



Experimental Investigation of the Effect of Bed's Coarse Grain Sediments on the Critical Shear Stress for Deposition of Suspended Sediments

Milad Khastar Boroujeni¹, Saeed Reza Khodashenas^{2,*}, Hosien Samadi Boroujeni³

¹ PhD Student, Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Professor, Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

³ Associate Professor, Water Engineering Department, Head of Water Resources Research Center, Shahrekord University, Iran

ABSTRACT: The importance of sediments studies for safety design of hydraulic structures has been drawn attention by river engineers. Determining the critical shear stress for suspended sediment is of highly significant in sediment hydraulics. Therefore in this research, the deposition process of suspended sediment in the presence of bed sediment has been investigated. Deposition experiments were carried out in the circular flume for three values of shear stress, six types of beds (smooth bed and five coarse-grained sediments) with initial concentrations of 5, 10 and 20 g/l. The results showed that, for the same initial concentration and equal velocity of flume rotation, the deposition of suspended sediments in the bed containing sediments is higher than that of the smooth bed. However, for specific flume rotation velocity, the bed coarse-grained increased the average of flow shear stresses. It was also found that bed sediments generally increased the critical shear stress for all deposition relative to the smooth bed. Accordingly, it can be explained that in the bed with coarse grain sediments, in the flow with bigger turbulence, full deposition conditions for suspended sediments still exist. The results of this study showed for threshold critical shear stress in a smooth bed, for shear stress of less than 1.28 N/m², sediments are in the state of the deposition threshold, but for bed containing coarse grain sediment was observed in which the suspended sediments was deposited in each flow shear stress and trapped among bed sediments. Also, it can be stated that due to the phenomenon of trapping suspended sediments in the bed containing coarse grain sediments, cannot be considered threshold critical shear stress for deposition of suspended sediments.

Review History:

Received: 2018-12-30

Revised: 2019-02-12

Accepted: 2019-02-16

Available Online: 2019-02-20

Keywords:

Entrapment

Erosion Rate

Circular Flume

Cohesive Sediments;

Critical Shear Stress

1. INTRODUCTION

Entrapment of fine sediment in coarse river bed substrate impacts on both the roughness characteristics of the river bed and the quality of river habitat. Fine sediment fills the interstitial space and changes the grain size distribution of the material forming the bed layer. It also alters the porosity and permeability of the stream bed, which in turn can have an effect on the ecology in the hyporheic zone [1]. Excessive infiltration of fine sediment into gravel beds can have deleterious effects on benthic organisms. The clogging of salmonid redds can smother eggs due to a reduction in re-oxygenating intra-gravel flows [2]. Colmation refers to the retention processes that can lead to the clogging of the top layer of channel sediments and decolmation refers to the resuspension of deposited fine particles. Internal colmation, clogging of the interstices directly below the armor layer, may form a thin seal that disconnects surface water from hyporheic water by inhibiting exchange processes. The settling of particles under low flow conditions can cause external colmation. Colmated channel sediments are characterized by reduced porosity and hydraulic conductivity as well as by a consolidated texture

*Corresponding author's email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir

[3]. The presence of coarse bed sediments and the process of entrapping the cohesive sediments, the prediction of the behavior of cohesive sediments is problematic. So far, little research has been carried out about the mass of cohesive sediment stored in coarse gravel beds, and there is no coherent and categorized information in this area. The purpose of this study was to investigate the effect of bed sediments on the critical shear stress for deposition.

2. METHODOLOGY

2-1 Sediments

These fine sediments contain 63.2% silt and 36.8% clay. The liquid limit (LL), plastic limit (PL) and plasticity index of the sediment was obtained as 48.0%, 37.2% and 10.8%, respectively, based on the ASTM-D-423 standard. The characteristics of coarse grained sediment are also showed in Table 1. Fig 2 shows the size distribution curve of sediments used in this study.

2-2 Annular Flume

The deposition characteristics of fine sediments were studied in an annular flume located at the Hydraulics



Table 1. Characteristics of coarse grained sediment

Parameter	Very Fine (B ₁)	Fine (B ₂)	Medium (B ₃)	Coarse (B ₄)	Very Coarse (B ₅)
D ₁₀	2.1	4.5	8.2	16.9	35.2
D ₃₀	2.4	5.3	8.8	20.9	41.5
D ₅₀	2.8	6.0	9.4	24.1	48.2
D ₆₀	2.9	6.5	10.1	27.1	53.1
Uniformity Coefficient	1.3	1.4	1.2	1.6	1.5
Curvature Coefficient	0.94	0.96	0.94	0.95	0.92

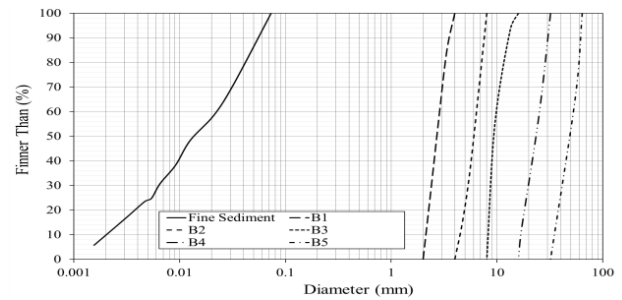


Fig. 1. Sediment gradation curve

Table 2. Critical shear stress for threshold and full deposition

Critical shear stress (N/m ²)	B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
Full Deposition	0.038	0.083	0.075	0.069	0.056	0.045
C _{eq} /C ₀	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Threshold of Deposition	1.0	50	50	50	50	50
C _{eq} /C ₀	1	0.41	0.58	0.69	0.48	0.53

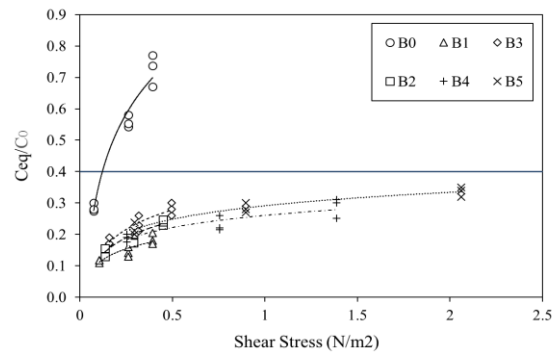


Fig. 2. Values of C_{eq}/C₀ for different beds against flow shear stress

Laboratory of Shahrekord University, Iran. The flume has a mean diameter of 1.6 m, is 0.30 m wide and 0.47 m deep, and rests on a rotating platform which is 1.9 m in diameter. A circular rotating ring was fitted inside the flume in order to regulate the flow velocity just at water surface of the flume. Bed shear stresses can be controlled by changing the rotational speeds of the flume and its rotating ring in inverse direction. The results showed that secondary flow are minimized and shear stress is uniform across the flume width when ratio of rotational speed of ring to flume is chosen at 1.1 ($N_r/N_f=1.1$). In this case, based on the obtained results, velocity profiles in the rotating flume were similar to flow pattern in a straight channels [4].

2-3 Experimental procedure

The tests were carried out for three different bed-shear stress conditions, three different initial sediment concentrations (5, 10 and 20 gr/l) and six state of bed rough. The first state of the bed, without coarse-grained sediment (smooth bed), and the other five, contains coarse-grained sediments of varying sizes. The depth of the coarse grain sediments in the flume floor was considered according to the particle diameter of 10 cm ($SD > 2d_{50}$). In order to maintain the hydraulic conditions and to sample the same valves in both mode of bed (smooth and rough bed), a metal plate made of galvanized steel was installed in ten centimeters of the flume floor for a bed whiteout coarse grain sediments

test. The initial concentration of sediments was determined according to the volume of fluid corresponding to 20 cm depth and after mixing with an electric stirrer, it entered the moving flume. In the experiments with coarse grain sediments, after the completion of each experiment, the flume was completely vacated and cleaned for conducting the next subsequent experiments. Finally on basis $N_r/N_f=1.1$, the experiments were carried out for three rounds of flume and the lid of 2.4, 4.2 and 6.2 rpm. In order to determine the flow shear stress and velocity in each mode of bed (smooth and five sizes of bed sediments) were measured, using Acoustic Doppler Velocimeter (ADV). All experiments were done for a period of 300 minutes, and in the meanwhile, the test samples were collected in a sampling interval of 15 min during the first hour, and 30 minutes thereafter. The samples were taken from depths 4.9, 8.3, 12.8 and 17.8 cm from the bottom and then, sample concentrations were measured by drying and weighting method.

3. DISCUSSION AND RESULTS

3-1 Critical Shear Stress

In flow shear stresses, lower than threshold shear stress for deposition, particles of sediment suspended over turbulence stream overcome and allowed to settle. Also when the bed shear stress is smaller than the critical shear stress for full deposition all sediment particles and flocs are deposited. Hence, in this paper, using the equilibrium concentration of sediments, investigated

critical shear stresses of suspended sediments. Accordingly, shear stress, which is $C_{eq}/C_0=1$, was selected as the threshold shear stress and shear stress, which is $C_{eq}/C_0=0.1$, was considered as a critical shear stress for full deposition. The value of full and partial deposition shown in Table 2.

