

Effect of Using Single Square Pile at Upstream of the Orifice on Pressurized Flushing


Peyman Peykani ¹, Mehdi Daryaei ^{2*}, Seyed Mahmood Kashefipour ³

1- M.Sc. Graduate, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2-Assistant Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

3-Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

* m.daryaei@scu.ac.ir

Received: 7 December 2019, Accepted: 19 April 2020  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: The deposition of sediments in reservoirs seems to be one of the fundamental problems in the operation of dams. An operation known as flushing, with two free and pressurized types, is used to discharge these sediments. In the free flushing method, all the water in the reservoir is drained from the bottom outlet and large amounts of the deposited sediments are discharged; however, this method does not perform well in the case of large dams. In the pressurized flushing method, the discharge of sediments is done under constant water height at the upstream of the bottom outlet. The efficiency of the free flushing method is superior to the pressurized flushing method; but it is not much common to be applied due to causing environmental problems resulting from the sudden outflow of large volumes of water and sediments in the downstream and is specifically used only for small reservoirs. Hence, due to its low efficiency, some strategies are needed to increase the efficiency of the pressurized flushing approach. A few researches have been conducted so far on the topic of increasing efficiency. By installing a group of cylindrical piles in the upstream of the orifice, Madadi et al. (2016) increased the efficiency of pressurized flushing by 250% compared to the control test (without piles). Also by installing a semi-cylindrical structure in the upstream of the orifice, Madadi et al. (2017) managed to enhance the efficiency of pressurized flushing by 450% compared to the control test. A new method has been provided in this study to examine the effect of using a square single-pile at the upstream of the orifice on the dimensions and the volume of the flushing cone in the pressurized flushing.

Materials and Methods: The experiments were performed in a rectangular flume in the hydraulic research laboratory of the Faculty of Water Sciences and Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. Three flow rates (Q) of 4.17, 6.39 and 8.34 l/s were considered for the experiments. In all experiments, the level of sediments (H_s) was set constant at the level of the orifice lower edge. The water level in the flume to the center of the orifice (H_w) was considered to be 52 cm in all experiments. The diameter of the outlet orifice (D_o) was also set to be 7 cm. The gradation of the sediments used was also considered fixed in all experiments ($d_{50} = 0.5\text{mm}$). We set the experiment time as 150 minutes in all cases. We utilized four different sizes of the side (1.4, 2.1, 2.8, and 3.5 cm or the corresponding ratio D_p/D_o equal

to 0.2, 0.3, 0.4, and 0.5, respectively) aimed at examining the effect of square pile size (D_p) on the dimensions and efficiency of the scour cone. We determined the pile placement distance from the orifice (L_p) in such a way to avoid any impact on the water level at the upstream of orifice and the outlet flow rate when discharging and also to be located at the closest distance from the orifice. This distance was calculated to be 4.9 cm by performing successive experiments. The pile was installed with the highest impact on flushing at different distances from the orifice upstream to examine the effect of pile placement distance (L_p). These distances have defined as a ratio of the orifice diameter equal to $L_p/D_o = 0.7, 1.2, 1.7, 2.2$.

Results and Discussion: The control experiments were made in a state of non-installation of the pile at the orifice upstream. Revealed by the results, by increasing the flow rate from 4.17 l/s to 8.34 l/s, the volume of the flushing cone has increased by approximately 287%. Also, the length, width, and depth of the flushing cone have increased by 57%, 42% and 53%, respectively. The movement of sediments in the pressurized flushing and their outflow are made due to shear stress along the bed and two clockwise and counterclockwise vortices in the orifice upstream. As the flow rate increases, more sediments removed as a result of more shear stress caused in the bed and the strength of the vortices enhances as well. This leads to the removal and exit of further sediments from the orifice, which will increase the volume and dimensions of the sediment flushing cone. The results of the pile installation experiments demonstrated that the application of the square pile has significantly increased the volume of the flushing cone so that in the case of a flow rate of 4.17 l/s and a pile installation with a side size of 3.5 cm at a distance of 4.9 cm from the orifice upstream, the volume of the flushing cone increased by approximately 362% compared to the control state. Also, in the same case, the depth, length and width of the flushing cone respectively increased by 120%, 57%, and 42% in comparison to the control state. When a pile is placed in the path of the water stream with a sedimentary bed, a series of downward currents are formed known as Horseshoe Vortices due to the collision of the flow lines to the pile upstream side, which causes the hydrodynamic scour phenomenon around the pile. Installing the pile at the orifice upstream causes the erosive sediments caused by the presence of the pile to exit from the orifice in addition to the removal of sediments from the sediment flushing phenomenon, increasing the efficiency of flushing. To explain this phenomenon, we can say that more downward vortices are formed in the pile upstream by increasing the pile dimensions. Also, the separation of the flow lines in this case increases and a low-pressure area is created with a larger area at the pile downstream. Thus, more sediments are detached from the orifice upstream and exit from it. It was found that the highest effect of the square pile dimension on extension of flushing cone is related to the size of $D_p/D_o = 0.5$. Therefore, in order to investigate the effect of the pile distance from the orifice on flushing cone volume and dimensions, the measured flushing volume and dimensions related to the relative distance of $L_p/D_o = 0.7, 1.2, 1.7, 2.2$ with the abovementioned pile size were only analyzed here. As the pile placement distance from the orifice upstream increases, the volume of the sediment flushing cone decreases; for the furthest distance the effect of pile placement almost vanishes.

Conclusion: The study of the effect of installing a single square pile at the upstream of the orifice on the pressurized flushing efficiency indicated that the presence of a single pile can lead to an increase in the sediment flushing efficiency. The greatest impact of the pile placement ($L_p/D_o = 0.7$) belongs to the largest pile ($D_p/D_o = 0.5$). In this case, the volume of the flushing cone increased by about 362% compared to the control state. In other words, with the same amount of discharge of water from the orifice in the pile-less state, we can increase the volume of sediments discharge to a considerable extent by installing the pile.

Keywords: Flushing, pile, Flushing cone, Orifice.

تأثیر استفاده از تک پایه مربعی بالادست روزنه در رسوب‌شویی تحت فشار

پیمان پیکانی^۱، مهدی دریائی^{۲*}، سید محمود کاشفی پور^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران - آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

* m.daryae@scu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۶، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۳۱ † † † † وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: یکی از مشکلات بنیادین در زمینه مدیریت مخزن‌های سد، تخلیه رسوب‌های نهشته شده در آنها می‌باشد. در این تحقیق تأثیر استفاده از تک پایه مربعی در بالادست روزنه روی ابعاد و حجم مخروط رسوب‌شویی در رسوب‌شویی تحت فشار بررسی شده است. بر این مبنا چهار پایه مربعی با اندازه ضلع نسبت به قطر روزنه $(\frac{D_p}{D_o})$ ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ در بالادست روزنه و در فاصله‌های نسبی $(\frac{L_p}{D_o})$ ۰/۷، ۱/۲، ۱/۷ و ۲/۲ کارگذاری شد. آزمایش‌ها با سه دبی ۴/۱۷، ۶/۳۹ و ۸/۳۴ لیتر بر ثانیه انجام شدند. نتایج بدست آمده نشان داد که حضور پایه مربعی تأثیر بسزایی در افزایش حجم مخروط رسوب‌شویی داشته است به نحوی که برای دبی ۴/۱۷ لیتر بر ثانیه و کارگذاری پایه با اندازه نسبی $\frac{D_p}{D_o} = ۰/۵$ در فاصله نسبی $\frac{L_p}{D_o} = ۰/۷$ از بالادست روزنه، حجم مخروط رسوب‌شویی به میزان تقریبی ۳۶۲ درصد نسبت به حالت شاهد افزایش یافت. همچنین در همین حالت، عمق، طول و عرض مخروط رسوب‌شویی نسبت به حالت شاهد به ترتیب ۱۲۰، ۵۷ و ۴۲ درصد افزایش یافت.

کلید واژگان: رسوب‌شویی، پایه، مخروط رسوب‌شویی، روزنه.

