



An experimental reserach on the scouring depth downstream of river grade-control structures

Mohammad Bagherzadeh¹ | Mir Ali Mohammadi² | Amir Ghaderi³

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Iran. E-mail: m.bagherzadeh@urmia.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Iran. E-mail: m.mohammadi@urmia.ac.ir
3. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Iran. E-mail: a.ghaderi@urmia.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 7 September 2024

Received in revised form

3 October 2024

Accepted 8 November 2024

Published online 10 Gebruary 2025

Keywords:

Environmental sound

Scouring depth

Free jet

Tailwater

ABSTRACT

Predicting and controlling the scour depth downstream of grade-control structures is one of the crucial hydraulics points in preventing riverbed erosion. The present research examines the influence of tailwater depth and longitudinal bed slopes at the downstream scouring depth of those structures by means of experimental settings. The experiments were conducted under the various tailwater depth conditions, including free tailwater e.g. 1.5 and 2 times of a free tailwater epth. The conditions were tested on three distinct longitudinal bed slopes: 0.05%, 0.2%, and 0.4%. Various flow rates were then introduced, necessary data were taken, and the hydraulic phenomena were studied. The results indicates that as the tailwater depth increases while maintaining a constant slope of the riverbed, the dimensions of the scour hole decreases. Establishing conditions for the maximum tailwater depth across various flow discharges resulted, on average, by 25% reduction in scouring depth downstream end of the structure. Conversely, by increasing the longitudinal bed slopes at a constant discharge and a related tailwater depth led to an increase in the dimensions of the scour hole. Specifically, when the bed slope increases from 0.05% to 0.4% under free tailwater conditions, the scour depth increases by 10.4%. Herein, a new relationship was developed based on the effective parameters to estimate the maximum scour depth for a grade-control structure. The correlation results demonstrated that this relationship yields accurate predictions with a high degree of reliability.

Cite this article: Bagherzadeh, M., Mohammadi, M. A., & Ghaderi, A. (2025). An experimental research on the scouring depth downstream of river grade-control structures. *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (4), 1019-1036.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.382030.1177>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.382030.1177>

Publisher: University of Tehran Press.



پژوهش آزمایشگاهی عمق آبشستگی پایین دست سازه‌های کنترل تراز بستر رودخانه‌ها

محمد باقرزاده^۱ | میرعلی محمدی^۲ | امیر قادری^۳

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: m.bagherzadeh@urmia.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: m.mohammadi@urmia.ac.ir
۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: a.ghaderi@urmia.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۱/۲۲

کلیدواژه‌ها:

سازگار محیط زیست

عمق آبشستگی

جت آزاد

عمق پایاب

پیش‌بینی و کنترل عمق آبشستگی در پایین‌دست سازه‌های کنترل تراز بستر رودخانه‌ها، یکی از حیاتی‌ترین نکات هیدرولیکی برای جلوگیری از افت بستر می‌باشد. پژوهش حاضر، تأثیر عمق پایاب و شیب بستر رسوبی رودخانه بر روی آبشستگی پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر به صورت آزمایشگاهی بررسی می‌کند. آزمایش‌ها برای شرایط مختلف دبی و عمق پایاب یعنی، سه حالت پایاب‌های آزاد، ۱/۵ و ۲ برابر عمق اولیه حالت آزاد در سه شیب طولی بستر ۰/۰۵ درصد، ۰/۲ و ۰/۴ درصد انجام شد. نتایج حاصل از تغییر شرایط هیدرولیکی در پایین‌دست نشان داد با افزایش عمق پایاب جریان به‌ازای دبی و شیب ثابت بستر رودخانه، مقادیر ابعاد حفره آبشستگی کاهش می‌یابد. با ایجاد شرایط حداکثر عمق پایاب به‌ازای دبی‌های مختلف جریان، به‌طور متوسط سبب کاهش ۲۵ درصدی عمق آبشستگی در پایین‌دست سازه گردید. با افزایش شیب بستر رودخانه به‌ازای یک دبی جریان و عمق پایاب ثابت، ابعاد حفره آبشستگی افزایش یافت. به‌طوری‌که با افزایش شیب از ۰/۰۵ به ۰/۴ درصد برای حالت آزاد پایاب، عمق آبشستگی ۱۰/۴ درصد افزایش یافت. رابطه جدیدی براساس پارامترهای تأثیرگذار جهت تخمین حداکثر عمق آبشستگی برای سازه کنترل تراز بستر ارائه شد. نتایج بررسی هم‌بستگی داده‌ها نشان داد که رابطه جدید ارائه‌شده، نتایج مناسب و با دقت بالا به‌دست می‌دهد.

استناد: باقرزاده، محمد، محمدی، میرعلی و قادری، امیر (۱۴۰۳). پژوهش آزمایشگاهی عمق آبشستگی پایین‌دست سازه‌های کنترل تراز بستر رودخانه‌ها.

نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۴ (۴)، ۱۰۱۹-۱۰۳۶. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.382030.1177>



۱. مقدمه

همواره دخالت‌های مستقیم و غیرمستقیم انسانی در محیط رودخانه باعث تشدید پدیده فرسایش می‌گردد. در حوزه هیدرولیک و مهندسی رودخانه توجه اصلی به موارد کمی است همانند تغییر ویژگی‌های هندسی رودخانه، تغییر دانه‌بندی بستر، تعیین مقادیر گودافتادگی بستر و حجم و نوع رسوبات حمل شده است. از شیب‌شکن‌ها، آبشکن‌ها و کف‌بندها به‌عنوان روش‌های سازه‌ای در راستای ساماندهی رودخانه‌ها استفاده می‌شود. با توجه به کاربرد بیش‌تر روش‌های سازه‌ای برای ساماندهی رودخانه‌ها، این نوع سازه‌ها به‌عنوان سازه‌های تثبیت‌کننده بستر و کناره نیز شناخته می‌شوند (Brierley and Fryirs, 2013; Julien, 2018; Majedi-Asl et al., 2021). از متداول‌ترین و پرکاربردترین روش‌های ساماندهی تثبیت بستر رودخانه و جلوگیری از فرسایش آن، استفاده از سازه شیب‌شکن یا سازه کنترل تراز بستر است. این سازه به‌صورت قائم در برابر جریان قرار می‌گیرد و در ارتفاع کمی نسبت به کف بستر در عرض رودخانه احداث می‌شود (USBR, 1983; Daneshfaraz et al., 2021a). آبشستگی موضعی پدیده‌ای است که به‌دلیل ناکافی بودن استهلاک انرژی و تشکیل جریان‌های گردابی، در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی همانند شیب‌شکن به وجود می‌آید. در زمینه تخمین عمق آبشستگی در پایین دست یک شیب‌شکن قائم Schoklitsch (1932) اولین پژوهش‌گری بود که یک معادله تجربی پیشنهاد نمود. در همین راستا و برای تعیین عمق آبشستگی پژوهش‌گران دیگری نیز معادلات متفاوتی ارائه نمودند (Mason and Arumugam, 1985; Bormann and Julien, 1991). بررسی آزمایشگاهی پایین دست یک جت ریزی آزاد نشان داد که پارامترهای آبشستگی تابعی از عدد فرود پایین دست، نسبت کل هد آب به عمق پایاب آب و نسبت میانگین اندازه رسوب به عمق پایاب است (Ghodsian et al., 1999). نتایج بررسی که بر روی ۷۳ سازه کنترل شیب بستر احداث شده در شش رودخانه کوهستانی واقع در شرق آلپ ایتالیا نیز مشخص نمود که علاوه بر دبی جریان و ارتفاع شیب‌شکن، اندازه رسوبات نیز در تعیین ابعاد حفره آبشستگی نقش دارند (Lenzi et al., 2003). هندسه حفره آبشستگی ناشی از جت آزاد در یک شیب‌شکن را می‌توان تابعی از عدد فرود ذره و نسبت عمق پایاب به ارتفاع شیب‌شکن دانست (Ghodsian et al., 2006). با این حال، عدد فرود ذره مؤثرترین پارامتر در عمق حفره آبشستگی بوده و افزایش اندازه ذرات رسوبی بستر و عمق پایاب منجر به کاهش ابعاد حفره آبشستگی در پایین دست شیب‌شکن قائم می‌شود (Dey and Raikar, 2007). بررسی آبشستگی پایین دست شیب‌شکن قائم با رسوبات غیریکنواخت نیز نشان داد که افزایش پارامتر غیریکنواختی رسوبات، عمق آبشستگی را کاهش داد (Ghodsian et al., 2012). روشی برای طراحی بهینه و توزیع صفحات مستغرق در طول قوس کانال توسط Ouyang and Lu (2016) ابداع شد که موجب محافظت سواحل می‌شود. در مطالعه‌ای تجربی حفره آبشستگی موضعی ایجاد شده در پایین دست سازه شیب‌شکن V شکل تأیید شد که نتایج روابط پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی حاصل از این پژوهش به نتایج روابط پیشنهادی توسط پژوهش‌گران قبلی نزدیک می‌باشد (Eom et al., 2019). بررسی فرایند آبشستگی در پایین دست یک سازه کنترل تراز بستر شیب‌دار (Grade-Control Structure) در کانال‌های رسوبی نشان داد که فرایند آبشستگی در سه مرحله متمایز شامل فاز اولیه بسیار سریع، فاز تدریجی میانی و حالت تعادل نهایی تکامل می‌یابد (Ben Meftah and Mossa, 2020). بررسی آبشستگی موضعی در پایین دست کف‌بند ایستگاه برق آبی Dangka نیز نشان داد که شکل بیضی نامنظم یا نیمه‌بیضی برای حفره آبشستگی در طول فرایند آبشستگی یکسان است. همچنین عمق و اندازه حفره آبشستگی با افزایش دبی افزایش و با افزایش اندازه رسوب کاهش یافت (Hong et al., 2020). در موضوع بررسی آبشستگی موضعی در پایین دست سازه‌های کنترل تراز بستر با پلان کنگره‌ای نیز پژوهش‌گران دریافته‌اند که پلان کنگره‌ای تأثیر بالایی در کاهش عمق آبشستگی دارد (Rajaei et al., 2020). بررسی تأثیر افزایش عمق پایاب بر روی آبشستگی

