر قابل‌توجهی بر میزان تنش‌های رینولدز ندارد. Shafaei et al. (2019) به بررسی اثر تراکم پوشش گیاهی بر ضریب زبری مانینگ در کانال آزمایشگاهی پرداختند و نشان دادند که با افزایش تراکم پوشش گیاهی ضریب زبری افزایش یافته است.

ذرات معلق رسوب ساختار جریان آشفته را تعدیل می‌کنند. بر این اساس بررسی این تعامل از دیدگاه هیدرودینامیک رسوب از اهمیت زیادی برخوردار است. همچنان که Dey (2014) اشاره کرده است، تناقضات زیادی در مورد اثر شدت آشفتگی بر انتقال رسوب بار معلق وجود دارد و مطالعات حاضر قابل‌تعمیم و استنتاج نیست. همچنین Lyn (1991) نشان داد که شدت آشفتگی فقط در نزدیکی بستر تحت تأثیر بار معلق رسوب می‌باشد. هر نوع تغییر در توزیع شدت آشفتگی مربوط به میزان تغییر در ساختار جریان آشفته است که از طریق مطالعه پیشامدهای آنالیز کوادرات بررسی می‌شود (Dey 2014). در واقع بررسی ساختارهای پیوسته جریان آشفته از طریق آنالیز کوادرات صورت می‌گیرد. مطالعات انجام‌شده در این زمینه نشان می‌دهد که این پیشامدها توزیع متفاوتی از پدیده‌های غالب در مقایسه با آب زلال نشان می‌دهند (Fazel Najafabadi et al. 2018). اغلب مطالعات، پیشامد غالب بار معلق را پرتاب معرفی می‌کنند اما هنوز تأییدی بر غالب بودن این پیشامد در مراجع ارائه نشده است. به‌عنوان نمونه Tang et al. (2019) به بررسی اثر پیشامدهای مختلف آشفتگی بر رسوب بار معلق پرداختند و پیشامدهای جاروب^۱ و پرتاب^۲ را منشأ اصلی تعلیق ذرات رسوب گزارش کردند در حالی که دو پدیده دیگر درونی^۳ و بیرونی^۴ سهم کم‌تری را دارند.

به‌دلیل طبیعت نیمه‌تجربی مطالعات انتقال رسوب لازم است

هیدرولیک رسوب و فرسایش، دانش مطالعه چگونگی حرکت، فرسایش و رسوب‌گذاری مواد رسوبی در آبراهه‌ها است. برآورد میزان بار معلق که یک جریان مشخص قادر به حمل آن است یکی از موضوعات اصلی پژوهش‌های رسوب است که در بسیاری از پروژه‌های مهندسی رودخانه همچون انتقال رسوب، ریخت‌شناسی و تغییرات بستر رودخانه، مطالعات سدها و طراحی و نگهداری کانال‌های پایدار حائز اهمیت است (Shafaei Bajestan 2006). از جمله عوامل مؤثر در تعلیق ذرات رسوب، شدت آشفتگی جریان است که طی آن ذرات رسوب از بستر جدا شده و ضمن اختلاط با آب همراه جریان منتقل می‌شوند. به‌دلیل پیچیدگی فرایند انتقال رسوب، مطالعه آن در تعامل با جریان آشفته و برآورد ضریب زبری به‌طریق نیمه‌تجربی صورت می‌گیرد. به‌عبارت دیگر برای مطالعه نحوه توزیع سرعت یا تنش رینولدز نیاز به کار میدانی است و برای تحلیل آن از برخی قوانین شناخته شده سیالات استفاده می‌شود.

از جمله مطالعاتی که توسط پیشگامان در زمینه اثر بار معلق بر ضریب زبری صورت گرفته است می‌توان به تحقیقات Khullar et al. (1991) و Lyn (1991)، Itakura and Kishi (1980) و al. (2002) اشاره نمود. این تحقیقات نشان می‌دهند که اتفاق نظر قابل‌قبولی بین محققین در مورد اثر بار معلق بر ضریب زبری وجود ندارد. در برخی از آن‌ها بار معلق باعث کاهش ضریب زبری و در برخی دیگر باعث افزایش آن می‌گردد که این موضوع به شرایط جریان، میزان غلظت بار معلق و افزایش یا کاهش اندازه زبری بستر بستگی دارد. Lyn (1991) ضمن مطالعه تعامل ضریب زبری با رسوب معلق نتیجه گرفت که ضریب زبری رابطه مستقیم با رسوب معلق دارد. Sumer (2003) نشان داد که آهنگ انتقال بار معلق با افزایش شدت آشفتگی در جهت جریان (URMS) به‌شدت افزایش می‌یابد، طوری که با افزایش ۲۰٪ شدت آشفتگی بار رسوب تا ۶ برابر افزایش می‌یابد. (Wren et al. 2013) به

³Inward⁴Outward¹Sweep²Ejection

چهارمحال و بختیاری در منطقه بهشت آباد و رستم آباد قرار دارند. مهم ترین معیار در انتخاب بازه های مورد مطالعه، ایمنی افراد و سپس سلامت کارایی تجهیزات بوده است، به گونه ای که حداکثر عمق آب ۵۰ cm بوده و سرعت آب به گونه ای بود که افراد ایمنی خود را هنگام کار در رودخانه از دست ندهند. هر یک از بازه های انتخابی در این سه رودخانه حدود ۳۰ m و به صورت مستقیم بوده و هیچ مانع خارجی (اعم از تنه درخت یا پایه پل) در مسیر جریان قرار نداشت. جریان در این رودخانه ها هنگام اندازه گیری دائمی و غیریکنواخت بود. موقعیت جغرافیایی هر سه رودخانه در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی رودخانه های الف) هرآز، ب) رستم-آباد، ج) بهشت آباد

Fig. 1 Geographic location of a) Haraz b) Rostam Abad c) Behesht Abad Rivers

۲-۲- وسایل مورد استفاده

برای برداشت سرعت در رودخانه هرآز و رستم آباد از دستگاه مولینه با قطر پروانه ۴۸ mm استفاده شد. در هر مقطع عرضی بین ۴ تا ۸ نیمرخ به وسیله مولینه برداشت شد و به منظور کاهش خطای اندازه گیری، سرعت به مدت ۵۰ s و در هر نقطه با ۳ تکرار انجام شد. اندازه گیری سرعت در رودخانه بهشت آباد با استفاده از دستگاه سرعت سنج صوتی^۱

با اندازه گیری های میدانی و بررسی ویژگی های ریخت شناسی و هیدرودینامیکی جریان در رودخانه ها تصویر بهتری از تعامل بار معلق با ساختار جریان آشفته در برآورد ضریب زبری ارائه نمود (Fazel Najafabadi and Afzalimehr 2020). اگرچه در مورد ذرات ریز رسوب مانند رس و ماسه حدود چند دهه مطالعه در مراجع در دسترس می باشد، اما رابطه ضریب زبری و رسوب بار معلق به میزان کم در رودخانه های کوهستانی با بستر شن و قلوه سنگ با در نظر گرفتن توزیع شدت آشفستگی مورد توجه و گزارش واقع شده است. از دلایل عمده برای عدم مطالعات در این زمینه می توان در دسترس نبودن ابزارهای سه بعدی اندازه گیری آشفستگی در رودخانه ها و خطرات بسیار ناشی از محیط اندازه گیری جریان و عدم دسترسی به برق در مدت برداشت داده ها در رودخانه های کوهستانی خارج شهر اشاره کرد. به علاوه پیچیدگی شکل های بستر در رودخانه های شنی و قلوه سنگی برخلاف رودخانه های ماسه ای که در آن تلماسه های مثلثی شکل مشاهده می شود، کار را برای محققین بسیار دشوار کرده است. بر این اساس اهداف پژوهش حاضر بررسی رابطه بار معلق با ضریب زبری، برآورد ثابت ون کارمن در سه رودخانه مورد مطالعه و تعیین چگونگی ساختارهای پیوسته جریان آشفته در عمق های متفاوت در حضور بار معلق می باشد.

