

Research paper

Investigation of the effect of compaction and non-uniformity of Non-adhesive sediments on scour downstream of the triangular labyrinth weir

M. Homayooni¹ and J. Mozaffari^{2*}

Extended Abstract

Introduction:

Labyrinth weirs are used in river sections that have limited width, to increase the flow capacity. Due to the turbulence of the flow and the increase in velocity, scour is one of the important issues downstream of the weirs. Moreover, the type of materials used downstream of the structure usually has a great impact on the amount of scour downstream of the weirs. For this reason, it is essential to evaluate the effect of material type on scour. Given that weirs are exposed to numerous floods, the most important challenge is to ensure the stability of the structures against erosion and scour, and the amount of scour must be estimated. In this research, the erosion downstream of labyrinth weirs is investigated, focusing on the effect of sediment bed compaction and non-uniformity of gradation on scour.

Materials and Methods:

Experiments were conducted in a glass flume with a length of 12 meters and a width of 80 cm. Also, three discharges of 5, 10 and 15 liter/s were considered. A triangular labyrinth weir with L/W equal to two, height of 35 cm and thickness of 4 mm was constructed. Downstream of the weir, the examined sediments were placed in the channel with a height of 20 cm. Two types of sediment were used: uniform sediment (A) and non-uniform sediment (B), both with a mean diameter of 2 mm. Sediment A had uniform gradation with the particles diameter varied between 0.7 and 3 mm, and the uniformity coefficient of 2.4. Sediment B had non-uniform gradation, with particles diameter of 0.07 to 6 mm, and a uniformity coefficient of 5.96. The uniformity coefficient, is defined as ratio d_{60}/d_{10} , indicates uniformity when less than 5 and non-uniformity when greater than 5. The important point was that d_{50} of both sediments was the same and equal to 2, meaning that both sediments had the same mean diameter, but different in uniformity. Therefore, the effect of uniformity and non-uniformity of sediments could be investigated. The tailwater depth in the experiments was 11 cm, and the equilibrium time was 6 hours. After each test, the scour depth was measured on a 2x2 cm grid and the scour profile was plotted in Sigma Plot software.

Result and Discussion:

Investigations revealed that the maximum scouring depth occurred near the junction of the

1- M.Sc. Student, Water Science & Engineering Department, Faculty of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran.

2- (a) Associate Professor, Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran,
(b) Member of the Research Institute of Water Science and Engineering, Arak University, Arak, Iran.

* Corresponding Author: j-mozafari@araku.ac.ir

Received: 2025/01/26

Accepted: 2025/03/08

weir and the channel wall. With increase in discharge, the scour rate increased by up to 68 percent in sediment A with 80 percent compaction. Also, the scouring profile of sediment B for a discharge of 15 Lit/s and 80 percent compaction showed a 40 percent increase compared to a discharge of 5 Lit/s. Therefore, higher discharges significantly increased the scour rate. Increasing the compaction from 80 percent to 90 percent, slightly reduced the scour depth. For sediment A, at a discharge of 5 Lit/s, increasing compaction resulted in over than 50 percent reduction in scour depth, but at a discharge of 15 Lit/s, only 5 percent change occurred. For sediment B, at a discharge of 5 Lit/s, a 35 percent reduction was obtained in scour depth with an increase in compaction from 80 percent to 90 percent; while at a discharge of 15 Lit/s, 2 percent change occurred in scour with an increase in compaction. This indicated that in high discharge, compaction had not significant effect. In comparison to sediment A, the sediment B had a 20 percent reduction in scour on the sides at a discharge of 15 liters per second and 90 percent compaction. Regarding the results, the non-uniformity of sediment B caused less erosion than sediment A. The sediment A was almost uniform and the sediment particles had less overlap and interlocking.

Studies confirmed that the maximum scour depth occurs near the junction of the labyrinth weir with the channel wall and this location remains consistent with increasing discharge. The second maximum scour occurs near the labyrinth weir apex. Therefore, to prevent erosion downstream of the labyrinth weir, necessary considerations should be taken regarding the maximum erosion locations. Increasing the compaction from 80 percent to 90 percent, the scour depth decreases to some extent, but at high discharge, compaction is less effective. However, the non-uniformity of the sediment affects the scour rate, because it enhances sediment particles contact and resistance to erosion.

Keywords: Compaction, Non-uniformity of sediment, Scouring, Triangular labyrinth weir.

Citation: Homayooni, M. and Mozaffari, J. 2025. Investigation of the effect of compaction and non-uniformity of Non-adhesive sediments on scour downstream of the triangular labyrinth weir. *Iranian Water Research Journal*, 56, pp. 89-99. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15092.2661>



مقاله پژوهشی

بررسی اثر تراکم و غیریکنواختی رسوبات غیرچسبنده بر آب‌شستگی پایین‌دست سرریز کنگره‌ای مثلثی

محمود همایونی^۱ و جواد مظفری^{۲*}

چکیده

سرریزهای کنگره‌ای در بازه‌ای از رودخانه که دارای محدودیت عرض باشد برای افزایش ظرفیت عبور جریان استفاده می‌شوند. در این پژوهش فرسایش پایین‌دست سرریزهای کنگره‌ای و اثر تراکم بستر رسوبی و غیریکنواختی دانه‌بندی بر آب‌شستگی بررسی شد. آزمایش‌ها در یک فلوم شیشه‌ای به طول ۱۰ متر و عرض ۸۰ سانتی‌متر و در سه دبی ۵، ۱۰ و ۱۵ لیتر بر ثانیه انجام گرفت. سرریز کنگره‌ای با L/W برابر با ۲ و ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر ساخته شد. برای انجام آزمایش‌ها دو نوع رسوب یکنواخت (A) و غیریکنواخت (B) با قطر میانه ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. عمق پایاب در آزمایش‌ها ۱۱ سانتی‌متر و زمان تعادل ۶ ساعت در نظر گرفته شد. بررسی‌ها نشان داد که بیشینه عمق آب‌شستگی در نزدیکی محل اتصال سرریز به دیواره کانال رخ می‌دهد و با تغییر هد آب بالادست، مکان آب‌شستگی تغییر خاصی نمی‌کند. همچنین، بیشینه دوم آب‌شستگی در نزدیک دماغه سرریز رخ داد. با افزایش دبی، میزان آب‌شستگی بیشینه تا ۶۸ درصد افزایش را در رسوب A و تراکم ۸۰ درصد نشان داد. با افزایش تراکم از ۸۰ به ۹۰ درصد، تا حدودی عمق آب‌شستگی کاهش یافت، اما در دبی زیاد، تراکم اثرگذاری خود را از دست داد. همچنین بررسی‌ها نشان داد که غیریکنواخت بودن رسوب B سبب شده است که فرسایش کمتری نسبت به رسوب یکنواخت A داشته باشد، به طوری که در دبی بیشینه، رسوب B نسبت به رسوب A، ۲۰ درصد کاهش آب‌شستگی را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: آب‌شستگی، تراکم، سرریز کنگره‌ای مثلثی، غیریکنواختی رسوب.