پایین دست سرریزهای پلکانی نشان داد که که افزایش عمق پایاب از $۶/۳۱$ سانتی متر به $۸/۵۴$ و سپس به $۱۱/۸۲$ سانتی متر، عمق آبشستگی را به ترتیب $۱۸/۵۶$ و $۱۱/۴۲$ درصد کاهش می دهد (Ghaderi et al., 2020). شبیه سازی عددی و آزمایشگاهی آبشستگی موضعی در پایین دست سرریزهای لبه تیز در رودخانه های طبیعی نیز نشان داد که افزایش دبی ورودی باعث تسریع فرایند آبشستگی موضعی و افزایش سطح توسعه حفره آبشستگی می شود (Esmaeili Varaki et al., 2021). ایده اعمال زبری سطح پایه ها با استفاده از زبری شن با قطر متوسط ۱ سانتی متر جهت کاهش آبشستگی توسط (Daneshfaraz et al., 2022) مطرح شد. مقایسه نتایج عمق آبشستگی گروه پایه های مسلح با صاف نشان داد که اعمال زبری سبب کاهش ۱۰۰ درصدی عمق آبشستگی گردید. (Aamir et al., 2022) تأثیر کف بند بر روی آبشستگی پایین دست دریچه های کشویی را بررسی و دریافتند که حداکثر عمق آبشستگی با افزایش اندازه رسوب و طول کف بند کاهش می یابد. در سال های اخیر، علاقه فزاینده ای به درک دینامیک آبشستگی در سازه های هیدرولیکی مختلف برای افزایش عملکرد و طول عمر آنها وجود داشته است. (Kurdistani et al., 2022) اثر هندسه سازه، مواد بستر و شرایط هیدرولیکی رودخانه بر مورفولوژی آبشستگی پایین دست سرریزهای پلکانی بافل دار بررسی نموده و دریافتند که در حضور سرریزهای پلکانی بافل دار، حداکثر عمق آبشستگی نسبت به سرریزهای پلکانی ساده (بدون بافل) کاهش می یابد. (Esmaeili Varaki et al., 2022) اثرات طول کف بند در پایین دست سازه های کنترل تراز بستر با پلان های کنگره ای دوزنقه ای را به صورت تجربی بررسی نمودند. مشاهدات تجربی آنان نشان داد که عملکرد طول کف بند به طور میانگین ۳۴ درصد حداکثر عمق آبشستگی را کاهش داد. در مورد اثرات تأمین رسوب بر آبشستگی در سازه های کنترل تراز بستر مستغرق توسط (Wang et al., 2023) انجام شد که این پژوهش گران رابطه تجربی برای تخمین عمق آبشستگی ارائه نمودند. علاوه بر این، پژوهشی در زمینه تأثیر تغییرات رسوب و پارامترهای هیدرولیکی بر آبشستگی پایین دست سرریزهای پلکانی را (Dah-Mardeh et al., 2023) انجام دادند. این پژوهش گران متوجه شدند که با کاهش فرود Fr_d ، عمق نسبی آبشستگی، فاصله نسبی حداکثر عمق و طول آبشستگی به ترتیب $۶۸/۶$ ، $۷۵/۶$ و $۷۳/۴$ درصد کاهش یافت. تخمین عمق آبشستگی حوضچه استغراق جت های متقاطع متقارن به روش ماشین بردار پشتیبان نیز توسط (Bagherzadeh and Mohammadi, 2023) بررسی شد و نشان دادند که عمق نسبی پایاب اصلی ترین پارامتر در میزان پیش بینی عمق آبشستگی را دارد. میدان جریان و ویژگی های آبشستگی پایین دست سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی را (Abdi Chooplou et al., 2023) بررسی نمودند و دریافتند که مقادیر عمق آبشستگی سرریز کلید پیانویی دوزنقه ای، $۱۰/۷$ درصد نسبت به سرریز کلید پیانویی مستطیلی و $۲۰/۵$ درصد نسبت به سرریز کلید پیانویی مثلثی کاهش یافت. همچنین استفاده از عناصر ابتکاری برای کنترل آبشستگی پایین دست در سرریزهای پلکانی توسط (Dah-Mardeh et al., 2024) مطرح شد. استفاده از این المان ها سبب کاهش حداقل ۵۹ درصد عمق نسبی آبشستگی می شود.

مطالعه آبشستگی در رودخانه ها به دلیل ضرورت پیش بینی و کنترل آبشستگی در نزدیکی سازه های هیدرولیکی همانند سازه کنترل تراز بستر که پتانسیل به خطر افتادن ایمنی این سازه ها را دارد، از اهمیت بالایی برخوردار می باشد. با بررسی پژوهش های اخیر مشخص شد تاکنون پژوهش های محدودی در خصوص سازه های کنترل تراز بستر و عملکرد آنها در کنترل یا کاهش فرسایش بستر رودخانه انجام شده است. از طرفی بررسی تأثیرات عمق پایاب رودخانه و شیب طولی بستر رودخانه در تعیین ابعاد حفره آبشستگی پایین دست سازه کنترل تراز بستر کمتر مدنظر پژوهش گران قرار گرفته است. بنابراین، در پژوهش حاضر تأثیر عمق پایاب و شیب طولی بستر رودخانه بر روی حداکثر عمق آبشستگی پایین دست سازه کنترل تراز بستر بررسی می شود. همچنین سعی گردید یک رابطه تجربی جدیدی با دقت بالا و در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر حداکثر عمق آبشستگی ارائه شود.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. تجهیزات آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش‌های تعریف شده در این پژوهش، از فلوم آزمایشگاهی واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده فنی دانشگاه ارومیه به طول ۱۸ متر، ارتفاع ۰/۵ متر و عرض ۰/۳ متر استفاده شد. جداره‌های کانال برای مشاهده دقیق جریان و داشتن سطحی صاف با کم‌ترین زبری از جنس پلکسی گلس شفاف ساخته شد. این کانال دارای یک جک تنظیم شیب طولی می‌باشد که با استفاده از این امکان تغییر شیب طولی بین ۰/۵- تا ۲ درصد وجود دارد. جریان عبوری از کانال آزمایشگاهی با استفاده از دو پمپ با حداکثر ظرفیت ۲۴ لیتر بر ثانیه تأمین شد. برای اندازه‌گیری دبی عبوری هر یک از پمپ‌ها یک دبی‌سنج اولتراسونیک با دقت اندازه‌گیری ۰/۱ لیتر بر ثانیه بر روی لوله مکش این پمپ‌ها متصل شد. بر روی دریاچه ورودی به این کانال یک شبکه مشبک پلاستیکی و سپس یک رمپ تعبیه شده است که برای آرام‌سازی جریان به کار برده شد. در انتهای کانال نیز از یک دریاچه اهرمی برای تنظیم عمق پایاب جریان استفاده شد. در تحقیق حاضر مدل‌های فیزیکی سازه کنترل تراز بستر به ارتفاع ۰/۱۵ متر به صورت صلب از جنس شیشه ایجاد شد. همچنین از یک دریاچه قابل تنظیم براساس درجه در انتهای کانال برای تنظیم عمق پایاب در پایین دست نیز استفاده شد. بر روی کانال فلوم یک عمق‌سنج برای اندازه‌گیری ارتفاع آب در طول و عرض‌های دلخواه در بالادست و پایین دست سازه استفاده شد، دقت اندازه‌گیری آن ۱ میلی‌متر می‌باشد. همچنین از مترهای نواری نصب شده بر روی شیشه فلوم جهت برداشت عمق آب در طول فلوم استفاده شد.

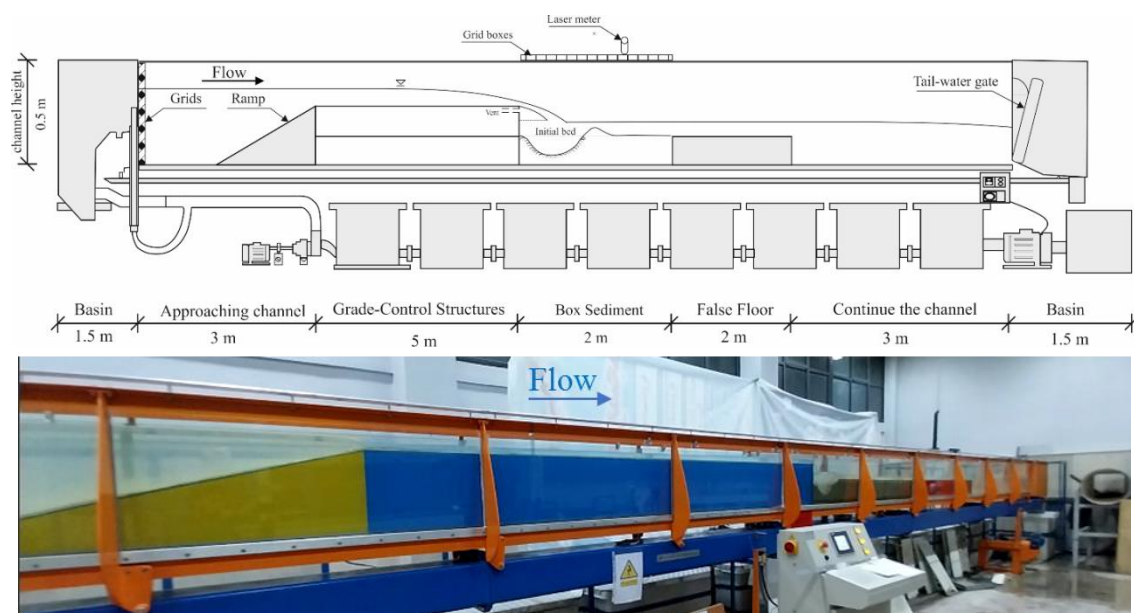


Figure 1. Schematic and real view of laboratory flume

۲.۲. مشخصات بستر رسوبی

برای تأمین ذرات رسوبی بستر، ماسه صنعتی فیروزکوه در دامنه قطره‌ای ۲-۳/۵ میلی‌متر تهیه شد و پس از الکنمودن براساس استاندارد ASTM D6913 در قطر یکنواخت ۲/۳۶ میلی‌متر به دست آمد (ASTM, 2010). در شکل (۲) منحنی دانه‌بندی پژوهش حاضر ارائه شده است. ذرات الک شده در بستر رسوبی به طول ۲ متر، هم‌عرض