۲- مواد و روش ها

داده های جریان، رسوب و ریخت شناسی بستر در این پژوهش از طریق عملیات میدانی در سه رودخانه هرآز، بهشت آباد و رستم آباد اندازه گیری شدند. در این بخش ابتدا نحوه اندازه گیری داده ها و وسایل مورد استفاده شرح داده می شود و سپس روابط مورد استفاده در تحلیل و کاربرد آن ها توضیح داده می شود.

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

عملیات صحرایی جمع آوری داده ها در دو استان مازندران و چهارمحال و بختیاری انجام شده است. بازه مورد بررسی در استان مازندران در نزدیکی روستای پلور از توابع شهرستان آمل و در رودخانه هرآز قرار دارد و دو بازه دیگر در استان

¹Acoustic Doppler Velocimeter

بستر آن، محاسبه شیب طولی رودخانه و ترسیم مقاطع عرضی برای تعیین محیط خیس شده و مساحت هر مقطع استفاده شد.

۲-۳- برداشت داده‌ها

۲-۳-۱- داده‌های نقشه برداری

به منظور نقشه برداری رودخانه، ابتدا بازه مورد نظر را به وسیله طناب شبکه بندی کرده و سپس نقشه برداری توپوگرافی بستر با دوربین نقشه برداری صورت گرفت. برای رسم نیمرخ سطح آب در همان نقطه های نقشه برداری شده، عمق آب به وسیله یک میله مدرج قرائت شده است. مقاطع مورد بررسی در رودخانه‌ها به ترتیب در بازه هراز H1 تا H7، در بازه بهشت آباد B1 و B2 و در بازه رستم آباد R1 تا R3 می باشد.

۲-۳-۲- تعیین سرعت متوسط و دبی

همان طور که اشاره شد، داده های سرعت توسط دستگاه های مولینه و سرعت سنج صوتی برداشت و محاسبه شدند. برای برآورد سرعت متوسط معادل و دبی از تمامی سرعت های نقطه ای در یک مقطع عرضی استفاده گردید تا دقت برآورد افزایش یابد. از رابطه (۱) جهت محاسبه دبی و رابطه (۲) جهت محاسبه سرعت متوسط شد.

$$Q = \sum_{i=1}^n \bar{U}_i A_i \quad (1)$$

$$U_{eq} = \frac{Q}{A} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \bar{U}_i A_i \quad (2)$$

برای تحلیل نیمرخ های حاصل از دستگاه ADV و محاسبه مقادیر سرعت متوسط و شدت آشفتگی از نرم افزار WinADV استفاده شد.

۲-۳-۳- داده های دانه بندی بستر

برای دانه بندی ذرات بستر، با انتخاب یک سطح m^2 $0/5 \times 0/5$ در بستر رودخانه بدون دیدن ذرات، ۱۰۰ عدد شن برداشته شد و سپس از طریق کولیس سه بعد آن اندازه گیری گردید تا بر اساس منحنی دانه بندی، قطر میانه

(ADV) ساخت شرکت نورتک^۱ و به صورت نقطه ای صورت پذیرفت. لازم به ذکر است که در دو رودخانه هراز و رستم آباد به دلیل سرعت بالای آب، خروشان بودن رودخانه و وجود ذرات رسوب در حد چند cm در بعضی قسمت ها امکان آسیب دیدن به دستگاه ADV وجود داشت. Kabiri et al. (2017) با مقایسه اختلاف داده های حاصل از داده برداری ۱۲۰ و ۳۰۰ s نشان دادند که برداشت داده ها به مدت ۱۲۰ s با این دستگاه از دقت کافی برخوردار است. در این پژوهش مدت زمان داده برداری در هر نقطه از نیمرخ سرعت ۱۲۰ s بوده است. همچنین فرکانس اندازه گیری ۲۰۰ Hz انتخاب شد تا پس از فیلتر کردن داده های نامناسب، تعداد کافی داده برای محاسبه سرعت و شدت آشفتگی در دسترس باشد. فرکانس مناسب داده ها از طریق فرکانس Nyquist تعیین می شود که حدود آن ۲۵ Hz در رودخانه های شنی است. بنابراین فرکانس ۲۰۰ Hz انتخابی به خوبی پاسخ گو است. در بازه های مورد مطالعه با استفاده از ADV از ۱۵ نقطه در هر نیمرخ سرعت برداشت شد.

در این پژوهش دستگاه نمونه بردار بار معلق پیوسته- عمقی از نوع US DH-48 مورد استفاده قرار گرفت. برای نمونه برداری، دستگاه سنجش بار معلق را به طور قائم در خلاف جهت جریان رودخانه قرار داده و سپس شیر هوا بروی آن را باز می کنند تا مخزن دستگاه پر شود. با توجه به امکانات و شرایط برداشت داده ها، نمونه گیری ها صورت گرفتند. ورود به رودخانه در اسفند و فروردین ماه که زمان حضور بار معلق است علاوه بر سردی آب توأم با خطرات جانی بود. لازم به ذکر است که بار معلق در ماه های اسفند و فروردین در اغلب رودخانه ها وجود دارد، هر چند قابل توجه بودن آن موضوع دیگری است. در واقع بار معلق موجود در رودخانه های مورد مطالعه و در مقاطع مورد بررسی به میزانی است که جریانی متفاوت از آب زلال ایجاد می کرد.

برای برداشت نقاط مختلف بستر رودخانه، عملیات نقشه برداری انجام گردید. از داده های این عملیات برای ترسیم خطوط توپوگرافی بستر رودخانه، ترسیم شکل های

²Nortek

آن نیمرخ سرعت تحت تأثیر لزجت باشد. حال اگر ذره ماسه یا قلوه‌سنگ باشد ممکن است از بستر تا سطح آب، نیمرخ سرعت تغییر کند بنابراین برای یک عمق واحد، در هر دو نیمرخ سرعت تغییر می‌نماید (Afzalimehr et al. 2019b, 2019c; Afzalimehr et al. 2017; Fazlollahi et al. 2015) این روش از مشخصات لایه‌مرزی و سرعت حداکثر به‌صورت رابطه (۳) برای تعیین سرعت برشی استفاده می‌کند.

$$U_* = \frac{(\delta_* - \theta) U_{\max}}{4/4\delta_*} \quad (3)$$

که در آن δ_* و θ به ترتیب ضخامت جابه‌جایی لایه‌مرزی و ضخامت اندازه حرکت لایه‌مرزی هستند و از روابط (۴) و (۵) به دست می‌آیند.

$$\delta_* = \int_0^h \left(1 - \left(\frac{U}{U_{\max}}\right)\right) dy \quad (4)$$

$$\theta = \int_0^h \left(\frac{U}{U_{\max}}\right) \left(1 - \left(\frac{U}{U_{\max}}\right)\right) dy \quad (5)$$

پس از محاسبه سرعت برشی در هر محور رودخانه می‌توان تنش برشی جریان را از رابطه (۶) تعیین نمود.

$$\tau_0 = \rho U_*^2 \quad (6)$$

که، U_* سرعت برشی جریان، ρ چگالی سیال (آب) و τ_0 تنش برشی بستر می‌باشند.

