

The role of urban wastewater on the rate of cohesive sediment erosion in water transfer channels

Zahra Taheri ¹, Kazem Esmaili ^{2*}, Hossein Samadi-Boroujeni ³, Saeed Reza 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.

*kazem.esmaili@gmail.com

Received: 1 April 2019, Accepted: 22 February 2020  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: One of the important influence factors on the critical shear stress of erosion is consolidation. Fluid mud consolidates gradually as a result of self-weight. Many factors affect the consolidation process, including initial concentration, water temperature, hydrodynamic conditions, particle characteristics, and salinity. The critical shear stress for the erosion of cohesive sediment is found to increase with consolidation pressure as well. Bed age can influence the transport characteristics of the deposited sediment by altering the critical shear stress for erosion through compaction. A major number of investigators used circular flume for studying the transport of cohesive sediments. These flumes essentially consists of two main components: a circular channel and an annular cover plate that fits inside the channel. The goal of this study is to better understand the wastewater effects on erosion and self-weight consolidation of cohesive sediment. Also, some experiments were carried out in annular flume using a mixture of cohesive sediment and water with a combination of three concentration of wastewater and four times of consolidation for evaluating their effects on the erosion of cohesive sediments.

Methodology: In this work, three sets of experiments with three different levels of wastewater (0%, 30%, and 60%) were conducted in an annular flume. The optimal speed ratio between the ring and the flume to be 1.1 for a water depth of 0.2 m. For the plane bed experiment, the water depth above the bed was maintained at 0.2 m. The sediment was sampled from Pribalut dam reservoir, located in the northern Karun basin, Iran. These fine sediments contain 76% silt and 24% clay. Wastewater used in the experiments was taken from Shahrekord wastewater treatment plant outlet, which is located east of Shahrekord city, Iran. In order to test self-weight consolidation of the cohesive sediment, the mixture of three levels of wastewater (0%, 30%, and 60%) with three different initial concentrations of cohesive sediment (200, 300 and 400 g/l) were poured into nine settling columns. By using the linear interpolation method, in order to have 10 cm height of deposited sediment in the annular flume, the initial concentration of the used mixture of fluid and sediment to fill the

flume for consolidation times of 1, 3, 14 and 28 days were found 279, 283, 289 and 291 g/l, respectively. To determine the appropriate ratio of the rotational speed of the ring to the flume, velocity and shear stress profiles were measured in the rotating flume, using an Acoustic Doppler Velocimeter (ADV). The flume was operated at a high speed, corresponding to a bed shear stress of 11.2Pa, for 30 minutes to ensure a homogenous suspended sediment mixture. This routine was followed for four consolidation periods of 1, 3, 14 and 28 days in which the bed was left undisturbed. For each erosion experiment in the presence of wastewater, the flume was started from rest and the rotational speed was increased in time increments of 60 min from the first shear stress to fourth shear stress and was considered 240 minutes for the last shear stress. Consequently, all experiments were done for a period of 480 min; meanwhile the test samples were collected in a sampling interval of 15 min during the first hour and 30 min thereafter. The samples were taken from depths 15.2, 18.3, 22.2 and 26.8 cm from the bottom.

Results and discussion: During the one-day consolidation period, the process of changes in the erosion rates is quite different. In this period, consolidation of the results showed that the presence of wastewater increased the resistance of bed sediment and reduced erosion rate. In this case, due to the results of the sediment consolidation process, the incompleteness of the consolidation process and biota affecting resulted from the presence of wastewater can be regarded as the main reasons for this difference. During the one-day period of the third shear stress (0.41 N/m²), the erosion rate increased and the highest erosion rate occurred in the fluid containing 60% wastewater and in the fifth stress. It can be inferred that the presence of wastewater in addition to impact on sediment consolidation caused more cohesion of the sediments that withstood the turbulence of the flow until the fourth shear stress and then experienced abrupt erosion at the last stress. This event occurred for pure water and 30% wastewater at the third shear stress. At consolidation periods of 3, 14 and 28 days, the results show that at different concentrations of wastewater, the erosion rate is increased with increase of the shear stress, such that the highest erosion rate occurred at the largest shear stress. ESP also increased with increasing wastewater percentage in the one-day consolidation period. The presence of wastewater also increased the shear stress of the erosion threshold, which is a trend that is unlike the consolidation periods of 3 to 28 days.

Conclusions: The results of this study show that the presence of wastewater has a dual role in the sediment consolidation process such that the rate of consolidation for different time periods in the fluid, it is 30% lower in pure water and 60% in fluids containing wastewater. Compared to pure water and 60% wastewater it was observed that sediment consolidation in 60% fluids is more than pure water. Given the similarity of the conditions of the consolidation experiments (time and type of sediments), the dual role of the wastewater in the consolidation process can be attributed to the difference in fluid quality parameters. In calculating the amount of erosion threshold shear stress, the dual impact of the wastewater is also evident, such that at different time periods, the lowest critical shear stress is for sediments in the fluid containing 30% of wastewater and the highest is for fluids containing 60% of wastewater. Accordingly, the ESP values showed a different trend for the 30% wastewater in all consolidation periods except for one day. For this purpose, the mean value of ESP index and relative height at different levels of wastewater showed that the trend of h/h_0 changes for different wastewater percentages was the same as the ESP index changes. Accordingly, ESP values indicate that in fluids containing 30% of wastewater, sediments have more diffusion than other wastewater concentrations.

Keywords: wastewater, ESP, erosion ratio, cohesive sediment.

نقش پساب تصفیه شده شهری بر نرخ فرسایش رسوب‌های چسبنده در آبراهه‌های انتقال آب

زهرا طاهری^۱، کاظم اسماعیلی^۲، حسین صمدی بروجنی^۳، سعیدرضا خدانشناس^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.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۴- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

*kazem.esmaili@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۱۲، پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۰۳ و ب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: امروزه بررسی میزان فرسایش رسوب‌های چسبنده یک بخش مهم در سازه‌های انتقال آب، با استفاده از پیش‌بینی و تعیین رفتار رسوب‌هاست. سویی دیگر در منطقه‌های خشک منابع آب تجدیدپذیر مانند پساب تصفیه شده شهری به عنوان یک ذخیره آبی مطمئن در برنامه‌ریزی منابع آب به منظور تأمین نیاز بخش صنعت و کشاورزی مورد توجه قرار می‌گیرد. ویژگی‌های شیمیایی پساب موجب تغییر رفتار رسوب‌های چسبنده در کانال‌های انتقال آب می‌شود. از این رو در این تحقیق با استفاده از یک فلوم دوار به بررسی نرخ فرسایش رسوب‌های چسبنده در دوره‌های تحکیم مختلف پرداخته شد. در این راستا آزمایش‌ها در سه حالت آب خالص، سیال حاوی ۳۰ و ۶۰ درصد پساب انجام و دوره تحکیم رسوب‌های در بستر فلوم ۱، ۳، ۱۴ و ۲۸ روز در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد در همه‌ی دوره‌های تحکیم در آغاز زمان اعمال تنش‌برشی، نرخ فرسایش به دلیل حضور رسوب‌های سطحی در آغاز افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. بیشترین نرخ فرسایش در سیال حاوی ۶۰ درصد پساب و در تنش برشی ۲/۳۵ نیوتن بر مترمربع رخ داد. همچنین با افزایش دوره تحکیم اختلاف نرخ فرسایش در پساب ۳۰ درصد، با آب خالص و ۶۰ درصد پساب افزایش می‌یابد که این امر به دلیل وجود بالاتر بودن شاخص ESP بیشتر در شرایط ۳۰ درصد پساب است. در دوره تحکیم‌های یکسان نیز بیشتر بودن شاخص ESP در سیال حاوی ۳۰ درصد پساب که منجر به پخشیدگی بیشتر ذرات می‌شود، عمق ته‌نشینی بیشتر و نسبت تخلخل کمتر خواهد شد.

کلید واژگان: پساب شهری، ESP، نرخ فرسایش، رسوبات چسبنده.

۱- مقدمه

محیطی مانند میزان مواد آلی، pH، شوری، میزان رطوبت و حتی زیست غشاها قرار دارد؛ پیش‌بینی رفتار این نوع رسوب‌ها همچون فرآیند فرسایش‌پذیری، با مشکل روبرو شده است (Black., 2002; Winterwerp and Van, 2004; Kestern., 2004; Grobowski., 2011).