The results show that the bed sediments generally increase the critical shear stress for full deposition than the smooth bed. Accordingly, it can be stated that in the bed with coarse-grained sediments, in the course of turbulence more, still full settling conditions are available for suspended sediments. As seen in Table 2, in bed containing coarse-grained sediments, increasing the diameter of bed sediments leads to a reduction in the critical shear stress for full deposition, so that the highest amount of shear stress is related to the first bed ($D_{50}=2.8$ mm), and the lowest is the fifth bed ($D_{50}=48.2$ mm). But a remarkable point is in the critical shear stresses for threshold deposition. In this case, in a smooth bed for shear stresses of less than 1.28 N/m², suspended sediments are in threshold deposited, but for bed containing coarse-grained sediments conditions it is observed that even in big shear stresses, the C_{eq}/C_0 is less than one. This suggests that in any state of turbulence, there is a possibility of deposition in bed containing coarse-grained sediments, and in fact suspended sediments are trapped between the bed sediments. Fig. 2 shows the values of C_{eq}/C_0 for different mode bed against flow shear stress, as seen for bed containing coarse-grained sediments, the C_{eq}/C_0 variations in the region of 0.4 have horizontal asymmetries.

4. CONCLUSIONS

Coarse grain sediment in bed cause trapped of suspended sediments and deposited more of these sediments than smooth bed. The results showed that the presence of coarse-grained sediment increases critical stress for full deposition. critical shear stresses for threshold deposition. In this case, in a smooth bed for shear stresses of less than 1.28 N/m², suspended sediments are in threshold deposited, but for bed containing coarse-grained sediments conditions it is observed that even in big shear stresses, the C_{eq}/C_0 is less than one.

5. REFERENCES

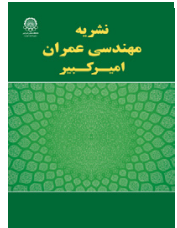
- [1] B.G. Krishnappan, P. Engel, 2006. "Entrapment of fines in coarse sediment beds", 2006, *River Flow Ferreira, Alves, Leal and Cardoso (eds). Taylor and Francis Group, London*, 817–824.
- [2] D. Huston, J. Fox, 2015. "Clogging of fine sediment within gravel substrates: dimensional analysis and macroanalysis of experiments in hydraulic flumes", *Journal of Hydraulic Engineering*, 141:04015015.
- [3] K. Glasgerben, M. Stone, B. Krishnappan, J. Dixon, U. Silins, 2015, "The effect of coarse gravel on cohesive sediment entrapment in an annular flume", *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, pp. 5
- [4] Khastar-Boroujeni, M., Esmaili, K., Samadi-Boroujeni, H., Ziaei, A.N., 2018. "Wastewater Effect on the Deposition of Cohesive Sediment", *Journal of Environmental Engineering, ASCE*.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Khastar Boroujeni, S.R. Khodashenas, H. Samadi Boroujeni, *Experimental Investigation of the Effect of Bed's Coarse Grain Sediments on the Critical Shear Stress for Deposition of Suspended Sediments, Amirkabir J. Civil Eng., 52(7) (2020) 397-400.*

DOI: [10.22060/ceej.2019.15541.5942](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15541.5942)





بررسی آزمایشگاهی تاثیر رسوبات درشت دانه بستر بر تنش برشی بحرانی ته نشینی رسوبات معلق

میلاذ خواستار بروجنی^۱، سعیدرضا خداشناس^{۲*}، حسین صمدی بروجنی^۳

^۱ دانشجوی دکتری سازه های آبی دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ استاد گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه شهرکرد

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۰-۰۹

بازنگری: ۱۳۹۷-۱۱-۲۳

پذیرش: ۱۳۹۷-۱۱-۲۷

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۲-۰۱

کلمات کلیدی:

تله اندازی

تنش برشی بحرانی

رسوبات چسبنده

فلوم دایره ای

نرخ ته نشینی

خلاصه: اهمیت مطالعات رسوب در مباحث مهندسی رودخانه و احداث سازه های هیدرولیکی به خوبی شناخته شده است. در این میان تنش برشی بحرانی ته نشینی رسوبات معلق یکی از پارامترهای بسیار مهم در مباحث هیدرولیک رسوب می باشد. از این رو در این تحقیق به بررسی تنش برشی بحرانی ته نشینی رسوبات در حضور رسوبات بستر پرداخته شده است. به همین منظور آزمایش های ته نشینی با استفاده از یک فلوم دایره ای به قطر ۱/۹ و عرض ۰/۳ متر و در سه تنش برشی جریان، شش حالت از بستر (بستر صاف و پنج دانه بندی رسوبات درشت دانه) و با غلظت های اولیه ۵، ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر انجام شد. نتایج نشان داد به ازای غلظت اولیه یکسان و سرعت برابر چرخش فلوم، ته نشینی رسوبات معلق در بستر حاوی رسوبات نسبت به حالت بستر صاف بیشتر است. این در حالی است که برای سرعت های مشخص چرخش فلوم، رسوبات درشت دانه بستر موجب افزایش تنش برشی متوسط جریان می شوند. همچنین مشخص شد رسوبات بستر به طور کلی موجب افزایش تنش برشی ته نشینی کامل نسبت به بستر صاف می شوند. بر این اساس می توان اظهار داشت که در بستر با رسوبات درشت دانه، در جریان با آشفتگی بیشتر، همچنان شرایط ته نشینی کامل برای رسوبات معلق فراهم است. نتایج این تحقیق برای مقادیر تنش برشی آستانه ته نشینی نشان داد در بستر صاف به ازای تنش های برشی کمتر از ۱/۲۸ نیوتن بر متر مربع رسوبات در آستانه ته نشینی قرار می گیرند، اما برای بستر های حاوی رسوبات درشت دانه مشاهده شد که در هر تنش برشی جریان رسوبات معلق ته نشین و در میان رسوبات بستر تله اندازی می شوند. بر این اساس می توان بیان داشت که به دلیل پدیده تله اندازی رسوبات معلق، در بستر های حاوی رسوبات درشت دانه نمی توان تنش برشی آستانه فرسایش برای رسوبات معلق در نظر گرفت.

۱- مقدمه

رسوبات چسبنده با قطر کمتر از ۰/۰۶۳ میکرون متشکل از رس و مواد ارگانیک می باشند که این ترکیب موجب چسبندگی ذرات، همآوری^۱ توده ها و پیچیدگی در رفتار آن ها می شود [۲]. همآوری یک فرآیند فیزیک و شیمیایی ترکیبی است که در آن ذرات با یکدیگر برخورد می کنند و با توجه به میزان بار الکتروشمیایی در سطح ذرات می توانند تشکیل توده های بزرگتری دهند یا این که با ساختار اصلی خود با توجه به شدت آشفتگی جریان به صورت معلق باقی بمانند یا ته نشین شوند. رفتار ته نشینی توده های رسوبی از طریق

انتقال رسوبات یکی از پر اهمیت ترین مباحث در مدیریت و بهره برداری سدها، شبکه های انتقال، سواحل و مهندسی رودخانه می باشد که در چند دهه اخیر بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است. از این میان تنش برشی بحرانی فرسایش و ته نشینی رسوبات معلق یکی از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار در دقت مدل های انتقال رسوبات چسبنده است که به منظور پیش بینی میزان رسوب گذاری یا فرسایش مورد استفاده قرار می گیرند [۱].

1 Flocculation

* نویسنده عهده دار مکاتبات: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir



$$P_d = 1 - \frac{\tau}{\tau_{d,part}}, \quad \tau_c \leq \tau \leq \tau_{d,part} \quad (4)$$

در حال حاضر، تعیین تنش برشی بحرانی برای ته نشینی کامل و جزئی قابل پیش بینی و مسلم نمی باشد. اما باید خاطر نشان کرد که دقت در مدل های ته نشینی کاملاً وابسته به مقدار صحیح مقادیر تنش برشی بحرانی است. بنابراین، زمانی که مقدار واقعی تنش برشی بحرانی برای ته نشینی کامل و جزئی نامعلوم است، ابتدا باید پارامتر برای تعیین دبی ته نشینی کالیبره شود. آزمایش های بسیاری برای تعیین مقدار تنش برشی بحرانی برای ته نشینی کامل رسوبات چسبنده انجام شده است. تنش برشی ته نشینی کامل دارای مقدار کوچکی است و به طور کلی مقدار 0.05 تا 0.1 نیوتن بر متر مربع در آزمایش ها به دست آمده است [۸].

کرون [۴]، با انجام یک سری آزمایش در فلوم مستقیم مقدار تنش برشی بحرانی را برای ته نشینی کامل، تعیین نمود. این محقق برای رسوبات خلیج سان فرانسیسکو مقادیر زیر را به دست آورد.

$$\tau_{(d,full)} = 0.06 \frac{N}{m^2} \quad for \quad c < 0.3 \quad \frac{g}{l}; \quad \tau_{(d,full)}$$

$$= 0.078 \frac{N}{m^2} \quad for \quad c < 0.3 - 10 \quad \frac{g}{l}$$

مهتا و پارتندیس^۱ [۵] مقدار تنش برشی 0.15 نیوتن بر متر مربع را برای رس کائولونیت در آب مقل به دست آوردند [۱]. همچنین در آزمایش های کریشناپان و استفان [۹] مقدار تنش برشی بحرانی ته نشینی برای رسوبات رودخانه آتاباسکا، 0.1 نیوتن بر متر مربع به دست آمد.