فلوم و ارتفاع ۰/۲ متر در پایین دست سازه کنترل تراز بستر قرار داده شد. براساس پژوهش‌های پیشین، قطر دانه‌بندی بستر رسوبی رودخانه ۲ میلی‌متر لحاظ شد (Ben Meftah and Mossa, 2020; Rajaei *et al.*, 2020). به‌منظور جلوگیری از تشکیل ریپل و تأثیر چسبندگی ذرات رسوبی، قطر میانگین ذرات باید بزرگ‌تر از ۰/۷ میلی‌متر باشد (Raudkivi and Ettema, 1983). همچنین، انحراف معیار رسوبات نیز باید کم‌تر از ۱/۳ باشد تا مصالح یکنواخت تلقی شوند (Dey and Raikar, 2007). در این پژوهش، ذرات با قطر یکنواخت ۲/۳۶ میلی‌متر و انحراف معیار ۱/۲۵ انتخاب شده‌اند. این انتخاب هم حداکثر آب‌شستگی را فراهم می‌کند و هم از تشکیل ریپل جلوگیری می‌کند. همچنین ضریب یکنواختی ذرات به مقدار $(C_u=1/3)$ می‌باشد که کم‌تر از ۲ است و نشان‌دهنده یکنواخت بودن مصالح است (Lambe and Whitman, 2008). برای برداشت عمق جریان در نقاط مختلف کانال و شیب‌شکن قائم از یک عمق‌سنج با دقت اندازه‌گیری ۱ میلی‌متر استفاده شد. در جهت کاهش خطای اندازه‌گیری نیز برداشت عمق جریان در پنج نقطه از عرض کانال برداشت شد. برای اندازه‌گیری و برداشت عمق آب‌شستگی موضعی پایین دست علاوه بر مترهای نصب‌شده بر روی شیشه‌های فلوم، از یک متر لیزی که بر روی شیشه شبکه بندی شده به ابعاد ۲/۵×۲/۵ سانتی‌متر قرار گرفت، استفاده شد. همچنین برای ترسیم پروفیل آب‌شستگی و بررسی الگوی جریان در زمان‌های متفاوت، از یک دستگاه دوربین دیجیتال canon مدل G9 که روی یک سه پایه و عمود به میدان جریان بود برای ثبت مشاهدات در حین آزمایش‌ها استفاده شد. در ادامه با بهره‌گیری از نرم‌افزار گیت دیتا استخراج داده‌ها و ترسیم پروفیل آب‌شستگی انجام شد.

sieve analyse curve

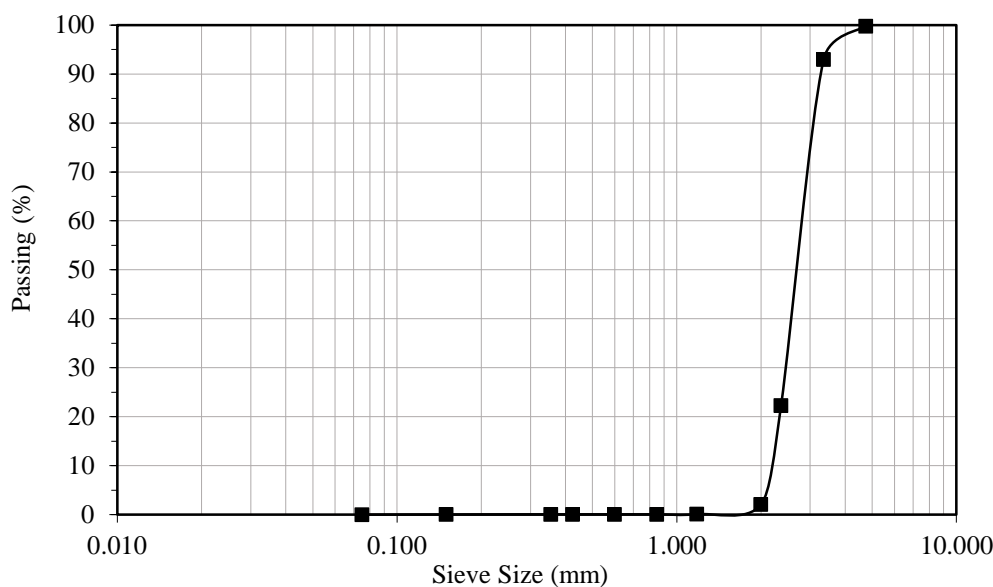


Figure 2. Granulation curve of the present study

۳.۲. آنالیز ابعادی

پارامترهای مؤثر بر حداکثر عمق آب‌شستگی پایین دست سازه کنترل تراز بستر رودخانه مطابق شکل (۳) می‌توان به صورت رابطه (۱) بیان نمود:

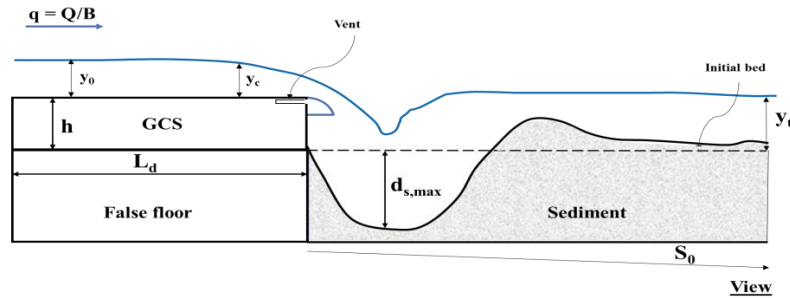


Figure 3. Hydraulic and geometric parameters affecting the scour of the downstream of grade-control structures

$$d_s = f_1(q, y_0, y_c, y_t, h, d_{50}, L_d, g, \rho, \rho_s, \nu) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در روابط بالا، d_s عمق آب‌شستگی، q دبی در واحد عرض، y_0 عمق اولیه جریان، y_c عمق بحرانی جریان، y_t عمق kinematic پایاب، h ارتفاع سازه، g شتاب گرانش، ρ_s چگالی ذرات رسوبی، ρ چگالی آب، ν ویسکوزیته جنبشی (kinematic viscosity of water = $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)، d_{50} اندازه متوسط ذرات بستر رسوبی، L_d طول سازه کنترل تراز بستر و S_0 شیب طولی رودخانه است. با توجه به در فعل و انفعالات رسوب-آب، مناسب است که پارامترهای مستقل g ، ρ_s و ρ ، به‌عنوان یک پارامتر ترکیبی Δg نشان داد که $\Delta = s - 1$ و $s = \rho_s / \rho$ می‌باشد که می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی نمود (Dey and Barbhuiya, 2004; Dey and Raikar, 2005; Mohammadnezhad et al., 2023).

$$d_s = f_2(q, y_0, y_c, y_t, h, \Delta g, \nu, d_{50}, L_d, S_0) \quad \text{رابطه (۲)}$$

با استفاده از روش پی-باکینگهام و انتخاب دو پارامتر تکراری h و q ، رابطه (۳) حاصل گردید:

$$\frac{d_s}{h} = f_3\left(\frac{q}{\nu}, \frac{y_c}{h}, \frac{y_t}{h}, Fr_u = \frac{q}{y_0 \sqrt{g y_0}}, Fr_s = \frac{q}{h \sqrt{\Delta g h}}, \frac{d_{50}}{h}, \frac{L_d}{h}, S_0\right) \quad \text{رابطه (۳)}$$

در آن، ds/h عمق نسبی آب‌شستگی، $Re = q/\nu$ عدد رینولدز جریان، y_c/h عمق بحرانی نسبی، y_t/h عمق پایاب نسبی، $Fr_u = q/y_0(gy_0)^{0.5}$ و $Fr_s = q/h(\Delta gh)^{0.5}$ معرف عدد فرود جریان، d_{50}/h قطر نسبی ذرات رسوبی یا زبری نسبی، L_d/h طول نسبی سازه کنترل تراز بستر است. پارامتر $(d_{50}/h, L_d/h)$ به جهت ثابت بودن مقادیرشان در حین آزمایشات قابل صرف‌نظر است. با توجه به این که عدد رینولدز جریان در تمامی مدل‌های پژوهش حاضر بیش‌تر از ۲۰۰۰ می‌باشد و جریان آشفته است. بنابراین، از تأثیر آن صرف‌نظر می‌شود (Bagherzadeh et al., 2022). جریان در بالادست شیب شکن زیربحرانی بوده و عدد فرود بالادست $Fr_u = q/y_0(gy_0)^{0.5}$ در محدوده 0.185 الی 0.16 می‌باشد لذا می‌توان از تأثیر این پارامتر نیز اغماض نمود (Daneshfaraz et al., 2021a). با تقسیم عدد فرود بر ریشه قطر نسبی ذرات رسوبی نیز می‌توان عدد فرود ذره رسوبی را به‌صورت $Fr_s = q/h(\Delta g d_{50})^{0.5}$ تعریف نمود (Dey and Raikar, 2005). همچنین، از آنجایی که عدد فرود ذره رسوبی (Fr_s) خود شامل قطر نسبی ذرات رسوبی است، لذا رابطه (۳) به‌صورت رابطه (۴) ساده می‌شود:

$$\frac{d_s}{h} = f_4\left(\frac{y_c}{h}, \frac{y_t}{h}, Fr_s, S_0\right) \quad \text{رابطه (۴)}$$

مطابق آنالیز ابعادی پارامترهایی همانند شیب بستر رودخانه و عمق پایاب می‌توانند بر روی ابعاد حفره آب‌شستگی تأثیر مستقیم بگذارند. در همین راستا، برای بررسی تأثیر این دو عامل مهم آزمایش‌هایی به‌ازای دبی‌های مختلف برای بستر رودخانه با دانه‌بندی $2/69$ میلی‌متر بر روی ابعاد حفره آب‌شستگی انجام شد. آزمایش‌ها برای سه حالت پایاب‌های آزاد، $1/5$ و 2 برابر عمق اولیه حالت آزاد در دو شیب 0.05 ، 0.2 و 0.4 درصد انجام شد. در جدول (۱) بازه تغییرات پارامترهای پژوهش حاضر ارائه شده است.

