Shahid Chamran University of Ahvaz
Irrigation Sciences and Engineering (JISE) Vol. 43, No. 2, Summer 2020, p. 171-186

EXTENDED ABSTRACT

Experimental Investigation of the Effect of Consolidation Time on Erosion Rate of cohesive sediment

Z. Taheri[1], K. Esmaili[2*], H. Samadi[3] and S.R. Khodashenas[4]

1- Ph.D. Student, Water and Science Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad.
2*- Corresponding Author, Associate Professor of Water and Science Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad. *(kazem.esmaili@gmail.com)*.
3- Associate Professor, of Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shahrekord University.
4- Professor of Water and Science Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad.

Received: 10 May 2018 Revised: 6 November 2018 Accepted: 11 November 2018

Keyword: Erosion, Equilibrium concentration, Critical shear stress, Annular flume.
DOI: 10.22055/jise.2018.25421.1753.

Introduction

The erosion of the deposited cohesive sediments by flow is a complex phenomenon. In general, hydraulic transmission of fine-grained sediments include depositional processes, consolidation and erosion. Cohesive sediments caused by physical-chemical effects on particle surfaces due to their strong ionic surfaces tend to form masses of low density or flocs. Depending on the conditions of the flow and resistance of the sedimentary masses, the erosion of sediments can occur in three different forms of floc, superficial and massive states (Mehta, 1991; Winterwerp and van Kestern, 2004). This study focuses on the effect of consolidation time on erosion rate of the deposited cohesive sediment in an annular experiment flume.

Methodology

In this work, sediment samples were taken from a small reservoir dam located in north Karun basin, Iran. First, the cohesive sediment samples were prepared using sediments passing from standard sieve ASTM No. 200. In order to study the process of sedimentation and consolidation of the sediments, deposition column tests with three different initial concentrations (including 200, 300 and 400 g/l) were carried out for the consolidation times of 1, 3, 14, and 28 days. It was observed that at concentrations of 200, 300 and 400 g/l, after 24, 96 and 24 hours, respectively, the depth of sediments approached to a constant limit. This indicates that after 96 hours, the concentration of sediments and the initial depth of deposition do not have significant effects on the rate of consolidation. In order to investigate the consolidation time on the erosion threshold shear stress, the consolidation times of 1, 3, 14 and 28 days were considered. Also, because of different consolidation stages, concentrations greater than 300 g/l resulting in a deposition depth of 10.6 cm were found to have little effect on consolidation due to sediment weight. Accordingly, the depth of sediment was considered 10 cm in the main experiments. Linear interpolation method was employed to have 10 cm height of deposited sediment in the annular flume and the initial concentration of the used mixture of water and sediment to fill the flume for consolidation times of 1, 3, 14 and 28 days were found to be 279, 283, 289 and 291 g/l, respectively. Before starting the process of sedimentation and consolidation of the sediments, flume

and ring were inversely rotated in a maximum rotational speed for 20 minutes to process the mixture. After finishing the desired consolidation time, the erosion experiments were carried out with four shear stress values in such a way that after applying the first shear stress and reaching the concentration of the eroded sediments to equilibrium, with subsequent increasing of speed of the flume and ring, subsequent shear stresses were applied. In all experiments the shear stress was changed at four stages in all of which the shear stress was kept at a constant value. The values for applied shear stress in four stages were considered 0.11, 0.42, 0.96 and 2.19 N/m2 and the values for time duration of each stage were considered 60, 60, 60 and 240 minutes, respectively. During the experiment, suspended sediment samples were taken via small valves installed at four different levels of the flume. It is necessary to explain that the hydraulic parameters of the flow flume and the ring at different rotation speeds were measured using an Acoustic Doppler Velocimeter (ADV).

Conclusion

The results show that with increasing shear stress the difference in the concentration of eroded sediments in different periods of consolidation increased. In the one-day consolidation period, after applying the second shear stress, the concentration of suspended sediments increased rapidly. However, for periods of 3, 14 and 28 days, sediments had more resistance to erosion and re-suspension. In the fourth shear stress, the concentration of eroded sediments with a consolidation period of three days increased more than consolidation periods of 14 and 28. It is also clear that the concentration of eroded sediments is very close to each other at periods of 14 and 28 days to the end of the experiment. This is similar to that of the deposition column tests, which shows that there is no significant difference between the rate of consolidation in the periods of 14 and 28 days. In addition, the changes in the eroded sediments during these two consolidation periods follow a uniform and similar pattern, but in one-day period consolidation, when applying the shear stress of 0.42 N/m^2, concentration of suspended sediments increased and when applying the shear stress of 0.96 N/m^2, concentration of eroded sediments increased suddenly. This can be attributed to a change in the erosion phenomenon.

At periods of 14 and 28 days, the shear stress increase the concentration of sediment up to the end of the test gently. This is true for sediments with consolidation period of 3 days prior to the application of the fourth shear stress, and thereafter an increase in concentration is observed. This increase in concentration can be considered similar to the one-day period in applying second shear stresses. Accordingly, the purpose of the change in the erosion phenomenon can be interpreted as follows that in periods of 14 and 28 days, as well as the three-day period to the applying fourth shear stress, erosion is superficial. However, the fourth and second shear stresses, for three and one-day periods of consolidation, respectively, change the type of erosion from superficial to subsurface erosion. Also, the application of the third shear stresses in one-day sediments leads to the separation of particles with larger masses. Because in larger shear stresses, the deposited sediment particles could not to resist against the power of turbulent flow, massive erosion from the bed surface was occurred.

Furthermore, with respect to the average concentration of suspended sediments in each shear stress, the relationship between these values and the shear stresses of flow for different consolidation periods was established. Based on this relationship, the hydraulic conditions of the threshold of erosion of sediments with different consolidation periods were obtained and described in Table 1. The results indicate a logarithmic relationship between the shear stresses of the erosion threshold and the consolidation time of bed sediments. The relation shows this issue.

Table 1- Erosion of threshold of shear stress at different consolidation times

Consolidation Time (day)	1	3	14	28
Erosion of Threshold of Shear Stress (N/m^2)	0.15	0.62	0.83	1.11
Erosion Threshold of Velocity (m/s)	0.15	0.32	0.35	0.39
Froude Number	0.11	0.23	0.25	0.28

Investigating the rate of erosion of sediments shows that this parameter is inversely related to the consolidation time. It was also observed that immediately after increasing the shear stress of the flow the erosion rate also increased, and by applying the next shear stress, this trend decreased, too. According to the amounts of erosion rate, it was found that for consolidation periods of 1 to 28 days, 61.9%, 16.33%, 5.84% and 1.68% of sediments were eroded, respectively. The values of the erosion rate at the time interval applied to each shear stress indicate that the trend of changes in the consolidation periods of 3, 14 and 28 days were similar and with increasing shear stress, the erosion rate also increased. For sediments with a consolidation of one day, however, there was an increase in erosion rate until third shear stress (0.96 N/m^2) and after applying fourth shear stress (2.19 N/m^2) erosion rate decreased.

Acknowledgements
The research was conducted in an annular flume located at Shahrekord University. The authors thank the related authorities who provided necessary equipment so that they could conduct experiments conveniently.

References

1- Mehta, A. J. 1991. Review notes on cohesive sediment erosion. In: Kraus N C, Gingerich K J, Kriebel D L, eds. *Coastal Sediments*' 91. *New York: ASCE*. 40—53.

2- Winterwerp, J. C., Van Kesteren, W. G. M. 2004. Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment. *Amsterdam: Elsevier*.

© 2020 by the authors. Licensee SCU, Ahvaz, Iran. This article 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/).

علوم و مهندسی آبیاری
دانشگاه شهید چمران اهواز
جلد ۴۳، شماره‌ی۲، تابستان ۹۹، ص. ۱۸۶-۱۷۱

بررسی آزمایشگاهی تأثیر زمان تحکیم بر نرخ فرسایش رسوبات چسبنده

زهرا طاهری[۱]، کاظم اسماعیلی[۲*]، حسین صمدی بروجنی[۳] و سعیدرضا خداشناس[۴]

۱-دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲*- نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد esmaili@um.ac.ir
۳-دانشیار گروه مهندسی آب،دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
۴-استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

دریافت: ۱۳۹۷/۲/۲۰ بازنگری: ۱۳۹۷/۸/۱۵ پذیرش: ۱۳۹۷/۸/۲۰

چکیده

انتقال رسوبات چسبنده توسط جریان، پدیده پیچیده‌ای است که برای مدیریت رسوب در کانال‌های انتقال اهمیت اساسی دارد. در این تحقیق با استفاده از فلوم دایره‌ای به بررسی فرآیند فرسایش رسوبات چسبنده پرداخته شد. بر اساس نتایج استوانه ته‌نشینی، زمان تحکیم رسوبات ۱، ۳، ۱۴ و ۲۸ روز در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که فرسایش رسوبات تابعی از زمان تحکیم و تنش‌برشی بستر است. هم‌چنین مشاهده شد با افزایش تنش‌برشی، با زمان تحکیم یک روز نوع فرسایش از نوع سطحی به توده‌ای تبدیل می‌شود در حالی که در دوره‌های تحکیم دیگر در تمام تنش‌ها، نوع فرسایش سطحی است. تنش‌برشی آستانه فرسایش رسوبات چسبنده بستر برای زمان‌های تحکیم انتخابی ۱، ۳، ۱۴ و ۲۸ روز بترتیب ۰/۱۵، ۰/۶۲، ۰/۸۳ و ۱/۱۱ نیوتن بر متر مربع بدست آمد. در همین راستا نتایج حاکی از آن است که در تنش‌برشی یکسان، افزایش دوره تحکیم، موجب کاهش نرخ فرسایش گردیده است.