میلبورن و کریشناپان [۸] دریافتند که رسوبات رودخانه ها با تنش برشی بزرگتر از 0.4 نیوتن بر مترمربع به صورت معلق باقی می ماند. ما^۲ و همکاران [۲] نیز با انجام آزمایش هایی در فلوم دوار تنش برشی حداقل برای جلوگیری از ته نشینی رسوبات چسبنده از نوع کائولونیت را 0.83 نیوتن بر مترمربع به دست آوردند.

خواستار بروجنی و همکاران [۱۰] با بررسی تاثیر پساب تصفیه شده شهری بر فرآیند ته نشینی رسوبات چسبنده با استفاده از فلوم دایره ای نشان دادند که به طور متوسط پساب سبب افزایش 30% میزان ته نشینی رسوبات می شود. این محققین تنش برشی بحرانی

آشفتگی جریان و پویایی تعامل شکستن توده ها و برخورد دوباره آن ها با یکدیگر و تشکیل توده های بزرگتر کنترل می شود [۳].

نگرش کلاسیک ته نشینی رسوبات چسبنده توسط کرون [۴]، مهتا [۵] و مهتا و پارتندیس [۶] توسعه یافت. این نگرش وابسته به پارامتر تنش برشی بحرانی ته نشینی (τ_{cd}) و حداکثر شار ته نشینی رسوبات در بالای بستر ($W_s C$) است. این رویکرد مبتنی بر این تعریف است که فرآیند ته نشینی را جابه جایی رسوبات معلق در ستون آب به بستر و مهمتر از همه چسبندگی ذرات به بستر توصیف می کند. کرون ۱۹۶۲ رابطه زیر را برای نرخ ته نشینی ارائه نمود [۷].

$$Q_d = P_d \omega c, \quad for \quad \tau \leq \tau_{d,full} \quad (1)$$

در این رابطه Q_d : نرخ ته نشینی رسوب، P_d : احتمال ته نشینی، ω : سرعت سقوط توده ها و c : غلظت رسوبات چسبنده معلق است. پارامتر P_d در واقع احتمال چسبیدن ذرات به بستر هستند که همراه با جریان جابه جا نمی شوند. بخشی از این رسوبات چسبنده در ناحیه نزدیک بستر نمی تواند در برابر تنش برشی بزرگ در ناحیه مشترک آب و بستر مقاومت کند و به سمت بالا حرکت کرده و به صورت معلق در می آید. احتمال ته نشینی از رابطه (۲) به دست می آید.

$$P_d = \frac{1 - \tau}{\tau_{d,full}}, \quad for \quad \tau \leq \tau_d \quad (2)$$

در این رابطه τ : تنش برشی بستر، $\tau_{d,full}$: تنش برشی بحرانی برای ته نشینی کامل رسوبات است.

ته نشینی جزئی، زمانی که تنش برشی کف بزرگتر از تنش برشی بحرانی برای ته نشینی کامل باشد، اتفاق می افتد. مقدار تنش برشی بحرانی، برای ته نشینی جزئی کوچک می باشد. در محدوده تنش برشی بستر، توده های نسبتاً قوی ته نشین شده و توده های ضعیف به طور معلق باقی می ماندند. ته نشینی جزئی از رابطه (۳) که حالت اصلاح شده رابطه ی نرخ ته نشینی کرون [۴] است و برای حالت بروز تعادل بین بستر و مخلوط معلق آب و رسوب قابل کاربرد است به دست می آید [۲]. در این رابطه C_{eq} غلظت تعادلی، $\tau_{d,part}$ تنش برشی آستانه ته نشینی رسوبات و دیگر پارامترها مشابه روابط قبلی است.

$$Q_d = P_d \omega (c - c_{eq}), \quad for \quad \tau_{d,full} < \tau < \tau_{d,part} \quad (3)$$

1 Metha and Partheniades

2 Maa

ته نشینی رسوبات چسبنده موجب تشکیل یک لایه مسدود کننده بر روی رسوبات بستر می شود که با اختلال در تبادل و گردش آب موجب تخریب زیستگاه آبزیان می شود. محققین بر این باورند که تله اندازی رسوبات در مواد بستر تا زمان تشکیل لایه مسدود کننده ادامه می یابد و از آن پس افزایش تله اندازی رسوب را به حرکت ذرات بستر که مانع تشکیل لایه مسدود شونده در بالای سطح بستر رودخانه می شود، نسبت داده اند. لایه مسدود کننده تحت شرایط بستر ثابت از طریق داخل شدن ذرات رس به منافذ خالی بستر تشکیل می شود. لایه مسدود کننده فرایند مکش و به همان نسبت نفوذ ذرات به بستر را کاهش می دهد [۱۵]. گلسبرگن و همکاران [۱۶] به بررسی تله اندازی رسوبات معلق رودخانه Elbow در میان رسوبات بستر رودخانه پرداختند. این محققین نشان دادند که ضریب تله اندازی رسوبات ماسه ای بستر ۰/۲ می باشد که بر این اساس، هنگامی که شرایط جریان برای ایجاد تنش برشی ($Pa < ۱۶$) که بتواند لایه مسدود کننده را حرکت دهد، رسوبات چسبنده ای که درون بستر ماسه به دام افتاده، حرکت کرده و به مخزن Glenmore منتقل می شود، جایی که مواد مغذی همراه با رسوب ممکن است چالش هایی را برای تامین آب آشامیدنی ایجاد کند.

نظر به اهمیت مطالعات رسوب و همچنین تاثیرات زیست محیطی رسوبات چسبنده بر محیط های آبی، این تحقیق با هدف بررسی تاثیر رسوبات درشت دانه بستر بر فرآیند ته نشینی انجام شد. با توجه به این که در مطالعات دیگر به تاثیر رسوبات درشت دانه بستر بر تغییرات تنش های برشی بحرانی ته نشینی رسوبات معلق پرداخته نشده است، این موضوع را می توان به عنوان نوآوری پژوهش حاضر معرفی نمود. به همین منظور آزمایش ها با استفاده از یک فلوم دایره ای و در حالت های مختلف زبری بستر، تنش برشی و غلظت های اولیه رسوبات معلق انجام شده تا بر اساس نتایج آن بتوان رفتار رسوبات چسبنده در این شرایط را شناخت.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- تهیه رسوبات

برای رسیدن به اهداف این تحقیق، احتیاج به رسوبات ریزدانه و درشت دانه است. رسوبات مورد نیاز این تحقیق از بستر و کناره های رودخانه ارمنند که از حوضه کارون شمالی سرچشمه می گیرد

ته نشینی کامل رسوبات را برای آب خالص، ۳۰ و ۶۰ درصد پساب بترتیب برابر ۰/۰۵۳، ۰/۰۷۵ و ۰/۰۷۰ نیوتن بر مترمربع بدست آوردند.

صمدی و همکاران [۱۱] به بررسی فرآیند ته نشینی رسوبات معلق در مخزن سد کرخه پرداختند که بر اساس نتایج این محققین تنش برشی آستانه ته نشینی معادل ۰/۱ نیوتن بر متر مربع بدست آمد. همچنین مشخص شد در حالتی که سرعت جریان بیشتر از ۰/۶۱ متر بر ثانیه باشد، رسوبات به صورت معلق باقی مانده و ته نشین نمی شوند که در این شرایط، تنش برشی معادل ۲/۵۵ نیوتن بر متر مربع و عدد فرود جریان برابر ۰/۴۳ بدست آمد.

وجدانی و قمشی [۱۲] به بررسی پدیده فرسایش و تنش برشی بحرانی فرسایش رسوبات چسبنده در شش کانال آبیاری در خوزستان پرداختند. نتایج آزمایشگاهی این محققان نشان داد تنش برشی بحرانی فرسایش رسوبات کانال های مورد مطالعه بین ۰/۹۶ برای منطقه شادگان تا ۲/۳ نیوتن بر متر مربع برای منطقه هندیجان متغیر است.

