

Experimental Study of Bed Particle Motions in a Floodplain of Rectangular Compound Open-Channel

Mostafa Nabipour^{1*}, Seyed Ali Akbar Salehi Neyshabouri², Seyed Hossein Mohajeri³,
Farhad Souri⁴


1- PhD, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

4- MSc, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* mnabipour61@gmail.com

Received: 20 October 2020, Accepted: 12 December 2020  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Sediment transport is one of the most basic and important characteristics in river hydraulics and bed morphology. The prediction of sediment transport path in rivers and also canals is absolutely complicated, and mostly conducted with semi-empirical methods. In such cases, the Lagrangian method is essential for exploring the physics of individual sediment particles. The investigation of the flow pattern in the compound open-channel originated in 1960s and followed by the exploration of turbulence structures of overbank flows. However, studies on the characteristics and processes of sediment transport in the compound channels are rarely conducted. For completion this gap, in this experimental study, the rolling and sliding motions of individual bed particle in the floodplain of a rectangular compound open-channel have been experimentally investigated. Specifically, the mechanical parameters of particle motions such as velocity and acceleration are investigated. In this regard, different statistical distributions, especially Gaussian or normal distribution, are employed to introduce the properties of bed sediment motions in the floodplain.

Methodology: The experiments were conducted in the hydraulic laboratory of Tarbiat Modares University in a straight open channel with length of 10 m, width of 1 m and height of 0.7 m (Fig. 1). The laboratory flume is a wide rectangular channel with a compound section (Fig. 2), where the side wall and bottom of the channel are made of glass. The main channel is 0.4 m wide and the floodplain is 0.6 m wide. To control the water depth, an adjustable weir was used at the end of channel. The discharge at the inlet of the channel was controlled using a regulating valve downstream of pump and measured by an electromagnetic flow-meter. The hydraulic conditions of the experiments are summarized in Table 1. According to the calculations, the Reynolds and Froude numbers are respectively 28000 and 0.34. Therefore, the flow in the compound channel of the present study is turbulent and subcritical. The flow depths in the floodplain and main channel are 5 and 20 cm, respectively.

To capture high quality images from bed particle motions in short intervals, a camera with the speed of 24 frames per second and FullHD resolution was used (Fig. 3). To improve the quality of the images, the floodplain and main channel bottoms were coated with black color in the measurement zone. Moreover, for detection of the particle trajectories, the measurement zone was regularly meshed by the perpendicular lines with the distance of 10 cm. Several projectors were applied at different angles for illumination of the measuring plane. The spherical bed particle characteristics of the present study are mentioned in Table 2. Particle tracking were conducted at the distances of 5, 20, 40, and 50 cm from the floodplain side wall (Fig. 4), and repeated about 20 times for each one.

Results and discussion: Chi-Squared test were used to determine the appropriate distribution to describe the longitudinal and transversal velocity and acceleration of individual particles (Fig. 5). Also, skewness and kurtosis of the data are employed to investigate the fitness of velocity and acceleration data to the normal distribution (Eqs. 2 and 3). In the case of sediment release at 20 cm from the floodplain side wall, the skewness values for the particle longitudinal and transversal velocities are always close to zero and their kurtosis values are close to 3. This indicates that the particle longitudinal and transversal velocities follow the normal distribution. However, kurtosis of longitudinal acceleration diverges from 3, and consequently, it does not follow normal distribution (Table 3). The averaged longitudinal and transversal velocities of the sediment particles increase, approaching to the interaction zone (Fig. 6). Also, the standard deviation of longitudinal and transversal velocity and acceleration values increase with the increase of distance from the floodplain side wall (Fig. 7 and 8). Kurtosis of streamwise and spanwise velocity and acceleration of sediment particles increase far from floodplain side wall (Fig. 9), duo to the uniformity of particle motions in the interaction zone. The linear relationship between the average particle velocity and flow shear velocity indicates that there is a good agreement between the results of the present study and previous researches.

Conclusion: The results of this study show that the streamwise and lateral velocity and spanwise acceleration histograms of spherical particles in the floodplain far from the interaction zone, could be fitted to the normal distribution. While the kurtosis of histograms increases considerably, approaching to the junction. The histogram of streamwise acceleration does not fitted by the normal distribution. The histogram kurtosis of velocity and acceleration is enhanced approaching the interaction zone.

Keywords: Compound Channel, Floodplain, Lagrangian Particle Tracking, Sliding and Rolling Motions.



© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the
Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

مطالعه آزمایشگاهی حرکت ذره بستر در سیلابدشت کانال مرکب مستطیلی

مصطفی نبی پور^{۱*}، سید علی اکبر صالحی نیشابوری^۲، سید حسین مهاجری^۳، فرهاد سوری^۴

۱- دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیطزیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیطزیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

۳- استادیار، دانشکده فنی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران.

۴- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیطزیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

* mnabipour61@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۹، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۲، وبگاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: بررسی انتقال بار رسوبی در رودخانه‌ها و کانال‌های روباز از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق رفتار تک‌ذره رسوبی بستر با حرکت لغزشی و غلظتی در سیلابدشت یک کانال مرکب مستطیلی (دارای دیواره میانی قائم) به صورت آزمایشگاهی و بر اساس دیدگاه لاگرانژی مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور روش ردیابی ذرات منفرد در یک کانال مستطیلی مرکب مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که توزیع سرعت طولی و عرضی و شتاب عرضی ذرات رسوبی در نواحی دور از ناحیه اندرکنش از توزیع نرمال پیروی می‌کند. این در حالی است که با افزایش فاصله از مرکز سیلابدشت و نزدیکی به ناحیه اندرکنش، تبعیت پارامترهای مذکور از توزیع نرمال تضعیف می‌گردد. بررسی‌های مطالعه حاضر نشان داد که هیستوگرام شتاب طولی ذره را نمی‌توان با استفاده از توزیع نرمال برآورد نمود. همچنین مشاهده شد که مقدار کشیدگی هیستوگرام سرعت و شتاب با نزدیک شدن به ناحیه اندرکنش افزایش می‌یابد.

کلید واژگان: کانال مرکب، سیلابدشت، ردیابی لاگرانژی رسوبات، حرکت غلظتی و لغزشی ذرات.