کلید واژه‌ها: تنش‌برشی بحرانی، غلظت تعادلی، فرسایش، فلوم دایره‌ای.

مقدمه

رسوبات چسبنده شامل ذرات رس با اندازه کوچکتر از ۲ میکرون و ذرات سیلت ۲ تا ۷۵ میکرون است (Huang et al. 2006). انتقال رسوبات چسبنده در رودخانه‌ها، تحت تأثیر مجموعه‌ای پیچیده از فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی می‌باشند. به‌طورکلی هیدرولیک انتقال رسوبات ریزدانه در کانال‌های انتقال را می‌توان شامل فرآیندهای ته‌نشینی، تحکیم و فرسایش دانست. رسوبات چسبنده به دلیل ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی و وجود یون‌های قوی در سطح ذرات تمایل به تشکیل توده‌های بزرگتری به نام فلوک‌ها شدن (Flocs) دارند که این پدیده هماوری یا فلوکوله (Flocculation) شناخته می‌شود. اندازه، ساختار و چگالی توده‌های رسوبی به نیروهای هیدرودینامیکی، برخوردهای متقابل و نیروهای الکتروشیمیایی ذرات بستگی دارد. (Mehta and Dyer, 1990).

ذرات نهشته شده، یک بستر رسوبی اشباع تشکیل می‌دهند و پس از آغاز مرحله تحکیم، رسوبات متراکم می‌شوند. تحکیم ذرات تحت تاثیر وزن آن‌ها موجب افزایش چگالی و مقاومت رسوبات نهشته شده می‌شود (Krishnappan and Engel, 1994; Milburn and Krishnappan, 2003).

به طور کلی فرآیند ته‌نشینی و تحکیم رسوبات به چهار مرحله تقسیم می‌شود (Bloomquist and Townsend,1984):

مرحله اول که در ساعات اولیه فرآیند و در مدت کمتر از یک روز اتفاق می‌افتد تحت عنوان تثبیت تجمیع (Stabilization Agglomeration) شناخته می‌شود که در این مرحله پوکی ذرات بیش از ۱۰ است.

دومین مرحله که به نام رسوب‌گذاری (Sedimentation) شناخته می‌شود، یک روز به طول می‌انجامد و مقدار پوکی ذرات به پنج کاهش می‌یابد.

مرحله سوم مرزی بین مرحله رسوب‌گذاری کامل و ستون آب زلال است که یک هفته طول کشیده و پوکی رسوبات در این مرحله بین ۳ تا ۵ متغیر است.

مرحله چهارم تحکیم رسوبات است که پوکی با زمان کاهش می‌یابد، این مرحله بین ۱۰ تا ۲۰ روز طول می‌کشد و به‌عنوان تحکیم تحت وزن خود ذرات (Self- Weight Consolidation) نامیده می‌شود.

فرسایش رسوبات چسبنده توسط جریان دارای سه حالت فرسایش فلوک، فرسایش سطحی و فرسایش جرمی است (Mehta., 1991; Winterwerp and Van Kestern., 2004). فرسایش فلوک در شرایطی که تنش برشی بستر بیشتر از چسبندگی بین فلوک‌ها و بستر باشد به صورت جدا شدن فلوک به صورت مجزا از بستر رخ می‌دهد. جدا شدن سطحی مجزا از ذرات از سطح بستر به عنوان فرسایش سطحی و جدا شدن توده‌ای از ذرات، فرسایش جرمی معرفی شد (Mehta., 1986).

Droppo و Amos (2001) با انجام آزمایش‌هایی روی بسترهای رسوبات چسبنده در همیلتون هاربور (Hamilton Harbour) در فلوم دایره‌ای آزمایش‌هایی گزارش دادند که رسوبات

بستر تحت تحکیم، دارای سه لایه است. این محققین اظهار داشتند بالاترین لایه به‌عنوان لایه نازک سطحی از ذرات ریزدانه مشخص شد (SFGL). مکانیسم‌های شیمیایی و بیولوژیکی در لایه سطحی که دارای ضخامت (۴-۲) میلی‌متر است، اتفاق می‌افتد. در این لایه رابطه‌ای بین تحکیم و عمق رسوبات نهشته شده وجود ندارد. لایه بعدی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر تخمین زده شد که تحکیم تحت وزن خود رسوبات در این لایه رخ می‌دهد و رابطه چگالی رسوبات با عمق ته‌نشتی رسوبات، افزایشی گزارش شد. سومین و پایین‌ترین لایه در ستون رسوب به عنوان بستر تحکیم یافته مشخص گردید که رابطه چگالی با عمق نسبتاً ثابت باقی ماند. تحکیم یافتگی بستر تابعی از زمان و ضخامت بستر است.

تنش‌برشی آستانه فرسایش یکی از پارامترهای مهم در مدل‌های انتقال رسوبات چسبنده است. برای رسوبات چسبنده مقدار تنش‌برشی بحرانی برای فرسایش، بزرگ‌تر از تنش‌برشی بحرانی ته‌نشینی است (Huang et al., 2006).

در حال حاضر دو دیدگاه مختلف فکری در مورد آستانه فرسایش رسوبات چسبنده وجود دارد. اولین دیدگاه، بر عدم وجود آستانه فرسایش رسوبات چسبنده معتقد است چرا که برخی از ذرات در هر مقدار از تنش‌برشی بستر دچار فرسایش می‌شوند (به‌عنوان مثال Parchure و Mehta (1985) و Lovelle et al (1984).

Lovelle et al (1984) میزان نرخ فرسایش (ε) را با استفاده از مفهوم عدم وجود آستانه فرسایش به صورت زیر ارائه کردند:

$$\varepsilon = \alpha \tau^{\beta} \qquad (۱)$$

در این رابطه α و β ضرائب تجربی هستند.

در دیدگاه دوم فرمول میزان نرخ فرسایش را به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که آستانه فرسایش رسوبات چسبنده وجود دارد (به‌عنوان مثال، Maa et al., 1998):

$$E = \alpha_2 \left[\tau - \tau_c \left(Z \right) \right]^{n_2} \qquad (۲)$$

که در آن τ_c تنش برشی بحرانی فرسایش؛ Z عمق فرسایش؛ و α_2 و n_2 ثابت های تجربی می‌باشند.

Parchure و Mehta (1985); Mehta (1991) با در نظر گرفتن رخداد فرسایش در هر تنش برشی معادله زیر را ارائه کردند:

$$E = \varepsilon_f \exp(\alpha_3 \left[\tau - \tau_c \left(Z \right) \right]^{n_3}) \qquad (۳)$$

ε_fنرخ فرسایش فلوک، τ_c تنش برشی بحرانی فرسایش؛ Z عمق فرسایش؛ و α_3 و n_3 ثابت‌های تجربی هستند.

Bui (2000) فرسایش رسوبات از بستر را به‌عنوان جرم رسوبات جابه‌جا شده توسط تنش‌برشی بستر در نظر گرفت و رابطه زیر را ارائه داد:

$$E = \varepsilon \left(\tau_b - \tau_s \right) \qquad (۴)$$

در این معادله E نرخ فرسایش،ε ضریب فرسایش،τ_b تنش‌برشی بستر وτ_s تنش مقاومتی بستر است.

در شرایطی که خواص بستر نسبتاً یکنواخت باشد معادله (۵) برای پروسه فرسایش رسوبات چسبنده ارائه گردید (Mitchener and Torfs.,1996; Sheng., 1986; Mei et al., 1997)

$$E = M \left(\tau_b - \tau_c \right)^{a} \qquad (۵)$$

E نرخ فرسایش جرم رسوبات بر واحد زمان بر سطح مقطع $\left(kg/(s.m^2)\right)$، M ضریب فرسایش (s/m) ، τ_b تنش‌برشی بستر، τ_c تنش برشی بحرانی، a نمایه‌ای که اغلب ۱ فرض گردید. Zhu (2006) با تقسیم معادله (۵) بر دانسیته رسوبات و نمایه a=۱ رابطه زیر را پیشنهاد کرد:

$$E = M_e \left(\tau_b - \tau_c \right) \qquad (۶)$$

E نرخ فرسایش در طول بر واحد زمان (m/s)،

$M_e = M/\rho_s$ ضریب توصیف قابلیت فرسایش رسوبات. عبارات M یا M_e و τ_c پارامترهای رسوب هستند در حالیکه τ_b یک پارامتر هیدرولیکی است.

Winterwerp و Van Kestern (2004) معادله‌ای را با در نظر گرفتن ارتباط بین پارامتر M و مشخصات رسوب برای فرسایش سطحی ارائه کردند:

$$M = \frac{C_v \varnothing_{s,0} \rho_{dry}}{10 d_{50} \tau_s} \qquad (۷)$$

C_vضریب تحکیم رسوبات، d_{50} قطر متوسط ذرات، $\emptyset_{s,0}$ تابعی از محتوای آب خاک، دانسیته آب و دانسیته ذرات رسوب و ρ_{dry} چگالی ذرات خشک می‌باشد.

یکی دیگر از روابطی که غالباً برای نرخ فرسایش رسوبات چسبنده بکار می‌رود (Parchure and Mehta. 1985; Ariathurai and Arulanandan. 1978)

$$E = M' \left(\frac{\tau_b - \tau_c}{\tau_c} \right) \qquad (۸)$$

M' ضریب وابسته به مواد رسوب است.

Parchure و Mehta (1985) برای بسترهای چسبنده‌ای که دارای روند افزایش دانسیته با عمق هستند، رابطه‌ای را برای نرخ فرسایش پیشنهاد کردند:

$$\varepsilon = E_0 exp \left[K_3 \left(\tau_b - \tau_c \right)^{0.5} \right] \quad for \ \tau_b > \tau_c \left(z \right) \qquad (۹)$$

DOI: 10.22055/jise.2018.25421.1753

E_0 و K_3 از طریق آزمایشات تعیین شدند و به خصوصیات رسوبات بسیار حساس هستند.