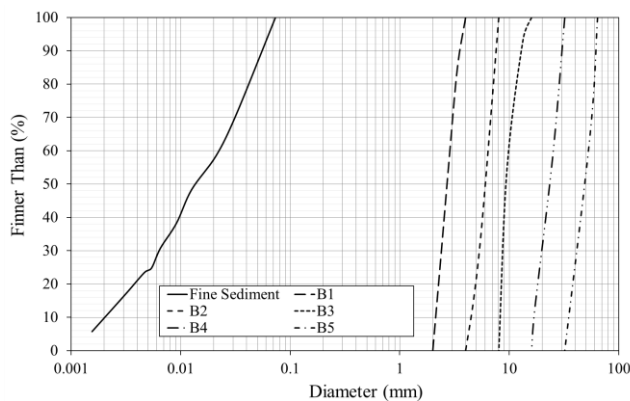
ته نشینی رسوبات ریزدانه در میان ذرات بستر یکی از پدیده های رایج در مجاری طبیعی است که بر ویژگی های زبری بستر رودخانه و کیفیت محیط رودخانه تاثیر می گذارد. رسوبات معلق در فضای بین رسوبات بستر فرو می روند و توزیع دانه بندی بستر را تغییر می دهند. همچنین این موضوع تخلخل و نفوذپذیری بستر را تغییر می دهد که به نوبه خود می تواند بر محیط زیست رودخانه در منطقه ی هیپوریک^۱ تاثیرگذار باشد. ته نشینی رسوبات چسبنده می تواند پایداری اکوسیستم آبزیان، میزان مواد مغذی و چرخه کربن بستر رودخانه را تغییر دهد و موجب ایجاد مشکلات زیست محیطی شود [۱۳].

کریشناپان و انگل [۱۴] با استفاده از فلوم دایره ای مطالعات تله اندازی رسوبات ریزدانه در بین رسوبات بستر با قطر متوسط مختلف در محدوده اندازه ماسه (۱ میلی متر) تا شن ریز (۸ میلی متر) برای تنش های برشی متفاوت مورد بررسی قرار دادند. این محققین نشان دادند اکثر رسوبات ریزدانه معلق در بین درشت دانه های بستر به دام افتادند و در این آزمایش ها شرایط دوباره معلق شدن برای رسوبات امکان پذیر نبود.

1 Hyporheic

به اینورتر است که قادر به چرخش فلوم و درپوش با سرعت چرخش قابل تنظیم می باشد. ضمن اینکه این دستگاه قابلیت چرخش در هر جهت دلخواه را فراهم نموده است. بر روی دیواره فلوم ۳۲ عدد شیر نمونه‌گیری در چهار موقعیت مختلف فلوم و در فواصل ۵/۳، ۱۰/۵، ۱۵/۲، ۱۸/۳، ۲۲/۲، ۲۶/۸، ۳۰/۵ و ۳۴ سانتی‌متر از کف جهت سنجش غلظت مواد معلق در ستون آب، تعبیه شده است. شکل ۲ نمای شماتیک و قسمت های مختلف این فلوم را نشان می دهد.

بررسی پارامترهای هیدرولیکی در این فلوم دوار نشان می دهد زمانی که درپوش و فلوم در جهت مخالف یکدیگر بچرخند و نسبت سرعت چرخش درپوش به فلوم ۱/۱ باشد؛ پروفیل سرعت در فلوم دایره ای به صورت لگاریتمی و مشابه کانال های باز است. رابطه سرعت متوسط و تنش برشی جریان با مجموع سرعت چرخش فلوم و درپوش برای این فلوم در حالت بستر صاف، به صورت زیر می باشد



شکل ۱. منحنی دانه بندی رسوبات ریزدانه و درشت دانه مورد استفاده در تحقیق حاضر

Fig. 1. Sediment gradation curve

جدول ۱. مشخصات فیزیکی رسوبات درشت دانه بستر

Table 1. Characteristics of coarse grained sediment

پارامتر	بستر اول (B ₁)	بستر دوم (B ₂)	بستر سوم (B ₃)	بستر چهارم (B ₄)	بستر پنجم (B ₅)
D ₁₀	۲/۱	۴/۵	۸/۲	۱۶/۹	۳۵/۲
D ₃₀	۲/۴	۵/۳	۸/۸	۲۰/۹	۴۱/۵
D ₅₀	۲/۸	۶/۰	۹/۴	۲۴/۱	۴۸/۲
D ₆₀	۲/۹	۶/۵	۱۰/۱	۲۷/۱	۵۳/۱
ضریب یکنواختی	۱/۳	۱/۴	۱/۲	۱/۶	۱/۰۳
ضریب انحنای	۰/۹۴	۰/۹۶	۰/۹	۰/۹۵	۰/۹۹

و نهایتاً به سد کارون ۴ می ریزد، جمع آوری و تهیه شد. پس از جداسازی رسوبات درشت دانه به منظور تهیه رسوبات ریزدانه، باقی مانده رسوبات در آب حل و سپس از الک شماره ۲۰۰ استاندارد ASTM عبور داده شد. رسوبات عبوری از الک شماره ۲۰۰ با قطر ۰/۰۷۵ میلی متر بر اساس تعاریف در گروه رسوبات رس و سیلت قرار می گیرد که دارای خاصیت چسبندگی نیز خواهند بود.

رسوبات درشت دانه نیز بر اساس تقسیم بندی اتحادیه ژئوفیزیک آمریکا، در محدوده شن و قله سنگ (اندازه بین ۲ تا ۶۴ میلی‌متر) و در پنج محدوده بسیار ریز (B_۱) با قطر متوسط بین ۲ تا ۴ میلی متر، محدوده ریز (B_۲) با قطر متوسط بین ۴ تا ۸ میلی متر، و محدوده متوسط (B_۳) با قطر متوسط ۸ تا ۱۶ میلی متر، محدوده درشت (B_۴) با قطر متوسط بین ۱۶ تا ۳۲ میلی متر و محدوده خیلی درشت (B_۵) با قطر متوسط بین ۳۲ تا ۶۴ میلی متر جداسازی شد. رسوبات درشت دانه به گونه ای انتخاب شد که دارای دانه بندی یکنواخت باشند (ضریب یکنواختی کمتر از ۴ و ضریب انحنای کمتر از ۱/۵). در شکل ۱ دانه بندی رسوبات مورد استفاده ارائه شده است.

بر اساس نتایج آزمایش هیدرومتری، رسوبات ریزدانه حاوی ۶۳ درصد رس، ۳۷ درصد سیلت و با قطر متوسط ۰/۰۱۴ میلی متر و شش درصد ماده آلی می باشند. حدود اتریرگ برای رسوبات بر اساس استاندارد ASTM-D-۴۲۳ مشخص شد که بر این اساس حد خمیری، حد روانی و شاخص خمیری بترتیب ۲۰، ۲۹ و ۵۱ درصد بدست آمد. مشخصات رسوبات درشت دانه نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده

آزمایش های تله اندازی رسوبات با استفاده از فلوم دایره ای موجود در آزمایشگاه تحقیقات منابع آب دانشگاه شهرکرد انجام شد. قطر داخلی، خارجی و متوسط این فلوم به ترتیب ۱/۳، ۱/۹ و ۱/۶ متر و عرض و ارتفاع آن بترتیب ۳۰ و ۵۰ سانتی متر می باشد. این فلوم از ورق گالوانیزه با پنجره های پلکسی گلس ساخته شده و یک درپوش از جنس پلکسی گلس با قطر ۱/۶ متر در داخل فلوم به گونه ای طراحی شده که از دیواره های فلوم دو سانتی متر فاصله دارد و قابلیت تنظیم برای قرارگیری بر روی سطح آب فلوم با هر عمق دلخواه را دارا می باشد. فلوم دارای دو الکتروموتور مجزا مجهز

سانتی متر ($SD > 2d_p$) در نظر گرفته شد. همچنین به منظور ثابت بودن شرایط هیدرولیکی و نمونه گیری از شیرهای مشابه در هر دو حالت، ورقه ای فلزی از جنس گالوانیزه در ده سانتی متری از کف فلوم برای آزمایش های بستر صاف نصب شد.

غلظت های اولیه رسوبات با توجه به حجم سیال در فلوم متناظر با ۲۰ سانتی متر عمق تهیه و پس از مخلوط کردن با همزن الکتریکی وارد فلوم در حال حرکت شد. مدت زمان آزمایش ها برای رسیدن به غلظت تعادلی در پایان آزمایش، پنج ساعت انتخاب و به منظور سنجش غلظت رسوبات معلق در یک ساعت اول هر ۱۵ دقیقه یکبار و بعد از آن هر ۳۰ دقیقه نمونه گیری انجام شد. در هر زمان از عمق های ۵/۲، ۸/۳، ۱۲/۲ و ۱۶/۸ سانتی متری بستر و چهار موقعیت فلوم نمونه گیری بعمل آمد. سپس با خشک کردن نمونه ها در آون، غلظت رسوبات معلق در هر زمان با توجه به فاصله قرارگیری شیرهای نمونه گیری، به روش وزنی محاسبه شد.

در آزمایش ها با بستر درشت دانه پس از پایان یافتن هر آزمایش، فلوم به طور کامل تخلیه و پس از شستشوی کامل رسوبات بستر، شرایط برای آزمایش های بعدی فراهم می شد. در آزمایش ها با بستر صاف ترتیب آزمایش ها بدین گونه بود که ابتدا کمترین غلظت رسوب (۵ گرم بر لیتر) تهیه و آزمایش ها برای سه تنش برشی انجام پذیرفت. در این پژوهش روند اعمال تنش برشی از مقدار تنش برشی کمتر به سمت تنش برشی بزرگ تر بود. در ادامه ی آزمایش ها با افزودن رسوب، غلظت های بعدی (۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر) تهیه و آزمایش ها به همین ترتیب ادامه یافت.