۲-۵- محاسبه ضریب زبری و ضریب ون کارمن

با داشتن سرعت متوسط مقاطع و داده‌های سطح مقطع و محیط خیس‌شده حاصل از نقشه برداری و با استفاده از رابطه مانینگ، ضریب زبری مانینگ (n) محاسبه می‌شود. برای محاسبه ضریب ون کارمن از یک رگرسیون خطی بین داده‌های سرعت نقطه‌ای نزدیک بستر با عمق نظیر جریان مطابق رابطه (۷) استفاده می‌شود:

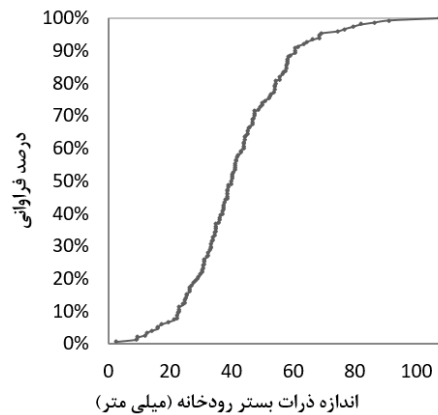
$$U = \alpha \ln\left(\frac{y}{K_s}\right) + C \quad (7)$$

که در آن α ضریب زاویه خط رگرسیون و C ثابت آن است. از طرف دیگر معادله لگاریتمی به‌صورت رابطه (۸) است.

ذرات رسوب بستر تعیین گردد. منحنی دانه‌بندی ذرات بستر رودخانه بهشت‌آباد در شکل (۲) نشان داده شده است.

۲-۳-۴- برداشت داده‌های بار معلق رسوب

برای برداشت رسوبات بار معلق، هر یک از بازه‌های مورد نظر را به چند مقطع تقسیم کرده و در هر مقطع یک سری نقاط تصادفی در راستای عرضی انتخاب شدند. سپس در هر راستای عمقی در یک مقطع عرضی در چند عمق از بستر نمونه‌برداری بار معلق صورت گرفت و نمونه‌ها در قوطی‌های شماره‌گذاری شده قرار داده شدند. نمونه‌ها پس از جمع‌آوری به آزمایشگاه منتقل شده و پس از عملیات صاف‌سازی برآورد شدند. با کاغذ صافی غلظت رسوب بار معلق محاسبه گردید.



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی ذرات بستر رودخانه بهشت‌آباد

Fig. 2 Grain size distribution at Behesht Abad River bed

۲-۴- تعیین سرعت برشی و تنش برشی جریان

روش‌های گوناگونی برای محاسبه سرعت برشی وجود دارد که از بین آنها، روش مشخصات تئوری لایه‌مرزی (Afzalimehr and Anctil 2000) برای این مطالعه انتخاب گردید. لایه‌مرزی برای شن و قلوه‌سنگ طی $20 < Y \leq 200$ گذشته با موفقیت توسط نویسندگان به کار رفته است که حاصل آن مقالات متعدد در مجلات معتبر جهان می‌باشد (Afzalimehr et al. 2019a, 2019b, 2019c). تنها جایی که کاربرد لایه‌مرزی نقض می‌شود، در بسترهای تخته‌سنگی^۱ است (Afzalimehr et al. 2019b) که اندازه تخته‌سنگ متناسب با عمق جریان است. لایه‌مرزی لایه‌ای است که در

^۱Boulder

شکل ۳- نواحی چهارگانه توالی پیشامدها و خصوصیات نوسانات
Fig. 3 Four different areas of bursting and turbulence fluctuations characteristics (Dey 2014)

۲-۶-۱- آنالیز کوادرنانت

پژوهش‌گران دریافته‌اند که حرکت جریان آشفته به صورت کاملاً نامنظم نبوده بلکه از یک الگوی مشخص پیروی می‌کند. به این حرکات منسجم، فرایند توالی پیشامدها^۱ گفته می‌شود. توالی پیشامدها یک رویداد نیمه‌پریودیک است که به صورت تصادفی در زمان و مکان در یکی از ناحیه‌های چهارگانه نشان داده شده در شکل (۳) رخ می‌دهد.

اطلاع از وضعیت هر رخداد در هر زمان به منظور بررسی رسوب و فرسایش ذرات از اهمیت خاصی برخوردار است. توالی پیشامدها شامل چهار رویداد است که خصوصیات هر کدام با استفاده از ویژگی‌های نوسانات \bar{u} و \bar{w} توصیف می‌شود. پرتاب مربوط به جریان کم‌سرعت سیال از طرف مرز جامد به سمت جریان اصلی است. این پدیده باعث گسترش لایه‌برشی به سمت سطح آب می‌شود. جاروب بیانگر جریان پرسرعت به سمت مرز جامد با جهت رو به پایین است. از این رو این پدیده در نزدیکی بستر باعث ایجاد آشفتگی‌های کوچک مقیاس در لایه‌برشی می‌شود. پیشامد بیرونی یک جریان پرسرعت از سمت بستر به سمت سطح آب و در جهت جریان را نشان می‌دهد. این در حالی است که پیشامد درونی معرف یک جریان کم‌سرعت به سمت بستر رودخانه بوده و در خلاف جهت جریان است. هرکدام از این پدیده‌ها تأثیر متفاوتی بر روی انتقال رسوب دارند. برای متمایز کردن نقش معنی‌دار هر پیشامد در توزیع شدت آشفتگی پارامتری به نام حفره H با رابطه (۱۱) تعریف می‌شود (Afzalimehr et al. 2011).

$$H = \frac{|u'w'|}{(u'u')^{0/5}(w'w')^{0/5}} \quad (11)$$

مقدار $H = 0$ نشان می‌دهد که تمام مقادیر u' و w' در توزیع شدت آشفتگی مشارکت دارند و با افزایش مقدار H رخدادهای ضعیف حذف و رخدادهای قوی باقی می‌مانند. در یک جمع‌بندی کلی آنالیز کوادرنانت در یک نقطه از نیمرخ سرعت

$$U = \frac{U^*}{k} \ln\left(\frac{y}{K_s}\right) + C \quad (8)$$

با مقایسه رابطه‌های (۷) و (۸)، ضریب ون کارمن به صورت رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$k = \frac{U^*}{\alpha} \quad (9)$$

۲-۶-۲- محاسبه نوسانات سرعت و شدت آشفتگی

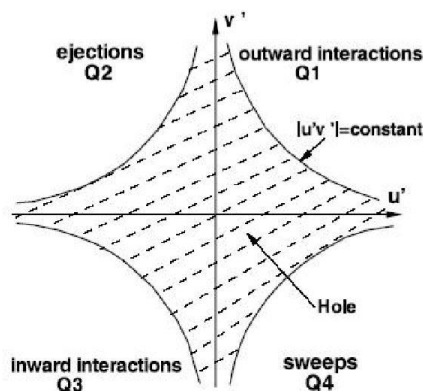
شدت‌های آشفتگی در جهات اصلی (u)، جانبی (v) و قائم (w) به ترتیب به صورت u_{RMS} ، v_{RMS} و w_{RMS} نشان داده شده و مطابق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شوند.

$$u_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum (u_i - \bar{U})^2}{N-1}}$$

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum (v_i - \bar{V})^2}{N-1}} \quad (10)$$

$$w_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum (w_i - \bar{W})^2}{N-1}}$$

که \bar{U} ، \bar{V} و \bar{W} سرعت متوسط در هر نقطه به ترتیب در جهت جریان، جهت عرضی و جهت قائم هستند. N نیز تعداد داده‌های برداشت شده در هر نقطه و در هر جهت است که با توجه به فرکانس ۲۰۰ Hz در این مطالعه برابر ۲۴۰۰۰ می‌باشد.