Hoseini و Kheyrkhahan (2014) نرخ فرسایش رسوبات چسبنده را بر اساس تنش برشی تسلیم و غلظت رسوبات بستر بررسی کردند و پس از صحت سنجی نتایج و واسنجی پارامترهای نرم‌افزار Mike با نتایج آزمایشگاهی، عوامل مؤثر بر نرخ فرسایش را در قالب اعداد بی‌بعد بررسی و رابطه‌ای به‌صورت نمایی به‌دست آوردند که دقت مناسبی را نشان داد.

Samadi-Boroujeni et al. (2013) به بررسی فرآیند فرسایش رسوبات ریزدانه با استفاده از فلوم دایره‌ای پرداختند که نتایج نشان داد تنش برشی آستانه فرسایش با مدت زمان تحکیم رابطه لگاریتمی دارد، که این مقدار برای رسوبات سطحی از ۰/۱۲ نیوتن بر متر مربع برای تحکیم ۳ روز تا ۰/۱۴ نیوتن بر متر مربع برای رسوبات با تحکیم پنج هفته تغییر داشت و برای رسوبات زیر سطحی این مقدار ۰/۴۴ نیوتن بر متر مربع برای تحکیم سه روز تا ۰/۶۹ نیوتن بر متر مربع برای رسوبات با تحکیم پنج هفته به‌دست آمد. در این پژوهش محققین فقط از چرخش درپوش به‌منظور ایجاد جریان در فلوم دایره‌ای استفاده کردند که بر این اساس نتایج حاصل مربوط به تنش‌های برشی آستانه فرسایش رسوبات در این شرایط هیدرولیکی صادق است. این در حالی است که Khastar et al (2018) نشان دادند زمانی که فلوم و درپوش در جهت مخالف یکدیگر بچرخند، پارامترهای هیدرولیکی فلوم دایره‌ای را می‌توان به کانال‌های باز تعمیم داد. چرا که در این شرایط پروفیل سرعت به صورت لگاریتمی، توزیع تنش در عرض کانال یکنواخت و جریان های ثانویه ناشی از نیروی گریز از مرکز حداقل می‌باشد.

Vojdani و Ghomshi (2007) به بررسی پدیده فرسایش و تعیین تنش‌برشی بحرانی رسوبات چسبنده چند کانال در استان خوزستان پرداختند که نتایج نشان داد فرسایش رسوبات چسبنده به‌صورت تصادفی و مطابق با تئوری فرسایش انیشتین و هون لی، است. مقادیر تنش برشی فرسایش رسوبات این کانال‌ها بین ۰/۹۶ تا ۲/۳۰ نیوتن بر متر مربع متغیر بود.

به‌دلیل پیچیدگی رفتار رسوبات چسبنده علی‌رغم مطالعه‌های بسیاری که در این زمینه انجام شده، تاکنون اطلاعات کافی و منسجم در خصوص هیدرولیک انتقال این رسوبات وجود ندارد. چرا که خصوصیات فیزیکی و شیمیایی رسوب و سیال و همچنین خاصیت هماوری و چسبندگی در رسوبات ریزدانه باعث تفاوت در نتایج پژوهش‌های مختلف می‌شود. بر این اساس آگاهی از نرخ و تنش‌برشی آستانه فرسایش تحت شرایط مختلف تحکیم به منظور طراحی کانال‌های انتقال آب ضروری به نظر می‌رسد. از این‌رو در این تحقیق در نظر است علاوه بر بررسی نوع فرسایش رسوبات ریزدانه در دوره‌های تحکیم ۱، ۳، ۱۴ و ۲۸ روز که در تحقیق‌های پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته، تاثیر آشفتگی جریان مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

رسوبات مورد استفاده

برای انجام تحقیق حاضر، رسوبات از بستر خشک مخزن سد خاکی پیر بلوط واقع در ۲۰ کیلومتری جنوب غرب شهرکرد با مختصات جغرافیایی x=4713116, y=3586402 تهیه شده است. با توجه به هدف تحقیق که بررسی فرسایش رسوبات ریزدانه چسبنده می‌باشد، رسوبات مورد نظر از الک شماره ۲۰۰ استاندارد ASTM عبور داده شد. دانه‌بندی رسوبات به روش هیدرومتری در دو حالت با و بدون کالگن انجام شد که نتایج آن در شکل (۱الف) و مشخصات شیمیایی آب و ذرات رسوبی نیز در جدول (۱) نشان داده شده است. اختلاف بین نمودارهای دانه‌بندی با و بدون کالگن نشان دهنده خاصیت چسبندگی رسوبات مورد استفاده می‌باشد. نتایج رسوبات عبوری پس از خشک شدن حاوی ۲۴ درصد رس کائولونیت، ۷۶ درصد سیلت و با قطر متوسط ۰/۰۰۴ میلی‌متر بود.

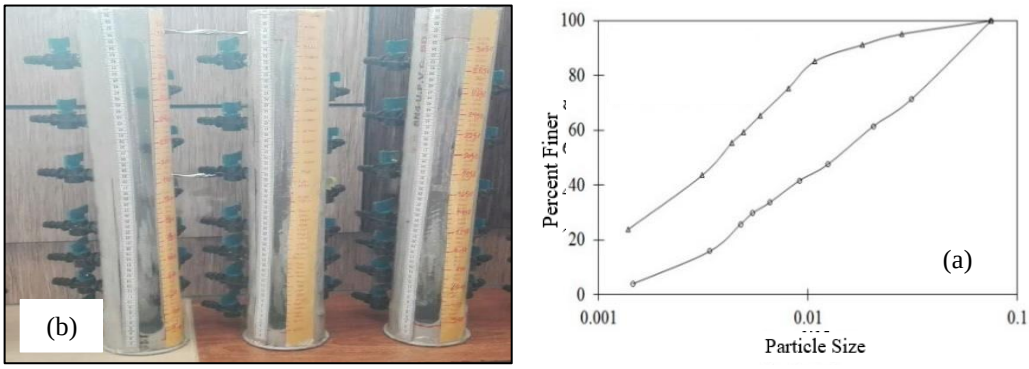


Fig. 1- a) Cumulative frequency curve of particle size in experimental sediment b) Deposition columns.

شکل ۱- (الف) منحنی دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده، (ب) ستون‌های ته‌نشینی

جدول ۱- مشخصات شیمیایی آب و رسوب

Table 1– The chemical characteristics of water and sediment.

Parameter	Unit	Value	
		Sediment	Water
pH	-	8.07	7.99
Cation Cxchange Capacity (CEC)	meq/100g	4	--
Electrical Conductivity (EC)	dS/m	0.76	0.17
Sodium adsorption ratio (SAR)		0.907	0.04
Calcium (Ca)	ppm	240	34
Magnesium (Ma)	ppm	28.8	0
Sodium (Na)	ppm	56	1
Potassium (K)	ppm	14	7

تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در یک فلوم دایره‌ای به ترتیب با قطر داخلی، خارجی و متوسط، ۱/۳، ۱/۹ و ۱/۶ متر، واقع در آزمایشگاه تحقیقات منابع آب دانشگاه شهرکرد انجام شد. اجزای مختلف فلوم دایره‌ای در شکل (۲) قابل مشاهده است. این مدل از دو قسمت مجزای فلوم و درپوش تشکیل شده که فلوم از جنس گالوانیزه و مجهز به پنجره‌های پلکسی‌گلس جهت مشاهده جریان می‌باشد. درپوشی از جنس پلکسی‌گلس با قطر متوسط ۱/۶ متر در داخل فلوم به گونه‌ای طراحی شده که از دیواره‌های فلوم دو سانتی‌متر فاصله دارد. ۲۸ عدد شیر نمونه‌گیری در چهار موقعیت مختلف فلوم و در فواصل ۵/۳، ۱۰/۵، ۱۸/۳و ۲۵ سانتی‌متر از کف تعبیه شده است. فلوم و درپوش، مجهز به دو الکتروموتور و گریبکس مجزا هستند که قابلیت چرخش در خلاف یکدیگر با سرعت چرخش قابل تنظیم را فراهم می‌نماید. الکتروموتورها به دستگاه متناوب‌ساز مجهز هستند که با تغییر در فرکانس برق شبکه، امکان تنظیم دور موتور در سرعت‌های مختلف را فراهم می‌نماید.