سرعت های جریان (کمینه و بیشینه) به گونه ای انتخاب شدند که تنش برشی جریان برای تمام غلظت های رسوب در حالت بستر صاف و بستر زبر در محدوده تنش برشی آستانه و ته نشینی کامل رسوبات معلق قرار گیرد. به همین منظور پیش آزمایش ها به نحوی صورت گرفت که غلظت ۵ گرم بر لیتر رسوبات (کمینه غلظت)، جهت تعیین سرعت حداکثر و غلظت ۲۰ گرم بر لیتر (بیشینه غلظت) نیز برای تعیین سرعت حداقل انتخاب شد. بر این اساس با انجام آزمایش های اولیه اختلاف سرعت فلوم و درپوش (با نسبت ۱/۱) که در آن ۸۰٪ رسوبات معلق ته نشین شوند به عنوان سرعت کمینه و در حالتی که حدود ۸۰٪ رسوبات به صورت معلق باقی بمانند، به عنوان سرعت بیشینه انتخاب شد. نهایتاً آزمایش ها برای سه مجموع دور فلوم و



شکل ۲. اجزای فلوم دایره ای
Fig. 2. Annular Flume assembly

[۱۰]

$$V = 0.2085 \ln(\omega) - 0.0556 \quad R^2 = 0.98 \quad (5)$$

$$\tau = 0.0254 \omega^{1.1777} \quad R^2 = 0.99 \quad (6)$$

در رابطه های بالا V : سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)، τ : تنش برشی جریان (نیوتن بر متر مربع) و ω : مجموع سرعت چرخشی رینگ و فلوم (دور بر دقیقه) است.

۲-۳- روش و برنامه انجام آزمایش ها

در این تحقیق آزمایش های ته نشینی رسوبات ریزدانه معلق در سه غلظت ۵، ۱۰ و ۲۰ گرم بر لیتر و برای سه سرعت جریان (اختلاف دور فلوم و درپوش) و در شش حالت بستر انجام شد. بسترهای مورد نظر شامل بستر صاف (B_1) و پنج بستر حاوی رسوبات درشت دانه (B_2 الی B_6) می باشد. منظور از بستر صاف، بستر فلوم با جنس گالوانیزه و بدون رسوبات بستر می باشد.

عمق رسوبات درشت دانه در کف فلوم با توجه به قطر ذرات ده

جدول ۲. نام و مشخصات آزمایش ها
Table 2. Characteristics of experiments

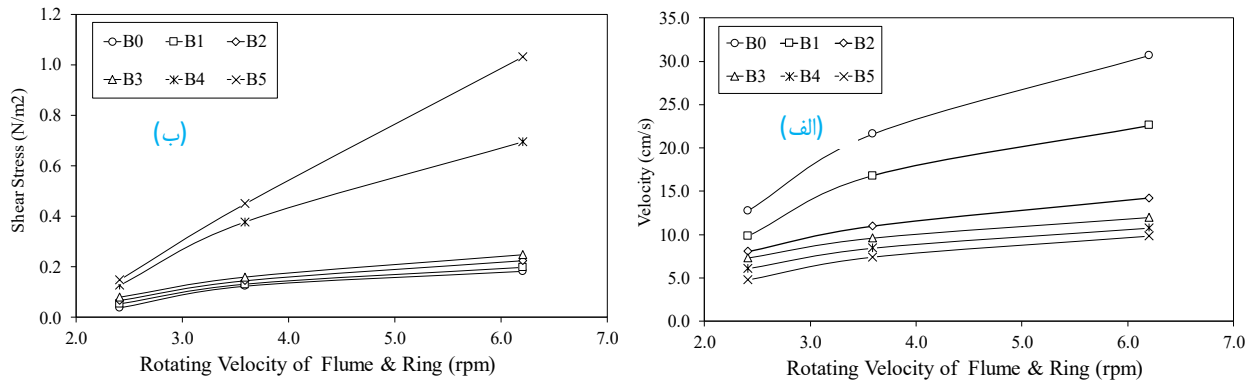
پارامتر	نوع بستر	D ₅₀ (mm)	نام آزمایش			متوسط تنش برشی (N/m ²)	متوسط سرعت (cm/s)
			C=5 gr/l	C=10 gr/l	C=20 gr/l		
سرعت خطی فلوم ۰/۹ m/s سرعت خطی درپوش ۱/۰ m/s	B ₀	–	B ₀ C ₅ V ₁	B ₀ C ₁₀ V ₁	B ₀ C ₂₀ V ₁	0/038	12/71
	B ₁	2/75	B ₁ C ₅ V ₁	B ₁ C ₁₀ V ₁	B ₁ C ₂₀ V ₁	0/053	9/82
	B ₂	6/03	B ₂ C ₅ V ₁	B ₂ C ₁₀ V ₁	B ₂ C ₂₀ V ₁	0/066	8/01
	B ₃	9/4	B ₃ C ₅ V ₁	B ₃ C ₁₀ V ₁	B ₃ C ₂₀ V ₁	0/071	7/30
	B ₄	24/1	B ₄ C ₅ V ₁	B ₄ C ₁₀ V ₁	B ₄ C ₂₀ V ₁	0/120	6/09
	B ₅	48/2	B ₅ C ₅ V ₁	B ₅ C ₁₀ V ₁	B ₅ C ₂₀ V ₁	0/154	4/76
سرعت خطی فلوم ۱/۴ m/s سرعت خطی درپوش ۱/۵ m/s	B ₀	–	B ₀ C ₅ V ₂	B ₀ C ₁₀ V ₂	B ₀ C ₂₀ V ₂	0/118	21/59
	B ₁	2/75	B ₁ C ₅ V ₂	B ₁ C ₁₀ V ₂	B ₁ C ₂₀ V ₂	0/124	16/79
	B ₂	6/03	B ₂ C ₅ V ₂	B ₂ C ₁₀ V ₂	B ₂ C ₂₀ V ₂	0/141	10/96
	B ₃	9/4	B ₃ C ₅ V ₂	B ₃ C ₁₀ V ₂	B ₃ C ₂₀ V ₂	0/154	9/59
	B ₄	24/1	B ₄ C ₅ V ₂	B ₄ C ₁₀ V ₂	B ₄ C ₂₀ V ₂	0/379	8/44
	B ₅	48/2	B ₅ C ₅ V ₂	B ₅ C ₁₀ V ₂	B ₅ C ₂₀ V ₂	0/458	7/38
سرعت خطی فلوم ۲/۴ m/s سرعت خطی درپوش ۲/۶ m/s	B ₀	–	B ₀ C ₅ V ₃	B ₀ C ₁₀ V ₃	B ₀ C ₂₀ V ₃	0/179	30/69
	B ₁	2/75	B ₁ C ₅ V ₃	B ₁ C ₁₀ V ₃	B ₁ C ₂₀ V ₃	0/187	22/58
	B ₂	6/03	B ₂ C ₅ V ₃	B ₂ C ₁₀ V ₃	B ₂ C ₂₀ V ₃	0/231	14/22
	B ₃	9/4	B ₃ C ₅ V ₃	B ₃ C ₁₀ V ₃	B ₃ C ₂₀ V ₃	0/255	11/95
	B ₄	24/1	B ₄ C ₅ V ₃	B ₄ C ₁₀ V ₃	B ₄ C ₂₀ V ₃	0/706	10/74
	B ₅	48/2	B ₅ C ₅ V ₃	B ₅ C ₁₀ V ₃	B ₅ C ₂₀ V ₃	1/008	9/80