از سویی دیگر در سال‌های اخیر که استفاده از منابع آب تجدیدپذیر مانند پساب‌های تصفیه شده شهری رواج یافته است لذا استفاده از پساب در فعالیت‌های کشاورزی نیز گسترش یافته که منجر به جریان آن در آبراهه‌های انتقال آب شده، لذا به خاطر دارا بودن ویژگی‌های شیمیایی بر

امروزه به دلیل پیچیدگی رفتار رسوب‌های چسبنده، فرآیند انتقال این رسوب‌های به طور کامل شناخته شده و قابل درک نیست. به طور کلی انتقال رسوبات چسبنده را می‌توان شامل فرآیندهای فرسایش، رسوبگذاری و تحکیم دانست (Krishnappan., 2006). رفتار رسوب‌های چسبنده تحت تأثیر پیوندهای بین ذره‌ای بوده که این پیوندها نیز به شدت به تعامل بین فراسنجه‌های فیزیکی، شیمیایی، مکانیکی و زیستی وابسته است. به دلیل وجود جاذبه بین ذره‌ای در رسوب‌های چسبنده که تحت تأثیر عامل‌های

بزرگ رسوب از بستر است و جدا شدن توده‌ای از ذرات، فرسایش جرمی معرفی شد (Winterwerp and Van Kestern., 2004).

امروزه دو دیدگاه در مورد آستانه فرسایش رسوب‌های چسبنده وجود دارد. نخست دیدگاه، بر نبود آستانه فرسایش رسوب‌های چسبنده باور دارد چرا که برخی از ذرات در هر مقدار از تنش‌برشی بستر دچار فرسایش می‌شوند (Lovelley et al., 1984 and Parchure et al., 1985).

(Lovelley et al. (1984) میزان نرخ فرسایش (ε) را با استفاده از مفهوم نبود آستانه فرسایش به صورت زیر ارائه کردند:

$$\varepsilon = \alpha \tau^\beta \quad (1)$$

در این رابطه α و β ضرایب‌های تجربی هستند. (Mehta and Partheniades (1982) یک تابع نمایی برای فرسایش بسترهای تازه ته‌نشین شده ارائه کردند:

$$E / \varepsilon_0 = M \left[\alpha (\tau_b / \tau_c - 1)^n \right] \quad (2)$$

که در آن ε_0 ، α و n ضریب هستند. رابطه اخیر توسط دیگر محققان به یک معادله توانی به صورت زیر توسعه یافت.

$$E = M (\tau_b / \tau_c - 1)^n, \text{ if } \tau_b > \tau_c \quad (3)$$

که در آن τ_c : تنش‌برشی بحرانی ته‌نشینی است، τ_b : تنش‌برشی بستر، n : یک تابع توانی از ترکیب رسوب‌ها و M : فراسنجه رسوب.

(Baptiste et al. (2017) ضریب n را تابعی توانی از ترکیب‌بندی رسوب‌ها معرفی کرده و مقدار آن را برای رسوب‌ها چسبنده یک و برای رسوبات غیر چسبنده ۱/۵ در نظر گرفتند. در شرایطی که ساختار و ویژگی‌ها بستر به نسبت یکنواخت باشد رابطه زیر برای فرآیند فرسایش رسوب‌های چسبنده ارائه شد (Mitchener, 1996; Mei, 1997).

$$E = M (\tau_b - \tau_c)^a \quad (4)$$

(Bui (2000) فرسایش رسوب‌ها از بستر به عنوان جرم رسوب‌های جابه‌جا شده توسط تنش‌برشی بستر در نظر گرفت و رابطه زیر را ارائه داد:

فرآیند رسوب‌گذاری در آبراهه‌ها نیز تاثیرگذار بوده است. امروزه استفاده از فلوم‌های مستقیم در بررسی‌ها و ارزیابی‌های رسوبات چسبنده منسوخ شده است. فرآیند انتقال رسوب‌های ریزدانه فرآیندی زمان‌بر است که از یک ساعت تا روزها به طول می‌انجامد و رسیدن به چنین فرآیند زمانی با استفاده از فلوم مستقیم عملی نیست، مگر اینکه از یک آبراهه بسیار طولانی استفاده شود که با توجه به فضای آزمایشگاهی امکان‌پذیر نمی‌باشد. از سویی دیگر در آبره‌های مستقیم چرخش جریان توسط پمپ می‌باشد که تخریب ساختار لخته‌ها^۱ توسط انرژی بالای پمپ، سبب ایجاد خطا در نتایج بررسی رفتار رسوب‌های چسبنده می‌شود. در چهار دهه اخیر، فلوم دوار به عنوان یک ابزار مناسب برای ارزیابی رسوب‌های چسبنده استفاده می‌شود.

مهم‌ترین نتیجه‌ی به دست آمده از این آزمایش‌ها وجود یک تنش‌برشی آستانه فرسایش است که تنش‌برشی بحرانی بستر برای فرسایش (τ_c) نامیده شد که در تنش‌های جریان فراتر از آن، رسوب‌ها فرسایش می‌یابند. تنش‌برشی آستانه فرسایش یکی از فراسنجه‌های مهم در مدل‌های انتقال رسوب‌های چسبنده است. برای رسوب‌های چسبنده میزان تنش‌برشی بحرانی برای فرسایش بزرگ‌تر از تنش‌برشی بحرانی ته‌نشینی است (Huang et al., 2006). بر مبنای نظر محققان فرسایش رسوب‌های چسبنده را می‌توان در سه حالت فرسایش لخته، فرسایش سطحی و فرسایش جرمی در نظر گرفت. فرسایش لخته در شرایطی که تنش‌برشی بستر بیشتر از چسبندگی بین لخته‌ها و بستر باشد به صورت جدا شدن لخته به صورت جدا از بستر رخ می‌دهد. فرسایش سطحی به شرایطی گفته می‌شود که ذرات منفرد به صورت آشکار آغاز به حرکت از سطح بستر رسوب‌های چسبنده می‌کنند. (Jacobs. (2011) فرسایش لخته را یک ویژگی تصادفی از شرایط جریان و مقاومت سطح رسوب‌ها است در حالیکه فرسایش سطحی با شاخص خمیری در ارتباط است. فرسایش توده‌ای در مقادیر بزرگ‌تر تنش برشی (سرعت) رخ می‌دهد و مشخصه آن جدا شدن توده‌های

¹ Flocculation

تنش برشی آستانه فرسایش را برای دوره‌های تحکیم ۳، ۱۴ و ۳۰ روزه به ترتیب ۰/۱۶، ۰/۲۲ و ۰/۳۱ نیوتن بر متر مربع و همچنین میزان سرعت آستانه فرسایش را برای دوره‌های یاد شده به ترتیب ۰/۱۵، ۰/۱۸ و ۰/۲۱ متر بر ثانیه محاسبه کردند.

(Droppo et al. (2009) به بررسی ویژگی‌های فرسایش رسوبات چسبنده در فلوم دواری با قطر ۲ متر پرداختند. این محققان آزمایش‌های فرسایش را برای دوره‌های تحکیم ۱، ۳ و ۷ روزه انجام شد. افزون بر این اندازه ذرات با استفاده از روش نوری، پردازش‌های تصویر، اندازه‌گیری تراکم و تجزیه و تحلیل میکروبی برای بررسی بیشتر ویژگی‌های فرسایش کف و تجمع به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که تنش برشی بحرانی کف برای رخدادهای فرسایش از ۰/۰۵ به ۰/۱۹ پاسکال (برای دوره زمانی یک تا هفت روز) افزایش یافته است. (Glasbergen (2014) خصوصیات انتقال رسوبات چسبنده حوضه رودخانه البوا در کانادا را با استفاده از یک فلوم دوار به قطر ۵ متر با بستر صاف بررسی کرد که در طی این آزمایش‌ها میزان تنش برشی بحرانی رسوبات چسبنده را برای فرسایش و رسوبگذاری به ترتیب ۰/۲۱۲ و ۰/۱۱۵ پاسکال در طول دوره‌های تحکیم ۳۹ و ۱۱۳ ساعت به دست آورد. تنش برشی بحرانی برای فرسایش رسوبات رودخانه البوا^۱ به طور تقریبی دو برابر بیشتر از تنش برشی بحرانی ته نشینی بود که با نتایج بررسی‌های (Stone and Krishnappan (1997) و (Milborn and Krishnappan (2003) نیز همخوانی داشت. به دلیل پیچیدگی رفتار رسوبات چسبنده به‌رغم نتایج بررسی‌های بسیاری که در این زمینه انجام شده، تاکنون اطلاعات کافی و منسجم در زمینه هیدرولیک انتقال این رسوبات وجود ندارد. چرا که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی رسوبات و سیال و همچنین ویژگی‌های همآوری و چسبندگی در رسوبات ریزدانه باعث تفاوت در نتایج پژوهش‌های مختلف می‌شود.