۱- مقدمه

آن همه آب مخزن تخلیه گشته و سطح آب پایین می‌آید. این روش رسوب‌شویی آزاد نامیده می‌شود (Lai and Shen, 1996). Qian (1982) بازده رسوب‌شویی را برابر رابطه (۱) تعریف کرد:

$$\eta = V_s / V_w \quad (1)$$

در این رابطه V_s و V_w به ترتیب حجم رسوب تخلیه شده و حجم آب تخلیه شده برای تخلیه این حجم از رسوب می‌باشند. بازده رسوب‌شویی آزاد از رسوب‌شویی تحت فشار بیشتر می‌باشد. اما به دلیل ایجاد مشکلات زیست محیطی ناشی از خروج ناگهانی حجم زیادی از آب و رسوب در پایین دست خیلی مرسوم نیست و تنها مختص مخزن‌های کوچک می‌باشد. بر مبنای نتایج بررسی‌های Morris and Fan (2010) محدوده راندمان رسوب‌شویی تحت فشار از ۰/۰۰۱۷ تا ۰/۰۱۲ محدوده بازده رسوب‌شویی آزاد از

بهره‌برداری مناسب از سدها و افزایش عمر آنها همواره دارای اهمیت خاصی است. یکی از مشکلات مهم در بهره‌برداری از سدها، ته‌نشین شدن رسوب‌ها در مخزن‌ها است. تخلیه رسوب‌های انباشته شده در مخزن‌ها سد به منظور احیای حجم مفید آنها طی عملیاتی به نام رسوب‌شویی انجام می‌شود. رسوب‌شویی توسط دریچه‌های خروجی که در بدنه و در نزدیکی پی سد قرار دارند و با ثابت نگه داشتن تراز سطح آب در بالادست روزنه انجام می‌شود. این نوع از رسوب‌شویی را رسوب‌شویی تحت فشار می‌نامند (Lai and Shen, 1996). در این نوع از رسوب‌شویی جریان با سرعت زیاد از روزنه خارج شده که منجر به جابه‌جایی و خروج رسوب‌ها از روزنه می‌شود. نوع دیگری از رسوب‌شویی وجود دارد که در حین

(2012) با بررسی و ارزیابی روی مدل آزمایشگاهی رسوب-شویی تحت فشار به این نتیجه رسیدند که شکل مخروط رسوب‌شویی برای ارتفاع‌های مختلف آب مخزن و اندازه رسوب‌های مختلف یکسان است. Emamgholizadeh and Fathi-Moghadam (2014) بر روی رسوب‌شویی تحت فشار رسوبات چسبنده در مخازن سدهای بزرگ بررسی‌هایی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند حجم رسوب خارج شده با افزایش دبی خروجی افزایش می‌یابد و با افزایش تراکم توده رسوب این حجم کاهش می‌یابد. Powell and Khan (2014) با انجام آزمایش‌هایی الگوی جریان بالادست روزنه سد تحت شرایط بستر ثابت و شرایط فرسایشی (بستر متحرک) را بررسی کردند. نتایج نشان داد که مولفه افقی و عمودی سرعت در نقطه‌های مختلف بالادست روزنه برای هر دو حالت بستر ثابت و شرایط فرسایشی با هم برابر بوده و بیشترین سرعت در هر دو حالت در زیر خط عبوری از مرکز روزنه رخ می‌دهد.

با توجه به کم بودن بازده رسوب‌شویی تحت فشار، ارائه راهکارهایی به منظور افزایش بازده آن امری ضروری می‌باشد. در این زمینه تا کنون بررسی و ارزیابی‌های کمی صورت گرفته است. Mazloum shahraki et al. (2017) تاثیر ارتعاشات موضعی در لایه های رسوب روی مخروط رسوب‌شویی را بررسی و به این نتیجه رسیدند که ارتعاش و بیبراتور عرض مخروط رسوب‌شویی را در مقایسه با حالت شاهد ۲۷۳ درصد افزایش می‌دهد. بیشترین حجم مخروط رسوب‌شویی در ارتعاش ۵۰ هرتز تشکیل شد که این مقدار دو برابر حالت ارتعاش ۲۰ هرتز بود. Madadi et al. (2016) با کارگذاری گروهی از پایه‌های استوانه‌ای در بالادست روزنه بازده رسوب‌شویی تحت فشار را ۲۵۰ درصد نسبت به حالت شاهد افزایش دادند. همچنین Madadi et al. (2017) با نصب سازه

در این تحقیق راهکار جدیدی با استفاده از کارگذاری تک پایه مربعی در بالادست روزنه به منظور افزایش بازده رسوب‌شویی تحت فشار ارائه شده است. هنگامی که یک پایه در مسیر جریان آب با بستر رسوبی قرار می‌گیرد به دلیل برخورد خطوط جریان به وجه بالادست پایه یک سری جریان‌های رو به پایین شکل می‌گیرند. این جریان‌ها که

۰/۰۴ تا ۰/۱۳ می‌باشد. همچنین Emamgholizadeh and Fathi-Moghadam (2014) در نتایج بررسی‌های خود میزان بازده را در فلاشینگ تحت فشار برای رسوب‌های چسبنده برابر ۰/۰۳۴۳ تعیین کردند. در بررسی‌هایی که تا کنون در زمینه رسوب‌شویی تحت فشار انجام شده، بیشتر به ساز و کار این پدیده و تاثیر فراسنجه‌هایی (پارامترهایی) چون دبی خروجی از روزنه، تراز آب روی روزنه، اندازه رسوب‌ها، قطر روزنه و ... روی ابعاد مخروط رسوب‌شویی در بالادست روزنه پرداخته شده است. Lai and Shen (1996) با انجام بررسی‌هایی روی رسوب‌شویی آزاد به این نتیجه رسیدند که با افزایش شیب سطح آب خروجی از دریچه زیرین سد بازده رسوب‌شویی آزاد افزایش می‌یابد. Shammaa et al. (2005) روی تاثیر شکل و اندازه روزنه بر رفتار جریان در نزدیکی روزنه بررسی‌هایی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که از یک فاصله مشخص به بعد شکل و اندازه روزنه تاثیری روی رفتار جریان ندارد. بر مبنای نتایج بررسی‌های Bryant et al. (2008)، چنانچه نسبت ارتفاع آب روی مرکز روزنه به قطر آن کوچکتر از ۱۲/۵ باشد، به آن روزنه بزرگ اطلاق می‌شود. Meshkati et al. (2009) بررسی‌هایی در زمینه تاثیر ابعاد مقطع دریچه خروجی بر ابعاد مخروط رسوب‌شویی در مخزن سدها انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش قطر دریچه، جریان خروجی قوی‌تری ایجاد شده و در نتیجه رسوب‌های بیشتری تخلیه می‌شوند. Fathi-Moghadam et al. (2010) روی رسوب‌شویی تحت فشار رسوب‌های غیرچسبنده بررسی‌هایی انجام دادند و با انجام تجزیه و تحلیل حساسیت به این نتیجه رسیدند که عمق آب روی روزنه و سرعت آب خروجی از آن به ترتیب تاثیرگذارترین فراسنجه‌ها روی توسعه اولیه و به تعادل رسیدن مخروط رسوب‌شویی می‌باشند. Powell and Khan (2017) نیم‌استوانه در بالادست روزنه توانستند بازده رسوب‌شویی تحت فشار را به میزان ۴۵۰ درصد نسبت به حالت شاهد افزایش دهند. با نصب این سازه در بالادست روزنه، طول، عرض و عمق مخروط رسوب‌شویی به ترتیب به میزان ۲۸۰ درصد، ۴۵ درصد و ۱۴ درصد نسبت به حالت شاهد افزایش یافت.

چهار اندازه ضلع مختلف $۱/۴$ ، $۲/۱$ ، $۲/۸$ و $۳/۵$ سانتی‌متر استفاده شد. فاصله کارگذاری پایه از روزنه (L_p) به نحوی تعیین شد که هنگام تخلیه روی سطح آب بالادست روزنه و دبی خروجی تاثیرگذار نباشد و همچنین در نزدیکترین فاصله از روزنه قرار گیرد. با انجام آزمایش‌های متوالی این فاصله برابر $۴/۹$ سانتی‌متر تعیین شد (شکل ۲).

در مجموع به همراه آزمایش‌های شاهد ۵۱ آزمایش انجام شد.