۳- نتایج و بحث

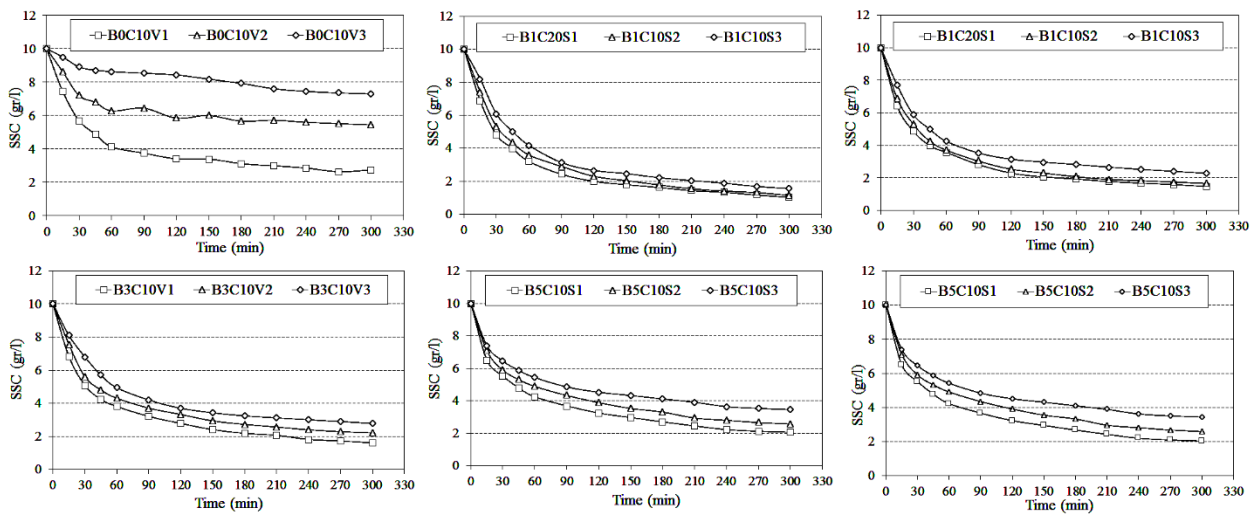
۳-۱- پارامترهای هیدرولیکی

شکل (۳) تغییرات سرعت و تنش برشی متوسط جریان را در حالت های مختلف بستر و در برابر مجموع سرعت چرخش فلوم و درپوش نشان می دهد. با توجه به شکل (۳-الف) مشاهده می شود به ازای اعمال یک نیروی ثابت به سیال (سرعت چرخش فلوم و درپوش)، افزایش قطر ذرات بستر موجب کاهش سرعت متوسط جریان می شود. قابل مشاهده است تفاوت سرعت در بسترهای مختلف با افزایش قطر ذرات کاهش می یابد. همچنین نتایج نشان می دهد با افزایش نیروی وارده بر سیال، اختلاف سرعت جریان در بین بسترهای مختلف افزایش می یابد. اما همانطور که در شکل (۳-ب) مشاهده می شود تاثیر رسوبات بستر بر تنش برشی جریان کاملاً متفاوت است. به گونه ای که نتایج نشان می دهد افزایش اندازه ذرات بستر موجب افزایش تنش برشی جریان می شود. بر این اساس کمترین تنش برشی مربوط به بستر صاف و پس از آن بستر (B_۱) می باشد و بیشترین تنش برشی در بستر (B_۵) اتفاق می افتد.

درپوش به ترتیب ۲/۴، ۳/۶ و ۶/۲ دور بردقیقه انجام پذیرفت. در ادامه به منظور تعیین متوسط تنش برشی جریان برای حالت های مختلف بستر از دستگاه سرعت سنج صوتی (ADV) مدل Vectrino+ با فرکانس ۲۰۰ هرتز و زمان داده برداری سه دقیقه استفاده شد. در این مدل از سرعت سنج های صوتی به علت دارا بودن کابل، امکان قرارگیری سنسورهای دستگاه در هر جهتی وجود دارد، اما در این حالت در بررسی نتایج نیاز به انتقال محورهای مختصات است. به منظور استفاده سرعت سنج و برداشت پارامترهای هیدرولیکی جریان در بسترهای مختلف نیاز به پایه ای سوار بر کانال می باشد که امکان جابجایی ADV را در عرض کانال میسر کند و همچنین امکان تغییر وضعیت قرارگیری در ارتفاعات مختلف را فراهم نماید. بر همین اساس نوسانات سرعت بترتیب در پنج مقطع عمودی و سه مقطع افقی با فاصله ۵ سانتی متر از یکدیگر و بستر فلوم اندازه گیری شد. نهایتاً بر اساس معادله تنش رینولدز برای سرعت های مختلف چرخش فلوم و حالت های گوناگون بستر، تنش برشی متوسط جریان محاسبه گردید. جدول ۲ شرایط هر یک از آزمایش ها را نشان می دهد.



شکل ۳. الف: تغییرات سرعت جریان، ب: تغییرات تنش برشی جریان؛ در بسترهای مختلف
 Fig. 3. a. Variation of velocity, b. Variation of bed shear stress; in different beds



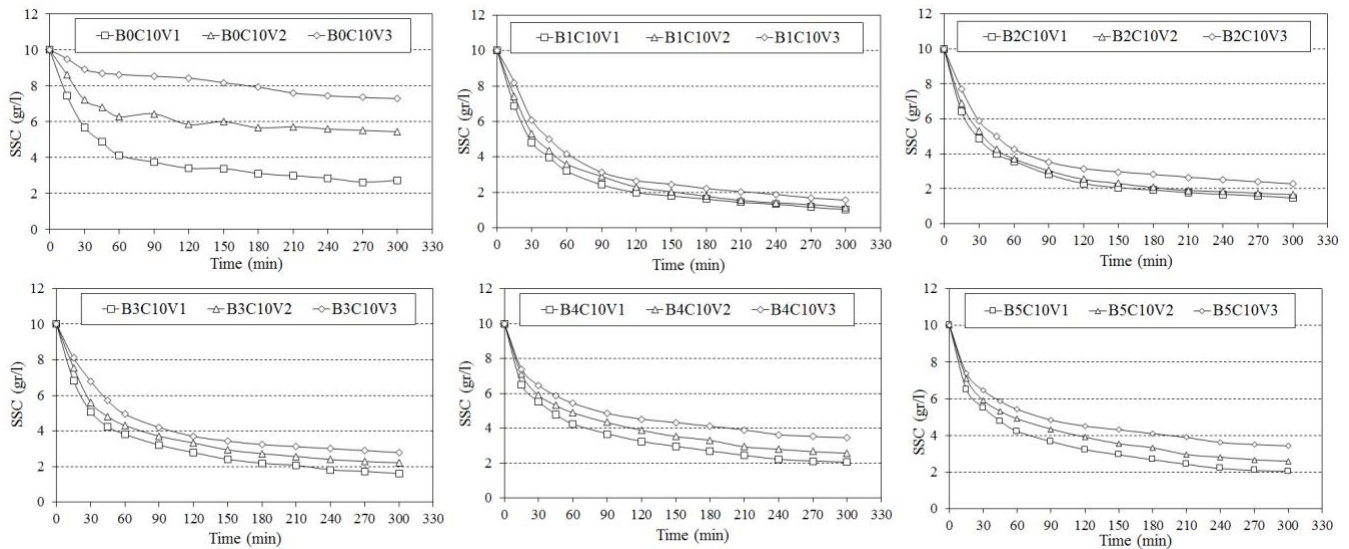
شکل ۴. تغییرات زمانی غلظت رسوبات معلق - غلظت اولیه ۱۰ گرم بر لیتر
 Fig. 4. Variation of suspended sediment concentration - initial concentration 10 g/L

۲-۳- روند ته نشینی رسوبات

نتایج این تحقیق نشان داد برای تمام حالت های بستر ته نشینی از نوع جزئی است. چرا که در تمام آزمایش ها فرآیند ته نشینی اتفاق می افتد که میزان ته نشینی در ۱۵ دقیقه ابتدایی زیاد و به صورت تدریجی تا رسیدن به یک حالت تعادلی ادامه می یابد. شکل (۴) تغییرات غلظت رسوبات معلق را به طور نمونه برای غلظت اولیه ۱۰ گرم بر لیتر نشان می دهد. با توجه به شکل (۴) می توان بیان داشت که غلظت تعادلی و روند ته نشینی، وابسته به غلظت اولیه رسوبات، تنش برشی جریان و اندازه رسوبات بستر است. برای بستر صاف (B_۰)، غلظت تعادلی تابعی از تنش برشی جریان است اما در بستر حاوی رسوبات درشت دانه (B_۱)، B_۲، B_۳، B_۴ و B_۵) مقادیر غلظت

تعادلی تقریباً یکسان و کمتر تحت تاثیر تنش برشی جریان قرار دارد. این پدیده را می توان با تله اندازی رسوبات معلق در بین رسوبات بستر توجیه نمود. رسوبات بستر موجب ایجاد جریان آشفته در بالای ذرات بستر و جریان آرام در بین آن ها می شود. جریان آشفته ناشی از زبری بستر موجب مکش جریان سطحی به داخل رسوبات می شود که این موضوع ته نشینی و تله اندازی رسوبات معلق را در بین ذرات بستر به همراه دارد [۱۶]. لازم به ذکر است که برای غلظت های اولیه دیگر نیز نتایج مشابه است.