¹Bursting

مقدار $S_{i,H}$ منفی است.

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- مشخصات هیدرولیکی رودخانه‌ها

این مشخصات شامل پارامترهایی همچون عمق هیدرولیکی، شیب کف، عرض سطح آزاد آب، سطح مقطع، دانه‌بندی کف رودخانه، زبری نسبی و نسبت ظرافت (نسبت عرض بالا به عمق متوسط جریان) در رودخانه می‌باشد که در جدول (۱) ارائه شده‌اند. با توجه به جدول (۱) مشاهده می‌شود که مقادیر عدد فرود محاسبه‌شده در مقاطع مختلف به جز در یک مقطع همگی عددی کوچک‌تر از ۱ هستند که نشان‌دهنده جریان زیر بحرانی در اغلب بازه‌های مورد مطالعه است. همچنین عدد رینولدز در همه مقاطع بیش‌تر از ۲۰۰۰ می‌باشد که معرف آشفتگی بودن جریان در زمان اندازه‌گیری‌ها می‌باشد. همچنین مقادیر سرعت متوسط، دبی جریان، عدد فرود، عدد رینولدز جریان، تنش برشی و پارامتر شیلدز معادل در جدول (۲) ارائه شده است. Church (2006) نشان داد که مقادیر کوچک‌تر زبری نسبی D_{50}/D ، مقادیر بیش‌تر پارامتر شیلدز را به‌دنبال دارد. طبق جدول‌های (۱) و (۲) با مقایسه سه رودخانه، این موضوع تأیید می‌شود. در رودخانه هراز زبری نسبی حدود ۰/۱ و پارامتر شیلدز بین ۰/۲۳ تا ۰/۶ می‌باشد، در حالی که در رودخانه رستم‌آباد زبری نسبی حدود ۰/۱۵ و پارامتر شیلدز بین ۰/۱۸ تا ۰/۲۶ و در بازه بهشت‌آباد مقدار زبری نسبی حدود ۰/۳ و پارامتر شیلدز ۰/۰۳ تا ۰/۰۵ است.

جدول ۱- مشخصات ریخت شناسیکی مقاطع مورد بررسی

Table 1 Morphological characteristics of cross sections

Reach	Cross section	U_{eq} (m/s)	q (m^2/s)	Fr	$Re \times 10^5$	U^* (m/s)	τ_0 (N/m^2)	q_s (m^2/s)	C (g/m^2)	n
Haraz	H ₁	1.49	0.43	0.85	2.85	0.21	0.37	0.43	116.07	0.046
	H ₂	1.24	0.33	0.76	2.19	0.18	0.39	0.33	114.4	0.046
	H ₃	1.13	0.32	0.68	2.11	0.16	0.31	0.32	77.53	0.050
	H ₄	1.33	0.34	0.84	2.12	0.19	0.23	0.34	72.56	0.040
	H ₅	1.53	0.45	1.025	3.00	0.25	0.60	0.45	85.92	0.045
	H ₆	1.41	0.38	0.87	2.53	0.23	0.45	0.38	220.63	0.046
	H ₇	1.21	0.32	0.75	2.13	0.17	0.37	0.32	194.39	0.046
Rostam Abad	R ₁	0.70	0.15	0.48	0.98	0.12	0.21	0.15	25	0.046
	R ₂	0.79	0.18	0.54	1.17	0.11	0.18	0.18	19.53	0.044
	R ₃	0.88	0.17	0.65	1.09	0.14	0.26	0.17	50.20	0.043
Behesht Abad	B ₁	0.36	0.09	0.30	0.34	0.06	0.03	0.09	76.25	0.027
	B ₂	0.68	0.12	0.61	0.57	0.08	0.05	0.12	69.24	0.016

صورت می‌گیرد و امکان آنالیز نوسانات سرعت در قالب پیشامدها با یک اندازه حفره معین و حذف پیشامدهای ضعیف را در آن نقطه فراهم می‌آورد. در هر نقطه سهم مجموع شدت آشفتگی از کوادرنانت i خارج از منطقه حفره هذلولی با اندازه H از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$\langle u'w' \rangle_{i,H} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u'(t)w'(t) \lambda_{i,H}(z,t) dt \quad (12)$$

که در آن t معرف زمان، T کل زمان داده‌برداری، i شماره هر ربع (پیشامد) و $\lambda_{(i,H)}(z,t)$ یک تابع آشکارسازی است. در ارتباط با داده‌های برداشت شده با ADV با توجه به این‌که فاصله زمانی بین داده‌های برداشت شده دقیقاً یکسان نیست و همچنین بعد از حذف داده‌های نامعتبر بین برخی داده‌ها فاصله زمانی ایجاد می‌شود، رابطه (۱۳) را می‌توان برای محاسبه سهم هر پیشامد در کوادرنانت i خارج از منطقه حفره توصیه نمود.

$$\langle u'w' \rangle_{i,H} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{i=n} u'_i w'_i \lambda_{i,H}(z,t) \quad (13)$$

نسبت سهم پیشامد از مجموع پیشامدها با رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$S_{i,H} = \frac{\langle u'w' \rangle_{i,H}}{u'w'} \quad (14)$$

در ربع‌های ۲ و ۴ که به‌ترتیب مربوط به رویدادهای پرتاب و جاروب هستند، مقدار $S_{i,H}$ مثبت و در پیشامدهای ۱ و ۳ که به‌ترتیب مربوط به برهمکنش بیرونی و درونی می‌باشند،

جدول ۲- مشخصات هیدرولیکی مقاطع مورد بررسی

Table 2 Hydraulic characteristics of cross sections

Reach	Cross section	S	D ₅₀ (mm)	D (m)	A (m ²)	T (m)	D ₅₀ /D	T/D	P (m)	R (m)
Haraz	H ₁	0.0029	26	0.29	2.26	7.8	0.09	26.90	7.5	0.301
	H ₂	0.0023	26	0.27	2.14	8	0.097	29.85	7.8	0.274
	H ₃	0.0028	26	0.28	2.42	8.6	0.092	30.25	8.4	0.288
	H ₄	0.0045	26	0.25	2.28	9	0.103	35.57	8.9	0.255
	H ₅	0.003	26	0.27	2.31	8.5	0.095	31.14	8	0.289
	H ₆	0.0029	26	0.27	2.31	8.5	0.096	31.37	8.1	0.284
	H ₇	0.0023	26	0.27	2.40	9	0.12	33.71	8.8	0.272
Rostam Abad	R ₁	0.0027	32	0.21	6.20	29.1	0.151	136.67	29	0.213
	R ₂	0.0027	32	0.22	6.39	28.7	0.144	128.70	28.5	0.224
	R ₃	0.0031	32	0.19	5.19	27.8	0.171	147.87	27.4	0.189
Behesht Abad	B ₁	0.0012	40	0.14	1.44	10	0.28	69.44	9.78	0.147
	B ₂	0.0018	40	0.13	0.98	7.8	0.32	61.90	7.5	0.127

رودخانه صورت گرفته است، هرچند بحث پرشدن خلل و فرج بستر با ذرات ریزدانه و تأثیر آن بر ضریب زبری به‌طور مستقل صورت نگرفته است زیرا این امر بسیار دشوار است و موضوع مطالعه دیگری است.

