

The effect of downstream sediment gradation on scour profiles of combined spillway and gate structures

Shadi Saraf¹, Javad Vejihat^{2*}

¹MSc Graduated, Department of Water Engineering, Sari Agricultural and Natural Resources University, Sari, Iran

²MSc Graduated, Department of Irrigation and Land Development Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran

Corresponding Author's E-mail: J.vejihat@ut.ac.ir

Received: 18 Apr. 2025 Accepted: 02 Aug. 2025
Revised: 20 July 2025 Published: 23 Sep. 2023



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: In the present study, the effect of downstream sediment grain size on the scour profile of combined spillway and gate structures was investigated. Changes in Froude number for ds/H changes relative to discharge changes at different downstream depths showed that with decreasing discharge, the increasing trend of ds/H changes is initially maintained with a steep slope and then a gentle one. Changes in Froude number for Ws/H trend at different discharges showed that Froude number initially has an upward trend relative to this dimensionless parameter, but from the point related to the change in spectrum, a decreasing trend with a steep slope for all three discharges begins. In the final values for all three discharges, this parameter ends at approximately the same location. With increasing sediment particle size, the effect of armor coating on the bed has increased at larger sizes, which allows better control over scour performance.

Keywords: Hydraulic structure, flood, Sediment gradation, Froude number

Introduction: Erosion is a phenomenon that occurs due to the passage of fluid flow, especially water, at the contact boundaries with other objects in hydraulic structures. The basis for this phenomenon is the creation of a vacuum at the contact boundaries of two environments due to changes in fluid velocity. In hydraulic structures, this phenomenon can damage the stability and durability of the hydraulic structure because the water fluid can wash the soil at the bottom and around the foundations of hydraulic structures, causing erosion of the walls and banks of rivers and carrying the eroded materials with it in the direction of flow. Local erosion is a phenomenon that occurs due to the interaction of water flow and soil in rivers, streams, and downstream of hydraulic structures. Gates and weirs are widely used in open channels to control, regulate flow, and stabilize the bottom. Due to the flow caused by the jet passing over or under the structures, there is a possibility of creating scour holes downstream of the structures, which may endanger the stability of the structure; therefore, determining the characteristics of scour holes has been of interest to hydraulic flow researchers. In order to minimize the problems in spillways and gates and to increase their benefits, a combined spillway-gate structure can be used so that the water flow can pass both over the spillway and under the gate at the same time.

Methodology: To conduct the experiments in this research, an aluminum spillway model with a thickness of 1 mm, a width of 50 cm, a crest length and a height of 40 and 20 cm, respectively, and a combined gate and spillway were installed at a distance of 140 cm from the beginning of the channel. The experiments were conducted in a flume with a length of 10 m, a width and a height of 0.5 m. The height of the channel from the laboratory floor is 1.3 m, and the slope of the channel floor is 0.001. The material of the channel floor and skeleton is iron, and the walls are glass. To measure the flow rate, a sharp-edged triangular weir with an apex angle of 90 degrees made of metal was used at the end of the downstream basin. Also, this flume was equipped with a valve at the downstream with the ability to control the depth of the backwater and the jump. The length of the rigid bottom was 60 cm, the depth of the sediments was 17 cm, and its length was 210 cm. In this research, silica sand materials were considered with three uniform grain sizes with an average particle diameter of 1.6, 3.3, and 6.2 mm. The depth of the backwater was adjusted by a sliding valve installed at the end of the laboratory flume. At the end of the test period (6 hours),

the equilibrium time was 120 minutes (90% scour depth).

Results and Discussion: The changes in the Froude number are affected by the speed and depth of the flow in the measurements. However, it is necessary to draw a diagram of these changes due to the effect of dimensionless parameters on the value of this characteristic for different measured discharges. These parameters include the average particle size, scouring cross-section width, scouring cross-section length, and scouring cross-section depth for different values of sediment diameters, which need to be evaluated. It is noteworthy that the overall trend of changes in the Froude number for changes in discharge under the same conditions is increasing, but it is necessary to determine the changes in the parameters in dimensionless conditions with respect to the flow depth. The range of changes in the Froude number for changes in ds/H with respect to changes in discharge at different depths of the tributaries indicates that with decreasing discharge, the increasing trend of ds/H changes is maintained first with a steep slope and then with a gentle slope. The changes in the Froude number with respect to the Ws/H trend at different tested discharges also showed that the Froude number initially had an upward trend with respect to this dimensionless parameter, but from the point related to the change in the spectrum, a downward trend with a steep slope begins for all three discharges. The important point is that in the final values for all three discharges, this parameter ends at approximately the same location. This is due to the high impact of the channel width on the flow rate changes. In the evaluation of the trend of changes in the length of the scour position relative to the flow depth at different values of the Froude number, it was determined that despite the gradual decrease in the Froude number for the relative increase in this dimensionless parameter, the range of flow rate changes had a minor effect on this.

Conclusion: It is noteworthy that with the increase in the size of the sediment particles, despite the minor nature of some changes, the effect of the armor coating on the bed increased at larger sizes, which allows for better control over the scouring performance. Another effective parameter in the process of flow changes for different values of descent, depth of the outlet, and measured discharges is the value related to the d_{50} of the sediment particles in question. The results of this study indicated that as the d_{50} of the bed sediments increases and the relative size of the particles becomes larger, the scouring performance in creating the scouring hole also occurs with a delay and over a longer period of time, and the conditions can be improved.

© 2023 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

تأثیر دانه‌بندی رسوبات پایین‌دست بر نیمرخ آب‌شستگی سازه‌های ترکیبی سرریز و دریچه

شادی صراف^۱، جواد وجاهت^{۲*}^۱دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران^۲دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، کرج، ایرانپست الکترونیکی نگارنده مسئول: J.vejahat@ut.ac.irوبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۹ تاریخ چاپ: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

چکیده: در پژوهش حاضر بررسی تأثیر دانه‌بندی رسوبات پایین‌دست بر نیمرخ آب‌شستگی سازه‌های ترکیبی سرریز و دریچه صورت گرفته است. تغییرات عدد فرود به ازای تغییرات ds/H نسبت به تغییرات دبی در عمق پایاب‌های مختلف نشان داد که با کاهش دبی، روند افزایشی تغییرات ds/H ابتدا با شیب تند و سپس ملایم حفظ می‌شود. تغییرات عدد فرود نسبت به روند Ws/H در دبی‌های مختلف نشان داد که عدد فرود ابتدا سیر صعودی نسبت به این پارامتر بی‌بعد داشته است؛ ولی از نقطه مربوط به تغییر طیف، روند کاهشی با شیب تندی به ازای هر سه دبی آغاز می‌گردد. در مقادیر انتهایی به ازای هر سه دبی، این پارامتر به‌طور تقریبی به محل یکسانی ختم می‌گردد. با افزایش اندازه ذرات رسوبی، اثرگذاری پوشش زرهی در بستر در اندازه‌های بزرگ‌تر افزایش یافته است که امکان کنترل بهتر بر عملکرد آب‌شستگی را فراهم می‌کند.

کلیدواژه‌ها: سازه‌های هیدرولیکی، سیلاب، دانه‌بندی رسوبات، عدد فرود، آب‌شستگی

۱- مقدمه

و باعث فرسایش دیوارها و سواحل رودخانه‌ها شود و مواد فرسایش یافته را با خود در جهت جریان حمل کند. محققان زیادی سال‌های بسیار تأثیرات این پدیده را بر انواع سازه‌های هیدرولیکی (مانند سرریز سدها، کناره و سواحل رودخانه‌ها، کناره پایه‌های پل‌ها و دیگر سازه‌های هیدرولیکی) در شرایط مختلف مورد بررسی و تحقیق قرار داده‌اند.

آب‌شستگی موضعی پدیده‌ای است که بر اثر اندرکنش جریان آب و خاک در رودخانه‌ها، مسیل‌ها و در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی به‌وجود می‌آید (Breusers, 1991 and Raudkivi).