Khastar et al (2018) به بررسی پارامترهای هیدرولیکی در فلوم دایره‌ای پرداختند. در این تحقیق با استفاده از سرعت سنج‌صوتی (Acoustic Doppler Velocimeter)، سرعت جریان در سه بعد و در پنج مقطع عمودی اندازه‌گیری شده است که اولین مقطع در پنج سانتی‌متری دیواره داخلی قرار گرفته و به سمت دیواره خارجی حرکت می‌کند. در هر مقطع عمودی، چهار سرعت اندازه‌گیری شد و سرعت متوسط جریان با توجه به منطقه تأثیر نقطه اندازه‌گیری، بصورت وزنی محاسبه کردند. این محققین دریافتند برای عمق ۲۰ سانتی‌متری سیال، زمانی که درپوش و فلوم برعکس یکدیگر بچرخند و نسبت سرعت چرخش درپوش به فلوم ۱/۱ باشد، پروفیل سرعت این فلوم مشابه کانال‌های باز و به صورت لگاریتمی است. هم‌چنین این محققین نشان دادند در این حالت توزیع تنش‌برشی در عرض فلوم را می‌توان به‌صورت یکنواخت در نظر گرفت و بر این اساس می‌توان نتایج به‌دست آمده از فلوم دایره‌ای را به کانال‌های مستقیم تعمیم داد. بر اساس این تحقیق ارتباط سرعت متوسط و تنش‌برشی جریان با مجموع سرعت چرخش فلوم و درپوش به شرح روابط (۱۰) و (۱۱) است.

$$V=0.2085\ln(\omega)-0.0556 \quad R^2=0.98 \qquad (۱۰)$$

$$\tau_{ET} = 0.2614\ln(C_T) + 0.2133 \quad R^2 = 0.95 \qquad (۱۱)$$

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

پیش آزمایش‌های تحکیم رسوبات

در این تحقیق ابتدا آزمایش‌های استوانه ته‌نشینی برای تعیین شرایط آزمایش‌های اصلی انجام شد. این آزمایش‌ها با سه هدف بررسی زمان تحکیم بر عمق رسوبات، انتخاب زمان‌های تحکیم و غلظت رسوبات ته‌نشین شده مورد استفاده قرار گرفت. تحکیم رسوبات از نوع تحکیم تحت وزن رسوبات انجام گرفت. به همین منظور از استوانه‌های ته‌نشینی از جنس پلی‌اتیلن با قطر شش و ارتفاع کلی ۶۰ سانتی‌متر استفاده شد. این استوانه‌ها که دارای شیر نمونه‌گیری با فاصله سه سانتی‌متر از یکدیگر بودند و از یک متر شفاف برای مشاهده و قرائت تغییرات ارتفاع سطح مشترک آب و رسوب استفاده شده در شکل (۱ ب) نشان داده شده است. غلظت‌های اولیه رسوب معادل ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ گرم بر لیتر انتخاب شد و زمان انجام قرائت پایین رفتن سطح رسوب ته‌نشین شده در ستون ناشی از ته‌نشینی و تحکیم رسوبات از لحظه شروع آزمایش تا ۲۸ روز در فواصل مختلف زمانی یک ساعت تا ۲۴ ساعت (بسته به میزان پائین‌رفتن سطح رسوب) انجام پذیرفت. برای انجام این آزمایش‌ها ابتدا رسوبات را با استفاده از همزن برقی مخلوط کرده و غلظت‌های مختلف در استوانه‌های ته‌نشینی رسوب ریخته شد.

DOI: 10.22055/jise.2018.25421.1753

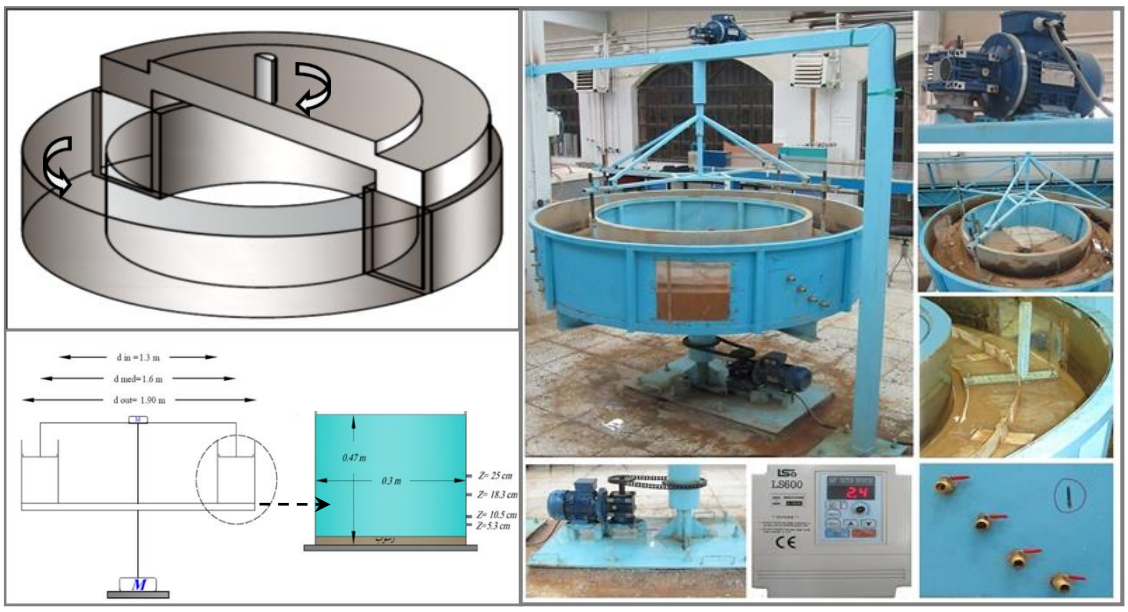


Fig. 2- The Annular Rotating Flume
شکل۲- نمایی از اجزای فلوم دایره‌ای مورد استفاده

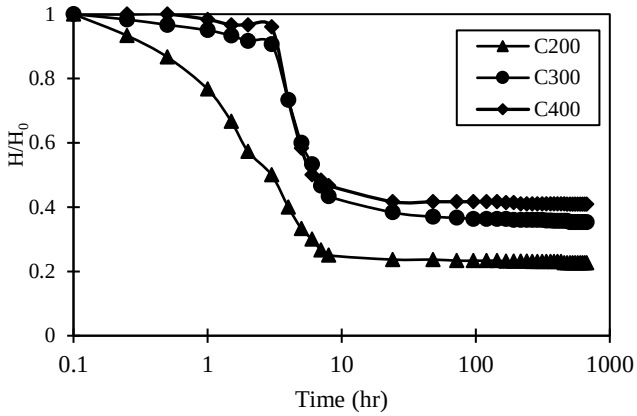


Fig. 3- The relative sediment sample height, H/H_0, versus elapsed time in different experiments of consolidation.
شکل ۳- میزان تغییرات عمق روزانه به عمق اولیه رسوبات در غلظت های مختلف آزمایش تحکیم

همان‌طور که مشاهده می‌شود در غلظت‌های ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ گرم بر لیتر به‌ترتیب پس از ۲۴، ۹۶ و ۲۴ ساعت عمق رسوبات به یک حد ثابت نزدیک شد. این موضوع نشان می‌دهد که پس از ۹۶ ساعت غلظت رسوبات و عمق اولیه ته‌نشینی بر میزان تحکیم تاثیر قابل ملاحظه ندارد. با توجه به این موضوع به منظور بررسی زمان تحکیم بر تنش‌برشی آستانه فرسایش، زمان‌های تحکیم۱، ۳، ۱۴ و ۲۸ روز در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به مراحل مختلف تحکیم نشان داده شده در شکل (۳) غلظت‌های بیشتر از ۳۰۰ گرم بر لیتر که منجر به عمق ته‌نشینی ۱۰/۶ سانتی‌متر می‌شوند بر تحکیم ناشی از وزن رسوبات تأثیر چندانی ندارند. بر همین اساس عمق رسوبات در آزمایش‌های اصلی ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که با توجه به تغییر در عمق ته‌نشینی با توجه به زمان تحکیم، نیاز است غلظت اولیه رسوبات برای رسیدن به عمق یکسان متفاوت باشد. با استفاده از روش درون‌یابی خطی غلظت اولیه برای زمان‌های تحکیم ۱، ۳، ۱۴ و ۲۸ روزه بترتیب ۲۷۹، ۲۸۳، ۲۸۹ و ۲۹۱ گرم بر لیتر به‌دست آمد. "مراحل ته‌نشینی و تحکیم را برای دوره تحکیم‌های مختلف در شکل (۴) قابل مشاهده است". همانطور که مشاهده می‌شود در دوره تحکیم‌های ۱ و ۳ روزه فرآیند ته‌نشینی و تحکیم به مرحله تحکیم تحت وزن خود ذرات نرسیده است. که این امر به این دلیل است که این مرحله به زمان ۱۰ تا ۲۰ روز احتیاج دارد و برای

دوره‌های تحکیم ۱ و ۳ روز زمان لازم برای رسیدن به تحکیم تحت وزن خود ذرات وجود ندارد. در دوره تحکیم‌های ۱۴ و ۲۸ روز هر چهار مرحله وجود دارد.

یکی از پارامترهایی که به‌طور واضح فرآیند ته‌نشینی و تحکیم را نشان می‌هد مقادیر $\frac{H}{H_0}$ می‌باشد که در ارتباط با زمان منحنی ته‌نشینی نامیده می‌شود. "منحنی ته‌نشینی برای زمان‌های تحکیم،۱، ۳، ۱۴ و ۲۸ روز برای غلظت ۳۰۰ گرم بر لیتر نسبت به زمان در شکل (۴) نشان داده شده است". تغییرات $\frac{H}{H_0}$ نسبت به زمان در هر مرحله از فرآیند ته‌نشینی و تحکیم بر طبق یک رابطه لگاریتمی به صورت زیر ارائه شد (Samadi Boroujeni et al. 2005):

$$\frac{H}{H_0} = a\ ln(t) + b \qquad (۱۲)$$

H عمق رسوب در زمان t، H_0 عمق اولیه رسوبات یا ارتفاع مخلوط آب و رسوب در ابتدای آزمایش، a و b ضرایب معادله می‌باشند.

میانگین ضریب a (شیب منحنی) برای تمامی آزمایش‌ها در هر یک از چهار مرحله به ترتیب برابر با ۰/۰۲۸-، ۰/۴۸۷-، ۰/۰۳۱- و ۰/۰۰۶- است. در واقع منفی بودن مقادیر نشان دهنده این واقعیت است که نرخ شیب تحکیم در طول زمان کاهش می‌یابد. بنابراین نرخ ته‌نشینی/تحکیم در مرحله دوم به بیشینه مقدار و در مرحله آخر زمانی که رسوبات به تحکیم می‌رسند کمینه است.