جدول ۳- مقادیر ضریب زبری و بار معلق در بازه‌های گوناگون

Table 3 Roughness coefficient and suspended load in different reaches

Reach	Cross section	n _s	n ₀	$\frac{n_s}{n_0}$
Haraz	H ₁	0.046	0.051	0.91
	H ₂	0.046	0.051	0.91
	H ₃	0.050	0.051	0.98
	H ₄	0.040	0.049	0.81
	H ₅	0.045	0.050	0.91
	H ₆	0.046	0.050	0.92
	H ₇	0.046	0.050	0.92
Rostam Abad	R ₁	0.046	0.048	0.96
	R ₂	0.044	0.047	0.93
	R ₃	0.043	0.046	0.94
Behesht Abad	B ₁	0.027	0.040	0.66
	B ₂	0.016	0.030	0.53

۳-۳- تأثیر رسوب معلق بر ضریب ون کارمن

ساختار جریان آشفته که رسوبات را با خود حمل می‌کند همواره یک موضوع جالب و بحث‌برانگیز برای دانشمندان در زمینه مهندسی رودخانه بوده است. Graf and Altinakar (1998) از سه روش توزیع تنش رینولدز، سن‌ونانت و لگاریتمی به کمک سرعت‌سنج صوتی ADVP نشان دادند که مقدار

۲-۲- رابطه ضریب زبری با دبی رسوب بار معلق

مقادیر ضریب زبری در دو حالت جریان فاقد رسوب و جریان حاوی رسوب بار معلق محاسبه شدند. در جدول (۳) مقادیر ضریب زبری در شرایط فاقد رسوب با n₀ و در شرایط حاوی رسوبات معلق با n_s نشان داده شده است. بر اساس Graf and Altinakar (1998) میزان غلظت رسوب به سه دسته تقسیم می‌شود: کمتر از ۱٪، بیش‌تر از ۸٪ و بین آن‌ها. در این پژوهش به‌دلیل شرایط رودخانه حد پایین غلظت رسوب بررسی شد. وجود خطا در کارهای صحرائی اجتناب‌ناپذیر است اما با ریسک بالا در شرایط دشوار در اسفند و فروردین ماه اقدام به اندازه‌گیری شد که تا حدی بار معلق برای اندازه‌گیری در رودخانه وجود داشت. خطای اندازه‌گیری از طریق تکرارها و فیلتر کردن داده‌ها با دقت مناسب بررسی و تصحیح گردید.

بر اساس جدول (۳) در اکثر مقاطع ضریب زبری در اثر وجود رسوب بار معلق کاهش پیدا کرده است. طبق پژوهشات Brooks and Vanoni (1957) علت کاهش ضریب زبری، پر شدن خلل و فرج بستر با ذرات ریزدانه بار معلق و در نتیجه کاهش زبری بستر می‌باشد. همچنین با مطالعه تأثیر بار معلق بر ضریب زبری در شرایط بستر صلب و فرسایش‌پذیر مشخص می‌گردد که کاهش ضریب زبری ناشی از تأثیر ذرات رسوب بر آشفتنگی جریان است. در این پژوهش نمونه‌برداری از لایه سطحی بر اساس دستگاه هلی-اسمیت در فاصله اندکی از کف

جدول ۴- مقادیر ثابت ون کارمن در بازه‌های انتخابی
Table 4 Von Karman coefficient in different reaches

Reach	Cross section	κ
Haraz	H_1	0.39
	H_2	0.39
	H_3	0.34
	H_4	0.38
	H_5	0.34
	H_6	0.35
	H_7	0.37
Rostam Abad	R_1	0.44
	R_2	0.47
	R_3	0.46
Behesht Abad	B_1	0.41
	B_2	0.42

۳-۴- تحلیل ساختار جریان آشفته

با بررسی بازه بهشت‌آباد که در آن پارامتر شیلدز دارای مقادیر کوچکی است (۰/۲۷ برای B1 و ۰/۵۴ برای B2) تفاوت ۸۰٪ شدت آشفتگی در فاصله حدود ۵ m در این دو مقطع، حدود ۱۵٪ تفاوت انتقال رسوب را در پی داشته است. هرچند عوامل بسیاری بر روی انتقال رسوب در این دو مقطع تأثیرگذار هستند اما با توجه به فاصله اندک این دو مقطع و همین‌طور انجام اندازه‌گیری‌های مربوط به این دو مقطع در یک روز می‌توان نتیجه گرفت که شدت آشفتگی یکی از عوامل تأثیرگذار بر بار معلق رسوب می‌باشد. در جدول (۵) مقادیر شدت آشفتگی در سه راستای جهت اصلی جریان (u_{RMS})، جهت عرضی (v_{RMS}) و جهت قائم (w_{RMS}) در دو مقطع و چهار محور طولی رودخانه بهشت‌آباد نشان داده شده‌اند. اختلاف در توزیع ذرات رسوب به محیط اندازه‌گیری، تغییرات در عمق و سرعت جریان و عملکرد سرعت‌سنج بستگی دارد. همچنان که یک مشت شن دارای ابعاد هندسی و اندازه یکسان از نظر شکل، تخت و گرد بودن نیستند، تغییر در مقادیر شدت آشفتگی و دبی رسوب در رودخانه‌ها به‌طور کامل از مبانی نظری پیروی نمی‌کنند. شرایط بالادست نقطه اندازه‌گیری در زیر آب، نوع غالب شکل بستر و تغییر دانه‌بندی در مقاطع و تعداد داده‌های هر نیم‌رخ سرعت در محاسبات مؤثر هستند و می‌بایست تفاوت شرایط رودخانه و شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی را حتی در عملکرد ابزار اندازه‌گیری در مطالعات پذیرفت.

ضریب ون کارمن مستقل از روش اندازه‌گیری است. به‌علاوه در کتب مرجع مانند مهندسی رسوب (Vanoni (2006) به‌صراحت به ضریب ون کارمن ۰/۲۱ در حضور بار معلق اشاره شده است و بعدها توسط (Yalin (1972) نیز تأیید شده است. در واقع ضریب ون کارمن به شرایط برداشت داده‌های مورد اندازه‌گیری مانند حضور پوشش گیاهی در حاشیه رودخانه و روی بستر، حضور بار رسوب و شکل بستر بستگی دارد. (Shahmohammadi et al. 2018; Fazel Najafabadi and Afzalimehr 2019; Afzalimehr et al. 2019) در این پژوهش اندازه‌گیری‌ها بر اساس ابزارهای در دسترس، بودجه و میزان ریسک قابل قبول در ایران صورت گرفته و در این راستا تأثیر رسوب معلق بر چگونگی توزیع سرعت مورد بررسی قرار گرفت. ضریب ون کارمن با استفاده از رابطه ۱۰ محاسبه گردید و در جدول (۴) مقادیر این ضریب به‌صورت موضعی و معادل (میانگین هر مقطع) نشان داده شده‌اند. ضریب ون کارمن در اغلب مراجع برای آب زلال معادل ثابت ۰/۴ در نظر گرفته می‌شود، هرچند در این مطالعه به‌دلیل بار رسوبی در جریان آب در بازه هراز کم‌تر از ۰/۴ و در بازه‌های رستم‌آباد و بهشت‌آباد بیش‌تر از ۰/۴ می‌باشد. لازم به‌ذکر است که مقدار بزرگ‌تر از ۰/۴ این ضریب معرف مشارکت بیش‌تر شکل بستر از بار معلق در برآورد آن می‌باشد، همچنان که Emadzadeh et al. (2010) به مقادیر تا ۰/۵۶ برای ثابت ون کارمن (κ) دست یافتند. از طرف دیگر مقادیر کم‌تر از ۰/۴ این ضریب معرف غالب شدن بار معلق نسبت به عوامل مرفولوژیکی مانند شکل بستر در فرآیند انتقال رسوب می‌باشد. در بیش‌تر مقاطع مورد مطالعه در این پژوهش رابطه معکوسی بین تغییرات ضریب ون کارمن و انتقال رسوب بار معلق برقرار است که این نتیجه‌گیری با مطالعات (Vanoni (1946) و (Enistein (1950) مطابقت دارد بطوریکه با افزایش غلظت ذرات رسوب معلق مقدار κ کاهش می‌یابد. همچنین (Nouh (1989) استدلال کرد که تغییر κ در جریان‌های رسوبی به عدد رینولدز جریان بستگی دارد طوری که برای عدد رینولدز کم‌تر از 7×10^5 غلظت رسوب معلق سبب کاهش κ و برای عدد رینولدز بیش‌تر از 7×10^5 غلظت رسوب معلق سبب افزایش κ می‌گردد. عدد رینولدز در بازه‌های مورد بررسی در این مطالعه کم‌تر از 3×10^5 می‌باشد که تأیید کننده نظر (Nouh (1989) می‌باشد.