تاثیر غلظت اولیه رسوبات بر غلظت تعادلی با ثابت قرار دادن سرعت چرخش فلوم و درپوش و غلظت های متفاوت مورد بررسی قرار گرفت که نتایج در شکل (۵) قابل مشاهده است. شکل (۵) نشان



شکل ۵. تاثیر غلظت اولیه رسوبات بر غلظت تعادلی
 Fig. 5. Effect of initial sediment concentration on equilibrium concentration

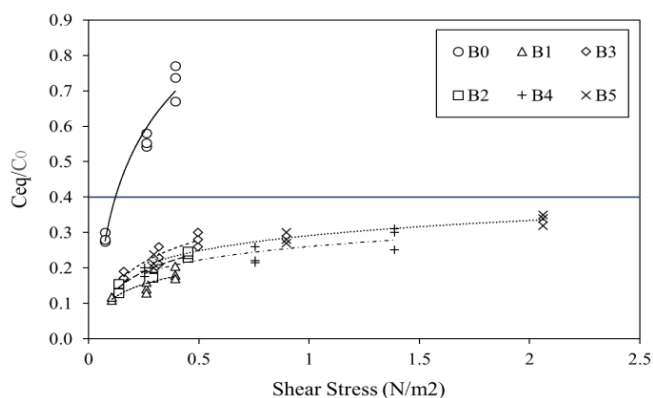
جدول ۳. مقادیر تنش برشی بحرانی آستانه و ته نشینی کامل رسوبات در بسترهای مختلف (نیوتن بر متر مربع)
 Table 3. Critical shear stress for threshold and full deposition in in different beds (N/m²)

B ₅	B ₄	B ₃	B ₂	B ₁	B ₀	پارامتر
۰/۰۴۵	۰/۰۵۶	۰/۰۶۹	۰/۰۷۵	۰/۰۸۳	۰/۰۳۸	تنش برشی ته‌نشینی کامل رسوبات (N/m ²)
۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	C _{eq} /C ₀
۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	تنش برشی آستانه ته‌نشینی رسوبات (N/m ²)
۰/۵۳	۰/۴۸	۰/۶۹	۰/۵۸	۰/۴۱	۱/۰	C _{eq} /C ₀

را پارتیاداس و کندی [۱۷] ارائه دادند. پارتیاداس و همکاران [۱۸] استدلال کردند که در فرآیند ته نشینی رسوبات چسبنده، فقط توده‌هایی که مقاومت کافی در برابر تنش برشی بزرگ در نزدیکی بستر را دارند، می‌توانند ته نشین شوند و توده‌های ضعیف‌تر در ناحیه تنش برشی بستر شکسته شده و به صورت معلق باقی می‌مانند. با توجه به استدلال فوق می‌توان نتیجه گرفت که فقط برخی از رسوبات می‌توانند به صورت توده‌های مقاوم باشند، از این رو مقدار باقی مانده تابعی از مقدار رسوبات در ابتدای آزمایش است. در نمونه با غلظت اولیه زیاد مقدار مواد توده‌ای سست بیشتر است، در نتیجه مقدار غلظت تعادلی نیز بیشتر می‌باشد. این موضوع بیانگر این

می‌دهد غلظت تعادلی رسوبات تابعی از غلظت اولیه است به طوری که در تمامی آزمایش‌ها با افزایش غلظت اولیه، غلظت تعادلی نیز افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که وجود ذرات بستر موجب کاهش تفاوت در مقادیر غلظت‌های تعادلی نسبت به بستر صاف می‌شود.

وابسته بودن غلظت تعادلی به غلظت اولیه رسوبات یکی از تفاوت‌های بارز در رفتار رسوبات چسبنده نسبت به رسوبات غیر چسبنده است. در رسوبات غیر چسبنده، غلظت تعادلی فقط تابعی از تنش برشی بستر است و غلظت اولیه رسوبات بی‌تاثیر می‌باشد. نظریه وابسته بودن غلظت تعادلی به غلظت اولیه در رسوبات چسبنده



شکل ۷. تغییرات تنش برشی آستانه ته نشینی رسوبات در بسترهای مختلف

Fig 7. Variation of critical shear stress for deposition threshold in different beds

بدست آمد. در ادامه بر اساس روابط بدست آمده تنش برش بحرانی آستانه ته نشینی و ته نشینی کامل رسوبات معلق در حالت های مختلف بستر محاسبه شد که نتایج در جدول (۳) ارائه شده است. مشخصات آماری این روابط نشان می دهد، نتایج بدست آمده از دقت قابل قبولی به ویژه در مطالعات رسوب برخوردار می باشند.

$$\left(\frac{C_{eq}}{C_0}\right)_{B_0} = 0.2548 \ln(\tau) + 0.9368 \quad R^2 = 0.96$$

0.96 $Err = 5.4\% \quad RMSE = 0.037$ (۷)

$$\left(\frac{C_{eq}}{C_0}\right)_{B_1} = 0.0492 \ln(\tau) + 0.2223 \quad R^2 = 0.78$$

$Err = 7.5\% \quad RMSE = 0.015$ (۸)

$$\left(\frac{C_{eq}}{C_0}\right)_{B_2} = 0.0744 \ln(\tau) + 0.2927 \quad R^2 = 0.89$$

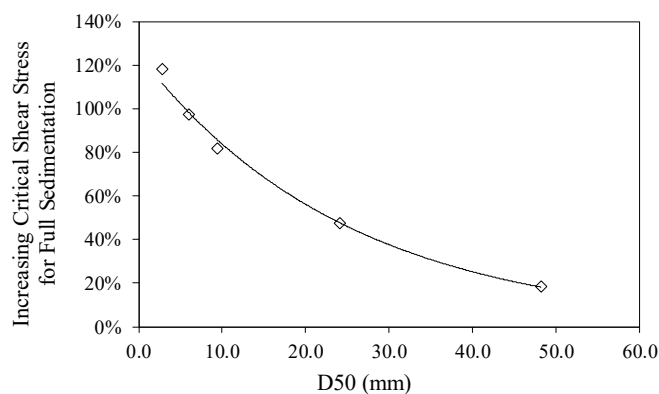
$Err = 5.9\% \quad RMSE = 0.013$ (۹)

$$\left(\frac{C_{eq}}{C_0}\right)_{B_3} = 0.0898 \ln(\tau) + 0.3403 \quad R^2 = 0.87$$

$Err = 6.5\% \quad RMSE = 0.018$ (۱۰)

$$\left(\frac{C_{eq}}{C_0}\right)_{B_4} = 0.0556 \ln(\tau) + 0.2605 \quad R^2 = 0.76$$

$Err = 8.3\% \quad RMSE = 0.022$ (۱۱)



شکل ۶. رابطه میزان افزایش تنش برشی بحرانی ته نشینی کامل نسبت به بستر صاف در برابر قطر متوسط ذرات بستر

Fig 6. Relationship between the increase in critical shear stress of full deposition relative to a smooth bed versus the average diameter of the bed sediments

است که تنش برشی جریان (تلاطم) ظاهراً نقش مضاعف در فرآیند توده ای شدن دارد. وجود تنش برشی کوچک در ابتدا سبب افزایش احتمال برخورد بین ذرات و به دنبال آن موجب آرایش توده ها و افزایش فرآیند همآوری شده و ته نشینی را افزایش می دهد. اما شدت بیش از حد تنش برشی، نرخ برشی را افزایش داده که سبب خرد شدن توده های رسوبی (فلوک) و کاهش نرخ ته نشینی می شود. مسلم است که مقدار مناسب تنش برشی سبب تشکیل فلوک ها با بزرگترین اندازه و پایداری بیشتر آن ها می شود.

۳-۳- تنش برشی بحرانی ته نشینی

در مطالعات انتقال رسوبات معلق دو تنش برشی بحرانی آستانه ته نشینی و ته نشینی کامل مد نظر است. تنش برشی آستانه ته نشینی، مقدار تنش برشی است که رسوبات در آن شروع به ته نشین شدن می کنند. به عبارت دیگر در تنش برشی آستانه ته نشینی نسبت غلظت تعادلی به غلظت اولیه رسوبات برابر با یک ($\frac{C_{eq}}{C_0} = 1$) خواهد بود و تنش برشی بحرانی (ته نشینی کامل) مقدار تنش برشی است که کل رسوبات معلق بتوانند به طور کامل ته نشین شوند. در این حالت نسبت $\frac{C_{eq}}{C_0}$ بسیار نزدیک به صفر خواهد بود. با توجه به مقدار تنش برشی جریان، می تواند ته نشینی جزئی یا کامل اتفاق بیفتد.

بر اساس مقادیر غلظت تعادلی در شرایط مختلف روابط (۷ الی ۱۲) بین این پارامتر و تنش برشی جریان برای حالت های مختلف بستر

می شود برای بسترهای حاوی رسوب درشت دانه، تغییرات C_{eq}/C_0 در مقدار حدودی ۰/۴ دارای مجانب افقی است.

$$\left(\frac{C_{eq}}{C_0}\right)_{B_5} = 0.0618 \ln(\tau) + 0.2913 \quad R^2 = 0.93$$

$$Err = 4.6\% \quad RMSE = 0.014 \quad (12)$$

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی تاثیر رسوبات درشت دانه بستر بر تنش برشی بحرانی رسوبات معلق پرداخته شده است. نتایج آزمایش حاکی از آن است که به طور کلی رسوبات درشت دانه بستر موجب تله اندازی رسوبات معلق و ته نشینی بیشتر این رسوبات نسبت به بستر صاف می شود. نتایج نشان می دهد در حالت بستر صاف، نسبت غلظت تعادلی به غلظت اولیه (C_{eq}/C_0) وابسته به تنش برشی جریان است اما در حالت بستر حاوی رسوب درشت دانه، می توان بیان داشت که مقادیر C_{eq}/C_0 مستقل از تنش برشی جریان می باشند. بر اساس نتایج بدست آمده مشخص شد با افزایش قطر رسوبات بستر، مقدار تنش برشی ته نشینی کامل رسوبات کاهش می یابد. اما به هر حال این مقادیر از حالت بستر صاف بیشتر است. به طور کلی می توان اظهار داشت حضور رسوبات درشت دانه بستر، تنش برشی بحرانی ته نشینی کامل رسوبات معلق را افزایش می دهد. به بیان دیگر در بسترهای حاوی رسوبات درشت دانه، ته نشینی کامل رسوبات معلق در تنش های بزرگتر نیز امکان پذیر است. تنش برشی آستانه ته نشینی رسوبات معلق برای بستر صاف ۱/۲۸ نیوتن بر متر مربع بدست آمد، این در حالی است در بستر حاوی رسوبات درشت دانه در هر مقادیری از تنش برشی، رسوبات امکان ته نشینی دارند که این موضوع را می توان با پدیده تله اندازی رسوبات معلق در میان منافذ رسوبات بستر توجیه نمود.