تراز بالای پایه‌ها برای همه‌ی آزمایش‌ها در تراز بالای روزنه قرار داشت (شکل ۱). دانه‌بندی رسوب‌های مورد استفاده در همه‌ی آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شد ($d_{50} = 0.5mm$ و $\sigma_g = 1.55$). نحوه انجام آزمایش‌ها بدین صورت بود که در آغاز رسوب‌ها (H_s) تا تراز زیر روزنه تسطیح شدند. آنگاه شیر شماره ۲ (شکل ۱) بسته شده و آب با استفاده از پمپ وارد فلوم می‌شد. به منظور جلوگیری از شسته شدن رسوب‌ها تا رسیدن آب به تراز موردنظر، در آغاز، آب با دبی بسیار کم وارد فلوم می‌شد. پس از رسیدن آب به تراز موردنظر و تنظیم دبی ورودی با استفاده از شیر شماره ۱ (شکل ۱)، شیر شماره ۲ باز می‌شد و تراز آب روی مرکز روزنه برای دبی مورد نظر در طول آزمایش در تراز مورد نظر (۵۲ سانتی‌متر) تنظیم می‌شد. زمان انجام آزمایش‌ها در همه موارد برابر ۱۵۰ دقیقه در نظر گرفته شد. چرا که با انجام آزمایش‌های متوالی در بیشترین دبی مشخص شد که پس از ۱۵۰ دقیقه تغییر محسوسی در ابعاد و حجم مخروط رسوب شویی ایجاد نمی‌شود. آزمایش‌های شاهد با دبی‌های مورد نظر و بدون حضور پایه انجام شدند. پس از پایان مدت زمان مورد نظر، شیر شماره ۲ بسته شده و آب با شیر تخلیه در بالادست فلوم به آرامی تخلیه می‌شد. سپس با استفاده از متر لیزری *Leica* مدل *D510* با دقت ۱ میلی‌متر، توپوگرافی مخروط آبشستگی در بالادست روزنه مربوط به هر آزمایش برداشت شده و با استفاده از نرم‌افزار *SURFER-16*، حجم مخروط آبشستگی (V_c)، طول مخروط آبشستگی (L_c)، عرض مخروط آبشستگی در محل روزنه (W_c) و عمق مخروط آبشستگی در محل روزنه (Z_c) تعیین شدند.

به منظور بررسی تاثیر فاصله کارگذاری پایه (L_p)، پایه‌ها در فاصله‌های مختلفی از بالادست روزنه نصب شدند. این

گردابه‌های نعل اسبی نامیده می‌شوند منجر به پدیده آبشستگی در پیرامون پایه می‌شوند. همچنین در پایین دست پایه در نتیجه جداشدگی خطوط جریان یک ناحیه کم فشار ایجاد شده که منجر به بلند شدن و جابه‌جایی رسوب‌ها می‌شود (Melville, 2008). چنانچه پایه در بالادست روزنه خروجی سد قرار گیرد سبب می‌شود که افزون بر خروج رسوب‌های ناشی از پدیده رسوب‌شویی، رسوب‌های فرسایش یافته ناشی از حضور پایه نیز از روزنه خارج شده و بازده رسوب‌شویی افزایش یابد. در این بین ابعاد مقطع پایه به دلیل ایجاد الگوی جریان متفاوت در پیرامون آن می‌تواند تاثیرگذاری‌های متفاوتی بر میزان آبشستگی ایجاد شده در پیرامون پایه داشته باشد. لذا هدف از این تحقیق بررسی و ارزیابی تاثیر حضور تک پایه با مقطع مربعی، ابعاد پایه و فاصله کارگذاری پایه در بالادست روزنه روی ابعاد و حجم مخروط رسوب‌شویی و همچنین بازده رسوب‌شویی تحت فشار می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در فلومی به طول ۲۵۰ سانتی‌متر، عرض ۱۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر به عنوان مخزن بالادست روزنه در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز استفاده شد. در شکل ۱ نمای کلی از فلوم مورد استفاده ارائه شده است.

برای انجام آزمایش‌ها ۳ میزان دبی (Q) $۴/۱۷$ ، $۶/۳۹$ و $۸/۳۴$ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد. به منظور اندازه‌گیری دبی از دبی‌سنج الکترومغناطیسی استفاده شد. در همه‌ی آزمایش‌ها تراز رسوب‌ها (H_s) ثابت و در تراز لبه پایینی روزنه قرار گرفت. تراز سطح آب در فلوم تا مرکز روزنه (H_w) در همه‌ی آزمایش‌ها ثابت و برابر ۵۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. تاثیر عمق آب بالادست روزنه روی فلاشینگ تحت فشار در بررسی‌های پیشین ارزیابی شده است (Emamgholizadeh and Fathi-Moghadam, 2014) و همچنین قطر روزنه خروجی (Powell and Khan, 2014). همچنین قطر روزنه خروجی (D_o) نیز در همه‌ی آزمایش‌ها ثابت و برابر ۷ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. به منظور بررسی تاثیر اندازه پایه مربعی (D_p) روی ابعاد و بازده مخروط رسوب‌شویی تحت فشار، از

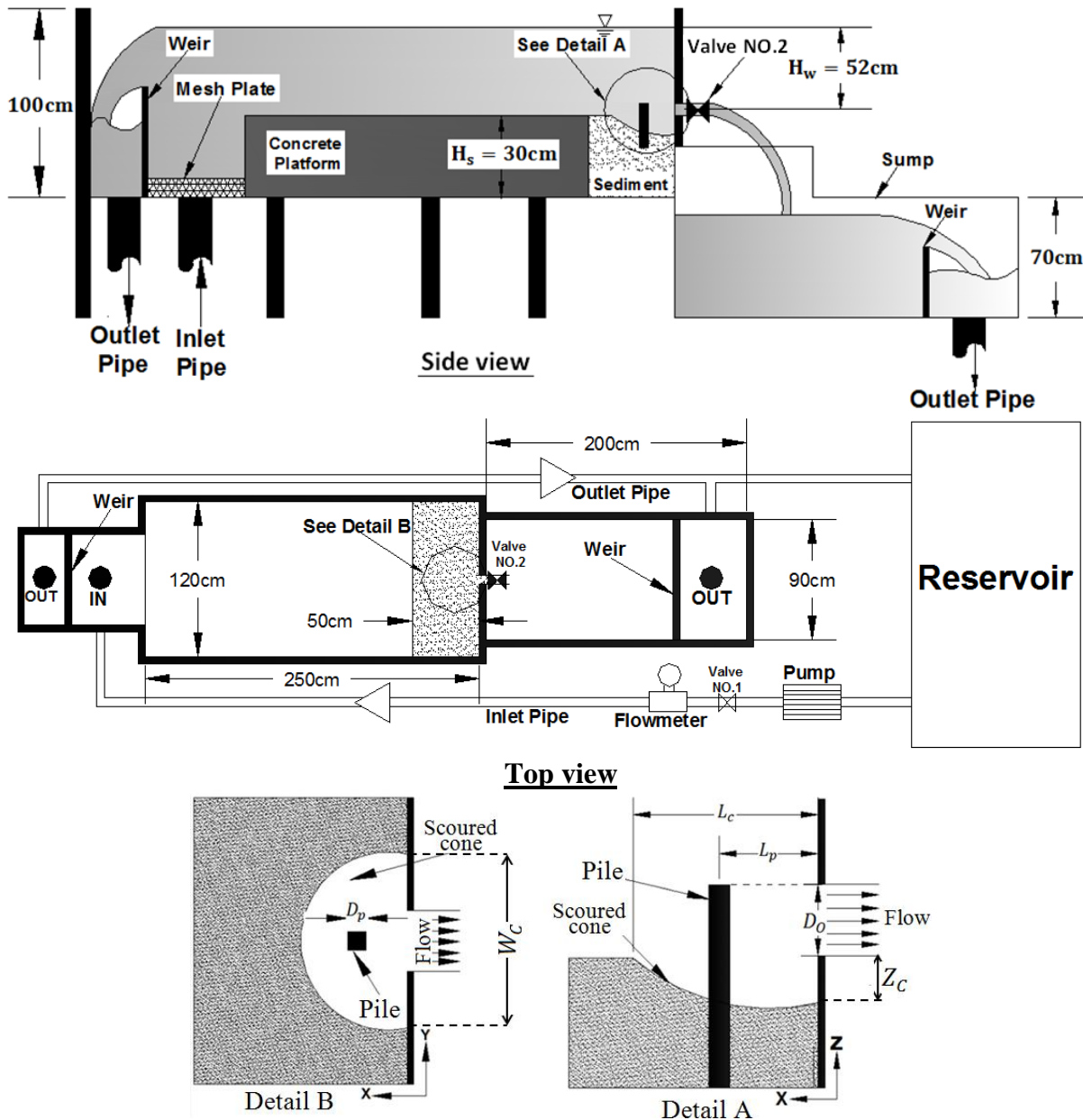


Fig. 1 Flume schematic
شکل ۱ نمای کلی فلوم



Fig. 2 Pile installation at upstream of the orifice at distance of 4.9 cm
شکل ۲ کارگذاری پایه در بالادست روزنه در فاصله $L_p = 4.9 \text{ cm}$

بدین معنی که ابعاد و حجم مخروط آبشستگی تابعی از دبی خروجی از روزنه، قطر روزنه، فاصله کارگذاری پایه تا روزنه و اندازه پایه می‌باشند.

