



## Experimental investigation of effect of the apron installation on local scour at the downstream of block ramp

Mohadese Moayedi moshkaposhti<sup>1</sup>, Mahdi Esmaili Varaki<sup>✉2</sup>, Behnam Shafiei Sabet<sup>3</sup>, Sahameddin Mahmoudi Kurdistani<sup>4</sup>

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture Science, University of Guilan, Rasht, Iran. Email: [m.moayedi73717@gmail.com](mailto:m.moayedi73717@gmail.com)

2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture Science, and Department of Water and Environmental Engineering, Caspian Sea Basin Research Center, University of Guilan, Rasht, Iran, Email: [esmaeili@guilan.ac.ir](mailto:esmaeili@guilan.ac.ir)

3. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture Science, University of Guilan, Rasht, Iran, Email: [behnamshafiei@yahoo.com](mailto:behnamshafiei@yahoo.com)

4. IA.ING, Lecce, Italy, Email: [kurdistani@iaing.it](mailto:kurdistani@iaing.it)

Article Info	ABSTRACT
<p><b>Article type:</b> Research Article</p> <p><b>Article history:</b></p> <p><b>Received:</b> May. 2, 2022</p> <p><b>Revised:</b> June. 13, 2022</p> <p><b>Accepted:</b> June. 18, 2022</p> <p><b>Published online:</b> Aug. 23, 2022</p> <p><b>Keywords:</b> Apron, Grade control structure, River rehabilitation, Roughness, Scour.</p>	<p>River bed control is a critical issue that river engineers facing with it today. Block ramps are grade control structures, implementing as a countermeasure to overcome successive erosion in rivers bed, having suitable environmental conditions in terms of aquatic migration to upstream reaches, and also increasing the dissolved oxygen in the water. One of the important issues in designing and safetying these structures is to predict and reduce the magnitude of scour depth in the downstream pools. In the present study, the effect of apron installation on the reduction of scour in the downstream of the block ramps under the smooth and rough surface of the structure was investigated, experimentally. The experiments were performed for slopes of 1:3 and 1:5, the ratio of the critical depth to the height of the structure 0.14-0.2, roughness elements height of 1.15-5.2 cm with different arrangements; as well as apron installation with a length of equal and half of the height of the structure at the hydraulic and physical hydraulic lab of University of Guilan in 2020 and 2021. The comparison of the results of all slopes of the structures showed that the apron installation is directly related to the reduction of the maximum scour depth, so that by installing an apron with length of equal to the structure height, the maximum scour depth for slopes 1:3 and 1:5 reduced by an average of 58 and 43%, respectively, compared to the smooth block ramp. By increasing the roughness height, the maximum scour depth over the range of minimum and maximum flow discharges and the structures slopes reduced by an average of 39 to 62 % compared to the corresponding smooth block ramp. A comparison of the results shows that for block ramp with the slope of 1:3, changing the roughness arrangement from staggered to compact in case of large roughness, had no effect on reduction of the maximum scour depth, but in the slope of 1:5, reduced the maximum scour depth in the range of 18 to 42 %.</p>

Cite this article: Rajaei; Moayedi Moshkaposhti, M., Esmaili Varaki, M., Shafiei Sabet, B., & Mahmoudi Kurdistani, S. (2022). Experimental investigation of effect of the apron installation on local scour at the downstream of block ramp. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (6), 1259-1279.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.341492.669243>



## مطالعه‌ی آزمایشگاهی اثر نصب کفبند بر کاهش آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار

محدثه مؤیدی مشکاپشتی<sup>۱</sup>، مهدی اسمعیلی ورکی<sup>۲</sup>، بهنام شفیعی ثابت<sup>۳</sup> و سهام‌الدین محمودی کردستانی<sup>۴</sup>

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. ایمیل: [m.moayed73717@gmail.com](mailto:m.moayed73717@gmail.com)

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی و وابسته پژوهشی پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر، دانشگاه گیلان، رشت،

ایران. ایمیل: [esmaeili@guilan.ac.ir](mailto:esmaeili@guilan.ac.ir)

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. ایمیل: [behnamshafiei@yahoo.com](mailto:behnamshafiei@yahoo.com)

۴. مؤسسه IA.ING، لچه، ایتالیا. ایمیل: [kurdistani@iaing.it](mailto:kurdistani@iaing.it)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۲/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۳/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۲۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۶/۱

### واژه‌های کلیدی:

آب‌شستگی،

احیاء رودخانه،

کفبند،

سازه کنترل تراز بستر سطح شیب

دار،

زبری.