ارجاع: همایونی، محمود، و مظفری، جواد، ۱۴۰۴. بررسی اثر تراکم و غیریکنواختی رسوبات غیرچسبنده بر آب‌شستگی پایین‌دست سرریز کنگره‌ای مثلثی. مجله پژوهش آب ایران، ۵۶، صص. ۸۹-۹۹. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15092.2661>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک.

۲- الف) دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک و ب) عضو پژوهشکده علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک.

* نویسنده مسئول: J-mozafari@araku.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۷

مقدمه

سرریزها ابزاری هستند که معمولاً در جهت عمود بر جریان برای کنترل تراز سطح آب و اندازه‌گیری جریان و کنترل سیل استفاده می‌شوند. یکی از روش‌های افزایش عملکرد هیدرولیکی و بالابردن توانایی تخلیه سرریزها، افزایش طول سرریزهای خطی با جایگزینی آن با سرریز کنگره‌ای است. باتوجه به افزایش سرعت در پایین‌دست سرریزها، آبشستگی و پایداری سازه آن یکی از مسائل مورد نیاز برای بررسی است. (Tuna and Emiroglu (2011) به بررسی سرریزهای جانبی کنگره‌ای پرداختند. نتایج حاکی از آن است که افزایش ارتفاع سرریز منجر به افزایش آبشستگی می‌شود. (Tuna and Emiroglu (2013) به بررسی شوت‌های پلکانی پرداختند و نتیجه گرفتند، در حالی که ارتفاع پله افزایش می‌یابد، عمق تعادل آبشستگی کاهش خواهد یافت. همچنین عمق تعادل آبشستگی نیز با افزایش دبی افزایش می‌یابد. (Zomorodian et al. (2017) به بررسی تأثیر درصد رسوب رس و درصد تراکم بر آبشستگی پایه پل در بستر رسوبی و در حضور تکیه‌گاه پرداختند. آنها به‌منظور کاهش آبشستگی در اطراف پایه پل، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد رس به بستر غیرچسبنده اضافه و سپس آن را متراکم کردند. نتایج نشان داد هنگامی که ۱۵ درصد رس به رسوبات غیرچسبنده اضافه شود، در شرایط اشباع بستر و تراکم ۷۰ درصد، بعد از گذشت ۲۴ ساعت از شروع آزمایش، آبشستگی پیرامون پایه به طور کامل متوقف می‌شود. (Kazempour larsari et al. (2019) در بررسی آزمایشگاهی فرسایش پایین‌دست سرریزهای پلکانی - کنگره‌ای، نتیجه گرفتند که عمق بیشینه فرسایش به طور متوسط نسبت به حالت بدون کنگره در دو عمق پایاب کمینه و بیشینه به ترتیب به میزان ۳۰/۱ و ۶۵ درصد کاهش می‌یابد. (Babakhani and morsali (2020) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر پارامترهایی مانند زاویه کنگره سرریز و هد آب روی سرریز بر ابعاد حفره آبشستگی و نیز پشته رسوبی پرداختند. نتایج نشان داد با افزایش ۷ برابری هد آب روی سرریز، عمق آبشستگی ۱۲ برابر و طول حفره ۱۰ برابر افزایش می‌یابد و با افزایش ۶ برابری زاویه کنگره، کاهش ۷۰ درصدی عمق آبشستگی به‌وجود می‌آید. (Kumar and Ahmad (2020) به مطالعه آزمایشگاهی آبشستگی سرریز کلید پیانویی پرداختند و با بررسی اثر عمق پایاب به‌ازای دبی‌های مختلف دریافتند که جت‌های

ریزشی از کلیدهای ورودی و خروجی سرریز عامل اصلی ایجاد حفره و پشته است. (Yazdi et al. (2021) به بررسی آزمایشگاهی آبشستگی پایین‌دست سرریز کلید پیانویی (در دو مدل تاج مستطیلی و دوزنقه‌ای) پرداختند و دریافتند که بیشینه عمق و طول حفره آبشستگی مدل مستطیلی بیشتر از مدل دوزنقه‌ای است. (Abdi Chooiplou et al. (2022) آزمایشی روی آبشستگی پایین‌دست سرریزهای کلید پیانویی دوزنقه‌ای با رسوبات غیرچسبنده و یکنواخت با قطر متوسط ۲ میلی‌متر انجام دادند. نتایج حاکی از آن است که آبشستگی در میانه عرضی بستر کمتر از جداره‌های آن می‌باشد. (Bodaghi et al. (2023) دو حالت جریان آزاد و مستغرق را برای آزمایش تغییر شکل آبشستگی پایین‌دست سرریز کلیدپیانویی دوزنقه‌ای در نظر گرفتند. نتایج حاکی از آن بود که در جریان آزاد، تغییرات بستر نسبت به جریان مستغرق با سرعت بیشتری انجام می‌شود و با افزایش عدد فرود طول نسبی حفره آبشستگی افزایش یافته است. (Babakhani and Morsali (2023) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر هیدرولیک جریان عبوری بر آبشستگی پائین‌دست سرریز کنگره‌ای مثلثی بدون کف‌بند پرداختند. آن‌ها بیان کردند با افزایش هد آب روی سرریز علاوه بر گسترش چشمگیر ابعاد حفره آبشستگی، محل تشکیل حفره از مجاورت دیواره‌های سرریز به سمت مرکز کشیده می‌شود و نهایتاً بیشینه عمق آبشستگی در دماغه سرریز اتفاق می‌افتد. با توجه به هزینه‌های بالا برای افزایش ارتفاع پی سرریز برای جلوگیری از ناپایداری بر اثر آبشستگی، هدف از این پژوهش، بررسی اثر تراکم رسوبات و یکنواختی دانه‌بندی بر کاهش آبشستگی پایین‌دست سرریزهای کنگره‌ای است.

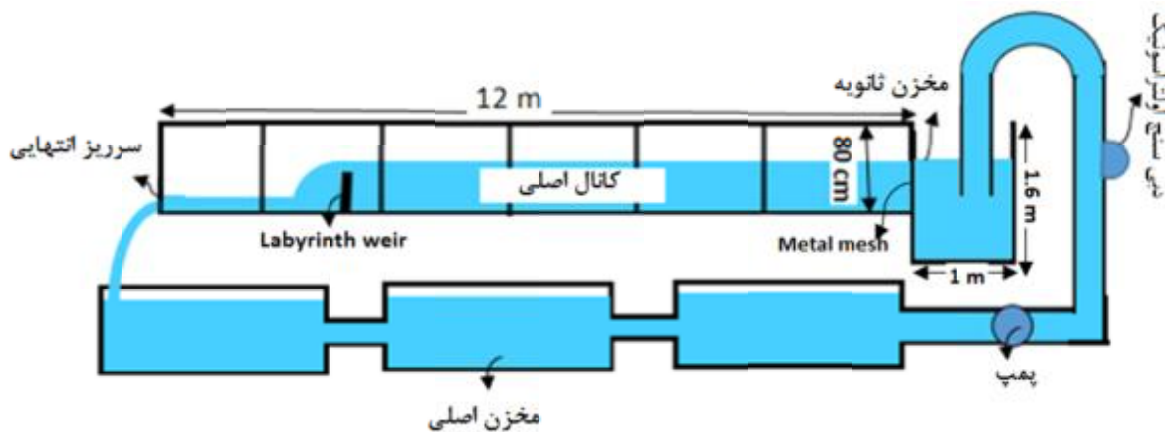
مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