۱- مقدمه

بررسی جریان رقیق رسوب‌ها که درصد حجمی ذرات از میزان مشخصی کمتر بوده و از تأثیر ذرات بر روی جریان صرف نظر شده (کوپل یک‌راهه)، استفاده می‌شود (Nasrollahi, 2010). توصیف حرکت ذرات را می‌توان به عنوان نخستین گام برای محاسبه نرخ انتقال بار رسوبی دانست (Ancey et al., 2002). هنگامی که ذرات رسوب به قدری سنگین باشند که آشفتگی جریان نتواند آن را به حالت معلق یا پرش درآورد یا حرکت آن‌ها در اثر نیرویی مانند چسبندگی بین ذرات رسوب چسبنده محدود شود، رسوب‌ها به صورت لغزشی یا غلظتی روی بستر حرکت می‌کنند. برای تشخیص نوع حرکت ذره از نسبت سرعت سقوط ذره به سرعت برشی کف استفاده می‌شود، به طوری که برای ذرات معلق، این نسبت کمتر از ۰/۶، برای ذرات در حال جهش بین ۰/۶ تا ۲ و برای ذرات بستر بزرگ‌تر از ۲ می‌باشد (Barati, 2016).

بررسی انتقال بار رسوبی در رودخانه‌ها و آبراهه‌های روباز از اهمیت زیادی برخوردار است. درصد زیادی از بار رسوبی رودخانه‌ها را بار بستر تشکیل می‌دهد که این میزان در رودخانه‌های با بستر شنی به حدود ۶۰ درصد می‌رسد (Raudkivi, 1998). عمده رابطه‌های ارائه شده برای پیش‌بینی انتقال بار بستر، رابطه‌های نیمه تجربی هستند که از برازش داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده‌اند (Graf, 1984) و به فیزیک مسئله در مقیاس ذره توجهی نشده است. در دهه‌های اخیر بررسی حرکت رسوب‌ها نه تنها به صورت گروهی و بر مبنای دیدگاه اولری، بلکه به صورت ردیابی ذرات منفرد و بر مبنای دیدگاه لاگرانژی نیز مورد توجه قرار گرفته است (Niño and García, 1998; Tang and Knight, 2006). روش لاگرانژی به طور عمده در

ذرات رسوب است. دوم اینکه فرآیندهای انتقال رسوب در آبراهه‌های باز ساده هنوز به‌طور کامل شناخته‌شده نیستند و این شناخت حرکت رسوب‌ها در آبراهه مرکب را دشوارتر می‌کند (Ikeda and McEwan, 2007). برای محاسبه میزان انتقال رسوب در آبراهه‌های باز رابطه‌های تجربی گوناگونی استفاده می‌شود که دقت بالایی ندارند. Karamisheva et al. (1979) برخی از رابطه‌ها پیش‌بینی انتقال رسوب را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و یک رابطه را به‌عنوان بهترین رابطه برای پیش‌بینی میزان انتقال رسوب در آبراهه مرکب ارزیابی کردند.

سیلاب‌دشت‌های نهرها در امور کشاورزی، تفریحی و تجاری با اهمیت هستند و به همین دلیل بررسی فرسایش و ته‌نشینی رسوب در آن‌ها همواره مورد بحث بوده است (Atabay et al., 2004; Chunhong et al., 2010). به دلیل گردابه‌های واقع در آبراهه مرکب، مواد آلاینده و رسوب‌های ریزدانه معلق پس از فروکش سیلاب در سیلاب‌دشت ته‌نشینی می‌شوند (Ikeda and McEwan, 2007). ته‌نشینی رسوب در سیلاب‌دشت با پوشش گیاهی تشدید می‌شود. به همین دلیل برخی از تحقیقات در زمینه انتقال رسوب در آبراهه مرکب به بررسی ذرات معلق معطوف شده است (Nicholas and Walling, 1998).

کمبرود پایه‌های فرضیه‌ای در رابطه با رفتار رسوب موجب شده است که آزمایش‌ها نقش بنیادین در درک سازوکار جریان رسوبی به عهده داشته باشند. در بسیاری از مدل‌های ریاضی و عددی نیز استفاده از نتایج آزمایشگاهی برای واسنجی ضریب‌ها مورد نیاز است.

عمده تحقیقات آزمایشگاهی انجام‌شده بر روی حرکت ذرات منفرد بستر به حرکت جهشی ذرات بستر معطوف بوده است (Lee, et al. 2006; Lee and Hsu, 1994). بررسی ویژگی‌های حرکت جهشی ذرات شامل سرعت ذره، طول و ارتفاع جهش به‌صورت آماری توسط تنی چند از پژوهشگران بررسی شده است (Hu and Hui, 1996; Niño and García, 1998). رفتار ذرات منفرد با حرکت جهشی توسط مدل‌سازی عددی نیز بررسی شده است (Lee, et al. 2002). برخلاف بررسی حرکت جهشی ذرات بار بستر، بررسی حرکت ذرات رسوبی بستر به‌صورت غلتشی و لغزشی

سرعت حرکت ذره یکی از مهم‌ترین فراسنجه‌های مؤثر در میزان انتقال رسوب است. سرعت حرکت ذره به ویژگی‌های جریان در نزدیکی ذره (مانند تنش برشی، زبری بستر و غیره) و ویژگی‌های خود ذره (مانند قطر و چگالی ذره و شکل هندسی آن) بستگی دارد. به دلیل اهمیت تعیین سرعت ذره رسوبی در میزان انتقال رسوب، رابطه‌های گوناگونی توسط پژوهشگران مختلف برای محاسبه آن ارائه شده است که عمده آن‌ها مربوط به سرعت ذره در حالت جهش و یا ترکیبی از سه حالت حرکت ذره بستر است (Hu and Hui, 1996; Ancey et al., 2002). بیشتر رابطه‌های ارائه‌شده برای برآورد سرعت ذره، یک رابطه خطی بر مبنای سرعت برشی کف به‌صورت زیر می‌باشد (Martin, et al., 2012):

$$u_p = a(u_* - u_{*,0}) \quad (1)$$

که در آن u_p سرعت میانگین حرکت ذره، a شیب خط برازش سرعت ذره برحسب سرعت برشی، u_* سرعت برشی کف و $u_{*,0}$ سرعت برشی کف بحرانی است. ضریب a در بررسی‌های مختلف به‌صورت آزمایشگاهی تعیین شده است (Hu and Hui, 1996; Abbott and Francis, 1977; Julien and Bounvilay, 2013; Ramesh, et al., 2011) (Martin, et al. 2012) و (Mehdizadeh 2009) توزیع نرمال را برای برازش سرعت طولی ذرات طبیعی با هر سه نوع حرکت بار بستر مناسب ارزیابی کردند. درحالی‌که (Lajeunesse et al., 2010) و (Roseberry et al. 2012) نمودار ستونی سرعت طولی ذرات طبیعی بستر را با توزیع نمایی و نمودار ستونی سرعت عرضی را با توزیع نرمال برازش دادند که این اختلاف تابع توزیع فراوانی سرعت طولی ذره می‌تواند به شکل هندسی ذرات رسوب، نوع بستر (صاف یا زبر)، نوع حرکت ذرات و حتی شرایط هیدرولیکی جریان مرتبط باشد.