بر این مبنای آگاهی از تاثیر پساب بر نرخ فرسایش در شرایط مختلف تحکیم رسوبات، به منظور مدیریت و بهره‌برداری بهتر شبکه‌های انتقال آب ضروری به نظر

$$E = \varepsilon(\tau_b - \tau_s) \quad (5)$$

در این رابطه E نرخ فرسایش، ε ضریب فرسایش، τ_b تنش برشی بستر و τ_s تنش مقاومتی بستر است. (Zhu (2006) با تقسیم رابطه (۴) بر تراکم و چگالی رسوبات و قرار دادن نمایه $a=1$ رابطه زیر را پیشنهاد کرد:

$$E = M_e(\tau_b - \tau_c) \quad (6)$$

E نرخ فرسایش در طول بر واحد زمان (m/s)، $M_e = M/\rho_s$ ضریب توصیف قابلیت فرسایش رسوبات. عبارت‌های M یا M_e و τ_c فراسنجه‌های رسوبات هستند در حالی که τ_b یک پارامتر هیدرولیکی است. (Parchure and Mehta (1985) برای بسترهای چسبنده‌ای که دارای روند افزایش چگالی با عمق هستند، رابطه‌ای را برای نرخ فرسایش پیشنهاد کردند:

$$\varepsilon = E_0 \exp\left[K_3(\tau_b - \tau_c)^{0.5}\right] \quad (7)$$

for $\tau_b > \tau_c(z)$

E_0 و K_3 با اجرای آزمایش‌ها تعیین شدند و به ویژگی‌های رسوبات بسیار حساس هستند. (Hosseini and Kheirkhahn (2015) نرخ فرسایش رسوبات چسبنده را بر مبنای تنش برشی بحرانی و غلظت رسوبات بستر بررسی کردند و پس از صحت‌سنجی نتایج و واسنجی فراسنجه‌های نرم‌افزار Mike21 با نتایج آزمایشگاهی، عامل‌های موثر بر نرخ فرسایش را در قالب اعداد بی‌بعد بررسی و رابطه‌ای به صورت نمایی به دست آوردند که دقت مناسبی با ضریب تبیین ۹۹٪ نسبت به رابطه ارائه شده توسط (Mehta (1985) را نشان داد. (Akbari et al. (2012) با استفاده از فلوم دوار به بررسی فرسایش رسوبات ریزدانه پرداختند که نتایج این محققان 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 رسوباتی با تحکیم ۵ هفته تغییر داشت و برای رسوبات زیر سطحی این مقدار ۰/۴۴ نیوتن بر متر مربع برای تحکیم ۳ روز تا ۰/۶۹ نیوتن بر متر مربع برای رسوبات با تحکیم ۵ هفته به دست آمد. (Samadi-boroujeni (2017) به بررسی فرسایش رسوبات رسوبات چسبنده سد کرخه پرداختند که

¹ Elbow River

سیلت و با قطر متوسط 0.04 میلی‌متر بود. به دلیل ویژگی‌های چسبندگی و الکتروشیمیایی ذرات رس و وجود یون‌ها در پساب لذا ویژگی‌های الکتروشیمیایی رسوب‌های در سطح‌های مختلف پساب و در جدول ۲ آورده شد. برای ارزیابی ویژگی‌های الکتروشیمیایی خاک، ظرفیت تبادل کاتیون^۱ (CEC)، نرخ جذب سدیم^۲ (SAR)، هدایت الکتریکی^۳ (EC)، و درصد سدیم تبادلی^۴ (ESP) اندازه‌گیری شد. CEC توسط مجموع مول‌اکی‌والانت‌های کاتیون‌های قابل تبادل (Ca, Mg, Na and K) محاسبه شد. pH و EC با pH متر و EC متر که حسگر این ابزار در محلول قرار داده شد، اندازه‌گیری شد. SAR با اندازه‌گیری غلظت منیزیم، کلسیم و سدیم در عصاره‌اشباع محاسبه شد.

جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پساب و آب آزمایشگاه

Table 1 The concentration of Some Principal Dissolved Elements in the Wastewater Used in the Experiments.

Parameter	Unit	Value	
		Wastewater	Water
pH	-	8.07	7.99
BOD	mg/L	19	1.3
COD	mg/L	31	7
Electrical conductivity (EC)	dS/m	1	0.17
Sodium adsorption ratio (SAR)		2.45	0.04
Calcium (Ca)	ppm	64	34
Magnesium (Ma)	ppm	25.2	0
Sodium (Na)	ppm	92	1
Potassium (K)	ppm	18	7

Note: BOD = biochemical oxygen demand; COD = chemical oxygen demand.

جدول ۲ ویژگی‌های الکتروشیمیایی رسوب‌ها در حضور

سطح‌های مختلف پساب

Table 2 Soil characteristics and properties

Saturated soil 60%	Saturated soil 30%	Saturated soil 0%	
7.87	7.84	7.74	pH
0.76	0.64	0.53	EC
12.4	10.8	5.91	ESP
0.842	0.738	0.245	SAR(mmol/l) ^{1/2}
10.4	9.6	8	CEC

¹ Cation Exchanging Capacity

² Sodium Absorb Ratio

³ Electrical Conductivity

⁴ Exchanging Sodium Percent

می‌رسد. از این‌رو در این تحقیق در نظر است افزودن بر بررسی نوع فرسایش رسوبات ریزدانه در سطح‌های مختلف پساب شهری، آب خالص (پساب صفر)، ۳۰ و ۶۰ درصد، که در تحقیق‌های پیشین کمتر توجه شده، تأثیر آشفستگی جریان بر نرخ فرسایش رسوب‌های چسبنده نیز ارزیابی شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- رسوب‌ها و پساب مورد استفاده

برای انجام این تحقیق رسوب‌ها از مخزن سد خاکی پیر بلوط واقع در حوضه کارون شمالی با مختصات جغرافیایی $x=4713116$, $y=3586402$ تهیه شد. با توجه به هدف تحقیق که بررسی و ارزیابی فرسایش رسوب‌های ریزدانه چسبنده می‌باشد، رسوب‌های مورد نظر از الک شماره ۲۰۰ استاندارد ASTM عبور داده شد. رسوب‌های عبوری از الک شماره ۲۰۰ با قطر 0.075 میلی‌متر بر مبنای تعریف‌ها در گروه رسوب‌های رس و سیلت قرار می‌گیرد که دارای ویژگی چسبندگی نیز خواهند بود.

دانه‌بندی رسوبات به روش هیدرومتری در دو حالت با و بدون کالگن انجام شد که نتایج آن در شکل ۱ و همچنین ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی پساب و آب آزمایشگاه مورد استفاده نیز در جدول ۱ نشان داده شده است.

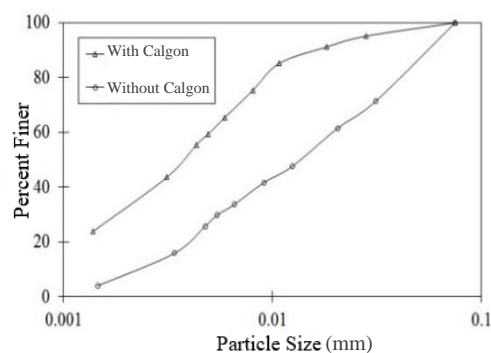


Fig 1. Cumulative frequency curve of particle size in experimental sediment

شکل ۱ منحنی دانه‌بندی رسوب‌های مورد استفاده

اختلاف بین نمودارهای دانه‌بندی با و بدون کالگن نشان دهنده ویژگی چسبندگی رسوبات مورد استفاده است. رسوب‌های حاوی ۲۴ درصد رس کائولونیت، ۷۶ درصد

۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در یک فلوم دوار به ترتیب با قطر درونی، خارجی و میانگین، ۱/۳، ۱/۹ و ۱/۶ متر انجام شد. اجزای مختلف فلوم دوار در شکل ۲ قابل مشاهده است. این مدل از دو قسمت جداگانه فلوم و درپوش تشکیل شده که فلوم از جنس گالوانیزه و مجهز به پنجره‌های پلکسی‌گلس برای مشاهده جریان می‌باشد. همچنین درپوشی از جنس پلکسی‌گلس با قطر میانگین ۱/۶ متر در داخل فلوم به گونه‌ای طراحی شده که از دیواره‌های فلوم دو سانتی‌متر فاصله دارد. ۳۲ عدد شیر نمونه‌گیری در چهار موقعیت مختلف فلوم و در فاصله‌های ۵/۳، ۱۰/۵، ۱۵/۲، ۱۸/۳، ۲۲/۲، ۲۶/۸، ۳۰/۵ و ۳۴ سانتی‌متر از کف تعبیه شده است. فلوم و درپوش، مجهز به دو الکتروموتور و گیربکس جداگانه هستند که قابلیت چرخش در خلاف یکدیگر با سرعت چرخش قابل تنظیم را ایجاد می‌کند. الکتروموتورها به دستگاه متناوب‌ساز مجهز هستند که با تغییر در بسامد برق شبکه، امکان تنظیم دور موتور در سرعت‌های مختلف را فراهم سازد.