پارامترهای موثر بر آبشستگی پایین‌دست سرریزهای کنگره‌ای عبارت است از: u_{cr} سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی، u_{in} سرعت ورودی به سرریز کنگره‌ای، t زمان از شروع آبشستگی، t_e زمان تعادل آبشستگی، d_{se} بیشینه عمق آبشستگی، γ_u عمق جریان در بالادست سرریز، γ_d عمق پایاب، ρ_w جرم مخصوص آب، ρ_{ds} جرم مخصوص خشک ذرات رسوبی، g شتاب ثقل، γ لزجت سینماتیکی آب، d_{50} قطر میانه ذرات رسوبی، W عرض سرریز، L طول

کانال آزمایشگاهی

آزمایش‌های مدل هیدرولیکی مربوط به این تحقیق در یک فلوم شیشه‌ای به طول ۱۰ متر، ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر و عرض ۸۰ سانتی‌متر با سیستم گردش آب در یک مخزن اصلی و یک مخزن ثانویه انجام گرفت (شکل ۱). پمپ دارای بیشینه دبی ۹۰ لیتر بر ثانیه است. دقت اندازه‌گیری با دبی‌سنج اولتراسونیک ± 0.1 لیتر بر ثانیه است. برای اندازه‌گیری تراز سطح آب نیز از چند عمق‌سنج نقطه‌ای ربلی که در طول فلوم قابل حرکت است، استفاده شد.



شکل ۱- نمای از فلوم آزمایشگاهی

۱۰ و ۱۵ لیتر بر ثانیه با سرعت ۰/۰۶، ۰/۱۱ و ۰/۱۷ در پایین‌دست برای آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. تغییرات در اولین آزمایش و پس از ۱۲ ساعت، نشان داد که در زمان کمتر از ۴ ساعت تغییرات در آب‌شستگی به‌وجود نمی‌آید. نهایتاً با در نظرگیری ضریب اطمینان، زمان آزمایش‌ها ۶ ساعت در نظر گرفته شد. (Emaeeli Varaki et al. (2017) نیز زمان تعادل را برای آزمایش آب‌شستگی روی سریز کنگره‌ای ۶ ساعت در نظر گرفتند. پس از گذشت ۶ ساعت پمپ خاموش شده و پایاب را با مش‌های ۲×۲ در نظر گرفته و تغییرات ارتفاعی آب‌شستگی با عمق‌سنج اندازه‌گیری شد. در نهایت نتایج به دست آمده را در نرم‌افزار سیگما پلات (معادل لاتین) رسم کرده تا شکل سه بعدی آب‌شستگی به دست آید. سیگما پلات نرم‌افزاری است که از توانایی‌های آن می‌توان به رسم نمودارهای دو بعدی و سه‌بعدی در محیطی ساده اشاره کرد.

تاج سریز، P ارتفاع سریز و δ کشش سطحی می‌باشد.

با استفاده از تئوری باکینگهام معادله زیر به دست آمد:

$$F1\left(\frac{u_{cr}}{u_{in}}, \frac{t}{t_e}, \frac{d_{se}}{P}, Fr, \theta_c, \frac{\gamma_u}{\gamma_d}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, Re, We, \frac{L}{W}, \frac{P}{W}\right) = 0 \quad (1)$$

عدد وبر (We) با توجه به عمق روی سریز و عدد رینولدز (Re) با توجه به وجود جریان آشفته در کانال باز که نیروی ثقل از لزجت اهمیت بیشتری دارد، حذف گردیدند. بنابراین معادله (۲) به دست آمد:

$$\frac{d_{se}}{P} = F2\left(\frac{u_{cr}}{u_{in}}, \frac{t}{t_e}, Fr, \theta_c, \frac{\gamma_u}{\gamma_d}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \frac{L}{W}, \frac{P}{W}\right) = 0 \quad (2)$$

قابل ذکر است جرم مخصوص خشک ذرات از معادله $\rho_{ds} = \rho_s(1 - n)$ به دست می‌آید. در این معادله ρ_s برابر با ۲۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و n پوکی رسوبات است.

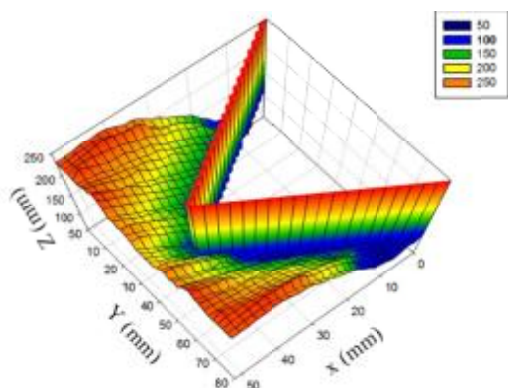
روش آزمایش

سریز کنگره‌ای با L/W برابر با ۲ در فاصله ۵ متری از ابتدای کانال قرار گرفت تا جریان کاملاً توسعه‌یافته تشکیل شود. این سریز از آهن با ضخامت ۴ میلی‌متر ساخته شد. در بالادست سریز تا ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر ذرات درشت دانه ریخته شد تا تراز کف بستر در بالادست و پایین‌دست یکی باشد. در پایین‌دست سریز ذرات رسوبات مورد بررسی برای آب‌شستگی تا ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر از کف کانال قرار گرفت. شکل ۲، نمای بالای آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. ابتدا صفحه پلکسی روی رسوبات قرار گرفت تا با شروع آزمایش و قبل از تنظیم عمق پایاب، تغییرات بر اثر آب‌شستگی ایجاد نگردد. عمق پایاب در آزمایش‌ها ۱۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که در تمام آزمایش‌ها ثابت بود. برای تنظیم عمق پایاب، دریچه انتهایی کانال برای هر دبی تنظیم شد تا یک عمق ثابت به دست آید. دبی ۵،

نتایج و بحث

بررسی اثر تراکم بر رسوب

در ابتدا رسوب نوع A برای دبی ۵ لیتر بر ثانیه و تراکم ۸۰ درصد به مدت ۶ ساعت مورد آزمایش قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که پس از ۴ ساعت تغییر خاصی در پروفیل طولی مشاهده نمی‌شود. با در نظر گرفتن ضریب اطمینان، زمان آزمایش‌ها ۶ ساعت در نظر گرفته شد. شکل ۴ پروفیل آب‌شستگی رسوب A برای دبی ۵ لیتر بر ثانیه و تراکم ۸۰ درصد را نشان می‌دهد. در این شکل، x محور طولی از سرریز کنگره‌ای به سمت پایین‌دست کانال، y محور عرضی نشان‌دهنده تغییرات در عرض کانال و z محور عمودی، نشان‌دهنده مقدار آب‌شستگی است. عدد ۲۰۰ میلی‌متر روی محور عمودی، تراز اولیه بستر است. برای مقایسه بهتر، محور عمودی در تمامی شکل‌های سه‌بعدی تا ارتفاع ۲۵۰ میلی‌متر، شماره‌گذاری شده است. بیشینه عمق آب‌شستگی در نزدیکی محل اتصال سرریز به دیواره کانال رخ داده که برابر با ۱۰۱ میلی‌متر است. با حرکت به سمت راس سرریز، عمق آب‌شستگی ۷۴ میلی‌متر شده است که کمترین میزان آب‌شستگی در کناره سرریز را نشان می‌دهد.