آب‌شستگی پدیده‌ای است که در اثر عبور جریان سیال به‌خصوص آب در مرزهای تماس با دیگر اجسام در سازه‌های هیدرولیکی به وقوع می‌پیوندد. مبنای ایجاد این پدیده ایجاد خلأ در مرزهای تماس دو محیط، به‌دلیل تغییر سرعت سیال است. سیال در مرزهای تماس با دیگر محیط‌ها، متأثر از زبری و شکل محیطی است که با آن تماس دارد. در سازه‌های هیدرولیکی، این پدیده می‌تواند به پایداری و دوام سازه هیدرولیکی آسیب برساند، چراکه، سیال آب می‌تواند خاک کف و اطراف پایه‌های سازه‌های هیدرولیکی را بشوید

یک پژوهش آزمایشگاهی، ۲۶۰ آزمایش در آزمایشگاه پیزا در کشور ایتالیا، نشان داد که پارامترهای موثر بر گودال آب‌شستگی عبارت است از دبی جت‌ها (Q_w)، عمق پایاب (T_w)، زاویه عمودی جت‌ها با افق (av) و زاویه بین جت‌ها (ac) (Pagliara et al., 2011). اعتبارسنجی داده‌های معادلات تجربی و مدل آزمایشگاهی سرریز عظمت‌الله نشان داد که دبی در واحد عرض (q)، ارتفاع ریزش (H) و شعاع باکت، دانه‌بندی مصالح پایین‌دست، زاویه باکت و عمق پایاب پارامترهای موثر بر عمق آب‌شستگی هستند. داده‌های میدانی موثر بر عمق آب‌شستگی نیز شامل دبی در واحد عرض (q)، ارتفاع ریزش (H) و دانه‌بندی مصالح پایین‌دست است (Kumar and P.Sreeja, 2012).

آب‌شستگی پایین‌دست ناشی از جت منفرد سرریز لبه‌تیز با دبی‌های مختلف (۱۷/۵۷، ۱۳/۹۴، ۱۰/۶ لیتر بر ثانیه) و سه عمق پایاب بررسی گردید. نتایج نشان داد که آرایش بهینه جت‌های کف منجر به کاهش عمق آب‌شستگی حداکثر در محدوده ۴۴/۵۳ تا ۷۶/۱۵ درصد و کاهش طول آب‌شستگی در محدوده ۲۵ درصد می‌شود (Esam et al., 2013). روابط بین حداکثر عمق و خصوصیات هندسی حفره آب‌شستگی پایین‌دست جام پرتاب‌کننده که با کمک مدل هیدرولیکی سیستم تخلیه سیلاب سد آزاد به‌دست‌آمده است؛ می‌تواند عرض حفره و موقعیت طولی بیش‌ترین عمق را به‌خوبی پیش‌بینی نماید. بهترین پیش‌بینی برای تخمین آب‌شستگی توسط مدل مارتینز B ارائه شد (Akbari, 2015).

مقایسه تأثیر عدد فرود و عمق پایاب بر ابعاد حفره آب‌شستگی پایین‌دست ناشی از تأثیر جت‌های پرتابی در مدل سد مخزنی داریان با مدل عددی FLOW3D حاکی از تطابق قابل‌قبول نتایج عددی و آزمایشگاهی بود و آب‌شستگی در زمان ۲۰۰ ثانیه به تعادل رسید به‌طوری‌که افزایش عمق پایاب حاکی از کاهش عمق و ابعاد آب‌شستگی و افزایش طول حفره آب‌شستگی بود. ابعاد آب‌شستگی، هنگامی‌که عمق پایاب وجود ندارد، بزرگ‌تر از حالت با عمق پایاب اولیه است. محدوده عدد فرود را در این تحقیق براساس شبیه‌سازی عددی ۵/۴۷ تا ۸/۵۱ به‌دست آوردند که با افزایش عدد فرود، ابعاد آب‌شستگی افزایش

تحقیق و مطالعه در مورد اثرات آب‌شستگی موضعی از اهمیت خاصی برخوردار است، چراکه در بعضی مواقع ممکن است این پدیده به تخریب سازه‌های زیربنایی منجر شده و وقایع جبران‌ناپذیری را به همراه داشته باشد (Annandale, 2006). از این‌رو، هرساله هزینه‌های زیادی برای کنترل و جلوگیری از تخریب ناشی از آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست سازه‌ها صرف می‌شود؛ به همین خاطر، پیش‌بینی پدیده آب‌شستگی موضعی قبل از اجرای پروژه از اهمیت به‌سزایی برخوردار است (Sanei et al., 2008).

یکی از عمده‌ترین مشکلات سازه‌هایی از قبیل سرریزها، دریچه‌ها و حوضچه‌های آرامش که در بالادست بسترهای فرسایش‌پذیر قرار دارند، آب‌شستگی در مجاورت سازه است که علاوه بر تأثیر مستقیم بر پایداری سازه، ممکن است باعث تغییر مشخصات جریان و در نتیجه تغییر در پارامترهای طراحی سازه شود. به دلیل پیچیدگی موضوع، اکثر محققین آن را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کرده‌اند که باوجود تمام دست‌آوردهای مهمی که تاکنون در زمینه آب‌شستگی موضعی حاصل گردیده است، هنوز هم شواهد زیادی از آب‌شستگی گسترده در پایاب دریچه‌ها، سرریزها، شیب‌شکن‌ها، کالورت‌ها و مجاورت پایه‌های پل‌ها دیده می‌شود که می‌تواند پایداری این سازه‌ها را با خطرات جدی مواجه کند. پدیده آب‌شستگی هنگامی اتفاق می‌افتد که تنش برشی جریان آب عبوری از آبراهه، از میزان بحرانی شروع حرکت ذرات بستر بیش‌تر شود. تحقیقات نشان داده است که عوامل بسیار زیادی بر آب‌شستگی در پایین‌دست سازه تأثیرگذار هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به‌اندازه و دانه‌بندی رسوبات، عمق پایاب، عدد فرود ذره، و هندسه سازه اشاره کرد (Samani and mazaheri, 2007).

بررسی پدیده آب‌شستگی موضعی ناشی از جت‌های ریزشی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی نشان داد که حداکثر عمق آب‌شستگی، با افزایش عمق پایاب تا حد معینی، افزایش‌یافته و پس‌از آن، با افزایش بیش‌تر عمق پایاب، کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد که ابعاد حفره آب‌شستگی با پارامترهای بدون‌بعد حاصل از آنالیز ابعادی، دارای رابطه توانی می‌باشند (Sanei et al., 2008; Sanei et al., 2014).

می‌باید (Hassanpour et al., 2015).

مقدار آن به ترتیب به میزان ۸۷/۹، ۵۴/۵ و ۱۵/۱۵ درصد کاهش یافت. همچنین حضور سازه در قوس بیرونی با ایجاد جریان ثانویه، منطقه ماکزیمم سرعت را در مقاطع ۴۵ و ۷۰ درجه به ترتیب ۵۳/۴ و ۸۲ درصد از قوس خارجی دور نمود (Maleki et al., 2020).

طاهری و همکاران (۲۰۲۴) بررسی عددی هیدرولیکی جریان عبوری از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق را صورت دادند. در بررسی نتایج یافت شد که استفاده از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط مستغرق در مقایسه با شرایط جریان آزاد، سرعت حداکثر در دبی‌های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه، در بازشدگی ۳۰ درجه، به‌طور متوسط برای میزان استغراق‌های (۷۰، ۸۰ و ۹۰) درصد به ترتیب ۹، ۳۰ و ۵۴ درصد، در بازشدگی ۴۵ درجه، به ترتیب ۸، ۲۲ و ۳۸ درصد و در بازشدگی ۶۰ درجه، به ترتیب ۱۲، ۲۲ و ۴۴ درصد، کاهش یافت. نتایج در خصوص ضریب دبی نشان داد که در زمان استفاده از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط مستغرق در مقایسه با شرایط جریان آزاد، ضریب دبی در دبی‌های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه، در بازشدگی ۳۰ درجه، به‌طور متوسط برای میزان استغراق‌های (۷۰، ۸۰ و ۹۰) درصد به ترتیب ۸، ۲۶ و ۴۵ درصد، در بازشدگی ۴۵ درجه، به ترتیب ۱۶، ۳۴ و ۴۹ درصد و در بازشدگی ۶۰ درجه، به ترتیب ۱۷، ۳۶ و ۵۴ درصد، کاهش خواهد یافت.