آزمایش‌های فرسایش رسوبات بستر

در آزمایش‌های مربوط به تعیین فرسایش رسوبات مورد آزمایش، پس از ریختن رسوبات در فلوم دایره‌ای، ابتدا برای مخلوط شدن کامل رسوبات و خرد شدن کامل فلوک‌ها، فلوم و درپوش به مدت ۳۰ دقیقه بر خلاف جهت هم و با مجموع سرعت ۳۱ دور بر دقیقه (سرعت فلوم ۱۴/۸ دور بر دقیقه و سرعت درپوش ۱۶/۲ دور بر دقیقه) که تنش‌برشی معادل $\frac{N}{m^2}$ ۱۱/۲ ایجاد می‌کند، به چرخش درآمدند. پس از مخلوط شدن کامل رسوبات، با توقف کامل فلوم و درپوش، اجازه ته‌نشینی به رسوبات تا رسیدن به زمان‌های تحکیم مورد نظر داده شد.

پس از گذشت زمان تحکیم، برای بررسی تنش‌برشی آستانه فرسایش و نرخ فرسایش، فلوم و درپوش با کمترین سرعت در خلاف جهت یکدیگر و با نسبت چرخش ۱/۱ به حرکت درآمدند. اگر سرعت و تنش اعمال شده از تنش‌برشی آستانه فرسایش کمتر باشد، رسوبات بدون تغییر و در بستر باقی می‌مانند اما اگر بیشتر باشد رسوبات شروع به فرسایش و معلق شدن می‌کنند. در حالت دوم زمان اعمال تنش‌برشی تا رسیدن به یک حالت تعادل به طول می‌انجامد، پس از آن سرعت و تنش‌برشی دوم و به همین ترتیب تنش‌های بعدی اعمال می‌شود. "مشخصات هیدرولیکی جریان در طول آزمایش فرسایش در جدول (۲) نمایش داده شده است".

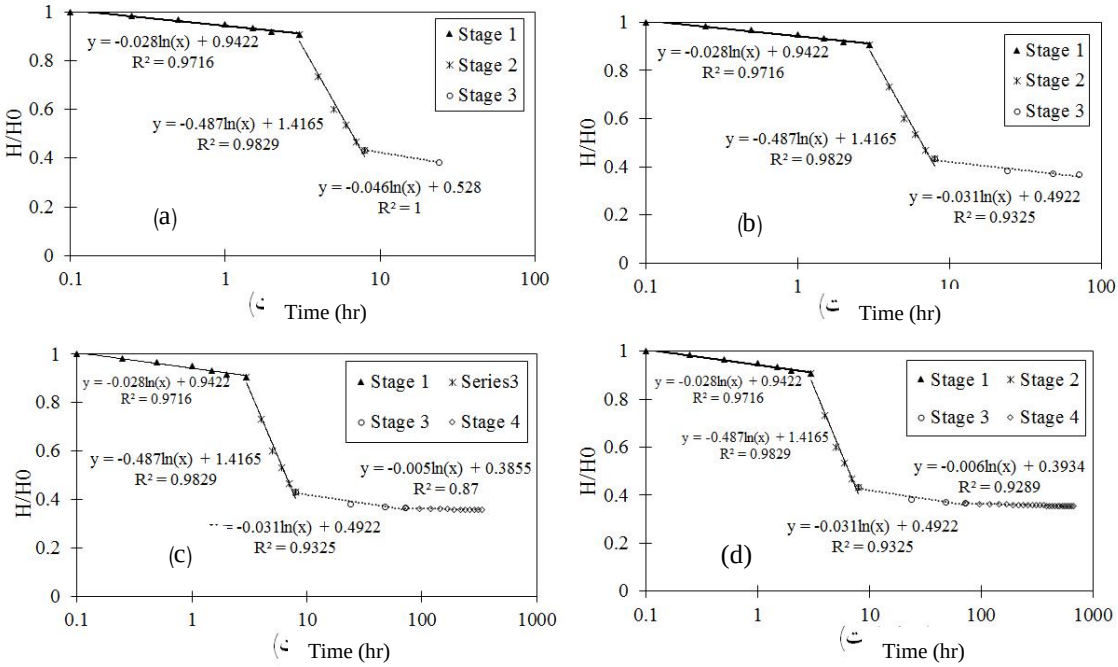


Fig. 4-Process of deposition and consolidation a) 1 day consolidation b) 3 days consolidation c) 14 days consolidation d) 28 days consolidation

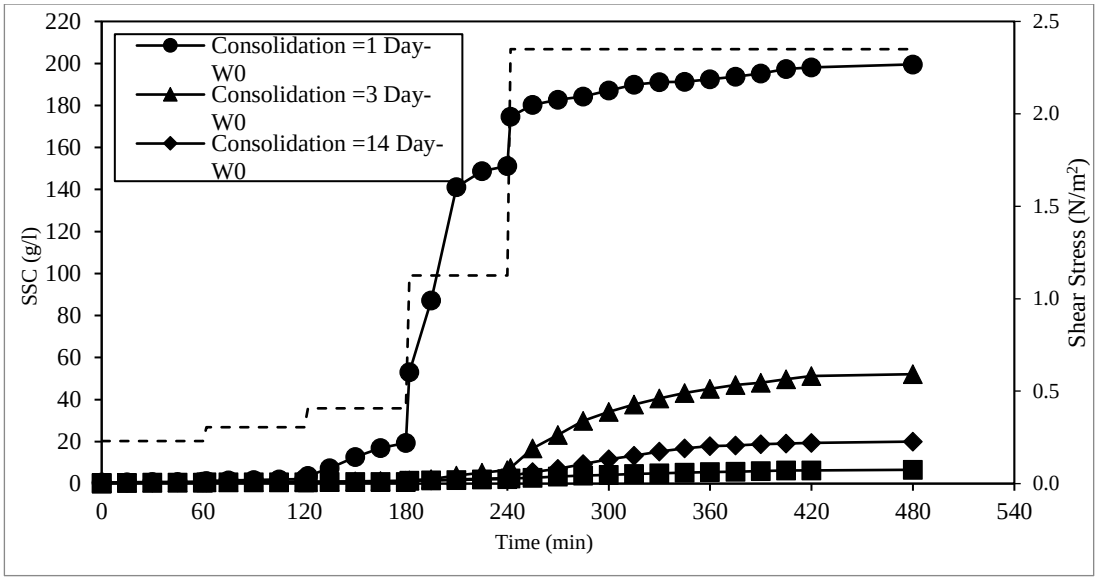
شکل ٤- پروسه ته‌نشینی و تحکیم الف- دوره تحکیم ۱ روز ب-دوره تحکیم ۳ روز ج-دوره تحکیم ١٤روز د-دوره تحکیم ۲۸روز

DOI: 10.22055/jise.2018.25421.1753

جدول ۲- زمان و تنش‌برشی و سرعت های درپوش و فلوم استفاده شده در آزمایش‌های فرسایش در بستر صاف

Table 2- Time and Bed Shear Stress Steps and Corresponding Ring and Flume Speeds Used in the Plane Bed Erosion Experiments

Time (minute)	0-60	60-120	120-180	180-240	240-420
Rotation speed of flume and ring (rpm)	1.8	2.74	3.91	6.18	9.87
shear stress (N/m^2)	0.23	0.31	0.41	1.13	2.35
Velocity (m/s)	0.09	0.14	0.2	0.34	0.42
Froude's Number	0.06	0.1	0.14	0.24	0.3



شکل ۵- تغییرات زمانی غلظت رسوبات معلق برای دوره‌های تحکیم مختلف

Fig. 5- Variations of sediment concentration versus time with different consolidation times.

در این تحقیق میزان رسوبات فرسایش یافته از بستر با توجه به غلظت رسوبات معلق در زمان‌های مختلف برآورد می‌شود. به عبارت دیگر میزان رسوبات فرسایش یافته در هر زمان برابر با میزان افزایش غلظت رسوبات معلق می‌باشد. زمان هر تنش‌برشی تا رسیدن به غلظت تعادلی رسوبات معلق ادامه می‌یابد که با توجه به آزمایش‌های اولیه برای زمان تحکیم یک روزه، مدت تنش‌برشی اول تا سوم یک ساعت و آزمایش‌های تنش‌برشی چهارم، برای رسیدن به غلظت تعادلی تا چهار ساعت ادامه یافت. لازم به توضیح است که برآورد غلظت رسوبات معلق بلافاصله پس از تغییر تنش‌برشی و پس از آن تنش‌برشی هر پانزده دقیقه از عمق‌های مختلف نمونه‌گیری بعمل آمد و بعد از خشک کردن نمونه‌ها در آون، غلظت رسوبات معلق با توجه به فاصله قرارگیری شیرهای نمونه‌گیری، به روش وزنی محاسبه شد.

نتایج و بحث

تغییرات زمانی غلظت رسوبات فرسایش یافته

"به منظور بررسی نرخ و تنش‌برشی آستانه فرسایش تغییرات زمانی غلظت برای دوره‌های متفاوت تحکیم در برابر تنش‌برشی جریان در شکل (۵) ارائه شده است". همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمام آزمایش‌ها با افزایش تنش‌برشی بستر، غلظت رسوبات معلق نیز افزایش می‌یابد. به بیان دیگر افزایش تنش‌برشی موجب افزایش نرخ فرسایش رسوبات بستر می‌شود.

هم‌چنین در یک تنش‌برشی ثابت و زمان مشخص از شروع آزمایش با افزایش زمان تحکیم، غلظت رسوبات معلق کاهش می‌یابد. به طور مثال پس از گذشت ۳۵۰ دقیقه از زمان آزمایش که تنش‌برشی ۲/۱۹ نیوتن بر متر مربع اعمال شده، مقدار غلظت رسوبات معلق برای رسوبات یک روز و سه روز تحکیم یافته بیشتر از رسوبات دو هفته‌ای و چهار هفته است. همچنین مشاهده می‌شود که رسوبات با دوره تحکیم کمتر نسبت به افزایش تنش‌برشی تغییرات بیشتری نشان می‌دهند.