شکل ۴- پروفیل آب‌شستگی رسوب A، دبی ۵ لیتر بر ثانیه و تراکم ۸۰ درصد

شکل ۵ پروفیل آب‌شستگی رسوب A برای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و تراکم ۸۰ درصد را نشان می‌دهد. براساس شکل، میزان بیشینه آب‌شستگی به ۱۴۸ میلی‌متر افزایش یافته است.

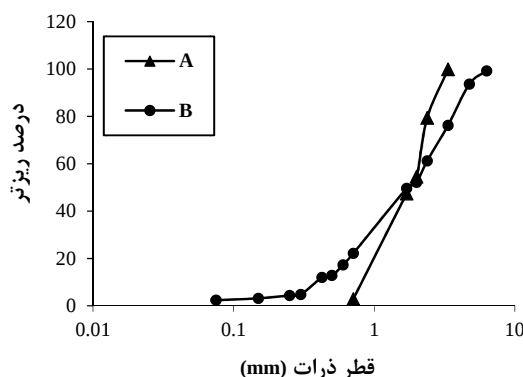
بنابراین میزان آب‌شستگی در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه نسبت به دبی ۵ لیتر بر ثانیه، ۴۶ درصد افزایش نشان می‌دهد. با



شکل ۲- نمایی از سرریز کنگره‌ای در آزمایش‌ها

آزمایش‌ها بر اساس نوع رسوبات مورد استفاده

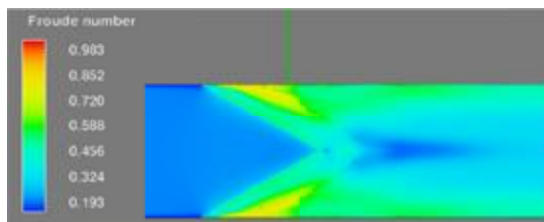
در این تحقیق از دو نوع رسوب متفاوت شامل: A با چگالی خشک ۱/۶۷ با دانه‌بندی یکنواخت و B با چگالی خشک ۲/۰۰ و دانه‌بندی غیریکنواخت استفاده شده است. در شکل ۳ دانه‌بندی رسوبات مورد بررسی نشان داده شده است.



شکل ۳- دانه‌بندی رسوبات مورد بررسی

براساس شکل ۳، دانه‌بندی رسوب A یکنواخت، ذرات دارای قطر بین ۰/۷ تا ۳ میلی‌متر و ضریب یکنواختی (Cu) ۲/۴ می‌باشد. رسوب B دارای دانه‌بندی غیریکنواخت و ذرات دارای قطر بین ۰/۰۷ تا ۶ میلی‌متر و ضریب یکنواختی ۵/۹۶ است. ضریب یکنواختی نسبت d_{60}/d_{10} است که برای عدد کمتر از ۵ نشان‌دهنده یکنواختی و برای بزرگتر از ۵ نشان‌دهنده غیریکنواختی رسوب است. نکته مهم اینکه d_{50} هر دو رسوب یکسان و برابر با ۲ می‌باشد. بدین معنی که دو رسوب قطر میانه برابری دارند اما یکی یکنواخت و دیگری غیریکنواخت است. بنابراین می‌توان اثر یکنواخت و غیر یکنواخت بودن رسوبات را بررسی کرد. رسوبات در تراکم ۸۰ و ۹۰ درصد مورد آزمایش قرار گرفتند.

بررسی‌ها نشان داد میزان افزایش فرسایش در راس سرریز با افزایش دبی، کمتر از کناره‌ها است. به نظر می‌رسد که با حرکت رسوبات از کناره‌ها به سمت جلو، تا حدودی مکان‌های مورد فرسایش در نزدیکی راس با رسوبات کناره‌ها پر شده است. (Babakhani and Morsali (2023) در بررسی آب‌شستگی پائین‌دست سرریزکنگره‌ای بیان کردند که با افزایش هد آب روی سرریز، علاوه بر گسترش چشمگیر ابعاد حفره آب‌شستگی، محل تشکیل حفره از کناره دیواره‌های سرریز به سمت مرکز کشیده می‌شود و نهایتاً بیشینه عمق آب‌شستگی در دماغه سرریز اتفاق می‌افتد. این در حالی است که در این آزمایش‌ها، بیشینه آب‌شستگی با افزایش دبی در کناره سرریز بود. شکل ۷ تغییرات عدد فرود جریان را برای سرریز مورد بررسی نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، عدد فرود در کناره‌ها بیشتر از راس سرریز است که با فرسایش بیشینه ایجاد شده در کناره‌ها مطابقت دارد.

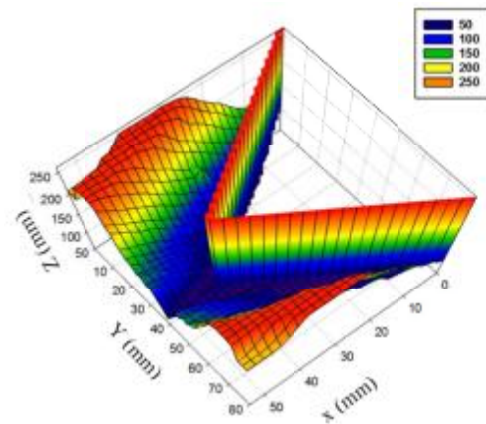


شکل ۷- عدد فرود جریان در سرریز کنگره‌ای مثلی $H/P=0.6$ و $L/W=2$ (Nazari Sharifi, 2023)

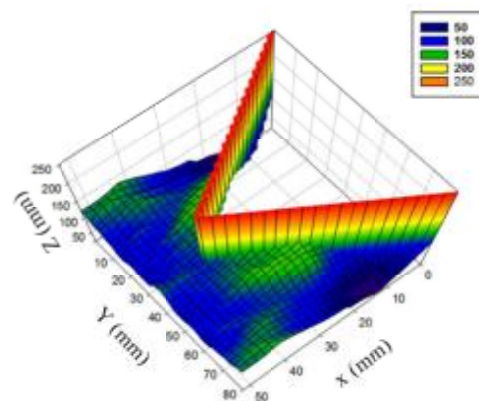
شکل ۸ پروفیل آب‌شستگی رسوب A برای دبی ۵ لیتر بر ثانیه و تراکم ۹۰ درصد را نشان می‌دهد. در این بخش، رسوب A دارای ۱۰ درصد تراکم بیشتر می‌باشد تا اثر تراکم بر روی رسوب مورد بررسی قرار گیرد. بر اساس این شکل، بیشترین میزان فرسایش برابر با ۴۸ میلی‌متر است که بیش از ۵۲ درصد کاهش را نسبت به رسوب A با تراکم ۸۰ درصد نشان می‌دهد. بنابراین، تراکم رسوب تاثیر زیادی را بر کاهش فرسایش نشان داده است. فرسایش در نزدیکی راس سرریز به ۲۸ میلی‌متر می‌رسد که در حدود ۶۲ درصد کمتر از فرسایش در راس سرریز برای تراکم ۸۰ درصد و دبی ۵ لیتر بر ثانیه است.