یکی از انواع سازه‌های هیدرولیکی که در سال‌های اخیر عمدتاً مورد استفاده قرار گرفته؛ ترکیب سرریز - دریچه است (شکل‌های ۱ و ۲). این سازه عبور سیال در مواردی که سیال حاوی سرباره و رسوب به‌صورت هم‌زمان است (مانند کانال عبور فاضلاب) تسهیل می‌کند، به‌گونه‌ای که در یک‌زمان، جریان آب می‌تواند هم از روی سرریز و هم از زیر دریچه عبور نماید. این وسیله ترکیبی می‌تواند مشکلات ناشی از فرسایش و رسوب‌گذاری را مرتفع نماید (Dehghani et al., 2010).

از کاربردهای عملی این ترکیب، می‌توان انواع سدهای تأخیری را نام برد. در سدهای تأخیری برای جلوگیری از انباشت رسوب در پشت سد که منجر به کاهش حجم مفید

ارزیابی تاثیر معیارهای سازه‌ای هیدرولیکی (جت‌های آبی دوخطی) در به حداقل رساندن ابعاد حفره آب‌شستگی در پایین‌دست سرریز نوع فایوم نشان داد که جت‌های آب کف در بهبود شرایط هیدرولیکی جریان و ابعاد آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی اثربخش است. در این راستا ۹۰ آزمایش با در نظر گرفتن عدد فرود جریان، تخلیه و موقعیت‌های مختلف جت انجام شد. برنامه آزمایشی تحت شرایط آب‌شستگی آب زلال برای یک حفره آب‌شستگی شبه‌تعدالی اجرا شد. یک مورد مرجع از کف صاف بدون جت‌های آب (معیار پیشنهادی) در نظر گرفته شد (Amin et al., 2015).

تاثیر اشکال و پیکربندی‌های مختلف شیار بر ابعاد آب‌شستگی پایین‌دست سازه‌های ترکیبی سرریز و دریچه به‌صورت تجربی بررسی شده است (Eskandari et al., 2020). آن‌ها برای بررسی آب‌شستگی پایین‌دست سازه دو سناریوی (۱) شرایط آزاد و (۲) شرایط شکاف‌دار با شیارهای مستطیلی و مثلثی تنظیم شده به‌صورت متفاوت تحت چهار نرخ تخلیه مختلف در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که استفاده از یک شکاف انحراف‌دهنده تا حد زیادی بر میزان آب‌شستگی و عمق، تاثیر می‌گذارد و منجر به کاهش آب‌شستگی (۵۳٪) در باکت مستطیلی پریچ‌وخم در مقایسه با باکت جامد می‌شود. همچنین، مقایسه نتایج با معادلات تجربی نشان داد که معادله تارایموویچ نتایج دقیق‌تری را در آزمایش‌های کنترل و معادلات دامول - A و دامول - B نتایج دقیق‌تری را به ترتیب در آزمایش‌های مربوط به پرتابه‌های چاک‌دار مستطیلی و مثلثی تولید کردند.

الگوی جریان در یک کانال قوسی ۹۰ درجه با نسبت شعاع به عرض ۴، که در محدوده قوس‌های ملایم است، تحت تاثیر عددهای فرود ۰/۳۷، ۰/۴۱، ۰/۴۵ و ۰/۴۷ مطالعه گردید. نتایج نشان داد با نصب سازه جت غیر هم‌فاز، ماکزیمم آب‌شستگی موجود در قوس بیرونی به میانه فلوم منتقل شد. از طرفی با کاهش فاصله لوله متخلخل از قوس بیرونی در فواصل صفر، ۶/۲۵ و ۲۰ درصد از قوس بیرونی

پدیده آب‌شستگی به‌شمار می‌آید؛ از این رو، پژوهش حاضر به بررسی تأثیر دانه‌بندی رسوبات موجود بر شرایط و نیمرخ آب‌شستگی ایجادشده در پایین‌دست سازه‌های ترکیبی سرریز - دریچه می‌پردازد.

۲- روش‌شناسی

برای رسیدن به اهداف این پژوهش، آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی انجام می‌شود. آزمایش‌ها با آب زلال و به‌کارگیری شرایط متفاوت هیدرولیکی انجام خواهد شد. جهت بررسی دقیق‌تر این پدیده آزمایش‌ها برای حالت‌های مختلف عبور جریان از روی سرریز و زیر دریچه با دبی‌های متفاوت و عمق پایاب مختلف انجام می‌پذیرد. پس از اتمام آزمایش‌ها نیز نیمرخ بستر ایجادشده اندازه‌گیری خواهد شد. پس از انجام آزمایش‌ها و برداشت داده‌ها، داده‌های مربوط به اندازه‌گیری آب‌شستگی در طول آزمایش وارد برنامه اکسل شده و داده‌های نیمرخ بستر وارد نرم‌افزار Surfer خواهد شد. سپس براساس آنالیز ابعادی انجام‌شده پارامترهای بی‌بعد مربوطه محاسبه و نتایج موردتجزیه و تحلیل قرار خواهند گرفت.

برای انجام آزمایش‌های این تحقیق از سرریز مدل از جنس آلومینیوم، با ضخامت ۱ میلی‌متر، عرض ۵۰ سانتی‌متر، طول تاج و ارتفاع به‌ترتیب ۴۰ و ۲۰ سانتی‌متر موجود در آزمایشگاه گروه مهندسی آب شرکت تحکیم‌گستر استفاده و دریچه و سرریز ترکیبی در فاصله ۱۴۰ سانتی‌متری از ابتدای کانال نصب‌شده است. طرح‌واره‌ای از حفره آب‌شستگی در پایین‌دست کف‌بند همراه با پارامترهای مشخصه اندازه دانه‌بندی و با سه دبی مختلف (۱۰، ۱۵، ۲۰ لیتر بر ثانیه) و پایاب‌های ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۷ سانتی‌متر و پارامترهای مشخصه حفره در [شکل ۳](#) و نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در [شکل ۴](#) ارائه شده است. آزمایش‌ها در یک فلوم به طول ۱۰ متر و عرض و ارتفاع ۰٫۵ متر و شیب کف کانال ۰٫۰۰۱ است. جنس کف و اسکلت کانال، آهنی و دیواره‌ها از جنس شیشه است، برای اندازه‌گیری دبی جریان از یک سرریز مثلثی شکل لبه‌تیز با

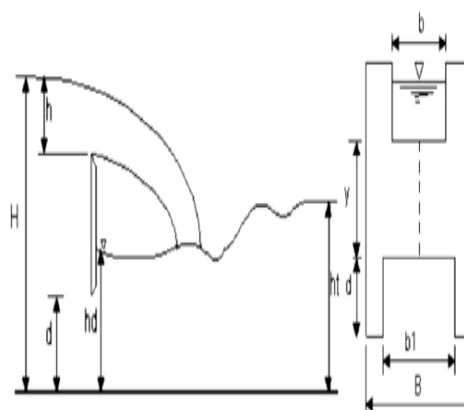


Fig. 1 Flow through a rectangular weir-gate combination structure with lateral compression

شکل ۱ جریان عبوری از سازه ترکیبی سرریز - دریچه مستطیل‌شکل با فشردگی جانبی

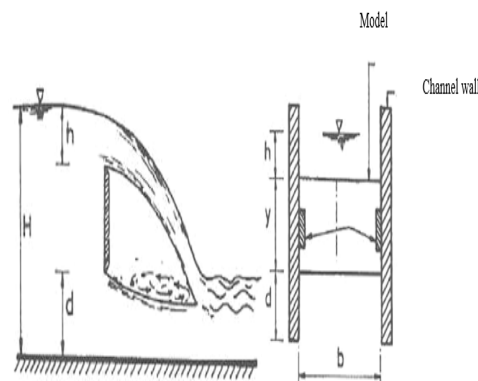


Fig. 2 Flow through a combined rectangular weir-valve structure without lateral compression

شکل ۲ جریان عبوری از سازه ترکیبی سرریز - دریچه مستطیل‌شکل بدون فشردگی جانبی

شکل ۳ مخزن می‌شود، اقدام به تعبیه تخلیه‌کننده‌های تحتانی می‌گردد. از طرف دیگر این نوع سدها به‌علت برآورد اهداف

طراحی و عبور سیلاب‌های محتمل، به‌صورت روگذر نیز عمل می‌کنند که از این دو جهت، مدل ترکیبی سرریز - دریچه ایده مناسبی برای تحلیل این نوع سدها است. همچنین، دریچه‌ها و سرریزها به‌منظور کنترل، تنظیم جریان و تثبیت کف، در کانال‌های باز مورد استفاده قرار می‌گیرند. از طرفی، بر اثر جریان ناشی از جت عبوری از رو یا زیر سازه‌ها، امکان ایجاد حفره آب‌شستگی در پایین‌دست سازه‌ها وجود دارد که ممکن است پایداری سازه را به خطر اندازد. دانه‌بندی رسوبات یکی از پارامترهای مهم موثر بر

زهکشی کامل بستر رسوبی، نیمرخ بستر توسط عمق سنج با دقت ۱ میلی‌متر برداشت شده و فرآیند فوق برای انجام آزمایش بعدی تکرار می‌شد. در [جدول ۱](#) پارامترهای مشخصه آزمایش ارائه شده است.