کاهش تراز بستر رودخانه‌ها، یکی از مهمترین مسائلی می‌باشد که امروزه مهندسين رودخانه با آن مواجه هستند. سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار از جمله سازه‌هایی هستند که علاوه بر حفاظت رودخانه در مقابل فرسایش پیش‌رونده در بستر، دارای شرایط مناسب محیط‌زیستی از منظر سهولت در عبور آبزیان به بازه‌های بالادستی و نیز افزایش اکسیژن محلول در آب هستند. یکی از موضوعات مهم در طراحی و ایمن‌سازی این سازه‌ها، پیش‌بینی مقدار عمق آب‌شستگی در پایین‌دست آن‌ها و اتخاذ روش‌های کاهش آن است. در تحقیق حاضر تاثیر حضور کفبند بر تغییرات مشخصات آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با و بدون زبری سطح سازه به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها برای شیب‌های کارگذاری ۱:۳ و ۱:۵، نسبت عمق بحرانی به ارتفاع سازه ۰/۱۴-۰/۲، زبری سطح سازه با اندازه‌های ۵/۲-۱/۱۵ سانتی‌متر و چیدمان‌های مختلف و نیز کفبند با طول‌های برابر و نصف ارتفاع سازه در آزمایشگاه هیدرولیک و مدل‌های فیزیکی-هیدرولیکی دانشگاه گیلان طی سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰، اجرا گردید. تجزیه و تحلیل نتایج در شیب‌های مختلف سازه نشان داد که ایجاد کفبند رابطه مستقیم با کاهش عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی دارد به‌گونه‌ای که با نصب کفبند به طول برابر با ارتفاع سازه، عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در دامنه دبی‌ها و زبری‌های حداقل تا حداکثر، برای شیب‌های ۱:۳ و ۱:۵ بطور متوسط به ترتیب ۵۸ و ۴۳ درصد نسبت به حالت بدون کفبند و بدون زبری کاهش می‌یابد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش اندازه زبری در بهترین عملکرد آن، از عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر و شیب‌های مورد بررسی، بطور متوسط ۳۹ تا ۶۲ درصد نسبت به حالت بدون زبری کاسته می‌شود. مقایسه نتایج حاکی از آن است که در شیب ۱:۳ تغییر چیدمان زبری از وضعیت یک در میان به متراکم در محدوده زبری درشت‌دانه، تاثیری بر کاهش عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی نداشت اما در شیب ۱:۵ منجر به کاهش ۱۸ تا ۴۲ درصدی عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی شد.

استاد: مؤیدی مشکاپشتی، محدثه؛ اسمعیلی ورکی، مهدی؛ شفیعی ثابت، بهنام؛ محمودی کردستانی، سهام‌الدین (۱۴۰۱). مطالعه‌ی آزمایشگاهی اثر نصب کفبند بر کاهش آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۶)، ۱۲۷۹-۱۲۵۹.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.342451.669259>



© نویسنده‌گان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

## مقدمه

رودخانه‌ها در اثر پدیده فرسایش و رسوبگذاری دستخوش تغییرات مستمر می‌باشند. شناخت اینگونه تغییرات به منظور نیل به اهداف ساماندهی و ایمن‌سازی رودخانه از گذشته مورد توجه محققین بوده است. فرسایش یا آب‌شستگی به فرآیندی گفته می‌شود که طی آن ذرات از بستر اصلی خود جدا شده و به کمک یک عامل انتقال‌دهنده به مکانی دیگر حمل می‌شود. بطور کلی پدیده آب‌شستگی در هر کجا که افزایش سرعت جریان نسبت به آستانه حرکت ذرات رسوبی رخ دهد، به وقوع می‌پیوندد. این افزایش سرعت می‌تواند ناشی از کاهش سطح مقطع، افزایش دبی عبوری از مقطع و کاهش زبری بستر یا افزایش شیب بستر باشد.