بررسی ساختار جریان در آبراهه مرکب از دهه ۱۹۶۰ میلادی آغاز شده و تاکنون ادامه یافته است، اما فرآیندهای انتقال رسوب در آبراهه مرکب موضوعی است که در چند دهه اخیر مورد توجه ویژه قرار گرفته است. این تأخیر در بررسی رسوب در آبراهه مرکب به این علت است که نخست درک سازوکار جریان در آبراهه مرکب پیش‌نیاز درک رفتار

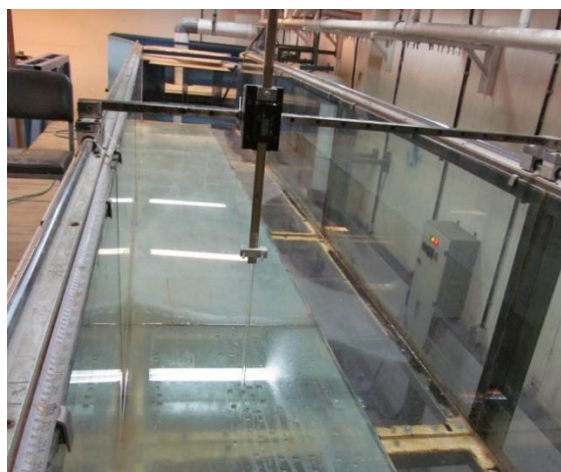


Fig. 1 A view of compound channel in this study (From downstream to upstream)

شکل ۱ تصویر آبراهه مرکب مورد بررسی (دید از پایین دست به سمت بالادست)

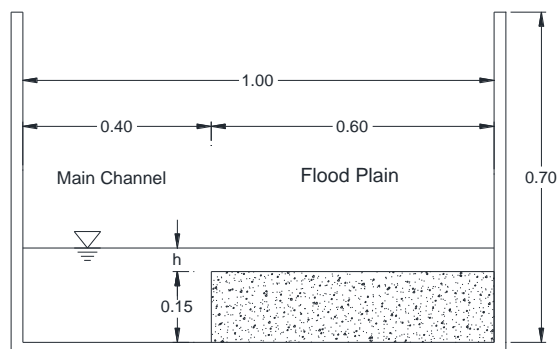


Fig. 2 Cross-section of compound channel in this study (all dimensions are in meters.)

شکل ۲ مقطع آبراهه مرکب مورد استفاده در تحقیق (همه بعدها به متر می باشند.)

۳۹ لیتر در ثانیه در نظر گرفته شد. علت انتخاب این دبی، کارکرد مناسب پمپ موجود در این نقطه کاری و لرزش کمتر آن در هنگام پمپاژ بوده است. شرایط هیدرولیکی آزمایش به طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به میزان اعداد فرود و رینولدز، جریان در آبراهه دارای رژیم زیربحرانی و به کلی آشفته است. دیواره‌ها و بستر سیلابدشت و آبراهه اصلی از جنس شیشه می باشد. با توجه به زبری شیشه، عدد بی بعد زبری بستر بسیار کوچکتر از ۳ و در نتیجه جداره‌های آبراهه از نظر هیدرولیکی صاف می باشند.

برای برداشت تصویرهای با کیفیت مناسب از حرکت ذره و در فاصله‌های زمانی کوتاه، از سرعت فیلم برداری ۲۴ فریم

به صورت لاگرانژی بسیار کم بوده است. در برخی تحقیقات نیز ذرات رسوبی در هر سه نوع حرکت جهشی، لغزشی و غلتشی بررسی شده‌اند. همچنین بیشتر بررسی‌های انجام شده در زمینه بررسی رفتار ذرات رسوبی منفرد در آبراهه‌های ساده مستطیلی بوده و بررسی‌های انجام شده در آبراهه‌های با هندسه پیچیده مانند آبراهه مرکب محدود بوده است (Souri, 2017). در بررسی‌های معدود صورت گرفته در زمینه انتقال ذرات رسوبی در آبراهه مرکب، رسوبها به صورت توده‌ای بررسی شده‌اند (Ackers, 1992). بر این مبنای هدف از این تحقیق بررسی حرکت رسوب‌های بستر در سیلابدشت آبراهه مرکب و بیان ویژگی‌های حرکت ذرات رسوبی منفرد مانند سرعت و شتاب آنها می باشد.

۲- مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس در یک آبراهه مستقیم به طول ۱۱، عرض ۱ و ارتفاع ۰/۷ متر انجام شد (شکل ۱). آبراهه آزمایشگاهی یادشده، یک آبراهه پهن با مقطع مرکب است (شکل ۲). برای کنترل عمق آب، از یک سرریز قابل تنظیم در انتهای آبراهه استفاده شد. دبی در ورودی آبراهه با استفاده از شیر تنظیم دبی خروجی از پمپ، کنترل شده و به وسیله یک دبی سنج الکترومغناطیسی اندازه گیری شد. به منظور حذف آشفتگی در ابتدای آبراهه از صفحه‌های موازی آرام کننده جریان استفاده شده است. شرایط توسعه یافتگی جریان در مقطع اندازه گیری توسط Nabipour, et al. (2017) بررسی و تأیید شد. محور X موازی بستر بوده و در راستای طولی جریان اصلی و به سمت پایین دست مثبت می باشد. محور Y عمود بر جهت جریان در راستای قائم بوده و جهت مثبت آن از بستر به سمت بالا می باشد. در نهایت محور Z در راستای عرضی بوده و مبدأ آن دیواره سمت راست آبراهه می باشد. عمق جریان در آبراهه اصلی و سیلابدشت به ترتیب برابر ۲۰ و ۵ سانتی متر در نظر گرفته شد. با توجه به میزان عمق نسبی (نسبت عمق جریان در سیلابدشت به عمق آبراهه اصلی) جریان در آبراهه مرکب از نوع کم عمق طبقه بندی می شود (Besio et al. 2012). دبی عبوری از آبراهه برابر



Fig. 3 Using camera for capturing of bed particle motions in the plan view

شکل ۳ استفاده از دوربین برای برداشت تصویرهای حرکات ذره رسوبی بستر در پلان

اندازه‌گیری تا حد امکان بزرگ در نظر گرفته شد. بدین منظور ردیابی ذرات رسوبی در صفحه‌ای به طول ۱ و عرض ۰/۶ متر انجام شد. مرکز صفحه برداشت در فاصله ۷/۹ متری از ورودی آبراهه قرار دارد. افزایش بعدهای صفحه برداشت منجر به نبود امکان ردیابی ذره رسوبی می‌شود.