۳- نتایج و بحث

آزمایش‌های شاهد در حالت بدون کارگذاری پایه در بالادست روزنه انجام شدند. در جدول ۱ ابعاد و حجم مربوط به مخروط رسوب‌شویی برای همه‌ی آزمایش‌ها ارائه شده است.

همان طور که مشاهده می‌شود در آزمایش‌های شاهد با افزایش دبی از ۴/۱۷ لیتر بر ثانیه تا ۸/۳۴ لیتر بر ثانیه، حجم مخروط رسوب‌شویی به میزان تقریبی ۲۸۷ درصد افزایش یافته است. همچنین طول، عرض و عمق مخروط رسوب‌شویی به ترتیب به میزان ۵۷ درصد، ۴۲ درصد و ۵۳ درصد افزایش یافته است. در قسمت مقدمه عنوان شد که مینا بر نتایج و بررسی‌های (Powell and Khan (2012) حرکت رسوبات در رسوب‌شویی تحت فشار در دو مرحله انجام می‌شود. مرحله اول ناشی از ایجاد تنش برشی در بستر ناشی از جریان خروجی و مرحله دوم ناشی از دو گردابه ساعتگرد و پاد ساعتگرد که در بالادست روزنه ایجاد شده و منجر به بلند شدن و خروج رسوب‌های می‌شود. با افزایش دبی در مرحله اول رسوب‌شویی به دلیل ایجاد تنش برشی بیشتر در بستر، رسوب‌های بیشتری کنده شده و از روزنه خارج می‌شوند. همچنین در مرحله دوم با افزایش دبی نیروی گردابه‌ها افزایش یافته که این موضوع منجر به برخاستن و خروج بیشتر رسوب‌ها از روزنه شده که افزایش حجم و ابعاد مخروط رسوب‌شویی را به همراه خواهد داشت. در شکل ۳ مخروط رسوب‌شویی برای دو دبی ۴/۱۷ لیتر بر ثانیه و ۸/۳۴ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است.

۳-۱- تاثیر ابعاد پایه روی ابعاد و حجم مخروط رسوب‌شویی

در شکل ۴ نتایج آزمایش‌های مربوط به تاثیر ابعاد نسبی پایه (D_p/D_o) در فاصله نسبی کارگذاری $L_p/D_o = 0.7$ از بالادست روزنه در دبی‌های مختلف روی حجم مخروط رسوب‌شویی ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود

فاصله‌ها با انجام آزمایش و تا اندازه‌ای تعیین شدند که حضور پایه تاثیری در افزایش حجم مخروط رسوب‌شویی نداشته باشد. همچنین کمترین فاصله پایه‌ها به نحوی تعیین شد که با کارگذاری آن تغییری در تراز سطح آب در بالادست روزنه نسبت به حالت شاهد ایجاد نشود. در نهایت این فاصله‌ها به صورت نسبتی از قطر روزنه و معادل $L_p/D_o = 0.7, 1.2, 1.7, 2.2$ تعریف شدند. سپس پایه مورد نظر در فاصله‌های تعیین شده از بالادست روزنه نصب و مراحل انجام آزمایش تکرار شد.

فراسنجه‌های دخیل در این تحقیق را می‌توان به صورت رابطه ۲ نوشت:

$$f(D_o, V_c, W_c, Z_c, D_p, L_p, L_c, \rho_w, \rho_s, g, d_{50}, H_w, Q, \mu, H_s) = 0 \quad (2)$$

در این رابطه ρ_w : دانسیته آب، ρ_s : دانسیته رسوب‌ها، g : شتاب ثقل، d_{50} : قطر متوسط رسوب‌ها، U_o : سرعت آب خروجی از روزنه و μ : لزجت دینامیکی آب می‌باشد. دیگر متغیرها پیشتر معرفی شده‌اند. با در نظر گرفتن U_o و D_o به عنوان متغیرهای تکراری و با استفاده از روش π باکینگهام، رابطه ۳ به دست آمد.

$$f\left(\frac{V_c}{D_o^3}, \frac{D_p}{D_o}, \frac{L_p}{D_o}, \frac{L_c}{D_o}, \frac{Z_c}{D_o}, \frac{W_c}{D_o}, \frac{H_w}{H_s}, \frac{Q}{\sqrt{gD_o^5}}, \frac{d_{50}}{D_o}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \frac{\rho_w U_o D_o}{\mu}\right) = 0 \quad (3)$$

فراسنجه $\frac{V_c}{D_o^3}$ عدد بی بعد حجم مخروط آبشستگی می‌باشد. عدد رینولدز روزنه $\frac{\rho_w U_o D_o}{\mu}$ می‌باشد که به دلیل شرایط جریان کاملاً متلاطم در مجموعه آزمایش‌های این تحقیق ($Re_o > 75880$) از این فراسنجه صرف‌نظر شد. به دلیل ثابت بودن H_s, H_w, ρ_s, ρ_w و d_{50} در طول انجام آزمایش‌ها از فراسنجه‌های $\frac{d_{50}}{D_o}, \frac{H_w}{H_s}$ و $\frac{\rho_s}{\rho_w}$ نیز صرف‌نظر شد. فراسنجه $\frac{L_p}{D_o}$ فاصله نسبی کارگذاری پایه تا روزنه و فراسنجه $\frac{D_p}{D_o}$ اندازه نسبی پایه تعریف شد. همچنین فراسنجه $Q_r = \frac{Q}{\sqrt{gD_o^5}}$ عدد فرود روزنه تعریف شد (Reddy and Pickford, 1972). در نهایت رابطه ۳ ساده شده و برابر رابطه ۴ ارائه شد:

$$\frac{V_c}{D_o^3}, \frac{L_c}{D_o}, \frac{Z_c}{D_o}, \frac{W_c}{D_o} = f\left(\frac{D_p}{D_o}, \frac{L_p}{D_o}, Q_r\right) \quad (4)$$