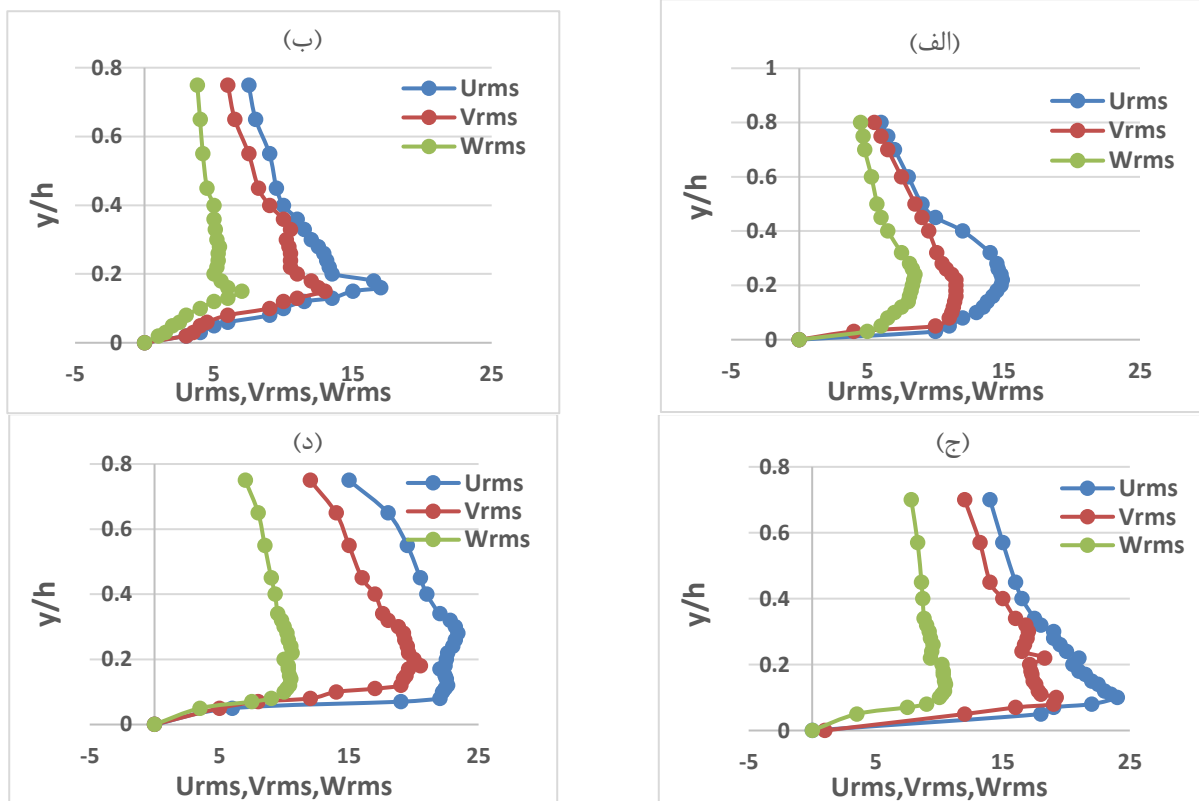
به دلیل افزایش گرادیان فشار طولی در این ناحیه است. با دور شدن از بستر روند کاهشی در این توزیع مشاهده می‌شود. با افزایش دبی مقادیر شدت آشفتگی افزایش می‌یابد، هر چند روند توزیع شدت آشفتگی همچنان همگرا باقی می‌ماند. فرض توزیع لگاریتمی سرعت در تمام عمق جریان منجر به معادله تحلیلی غلظت مواد معلق (Rouse (1937) می‌شود، اگرچه این قانون لزوماً در تمام عمق برقرار نیست و فقط در نزدیکی بستر حاکم است. بر اساس این معادله توزیع بار معلق در نزدیکی بستر بیشترین مقدار را داشته و شکل آن واگرا است. لازم به ذکر است که توزیع غلظت مواد معلق توسط معادله Rouse به‌طور عمده توسط اندازه ذره و سرعت برشی کنترل می‌شود و در ذرات درشت عملاً فقط در نزدیکی بستر ($y/h < 0.1$) تغییرات نشان می‌دهد و در باقی‌مانده عمق جریان ($0.1 < y/h < 1$) به صفر میل می‌کند.

جدول ۵- شدت آشفتگی در چهار محور مختلف مقاطع B1 و B2 در سه جهت

Table 5 Turbulence intensity in four different axis

	U_{RMS}	V_{RMS}	W_{RMS}	q_s
$B_1 - 3.11\text{ m}$	10.28	8.6	5.82	0.099
$B_1 - 5.31\text{ m}$	10.9	8.81	5.44	0.099
$B_2 - 2.22\text{ m}$	17.61	14.93	8.39	0.121
$B_2 - 4.27\text{ m}$	19.68	16.65	9.71	0.121

در شکل (۴) توزیع آشفتگی در سه جهت در عمق جریان برای مقاطع B1 و B2 نشان داده شده است. همانطور که مشخص است الگوی شدت آشفتگی جریان در هر سه راستا توزیع همگرا دارد که مطابق شدت آشفتگی جریان غیریکنواخت بر روی بستر شنی بدون بار معلق رسوب است (Graf and Altinakar 1998). توزیع همگرا قابل تشریح بر اساس معادله رینولدز است که در آن روند توزیع تنش برشی همسو با روند توزیع شدت آشفتگی بوده و روند افزایشی آن در نزدیکی بستر