Table 1. Range of the parameters of the present study

Parameters	Min	Max
q(m ² /s)	0.023	0.040
y _c (m)	0.037	0.058
y _t (m)	0.03	0.104
Fr _s (-)	1.19	2.30
S ₀ (%)	0.05	0.4

۴.۲. معیارهای ارزیابی

در پژوهش حاضر برای مقایسه نتایج حداکثر عمق حفره آبشستگی به صورت آماری از رابطه زیر استفاده شد:

$$\beta = \frac{d_{s' \max} - d_{s \max}}{d_{s' \max}} \times 100 \quad \text{رابطه (۵)}$$

در رابطه بالا، β درصد تغییرات، $d_{s \max}$ حداکثر مقدار آبشستگی کل در بحرانی‌ترین شرایط و $d_{s \max}$ مقدار آبشستگی است. همچنین جهت تشریح بهتر همبستگی میان نتایج آزمایشگاهی و رابطه غیرخطی ارائه شده در برآورد عمق حداکثر آبشستگی در سازه کنترل تراز بستر پژوهش حاضر از آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE) و حداکثر درصد خطای نسبی (Max Relative Error) جهت ارزیابی روابط به کار گرفته شد. در روابط زیر N ، M_{cal} و M_{exp} به ترتیب تعداد داده‌های آزمایشگاهی، مقادیر داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر داده‌های محاسباتی است (Majedi-Asl *et al.*, 2020; Daneshfaraz *et al.*, 2021b).

$$R^2 = \left(\frac{(N \sum M_{\text{exp}} M_{\text{cal}}) - (\sum M_{\text{exp}})(\sum M_{\text{cal}})}{\sqrt{N(\sum M_{\text{exp}}^2) - (\sum M_{\text{exp}})^2} \sqrt{N(\sum M_{\text{cal}}^2) - (\sum M_{\text{cal}})^2}} \right)^2 \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_{\text{exp}} - M_{\text{cal}})^2} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$E_{\text{Relative error}} = \frac{|M_{\text{exp}} - M_{\text{cal}}|}{M_{\text{exp}}} \times 100 \quad \text{رابطه (۸)}$$

۳. نتایج و بحث

۳.۱. بررسی زمان تعادل آبشستگی

به طور کلی، فرایند آبشستگی زمان بر است و تعیین زمان تعادل در مطالعات مرتبط با آن بسیار اهمیت دارد. باید توجه داشت که به صورت مطلق نمی‌توان زمان تعادل را به دست آورد، زیرا هر چقدر زمان از شروع آبشستگی گذشته باشد، فرایند فرسایش در حفره، حتی اگر کم و نامحسوس باشد، ادامه دارد و در طولانی مدت به صورت مجانبی با خط افق ادامه پیدا می‌کند. در پژوهش حاضر، آزمایش‌های اولیه برای تعیین زمان تعادل به مدت زمان ۱۰ ساعت انجام شد و تغییرات عمق حداکثر لحظه‌ای آبشستگی مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج نشان داد که بعد از گذشت زمان شش ساعت از شروع آزمایش، تغییرات قابل توجهی در ابعاد چاله آبشستگی رخ نداد، بنابراین این بازه زمانی به عنوان زمان تعادل نهایی در تمام آزمایش‌ها انتخاب شد. در شکل (۴) نمونه‌ای از نیمرخ‌های برداشت شده در زمان‌های مختلف برای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه برای شیب بستر ۰/۰۵ درصد و حالت پایاب آزاد ارائه شده است. همچنین، در پژوهش حاضر برای سه دبی مورد بررسی آزمایش تعادل انجام شد که نسبت عمق نسبی آبشستگی به زمان تعادل نسبی در شکل (۵) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دبی زمان تعادل نیز افزایش پیدا می‌نماید، اما بررسی نتایج دبی حداکثر نشان داد که در زمان کم‌تر از شش ساعت حفره آبشستگی مورد بررسی به تعادل رسیده است.

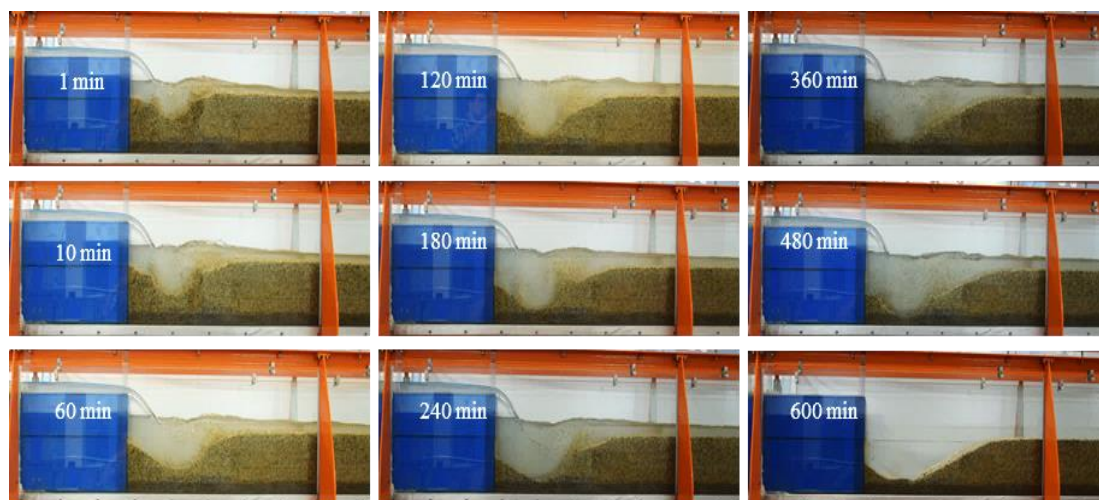


Figure 4. A view of the scour profiles for different times ($Q=10$ l/s, $S_0=0.05\%$, $y'_t=4.15$)

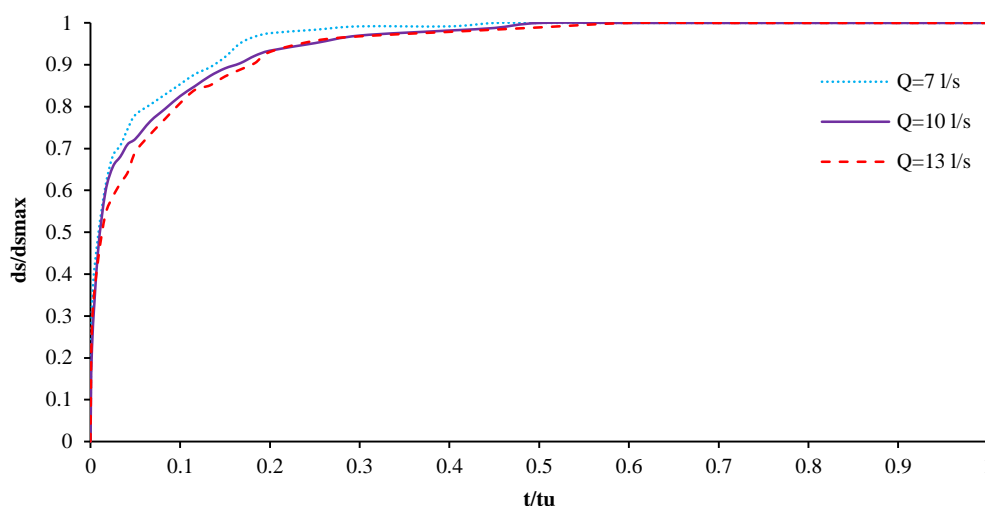


Figure 5. Time development of the relative momentary depth of scour versus the relative equilibrium time

۳.۲. بررسی تأثیر عمق پایاب و شیب طولی بستر رودخانه بر حداکثر عمق آبشستگی

۳.۲.۱. اثر عمق پایاب رودخانه

عمق پایاب یکی از عوامل مهم در طراحی و عملکرد سازه‌های هیدرولیکی است که تأثیر مستقیمی بر میزان آبشستگی دارد. عمق پایاب می‌تواند الگوهای جریان را تغییر دهد. در عمق‌های پایاب بالا، جریان ممکن است به صورت آرام و یکنواخت باشد، در حالی که در عمق‌های پایاب کم، جریان ممکن است به صورت متلاطم و پیچشی باشد که می‌تواند به فرسایش بیش‌تری منجر شود. عمق پایاب همچنین می‌تواند بر رفتار رسوبات تأثیر بگذارد. در عمق‌های پایاب کم‌تر، ذرات سنگین‌تر ممکن است به راحتی جابه‌جا شوند، در حالی که در عمق‌های پایاب بالا، ممکن است رسوبات بیش‌تری در محل باقی بمانند. پژوهش‌گران زیادی از جمله Abida and Townsend (1991) و Esmaeili Varaki *et al.* (2021) نشان دادند که عمق آبشستگی با افزایش عمق پایاب کاهش می‌یابد. در پژوهش حاضر، جهت بررسی اثر پارامتر عمق پایاب ابتدا آزمایش‌ها برای عمق پایاب حالت آزاد (y'_t) انجام شد، سپس مقدار اولیه عمق پایاب آزاد هر دبی در دو حالت

۱/۵ و ۲ برابری نیز بررسی شد. در شکل (۶) نتایج بررسی تأثیر عمق پایاب بر روی مقادیر ابعاد حفره آب‌شستگی در شیب‌های حداقلی و حداکثری ارائه شده است. براساس نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش عمق پایاب جریان به‌ازای دبی و شیب طولی ثابت بستر، مقادیر عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، هرچه عمق پایاب در پایین‌دست سازه بیشتر می‌شود، حداکثر عمق آب‌شستگی پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر کم‌تر خواهد بود و برعکس، هرچه عمق پایاب کوچک‌تر باشد، آب‌شستگی پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر بیشتر خواهد بود.