Khastar et al. (2018) به بررسی فراسنجه‌های هیدرولیکی در این فلوم دوار پرداختند. در این تحقیق با استفاده از سرعت سنج صوتی^۱ سرعت جریان در سه بعد و در پنج مقطع عمودی اندازه‌گیری شده است که نخستین مقطع در پنج سانتی‌متری دیواره درونی قرار گرفته و مقطع‌های بعدی با همین فاصله به سمت دیواره واقع شده است شکل ۲ الف و ب. این محققان در هر مقطع عمودی، چهار سرعت اندازه‌گیری کردند و سرعت میانگین جریان را با توجه به منطقه تأثیر نقطه‌های اندازه‌گیری، به صورت وزنی محاسبه کردند. نتایج این محققان نشان داد 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 آبراهه‌های باز و به صورت لگاریتمی است. همچنین این محققان نشان دادند در این حالت توزیع تنش‌برشی در عرض فلوم را می‌توان به صورت همسان در نظر گرفت و بر

این مبنا می‌توان نتایج به دست آمده از فلوم دوار را به آبراهه‌های مستقیم تعمیم داد.

۲-۳- مرحله‌های انجام آزمایش‌ها

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر پساب تصفیه شده شهری بر نرخ فرسایش از سه غلظت ۰، ۳۰ و ۶۰ درصد پساب استفاده شد. همچنین به منظور بررسی تأثیر تحکیم رسوبات بستر بر نرخ فرسایش آزمایش‌ها در دوره‌های تحکیم ۱، ۳، ۱۴ و ۲۸ روز انجام گرفت.

۲-۴- پیش‌آزمایش‌های تحکیم رسوبات

در این تحقیق در آغاز آزمایش‌های استوانه ته‌نشینی برای تعیین شرایط آزمایش‌های اصلی انجام شد. این آزمایش‌ها با هدف انتخاب دوره‌های تحکیم رسوبات بستر و غلظت اولیه و عمق رسوبات ته‌نشین شده استفاده شد. با توجه به شرایط رسوب‌گذاری در آبراهه‌های انتقال، فرآیند تحکیم مورد بررسی در این تحقیق از نوع تحکیم با وزن رسوبات می‌باشد. به همین منظور برای انجام آزمایش‌ها در آغاز مخلوط آب و رسوب با غلظت‌های ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ گرم بر لیتر و درصد‌های مختلف پساب (۰، ۳۰ و ۶۰ درصد) در مخزنی تهیه و پس از آماده‌سازی ستون‌های ته‌نشینی شکل ۳، در ستون‌ها ریخته شد. با توجه به اینکه مد نظر بود ارتفاع آب و رسوب در فلوم ۳۰ سانتی‌متر باشد، ارتفاع مخلوط آب و رسوب نیز در آزمایش‌های تحکیم ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

در این آزمایش‌ها دمای محیط به نسبت ثابت و بین ۲۰ تا ۲۳ درجه سلسیوس تنظیم شد. به منظور بررسی رفتار ته‌نشینی رسوبات از لحظه شروع آزمایش تا پایان دوره تحکیم مورد نظر در فاصله‌های مختلف زمانی یک ساعت تا ۲۴ ساعت (بسته به میزان پایین‌رفتن سطح رسوب) ارتفاع رسوب ته‌نشین شده خوانده شد. بر مبنای نتایج ستون‌های ته‌نشینی مشخص شد برای غلظت‌های اولیه رسوب و درصد‌های مختلف پساب پس از گذشت دو هفته عمق رسوبات ته‌نشین شده به نسبت ثابت می‌شود بر همین مبنا به منظور اطمینان بیشتر بررسی تغییرپذیری‌های عمق تا چهار هفته بررسی شد.

¹ Acoustic Doppler Velocimeter

استنباط کرد که پس از ۹۶ ساعت از آغاز آزمایش‌ها غلظت رسوبات و عمق اولیه ته‌نشینی بر میزان تحکیم تأثیر قابل ملاحظه ندارد از این‌رو با توجه به ثابت شدن زمان تغییر پذیرایی‌های عمق رسوبات، آزمایش‌های دیگر برای دوره تحکیم ۱، ۳، ۱۴ و ۲۸ روز انجام شد تا بر این مبنا بتوان تأثیر زمان بر فرآیند تحکیم را به خوبی بررسی و از نتایج آن در آزمایش‌های اصلی فرسایش استفاده کرد.

شکل ۴ نتایج مربوط به ستون‌های ته‌نشینی را نشان می‌دهد که بر این مبنا مشخص است برای درصدهای مختلف پساب، غلظت‌های بیشتر از ۳۰۰ گرم بر لیتر بر تحکیم ناشی از وزن رسوبات تأثیر چندانی ندارند. همچنین بر مبنای شکل ۴ مشخص است برای غلظت ۳۰۰ گرم بر لیتر و در سطح‌های صفر، ۳۰ و ۶۰ درصد پساب، به ترتیب پس از ۴۸، ۹۶ و ۴۸ ساعت عمق رسوبات به یک حد ثابت نزدیک می‌شود.

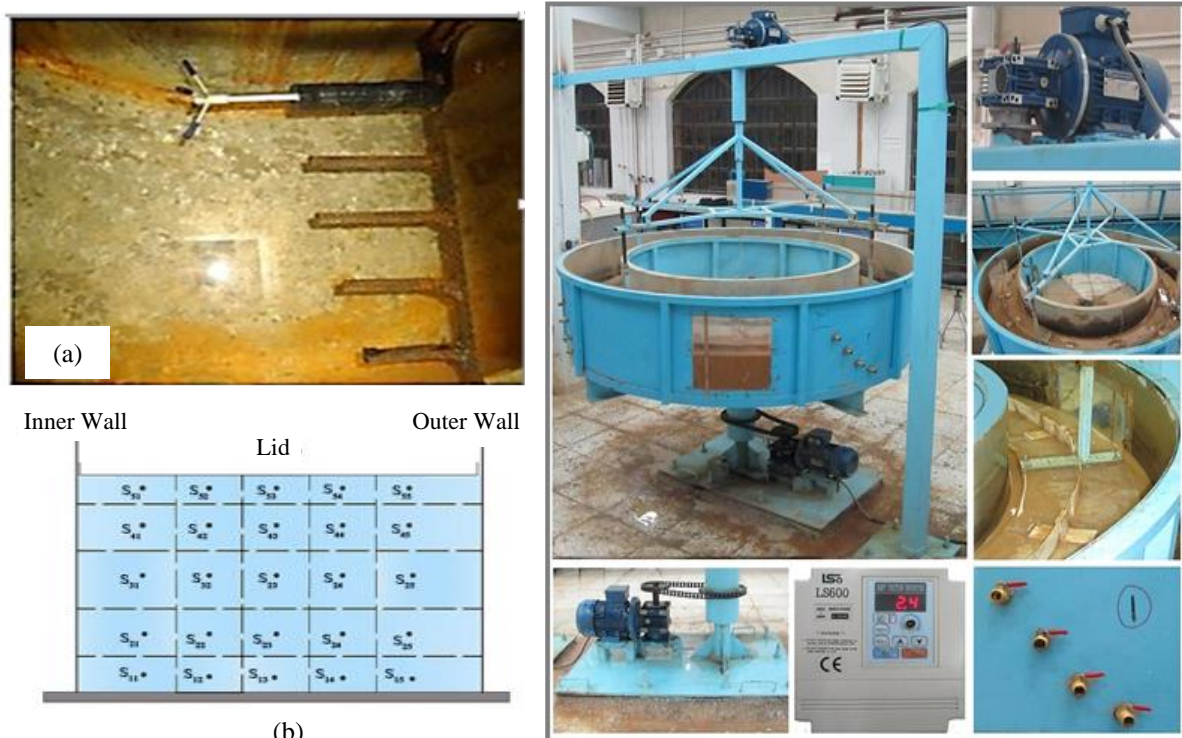


Fig 2. (a) The Annular Rotating Flume Assembly (Khastar et al., 2018). (b) Locating of ADV in annular flume.