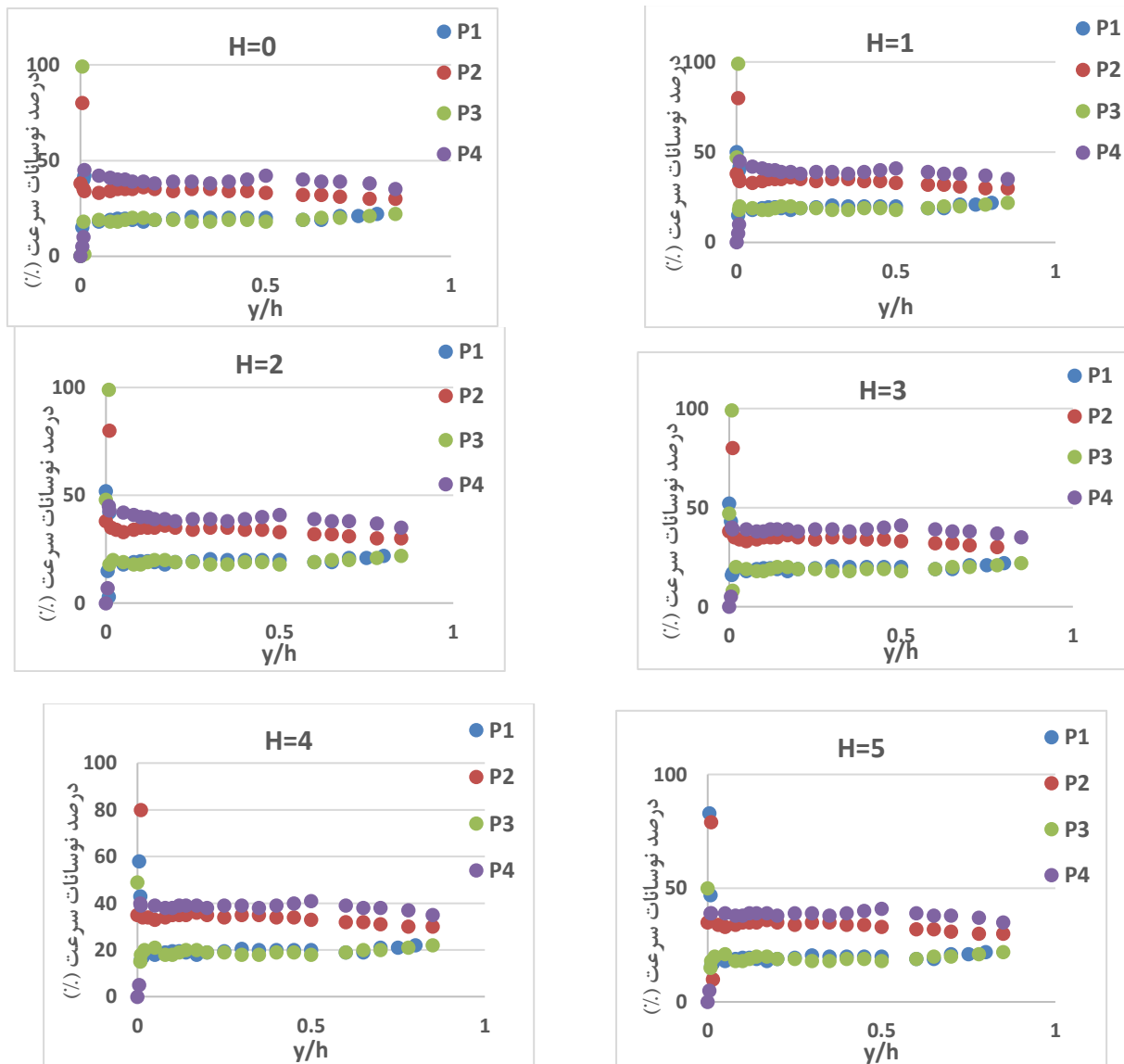


شکل ۴- نیمرخ‌های شدت آشفتگی در سه جهت در رودخانه بهشت‌آباد برای مقاطع مختلف: الف) B1-3.11m، ب) B1-5.31m، ج) B2-2.22m و د) B2-4.27m

Fig. 4 Turbulence intensity profiles, Behesht Abad river for different sections: a) B1-3.11m, b) B1-5.31m, c) B2-2.22m, and d) B2-4.27m

با دور شدن از بستر و محدوده $0.2 \leq y/h \leq 0.5$ سهم پیشامد درونی کم شده و بیشترین سهم را پیشامد پرتاب و پس از آن، جاروب، درونی و بیرونی دارند. در ناحیه $0.2 \leq y/h \leq 0.85$ (بالترین نقطه که دستگاه ADV قادر به برداشت سرعت در آن است، $y/h = 0.85$ می‌باشد) پیشامدهای تأثیرگذار بر توزیع شدت آشفتگی به ترتیب جاروب، پرتاب، بیرونی و درونی هستند.

آنالیز کوادرنانت می‌تواند برای کمی کردن سهم پیشامدهای گوناگون در توزیع شدت آشفتگی استفاده شود. شکل (۶) نشان‌دهنده پیشامدهای غالب در آنالیز کوادرنانت به ازای مقادیر مختلف حفره (H) برای نقطه B1-3/11m می‌باشد. بررسی پیشامدهای غالب در سه بخش از عمق جریان قابل بررسی است. در نواحی نزدیک بستر یعنی $0 \leq y/h \leq 0.5$ پدیده‌های غالب به ترتیب درونی، بیرونی و پرتاب است. سهم پیشامد جاروب در این بخش کم‌تر از سایر پیشامدها می‌باشد.



شکل ۶- درصد نوسانات سرعت در ربع‌های مختلف

Fig. 6 Percentage of velocity fluctuations in different quarters

۴- نتیجه‌گیری

به‌دلیل اهمیت برآورد اثر انتقال رسوب به‌ویژه بار معلق در مدیریت رودخانه‌ها، در این پژوهش به بررسی تأثیر بار معلق رسوب در برآورد ضریب زبری و ضریب ون کارمن در رودخانه‌های هراز، رستم‌آباد و بهشت‌آباد پرداخته شد. به‌طور خلاصه می‌توان موارد زیر را نتیجه‌گیری کرد:

۱- حضور بار معلق در نزدیکی بستر و روند کاهشی آن به سمت سطح آب موجب چندلایه شدن جریان می‌شود. چندلایه بودن جریان سبب تأخیر در فرایند اختلاط اندازه حرکت سیال و جرم رسوب از بستر به‌طرف سطح آب می‌شود که پیامد آن تغییر مقدار ثابت جهانی ون کارمن و توزیع سرعت ناشی از تغییر ساختار جریان در حضور بار معلق می‌باشد.

۲- ثابت ون کارمن به دلیل تعامل ریخت شناسی رودخانه‌ها از طریق شکل بستر با بار معلق، موجب غیر جهانی شدن این

ضریب و مقادیر متفاوت از ۰/۴ (گزارش شده در مراجع) می‌شود به‌طوری‌که در برخی شرایط بیشتر از آن می‌باشد. همچنین در اکثر مقاطع ضریب زبری جریان در اثر وجود رسوبات بار معلق کاهش پیدا کرده است که علت آن پر شدن خلل و فرج بستر با ذرات ریزدانه بار معلق می‌باشد.

۳- مقادیر شدت آشفتگی در سه جهت نشان داد که روند افزایشی شدت آشفتگی در نزدیکی بستر همراه با روند کاهشی رسوب بار معلق است. همچنین توزیع شدت آشفتگی در حضور بار معلق همگرا است که شیب آن در ناحیه بستر بیشتر از حالت بدون بار معلق می‌باشد.

۴- پیشامدهای غالب در سه بخش از عمق جریان مورد بررسی قرار گرفت. در نواحی نزدیک بستر پیشامدهای غالب به ترتیب درونی، بیرونی، پرتاب و جاروب می‌باشد. با دور شدن از بستر پیشامد جاروب تأثیر بیشتری بر توزیع شدت آشفتگی داشته و تأثیر پیشامدهای درونی و بیرونی کاهش می‌یابد.

References

Afzalimehr H. and Anctil F. (1999). Velocity distribution and shear velocity behaviour of decelerating flow over a gravel-gravel. *Can. J. Civ. Eng.*, 26(4), 468-475.