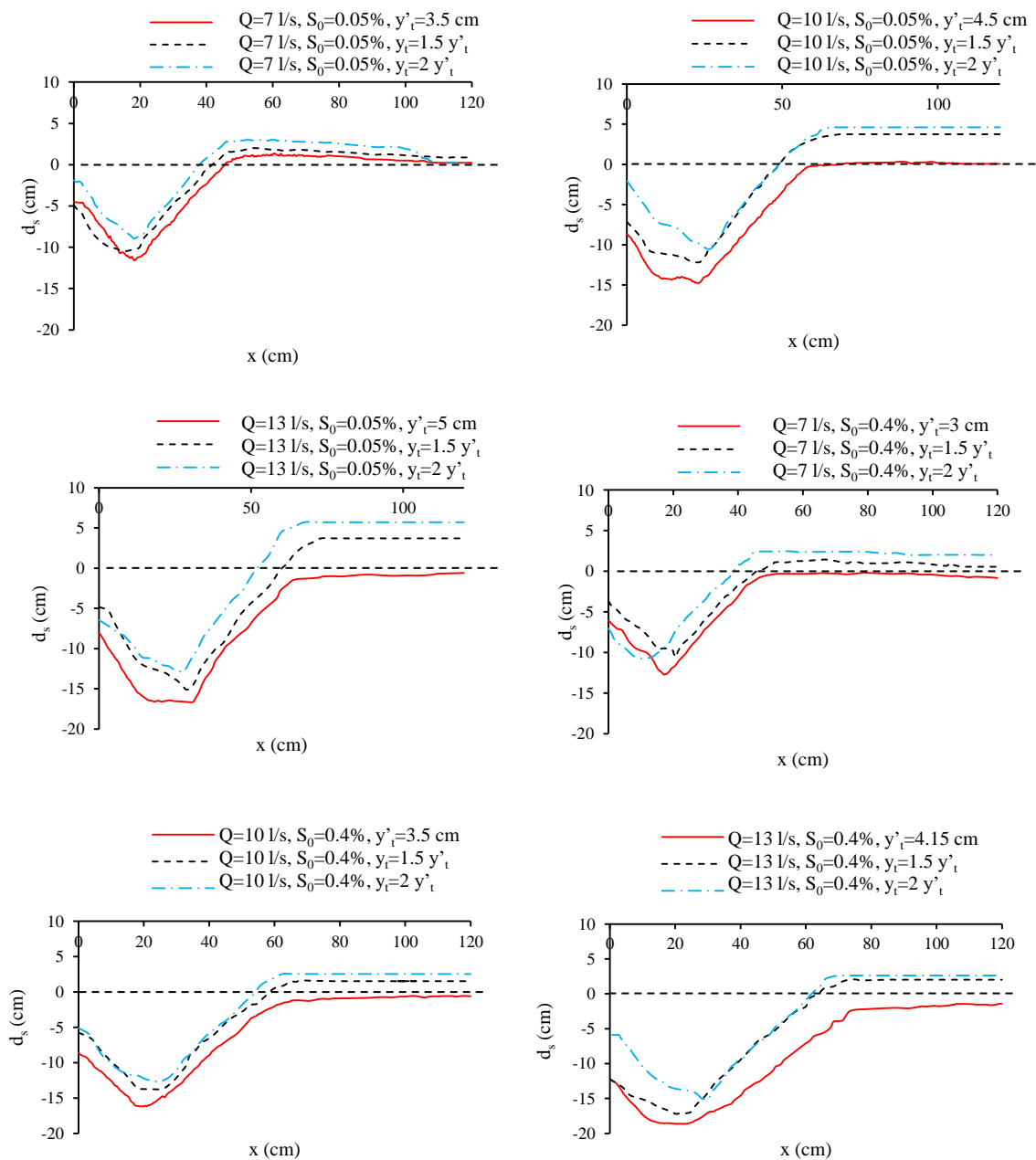


Figure 6. The influence of the tailwater depth the scour depth downstream of grade-control structures

در شکل (۷) نمایی از جریان بر حالت حداقلی و حداکثری عمق پایاب به‌ازای دبی، شیب طولی بستر ثابت ارائه شده است. مطابق مشاهدات عمق پایاب تأثیر مستقیمی بر سرعت جریان آب در اطراف سازه کنترل تراز بستر دارد. با افزایش عمق پایاب، سرعت جریان در ناحیه ریزش به داخل رودخانه کاهش می‌یابد و از این رو آبشستگی پایین دست سازه کنترل تراز بستر کم‌تر خواهد بود. در عمق پایاب کم‌تر، سرعت جریان در ناحیه ریزش جت بیش‌تر است و این موجب افزایش آبشستگی پایین دست سازه کنترل تراز بستر می‌شود. هم‌چنین مشاهده می‌شود که تغییرات حفره آبشستگی با دو برابر شدن عمق پایاب بیش‌تر مشهود است و کاهش چشم‌گیر میزان حجم آبشستگی اتفاق افتاد. مطابق مشاهدات آزمایشگاهی مشخص شد که شکل دیون‌ها (پشته رسوبی یا همان حجم انباشت) در عمق پایاب زیاد به حالت صاف بوده و انباشت رسوبات بر روی هم با شدت کم‌تری جابه‌جا می‌شد و انباشت در ناحیه نزدیک اتفاق می‌افتاد. با کاهش عمق پایاب شکل پشته رسوبی صاف نبود و سرعت جابه‌جایی رسوبات افزایش یافت. به‌عبارت دیگر، کاهش عمق پایاب سرعت جریان روی پشته رسوبی در پایین دست حفره آبشستگی افزایش یافت و جریان با توانایی بیش‌تری رسوبات را به پایین دست انتقال داد (شکل ۷).

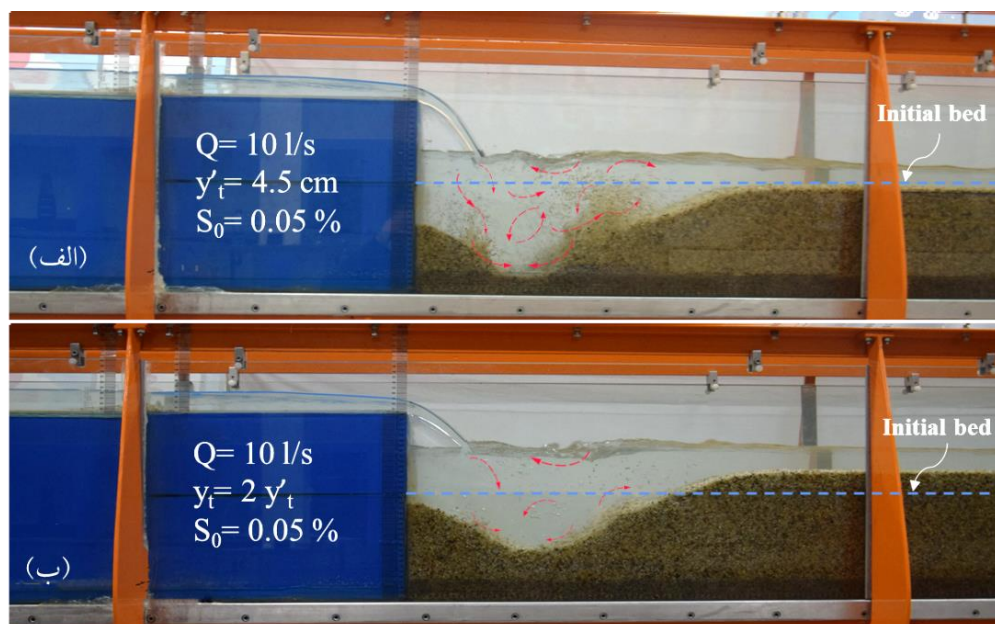


Figure 7. A view of the flow and erosion pattern downstream of the grade-control structure for a) minimum tailwater depth, and b) maximum tailwater depth

در شکل (۸) نتایج مقایسه حداکثر عمق آبشستگی و درصد تغییرات در برابر دبی جریان ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دبی برای هر سه حالت عمق پایاب، مقدار عمق آبشستگی کل افزایش می‌یابد. افزایش عمق پایاب عامل مهمی در کاهش عمق آبشستگی در پایین دست سازه است، به نحوی که برای دبی ۷ برای پایاب ۱/۵ و ۲ برابری به ترتیب ۱۱/۲ و ۲۳/۲ درصد کاهش داد. بیش‌ترین کاهش عمق آبشستگی برای دبی ۱۰ با پایاب دو برابر به مقدار ۲۸/۵ درصد اتفاق افتاد و این مقدار برای دبی ۱۳ به میزان ۲۲/۹ درصد بود. نتایج کلی نشان داد که سه دبی پژوهش حاضر، به‌طور متوسط برای پایاب دو برابر، ۲۴/۹ درصد و برای پایاب ۱/۵ برابر نیز ۱۳/۲ درصد عمق آبشستگی کاهش پیدا کرد.