پس از فیلم‌برداری از حرکت تک‌ذره رسوبی بستر و استخراج تصویرها، با استفاده از یک کد ردیابی در نرم‌افزار MATLAB مسیر حرکت ذره و سرعت آن به دست می‌آید. این کد بر مبنای تضاد رنگ ذره نسبت به محیط پیرامونی ذره نوشته شده است. این برنامه با استفاده از صافی‌های مختلف، محل ذره را در هر تصویر جستجو می‌کند. صافی‌های مورد استفاده در این تحقیق، صافی میان‌گذر^۲ و صافی تعداد ذره (که در این تحقیق برابر یک ذره است) بوده است.

در این تحقیق برای ردیابی رسوب بستر از یک ذره با ویژگی‌های جدول ۲ استفاده شد. چگالی و قطر ذره تا حد امکان در محدوده قطر و چگالی رسوب‌های طبیعی در نظر گرفته شد. ذره رسوبی بستر افزون بر چگالی و قطر نزدیک به رسوب‌های موجود در طبیعت، باید دارای کمینه قطر لازم برای دیده‌شدن در میدان دید به طول ۱۰۰ و عرض ۶۰ سانتی‌متر و همچنین رنگ مناسب برای بازتابش نور برای ردیابی مناسب باشد. بدین ترتیب ذره انتخاب‌شده از

جدول ۱ ویژگی‌های هیدرولیکی آزمایش‌ها

Table 1 Hydraulic characteristic of experimental tests

Floodplain flow depth (cm)	5
Main channel flow depth (cm)	20
Relative depth	0.25
Discharge (m ³ /s)	39
Averaged velocity (m/s)	0.35
Froude number	0.34
Reynolds number (assuming hydraulic radius as characteristic length)	2.8×10 ⁴

بر ثانیه و کیفیت تصویرهای FullHD استفاده شد که در شکل ۳ نمایش داده شده است. با توجه به سرعت حرکت ذره نیاز به فیلم‌برداری با سرعت بالاتر وجود ندارد. با توجه به این که حرکت ذرات رسوبی مورد استفاده در این تحقیق از نوع لغزشی و غلتشی و بدون جهش می‌باشد، برای ردیابی حرکت ذرات رسوبی بستر تنها از یک دوربین برای تصویربرداری از بالا (نمای پلان) استفاده شده است. پیش از آغاز آزمایش‌ها کف آبراهه با رنگ سیاه رنگ‌آمیزی شد. همچنین برای تشخیص مکان حرکت ذره، کف آبراهه با خطوطی با فاصله ۱۰ سانتی‌متر شبکه‌بندی شد. با توجه به استفاده از لنز زاویه باز^۱ برای برداشت تصویر و اعوجاج تصویر ناشی از آن، امکان بروز خطا در ردیابی ذرات وجود دارد. در این نوع لنزها بیشترین اعوجاج در گوشه‌های تصویر رخ می‌دهد. مقایسه مکان نقطه‌های شبکه ترسیم‌شده در کف سیلاب‌دشت با موقعیت واقعی آن‌ها نشان می‌دهد که خطای اندازه‌گیری در راستای طولی کمتر از ۰/۴ درصد و در راستای عرضی کمتر از ۱/۲ درصد می‌باشد.

برای نورپردازی مقطع اندازه‌گیری از چند نورافکن با توان‌های متفاوت و در زوایای مختلف استفاده شد. شدت و جهت نورپردازی به نحوی انتخاب شد که انعکاس نور نورافکن در تصویر موجب ایجاد نقطه‌های پرنور نگردد. در حقیقت، این نقطه‌های پرنور موجب اختلال در ردیابی ذرات رسوب می‌شود.

برای اطمینان از درستی و دقت نتایج، طول صفحه‌اندازه‌گیری

² Band-pass filter

¹ Wide-angle lens

نوع کروی و سفیدرنگ (برای کیفیت بهتر تصویرها) در نظر گرفته شد. از آنجاکه ردیابی ذره رسوبی منفرد باید به دفعات انجام شود، برای تله‌اندازی ذرات و جلوگیری از ورود ذره به درون مخزن، از یک توری با شبکه ریز در انتهای آبراهه استفاده شد. به‌منظور بررسی حرکت عرضی ذرات رسوب در سیلاب‌دشت، رهاسازی ذرات رسوبی بستر در چهار موقعیت

عرضی متفاوت متشکل از فاصله‌های ۵، ۲۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متری از جداره سیلاب‌دشت انجام شد (شکل ۴). رهاسازی ذرات رسوب به‌صورت دستی و از فاصله کمی از سطح آب انجام شده است. ذرات رسوبی در فاصله ۱۰ سانتی‌متری بالادست بازه اندازه‌گیری تزریق شدند. ذرات رسوب بی‌درنگ پس از رهاسازی از نزدیکی سطح آب، به کف رسیده و روی بستر آغاز به حرکت می‌کنند.

جدول ۲ ویژگی‌های ذرات رسوب بستر
Table 2 Bed particle characteristics

Material	Particle diameter (mm)	Density (gr/cm ³)	Particle weight (gr)	Particle settling velocity (m/s)	Release widths of particles (cm)
Plastic	6	2.8	0.3165	0.57	5, 20, 40, 50

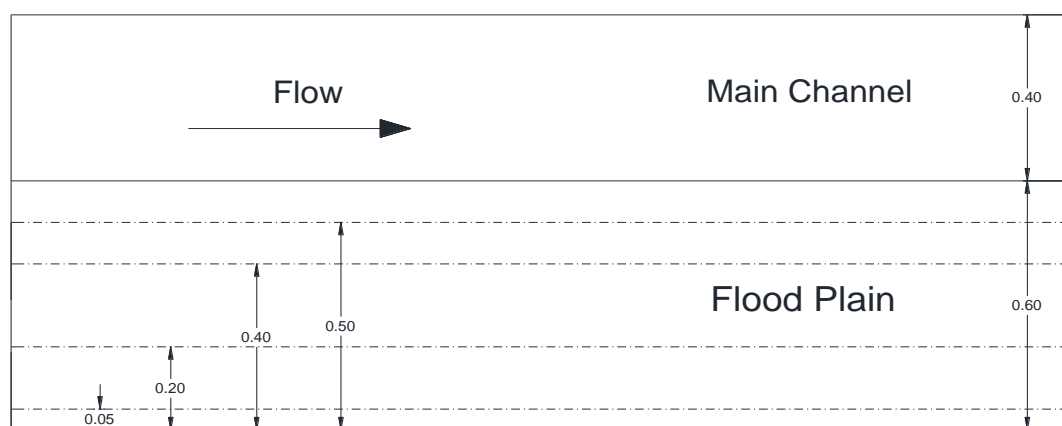


Fig. 4 Position of sediment particles release regarding to the floodplain side wall (all dimensions are in meters.)