۳- نتایج و بحث

Surfer نرم‌افزاری بر پایه نقشه‌های Grid است که داده‌های نامنظم با فواصل XYZ را به داده‌های منظم شبکه‌ای با فواصل دلخواه تبدیل می‌کند. فایل‌های Grid همچنین می‌تواند برای سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا مهم باشد. از فایل‌های Grid برای ایجاد نقشه‌های مختلفی مانند نقشه‌های هم‌ارزش، نقشه‌های جهت تغییرات برداری، نقشه‌های تصویری، نقشه‌های سایه و روشن (به صورت استمپاز)، نقشه‌های سه‌بعدی سطحی و نقشه‌های سه‌بعدی توری می‌توان استفاده نمود. نقشه‌ها قابلیت تغییر و ویرایش در محیط نرم‌افزار Surfer را دارد. این نرم‌افزار اجازه ساخت و تهیه نقشه‌ها در بهترین حالت را به شما خواهد داد.

همان‌طور که قبلاً ذکر گردید، به ازای سه عدد فرود متفاوت و اعماق پایاب مختلف، در مجموع ۱۱ سری آزمایش به‌ازای عدد فرود ۴/۶۰۹، ۴/۸۱ و ۴/۶۸۳ و اعماق پایاب مختلف بعد از رسیدن سیستم به حالت تعادل نشان داده شده است. همان‌طور که از [این شکل](#) مشخص است هندسه گودال آب‌شستگی به میزان زیادی تحت تاثیر عمق پایاب قرار دارد. به ازای این عدد فرود خاص، با کاهش عمق پایاب، گسترش طولی گودال آب‌شستگی به‌طور چشمگیر کاهش می‌یابد. همچنین از ارتفاع تپه (دیون) تشکیل شده بعد از گودال نیز کاسته می‌شود.

در [شکل ۵](#) تغییرات نیمرخ طولی آب‌شستگی ناشی از دبی‌های مختلف به ازای یک مقدار ثابت عمق پایاب

جدول ۱ ایستگاه‌های هیدرومتری در رودخانه تجن

Table 1 Hydrometric stations on the Tajan River

Tail depth (cm)	Discharge (l/s)	Particle average diameter (mm)
10	10	1.6
12.5	15	3.3
17	20	6.2

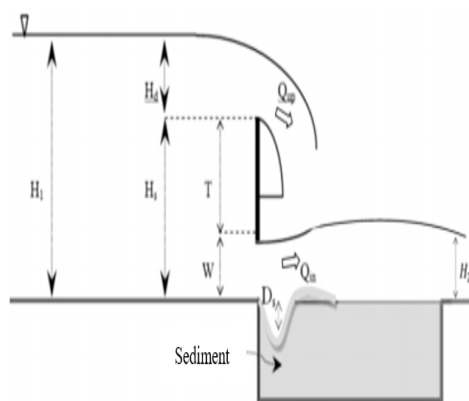


Fig. 3 Schematic of scour hole formation downstream of the combined spillway-gate structure

شکل ۴ شماتیک تشکیل حفره آب‌شستگی در پایین‌دست سازه ترکیبی سرریز - دریچه



Fig. 4 View of the laboratory flume used

شکل ۵ نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده

زاویه راس ۹۰ درجه از جنس فلز در انتهای حوضچه پایین‌دست استفاده گردید. همچنین این فلوم در پایین‌دست مجهز به یک دریچه با قابلیت کنترل عمق پایاب و پرش بود. طول کف‌بند صلب ۶۰ سانتی‌متر، عمق رسوبات ۱۷ سانتی‌متر و طول آن ۲۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در این تحقیق مصالح ماسه سیلیسی و با سه دانه‌بندی یکنواخت با قطر متوسط ذرات ۱/۶، ۳/۳ و ۶/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. عمق پایاب به‌وسیله دریچه کشویی که در انتهای فلوم آزمایشگاهی تعبیه شده است تنظیم می‌گردید. در پایان مدت آزمایش (۶ ساعت)، زمان تعادل ۱۲۰ دقیقه به‌دست آمد. (۹۰ درصد عمق آب‌شستگی). هم‌زمان با بستن دریچه انتهایی، جریان قطع و بعد از

شیب تندتری بوده و امکان وقوع شرایط نابسامان در این دبی بیش‌تر از سایر مقادیر است. بدیهی است که با افزایش میزان دبی، شیب خط نمودار بی‌بعد رسم‌شده افزایش خواهد یافت.

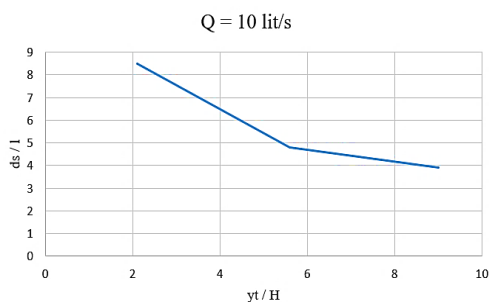


Fig. 6 Dimensionless diagram of the effect of the depth of the watercourse on the maximum scour depth for a flow rate of 10 liters per second

شکل ۷ نمودار بی‌بعد تاثیر عمق پایاب بر حداکثر عمق آب‌شستگی به ازای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه

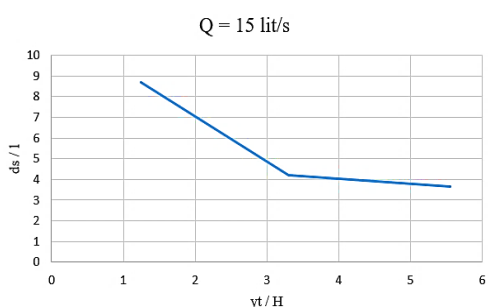


Fig. 7 Dimensionless diagram of the effect of the depth of the watercourse on the maximum scour depth for a flow rate of 15 liters per second

شکل ۸ نمودار بی‌بعد تاثیر عمق پایاب بر حداکثر عمق آب‌شستگی به ازای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه

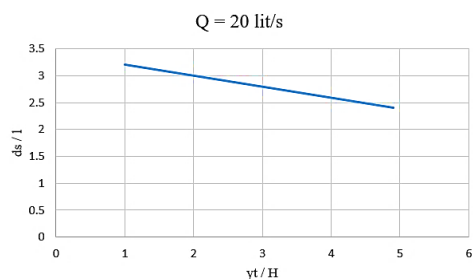


Fig. 8 Dimensionless diagram of the effect of the depth of the watercourse on the maximum scour depth for a flow rate of 20 liters per second

شکل ۹ نمودار بی‌بعد تاثیر عمق پایاب بر حداکثر عمق آب‌شستگی به ازای دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه

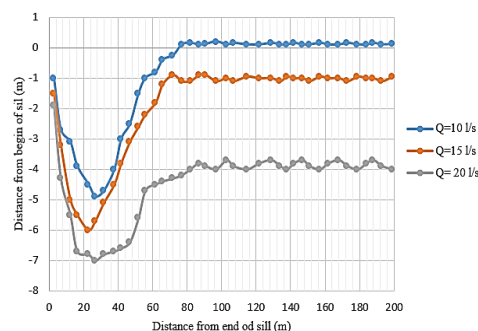


Fig. 5 Longitudinal scour profile for different discharges for a 10 cm tailwater depth