پایین افتادگی تراز بستر رودخانه می‌تواند تغییرات نامطلوب در مؤلفه‌های هیدرولیکی و رسوبی در رودخانه داشته باشد. حفظ تراز بستر رودخانه به ویژه در بازه‌هایی که شیب بستر به دلایل مختلف از جمله برداشت شن و ماسه دچار افزایش ناگهانی شده است، از منظر حفاظت رودخانه اهمیت زیادی دارد (Kazempour et al., 2019).

روشهای متنوعی برای حفاظت از بستر و دیواره رودخانه‌ها و کنترل آب‌شستگی وجود دارد که از جمله می‌توان به اجرای پوشش سنگچین، پوشش گیاهی، احداث آبشکن‌ها، صفحات مستغرق، سازه‌های توری سنگی و سازه‌های کنترل تراز بستر اشاره نمود (Hoffmans and Verhij, 1997).

برای جلوگیری از توسعه آب‌شستگی و فرسایش بستر رودخانه به بازه‌های بالادستی، از سازه‌های کنترل تراز بستر استفاده می‌شود. سازه‌های کنترل تراز بستر، از کاهش تراز اضافی بستر در کانال‌های آبرفتی که شیب زیادی دارند، جلوگیری می‌کنند. هدف از ساخت این سازه‌ها، تثبیت جداره و بستر آبراهه با کاهش شیب رودخانه و سرعت جریان است که در نتیجه مانع از فرسایش آن می‌شود. سازه‌هایی نظیر شیب‌شکن‌های قائم و مایل، آستانه شیب‌دار، پره قلابی‌شکل، پره عرضی، سرریز W و U شکل، سرریزهای پلکانی و سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، از جمله سازه‌های هستند که تاکنون در رودخانه‌ها طراحی و اجرا شده‌اند (Dey and Raikar, 2007).

سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، سازه‌های سازگار با محیط زیست می‌باشند که به منظور حفاظت از بستر و دیواره‌های رودخانه مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سازه‌ها با استهلاک انرژی قابل توجه ناشی از ساختار سطح زبر روی آن و نیز پرش هیدرولیکی در پایین دست آن، توصیف می‌شوند (Pagliara and Chiavaccini, 2006b).

ویژگی‌های هیدرولیکی جریان و آب‌شستگی در پایین دست سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار تابع پارامترهای متعددی است که از جمله آن‌ها می‌توان به دانه‌بندی و تراکم پوشش سنگ‌چین روی آن، شیب کارگذاری، دبی جریان، عمق جریان عبوری و عمق پایاب اشاره نمود. ازین رو تاکنون تحقیقات زیادی در رابطه با تاثیر پارامترهای مختلف هیدرولیکی و هندسی بر مشخصات جریان عبوری از پایین دست سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار انجام شده است.

Pagliara and Chiavaccini (2006a) به بررسی استهلاک انرژی در سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار پوشیده شده با المان‌های زبری بزرگ مقیاس پرداختند. مقایسه نتایج در محدوده شیب‌های ۰/۰۸ تا ۰/۳۳، طول سازه ۰/۸ تا ۱/۲ متر، عرض سازه ۰/۲۵ متر با آرایش زبری‌های بزرگ مقیاس به صورت تصادفی و ردیفی نشان داد که حداکثر میزان افزایش استهلاک انرژی در محدوده زبری‌های بزرگ مقیاس با تراکم ۳۵-۳۰ درصد، به مقدار ۱۲-۱۰ درصد حاصل می‌گردد.

Pagliara and Chiavaccini (2006c) اثر حضور تخته‌سنگ‌های بزرگ مقیاس بر مقاومت جریان در تندآب‌های سنگی برای شیب‌های ۰/۰۸ و ۰/۴ را به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. مقایسه نتایج نشان داد که حضور تخته‌سنگ‌ها به صورت ردیفی، استهلاک انرژی بیش‌تری در مقایسه با آرایش تصادفی ایجاد می‌کند.