شکل ۴ محل رهاسازی ذرات رسوب نسبت به جداره سیلاب‌دشت (همه بعدها به متر می‌باشند).

برای بررسی آماری حرکت ذرات رسوب بستر، تزریق ذرات رسوبی در هر عرض حدود ۲۰ بار انجام شد. Julien and Bounvilay (2013) برای بررسی سرعت حرکت غلتشی ذرات بستر منفرد، حرکت هر ذره را ۱۵ بار ردیابی کردند. در این تحقیق برای یافتن شمار مناسب رهاسازی ذرات رسوبی، ذره در عرض ۲۰ سانتی‌متر ۲۵ بار رهاسازی شد و مسیرهای ۱ الی ۲۰ و ۱ الی ۲۵ از نظر آماری مورد مقایسه قرار گرفتند. مقایسه آماری مسیرهای ۱ تا ۲۰ و ۱ تا ۲۵ نشان می‌دهد که رهاسازی ۲۰ ذره در هر عرض کافی خواهد بود.

در این بخش نتایج مربوط به سرعت و شتاب ذره رسوبی بستر بحث و بررسی می‌شود. میزان سرعت طولی و عرضی ذره رسوبی با استفاده از مختصات مکانی ذره و فاصله زمانی برداشت تصویرها قابل محاسبه است. شتاب ذره نیز از تغییر سرعت در واحد زمان حاصل می‌شود. حرکت رسوب در جریان آشفته اغلب با عدم قطعیت زیاد همراه است و نمی‌توان ویژگی‌های حرکت ذرات را در زمان و مکان به‌طور دقیق پیش‌بینی کرد (Nelson et al., 1995; Paiement-Paradis et al., 2011). بنابراین برای بررسی حرکت ذرات رسوبی در آبراهه نیاز به روش‌های آماری می‌باشد. یکی از راهکارهای مناسب برای تحلیل آماری حرکت ذره رسوبی، استفاده از تابع توزیع چگالی احتمال یا

۳- نتایج

$$skewness = \frac{\sum(x - \bar{x})^3}{N\sigma^3} \quad (2)$$

$$Kurtosis = \frac{\sum(x - \bar{x})^4}{N\sigma^4} \quad (3)$$

در رابطه‌های فوق N برابر شمار داده‌های فراسنجه x است. اگر میزان چولگی بزرگ‌تر از صفر باشد، نشان‌دهنده این است که تابع توزیع نرمال به سمت راست کشیده شده و دنباله طولانی تابع توزیع در سمت چپ قرار دارد و بالعکس. همچنین اگر میزان کشیدگی کوچک‌تر از سه باشد، قله تابع توزیع پهن‌تر و اگر بزرگ‌تر از سه باشد، قله تابع توزیع تیزتر از تابع توزیع نرمال است.

برای بررسی میزان سازگاری دوره زمانی حرکت ذره بر توزیع نرمال، میزان چولگی و کشیدگی سرعت طولی و عرضی و شتاب طولی ذره رسوبی رهاشده در عرض ۲۰ سانتی‌متر به همراه میانگین و انحراف معیار فراسنجه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. میزان چولگی برای سرعت طولی و عرضی ذره همواره نزدیک به صفر و میزان کشیدگی آن‌ها نزدیک به ۳ است که این نشان از پیروی سرعت طولی و عرضی ذره از توزیع نرمال دارد؛ اما میزان کشیدگی برای شتاب طولی ذره بسیار بالاتر از ۳ بوده و شتاب طولی ذره از توزیع نرمال پیروی نمی‌کند. علت این پدیده یکنواختی نیروی درگ وارده به ذره (که با توجه به قانون دوم نیوتن، متناسب با شتاب طولی ذره است) در راستای طولی جریان است. به عبارت دیگر به دلیل وجود سرعت میانگین جریان و نیروی درگ ناشی از آن، همواره یک نیروی ثابت به ذره وارد شده و تغییر نیروی وارده بر ذره رسوبی ناشی از آشفتگی جریان در راستای طولی نسبت به نیروی درگ، قابل ملاحظه نیست.

پیروی سرعت طولی ذره از تابع توزیع نرمال در حرکت تک‌ذره کروی بستر (به صورت جهشی) در نتایج تحقیقات (Mehdizadeh (2009) نیز گزارش شده است که با نتایج این تحقیق سازگار است. در حالی که (Lajeunesse et al., (2010) و (Roseberry et al. (2012) نمودار ستونی سرعت طولی ذرات طبیعی بستر را با توزیع نمایی و نمودار ستونی سرعت

تابع توزیع احتمالاتی است. به منظور تعیین یک الگوی آماری حاکم بر حرکت ذره رسوبی بستر، لازم است بهترین توزیع چگالی احتمال هماهنگ با آن مشخص شود. یکی از معمول‌ترین توابع توزیع احتمالاتی برای متغیرهای تصادفی، توزیع نرمال یا گوسی یا زنگوله‌ای است.

برای تعیین توزیع مناسب برای توصیف سرعت و شتاب طولی و عرضی ذرات از نرم‌افزار EasyFit و آزمون Chi-Squared استفاده شده است. در شکل ۵ نمودار نمودار ستونی سرعت طولی ذره در عرض ۲۰ سانتی‌متر از دیواره سیلابدشت به همراه توزیع برتر برازش داده شده و توزیع نرمال ارائه شده است. در این شکل محور افقی برحسب $(x - \bar{x})/\sigma$ (میانگین و σ انحراف معیار^۱ فراسنجه دلخواه x) بی‌بعد شده است. در شکل ۵ این فراسنجه، سرعت طولی ذره (u_p) می‌باشد.

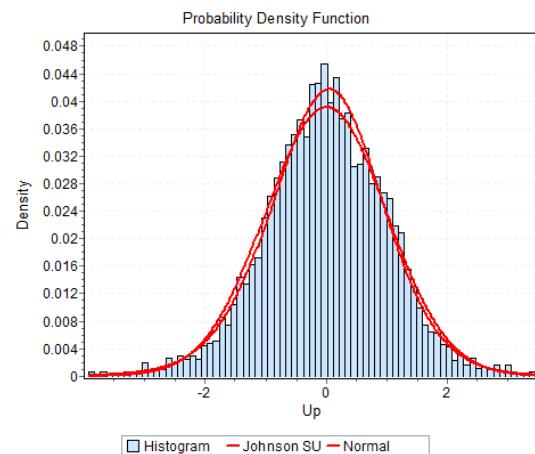


Fig 5 Normalized streamwise velocity histogram of sediment particles at 20 cm width from floodplain side wall with normal and the best fitted distribution

شکل ۵ نمودار ستونی فراوانی فراوانی سرعت طولی بی‌بعد ذره رسوبی در عرض ۲۰ سانتی‌متر از دیواره سیلابدشت به همراه برازش توزیع نرمال و برترین توزیع منتخب

دو فراسنجه مهم در بررسی توزیع فراوانی داده‌ها و نیز برازش توزیع نرمال بر داده‌ها، چولگی^۲ و کشیدگی^۳ هستند که در رابطه‌های زیر تعریف شده‌اند (Nikora et al., 2002). برای توزیع نرمال میزان چولگی و کشیدگی به ترتیب برابر صفر و سه هستند.