شکل ۹ پروفیل آب‌شستگی رسوب A برای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و تراکم ۹۰ درصد را نشان می‌دهد. بیشینه فرسایش در کناره‌ها ۱۱۹ میلی‌متر بوده که با حرکت به سمت راس سرریز به کمتر از ۹۵ میلی‌متر رسیده است. بنابراین

حرکت به سمت راس سرریز، میزان آب‌شستگی کاهش می‌یابد و به ۱۲۰ میلی‌متر می‌رسد که ۱۹ درصد آب‌شستگی کمتری را نسبت به کناره‌ها نشان می‌دهد. شکل ۶ پروفیل آب‌شستگی رسوب A برای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و تراکم ۸۰ درصد را نشان می‌دهد. براساس این شکل، میزان بیشینه آب‌شستگی به ۱۷۰ میلی‌متر افزایش یافته است که ۱۵ درصد از دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و ۶۸ درصد از دبی ۵ لیتر بر ثانیه بیشتر است. بیشترین میزان آب‌شستگی در فاصله ۱۸ سانتی‌متری از سرریز و در نزدیکی جداره کانال رخ داده است. همچنین میزان فرسایش با حرکت به سمت راس کانال به ۱۲۹ میلی‌متر می‌رسد که به ترتیب ۷۴ درصد و ۸ درصد نسبت به فرسایش در راس سرریز برای دبی ۵ و ۱۰ لیتر بر ثانیه افزایش نشان می‌دهد.

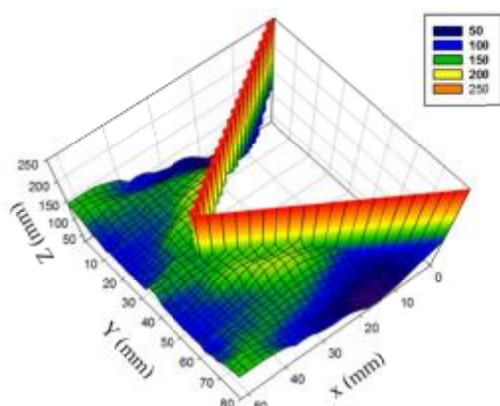


شکل ۵- پروفیل آب‌شستگی رسوب A، دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و تراکم ۸۰ درصد



شکل ۶- پروفیل آب‌شستگی رسوب A، دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و تراکم ۸۰ درصد

کاهش آب‌شستگی نسبت به تراکم ۸۰ درصد در کناره‌ها برابر با ۵ درصد و در راس سرریز برابر با ۱۸ درصد است. در این بخش نیز با افزایش دبی اثر تراکم رسوب بدون رس بر کاهش میزان آب‌شستگی، کمتر شده است؛ به گونه‌ای که نسبت به رسوب با تراکم ۸۰ درصد در کناره‌ها که دارای بیشینه تراکم است، تنها ۵ درصد مؤثر بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت تراکم تا حدودی بر آب‌شستگی مؤثر است اما اثر آن با افزایش دبی ناچیز است.

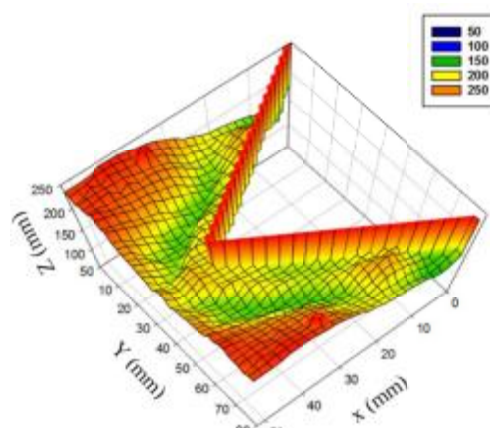


شکل ۱۰- پروفیل آب‌شستگی رسوب A، دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و تراکم ۹۰ درصد

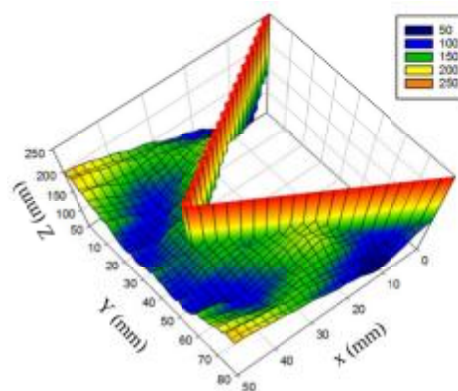
شکل ۱۱ پروفیل آب‌شستگی رسوب B را برای دبی ۵ لیتر بر ثانیه و تراکم ۸۰ درصد نشان می‌دهد. بیشینه آب‌شستگی ۷۸ میلی‌متر در کناره‌ها و ۷۰ میلی‌متر در راس سرریز است. این در حالی است که میزان بیشینه آب‌شستگی برای رسوب A در شرایط مورد بررسی در کناره‌ها و راس برابر با ۱۰۱ و ۷۴ میلی‌متر بوده است. بنابراین میزان آب‌شستگی در رسوب B در کناره‌ها و راس سرریز به ترتیب ۲۳ و ۵ درصد کاهش نشان داده است. باید در نظر داشت که رسوب B دارای جرم مخصوص بیشتری از رسوب نوع A است. دلیل این مساله نیز غیریکنواخت بودن رسوب نوع B می‌باشد. این در حالی است که رسوب نوع A تقریباً یکنواخت و ذرات رسوب همپوشانی کمتری را ایجاد کرده و کمتر درون همدیگر قرار می‌گیرند. بنابراین یکنواخت بودن دانه‌بندی رسوب، تا حدودی فرسایش ناشی از آب‌شستگی را افزایش داده است.