به طور کلی نتایج این تحقیق نشان می دهد که رفتار ته نشینی رسوبات معلق در شرایط رودخانه ای به ویژه رودخانه های کوهستانی که حاوی رسوبات درشت دانه بستر هستند، بسیار متفاوت با نتایج آزمایشگاهی است. از این رو به منظور انجام مطالعات هیدرولیک رسوب در این رودخانه ها، در استفاده از نتایج و روابط تجربی که در فلوم های آزمایشگاهی بدون شبیه سازی شرایط رودخانه بدست آمده اند، بایستی احتیاط نمود.

۵- فهرست علائم

فارسی	لاتین	پارامتر
-------	-------	---------

بر اساس نتایج جدول (۳) می توان اظهار داشت رسوبات بستر به طور کلی موجب افزایش تنش برشی ته نشینی کامل نسبت به بستر صاف می شوند. بر این اساس می توان بیان داشت که در بستر با رسوبات درشت دانه، با وجود آشفتنگی بیشتر جریان، همچنان شرایط ته نشینی کامل برای رسوبات معلق فراهم است. همانطور که مشاهده می شود افزایش قطر رسوبات بستر موجب کاهش تنش برشی ته نشینی کامل رسوبات می شود به طوری که بیشترین مقدار تنش مربوط به بستر اول و کمترین آن مربوط به بستر پنجم می باشد. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۳) مقادیر افزایش تنش برشی بحرانی ته نشینی کامل برای بستر B_1 الی B_5 نسبت به بستر صاف بترتیب ۱۱۸، ۹۷، ۸۲، ۴۷ و ۱۸ درصد افزایش یافته است.

در ادامه به بررسی ارتباط میزان افزایش تنش برشی بحرانی ته نشینی با قطر متوسط ذرات بستر پرداخته شد که نتایج در رابطه (۱۳) و شکل (۶) ارائه شده است. در این رابطه P_{CS} : درصد افزایش میزان تنش برشی بحرانی و D_{50} : قطر متوسط ذرات رسوب بستر بر حسب میلی متر می باشد. نتایج شکل (۶) و پارامترهای آماری رابطه (۱۳) حاکی از دقت مناسب این رابطه جهت تخمین میزان افزایش تنش برشی بحرانی ته نشینی کامل رسوبات نسبت به بستر صاف، می باشد.

$$P_{CS} (\%) = 1.2505 \exp(-0.04D_{50}) \quad R^2 = 0.99$$

$$Err = 2.76\% \quad RMSE = 0.001 \quad (13)$$

اما نکته قابل توجه این تحقیق تاثیر رسوبات بستر بر مقادیر تنش برشی آستانه ته نشینی است. نتایج نشان می دهد در بستر صاف به ازای تنش های برشی کمتر از ۱/۲۸ نیوتن بر متر مربع رسوبات در آستانه ته نشینی قرار می گیرند، اما برای بسترهای حاوی رسوب مشاهده می شود که حتی در تنش های برشی خیلی بزرگ، مقادیر C_{eq}/C_0 از یک کمتر می باشد. این موضوع نشان می دهد در هر حالتی از آشفتنگی جریان، امکان ته نشینی در بستر رسوبی وجود دارد و در واقع رسوبات معلق در میان رسوبات بستر تله اندازی می شوند. شکل ۴ مقادیر C_{eq}/C_0 را برای حالت های مختلف بستر و در برابر تنش برشی جریان نشان می دهد، همانطور که مشاهده

- Florida, (1973).
- [6] A.J. Mehta, E. Partheniades, Depositional Behavior of Cohesive Sediments, Univ. of Florida, Gainesville, Florida, (1973).
- [7] J.P. Maa, J. Kwon, K. Hwang, H.K. Ha, Critical bed shear stress for cohesive sediment deposition under steady flows, Journal of Hydraulic Engineering (ASCE), 134(12), (2008), pp 5.
- [8] D. Milburna, B.G. Krishnappan, Modelling Erosion and Deposition of Cohesive Sediments from Hay River, Northwest Territories, Canada, in: 13' Northern Res. Basins/Workshop, Nordic Hydrology, Territories, Canada, (2001), pp. 14.
- [9] B.G. Krishnappan, R. Stephens, Critical shear stresses for erosion and deposition of fine suspended sediment from the Athabasca River, Northern River Basins Study Project, (1996).
- [10] M. Khastar-Boroujeni, K. Esmaili, H. Samadi-Boroujeni, A. Ziaei, Wastewater Effect on the Deposition of Cohesive Sediment, Journal of Environmental Engineering, ASCE, (2018).
- [11] H. Samadi- Boroujeni, M. Khastar Boroujeni, R. Fatahi Nafchi, M. Ghasemi, M. Heidari, Experimental Study on suspended sediment deposition process in Karkheh dam reservoir, Amirkabir Journal of Civil Engineering, (2018).
- [12] N. Vojdani, M. Ghomshi, Erosion critical shear stress of cohesive sediment and its role in the design of open channels, in: national conference on irrigation and drainage network management, Sh Chamran University, (2006).
- [13] W.I. Ford, J.F. Fox, Model of particulate organic carbon transport, in an 431 agriculturally impacted stream., Hydrological Processes, (2014), 28(3), 662-675.
- [14] B.G. Krishnappan, P. Engel, Entrapment of fines in coarse sediment beds, River Flow Ferreira, Alves, Leal and Cardoso (eds). Taylor and Francis Group, London, (2006), 817-824.
- [15] D. Huston, J. Fox, Clogging of fine sediment within gravel substrates: dimensional analysis and

α	Rotational Speed Ratio of Flume to the Ring	نسبت سرعت چرخش درپوش به فلوم
τ_b	Bed Shear Stress	تنش برشی بستر
τ_c	Stress Critical Shear	تنش برشی بحرانی
$\tau_{d,Part}$	Shear Stress for Part Deposition	تنش برشی برای ته نشینی جزئی
$\tau_{d,Full}$	Shear Stress for Full Deposition	تنش برشی برای ته نشینی کامل
C	Suspended Sediment Concentration	غلظت رسوبات معلق
C_{eq}	Equilibrium Concentration	غلظت تعادلی
C_0	Initial Concentration	غلظت اولیه رسوبات
D_{50}	Median Diameter	قطر متوسط ذرات
F_d	Fraction Deposition	درصد ته نشینی
P_d	Deposition Probability	احتمال ته نشینی
P_{CS}	Percentage of Critical Shear Stress	درصد افزایش تنش برشی بحرانی
Q_d	Deposition Rate	نرخ ته نشینی
V	Flow Velocity	سرعت جریان
W_s	Fall Velocity	سرعت سقوط

۶-منابع

- [1] E. Partheniades, Cohesive Sediments in Open Channels, Elsevier Inc, Burlington, USA, (2009).
- [2] J. Huang, R.C. Hilldate, B.P. Greiman, Erosion and sedimentation manual, in, U.S. Department of the interior. United States Bureau of Reclamation, (2006).
- [3] Droppo IG, D'Andrea L, Krishnappan BG, Jaskot C, Trapp B, Basuvaraj M, Liss SN, Fine-sediment dynamics: towards an improved understanding of sediment erosion and transport, in: Journal of Soil Sediment (2015), 15:467-479.
- [4] R.B. Krone, Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Processes., Technical Report, Hydraulic Engineering Laboratory, University of California, Berkeley California., (1962).
- [5] A.J. Mehta, E. Partheniades, Depositional Behavior of Cohesive Sediments, Univ. of Florida, Gainesville,

- [17] E. Partheniades, J. G. Kennedy, Deposition behavior of fine sediment in a turbulent fluid motion, Proc., 10th Int. Conf. on Coastal Engineering, Tokyo, (1966), pp.707–724.
- [18] E. Partheniades, R.H. Cross, A. Ayora, Further research on the deposition of cohesive sediments, in Proceedings of the 11th Conference on Coastal Engineering, (1968), pp. 723–772.
- macroanalysis of experiments in hydraulic flumes, in Journal of Hydraulic Engineering, (2015), 141:04015015.
- [16] K. Glasgerben, M. Stone, B. Krishnappan, J. Dixon, U. Silins, The effect of coarse gravel on cohesive sediment entrapment in an annular flume, in: Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences (2015), pp. 5.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Khastar Boroujeni, S.R. Khodashenas, H. Samadi Boroujeni, *Experimental Investigation of the Effect of Bed's Coarse Grain Sediments on the Critical Shear Stress for Deposition of Suspended Sediments*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(7) (2020) 1609-1620.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15541.5942](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15541.5942)