³ Kurtosis

¹ Standard deviation

² Skewness

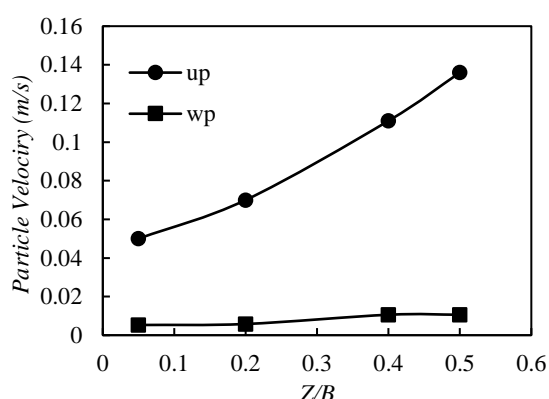


Fig 6 Averaged streamwise and spanwise velocities of sediment particles at different normalized widths from floodplain side wall

شکل ۶ میانگین سرعت‌های طولی و عرضی ذره رسوبی در عرض‌های نسبی مختلف از دیوار جانبی سیلاب‌دشت

معیار سرعت و شتاب طولی و عرضی ذره با دور شدن از دیواره سیلاب‌دشت، در آغاز کاهش یافته و در عرض نسبی ۰/۲ به کمترین میزان خود می‌رسد. اما با افزایش عرض و نزدیک شدن به ناحیه اندرکنش، مقدار انحراف معیار همه فراسنجه‌ها روند افزایشی دارند. در عرض نسبی ۰/۰۵ که نزدیک دیواره سیلاب‌دشت است، دو گردابه با جهت چرخش مخالف در حال حرکت هستند و به همین دلیل ذرات رسوب گاهی به سمت دیواره و گاهی به سمت آبراهه اصلی حرکت می‌کنند و بنابراین مقدار انحراف معیار سرعت و شتاب ذرات رسوب افزایش می‌یابد.

در شکل ۹ مقدار کشیدگی سرعت و شتاب‌های طولی و عرضی ذره در عرض‌های نسبی مختلف ارائه شده است.

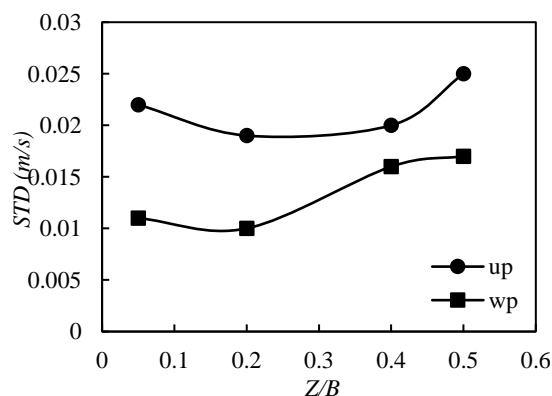


Fig 7 Standard deviation of streamwise and spanwise velocities of sediment particles at different normalized widths from floodplain side wall

شکل ۷ انحراف معیار سرعت طولی و عرضی ذره رسوبی در عرض‌های نسبی مختلف از دیوار جانبی سیلاب‌دشت

عرضی را با توزیع نرمال برازش دادند که این اختلاف تابع توزیع فراوانی سرعت طولی ذره می‌تواند به شکل هندسی ذرات رسوب و نوع بستر (صاف یا زبر) مرتبط باشد. همچنین Furbish, et al. (2012) نمودار ستونی شتاب طولی ذره را به صورت نرمال با میانگین نزدیک به صفر گزارش کردند که با نتایج این تحقیق سازگار نیست. همان‌طور که بیان شد این تفاوت نیز می‌تواند مربوط به بستر زبر، شکل غیر کروی ذرات و همچنین نوع حرکت ذرات (حرکت و توقف) باشد.

جدول ۳ ویژگی‌های آماری سرعت و شتاب طولی و عرضی ذره رسوبی ره‌اشده در عرض ۲۰ سانتی‌متر

Table 3 Statistical characteristics of streamwise and spanwise velocities and streamwise acceleration of sediment particles at 20 cm width from floodplain side wall

Parameter	Average	Standard deviation	Skewness	Kurtosis
Particle streamwise velocity	0.07	0.019	-0.10	3.63
Particle spanwise velocity	0.006	0.014	-0.27	3.57
Particle streamwise acceleration	0.0013	0.111	0.10	25.6

برای بررسی تغییر ویژگی‌های حرکتی رسوب در عرض سیلاب‌دشت، در شکل ۶ نمودار میانگین سرعت طولی (u_p) و عرضی ذره (w_p) در عرض‌های نسبی (Z/B) مختلف ارائه شده است. در این شکل فاصله عرضی از دیواره سیلاب‌دشت (Z) با استفاده از عرض آبراهه (B) بی‌بعد شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با نزدیک شدن به ناحیه اندرکنش آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت، میانگین سرعت‌های طولی و عرضی ذره افزایش می‌یابد. علت این پدیده، افزایش سرعت طولی جریان و در نتیجه نیروی درگ و همچنین نیروهای ناشی از آشفتگی جریان، با نزدیک شدن به ناحیه اندرکنش می‌باشد.