جدول ۱ ابعاد و حجم مخروط رسوب شویی

Table 1 Dimensions and volume of scour cone

Q (l/s)	D _p (cm)	L _p (cm)	V _c (cm ³)	L _c (cm)	W _c (cm)	Z _c (cm)	
			Reference test	138	7	19	3
4.17	1.4	4.9	250	10	21	3.5	
		8.4	196	11	20	3.4	
		11.9	168	12	20	3.2	
		15.4	144	8	20	3	
4.17	2.1	4.9	270	11	22	2.7	
		8.4	218	12	22	2.8	
		11.9	170	14	19	3.1	
		15.4	145	9	21	3.2	
4.17	2.8	4.9	579	13	25	5.9	
		8.4	309	14	20	2.7	
		11.9	157	15	19	2.7	
		15.4	150	10	20	2.9	
4.17	3.5	4.9	638	11	27	6.6	
		8.4	350	12	23	3.2	
		11.9	211	13	19	3.2	
		15.4	165	11	20	3.1	
			Reference test	332	9	24	4.2
6.38	1.4	4.9	400	11	25	4.1	
		8.4	360	12	26	2.9	
		11.9	350	13	26	3.3	
		15.4	340	10	25	4.2	
6.38	2.1	4.9	634	13	28	5.6	
		8.4	427	14	27	3.5	
		11.9	352	15	24	3.7	
		15.4	347	11	24	4	
6.38	2.8	4.9	921	15	28	7.1	
		8.4	652	16	26	4.6	
		11.9	431	17	24	4.7	
		15.4	422	12	24	3.9	
6.38	3.5	4.9	1075	16.5	30	8	
		8.4	825	17.5	28	4.8	
		11.9	412	18.5	26	3.7	
		15.4	382	13	24	3.9	
			Reference test	534	11	27	4.6
8.34	1.4	4.9	668	12	26	4.3	
		8.4	640	13	26	4.1	
		11.9	550	15	27	4.7	
		15.4	540	13	27	4.7	
8.34	2.1	4.9	813	15	27	5.7	
		8.4	720	16	27	4	
		11.9	570	17	26	4.2	
		15.4	545	14	28	4.4	
8.34	2.8	4.9	1200	17	26	7.5	
		8.4	1060	18	28	6	
		11.9	636	19	27	4.3	
		15.4	548	14	25	3.9	
8.34	3.5	4.9	1270	18	28	8.9	
		8.4	1057	18.9	27	6	
		11.9	619	19.6	27	3.4	
		15.4	589	15	26	3.8	

$(D_p/D_o = 0.5)$ حجم بدون بعد مخروط رسوب شویی نسبت به حالت شاهد به میزان ۱۳۸ درصد افزایش یافته است. همچنین مشاهده می شود برای همه ی اندازه پایه ها در همین حالت مشاهده می شود با افزایش Q_r حجم مخروط رسوب شویی افزایش می یابد. به عنوان مثال برای افزایش Q_r از ۱/۰۲ تا ۲/۰۵ در حالت $D_p/D_o = 0.5$ میزان حجم مخروط رسوب شویی نزدیک به ۹۸ درصد افزایش یافته است. در شکل ۵ مخروط رسوب شویی برای $Q_r = 2.05$ در حالت شاهد و در حضور پایه با اندازه نسبی $D_p/D_o = 0.5$ ارائه شده است.

نیمرخ طولی آزمایش شاهد و کارگذاری پایه با اندازه های مورد نظر برای $Q_r = 2.05$ و فاصله نسبی $L_p/D_o = 0.7$ در شکل ۶ ارائه شده است.

همان طور که مشاهده می شود کارگذاری پایه منجر به افزایش طول مخروط رسوب شویی (L_c) شده و با افزایش اندازه پایه، این طول افزایش می یابد. وجود پایه مربعی در بالادست روزنه به دلیل ایجاد جریان رو به پایین در بالادست پایه منجر به ایجاد آبشستگی موضعی در پیرامون پایه می شود. این آبشستگی موضعی منجر به افزایش طول مخروط رسوب شویی می شود. برای فاصله نسبی $L_p/D_o = 0.7$ و $Q_r = 2.05$ ، بیشترین افزایش طول مخروط رسوب شویی مربوط به $D_p/D_o = 0.5$ و به میزان ۶۴ درصد و کمترین آن مربوط به $D_p/D_o = 0.2$ و به میزان ۹ درصد نسبت به حالت شاهد می باشد.

همچنین شکل ۶ نشان می دهد که کارگذاری پایه منجر به افزایش عمق چاله رسوب شویی در محل روزنه (Z_c) می شود. بیشترین میزان افزایش Z_c نسبت به حالت شاهد برای $D_p/D_o = 0.5$ و به میزان ۹۴ درصد به دست آمد. دلیل این پدیده با توجه به توضیح های بیان شده، ایجاد جداسدگی بیشتر خطوط جریان ناشی از اندازه وجه بالادست پایه و تولید ناحیه کم فشار با فشار کمتر و گستره بیشتر در پایین دست پایه نسبت به دیگر پایه ها می باشد.

پروفیل های عرضی مخروط رسوب شویی در محل روزنه برای حالت شاهد و با کارگذاری پایه با اندازه های مورد نظر برای $Q_r = 1.02$ و فاصله نسبی $L_p/D_o = 0.7$ در شکل ۷ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود کارگذاری

با توجه به شکل ۴ مشاهده می شود که افزایش ابعاد پایه تاثیر قابل توجهی در افزایش حجم مخروط رسوب شویی دارد. به نحوی که برای $Q_r = 2.05$ و در فاصله نسبی $L_p/D_o = 0.7$ ، برای بزرگترین اندازه پایه

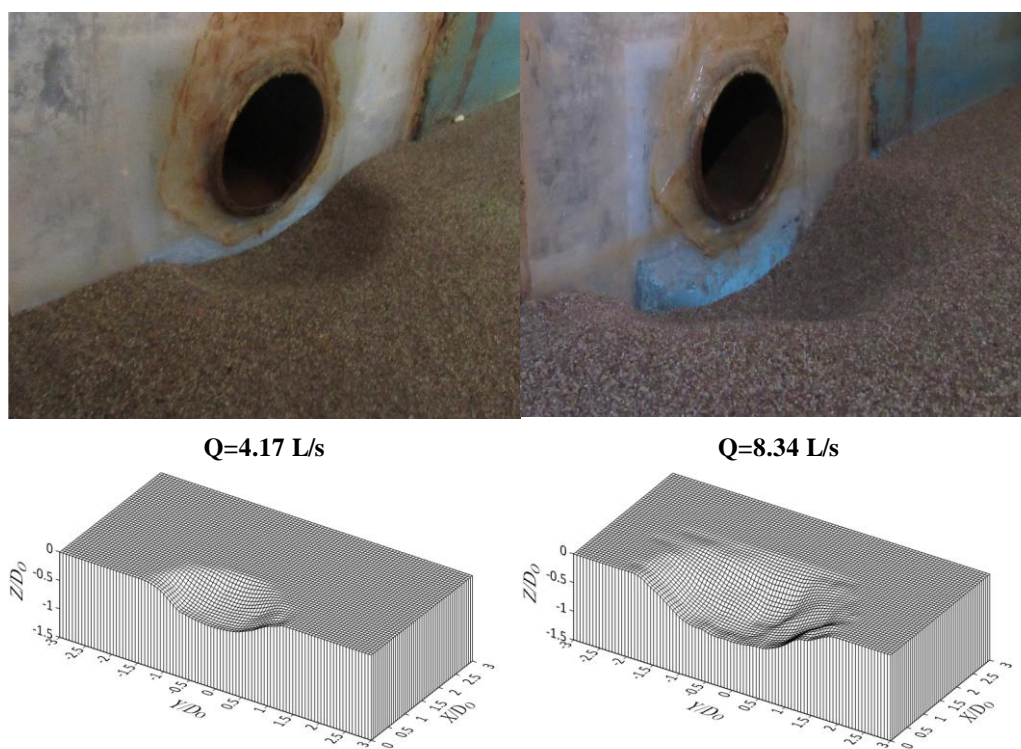


Fig. 3 Scour cone in reference test for two flow rates 4.17 L/s and 8.34 L/s

شکل ۳ مخروط رسوب‌شویی در حالت شاهد برای دو دبی ۴/۱۷ لیتر بر ثانیه و ۸/۳۴ لیتر بر ثانیه