نتایج نشان می‌دهد با افزایش تنش‌برشی اختلاف غلظت رسوبات فرسایش یافته در دوره‌های مختلف تحکیم افزایش می‌یابد. در دوره تحکیم یک روزه پس از اعمال تنش دوم، غلظت رسوبات معلق به سرعت افزایش می‌یابد. این در حالی است که برای دوره‌های ۳، ۱۴ و ۲۸ روزه، رسوبات مقاومت بیشتری در مقابل تنش‌برشی و دوباره معلق شدن دارند. در تنش‌برشی چهارم، غلظت رسوبات فرسایش یافته با دوره تحکیم سه روز افزایش بیشتری نسبت به دوره‌های تحکیم ۱۴ و ۲۸ دارد. هم‌چنین مشخص است که غلظت رسوبات فرسایش یافته در دوره‌های ۱۴ و ۲۸ روز تا

انتهای آزمایش بسیار نزدیک به‌هم است. این موضوع مشابه آزمایش‌های ستون ته‌نشینی است که نشان داد تفاوتی زیادی بین مقدار تحکیم با دوره ۱۴ و ۲۸ روز وجود ندارد. این موضوع را با توجه به شکل (۴) می‌توان ناشی از یکسان بودن شرایط تحکیم و نهایتاً ساختار و استحکام توده‌های رسوبی ته‌نشین شده در ارتباط دانست. علاوه بر این تغییرات رسوبات فرسایش یافته در این دو زمان تحکیم، از الگویی یکنواخت و مشابه پیروی می‌کند اما در زمان تحکیم یک روزه، در تنش‌برشی ۰/۴۲ نیوتن بر متر مربع، غلظت رسوبات معلق افزایش یافته و در تنش‌برشی ۰/۹۶ نیوتن بر متر مربع با یک افزایش ناگهانی غلظت رسوبات فرسایش یافته همراه است. این موضوع را می‌توان ناشی از تغییر در پدیده فرسایش دانست.

در دوره‌های ۱۴ و ۲۸ روز، افزایش تنش‌برشی جریان موجب افزایش ملایم غلظت رسوبات تا انتهای آزمایش می‌شود. این موضوع برای رسوبات با تحکیم سه روز تا اعمال تنش برشی چهارم صادق است و پس از آن با یک افزایش در غلظت روبه‌رو هستیم. این افزایش غلظت را می‌توان مشابه دوره یک روزه در اعمال تنش‌برشی دوم دانست. بر همین اساس منظور از تغییر در پدیده فرسایش را این گونه می‌توان تفسیر نمود که در دوره‌های ۱۴ و ۲۸ روز و همچنین دوره سه روزه تا اعمال تنش‌برشی چهارم، فرسایش به صورت سطحی است. این در حالی است که اعمال تنش‌برشی چهارم و دوم به‌ترتیب برای دوره‌های سه و یک روزه، نوع فرسایش از سطحی به توده‌ای تغییر می‌کند. هم‌چنین اعمال تنش‌برشی سوم در رسوبات یک روزه، جدا شدن ذرات با توده‌های بزرگ‌تر (جرمی) را به همراه دارد. چرا که در تنش‌های بزرگتر، مقاومت ذرات رسوب ته‌نشین شده کمتر از قدرت آشفتگی جریان است که این امر موجب فرسایش توده‌ای و جرمی از سطح بستر می‌شود. این نوع فرسایش در مقادیر بزرگ تنش‌برشی (سرعت) رخ می‌دهد و مشخصه آن جدا شدن توده‌های بزرگ رسوب از بستر می‌باشد. Winterwerp et al (2012) فرسایش سطحی و توده‌ای را تابعی از تنش‌برشی متوسط بستر می‌دانند. محققین دیگر نظیر Korn (1984);(1991) Mehta;(2011) Jacobs و غیره این انواع فرسایش را مشاهده کرده و روابطی نیز پیرامون این موضوع ارائه داده‌اند.

تنش‌برشی آستانه فرسایش

برآورد تنش‌برشی آستانه فرسایش بر اساس افزایش غلظت رسوبات معلق صورت گرفت. در حقیقت با توجه به زمان‌های تحکیم و فرصت کافی برای ته‌نشینی رسوبات، در شروع آزمایش‌های فرسایش غلظت رسوبات معلق بسیار نزدیک به صفر است. از این رو در این تحقیق با اندازه‌گیری غلظت رسوبات معلق از شروع آزمایش‌های فرسایش، تنشی‌برشی که منجر به رسیدن غلظت رسوبات معلق به یک گرم بر لیترشد، به‌عنوان تنش‌برشی آستانه فرسایش در نظر گرفته شد. برهمین اساس مقدار متوسط غلظت رسوبات معلق در هر تنش‌برشی به‌دست آمد و "رابطه‌ای بین این مقادیر و تنش‌برشی جریان برای دوره‌های تحکیم ۱ تا ۲۸ روز در شکل (۶) برقرار شد" که به‌ترتیب در روابط (۱۳) تا (۱۶) ارائه شده است. همان‌طور که مشخصات آماری این روابط نشان می‌دهد برآورد تنش‌برشی آستانه فرسایش با استفاده از این معادله‌ها از دقت قابل قبولی به ویژه در مطالعات رسوبی برخوردار است.

مقادیر تنش‌برشی آستانه فرسایش رسوبات چسبنده به همراه سرعت آستانه و عدد فرود معادل در جدول (۳) ارائه شده است. Glasbergen (2014) میزان تنش‌برشی بحرانی فرسایش رسوبات چسبنده را با دوره تحکیم ۳۹ ساعت، ۰/۲۱۲ پاسکال به دست آورد.

$$\tau_b = 0.0096\left(C_E\right) + 0.1414 \qquad R^2 = 0.93 \qquad (۱۳)$$

$$\tau_b = 0.4004\ln\left(C_E\right) + 0.6167 \qquad R^2 = 0.98 \qquad (۱۴)$$

$$\tau_b = 0.4832\ln\left(C_E\right) + 0.828 \qquad R^2 = 0.98 \qquad (۱۵)$$

$$\tau_b = 0.6627\ln\left(C_E\right) + 1.1056 \qquad R^2 = 0.98 \qquad (۱۶)$$

در این روابط C_E غلظت رسوبات فرسایش یافته (گرم بر لیتر) و τ_b تنش‌برشی بستر (نیوتن بر متر مربع) می‌باشد.

در ادامه با توجه به نتایج به‌دست آمده، رابطه (۱۷) به‌منظور تخمین تنش‌برشی آستانه فرسایش بر اساس زمان تحکیم رسوبات بستر به‌دست آمد که نتایج آن در شکل (۷) نیز ارائه شده است.

$$\tau_{ET} = 0.2614\ln\left(C_T\right) + 0.2133 \quad R^2 = 0.95 \qquad (۱۷)$$

در این رابطه τ_{ET}: تنش‌برشی آستانه فرسایش (نیوتن بر متر مربع) و C_T : زمان تحکیم رسوبات ته‌نشین شده (روز) می‌باشد. همان‌طور که مشخص است با افزایش زمان تحکیم رسوبات، تنش‌برشی آستانه فرسایش نیز افزایش می‌یابد که این تغییرات به صورت رابطه لگاریتمی می‌باشد.

DOI: 10.22055/jise.2018.25421.1753

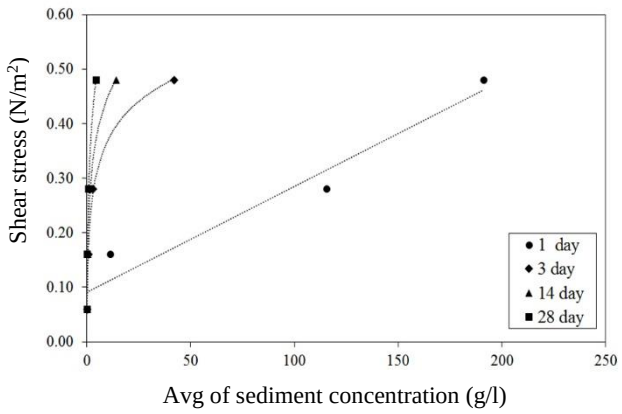


Fig. 6– The bed shear stress as the function of average of sediment concentration with different consolidation times.

شکل ٦- رابطه تنش‌برشی و متوسط غلظت رسوبات در هر تنش‌برشی در دوره‌های تحکیم مختلف

جدول ۳- تنش‌برشی بحرانی و سرعت بحرانی برای فرسایش در دوره‌های تحکیم مختلف

Table 3. Critical shear stress and critical velocity for erosion in different consolidation times

Consolidation time (day)	1	3	14	28
Critical shear stress of erosion (N/m^2)	0.29	0.66	0.9	1.12
Critical velocity of erosion (m/s)	0.13	0.25	0.3	0.33
Froud Number	0.19	0.35	0.42	0.46

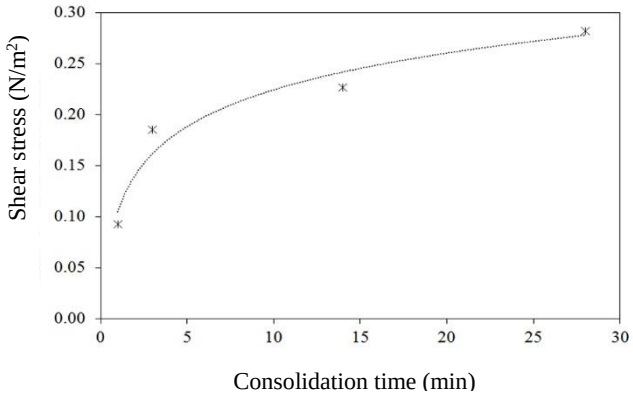


Fig. 7– Relation changes between shear stress of erosion threshold and consolidation time.