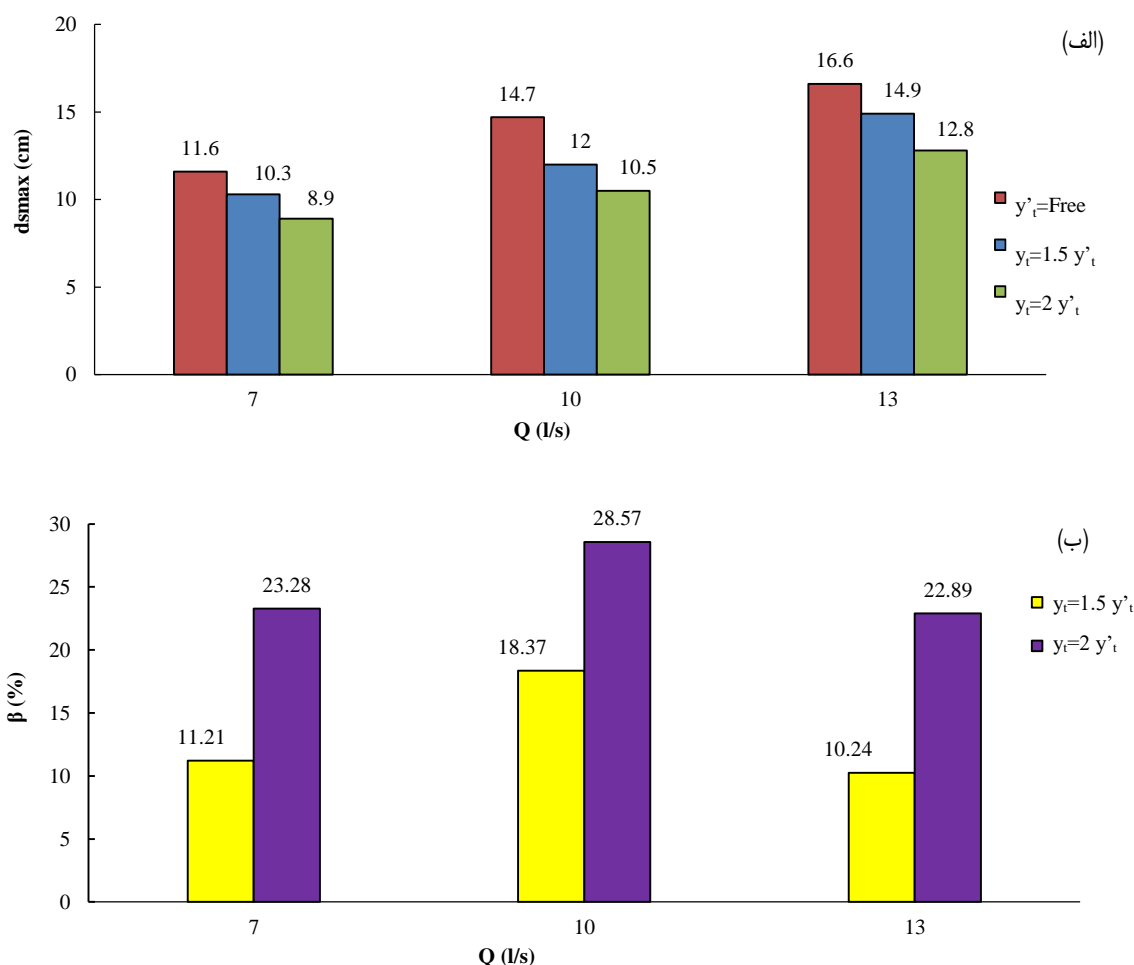


Figure 8. a) Comparison of the results of the maximum scour depth, b) The percentage of changes scour depth against different discharge and tailwater depth

۲.۲.۳. اثر شیب طولی بستر رودخانه

شکل (۹) نتایج بررسی اثر شیب طولی بستر رودخانه بر میزان حداکثر عمق آبشستگی در سه شیب ۰/۰۵، ۰/۲ و ۰/۴ درصد به‌ازای پایاب‌های حداقلی و حداکثری در شرایط مختلف دبی را نشان می‌دهد. مقایسه میان نتایج نشان داد که به‌ازای یک عمق پایاب ثابت، عمق آبشستگی با افزایش شیب بستر رودخانه افزایش یافت. میزان تأثیر شیب بستر برای حالت آزاد عمق پایاب بر نتایج طول پیشروی چاله آبشستگی نسبت به عمق آبشستگی بیش‌تر است. دلیل آن را می‌توان به زاویه ریزش جت و برخورد جت ریزشی از سازه به منطقه دورتر از پای سازه کنترل تراز بستر و همچنین عمق کم آب در پایین‌دست مرتبط دانست. همچنین برای پایاب دو برابر نیز نتایج نشان می‌دهد که عمق آبشستگی با افزایش شیب نسبت به طول پیشروی چاله به‌ازای هر سه دبی مقدار بیش‌تری افزایش پیدا کرده است. به‌دلیل وجود جریان آب با عمق بالا در ناحیه پایین‌دست و میل جریان با شیب زیاد جهت انتقال رسوب به پایین‌دست سبب شد که در ناحیه جلوی سازه کنترل تراز بستر موج‌های چرخشی ایجاد شود و جریان در این ناحیه در میان رسوبات چرخش نماید (شکل ۱۰). در نتیجه می‌توان بیان نمود که با افزایش شیب برای حالت آزاد عمق پایاب، طول چاله افزایش یافت و برای حالت پایاب دو برابر نیز عمق چاله آبشستگی افزایش یافت.

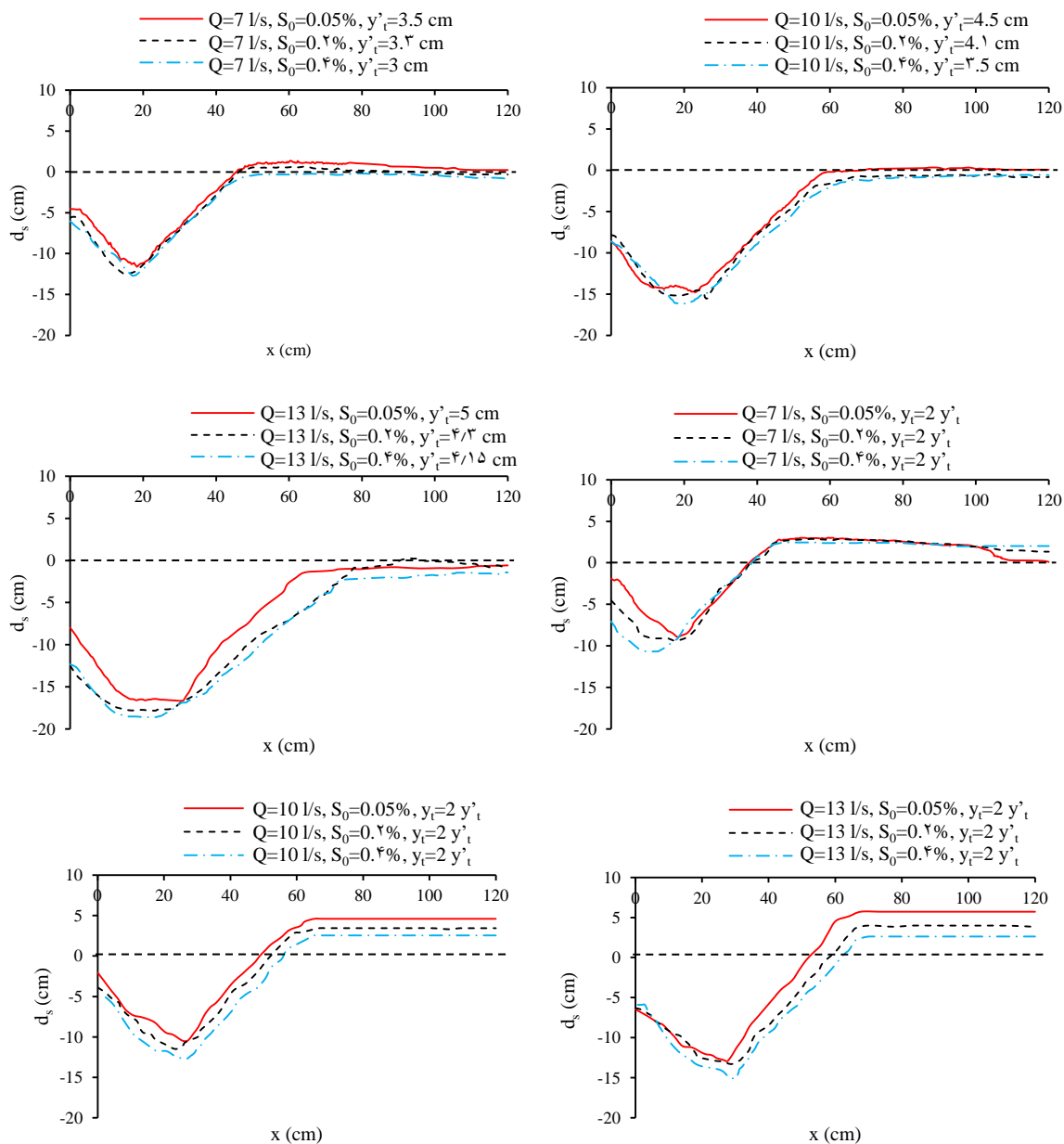


Figure 9. The influence of the longitudinal slope bed on the scour depth downstream of grade-control structures

هم‌چنین به‌ازای شرایط معین هیدرولیکی با افزایش شیب بستر رودخانه نیز نتیجه گرفته شد که شرایط پایین دست بحرانی‌تر شد و ابعاد آب‌شستگی افزایش یافت. افزایش شیب بستر هندسه حفره آب‌شستگی را تغییر داد و مقدار انرژی جریان آب در پایین دست را نیز افزایش داد. در شکل (۱۰) نمایی از جریان عبوری از سازه کنترل تراز بستر در شیب‌های مختلف برای حالت عمق پایاب آزاد ارائه شده است. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که افزایش شیب باعث می‌شود که جت ریزشی با زاویه عمودتری بر روی بستر رودخانه برخورد نموده و سبب افزایش آب‌شستگی شود. به‌عبارت دیگر، در حالت افزایش شیب بستر رودخانه، جریان آب با سرعت بیشتری در طول بستر حرکت نمود و منجر به افزایش عمق و

طول آب‌شستگی پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر شد. حجم انباشت و پشته رسوبی با افزایش شیب در حالت آزاد پایاب غالباً صاف نبود و با قدرت بیش‌تری به سمت پایین‌دست انتقال یافت. بررسی تأثیر عامل دبی نیز نشان داد که این پارامتر رابطه مستقیمی با ابعاد آب‌شستگی دارد و افزایش دبی سبب افزایش عمق آب‌شستگی شد. با توجه به سرعت کم جریان در دبی‌های پایین، جریان توانایی حمل ذرات بستر رودخانه را نداشت و پشته رسوبی با کندی به سمت پایین‌دست حرکت نمود. برای حالت دبی حداکثری و شیب $0/05$ درصد تشکیل پشته رسوبی به حالت غیرصاف بود، درحالی‌که برای دبی حداقلی شکل آن به حالت صاف بود. در حالت شیب حداکثری این شرایط تشدید یافت و حالت غیرصاف‌بودن پشته رسوبی برای دبی حداکثری بیش‌تر مشهود بود.