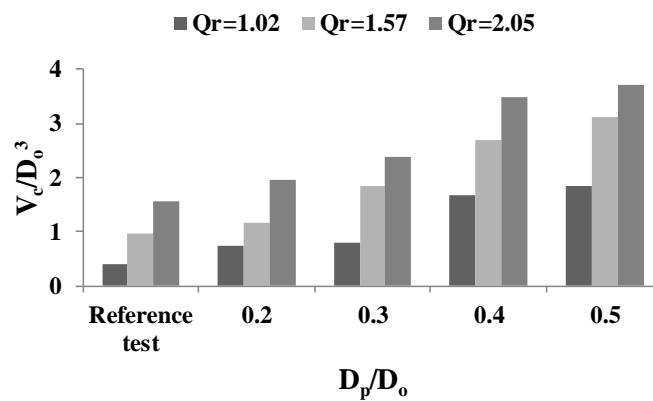


Fig. 4 V_c/D_0^3 versus D_p/D_0 in $L_p/D_0 = 0.7$

شکل ۴ V_c/D_0^3 در مقابل D_p/D_0 در $L_p/D_0 = 0.7$

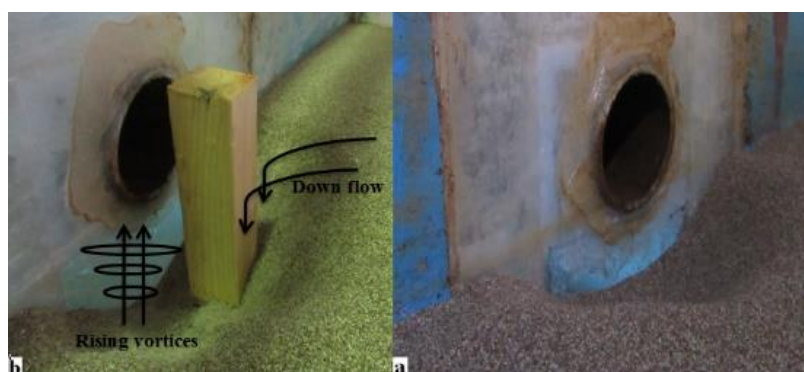


Fig. 5 Scour cone for $Q_r = 2.05$ (a) Reference test (b) Pile installation, relative size of $D_p/D_0 = 0.5$

شکل ۵ مخروط رسوب‌شویی برای $Q_r = 2.05$ (a) حالت شاهد (b) کارگذاری پایه با اندازه نسبی $D_p/D_0 = 0.5$

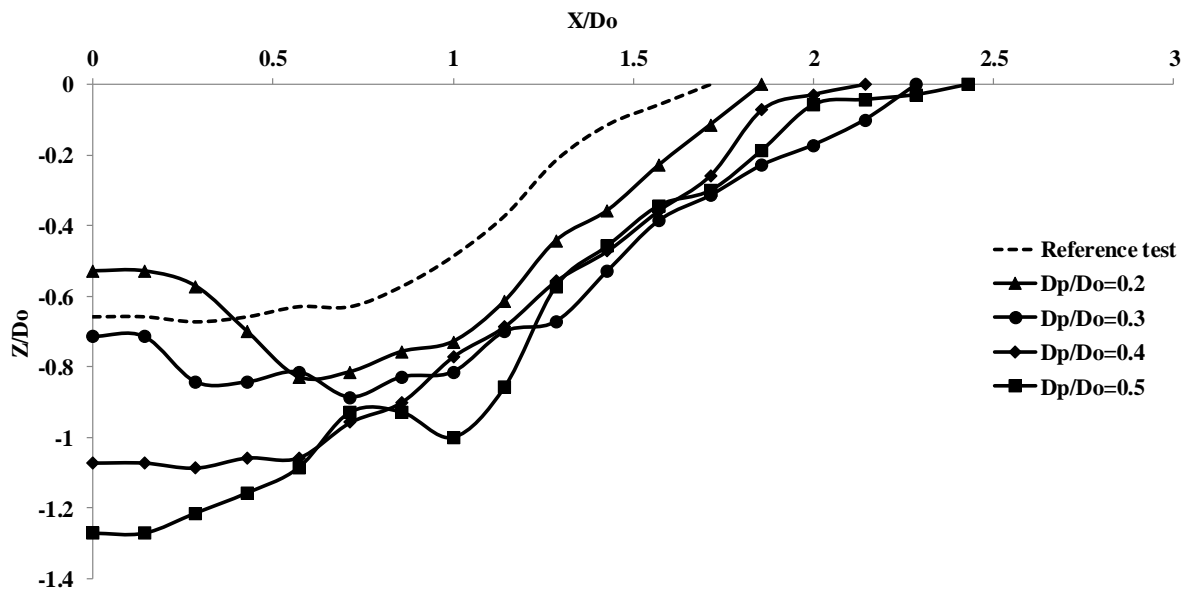


Fig. 6 Longitudinal profile of scour cone $L_p/D_o = 0.7$ and $Q_r = 2.05$
 شکل ۶ نیمرخ طولی مخروط رسوب‌شویی در $Q_r = 2.05$ و $L_p/D_o = 0.7$

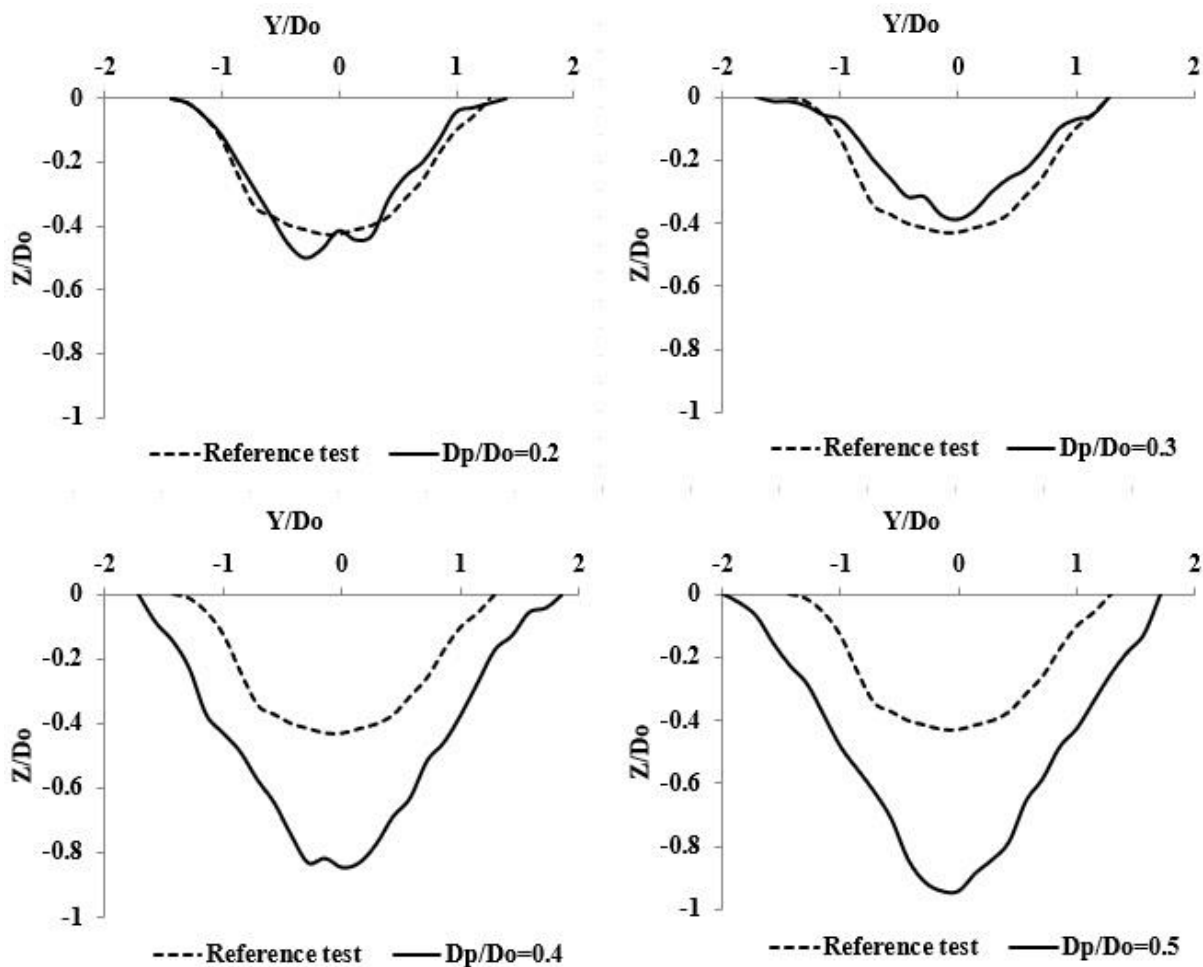


Fig. 7 Cross section of scour cone at $L_p/D_o = 0.7$ and $Q_r = 1.02$
 شکل ۷ نیمرخ عرضی مخروط رسوب‌شویی در فاصله نسبی $Q_r = 1.02$ و $L_p/D_o = 0.7$

کاهش یافته و در $L_p/D_o = 2.2$ ، تاثیر کارگذاری پایه تقریباً از بین رفته و حجم مخروط با حالت شاهد نیز تقریباً برابر است.