شکل ۷- رابطه بین تغییرات تنش‌برشی آستانه فرسایش و زمان تحکیم

"ارتباط بین تنش‌برشی آستانه فرسایش و درصد پوکی رسوبات شکل (۸) نشان داده شده است". نتایج نشان می‌دهد که مقادیر تنش‌برشی رابطه معکوس با درصد پوکی رسوبات دارد. معادله (۱۸) نیز ارتباط بین این دو پارامتر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تنش‌برشی آستانه فرسایش مشابه رابطه قبل به صورت لگاریتمی با مقادیر درصد پوکی رسوبات در زمان‌های مختلف تحکیم در ارتباط است.

$$y = -7.719 ln(x) + 6.9893 \qquad R^2 = 0.98 \qquad (۱۸)$$

نرخ فرسایش

برای محاسبه نرخ فرسایش از رابطه (۱۸) استفاده شد. در این رابطه از حاصل‌ضرب اختلاف دو غلظت متوالی در حجم سیال، جرم رسوب فرسایش یافته مشخص می‌شود. از تقسیم جرم رسوبات بر فاصله زمانی دو نمونه‌گیری و بر سطح فلوم، نرخ متوسط فرسایش در واحد زمان و واحد سطح بستر فلوم بدست می‌آید.

$$Q_d = \frac{(C_2 - C_1) \times V_{flume}}{(t_2 - t_1) \times A} \qquad (۱۹)$$

در رابطه فوق، Q_d: نرخ فرسایش ($gr/m^2/min$)، C: غلظت رسوبات معلق (گرم بر لیتر)، V: حجم سیال موجود در فلوم (لیتر)، t_i: زمان (دقیقه) و A: مساحت بستر فلوم (m^2) می‌باشد.

"تغییرات نرخ فرسایش در بازه‌های نمونه‌گیری غلظت رسوبات برای دوره‌های تحکیم مختلف در شکل (۹) نشان داده شده است". به منظور نمایش جزئیات بیشتر، تغییرات نرخ فرسایش دوره‌های یک و سه روز از دوره‌های ۱۴ و ۲۸ روز تفکیک شده است. قابل مشاهده است که در آزمایش‌ها به ازای تنش‌برشی یکسان، نرخ فرسایش با دوره تحکیم رابطه معکوس دارد و در زمان افزایش تنش‌برشی جریان، نرخ فرسایش نیز افزایش یافته و در ادامه کاهش یافته است. دلیل کاهش نرخ فرسایش، رسیدن به حالت تعادل و همچنین فرسایش لایه سطحی در زمان اعمال تنش‌برشی می‌باشد. در دوره‌های تحکیم ۱۴ و ۲۸ روز گاهاً مقادیر منفی از نرخ فرسایش در انتهای آزمایش قابل مشاهده است که این موضوع نشانگر ته-نشینی دوباره رسوبات معلق می‌باشد. چرا که غلظت بالای رسوبات معلق باعث برخورد توده‌های رسوبی و تشکیل توده‌های بزرگتر شده که این ذرات در برابر تنش‌برشی جریان مقاومت کرده و دوباره ته-نشین می‌شوند. بر اساس نتایج نرخ ته‌نشینی، مجموع رسوبات فرسایش یافته برای دوره‌های تحکیم ۱، ۳، ۱۴ و ۲۸ روز بترتیب ۸۰/۵، ۲۰/۸، ۷/۶ و ۲/۲ کیلوگرم به‌دست می‌آید. با توجه به مقادیر رسوب در ابتدای آزمایش به ازای دوره‌های تحکیم مختلف، می‌توان اذعان داشت که برای دوره‌های ۱ تا ۲۸ روز به‌ترتیب ۶۱/۹، ۱۶/۳۳، ۵/۸۴ و ۱/۶۸ درصد رسوبات فرسایش یافته است.

"مقادیر نرخ فرسایش در بازه ابتدا و انتهایی اعمال تنش‌برشی در دوره‌های مختلف تحکیم در شکل (۱۰) نمایش داده شده است".

در این شکل نیز به‌منظور مشاهده جزئیات بیشتر، نتایج تحکیم یک روزه به‌صورت مجزا نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تغییرات نرخ فرسایش در دوره یک روزه با دیگر دوره‌های تحکیم کاملاً متفاوت است. در دوره‌های ۳ تا ۲۸ روزه نرخ فرسایش در گذر زمان روند افزایشی داشته است. به عبارت دیگر با افزایش تنش‌برشی، نرخ فرسایش نیز روند افزایشی دارد. اما در خصوص تحکیم یک روزه نتایج نشان می‌دهد روند افزایش نرخ فرسایش تا تنش‌برشی سوم ادامه دارد اما اعمال تنش‌برشی چهارم موجب کاهش نرخ فرسایش می‌شود. در نتایج شکل (۹ الف) نیز قابل مشاهده است که در تنش‌برشی چهارم، نرخ فرسایش در بازه-های نمونه‌گیری تقریباً یکسان شده است. این موضوع را می‌توان این گونه استنباط نمود که در دوره تحکیم یک روزه، به دلیل استحکام پایین، توده‌های رسوب در برابر تنش‌برشی چهارم (۲/۱۹ نیوتن بر متر مربع) غلظت ستون آب تا مرز اشباع شدن پیش رفته است. به عبارت دیگر در این شرایط، ستون آب ظرفیت غلظت بیشتر رسوبات را نداشته و می‌توان بیان داشت که در این حالت مقدار فرسایش و ته‌نشینی رسوبات هم‌زمان اتفاق می‌افتد. "غلظت رسوبات معلق برای تحکیم یک روزه به ویژه در ۱۵۰ دقیقه پایانی آزمایش با توجه به شکل (۴) ثابت است، از این رو تنش‌برشی چهارم را می‌توان به‌عنوان تنش‌برشی فرسایش کامل رسوبات در نظر گرفت.

هم‌چنین قابل مشاهده است که برای هر سه دوره تحکیم در تنش‌برشی سوم (۰/۹۶ نیوتن بر متر مربع) نرخ ته‌نشینی کاهش داشته که در تحکیم ۲۸ روز این کاهش مشهودتر است. دلیل این موضوع را می‌توان با دوباره ته‌نشین شدن رسوبات فرسایش یافته که نهایتاً در مقدار نرخ فرسایش تاثیر گذار است، توجیه نمود.

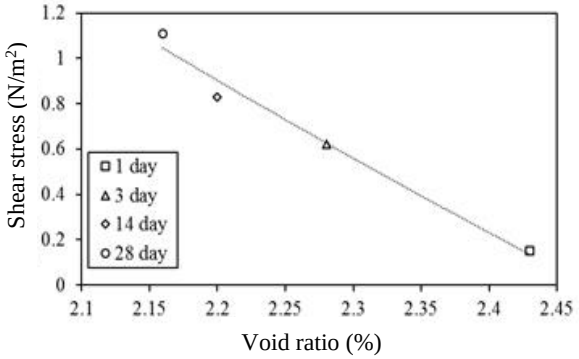


Fig. 8- Relationship between shear stress and erosion threshold against sediment porosity

شکل ۸- ارتباط تنش‌برشی آستانه فرسایش در برابر میزان پوکی رسوبات

DOI: 10.22055/jise.2018.25421.1753

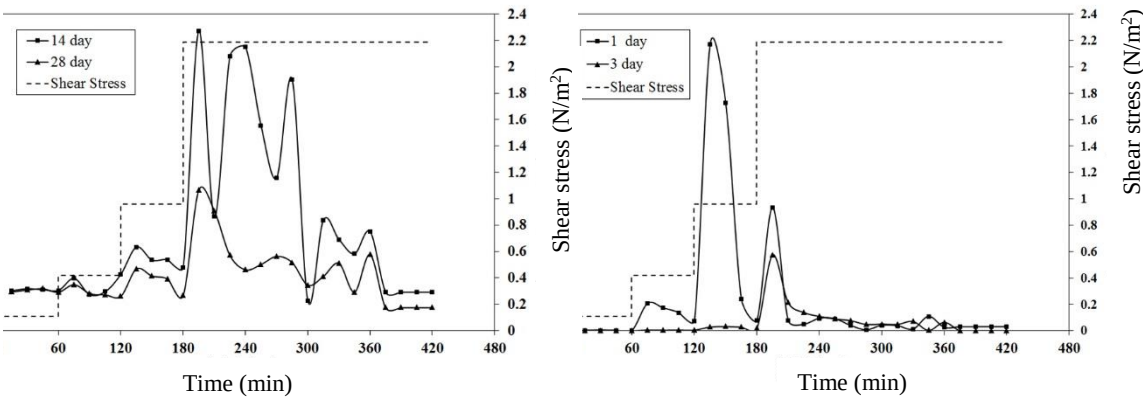


Fig. 9- Erosion rate changes in different periods of consolidation

شکل ۹- تغییرات نرخ فرسایش در دوره‌های مختلف تحکیم

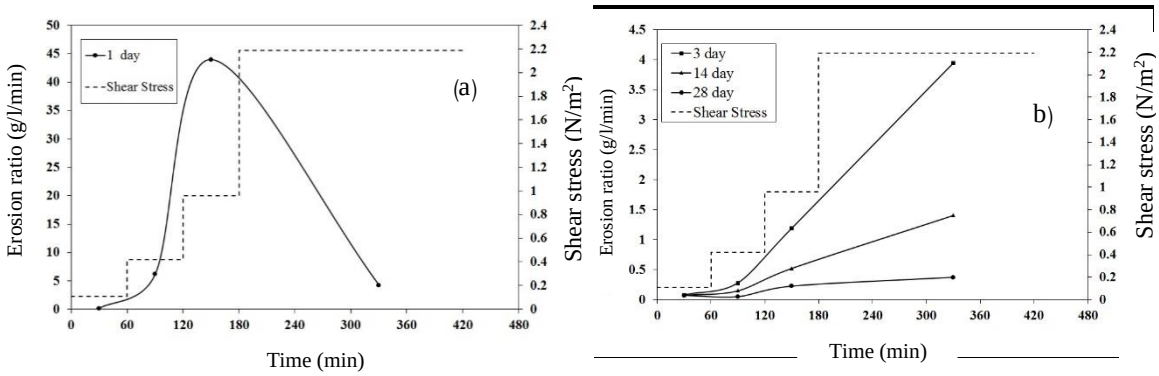


Fig. 10- Erosion rate during shear stresses, a) one day consolidation period, b) consolidation period 3, 14 and 28 days