Pagliara et al. (2008) اثر زبری بزرگ مقیاس را بر روی مقاومت جریان در سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار مورد مطالعه قرار دادند. مقایسه نتایج نشان داد که ضریب اصطکاک با افزایش استغراق نسبی (نسبت عمق جریان به ابعاد مشخصه ذره که شامل قطر یا شعاع ذره است) در یک شیب ثابت حدود ۶۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین مقایسه نتایج حاکی از آن بود که ضریب اصطکاک با افزایش شیب (۰/۰۱ تا ۰/۰۹) برای استغراق نسبی و درصد پوشش تخته‌سنگ‌های یکسان، افزایش می‌یابد.

در کنار آگاهی از تاثیر پارامترهای مختلف هیدرولیکی و هندسی بر مشخصات جریان عبوری از پایین دست سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، مطالعه در زمینه شناسایی و بررسی عوامل مؤثر بر آب‌شستگی در پایین دست آن به منظور پیش‌بینی مقدار عمق آب‌شستگی و اتخاذ روش‌های کاهش آن از اهمیت زیادی برخوردار است.

Pagliara (2007) اثر دانه‌بندی رسوب بر آب‌شستگی پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار را در محدوده شیب‌های



مختلف (۱:۴ تا ۱:۱۲)، دبی های ۱۰ تا ۳۰ لیتر بر ثانیه، سه دانه بندی مصالح برای بستر رسوبی ( $D_{50} = 5-6$  mm و  $D_{90} = 7-16$  mm) و پارامتر غیریکنواختی ذرات رسوبی در محدوده ۲/۷۷-۱/۱۷ مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصل از آزمایش های انجام شده حاکی از آن بود که تاثیر پارامتر غیریکنواختی ذرات رسوبی برای برآورد عمق حداکثر آبشستگی، به قطر مورد استفاده برای محاسبه عدد فرود ذره  $F_d$  بستگی دارد. نتایج آزمایش های انجام شده نشان داد که عدد فرود ذره  $F_{d50}$  رابطه معکوس با پارامتر غیریکنواختی و عمق حداکثر آب شستگی دارد و با افزایش پارامتر غیریکنواختی، عمق حداکثر آبشستگی کاهش می یابد درحالی که با بهره گیری از عدد فرود ذره  $F_{d90}$ ، بین پارامتر غیریکنواختی و عمق حداکثر آبشستگی، رابطه مستقیم برقرار می شود. همچنین با افزایش پارامتر غیریکنواختی، عمق حداکثر آب شستگی افزایش می یابد.

Pagliara and palermo (2008) آبشستگی پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب دار را مورد مطالعه قرار دادند. تجزیه و تحلیل نتایج در دامنه شیب های مختلف (۱:۴ تا ۱:۱۲)، دبی های  $3/3-9/3$  لیتر بر ثانیه و استقرار سه نوع آستانه (متوالی، دنداندار و سنگی) که متوسط ضخامت سنگ های مورد استفاده برای آستانه ها  $4/6$  سانتی متر بود، حاکی از آن بود که موقعیت طولی و ارتفاع آستانه در حوضچه آرامش بطور قابل توجهی بر مکانیزم آبشستگی اثرگذار است. مقایسه نتایج نشان داد که آستانه سنگی عمق آبشستگی را بیش تر از سایر گزینه های مورد بررسی کاهش می دهد. در این شرایط نیم رخ آبشستگی کوتاه تر و عمق آن کم تر از سایر موارد بود.