شکل ۲ (a) نمایی از اجزای فلوم دوار مورد استفاده، (b) چگونگی قرارگیری سرعت سنج صوتی در فلوم

یکسان رسوبات ته‌نشین شده پس از پایان دوره تحکیم به منظور انجام آزمایش‌های فرسایش عمق رسوبات‌های ته‌نشین شده ۱۰۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که با استفاده از روش درون‌یابی خطی غلظت اولیه برای زمان‌های تحکیم ۱، ۳، ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب ۲۷۹، ۲۸۳، ۲۸۹ و ۲۹۱ گرم بر لیتر به دست آمد.



Fig 3. Using cylinders for deposition experiments

شکل ۳ ستون‌های مورد استفاده برای آزمایش‌های ته‌نشینی

۲-۵- آزمایش‌های فرسایش رسوبات بستر
در آزمایش‌های مربوط به تعیین فرسایش رسوبات مورد آزمایش، پس از ریختن رسوبات در فلوم دوار، در آغاز

بنا بر نتایج به دست آمده از آزمایش ستون ته‌نشینی رسوبات و همچنین با توجه به در نظر گرفتن عمق

تا رسیدن به غلظت تعادلی رسوبها معلق ادامه می‌یابد که با توجه به آزمایش‌های اولیه برای زمان تحکیم یک روزه، مدت تنش‌برشی اول تا چهارم یک ساعت و آزمایش‌های تنش‌برشی پنجم، برای رسیدن به غلظت تعادلی تا پنج ساعت ادامه یافت. ویژگی‌های هیدرولیکی جریان در طول آزمایش فرسایش در جدول ۳ نمایش داده شده است.

در این تحقیق میزان رسوب‌های فرسایش یافته از بستر با توجه به غلظت رسوب‌های معلق در زمان‌های مختلف برآورد می‌شود. به عبارت دیگر میزان رسوب‌های فرسایش یافته در هر زمان برابر با میزان افزایش غلظت رسوب‌های معلق می‌باشد. لازم به توضیح است که برآورد غلظت رسوب‌های معلق بی‌درنگ 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 آن، غلظت رسوب‌های معلق با توجه به فاصله قرارگیری شیرهای نمونه‌گیری، به روش وزنی محاسبه شد.

برای مخلوط شدن کامل رسوبها و خرد شدن کامل لخته‌ها، 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 $11/2 \frac{N}{m^2}$ ایجاد می‌کند، به چرخش درآمدند. پس از مخلوط شدن کامل رسوبها، 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، رسوبها بدون تغییر در بستر باقی می‌مانند اما اگر بیشتر باشد رسوبها 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. بر همین اساس زمان هر تنش‌برشی

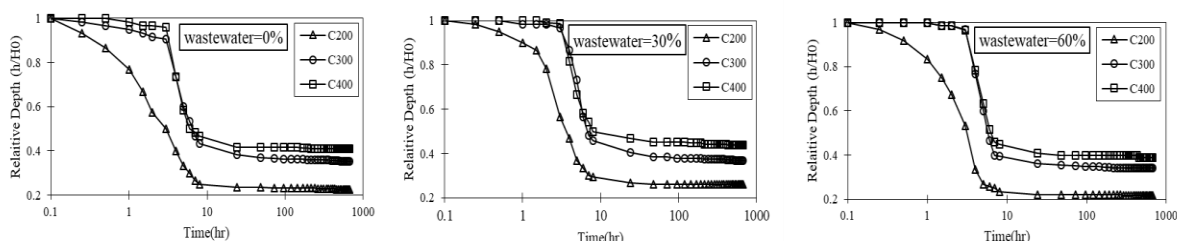


Fig 4. The relative sediment sample height, h/h_0 , versus elapsed time for different wastewater concentrations

شکل ۴ تأثیر غلظت اولیه رسوبها بر مرحله‌های تحکیم در غلظت‌های مختلف پساب

جدول ۳ زمان و تنش‌برشی و سرعت‌های درپوش و فلوم استفاده شده در آزمایش‌های فرسایش در بستر صاف

Table 3 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	240-480
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

رابطه از حاصل ضرب اختلاف دو غلظت متوالی در حجم سیال، جرم رسوب فرسایش یافته مشخص می‌شود. از تقسیم جرم رسوبات بر فاصله زمانی دو نمونه‌گیری و بر

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نرخ فرسایش

برای محاسبه نرخ فرسایش از رابطه ۸ استفاده شد. در این

سطح فلوم، نرخ میانگین فرسایش در واحد زمان و واحد سطح بستر فلوم بدست می‌آید.

$$Q_d = \frac{(C_2 - C_1) \times V_{flume}}{(t_2 - t_1) \times A} \quad (8)$$

در رابطه بالا، 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.

شکل ۵ روند تغییرپذیری‌های نرخ فرسایش را در دوره‌های تحکیم و غلظت‌های مختلف پساب نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که در تمام دوره‌های تحکیم در آغاز زمان اعمال تنش‌برشی، نرخ فرسایش به دلیل حضور رسوبات سطحی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و روند تغییرپذیری‌ها در تنش‌های بعدی نیز به همین ترتیب است. خیزش‌های ناگهانی در نرخ فرسایش را می‌توان ناشی از لایه‌ای بودن بستر و فرسایش لایه سطحی در هر مرحله دانست. همان‌طور که مشاهده می‌شود در دوره تحکیم یک روز از تنش برشی سوم ($0/41$ نیوتن بر متر مربع) نرخ فرسایش روندی افزایشی داشته و بیشترین نرخ فرسایش در سیال حاوی 60 درصد پساب، در تنش پنجم است. می‌توان استنباط نمود که حضور پساب علاوه بر تاثیر بر تحکیم رسوب، موجب چسبندگی بیشتر رسوبات شده که تا تنش برشی چهارم در برابر آشفته‌گی جریان مقاومت کرده و سپس در تنش آخر با فرسایش ناگهانی روبه رو شده است. این رویداد برای آب خالص و پساب 30 درصد در تنش برشی سوم است.

این رویداد برای دوره‌های دیگر تحکیم نیز به همین ترتیب است و بیشترین نرخ فرسایش در تنش برشی آخر است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دوره تحکیم اختلاف نرخ فرسایش در پساب 30 درصد، با آب خالص و 60 درصد پساب افزایش می‌یابد. این رویداد را می‌توان با پخشیدگی ذرات ناشی از یون‌های موجود در سیال در ارتباط دانست که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

میزان نرخ فرسایش در بازه آغاز و پایان اعمال تنش‌برشی در دوره‌های مختلف تحکیم در شکل‌های ۶ و ۷ نمایش داده شده است. به دلیل بزرگی مقادیر فرسایش در تحکیم

یک روز و مشاهده جزئیات، تغییر پذیری‌های نرخ فرسایش آن از سایر تحکیم‌ها جدا شد. نتایج تحکیم یک روز برای آب خالص نشان می‌دهد نرخ فرسایش در تنش‌برشی پنجم ($2/35$ نیوتن بر متر مربع) حالت کاهشی دارد. این موضوع را می‌توان این‌گونه استنباط کرد که در دوره تحکیم یک روز، به دلیل استحکام پایین توده‌های رسوب، رسوبات توان مقاومت در برابر تنش‌برشی چهارم ($1/13$ نیوتن بر متر مربع) را نداشته و غلظت ستون آب تا مرز اشباع شدن پیش رفته که این موضوع موجب کاهش نرخ فرسایش در تنش‌برشی آخر شده است. به عبارت دیگر در این شرایط، ستون آب ظرفیت غلظت بیشتر رسوبات را نداشته و می‌توان بیان داشت که در این حالت فرسایش و ته‌نشینی رسوبات همزمان رخ دهد. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که نرخ فرسایش رسوبات برای تحکیم یک روزه به ویژه در 200 دقیقه پایانی آزمایش به نسبت ثابت است؛ از این رو شرایط تنش‌چهارم را می‌توان، تنش‌برشی فرسایش کامل رسوبات در نظر گرفت. این فرآیند در سیال حاوی 30 درصد پساب نیز رخ داده است، با این تفاوت که در این آزمایش کاهش نرخ فرسایش کمتر از آب خالص است. در سیال 60 درصد پساب نرخ فرسایش در تنش‌برشی $2/35$ نیوتن بر متر مربع حالت افزایشی را داراست اما شیب نمودار نرخ فرسایش حالت کاهشی را نشان می‌دهد و شاید اگر آزمایش ادامه می‌یافت، نرخ فرسایش روند کاهشی می‌یافت. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که برای سیال‌های حاوی پساب نیز نرخ فرسایش در پایان آزمایش به نسبت میزان ثابتی داشته است. در دوره‌های تحکیم 3 ، 14 و 28 روز نتایج نشان می‌دهد که در غلظت‌های مختلف پساب با افزایش تنش‌برشی نرخ فرسایش نیز افزایش می‌یابد، به طوری که بیشترین نرخ فرسایش در تنش‌برشی آخر رخ داده است. با توجه به شکل ۷ نیز مشاهده می‌شود که در این دوره‌های تحکیم نرخ فرسایش در تنش‌برشی آخر از مقدار بزرگ آغاز و با فرسایش رسوبات سطحی لایه مورد نظر، روند کاهشی را تا پایان آزمایش طی می‌کند. در حقیقت تغییرپذیری‌های مقادیر شیب در منحنی‌های نرخ فرسایش بیانگر تغییر در نوع فرسایش از سطحی به توده‌ای و جرمی

(۱۹۹۵) به بررسی این موضوع پرداختند.