شکل ۱۰- نرخ فرسایش در بازه زمانی اعمال تنش‌های برشی، الف: دوره تحکیم یک روز، ب: دوره تحکیم ۳، ۱٤ و ۲۸ روز

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از فلوم دایره‌ای، فرسایش رسوبات چسبنده در دوره‌های مختلف تحکیم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش تنش‌برشی جریان موجب فرسایش رسوبات تحکیم یافته بستر می‌شود. افزایش غلظت ناگهانی رسوبات معلق در ابتدای بازه‌های اعمال تنش‌برشی موجب فرسایش توده‌ای و جرمی در رسوبات با دوره تحکیم یک و سه روزه می‌شود. این درحالی است که در دوره‌های تحکیم ۱۴ و ۲۸ روزه، به دلیل استحکام توده‌های رسوبی، فرسایش از سطح انجام می‌شود.

با توجه به غلظت رسوبات در ابتدای آزمایش و متوسط غلظت در هر تنش‌برشی، تنش‌برشی آستانه فرسایش به ازای دوره‌های تحکیم ۱ تا ۲۸ روز بترتیب ۰/۱۵، ۰/۶۲، ۰/۸۳ و ۱/۱۱ نیوتن بر متر مربع به‌دست آمد. مشخص است که افزایش دوره تحکیم، موجب افزایش تنش‌برشی آستانه فرسایش می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که تنش‌برشی آستانه فرسایش با دوره تحکیم رسوبات بستر رابطه لگاریتمی دارد.

بررسی نرخ فرسایش رسوبات نشان می‌دهد که این پارامتر با زمان تحکیم رابطه معکوس دارد. همچنین مشخص شد که بلافاصله پس از افزایش تنش‌برشی جریان، نرخ فرسایش نیز افزایش یافته و تا اعمال تنش‌برشی بعدی روند کاهشی پیدا می‌کند. با توجه به مقادیر نرخ فرسایش مشخص شد که برای دوره‌های تحکیم ۱ تا ۲۸ روز به‌ترتیب ۶۱/۹، ۱۶/۳۳، ۵/۸۴ و ۱/۶۸ درصد رسوبات فرسایش یافته است. مقادیر نرخ فرسایش در بازه زمانی اعمال هر تنش‌برشی نشان می‌دهد که روند تغییرات دوره‌های تحکیم ۳، ۱۴ و ۲۸ روز مشابه بوده و با افزایش تنش‌برشی، نرخ فرسایش نیز افزایش می‌یابد. اما برای رسوبات با تحکیم یک روز، افزایش نرخ فرسایش تا تنش‌برشی سوم (۰/۹۶ نیوتن بر متر مربع) وجود دارد و پس از اعمال تنش‌برشی چهارم (۲/۱۹ نیوتن بر متر مربع) نرخ فرسایش کاهش یافته است.

تقدیر و تشکر

آزمایش‌ها در یک فلوم دوار واقع در دانشگاه شهرکرد انجام گردید. نویسندگان از مسئولین مربوطه کسانی که امکانات لازم را فراهم نمودند تا ما به راحتی آزمایش‌ها را نجام دهیم کمال تشکر را دارند.

References

1- Ariathurai, Ranjan, and Kandiah Arulanandan. "Erosion rates of cohesive soils." *Journal of the Hydraulics Division* 104, no. 2 (1978): 279-283.

2- Bloomquist, D.G. and F.C. Townsend. 1984. Centrifugal modeling of phosphatic clay consolidation. *ASCE Symposium on Sedimentation/Consolidation Models*, San Francisco.

3- Bui, T.D., 2000. Cohesive sediment transport in natural streams: state of knowledge. In *Building Partnerships* (pp. 1-10).

4- Droppo, I.G., and Amos, C.L. 2001. Structure, stability, and transformation of contaminated lacustrine surface fine-grained laminae. *Journal of Sedimentary Research*, 71(5), 717- 726.

5- Glasbergen, K. 2014. The Effect of Coarse Gravel on Cohesive Sediment Entrapment in an Annular Flume. presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the Degree of master of Science In Geography. Waterloo, Ontario, Canada. 168p.

6- Hoseini, KH., and Kheyrkhahan, M. 2014. Provide regression relation for determining the erosion rate of cohesive sediments with the help of laboratory data and numerical model. Journal of Agricultural Science and Technology, *Water and Soil Science*, 18 (70). PP 187-192.

7- Huang, J., Hilldale, R. C., and Greimann, B.P., 2006. Erosion and Sedimentation Manual. Department of the Interior Bureau of Reclamation. Chapter 4, PP.1-55.

8- Jacobs, W. 2011. Sand-mud erosion from a soil mechanical perspective, PhD dissertation, Delft Univ. of Technol., *Delft, Netherlands*. 154p.

9- Khastar-Boroujeni, M., Esmaili, K., Samadi-Boroujeni, H. and Ziaei, A., 2018. Wastewater Effect on the Deposition of Cohesive Sediment. Journal of Environmental Engineering, 144(1), p.04017083.

10- Krishnappan, B.G., and Engel, P. 1994. Critical shear stress for erosion and deposition in suspended sediments in the Fraser River, *Environment Canada.*

11- Kron, R.B. 1984. The Significance of Aggregate Properties to Transport Processes in Estuarine Cohesive Sediment Dynamics, Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies, edited by A. J. Mehta, *Springer, New York.*

12- Lovelle, J. W., Mofjeld, H. O. and Baker, E. T. 1984. An In-situ Erosion Rate for Fine Grained Marine Sediment. *Journal of Geophysical Research* , 89(4), pp 6543-6552

13- Maa, J. P.-Y., Sanford, L. & Halka, J. P. 1998 Sediment resuspension characteristics in Baltimore Harbour, Maryland. *Marine Geology* 146**,** 137–145.

14- Mei, C. C., Fan, S. J., Jin, K. R. 1997. Resuspension and transport of fine sediments by waves. *J Geophys Res*, 102 (7). PP 1234-1249

15- Mehta, A. J. 1986. Characterization of cohesive sediment properties and transport processes in estuaries, In: Mehta A J, ed. Estuarine Cohesive Sediment Dynamics. *Berlin: Springer-Verlag*, 290—325.

16- Mehta, A. J., and Dyer, K.R. 1990. Cohesive sediment transport in estuarine and coastal waters, Vol. 9. *Ocean engineering science*, PP. 815-839.

17- Mehta, A. J. 1991. Review notes on cohesive sediment erosion. In: Kraus N C, Gingerich K J, Kriebel D L, eds. Coastal Sediments' 91. *New York: ASCE,*. 40—53.

18- Milburn, D., and Krishnappan, B.G. 2003. Modelling erosion and deposition of cohesive sediments from Hay River, Northwest Territories, Canada. *Nordic Hydrology*. 34(1), 125-138.

DOI: 10.22055/jise.2018.25421.1753

19- Mitchener H, Torfs H. 1996. Erosion of mud/sand mixtures. *Coastal Eng*, 29: 1—25.

20- Parchure, T. M., Mehta, J. A. 1985. Erosion of soft cohesive sediment deposits. *J Hydr Eng, ASCE*, 111(10): 1308—1326.

21- Samadi-Boroujeni, H., M.Fathi-oghaddam, M.Shafaie-Bajestan and H.Mohammad.Vali.Saman, 2005, "Modelling of Sedimentation and Self-Weight Consolidation of Cohesive Sediments", Sediment and Ecohydraulics Intercoh2005.1stEdn, *Elsevier B.V.Oxford,UK, ISBN*: 978-444-53184-1, pp. 165-191.

22- Samadi-Boroujeni, H., Akbari, N. and Gorbani, B., 2013. Experimental Study of Erosion Threshold Shear Stress of Deposited Cohesive Sediments with Different Self-Weight Consolidation. *Journal of Science of Irrigation Engineering*, 37(3). PP. 1-11. (In Persian)

23- Sheng, Y. P. 1986. Modeling bottom boundary layer and cohesive sediment dynamics in estuarine and coastal waters. *In: Mehta A J, ed. Estuarine Cohesive Sediment Dynamics. Berlin: Springer-Verlag*, 360—400.

24- Vojdani, N. and Ghomshi, M., 2007. Experimental Study of the Critical Shear Stress of Erosion of Cohesive sediment in Six Irrigation Canals in Khuzestan Province. *Shahid Chamran University of Ahvaz*, Ahvaz, Iran. (In Persian)

25- Winterwerp, J. C., Van Kesteren, W. G. M. 2004. Introduction to the Physics of Cohesive Sediment in the Marine Environment. *Amsterdam: Elsevier*, 2004.

26- Winterwerp, J. C., van Kestern, W. G. M., van Prooijen, B. 2012. A conceptual framework for shear flow-induced erosion of soft cohesive sediment beds. PP. 432-441

27- Zhu, Y. H. 2006. Breach Growth in clay-dikes. Dissertation for the Doctoral Degree. Delft: *Delft University of Technology*, ISBN: 978-90-9020964-7.