Afzalimehr H. and Anctil F. (2000). Accelerating shear velocity in gravel-bed channels. *Hydrol. Sci. J.*, 45(1), 113-124.

Afzalimehr H., Barahimi M. and Sui J. (2019a). Non-uniform flow over cobble bed with submerged vegetation strip. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Wat. Manag.*, 172(2), 86-101.

Afzalimehr H., Maddahi R., Naziri D. and Sui J. (2019b). Effects of non-submerged boulder on flow characteristics - a field investigation. *Int. J. Sediment Res.*, 34, 136-143.

Afzalimehr H., Maddahi R., Sui J. and Rahimpour M. (2019c). Impacts of vegetation over gravel bedforms on flow characteristics in gravel-bed Rivers. *J. Hydrodyn.*, 31(5), 986-998.

Afzalimehr H., Maddahi M. R. and Sui. J. (2017). Bed form Characteristics in a Gravel-Bed River. *J. Hydrol. Hydromech.*, 65(4), 366-377.

Afzalimehr H., Moghbel R., Gallichand J. and Sui J. (2011). Investigation of turbulence characteristics in channel with dense vegetation. *Int. J. Sediment Res.*, 26(3), 269-282.

Church M. (2006). Bed material transport and the morphology of alluvial river channels. *Earth Planet. Sci.*, 34, 325-354.

Dey S. (2014). *Fluvial hydrodynamics*. Berlin: Springer, 529-562.

Einstein H. A. (1950). *The bed-load function for sediment transportation in open channel flows*. U.S. Government Printing Office.

Emadzadeh A., Chiew Y. M. and Afzalimehr H. (2010). Effect of accelerating and decelerating flows on incipient motion in sand bed streams. *Adv. Wat. Resour.*, 33(9), 1094-1104.

Fazel Najafabadi E., Afzalimehr H. and Rowinsky P. M. (2018). Flow structure through a fluvial pool-riffle sequence - case study. *J. Hydro-environ. Res.*, 19, 1-15.

Fazel Najafabadi E. and Afzalimehr H. (2020). Comparison of two and three-dimensional flow and habitat modeling in pool-riffle sequences.

- Iran. J. Sci. Technol., Trans. Civ. Eng., 44(3), 991-1000.
- Fazlollahi A. Afzalimehr H. and Sui J. (2015). Effect of slope angle of an artificial pool on distributions of turbulence. *Int. J. Sediment Res.*, 30(2), 93-99.
- Graf W. H. and Altinakar M. (1998). *Hydraulics of Sediment Transport*, Book Crafters Inc., USA.
- Itakura T. and Kishi T. (1980). Open Channel Flow with Suspended Sediments. *J. Hydraul. Eng.*, 106 (8), 1325-1343.
- Kabiri F., Afzalimehr H. and Sui J. (2017). Flow structure over a wavy bed with vegetation cover. *Int. J. Sediment Res.*, 32(2), 186-194.
- Khullar N. K., Kothiyari U. C. and Ranga Raju K. G. (2002). The Effect of suspended sediment on flow resistance. 5th International conference on Hydro-Science and Engineering, Warsa, Poland.
- Maddahi M. R., Afzalimehr H. and Rowinski P. M. (2016). Flow characteristics over a gravel bedform: Kaj River case study. *Acta Geophys.*, 64(5), 1779-1796.
- Nouh M. (1989). The von-Kármán coefficient in sediment laden flow. *J. Hydraul. Res.*, 27(4), 477-499.
- Lyne D. A. (1991). Resistance in flat-bed sediment. *Hydraul. Eng.*, 117(1), 94-114.
- Shafaei H., Amini A. and Shirdeli A. (2019). Assessing submerged vegetation roughness in streambed under clear water condition using physical modeling. *Wat. Resour.*, 46(3), 377-383.
- Shafaei Bajestan M. (2006). *Hydraulic of sediment*. Shahid Chamran University [In Persian].
- Rouse H. (1937). Nomogram for the settling velocity of spheres. In: *Division of Geology and Geography, Exhibit D of the Report of the Commission on Sedimentation*, National Research Council, Washington, D.C., 57-64.
- Shahmohammadi R., Afzalimehr H. and Sui J. (2018). Interaction of turbulence and vegetation patch on the incipient motion of sediment. *Can. J. Civ. Eng.*, 45(9), 803-816.
- Sumer, B. M., Chua, L. H. and Cheng, N. S. (2003). Influence of turbulence on bed load sediment transport. *J. Hydraul. Eng.*, 129(8), 585-596.
- Tang C., Li Y., Acharya K., Du W., Gao X., Luo L. and Yu Z. (2019). Impact of intermittent turbulent bursts on sediment resuspension and internal nutrient release in Lake Taihu, China. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 26(16), 16519-16528.
- Vanoni V. A. (1946). Transportation of suspended sediment by water. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 111, 67-133.
- Vanoni V. A. and Brooks N. H. (1957). Laboratory Study of the roughness and suspended load of alluvial streams. Report No.E-68.
- Vanoni Vito A. (2006). *Sedimentation engineering. Manual of Practice 54*, 2nd ed.
- Wren D. G., Langendoen E. J. and Kuhnle R.A. (2013). A note on acoustic measurements of turbulence, suspended sediment, and bed forms in mobile-bed experiments. *J. Hydro-environ. Res.*, 8(2), 164-173
- Yalin M. S. (1972). *Mechanics of sediment transport*. Pergamon Press, U.K.

Influence of Suspended Sediment Load on Roughness Coefficient and Intensity of Flow Turbulence (Case study: Haraz, Rostamabad and Beheshtabad Rivers)

Hossein Afzalimehr¹, Sanaz Hadian^{2*}, Ehsan Shahiri Tabarestani² and Meysam Mohammadi³

¹Professor, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

²Ph.D Scholar, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

³M.Sc. Student, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

*Corresponding author: sanaz_hadian@civileng.iust.ac.ir

Original Paper

Received: August 10, 2020

Revised: October 03, 2020

Accepted: October 06, 2020

Abstract

Estimating the effect of sediment transport, especially suspended load, is important in river planning and management. The aim of this study was to investigate the effect of suspended sediment load on the roughness coefficient and the intensity of flow turbulence in Haraz, Rostamabad and Beheshtabad Rivers. In order to better understand these relationships, the geometric characteristics of the sections, the flow velocity and the suspended load were measured in different sections of these rivers. Then shear stress, Manning coefficient and Von karman coefficient were calculated using related equations in each section. The intensity of turbulence was also determined by measuring velocity fluctuations. The study of the effect of suspended load on roughness coefficient and Van Carmen coefficient showed that in most sections roughness coefficient and Van Carmen coefficient have decreased due to the presence of suspended load. In Haraz, Rostamabad and Beheshtabad Rivers, the ratio of roughness coefficient in the presence of suspended load to roughness coefficient without suspended load was 0.9, 0.94 and 0.6, respectively. The results of this study showed that the turbulence intensity distribution is independent from the flow rate and the distribution is always convergent and its maximum value occurred not in the bed but above the bed. Besides, the distribution of turbulence intensity in the presence of suspended load in gravel-boulder rivers is convergent and can be analyzed based on the boundary layer equation. Quadrant analysis was performed on the dominant events at three flow depths. In the areas close to the bed, the predominant phenomena were inward, outward and ejection, respectively, and the contribution of the sweeping event in this section was negligible.

Keywords: Coefficient; Quadrant Analysis; Roughness; Suspended Load; Turbulence Intensity; Von-Karman Coefficient.