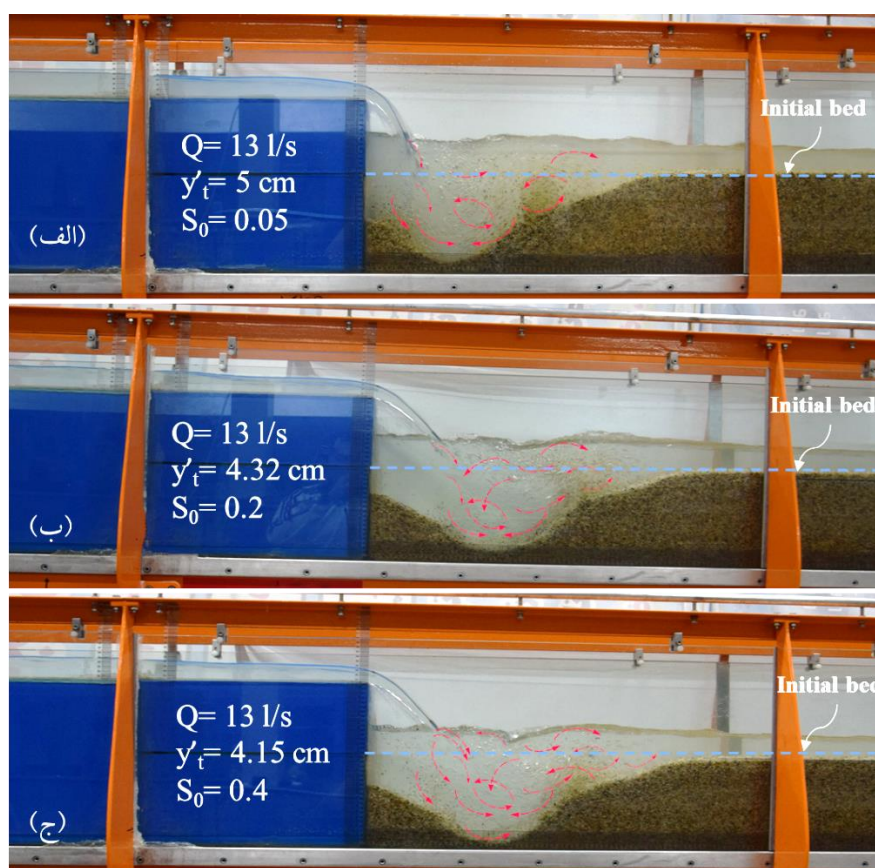


Figure 10. A view of the flow and erosion pattern downstream of the grade-control structure for different bed slopes a) 0.05, b) 0.2, and c) 0.4 (in percentage)

شکل (۱۱) مقایسه نتایج تأثیر شیب حداقل ($0/05$ درصد) و حداکثر ($0/4$ درصد) بر روی ابعاد حفره آب‌شستگی در برابر دبی جریان برای سه حالت مختلف عمق پایاب را نشان می‌دهد. مطابق نتایج، بیش‌ترین درصد افزایش عمق آب‌شستگی برای حالت پایاب دو برابر در دبی ۷ لیتر بر ثانیه به مقدار $20/22$ درصد اتفاق افتاد. برای دبی ۱۳ لیتر بر ثانیه نیز مشخص شد که با افزایش شیب از $0/05$ به $0/4$ درصد، حداکثر عمق آب‌شستگی برای حالت پایاب حداکثری $17/97$ درصد افزایش یافت. این مقادیر برای حالت پایاب‌های $1/5$ برابری و حالت آزاد به ترتیب $15/44$ و $12/05$ درصد بود. به‌طور کلی نتایج نشان داد که هر سه عامل دبی، عمق پایاب و شیب بستر رودخانه تأثیر مستقیم بر ابعاد حفره آب‌شستگی دارند.

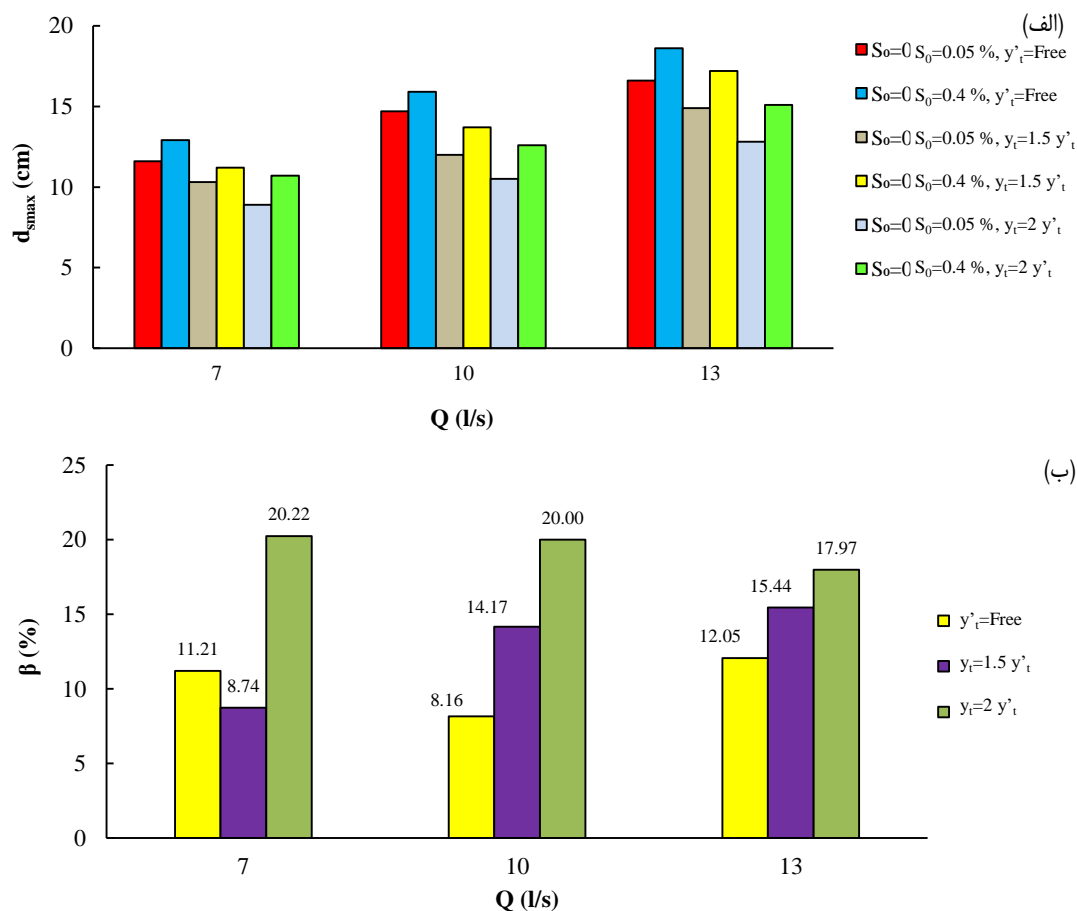


Figure 11. a) Comparison of the results of the maximum scour depth, and b) The percentage of changes scour depth against the different discharge and bed slopes

۳.۳. ارائه رابطه تجربی برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی

عملکرد سازه های کنترل تراز بستر تحت تأثیر پارامترهای هندسی مختلفی و همچنین شرایط هیدرولیکی قرار دارد. این پارامترها شامل عرض سازه، شیب آن، ارتفاع سازه، دبی جریان و عمق پایاب می باشند. به همین دلیل، ارائه رابطه ای که بتواند عمق حداکثر آبشستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر را پیش بینی کند، به ویژه در مراحل اولیه طراحی این نوع سازه ها، از اهمیت بالایی برخوردار است. برای دستیابی به این هدف، تحلیل ابعادی بر روی پارامترهای هندسی و هیدرولیکی کلیدی و مؤثر انجام شد تا به کمک آن یک رابطه تجربی استخراج شود. در این پژوهش، توجه ویژه ای به تأثیر هر یک از پارامترهای هندسی بر عمق آبشستگی صورت گرفت. براساس آنالیز ابعادی پژوهش حاضر مشخص شد که طول و عمق نسبی آبشستگی پایین دست سازه کنترل تراز بستر تابعی از پارامترهای شیب بستر رودخانه و عمق پایاب نسبی، عمق بحرانی نسبی و عدد فرود ذره می باشد. در همین راستا، با در نظر گرفتن داده های حاصل از کار آزمایشگاهی حاضر رابطه غیرخطی (۹) برای تعیین میزان عمق نسبی آبشستگی پایین دست سازه کنترل تراز بستر رودخانه ارائه شده است.

$$(d_s/h) = 0.474 - 0.054(y_c/h) - 0.851(y_t/h) + 0.427Fr_s + 0.16S_0 \quad \text{(رابطه ۹)}$$

مقایسه مقادیر عمق نسبی آبشستگی آزمایشگاهی با مقادیر محاسبه‌شده از رابطه (۹) در شکل (۱۲) ارائه شده است. مطابق شکل مشاهده می‌شود که نتایج پیش‌بینی توسط روابط تجربی همخوانی خوبی با مقادیر آزمایشگاهی دارند. مقدار ضریب تبیین R^2 ، خطای جذر میانگین مربعات RMSE و Max Relative Error به ترتیب برابر با ۰/۹۶۵، ۰/۰۳۶ و ۱۰/۶۵ درصد است. همچنین مشاهده می‌شود که با توجه به ضریب عمق پایاب نسبی (y_t/h) در رابطه (۹)، این رابطه بیش‌ترین تأثیر را بر روی عمق نسبی آبشستگی دارد.