شکل ۱۲ پروفیل آب‌شستگی رسوب B را برای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و تراکم ۸۰ درصد نشان می‌دهد. بیشینه آب‌شستگی ۹۴ میلی‌متر در کناره‌ها و ۷۴ میلی‌متر در راس

فرسایش برای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و برای تراکم ۹۰ درصد کمتر از فرسایش برای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و تراکم ۸۰ درصد شده است؛ به گونه‌ای که بیشینه تراکم در کناره‌ها و همچنین در نزدیکی راس سرریز در حدود ۲۰ درصد کاهش نشان می‌دهد. با افزایش دبی از ۵ به ۱۰ لیتر بر ثانیه، میزان اثر تراکم روی آب‌شستگی نیز کمتر شده است. البته میزان آب‌شستگی در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و برای تراکم ۹۰ درصد نسبت به تراکم ۸۰ درصد کاهش پیدا کرده است اما افزایش دبی سبب شده است که این میزان کاهش آب‌شستگی در مقایسه با دبی ۵ لیتر بر ثانیه کمتر باشد.



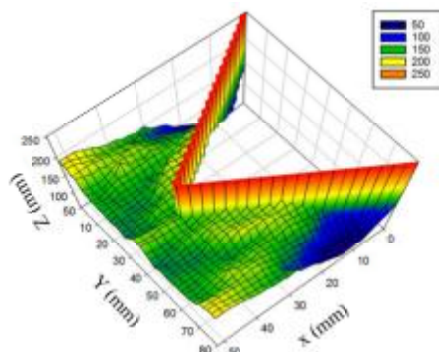
شکل ۸- پروفیل آب‌شستگی رسوب A، دبی ۵ لیتر بر ثانیه و تراکم ۹۰ درصد



شکل ۹- پروفیل آب‌شستگی رسوب A، دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و تراکم ۹۰ درصد

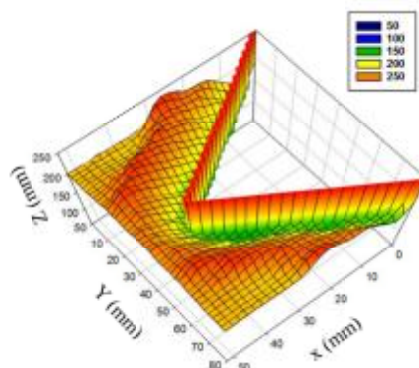
شکل ۱۰ پروفیل آب‌شستگی رسوب A برای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و تراکم ۹۰ درصد را نشان می‌دهد. بیشینه آب‌شستگی به ۱۶۲ میلی‌متر در کناره‌ها رسیده است که در راس سرریز به ۱۰۵ میلی‌متر می‌رسد. بنابراین میزان

عمق آبشستگی در نزدیکی آن شده است. همچنین مقایسه رسوب B با رسوب A در تراکم ۸۰ درصد و دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه کاهش ۲۰ درصدی عمق آبشستگی در کناره‌ها و ۶۹ درصدی در راس سرریز را نشان داده است.



شکل ۱۳- پروفیل آبشستگی رسوب B، دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و تراکم ۸۰ درصد

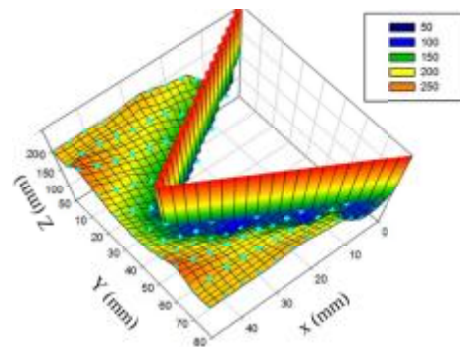
شکل ۱۴ اثر افزایش تراکم راروی رسوب B و برای دبی ۵ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. بیشینه آبشستگی ۵۰ میلی‌متر در کناره‌ها و راس سرریز است. آبشستگی برای دبی ۵ لیتر بر ثانیه و تراکم ۸۰ درصد در کناره‌ها و راس سرریز به ترتیب برابر با ۷۸ و ۷۰ میلی‌متر است. در نتیجه با افزایش تراکم از ۸۰ به ۹۰ درصد، میزان آبشستگی بیشینه در کناره‌ها و راس سرریز به ترتیب ۳۵ و ۲۸ درصد کاهش نشان داده است.



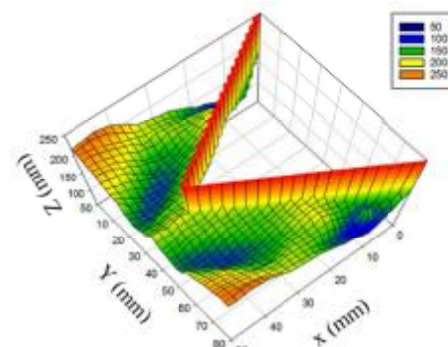
شکل ۱۴- پروفیل آبشستگی رسوب B، دبی ۵ لیتر بر ثانیه و تراکم ۹۰ درصد

شکل ۱۵ اثر افزایش تراکم را روی رسوب B و برای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. بیشینه آبشستگی ۹۰ میلی‌متر در کناره‌ها و ۸۷ میلی‌متر در راس سرریز است. این میزان آبشستگی افزایش ۸۰ درصد در کناره‌ها و ۷۴

سرریز است. میزان بیشینه فرسایش در کناره‌ها و راس سرریز نسبت به دبی ۵ لیتر بر ثانیه به ترتیب ۲۰ و ۶ درصد افزایش نشان می‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که میزان بیشینه عمق آبشستگی برای شرایط مورد بررسی ۳۶ درصد در کناره‌ها و ۳۸ درصد در نزدیکی راس سرریز نسبت به رسوب A کاهش داشته است. بنابراین در این بخش نیز رسوب B عمق آبشستگی کمتری را نسبت به رسوب A ایجاد کرده است.



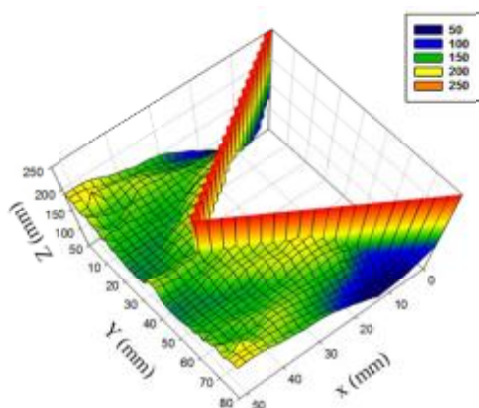
شکل ۱۱- پروفیل آبشستگی رسوب B، دبی ۵ لیتر بر ثانیه و تراکم ۸۰ درصد



شکل ۱۲- پروفیل آبشستگی رسوب B، دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و تراکم ۸۰ درصد

شکل ۱۳ پروفیل آبشستگی رسوب B را برای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و تراکم ۸۰ درصد نشان می‌دهد. بیشینه آبشستگی ۱۳۳ میلی‌متر در کناره‌ها و ۶۰ میلی‌متر در راس سرریز است. میزان آبشستگی بیشینه در کناره‌ها نسبت به دبی ۵ لیتر بر ثانیه ۴۰ درصد افزایش را نشان داده است؛ اما در نزدیکی راس سرریز میزان آبشستگی ۱۴ درصد کمتر از دبی ۵ لیتر بر ثانیه بوده است. به نظر می‌رسد که حرکت رسوبات از کناره‌ها به سمت پایین‌دست سبب ته‌نشینی در نزدیکی راس سرریز و کاهش میزان