بر مبنای نتایج بررسی‌های (Powell and Khan 2012) با افزایش فاصله نسبی از روزنه X/D_o ، فاصله از روزنه در امتداد بالادست، میزان سرعت نسبی (U_{co}/U_o) ، U_{co} سرعت در امتداد مرکز روزنه در هر فاصله از بالادست (روزنه) در بالادست کاهش می‌یابد. به نحوی که برای $X/D_o > 2$ سرعت نسبی تقریباً به سمت صفر میل می‌کند. در نتیجه با کاهش سرعت برخورد جریان به پایه، نیروی جریان‌های رو به پایین در بالادست پایه و گرداب‌های برخاستگی در پایین دست پایه کاهش یافته و در نتیجه تاثیر حضور پایه روی افزایش حجم مخروط رسوب شویی کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان گفت هنگامی که پایه به روزنه نزدیک باشد، گرداب‌های تشکیل شده در پایین دست پایه با گرداب‌های ناشی از خروج جریان از روزنه با یکدیگر هم‌پوشانی داشته و نیروی آنها افزایش می‌یابد. در صورتی که با دور شدن پایه از روزنه این هم‌پوشانی ممکن است صورت نگیرد.

پایه منجر به افزایش عرض مخروط رسوب شویی در محل روزنه (W_c) شده است که بیشترین میزان افزایش در دبی و فاصله نسبی مورد نظر مربوط به بزرگترین پایه ($D_p/D_o = 0.5$) و به میزان ۴۲ درصد و کمترین آن مربوط به کوچک‌ترین پایه ($D_p/D_o = 0.2$) و به میزان ۱۱ درصد می‌باشد. در شکل ۸ تغییرات فراسنجه‌های L_c ، Z_c و W_c نسبت به افزایش ابعاد نسبی پایه در فاصله نسبی $L_p/D_o = 0.7$ برای اعداد فرود روزنه موردنظر ارائه شده است.

۲-۳- تاثیر فاصله کارگذاری پایه روی حجم مخروط رسوب شویی

به منظور بررسی تاثیر فاصله کارگذاری پایه روی حجم رسوب شویی، به عنوان نمونه نتایج پایه با اندازه $D_p/D_o = 0.5$ که بیشترین تاثیر را روی فراسنجه‌های یاد شده داشت، در چهار فاصله نسبی $L_p/D_o = 0.7, 1.2, 1.7, 2.2$ بررسی شد. در شکل ۹ نتیجه تغییرات V_c/D_o^3 در مقابل L_p/D_o ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله کارگذاری پایه از بالادست روزنه، حجم مخروط رسوب شویی

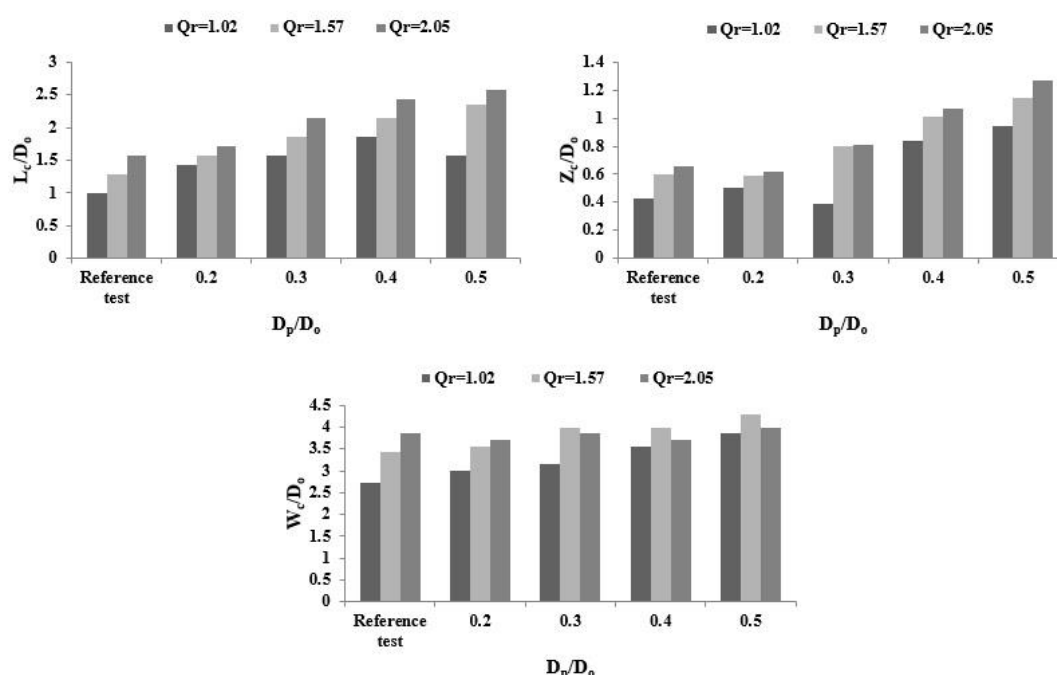


Fig. 8 Scour cone dimensions variation for different pile relative sizes at $L_p/D_o = 0.7$

شکل ۸ تغییرات ابعاد مخروط رسوب شویی برای اندازه‌های نسبی مختلف پایه در فاصله نسبی $L_p/D_o = 0.7$

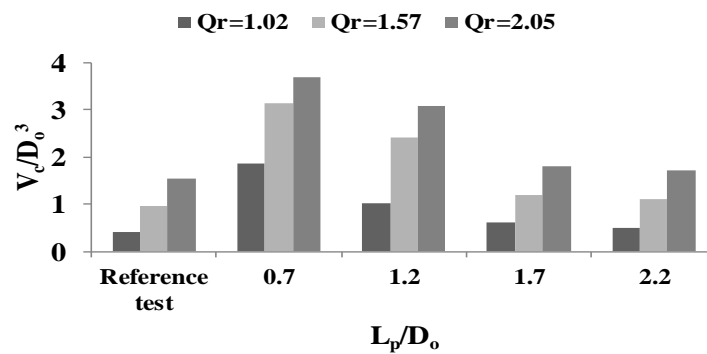


Fig.9 V_c/D_0^3 versus L_p/D_0
 شکل ۹ تغییرات V_c/D_0^3 در مقابل L_p/D_0

جدول ۲ مقایسه نتایج افزایش بازده رسوب شویی با استفاده از

راهکارهای ارائه شده توسط محققین مختلف با این تحقیق

Table 2 Comparison the results of increasing flushing efficiency using methods presented by other researchers with present study

Flushing efficiency increasing (%)	Method	-
250	Cylindrical piles with Semicircular pattern	Madadi et al. (2016)
273	Vibrator	Mazloun Shahraki et al. (2017)
450	Semi-circular structure	Madadi et al. (2017)
270	Single square pile	Present study

۳-۴- توسعه مدل

با استفاده از نتایج آزمایش‌ها و استفاده از رگرسیون غیر خطی معادله‌هایی به منظور پیش‌بینی حجم و عمق مخروط رسوب‌شویی ارائه شدند. بدین صورت که با در نظر گرفتن ۸۰ درصد از اطلاعات مدل واسنجی و با ۲۰ درصد مابقی اطلاعات که در واسنجی مدل نقشی نداشتند، مدل صحت‌سنجی شد. لازم به یادآوری است در زمینه پیش‌بینی عرض و طول مخروط رسوب‌شویی با استفاده از اطلاعات موجود معادله‌ها با دقت قابل قبولی حاصل نشد.

$$\frac{V_c}{D_0^3} = 1.87Q_r^{1.28} \left(\frac{D_p}{D_0}\right)^{0.64} \left(\frac{L_p}{D_0}\right)^{-0.57} \quad (5)$$

$$\frac{Z_c}{D_0} = 0.89Q_r^{0.54} \left(\frac{D_p}{D_0}\right)^{0.35} \left(\frac{L_p}{D_0}\right)^{-0.55} \quad (6)$$