شکل ۶ نیمرخ طولی آب‌شستگی به ازای دبی‌های مختلف برای عمق پایاب ۱۰ سانتی‌متر

مشخص‌شده است. از نظر تئوری، با افزایش دبی جریان به همراه ثابت نگه‌داشتن سایر عوامل لزوماً بر میزان تلاطم جریان افزوده‌شده و در نتیجه امکان بروز فرسایش و بالطبع آب‌شستگی حتمی خواهد بود. این روند در محدوده مشخصی روی می‌دهد؛ زیرا او لا در صورتی که از تمهیدات کنترل‌کننده انرژی مانند حوضچه آرامش یا سنگچین استفاده‌شده باشد امکان کنترل وجود خواهد داشت و ثانیاً انرژی جریان آب به‌علت افت ناشی از تقلیل انرژی کاهش خواهد انجام‌شده است. در شکل ۵ نیمرخ گودال آب‌شستگی نشان‌داده شده است. بدیهی است که در صورت وجود تجهیزات کاهنده انرژی این فاصله کوتاه‌تر خواهد بود. نتایج ارزیابی صورت گرفته نیز حاکی از این امر است. همان‌طور که مشخص است، به ازای افزایش دبی جریان، در محدوده ۶۰ سانتی‌متری ابتدایی، تغییرات عملکردی دبی شرایط یکسانی داشته و تنها تفاوت آن در تغییرات رخ‌داده در ارتفاع کف‌بند است که با افزایش دبی افزایش‌یافته و منجر به آب‌شستگی بیش‌تر می‌گردد.

در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ از طریق بی‌بعدسازی، تاثیر عمق پایاب بر حداکثر عمق آب‌شستگی مشخص‌شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود به ازای هر سه دبی مورد‌آزمایش، روند تغییرات عملکرد آب‌شستگی افزایشی بوده است. نکته قابل‌توجه این است که در دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه به‌عنوان دبی جریان که بیش‌ترین مقدار اثرگذاری را در بروز شرایط ناپایداری‌سازی بستر و همچنین آب‌شستگی داشته است، روند تغییرات نسبت به سایر مقادیر دارای

توجه به اینکه پرش هیدرولیکی در پایین‌دست سرریز تحت تاثیر عمق پایاب است، لذا عمق پایاب بر روی ابعاد آب‌شستگی تاثیرگذار است. بنابراین در این پژوهش به بررسی تاثیر عمق پایاب بر ابعاد آب‌شستگی به صورت

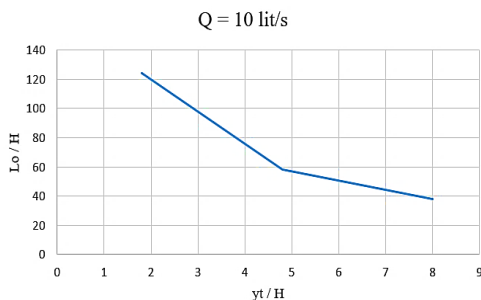


Fig. 9 Dimensionless diagram of the effect of the depth of the watercourse on the length of the scour hole for a flow rate of 10 liters per second

شکل ۱۰ نمودار بی‌بعد تاثیر عمق پایاب بر طول حفره آب‌شستگی به ازای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه

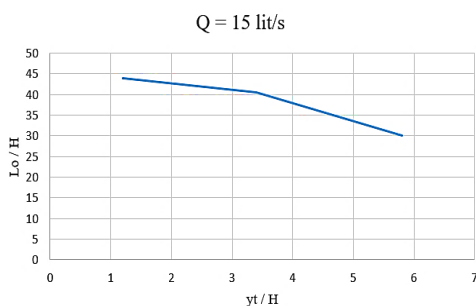


Fig. 10 Dimensionless diagram of the effect of the depth of the watercourse on the length of the scour hole for a flow rate of 15 liters per second

شکل ۱۱ نمودار بی‌بعد تاثیر عمق پایاب بر طول حفره آب‌شستگی به ازای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه

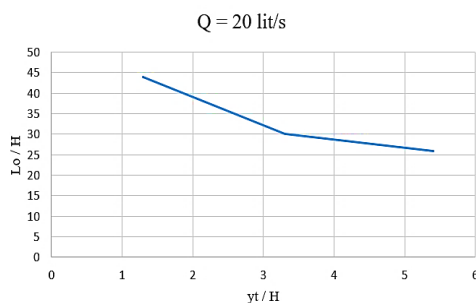


Fig. 11 Dimensionless diagram of the effect of the depth of the watercourse on the length of the scour hole for a flow rate of 20 liters per second

شکل ۱۲ نمودار بی‌بعد تاثیر عمق پایاب بر طول حفره آب‌شستگی به ازای دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه

در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ نمودار بی‌بعد شده تاثیر عمق پایاب بر طول حفره آب‌شستگی مشخص شده است. همان‌طور که مشخص است، روند تغییرات عمق پایاب و حفره آب‌شستگی ایجاد شده به صورت معکوس است. به عبارت بهتر در مقادیر عمق پایاب کم‌تر، طول حفره آب‌شستگی ایجاد شده بزرگ‌تر بوده و با افزایش عمق پایاب، از میزان طول حفره آب‌شستگی کاسته می‌شود. بروز این پدیده در نتیجه اثرگذاری مثبت عمق پایاب بر تلاطم جریان در پایین‌دست و کنترل انرژی مخرب آن است که منجر به وقوع آب‌شستگی می‌شود. یکی از اهداف اصلی ایجاد سازه‌هایی از جمله حوضچه آرامش، ایجاد شرایطی است که در آن در پایین‌دست سازه عمق پایاب را افزایش داده و جریان دارای خصوصیات فوق بحرانی به واسطه عمق پایاب و تشکیل پرش هیدرولیکی به حالت زیر بحرانی تبدیل شود. به همین دلیل بعضاً از سازه‌هایی از جمله سرریز لبه‌پهن استفاده می‌شود تا این مهم حاصل گردد.

در شکل ۱۲ تغییرات بی‌بعد مقدار آب‌شستگی به ازای افزایش میزان دبی مشخص شده است. عملکرد افزایش دبی به دلیل بروز تغییرات افزایشی در میزان سرعت، عدد فرود و بروز تلاطم منجر به افزایش اثرگذاری در مقدار آب‌شستگی می‌شود. بروز افزایش میزان آب‌شستگی به ازای افزایش دبی جریان امری بدیهی است. محدوده تغییرات آن وابسته به خصوصیات آبراهه، شرایط کنترل‌کنندگی جریان و خصوصیات رسوبات بستر است، به نحوی که در شرایطی که امکان ساخت سازه هیدرولیکی حوضچه آرامش به دلایل مختلف مقدور نباشد، از قطعات سنگی بزرگی استفاده می‌شود. جریان حتی در مواقع بروز سیلاب‌های شدید با این قطعات سنگی برخورد نموده و در نتیجه منجر به پراکنش میزان انرژی مازاد آن‌ها می‌گردد. مشاهده شده است که در این شرایط مقدار آب‌شستگی و فرسایش سایر رسوبات به صورت معنی‌داری کاهش یافته است.