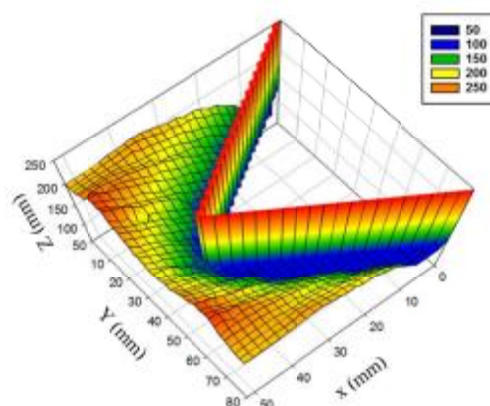
رسوب A داشته باشد. از طرفی افزایش تراکم نیز تا حدودی بر کاهش عمق آب‌شستگی اثرگذار بوده است، اما در اکثر موارد بررسی شده با افزایش دبی، میزان آب‌شستگی در تراکم ۸۰ درصد و ۹۰ درصد به هم نزدیک شده‌اند. همچنین بیشینه تراکم در کناره‌ها رخ داده است و البته در نزدیکی راس سرریز نیز بیشینه تراکم دیگری وجود دارد؛ اما بیشینه تراکم در نزدیکی راس سرریز دارای نوسان بوده است و روند یکنواختی را طی نمی‌کند. به نظر می‌رسد که حرکت رسوبات از کناره‌ها به سمت راس سرریز سبب شده است که در بعضی موارد رسوبات تا حدودی در مکان مورد بررسی ته‌نشین شوند و عمق آب‌شستگی را کاهش دهند.



شکل ۱۶- پروفیل آب‌شستگی رسوب B، دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و تراکم ۹۰ درصد

شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ به مقایسه آب‌شستگی در دبی‌های یکسان پرداخته است. در این شکل‌ها پروفیل خطی در طول کانال از سرریز به سمت پایین‌دست که بیشترین عمق آب‌شستگی را دارا بوده است ترسیم شده‌اند. براساس شکل‌های ۱۷ و ۱۸ بیشترین میزان آب‌شستگی در رسوب یکنواخت A و تراکم ۸۰ درصد و کمترین میزان آب‌شستگی برای رسوب غیریکنواخت B و تراکم ۹۰ درصد رخ داده است؛ بنابراین افزایش تراکم و همچنین غیریکنواختی رسوب هر دو در کاهش آب‌شستگی اثرگذار بوده‌اند. در شکل ۱۹ با افزایش دبی به ۱۵ لیتر بر ثانیه، تراکم اثر خود را از دست می‌دهد؛ به‌طوری‌که رسوب A با تغییر تراکم، هیچ تغییری در فرسایش نشان نمی‌دهد و رسوب B نیز با تغییر تراکم مانند رسوب A عمل می‌کند. همچنین براساس شکل ۱۹ تغییر رسوبات از نوع یکنواخت

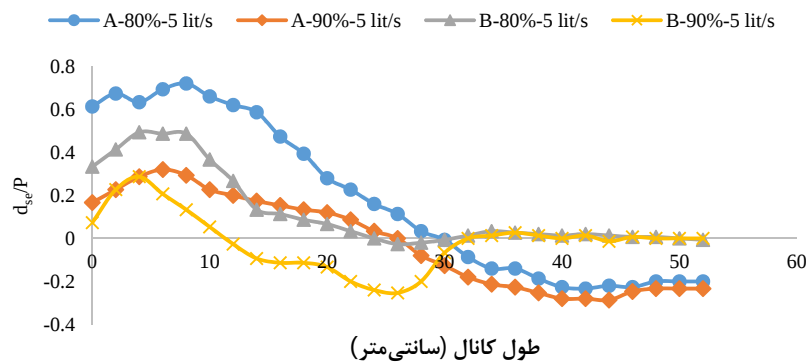
درصد در نزدیکی راس نسبت به دبی ۵ لیتر بر ثانیه در تراکم ۹۰ درصد را نشان می‌دهد، اما میزان آب‌شستگی در رسوب A و برای دبی ۵ لیتر بر ثانیه و تراکم ۹۰ درصد و به ترتیب در کناره‌ها و راس سرریز، برابر با ۱۱۹ و ۹۵ میلی‌متر است. بنابراین در کناره‌ها ۲۴ درصد و در راس ۸ درصد کاهش در بیشینه عمق آب‌شستگی به‌وجود آمده است. در این بخش نیز تراکم تا حدودی اثرگذار بوده است، اما همان‌طور که بیان شد، با افزایش دبی اثر تراکم در بیشتر موارد بر عمق آب‌شستگی کمتر شده است. همچنین بیشینه عمق، معیار اصلی بررسی عمق آب‌شستگی است که در کناره‌ها رخ داده است. مقدار بیشینه عمق در نزدیکی سرریز به میزان آب‌شستگی کناره‌ها نیز بستگی دارد و می‌تواند تا حدودی دارای نوسان باشد.



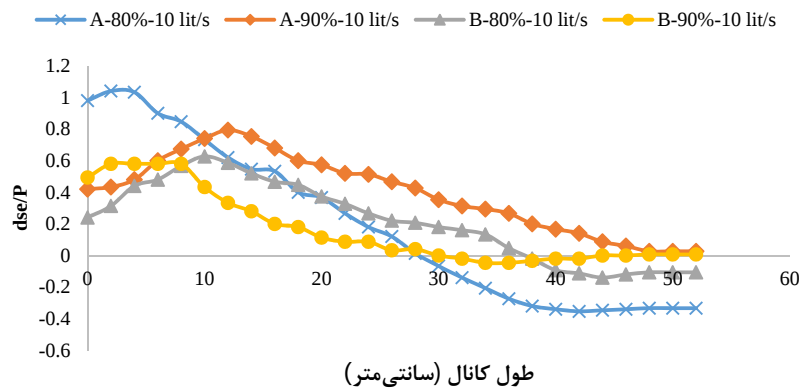
شکل ۱۵- پروفیل آب‌شستگی رسوب B، دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و تراکم ۹۰ درصد

در شکل ۱۶ اثر افزایش تراکم روی رسوب B و برای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است. بیشینه آب‌شستگی ۱۳۰ میلی‌متر در کناره‌ها و ۶۲ میلی‌متر در راس سرریز است. این میزان آب‌شستگی افزایش ۳۲ درصدی در کناره‌ها و کاهش ۲۸ درصدی در نزدیکی راس را نسبت به دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه و در تراکم ۹۰ درصد نشان می‌دهد. میزان آب‌شستگی بیشینه برای رسوب A در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و تراکم ۹۰ درصد برابر با ۱۶۲ میلی‌متر و ۱۰۵ میلی‌متر در کناره‌ها و راس سرریز بوده است؛ بنابراین رسوب B نسبت به رسوب A دارای کاهش ۲۰ درصدی آب‌شستگی در کناره‌ها و ۴۰ درصدی در نزدیکی راس سرریز است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که غیریکنواخت بودن رسوب B سبب شده است که فرسایش کمتری نسبت به