Huang (2006); Zrik (1998); Mehta (1991); دارد. Winterwerp and Van-Kestern (2004); Vermeyen

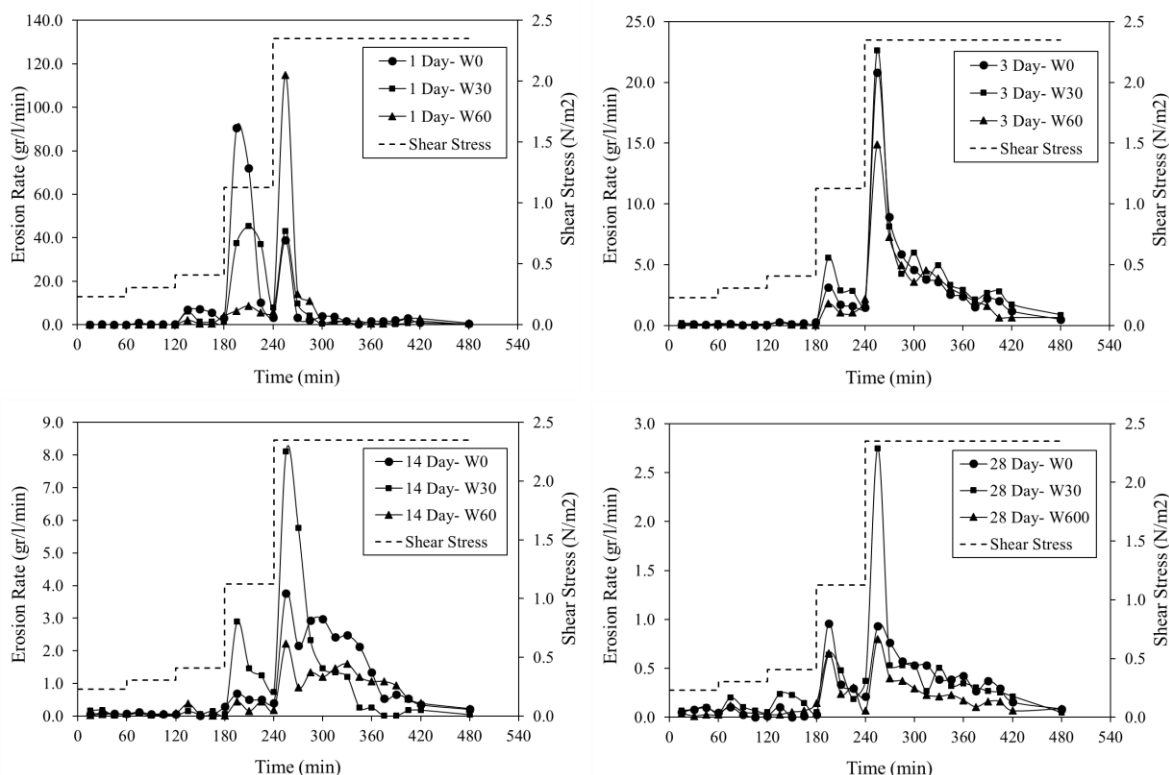


Fig 5. Variation trend of erosion rate with different consolidation times and three levels wastewater

شکل ۵ روند تغییرپذیری‌های نرخ فرسایش را در دوره‌های تحکیم و غلظت های مختلف پساب

همه‌ی آزمایش‌ها شرایط مانند دما، نوع رسوب، نیروی وارد بر جریان، زمان تحکیم و غیره ثابت می‌باشد برای پاسخ به این موضوع، ویژگی‌های شیمیایی سیال و تأثیر آن بر رسوب‌های چسبنده بررسی شد. به منظور ارزیابی رفتار متفاوت رسوب‌های چسبنده در سیال حاوی ۳۰ درصد پساب، ویژگی‌های شیمیایی عصاره اشباع رسوب‌های بررسی شد که نتایج در جدول ۲ ارائه شده است.

۲-۳- تأثیر ویژگی‌های الکتروشیمیایی بر نرخ فرسایش

به طور کلی می‌توان بیان داشت که نتایج این تحقیق گویای نقش متفاوت پساب بر نرخ فرسایش و تنش برشی بحرانی است به طوری که نتایج و روند تغییرپذیری در سیال حاوی ۳۰ درصد پساب با دیگر حالت‌های سیال رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد. با توجه به این که در

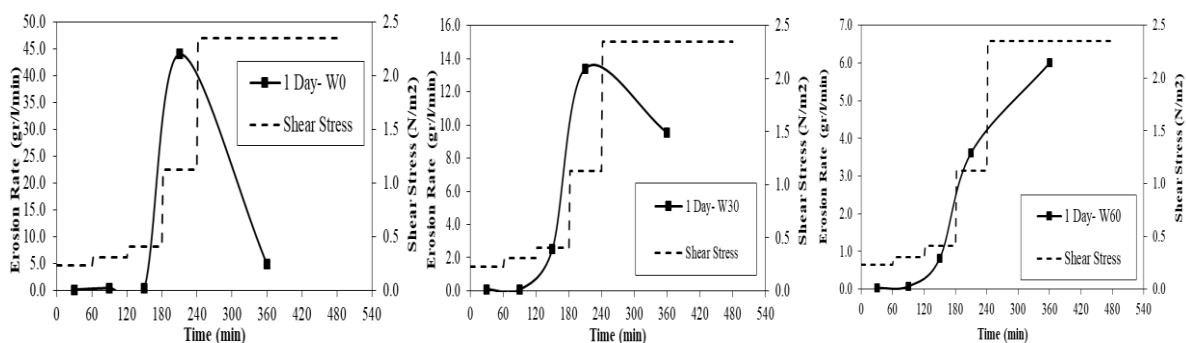


Fig 6. Variation trend of erosion rate at the beginning and the end of shear stress in one day consolidation with presence of wastewater

شکل ۶ میزان نرخ فرسایش در بازه آغاز . پایان تنش برشی برای دوره تحکیم یک روز- در حضور پساب

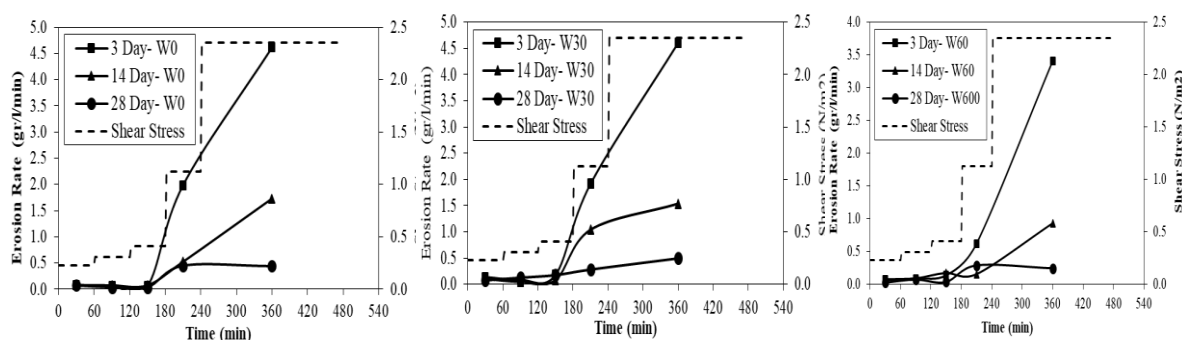


Fig 7. Variation trend of erosion rate at the beginning and the end of shear stress in 3, 14 and 28 days consolidation with presence of wastewater

شکل ۷ میزان نرخ فرسایش در بازه آغاز و پایانی تنش برشی برای دوره تحکیم ۳، ۱۴ و ۲۸ روز- در حضور پساب

اثرگذاری ESP بر پخشیدگی ذرات رسوبی در شرایط ۳۰ درصد پساب بیشتر از ۶۰ درصد پساب است.