در شکل ۷ نمودار انحراف معیار سرعت طولی (u_p) و عرضی ذره (w_p) و در شکل ۸ میزان شتاب طولی (a_x) و عرضی ذره (a_z) در عرض‌های نسبی مختلف ارائه شده است. با دقت در این دو شکل می‌توان دریافت که انحراف

طولی ذره بستر را برحسب سرعت برشی بستر نشان می‌دهد. سرعت برشی بستر با استفاده از امتداد خط برازش‌یافته به منحنی تنش برشی رینولدز ($-\overline{u'v'}$) که در آن u' و v' به ترتیب نوسان‌های سرعت در راستای طولی و قائم است) در راستای عمق تا بستر به دست آمده است. (Abbott and Francis (1977) در یک بررسی آزمایشگاهی برای ذرات کروی در حالت حرکت‌های جهشی، غلتشی و لغزشی، شیب خط برازش‌یافته بین سرعت میانگین حرکت رسوب و سرعت برشی را $13/4$ تا $14/3$ گزارش نمودند که با نتایج شکل ۱۰ همخوانی خوبی دارد. همچنین Martin et al. (2012) در یک بررسی دیگر آزمایشگاهی برای ذرات طبیعی با هر سه نوع حرکت بار بستر، شیب این خط را برابر $13/6$ به دست آوردند که مؤید نتایج این بخش می‌باشد. (Hu and Hui (1996) شیب این خط را برای بستر زبر برابر $11/9$ و برای بستر صاف برابر $19/5$ گزارش کردند. همچنین Ancey et al (2002) برای ذرات کروی از جنس شیشه در یک آبراهه با شیب تند، شیب خط برازش‌یافته بین سرعت میانگین حرکت رسوب و سرعت برشی را برابر 35 به دست آوردند که به دلیل شیب تند آبراهه آزمایشگاهی، با نتایج این تحقیق سازگار نیست. تشابه نتایج حرکت ذرات رسوبی در این تحقیق با نتایج دیگر پژوهشگران در آبراهه مستطیلی نشان می‌دهد که سرعت برشی کف فراسنجه مهمی در بررسی حرکت ذرات رسوبی در آبراهه مستطیلی و همچنین سیلابدشت آبراهه مرکب است. عدد منفی عرض از مبدأ خط برازش یافته نشان می‌دهد که در صورتی که سرعت برشی از مقدار مشخصی ($0/0036$ متر در ثانیه) کوچک‌تر باشد، ذره رسوبی حرکت نخواهد کرد.

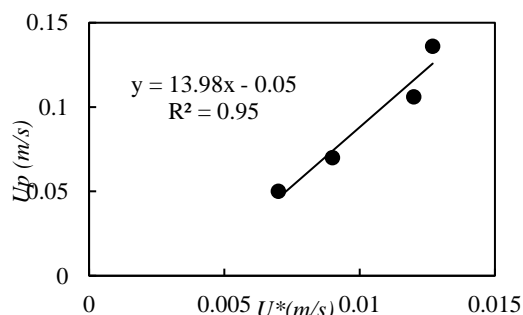


Fig 10 The mean streamwise velocity of sediment particles vs. flow shear velocity

شکل ۱۰ سرعت میانگین طولی ذره رسوبی برحسب سرعت برشی جریان

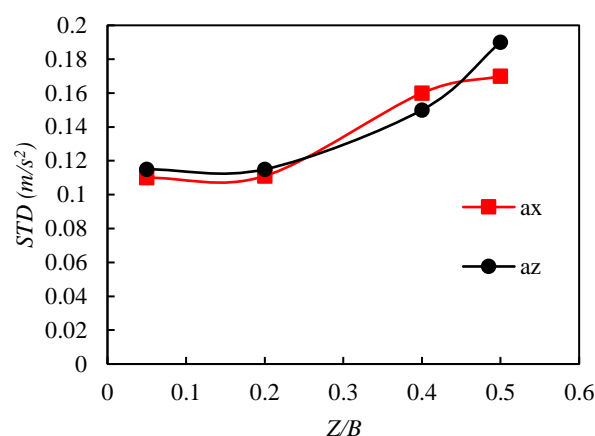


Fig 8 Standard deviation of streamwise and spanwise accelerations of sediment particles at different normalized widths from floodplain side wall

شکل ۸ انحراف معیار شتاب طولی و عرضی ذره رسوبی در عرض‌های نسبی مختلف از دیوار جانبی سیلابدشت

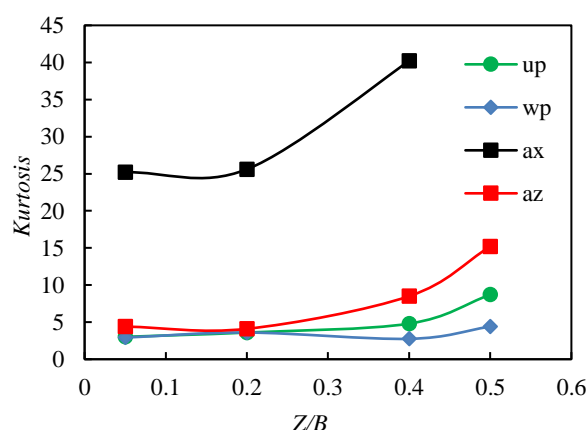


Fig 9 Kurtosis of streamwise and spanwise velocities and accelerations of sediment particles at different normalized widths from floodplain side wall

شکل ۹ کشیدگی سرعت و شتاب طولی و عرضی ذره رسوبی در عرض‌های نسبی مختلف از دیوار جانبی سیلابدشت

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود مقدار کشیدگی سرعت و شتاب با نزدیک شدن به ناحیه اندرکنش افزایش می‌یابد و به عبارت دیگر یکنواختی حرکت ذرات با افزایش عرض بیشتر می‌شود؛ زیرا با نزدیک شدن به ناحیه اندرکنش، سرعت میانگین طولی جریان و نیروی درگ افزایش یافته و موجب یکنواختی بیشتر حرکت ذره رسوبی می‌شود.

تنش برشی بستر و ساختارهای آشفتگی در نزدیکی کف آبراهه، نقش بنیادین در انتقال رسوب و حفاظت بستر رودخانه‌ها بازی می‌کنند. نمودار ۱۰ میزان سرعت میانگین

\bar{x}	میانگین فراسنجه x
Y	محور قائم
Z	محور عرضی
σ	انحراف معیار

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق حرکت ذره رسوبی بستر در سیلابدشت یک آبراهه مرکب مستطیلی به صورت لاگرانژی بررسی و بحث شد که در زیر برخی از نتایج مربوط به حرکت رسوب به طور خلاصه بیان می شود:

- ✓ ذره رسوبی در نزدیکی دیواره سیلابدشت با سرعت کمتر و در ناحیه اندرکنش با سرعت بیشتری جابه جا می شود. ارتباط خطی سرعت میانگین ذره و سرعت برشی جریان نشان می دهد که همخوانی خوبی بین این نتایج با نتایج پژوهشگران پیشین وجود دارد.
- ✓ توزیع سرعت های طولی و عرضی و شتاب عرضی ذرات رسوبی در ناحیه های دور از ناحیه اندرکنش از توزیع نرمال پیروی می کند. با افزایش فاصله از مرکز سیلابدشت و نزدیکی به ناحیه اندرکنش، پیروی فراسنجه های یاد شده از توزیع نرمال تضعیف می شود.
- ✓ مقدار کشیدگی نمودار ستونی شتاب طولی ذره بسیار بالاتر از ۳ است و بنابراین نمودار ستونی شتاب طولی ذره را نمی توان با استفاده از توزیع نرمال برآورد نمود.
- ✓ مقدار کشیدگی نمودار ستونی سرعت و شتاب با نزدیک شدن به ناحیه اندرکنش افزایش می یابد و به عبارت دیگر یکنواختی حرکت ذرات با افزایش عرض بیشتر می شود.