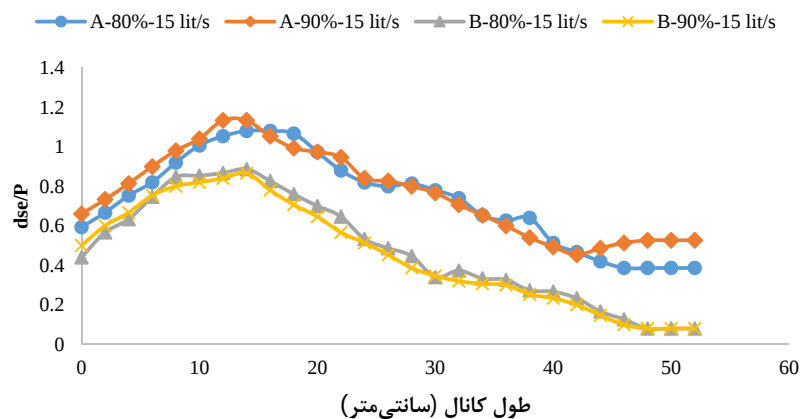
به غیریکنواخت سبب کاهش میزان آبشستگی شده است. خود را از دست می‌دهد اما یکنواختی و غیریکنواختی بنا براین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دبی، تراکم اثر رسوب همچنان بر آبشستگی اثرگذار می‌باشد.



شکل ۱۷- تغییرات عمق آبشستگی در دبی ۵ لیتر بر ثانیه



شکل ۱۸- تغییرات عمق آبشستگی در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه



شکل ۱۹- تغییرات عمق آبشستگی در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه

نتیجه‌گیری

می‌تواند سبب تخریب سازه گردد. در این پژوهش به بررسی اثر تراکم بستر رسوبی و غیریکنواختی دانه‌بندی بر آبشستگی پایین‌دست سرریزهای کنگره‌ای پرداخته شد.

آبشستگی پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی از مسائل مهمی است که باید در طراحی در نظر گرفته شود، زیرا

منابع

1. Abdi Chooplou, C., Ghodsian, M., Vaghefi, M. V., Kazerooni, S. and Bodaghi, E., 2022. Experimental Study of Effect of Flow Drop Height on Downstream Bed Topography of Type-A Trapezoidal Piano Key Weir. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 1(1), pp. 113-124 [In Persian].
2. Babakhani, A. and Morsali, M., 2023. Experimental investigation on the influence of flow pattern on scour at triangular labyrinth weir without the apron. *Irrigation and Water Engineering*, 15(4), pp. 35-44. doi: 10.22125/iwe.2022.254669.1433. [In Persian].
3. Babakhani, A. and Morsali, M., 2020. Investigation on the effect of different parameters on maximum scour depth at triangular labyrinth weir without apron. *MCEJ*, 20(1), pp. 25-34. doi: 10.1001.1.24766763.1399.20.1.14.0. [In Persian].
4. Bodaghi, E., Ghodsian, M. and abdi, C., 2023. The experimental study of downstream scouring of trapezoidal Piano key weir type A under free and submerged flow. *Journal of Hydraulics*, 18(1), pp. 18-31. doi: 10.30482/jhyd.2022.330389.15 90. [In Persian].
5. Emaeli Varaki, M., Rajayee, A. and Shafiei sabet, B., 2017. Laboratory Study on Local Scour at the Downstream of Grade Control Structures with Labyrinth Planform, *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 18(68), pp. 129-142. doi: <https://doi.org/10.22092/aridse.2017.106469.1091>. [In Persian].
6. Kazempour larsari, Z., Esmaeili Varaki, M. and Malekpour, A., 2019. Laboratory Study of Scour Downstream of Stepped-labyrinth Weirs, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(6), pp. 1227-1241. doi: 10.22059/ijswr.2018.246313. 667796. [In Persian].
7. Kumar, B., and Ahmad, Z., 2020. Experimental study on scour downstream of a piano key weir with nose. 8th IAHR ISHS, *Santiago, Chile*.
8. Nazari Sharifi, M., 2023. Simulation of Labyrinth Weir with FLOW 3D software, MSc thesis, Water Science and engineering Department, Arak University. 94 p. [In Persian].
9. Tuna, M. C. and Emiroglu, M. E., 2011. Scour profiles at downstream of cascades, *Scientia Iranica*, 18, pp. 338-347. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.05.04>.
10. Tuna, M. C. and Emiroglu, M. E., 2013. Effect of Step Geometry on Local Scour

بررسی‌ها نشان داد که بیشینه عمق آبشستگی در نزدیکی محل اتصال سرریز به دیواره کانال و بیشینه دوم نیز در دماغه رخ داده است. پروفیل آبشستگی رسوب A برای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و تراکم ۸۰ درصد، ۶۸ درصد نسبت به دبی ۵ لیتر بر ثانیه بیشتر بود. همچنین، پروفیل آبشستگی رسوب B برای دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و تراکم ۸۰ درصد، ۴۰ درصد افزایش نسبت به دبی ۵ لیتر بر ثانیه نشان داد. بنابراین با افزایش دبی، میزان آبشستگی افزایش چشمگیری داشت. افزایش تراکم از ۸۰ به ۹۰ درصد، تا حدودی عمق آبشستگی را کاهش داد. برای رسوب A، در دبی ۵ لیتر بر ثانیه بیش از ۵۰ درصد و در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه تنها ۵ درصد تغییر در آبشستگی با افزایش تراکم به دست آمد. برای رسوب B، در دبی ۵ لیتر بر ثانیه، ۳۵ درصد کاهش عمق آبشستگی و در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه، ۲ درصد تغییر در آبشستگی با افزایش تراکم به وجود آمد. این مساله نشان می‌دهد در دبی زیاد، تراکم اثرگذاری زیادی نخواهد داشت. همچنین رسوب B نسبت به رسوب A در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و تراکم ۹۰ درصد، دارای کاهش ۲۰ درصدی آبشستگی در کناره‌ها می‌باشد. بررسی‌ها نشان داد که غیریکنواخت بودن رسوب B سبب فرسایش کمتری شده است.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: انجام مراحل آزمایشگاهی
نویسنده دوم: تحلیل داده‌ها، نویسنده و بازبینی مقاله، کنترل نتایج

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها می‌باشد.

- Downstream of Stepped Chutes. *Arab J. Sci. Eng*, 38, pp. 579-588, doi: 10.1007/s13369-012-0335-x.
11. Yazdi, A. M., Hoseini, S. A., Nazari, S. and Amanian, N., 2021. Effects of weir geometry on scour development in the downstream of Piano Key Weirs. *Water Supply*, 21(1), pp 289-298. doi:10.2166/ws.2020.272.
12. Zomorodian, S., Arab, M. and Zolghadr, M., 2017. Effect of Clay Content Percentage and Compaction Energy on Pier Bridge Scour in Erosive Bed and in the vicinity of Abutment. *MCEJ*, 17(2), pp. 157-166.