۳-۱- تاثیر عمق پایاب بر ابعاد آب‌شستگی

به منظور بررسی دقیق تاثیر عمق پایاب بر ابعاد آب‌شستگی در پایین‌دست سرریز، نمودارهای بی‌بعد ترسیم شده و روند تغییرات ابعاد آب‌شستگی مورد تحلیل قرار گرفته است. با

به ترتیب از رسوبات درشت‌دانه به ریزدانه افزایش خواهد یافت. به عبارت بهتر، در صورتی که نوع رسوبات از نوع ریزدانه باشد، با افزایش بازشدگی دریاچه و در پی آن افزایش دبی، آب‌شستگی سرعت بیش‌تری گرفته و حفره ناشی از عملکرد جریان نیز گسترده‌تر خواهد گردید. به همین

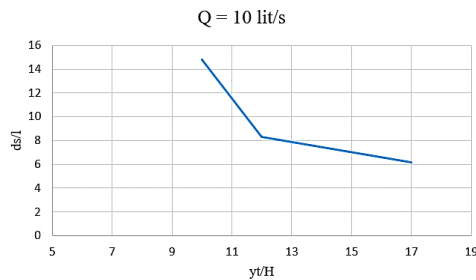


Fig. 13 Dimensionless diagram of the effect of the depth of the watercourse on the maximum scour depth for a flow rate of 10 liters per second

شکل ۱۴ نمودار بی‌بعد تأثیر عمق پایاب بر حداکثر عمق آب‌شستگی به ازای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه

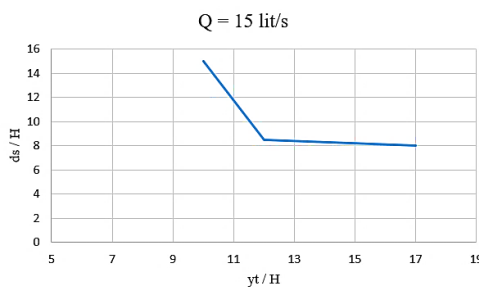


Fig. 14 Dimensionless diagram of the effect of the depth of the watercourse on the maximum scour depth for a flow rate of 15 liters per second

شکل ۱۵ نمودار بی‌بعد تأثیر عمق پایاب بر حداکثر عمق آب‌شستگی به ازای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه

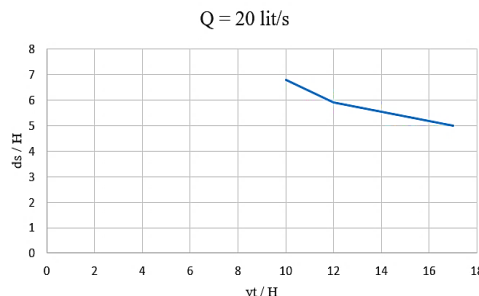


Fig. 15 Dimensionless diagram of the effect of the depth of the watercourse on the maximum scour depth for a flow rate of 20 liters per second

شکل ۱۶ نمودار بی‌بعد تأثیر عمق پایاب بر حداکثر عمق آب‌شستگی به ازای دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه

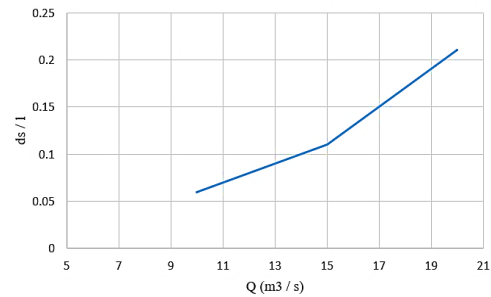


Fig. 12 Dimensionless graph of maximum scour depth per increase in discharge

شکل ۱۳ نمودار بی‌بعد حداکثر عمق آب‌شستگی به ازای افزایش دبی

۲-۳- تأثیر عمق پایاب بر حداکثر عمق آب‌شستگی

در شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ نمودارهای بی‌بعد تأثیر عمق پایاب بر حداکثر عمق آب‌شستگی نشان داده شده است. با افزایش عمق پایاب پارامتر بی‌بعد حداکثر عمق آب‌شستگی (ds/H) کاهش می‌یابد؛ زیرا در پایاب پرش مستغرق بوده و انرژی جت مستهلک می‌شود. همچنین به ازای یک شکل هندسی ثابت از سرریز و عمق پایاب ثابت، با افزایش دبی مقدار حداکثر عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد.

۳-۳- تأثیر عمق پایاب بر محل وقوع حداکثر عمق آب‌شستگی

در شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ نمودارهای بی‌بعد تأثیر عمق پایاب بر محل وقوع حداکثر عمق آب‌شستگی نشان داده شده است. با افزایش عمق پایاب پارامتر بی‌بعد (Ls/H) به دلیل مستهلک شدن انرژی جنبشی جت در پایاب‌های بالا کاهش می‌یابد. همچنین به ازای یک شکل هندسی ثابت از سرریز با افزایش دبی، محل وقوع حداکثر عمق آب‌شستگی از انتهای کف‌بند دور می‌شود.

- ارزیابی اثرات عمق پایاب و اندازه ذرات رسوبی

عمق پایاب جریان در پایین‌دست یکی از عوامل مهم و حائز اهمیت در میزان و شدت آب‌شستگی رخ داده است. به‌طور کلی افزایش میزان پایاب، ناشی از افزایش ارتفاع بازشدگی دریاچه کنترلی در پایین‌دست بوده که متناسب با افزایش دبی نیز همراه خواهد بود. با افزایش دبی، به ازای یک نوع از رسوبات با مشخصات ثابت، میزان آب‌شستگی

بلوک‌های ضربه‌گیر است.

در این شرایط از شدت و عملکرد فرسایشی جریان کاسته شده و در نتیجه شرایط از نظر رسوب‌گذاری بهتر خواهد گردید. در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نمودارهای تاثیر گذاری عمق پایاب و اندازه رسوبات بر سایر پارامترها ارائه شده است.

با مقایسه بین دو نمودار فوق، مشخص می‌شود که افزایش دبی در مقطع ثابت منجر به افزایش سرعت گشته و در نتیجه عدد فرود افزایش خواهد یافت. از سوی دیگر، افزایش اندازه ذرات رسوبی منجر به بهبود عملکرد بستر در برابر آب‌شستگی و کاهش میزان نسبی آن نسبت به ذرات ریزتر در دبی یکسان می‌شود. به عبارت بهتر، در مجموع تغییرات افزایشی دبی منجر به افزایش آب‌شستگی افزایش اندازه ذرات سبب کاهش آن می‌گردد، بدین ترتیب تغییرات جزئی در بین دو نمودار ترسیم شده مشخص می‌شود. این تغییرات

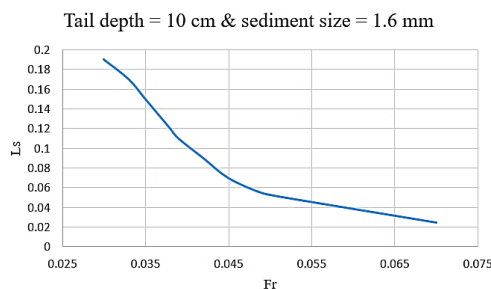


Fig. 19 Changes in Froude number at a water depth of 10 cm and sediments of 1.6 mm for a flow rate of 10 liters per second

شکل ۲۰ تغییرات عدد فرود در عمق پایاب ۱۰ سانتی‌متر و رسوبات ۱/۶ میلی‌متر به ازای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه

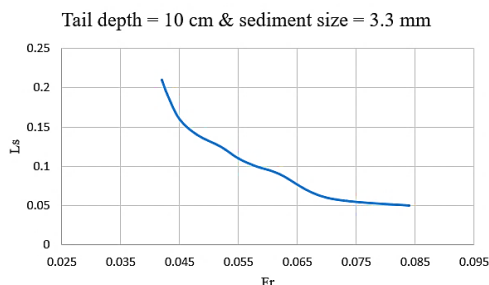


Fig. 20 Changes in Froude number at a water depth of 10 cm and sediments of 3.3 mm for a flow rate of 15 liters per second

شکل ۲۱ تغییرات عدد فرود در عمق پایاب ۱۰ سانتی‌متر و رسوبات ۳/۳ میلی‌متر به ازای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه

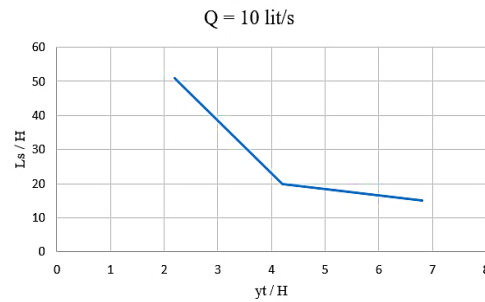


Fig. 16 Dimensionless diagram of the effect of the depth of the watercourse on the location of the maximum scour depth for a discharge of 10 liters per second