۳-۳- تاثیر کارگذاری پایه بر بازده رسوب شویی

یکی از مهم‌ترین مسائل در ارتباط با رسوب‌شویی، بازده آن می‌باشد. بدین معنی که بتوان با رهاسازی کمتر آب از مخزن سد، حجم بیشتری از رسوب‌ها را تخلیه کرد. به منظور محاسبه بازده رسوب‌شویی در این تحقیق از رابطه (۱) استفاده شد. پس از گذشت ۱۰۰۰ ثانیه از شروع آزمایش در حالت $Q_r = 1.02$ با نصب پایه با قطر نسبی $D_p/D_0 = 0.5$ در فاصله نسبی $L_p/D_0 = 0.7$ ، بازده به میزان ۰/۰۰۰۱ به دست آمد. بدین معنی که بازده رسوب شویی به میزان ۲۷۰ درصد نسبت به حالت شاهد در مدت زمان ۱۰۰۰ ثانیه افزایش یافته است. در نتیجه کارگذاری پایه تاثیر معنی داری روی افزایش بازده رسوب شویی داشته است. در جدول ۲ نتایج افزایش بازده رسوب‌شویی با استفاده از راهکارهای ارائه شده توسط محققان مختلف ارائه شده است. مشاهده می‌شود میزان افزایش بازده رسوب شویی نسبت به حالت شاهد در روش ارائه شده در این تحقیق در مقایسه با روش ارائه شده توسط Madadi et al. (2017) کمتر می‌باشد. روش ارائه شده توسط Mazloun (2017) ممکن است از نظر سازه‌ای به واسطه ایجاد لرزش برای بدنه سد مشکل ایجاد کند. روش ارائه شده توسط Madadi et al. (2016) نیاز به استفاده از چند پایه دارد. حال آنکه با روش ارائه شده در این تحقیق تنها با استفاده از یک پایه بازده رسوب‌شویی بیشتر است. البته لازم به یادآوری است عامل‌های چندی مانند تراز آب بالادست روزنه، اندازه روزنه، اندازه رسوب‌ها و دبی خروجی از روزنه تا حد زیادی نتایج را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

۵- فهرست نشانه‌ها

Q	دبی خروجی
D_o	قطر روزنه
V_c	حجم مخروط رسوب شویی
D_p	اندازه ضلع پایه
L_p	فاصله پایه از روزنه
g	شتاب ثقل
d_{50}	اندازه متوسط رسوب‌ها
H_w	عمق آب روی روزنه
U_o	سرعت آب خروجی از روزنه
H_s	تراز رسوب‌ها
Q_r	عدد فرود روزنه
Re_o	عدد رینولدز روزنه
L_c	طول مخروط رسوب شویی
W_c	عرض مخروط رسوب شویی
Z_c	عمق مخروط رسوب‌شویی
ρ_w	جرم مخصوص آب
ρ_s	جرم مخصوص رسوب
μ	لزجت دینامیکی آب

۶- سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (GN: SCU.WH98.31370) در انجام این تحقیق قدردانی می‌شود.

۷- منبع‌ها

- Qian, N. (1982). Reservoir sedimentation and slope stability; technical and environmental effects. In Fourteenth International Congress on Large Dams, Transactions, Rio de Janeiro, Brazil, 3, 639-690.
- Lai, J.S. and Shen, H.W. (1996). Flushing sediment through reservoirs. Journal of Hydraulic Research, 34(2), 237-255.
- Shammaa, Y., Zhu, D.Z. and Rajaratnam, N. (2005). Flow upstream of orifices and sluice gates. Journal of Hydraulic Engineering, 131(2), 127-133.

محدوده اعتبار معادله‌های بالا برای $1.02 < Q_r < 2.05$ ، همچنین $0.2 < \frac{D_p}{D_o} < 2.2$ و $0.7 < \frac{L_p}{D_o}$ می‌باشد. هم‌چنین میزان R^2 برای معادله‌های ۵ و ۶ به ترتیب برابر ۰/۷۷ و ۰/۷۰ و میزان $\%E$ بر اساس معادله ۷ برای معادله‌های ۵ و ۶ به ترتیب برابر ۱۴ و ۱۹ درصد در مرحله صحت‌سنجی حاصل شد که نشان از دقت قابل قبول معادله‌ها در پیش‌بینی حجم و عمق مخروط رسوب‌شویی در حضور پایه‌ی مربعی در بالادست روزنه دارد.

$$\%E = \frac{\sum_{i=1}^n |x_{mi} - x_{pi}|}{\sum_{i=1}^n x_{mi}} \quad (7)$$

که در این رابطه x_m داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، x_p داده‌های پیش‌بینی شده توسط معادله‌ها و n شمار داده‌ها می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

هدف از این تحقیق بررسی و ارزیابی تاثیر کارگذاری پایه مربعی در بالادست روزنه روی بازده رسوبشویی تحت فشار می‌باشد. برای این منظور ۴ پایه با مقطع مربعی و ابعاد متفاوت و در فاصله‌های مختلف در بالادست روزنه نصب شد. نتایج به دست آمده نشان داد که حضور تک‌پایه منجر به افزایش بازده فلاشینگ می‌شود. بیشترین تاثیر کارگذاری پایه مربوط به بزرگترین پایه ($D_p/D_o = 0.5$) می‌باشد. به نحوی که در این حالت حجم مخروط رسوب‌شویی نسبت به حالت شاهد برای $Q_r = 1.02$ حدود ۳۶۲ درصد افزایش یافت. به عبارت دیگر با همان میزان تخلیه آب از روزنه در حالت بدون کارگذاری پایه، می‌توان حجم تخلیه رسوب‌ها را تا میزان قابل توجهی با کارگذاری پایه افزایش داد. هم‌چنین کارگذاری پایه با قطر ۳.۵ سانتی‌متر با فاصله کارگذاری ۴.۹ سانتی‌متر از بالادست روزنه در دبی ۴.۱۷ لیتر بر ثانیه، عمق، طول و عرض مخروط رسوب شویی را نسبت به حالت شاهد به ترتیب معادل ۱۲۰ درصد، ۵۷ درصد و ۴۲ درصد افزایش داد. از سوی دیگر با افزایش فاصله کارگذاری پایه از بالادست روزنه، تاثیر آن روی ابعاد و حجم مخروط رسوب شویی کاهش یافت.

- equilibrium scour conditions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(2), 04014076.
- Morris, G.L. and Fan, J. (2010). *Reservoir sedimentation handbook*. Electronic version 1.04. McGraw Hill, New York.
- Madadi, M.R., Rahimpour, M. and Qaderi, K. (2016). Sediment flushing upstream of large orifices: An experimental study. *Flow Measurement and Instrumentation*, 52, 180-189.
- Madadi, M.R., Rahimpour, M. and Qaderi, K. (2017). Improving the pressurized flushing efficiency in reservoirs: an experimental study. *Water Resources Management*, 31(14), 4633-4647.
- Melville, B. (2008). The physics of local scour at bridge piers. In *Fourth International Conference on Scour and Erosion*, 28-38.
- Reddy, Y.R., and Pickford, J.A. (1972). Vortices at intakes in conventional sump. *International Water Power Dam Constr*, 24(3), 108-109.
- Mazloun Shahraki, S., Ahadpour, A. and Mardashty, A. (2017). Pressure Hydraulic Sediment Flushing on short dams. *Journal of River Engineering*.
- Bryant, D.B., Khan, A.A. and Aziz, N.M. (2008). Investigation of flow upstream of orifices. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 98-104.
- Meshkati, M.E., Dehghani, A.A., Naser, G., Emamgholizadeh, S. and Mosaedi, A. (2009). Evolution of developing flushing cone during the pressurized flushing in reservoir storage. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 58, 1107-1111.
- Fathi-Moghadam, M., Emamgholizadeh, S., Bina, M. and Ghomeshi, M. (2010). Physical modelling of pressure flushing for desilting of non-cohesive sediment. *Journal of Hydraulic Research*, 48(4), 509-514.
- Powell, D.N. and Khan, A.A. (2012). Scour upstream of a circular orifice under constant head. *Journal of Hydraulic Research*, 50(1), 28-34.
- Emamgholizadeh, S. and Fathi-Moghadam, M. (2014). Pressure flushing of cohesive sediment in large dam reservoirs. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(4), 674-681.
- Powell, D.N. and Khan, A.A. (2014). Flow field upstream of an orifice under fixed bed and