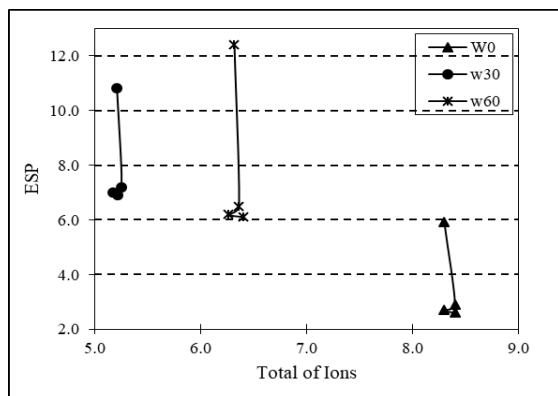


Fig 8. Variation of ESP with wastewater

شکل ۸ بررسی تغییرپذیری‌های شاخص پراکندگی رسوب‌های در سیال حاوی رسوب

به منظور بررسی بیشتر، میانگین مقادیر شاخص ESP برای درصدهای مختلف پساب، در پایان تحکیم ۲۸ روز تهیه شد که نتایج در شکل ۹ ارائه شده است. قابل مشاهده است که روند تغییرپذیری‌های H/H_0 برای درصدهای مختلف پساب با تغییرپذیری‌های شاخص ESP یکسان است.

حال این که چرا در شرایط ۶۰ درصد پساب پخشیدگی کمتر از شرایط ۳۰ درصد پساب است را می‌توان به ترجیح خاک نسبت داد. ترتیب نسبی یک گروه کاتیون‌های تبدالی و یا آسان بودن آزاد کردن آن‌ها از کانی‌های رس، به نام "سری لیوتروپیک"^۱ نامیده می‌شود.

در تحقیق‌های (Winterwerp and van Kestern (2004) و Grabowski (2011) مقدار پایین برای SAR ۲/۵ در نظر گرفته شد. بنابراین تأثیر فراسنجه SAR به دلیل پایین بودن مقدار آن، در این تحقیق ناچیز فرض گردید. از سویی دیگر تغییرپذیری‌های فراسنجه CEC به تنهایی و بدون حضور فراسنجه SAR بر تغییر رفتار رسوب‌های چسبنده تأثیرگذار نیست. از سویی دیگر مقادیر pH نیز با توجه به جدول ۲ در سطح‌های مختلف پساب تغییر ناچیزی از خود نشان داده‌اند. نتایج محققان نشان می‌دهد بررسی جداگانه فراسنجه‌های شیمیایی بر رفتار رسوب‌ها گمراه کننده است (Pant, 2013). از اینرو به بررسی عامل ESP نیز پرداخته شد. میزان ESP در مقابل کل یون‌های موجود در مخلوط سیال و رسوب برای عصاره اشباع صفر، ۳۰ و ۶۰ درصد و دوره تحکیم ۷۲ ساعت تهیه و در شکل ۸ ارائه شده است. بر مبنای یافته‌های محققان مقادیر یونی هر خاکی که به محور ESP نزدیکتر باشد، به اصطلاح پراکنده‌تر است (Alizadeh, 2005). بر این مبنای می‌توان دریافت که رسوب‌ها در ستون حاوی ۳۰ درصد پساب دارای پخشیدگی بیشتری هستند. از آنجایی که بسته به نوع کانی رس و غلظت نمک (EC)، اثرگذاری ESP بر پراکندگی ذرات رسوب متفاوت است؛ تغییرپذیری‌های EC در سطح‌های مختلف پساب نیز بررسی شد. بر مبنای یافته‌های محققان EC رابطه معکوس با میزان پراکندگی ذرات دارد (Barbosa and Overstreet, 2011). با توجه به جدول ۲ قابل مشاهده است که مقدار EC برای شرایط ۳۰ درصد پساب کمتر از ۶۰ درصد پساب است. بنابراین

¹ Lyotropic series

در سیال حاوی ۳۰ درصد پساب قطر ذرات بیشتر از ۶۰ درصد پساب است که این موضوع نشان می‌دهد به دلیل پراکنده‌تر بودن ذرات رسوب در محلول حاوی ۳۰ درصد پساب، درصد میزان ذرات ریز ته‌نشین شده کمتر از محلول ۶۰ درصد پساب است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از فلوم دوار، فرسایش رسوب‌های چسبنده در دوره‌های مختلف تحکیم در حضور سطوح‌های مختلف پساب (صفر، ۳۰ و ۶۰ درصد) و در تنش‌های برشی متفاوت جریان بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش تنش برشی جریان موجب فرسایش رسوب‌های تحکیم یافته بستر می‌شود. هم‌چنین در همه‌ی دوره‌های تحکیم در آغاز زمان اعمال تنش برشی، نرخ فرسایش به دلیل حضور رسوب‌های سطحی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. افزایش غلظت ناگهانی رسوب‌های معلق در آغاز بازه‌های اعمال تنش برشی موجب فرسایش توده‌ای و جرمی در رسوب‌های با دوره تحکیم یک و سه روزه می‌شود. این درحالی است که در دوره‌های تحکیم ۱۴ و ۲۸ روز، به دلیل استحکام توده‌های رسوبی، فرسایش از سطح انجام می‌شود. بیشترین نرخ فرسایش در تمام سطوح‌های پساب در تنش برشی پایانی (۲/۳۵ نیوتن بر متر مربع) رخ داد.

بررسی نرخ فرسایش رسوب‌ها نشان می‌دهد که این فراسنج با زمان تحکیم رابطه معکوس دارد. هم‌چنین مشخص شد که بی درنگ پس از افزایش تنش برشی جریان، نرخ فرسایش نیز افزایش یافته و تا اعمال تنش برشی بعدی روند کاهشی پیدا می‌کند. با توجه به مقادیر نرخ فرسایش در شرایط آب خالص مشخص شد که برای دوره‌های تحکیم ۱ تا ۲۸ روز به ترتیب ۶۱/۹، ۱۶/۳۳، ۵/۸۴ و ۱/۶۸ درصد رسوب‌های فرسایش یافته است. افزایش دوره تحکیم اختلاف نرخ فرسایش در پساب ۳۰ درصد، با آب خالص و ۶۰ درصد پساب افزایش می‌یابد. که این امر به دلیل بالاتر بودن شاخص ESP در شرایط ۳۰ درصد پساب است. در دوره تحکیم‌های یکسان بیشتر بودن شاخص ESP در سیال حاوی ۳۰ درصد

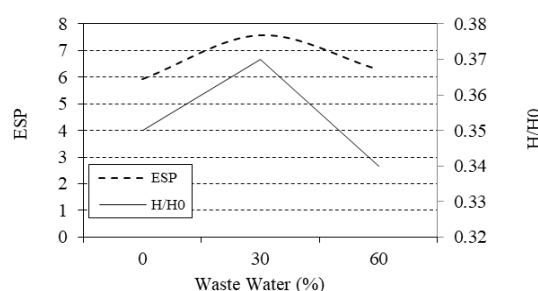


Fig 9. Variation of ESP and h/h0 with wastewater
شکل ۹ تغییر پذیری‌های مقادیر ESP و H/H0 در مقادیر مختلف پساب

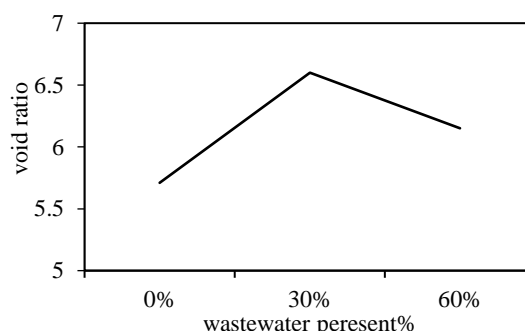


Fig 10. Variation of void ratio at different concentrations of wastewater
شکل ۱۰ تغییر پذیری‌های پوکی رسوبات در غلظت‌های مختلف پساب

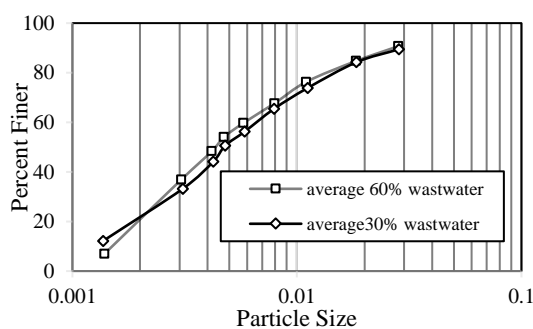


Fig 11. Cumulative frequency curve of particle size in fluid with wastewater at the end of consolidation
شکل ۱۱ منحنی دانه‌بندی رسوب‌های در سیال حاوی پساب پس از پایان دوره تحکیم

به منظور اطمینان بیشتر از تأثیر پدیده پراکندگی در عمق رسوب‌ها در پایان دوره تحکیم، نسبت تخلخل و دانه‌بندی رسوب‌ها (بدون حضور کالگن) تهیه و نتایج به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. قابل مشاهده است نسبت تخلخل در رسوب‌های سیال حاوی ۳۰ درصد پساب بیشتر از آب خالص و ۶۰ درصد پساب است. هم‌چنین با توجه به منحنی دانه‌بندی مشخص است که

Baptiste, M., Pierre, L. H., Florence, C. and Thierry, G. (2017). Modeling fine sediment dynamic: towards a common erosion law for fine sand, mud and mixture. *Water*, doi: 10.3390/w9080564.