شکل ۱۷ نمودار بی‌بعد تاثیر عمق پایاب بر محل وقوع حداکثر عمق آب‌شستگی به ازای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه

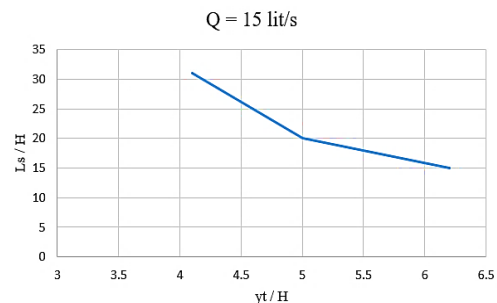


Fig. 17 Dimensionless diagram of the effect of the depth of the watercourse on the location of the maximum scour depth for a discharge of 15 liters per second

شکل ۱۸ نمودار بی‌بعد تاثیر عمق پایاب بر محل وقوع حداکثر عمق آب‌شستگی به ازای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه

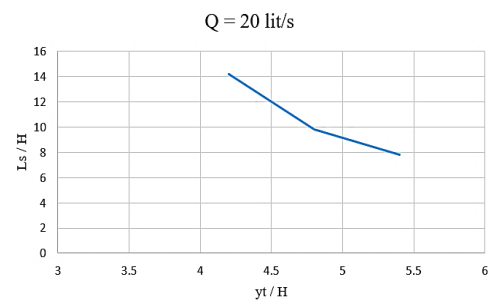


Fig. 18 Dimensionless diagram of the effect of the depth of the watercourse on the location of the maximum scour depth for a flow rate of 20 liters per second

شکل ۱۹ نمودار بی‌بعد تاثیر عمق پایاب بر محل وقوع حداکثر عمق آب‌شستگی به ازای دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه

ملکرد جریان نیز گسترده‌تر خواهد گردید. به همین بدون بعد پرداخته شده است.

منظور یکی از روش‌های مقابله با این مهم، استفاده از قطعات سنگی درشت در پایاب مقاطع دریاچه‌ها یا ساخت

به ترتیب حدود ۲۵/۸۶، ۲۵/۹ و ۲۵/۹۲ درصد افزایش یافته است.

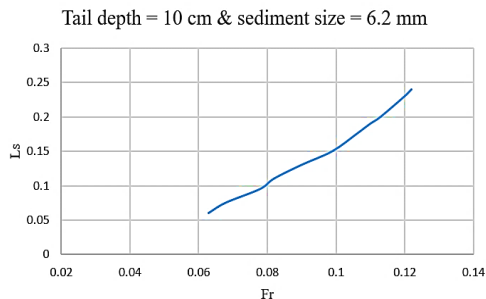


Fig. 21 Changes in Froude number at a water depth of 10 cm and sediments of 6.2 mm for a flow rate of 20 liters per second

شکل ۲۲ تغییرات عدد فرود در عمق پایاب ۱۰ سانتی‌متر و رسوبات ۶/۲ میلی‌متر به‌ازای دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه

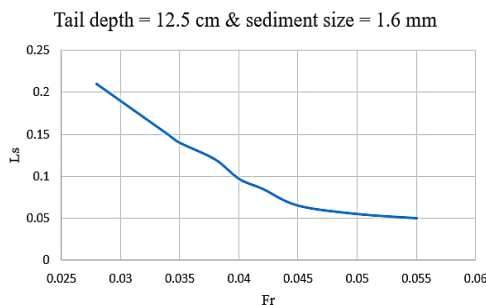


Fig. 22 Changes in Froude number at a water depth of 12.5 cm and sediments of 1.6 mm for a flow rate of 10 liters per second

شکل ۲۳ تغییرات عدد فرود در عمق پایاب ۱۲/۵ سانتی‌متر و رسوبات ۱/۶ میلی‌متر به‌ازای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه

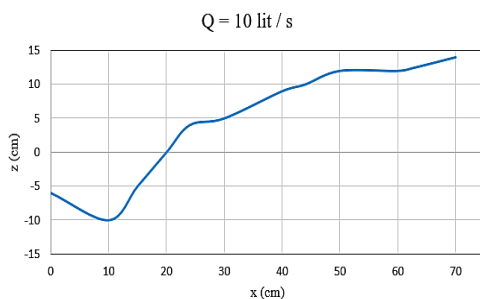


Fig. 23 Changes in sediment bed level after flume for a flow rate of 10 liters per second

شکل ۲۴ تغییرات تراز بستر رسوبی بعد از فلوم به‌ازای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه

به ازای تمامی پایاب‌های مختلف در اندازه‌های متفاوت ذرات رسوبی و بازشدگی‌های مختلف مشاهده گردید.

در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ تغییرات اثرگذاری عدد فرود به‌ازای دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه، عمق پایاب ۱۰ سانتی‌متری و اندازه رسوبات ۶/۲ میلی‌متری ارائه شده است. افزایش دبی جریان به‌ازای ثابت بودن سایر پارامترها منجر به افزایش آب‌شستگی و در نتیجه افزایش گستردگی حفره آب‌شستگی می‌گردد. این مهم از مقایسه نمودارهای فوق به‌ازای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه قابل‌درک است. در سایر دبی‌ها نیز همین روند حاکم بوده و فرآیند امر یکسان خواهد بود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بلافاصله بعد از فلوم، بستر رسوبی دچار فرسایش شده به‌طوری‌که با افزایش دبی مقدار شسته شدن رسوبات و انتقال آن‌ها به پایین‌دست افزایش می‌یابد. نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری در آزمایشگاه، پس از ترسیم مقطع عرضی فرسایش یافته شده به‌ازای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه اندازه ذرات ۱/۶ میلی‌متر، مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۲۳ آورده شده است. از نتایج به‌دست‌آمده چنین مشخص می‌شود که افزایش دبی ورودی به کانال و فلوم منجر به افزایش فرسایش بستر رسوبی می‌شود. شسته شدن ذرات رسوبی در ابتدای بستر رسوبی بیش‌تر بوده و با رسیدن به انتهای بستر رسوبی، این مقدار کاهش می‌یابد. حداکثر عمق شسته شده رسوبات در انتهای فلوم به‌صورت خلاصه در جدول ۲ آورده شده است.

همان‌طور که در جدول ۲ نیز نشان داده شده است، برای رسوبات بستر فرسایش‌پذیر با دانه‌بندی ۱۶ میلی‌متر، با افزایش دبی جریان از ۱۰ لیتر بر ثانیه به ۱۵ لیتر بر ثانیه (یعنی حدود ۳۳/۳۴ درصد افزایش دبی جریان ورودی)، حداکثر عمق فرسایش‌یافته بستر رسوبی در پایین‌دست فلوم، حدود ۲۵/۸۶ درصد افزایش یافته است. این مقدار برای رسوبات با دانه‌بندی ۳۳ میلی‌متر افزایشی برابر با ۲۵ درصد از خود نشان می‌دهد. همچنین با توجه به جدول فوق می‌توان این نتیجه را گرفت که با کاهش دانه‌بندی از ۳/۳ به ۱/۶ میلی‌متر (یعنی کاهش اندازه ذرات رسوبی در حدود ۵۱ درصد)، حداکثر عمق فرسایش‌یافته برای دبی ۱۵ و ۲۰ لیتر بر ثانیه حدود ۲۶/۲۶ درصد افزایش یافته است. حداکثر عمق فرسایش‌یافته برای دبی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ لیتر بر ثانیه