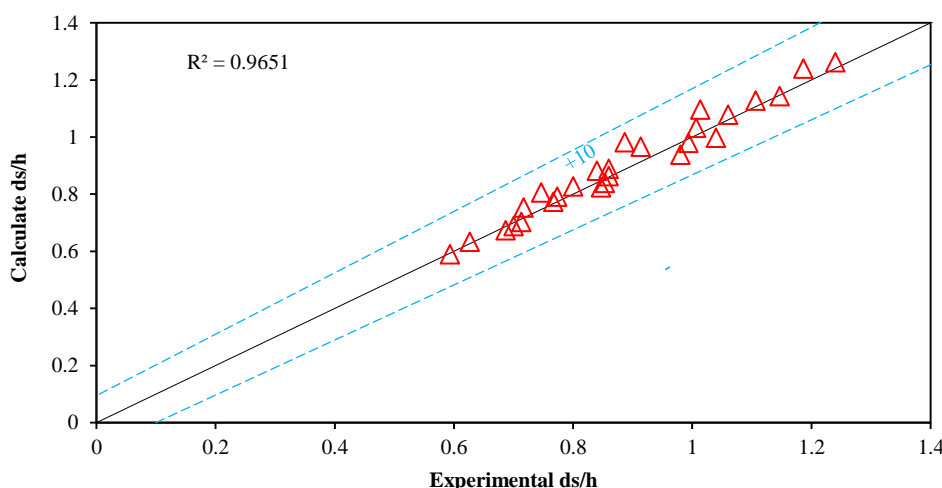


Figure 12. The correlation between experimental and calculated values of the relative scour depth

۴. نتیجه‌گیری کلی

طراحی سازه‌های کنترل تراز بستر برای کنترل آبشستگی در نواحی ساحلی یا رودخانه‌ای بسیار دارای اهمیت است. پژوهش حاضر می‌تواند در راستای افزایش دانش مهندسان طراح در زمینه طراحی سازه‌های کنترل تراز بستر و کنترل آبشستگی کمک کند و در نهایت منجر به ایجاد سازه‌هایی با کیفیت و پایدار گردد. در پژوهش حاضر ابعاد حفره آبشستگی پایین‌دست حاصل از احداث سازه کنترل تراز بستر در مسیر بستر رودخانه تحت شرایط هیدرولیکی متفاوت شامل سه دبی جریان به مقدار هفت، ۱۰ و ۱۳ لیتر بر ثانیه، با سه عمق پایاب یعنی عمق پایاب آزاد، ۱/۵ و ۲ برابر عمق پایاب در شیب‌های طولی بستر ۰/۰۵، ۰/۲ و ۰/۴ درصد به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تغییر شرایط هیدرولیکی در پایین‌دست نشان داد به ازای هر دبی و شیب ثابت بستر و با افزایش عمق پایاب جریان، مقادیر ابعاد حفره آبشستگی کاهش می‌یابد. ایجاد حداکثر عمق پایاب به ازای دبی‌های مختلف به طور متوسط سبب کاهش ۲۵ درصدی عمق حفره آبشستگی در پایین‌دست سازه می‌شود. مقایسه نتایج نشان داد که به ازای یک عمق پایاب ثابت، عمق آبشستگی با افزایش شیب بستر رودخانه افزایش پیدا می‌کند. با افزایش شیب برای حالت آزاد عمق پایاب، طول چاله افزایش یافت و برای حالت پایاب دو برابر نیز عمق چاله آبشستگی افزایش یافت. با افزایش شیب از ۰/۰۵ به ۰/۴ درصد به طور متوسط برای حالت پایاب حداکثری عمق آبشستگی ۱۹/۴ درصد افزایش پیدا کرد. برای حالت حداقلی عمق پایاب نیز افزایش شیب بستر رودخانه عمق آبشستگی ایجادشده در پایین‌دست را ۱۰/۴ درصد افزایش داد. همچنین با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی رابطه غیرخطی جهت تخمین عمق نسبی آبشستگی پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر با درصد خطای ۱۰/۶۵ درصد ارائه شد. تخمین مقدار آبشستگی در مرحله طراحی و قبل از اجرای هر سازه هیدرولیکی که در مجاورت جریان آب قرار دارد از این جهت اهمیت دارد که طراح با برآورد

مقدار تقریبی آن، پی سازه هیدرولیکی را به نحوی طراحی نماید تا آبشستگی ناشی از جریان‌های مختلف منجر به تخریب آن نشود. بنابراین پیشنهاد می‌شود در ادامه کار حاضر از سازه‌های الحاقی در منطقه ریزش جت به پایین دست سازه جهت کاهش ابعاد حفره آبشستگی استفاده شود.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Grade-Control Structures

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- ASTM. (2010). Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis. ASTM D6913-04e1. West Conshohocken, PA: ASTM.
- Abida, H., & Townsend, R. D. (1991). Local scour downstream of box-culvert outlets. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 117(3), 425-440.
- Aamir, M., Ahmad, Z., Pandey, M., Khan, M. A., Aldrees, A., & Mohamed, A. (2022). The effect of rough rigid apron on scour downstream of sluice gates. *Water*, 14(14), 2223.
- Abdi Chooplou, C., Ghodsian, M., Abediakbar, D., & Ghafouri, A. (2023). An experimental and numerical study on the flow field and scour downstream of rectangular piano key weirs with crest indentations. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(5), 140.
- Bormann, N. E., & Julien, P. Y. (1991). Scour downstream of grade-control structures. *Journal of hydraulic engineering*, 117(5), 579-594.
- Brierley, G. J., & Fryirs, K. A. (2013). *Geomorphology and river management: applications of the river styles framework*. John Wiley & Sons.
- Ben Meftah, M., & Mossa, M. (2020). New approach to predicting local scour downstream of grade-control structure. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(2), 04019058.
- Bagherzadeh, M., & Mohammadi, M. (2023). Estimation of the Scouring Depth of the Plunge Pool of the Symmetrical Crossing Jets by Support Vector Machine. *Journal of Water and Sustainable Development*, 9(4), 1-12. (In Persian)
- Bagherzadeh, M., Mousavi, F., Manafpour, M., Mirzaee, R., & Hoseini, K. (2022). Numerical simulation and application of soft computing in estimating vertical drop energy dissipation with horizontal serrated edge. *Water Supply*, 22(4), 4676-4689.
- Dey, S., & Barbhuiya, A. K. (2004). Clear water scour at abutments. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management (Vol. 157, No. 2, pp. 77-97)*. Thomas Telford Ltd.
- Dey, S., & Raikar, R. V. (2005). Scour in long contractions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(12), 1036-1049.
- Dey, S., & Raikar, R. V. (2007). Scour below a high vertical drop. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(5), 564-568.
- Daneshfaraz, R., Bagherzadeh, M., Ghaderi, A., Di Francesco, S., & Asl, M. M. (2021a). Experimental investigation of gabion inclined drops as a sustainable solution for hydraulic energy loss. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(4), 3451-3459.
- Daneshfaraz, R., Bagherzadeh, M., Esmaeeli, R., Norouzi, R., & Abraham, J. (2021b). Study of the performance of support vector machine for predicting vertical drop hydraulic parameters in the presence of dual horizontal screens. *Water supply*, 21(1), 217-231.
- Daneshfaraz, R., Sattariyan, M., Alinejad, B., & Majedi Asl, M. (2022). Investigation Experimentally the Effect of Roughness of Pile Group on Local Scouring at Presence of Harvesting of River Material Pit. *Water and Soil Science*, 32(4), 32-46. (In Persian)

- Dah-Mardeh, A., Azizyan, G., Bejestan, M. S., Parsaie, A., & Rajaei, S. H. (2023). Experimental study of variation sediments and effective hydraulic parameters on scour downstream of stepped spillway. *Water Resources Management*, 37(13), 4969-4984.
- Dah-Mardeh, A., Azizyan, G., Bejestan, M. S., Parsaie, A., & Rajaei, S. H. (2024). Laboratory investigation to control of downstream scour in a specific model of stepped spillway by six-legged concrete elements (A-Jack). *Ocean Engineering*, 304, 117815.
- Eom, J., Han, H., Park, S. W., & Ahn, J. (2019). Experimental Study on the Characteristics of Local Scour Hole Downstream of V-shaped Drop Structure Model. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 20(12), 8-14.
- Esmaeili Varaki, M., Mahmoudi Kurdistanani, S., & Noormohammadi, G. (2021). Scour morphology downstream of submerged block ramps. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 9(3), 241-250.
- Esmaeili Varaki, M., Sedaghati, M., & Sabet, B. S. (2022). Effect of apron length on local scour at the downstream of grade control structures with labyrinth planform. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(14), 1240.
- Ghodsian, M. A. S. O. U. D., Faradonbeh, A. A., & Abbasi, A. A. (1999, August). Scour downstream of free overfall spillway. In 28th IAHR World Congress (pp. 22-27).
- Ghodsian, M., Melville, B., & Tajkarimi, D. (2006, December). Local scour due to free overfall jet. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management (Vol. 159, No. 4, pp. 253-260). Thomas Telford Ltd.
- Ghodsian, M., Mehraein, M., & Ranjbar, H. R. (2012). Local scour due to free fall jets in non-uniform sediment. *Scientia Iranica*, 19(6), 1437-1444.
- Ghaderi, A., Daneshfaraz, R., Torabi, M., Abraham, J., & Azamathulla, H. M. (2020). Experimental investigation on effective scouring parameters downstream from stepped spillways. *Water supply*, 20(5), 1988-1998.
- Hong, V., Zhang, G., Wang, X., & Li, A. (2020). Experimental Investigation on the Shape and Depth of Local Scour Hole Downstream of the Release Structure. *World Journal of Engineering and Technology*, 8(01), 104.
- Julien, P. Y. (2018). River mechanics. Cambridge University Press.
- Kurdistanani, S. M., Varaki, M. E., & Larsari, Z. K. (2022). Scour downstream of stepped-baffle weirs in wide rivers. *Sādhanā*, 47(3), 178.
- Lambe, T.W., & Whitman, R.V. (2008). Soil mechanics SI version. John Wiley & Sons.
- Lenzi, M. A., Marion, A., & Comiti, F. (2003). Local scouring at grade-control structures in alluvial mountain rivers. *Water Resources Research*, 39(7).
- Mason, P. J., & Arumugam, K. (1985). Free jet scour below dams and flip buckets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(2), 220-235.
- Majedi-Asl, M., Daneshfaraz, R., Abraham, J., & Valizadeh, S. (2021). Effects of hydraulic characteristics, sedimentary parameters, and mining of bed material on scour depth of bridge pier groups. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 35(2), 04020148.
- Majedi-Asl, M., Daneshfaraz, R., Fuladipannah, M., Abraham, J., & Bagherzadeh, M. (2020). Simulation of bridge pier scour depth base on geometric characteristics and field data using support vector machine algorithm. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 7(2), 137-143.
- Mohammadnezhad, H., Mohammadi, M., & Bagherzadeh, M. (2023). Estimation of the downstream scour depth of vertical drop using the support vector machine (SVM) algorithm. *Civil Infrastructure Researches*, 9(1), 1-11. (In Persian).
- Ouyang, H., & Lu, C. (2016). Optimizing the spacing of submerged vanes across rivers for stream bank protection at channel bends. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(12), 04016062.
- Raudkivi, A.J., & Ettema, R. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3).
- Rajaei, A., Esmaeili Varaki, M., & Shafei Sabet, B. (2020). Experimental investigation on local scour at the downstream of grade control structures with labyrinth planform. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 26(4), 457-467.
- Wang, L., Zhao, L., Liu, C., & Nie, R. (2023). Effects of sediment supply on scour at submerged grade control structures. *Journal of Hydrology*, 622, 129729.