Bui, T.D. (2000). Cohesive Sediment Transport in Natural Streams. *Journal of Water Resources* 129.97.146.103.

Black, K.S. (2002). Working with natural cohesive sediments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1), 2-8.

Droppo, I.G. (2009). Biofilm structure and bed stability of five contrasting freshwater sediments. *Marine and Freshwater Research*. 60, 690-699.

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.

Grabowski, R.C., Droppo, I.G. and Wharton, G., (2011). Erodibility of cohesive sediment: The importance of sediment properties. *Earth-Science Reviews*, 105(3-4), 101-120.

Hosseini, K. and Kheirkhahn, M. (2015). Developing a Regression Relation for Erosion Rate of Cohesive Sediments Using Experimental Data and Numerical Modeling. *Journal of Water and Soil Science*, 18(70), 351-361. (in Persian)

Huang, J., Hilldate, R.C. and Greiman, B.P. (2006). Erosion and sedimentation manual. U.S. Department of the interior. United States Bureau of Reclamation.

Jacobs, W. (2011). Sand-mud erosion from a soil mechanical perspective. PhD Thesis, TU Delft.

Kandiah, A. (1974). Fundamental aspects of surface erosion of cohesive soils, Ph.D. thesis, Univ. of Calif., Davis, Calif.

Khastar, M., Esmaili, K., Samadi, H. and Ziaei, A. N. (2018). Wastewater effect on the deposition of cohesive sediment. *Journal of Environmental Engineering (ASCE)*, ISSN 0733-9372.

Kimiaghalam, N., Shawn, P. C. and Ahmari, H. (2015). An experimental study on the effect of physical, mechanical and electrochemical properties of natural cohesive soils on critical shear stress and erosion rate. *International Journal of Sediment Research*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsrc>

Krishnappan, B. G. (2006). Cohesive sediment transport studies using a rotating circular flume. The

پساب که منجر به پخشیدگی بیشتر ذرات، عمق ته‌نشینی بیشتر و نسبت تخلخل کمتر گردید. مقادیر نرخ فرسایش در بازه زمانی اعمال هر تنش‌برشی نشان می‌دهد که روند تغییرپذیری‌های دوره‌های تحکیم ۳، ۱۴ و ۲۸ روز مشابه بوده و با افزایش تنش‌برشی، نرخ فرسایش نیز افزایش می‌یابد. اما برای رسوب‌هایی با تحکیم یک روز، افزایش نرخ فرسایش تا تنش‌برشی چهارم (۱/۱۳ نیوتن بر متر مربع) وجود دارد و پس از اعمال تنش‌برشی پنجم (۲/۳۵ نیوتن بر متر مربع) نرخ فرسایش کاهش یافته است.

۵- فهرست نشانه‌ها

H/H ₀	نسبت عمق ته‌نشینی به عمق کل
W ₀	سیال بدون پساب (آب خالص)
W ₃₀	سیال حاوی ۳۰ درصد پساب
W ₆₀	سیال حاوی ۶۰ درصد پساب
BOD	اکسیژن خواهی زیستی
COD	اکسیژن خواهی شیمیایی
pH	اسیدیته
C	غلظت (g/l)
C _s	تحکیم
SAR	نسبت جذب سدیم (mmol/l) ^{0.5}
ESP	درصد جذب سدیم
CEC	ظرفیت تبادل کاتیونی

۶- منبع‌ها

Akbari, N. (2012). Settling of Erosion Threshold of cohesive sediment by annular flume. Master Thesis, Shahrekord University.

Alizadeh, A. (2005). Draining of land. University of Ferdowsi Press.

Ariathurai, R., Arulanandan, K. (1978). Erosion rates of cohesive soils. *J Hydr Div, ASCE*, 104(2), 279-283.

Amos, C. L., Daborn, G. R., Christian, H. A., Atkinson, A. and Robertson, A. (1992a). In situ erosion measurements on fine-grained sediments from the Bay of Fundy, *Mar. Geol.*, 108, 175-196

Barbosa, R. N. and Overstreet, C. (2011). What is soil electrical conductivity. Baton Rouge. LA, USA: LSU Ag Center publication pub. 3185.

- erosion in the presence of the bioturbator, *Hydrobia ulvae*, *J. Mar. Res.*, 61, 823-851.
- Pant, H.R. (2013). Erosional resistance of cohesive sediments in coastal saltmarshes, Master Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University.
- Parchure, T.M. and Mehta, A.J. (1985). Erosion of soft cohesive sediment deposits. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111 (10), 1308-1326.
- Partheniades, E. (2007). *Engineering Properties and Hydraulic Behavior of Cohesive Sediments*. CRC, Boca Raton. 338 p.
- Roberts, J., Jepsen, R., Gotthard, D. and Lick, W., (1998). Effects of particle size and bulk density on erosion of quartz particles. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 124 (12), 1261-1267.
- Samadi-Boroujeni, H., Khastar-Boroujeni, M., Fatahi, R., Ghasemi, M. and Taheri, Z. (2017). Laboratory experiment Shear stress of erosion threshold of fine sediments (Case study of Karkheh reservoir sediments). *Journal of Hydraulics*, 13(3). (in Persian)
- Stone, M. and Krishnappan, B.G. (1997). Transport characteristics of tile-drain sediments from an agricultural watershed. *Water, Air and Soil Pollution*, 99, 89-103.
- Winterwerp, J.C. and van Kesteren, W.G.M. (2004). *Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment*. Elsevier, Amsterdam, 466 p.
- Zhu, Y. H. (2006). Breach Growth in clay-dikes. Dissertation for the Doctoral Degree. Delft: Delft University of Technology, ISBN:978-90-9020964-7.
- 7th Int. Conf. on Hydrosience and Engineering (ICHE), Sep10-13, Philadelphia, USA.
- Kuijper, C., Cornelisse, J. M. and Winterwerp, J. C. (1989). Research on erosive properties of cohesive sediments, *J. Geophys. Res.*, 94, 14,341– 14,350.
- Lavelle, J.W., Mofjeld, H.O. and Baker, E.T. (1984). An in situ erosion rate for a fine-grained marine sediment. *J. Geophys. Res.* 89 (C4), 6543-6552.
- Le Hir, P., Cann, P., Waeles, B., Jestin, H. and Bassoullet, P. (2005). Erodability of natural sediments: Experiments on sand/mud mixtures from laboratory and field erosion tests, in *Sediment and Ecohydraulics: IntercoH 2005*, Proc. Mar. Sci. Ser., vol. 9, edited by T. Kusuda et al., 137-154, Elsevier, Amsterdam.
- MAST (1993). On the methodology and accuracy of measuring physical-chemical properties to characterize cohesive sediments. G6M report, EU marine science and technology programme project.
- Mehta, A.J. and Partheniades, E. (1982). Resuspension of Deposited Cohesive Sediment Beds. *Coastal Engineering*, Cape Town, South Africa. ASCE, Reston, VA, 1569-1588.
- Mei, C. C., Fan, S. J. and Jin, K. R. (1997). Resuspension and transport of fine sediments by waves. *J Geophys Res*, 102 (C7), 15807-15821.
- Milburn, D. and Krishnappan, B.G. (2003). Modelling erosion and deposition of cohesive sediments from Hay River, Northwest Territories, Canada. *Nordic Hydrology*, 34(1-2), 125-138.
- Mitchener, H. and Torfs, H. (1996). Erosion of mud/sand mixtures, *Coastal Engineering*, 29, 1-25.
- Orvain, F., le Hir, P. and Sauriau, P. G. (2003). A model of fluff layer erosion and subsequent bed