می‌گردد. این مهم ناشی از اثرگذاری زیاد عرض مجرا به‌ازای تغییرات دبی است. در ارزیابی مربوط به روند تغییرات طول موقعیت آب‌شستگی نسبت به عمق جریان در مقادیر مختلف عدد فرود، مشخص گردید که علی‌رغم کاهش تدریجی عدد فرود به‌ازای افزایش نسبی این پارامتر بی‌بعد، گستره تغییرات دبی، تاثیر جزئی بر این امر داشته است. دلیل این امر ناشی از روند طولی مجرا و کاهش میزان اثرگذاری در راستای جریان است. بدین ترتیب چنانچه بازه مربوط به آب‌شستگی افزایش یابد، باوجود تغییر دبی و بالطبع تغییرات صورت‌گرفته در عمق پایاب، امکان استهلاک اثرات مربوط به عدد فرود مهیا شده و در نتیجه روند شیب تغییرات ملایم می‌گردد. تغییرات مقادیر اندازه‌گیری‌شده فوق با تغییر اندازه رسوبات مربوط به بستر و همچنین اعمال دبی‌های یکسان مجدد اندازه‌گیری و موردبررسی واقع گردید. نکته قابل‌توجه این است که با افزایش اندازه ذرات رسوبی، علی‌رغم جزئی بودن برخی از تغییرات، اثرگذاری پوشش زرهی در بستر در اندازه‌های بزرگتر افزایش‌یافته که امکان کنترل بهتر بر عملکرد آب‌شستگی را منجر می‌گردد. یکی دیگر از پارامترهای موثر در روند تغییرات جریان به‌ازای مقادیر مختلف عدد فرود، عمق پایاب و دبی‌های اندازه‌گیری‌شده، مقدار مربوط به d_{50} ذرات رسوبی موردنظر است. به‌طور کلی، d_{50} بیانگر متوسط اندازه ذرات موجود در بستر است که تعیین آن منجر به درک بهتر جهت وقوع سازوکار آب‌شستگی می‌گردد. بررسی‌های در این پژوهش حاکی از آن بود که هرچه میزان d_{50} رسوبات بستر افزایش‌یافته و اندازه نسبی ذرات درشت‌تر گردد، عملکرد آب‌شستگی در ایجاد حفره آب‌شستگی نیز با تأخیر و در طی مدت‌زمان بیش‌تری رخ‌داده و امکان بهبود شرایط مهیا می‌شود. این تغییرات با افزایش دبی دستخوش روند کاهشی از نظر زمانی شده و بیانگر آن است که افزایش عدد فرود ناشی از افزایش دبی جریان به‌ازای مقدار ثابت خصوصیات مجرا، منجر به افزایش میزان آب‌شستگی می‌گردد.

5- List of symbols

Q (m^3s^{-1})	Flow rate
y_t (m)	Foothill depth
q (m^2s^{-1})	Flow rate per unit width

جدول ۲ حداکثر عمق شسته‌شده بستر رسوبی در پایین‌دست فلوم به‌ازای دبی و دانه‌بندی‌های مختلف

Table 2 Maximum depth of sedimentary bed washed at the downstream of the flume for different discharges and grain sizes

Q (l/s)	Sedimentation size (mm)		
	1.6	3.3	6.2
	Max depth of Wash load (mm)		
10	8.6	6.88	5.59
15	11.6	9.28	7.54
20	15.66	12.53	10.18

۴- نتیجه‌گیری

تغییرات عدد فرود متأثر از سرعت و عمق جریان در اندازه‌گیری‌ها است. با این وجود، ضروری است به‌دلیل اثرگذاری پارامترهای بی‌بعد در مقدار این مشخصه به‌ازای دبی‌های مختلف اندازه‌گیری‌شده و نمودار این تغییرات ترسیم گردد. از جمله این پارامترها اندازه متوسط ذرات، عرض مقطع آب‌شستگی، طول مقطع آب‌شستگی، عمق مقطع آب‌شستگی به‌ازای مقادیر مختلف ذرات رسوبی است که لازم است مورد ارزیابی قرار گیرند.

نکته قابل‌توجه در این است که روند تغییرات کلی عدد فرود به‌ازای تغییرات دبی در شرایط یکسان افزایشی است؛ اما لازم است به‌ازای تغییرات پارامترها در شرایط بی‌بعدسازی‌شده نسبت به عمق جریان معین گردد.

گستره تغییرات عدد فرود به‌ازای تغییرات ds/H نسبت به تغییرات دبی در عمق پایاب‌های مختلف حاکی از آن است که با کاهش دبی، روند افزایشی تغییرات ds/H ابتدا با شیب تند و سپس ملایم حفظ می‌شود. تغییرات عدد فرود نسبت به روند Ws/H نیز در دبی‌های مختلف آزمایش‌شده نشان داد که عدد فرود در ابتدا سیر صعودی نسبت به این پارامتر بی‌بعد داشته ولی از نقطه مربوط به تغییر طیف، روندی کاهشی با شیبی تند به‌ازای هر سه دبی آغاز می‌گردد. نکته حائز اهمیت این است که در مقادیر انتهایی به‌ازای هر سه دبی، این پارامتر به‌طور تقریبی به محل یکسانی ختم

H (m)	Drop height
Fr	Froude number
d_s (m)	Depth of washing
x	Longitudinal distance

z	Altitude distance
H (m)	Water load on the spillway
h_d (m)	Valve opening height
b_1 (m)	Overflow width
B (m)	Waterway width

Acknowledgments

We would like to express our deepest gratitude and appreciation for the cooperation of the Tahkim gostar company.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, J.V.; methodology, Sh.S., and J.V.; software, Sh.S.; data analysis, Sh.S.; writing — original draft preparation, J.V.; writing—review and editing, J.V. and Sh.S.; supervision, Sh.S.; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript

Funding

No financial support was received from any organization for this research.

Data Availability Statement

The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors upon request

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Eskandari, A., Heidarnejad, M., Masjedi, A., Purmohammadi, M. H., & Kamanbedast, A. (2020). Experimental investigation on the effect of different slot shapes and configurations on scour dimension downstream of flip buckets. *Water SA*, 46(3), 458-464
- Pagliara, S., Palermo, M., Carnacina, I. (2011). Scour process due to symmetric dam spillways crossing jets. *Int J River Basin Manag* 9(1):31-42
- Dehghani, A.A., Bashiri, H., Dehghani, N. (2010). Downstream scour of Combined flow over Weirs and below gates. *Water research*, 25 (4), 14-25
- Breusers, H. N. C., & Raudkivi, A. J. (1991). *Scouring*. Rotterdam: Balkema.
- Annandale, G. W. (2006). *Scour technology: mechanics and engineering practice*. McGraw Hill Professional.
- Samani, Mazaheri. (2007). Estimation of flow rate overpass and under valve in semi-submersible and submersible. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(4), 1143-1150
- Amin, A. M. A. (2015). Physical model study for mitigating local scour downstream of clear overflow weirs. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(4), 1143-1150
- Sanei, M. Hadidi, H., Banihashemi, M. A. (2008). Laboratory investigation of critical water depth in localized scour downstream of downdraft jets, Iranian seventh hydraulic conference, Tehran (In Persian)
- Sanei, M. Hadidi, H., Banihashemi, M. A. (2014). Investigation of changes in local scour downstream of downdraft jets with changes in critical downstream depth and orifice shape, *Watershed management*, 5 (4), 282 – 288 (In Persian)
- Akbari, GH. Kavianpour, M.R. Samani, E. (2015). Laboratory investigation of the scouring of the lower arm of a cup-shaped thrower. *Water resource*, 7 (4), 51 – 64 (In Persian)
- Hassanpour, S. Kavianpour, M. R. Rostami, M. (2015). Investigation of Froude Number and Watershed Depth on the Dimensions of the Downstream Scrubbing Hole of Free-Thrust Jets in Reservoir Dams with Flow 3D Model (Case Study of Darian Dam). The First National Congress of Construction Engineering and Evaluation of Civil Projects of the Golestan Province Construction Engineering System Organization, Golestan (In Persian)
- Chandan Kumar and P.Sreeja. (2012). "Evaluation of selected equations for predicting scour at downstream of ski-jump spillway using laboratory and field data. "Elsevier Engineering Geology Journal, 98–103.
- Maleki, P., Ahadiyan, J., Kashefi Pour, S.M., & Fathi-Moghadam, M.. (2020). Experimental investigation of the effective parameters in design of a non-phase hydraulic jet in the reduction of 90-degree bend scour. *MODARES CIVIL ENGINEERING JOURNAL*, 20(4), 179-190. SID. <https://sid.ir/paper/1037431/en>
- Taheri Talavari, T., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., Azizi Nadian, H. (2024). 'Numerical hydraulic and hydrodynamic investigation of flow passing through multiple elliptic lopac gates with Flow 3D software', *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(3), pp. 40-60. [doi: 10.22126/atwe.2024.10747.1127](https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10747.1127).