۶- منابع

Abbott, J.E. and Francis, J.R.D. (1977). Saltation and suspension trajectories of solid grains in a water stream. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 284(1321), 225-254.

Ackers, P. (1992). Hydraulic design of two-stage channels. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy, 96(4), 247-257.

Ancey, C., Bigillon, F., Frey, P., Lanier, J. and Ducret, R. (2002). Saltating motion of a bead in a rapid water stream. Physical review E, 66(3), 036306.

Atabay, S., Knight, D.W. and Seckin, G. (2004). Influence of a mobile bed on the boundary shear in a compound channel, River Flow. Proc. 2nd International Conference on Fluvial Hydraulics, 23-25 June, Napoli, Italy, 1, 337-345.

Barati, R. (2016). 3D modeling of granular sediment transport (bed load) by considering turbulence effects: incipient motion and saltation, PhD Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, 168p. (in Persian).

Besio, G., Stocchino, A., Angiolani, S. and Brocchini, M. (2012). Transversal and longitudinal mixing in compound channels. Water Resources Research, 48, W12517, doi:10.1029/2012WR012316.

Chunhong, H., Zuwen, J. and Qingchao, G. (2010). Flow movement and sediment transport in compound channels. Journal of Hydraulic Research, 48(1), 23-32.

Furbish, D.J., Ball, A.E. and Schmeeckle, M.W. (2012). A probabilistic description of the bed load sediment flux: 4. Fickian diffusion at low transport rates. Journal of Geophysical Research, 117, F03034, doi:10.1029/2012JF002356.

Graf, W.H. (1984). Hydraulics of sediment transport. Water Resources Publications, Littleton, Colorado.

۵- فهرست نشانه ها

a	شیب خط برآزش سرعت ذره بر حسب سرعت برشی
a_x	شتاب طولی ذره
a_z	شتاب عرضی ذره
B	عرض آبراهه
N	شمار داده ها
u_p	سرعت میانگین طولی حرکت ذره (m/s)
u_*	سرعت برشی کف (m/s)
$u_{*,0}$	سرعت برشی کف بحرانی (m/s)
w_p	سرعت میانگین عرضی حرکت ذره (m/s)
X	محور طولی
x	فراسنجه دلخواه

- Velocimetry. Modares Mechanical Engineering, 17(8), 164-172. (in Persian).
- Nasrollahi, A. (2010). Numerical simulation of bed load transport using Eulerian-Lagrangian two phase flow, PhD Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, 225p. (in Persian).
- Nelson, J.M., Shreve, R.L., McLean, S.R., Drake, T.G. (1995). Role of near-bed turbulence structure in bed load transport and bed forms mechanics. *Water Resources Research*, 31, 2071–2086.
- Nicholas, A.P. and Walling, D.E. (1998). Numerical modelling of floodplain hydraulics and suspended sediment transport and deposition. *Hydrological Processes*, 12(8), 1339-1355.
- Nikora, V., Habersack, H., and Huber, T. and McEwan, I. (2002). On bed particle diffusion in gravel bed flows under weak bed load transport. *Water Resource Research*, 38(6), 1081, 10.1029/2001WR000513.
- Niño, Y. and García, M. (1998). Using Lagrangian particle saltation observations for bedload sediment transport modelling. *Hydrological Processes*, 12(8), 1197-1218.
- Paiement-Paradis, G., Marquis, G. and Roy, A. (2011). Effects of turbulence on the transport of individual particles as bedload in a gravel-bed river. *Earth Surf. Process. Landforms*, 36, 107–116.
- Ramesh, B., Kothyari, U.C. and Murugesan, K. (2011). Near-bed particle motion over transitionally-rough bed. *Journal of Hydraulic Research*, 49(6), 757–765.
- Raudkivi, A. J., (1998). *Loose Boundary Hydraulics*. A.A. Balkema, Brookfield, Vt.
- Roseberry, J.C., Schmeckle, M.W. and Furbish, D.J. (2012). A probabilistic description of the bed load sediment flux: 2. Particle activity and motions. *Journal of Geophysical Research*, 117. F03032, doi:10.1029/2012JF002353
- Souri, F. (2017). Particle Tracking in Compound Channel, MSc Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, 110p. (in Persian).
- Tang, X. and Knight, D.W. (2006). Sediment Transport in River Models with Overbank Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(1), 77-86.
- Hu, C. and Hui, Y. (1996). Bed-load transport. I: Mechanical characteristics. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(5), 245-254.
- Ikeda, S. and McEwan, I.K. (2007). Flow and sediment transport in compound channels. IAHR monograph, Madrid, Spain.
- Julien, P.Y. and Bounvilay, B. (2013). Velocity of Rolling Bed Load Particles. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139, 177-186.
- Karamisheva, R.D., Lyness, J.F., Myers, W.R.C., Cassells, J.B.C. and Sullivan, J.O. (1979). Sediment transport formulae for compound channel flows. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water Management* 159 September 2006 (Issue WM3), 183–193
- Lee, H.Y. and Hsu, I.S. (1994). Investigation of saltating particle motions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(7), 831-845.
- Lee, H.Y., Lin, Y.T., Yunyou, J. and Wenwang, H. (2006). On three-dimensional continuous saltating process of sediment particles near the channel bed. *Journal of Hydraulic Research*, 44(3), 374-389.
- Lee, H.Y., You, J.Y. and Lin, Y.T. (2002). Continuous saltating process of multiple sediment particles. *Journal of hydraulic engineering*, 128(4), 443-450.
- Lajeunesse, E., Malverti, L. and Charru, F. (2010). Bed load transport in turbulent flow at the grain scale: Experiments and modeling. *Journal of Geophysical Research*, 115, F04001, doi:10.1029/2009JF001628.
- Martin, R.L., Jerolmack, D.J. and Schumer, R. (2012). The physical basis for anomalous diffusion in bed load transport. *Journal of Geophysical Research*, 117, F01018, doi:10.1029/2011JF002075.
- Mehdizadeh, S. (2009). Experimental investigation of sediment particle motions near the channel bed using PIV technique, MSc Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, 110p. (in Persian).
- Nabipour, M., Salehi Neyshabouri, S.A.A., Mohajeri, S.H., Zarrati, A.R. and Zabetian Toroghi, M. (2017). Study on turbulent flow in a compound channel with shallow overbank using Particle Image