Pagliara and palermo (2009) آبشستگی و پرش هیدرولیکی پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب دار را در شرایط واگرایی حوضچه آرامش مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش های انجام شده در محدوده شیب های مختلف (۱:۴ تا ۱:۱۲)، دو نسبت واگرایی (نسبت عرض حوضچه به عرض سطح شیب دار:  $1/8$  و  $2/8$ ) و مصالح بستر یکنواخت و غیریکنواخت تحت عمق های پایاب مختلف نشان داد که برای یک عمق پایاب و دبی معین، اگر نسبت واگرایی افزایش یابد، جریان نزدیک شونده در مرکز حوضچه متمرکز شده و منجر به گودال آبشستگی عمیق تر می گردد.

Pagliara and palermo (2010) تاثیر عمق پایاب و موقعیت شمع بر آبشستگی پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب دار را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش های انجام شده در محدوده شیب های مختلف (۱:۴ تا ۱:۱۲) با مصالح یکنواخت سطح شیب دار  $19/7-$   $14/8$  میلی متر و مصالح یکنواخت و غیریکنواخت مختلف بستر رسوبی پایین دست سازه ( $D_{50} = 5-7/47$  mm و  $D_{90} = 7/41-16/59$  mm) نشان داد که افزایش عمق پایاب باعث کاهش عمق آبشستگی می شود و به همان اندازه، طول پخشیدگی پرش هیدرولیکی روی سطح شیب دار افزایش می یابد. همچنین در این پژوهش سه ارتفاع شمع بلند، کوتاه و متوسط مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج حاکی از آن بود که با افزایش تراز شمع، پرش هیدرولیکی به صورت نوسانی در طول بیش تری از حوضچه آرامش اتفاق افتاده و به دلیل عدم تمرکز استهلاک انرژی در پای شمع و شکل گیری گردابه های قوی، عمق آبشستگی کاهش می یابد.

Pagliara and palermo (2011) اثر هندسه حوضچه آرامش بر شکل آبشستگی پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب دار در شرایط آب زلال را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش های انجام شده در محدوده شیب های مختلف (۱:۴ تا ۱:۸)، سه نوع مصالح یکنواخت حوضچه آرامش، دو نسبت واگرایی عرضی (نسبت عرض حوضچه به عرض سطح شیب دار بین  $1/8$  و  $2/8$ ) و دو نسبت واگرایی طولی (نسبت طول حوضچه به عرض حوضچه بین  $1$  و  $2$ ) نشان داد که در حوضچه آرامش دو ناحیه چرخش جانبی جریان به صورت متقارن (زمانی که تلماسه پایین دست گودال آبشستگی نزدیک به پایین دست کانال همگرا واقع شده است) و موضعی (مربوط به دیواره های عرضی پایین دست، در محل همگرایی حوضچه آرامش و کانال پایین دست) اتفاق می افتد. بررسی عوامل موثر بر هندسه آبشستگی که شامل ویژگی های هندسی سازه و شرایط هیدرولیکی جریان بود، ۷ نوع آبشستگی با ویژگی های مختلف را معرفی نمود.

Pagliara et al. (2015) استهلاک انرژی و الگوی آبشستگی پایین دست سرریزهای پلکانی-گابیونی، پره های عرضی و سازه کنترل تراز بستر سطح شیب دار را تحلیل کردند. نتایج حاصل از آزمایش های انجام شده حاکی از آن بود که به دلیل استهلاک انرژی بالا، عمق بی بعد آبشستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب دار به میزان قابل توجهی کاهش می یابد.

Pagliara et al. (2017) تاثیر انحنا کانال بر ریخت شناسی آبشستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب دار را با ترکیب مجموعه ای از اندازه گیری های میدانی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج حاکی از آن بود که قوس رودخانه تاثیر زیادی بر ریخت شناسی و فرآیند آبشستگی دارد.

Pagliara et al. (2020) آبشستگی پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب دار را در کانال های انحنادار با شیب ملایم مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش های انجام شده نشان داد که بین عمق حداکثر آبشستگی و انحنا کانال رابطه مستقیم برقرار است و با

افزایش انحنای کانال، عمق حداکثر آبشستگی افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج حاکی از آن بود که با کاهش عمق پایاب، عمق حداکثر آبشستگی افزایش می‌یابد.

Esmaeili Varaki et al. (2021) آبشستگی موضعی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های انجام شده در محدوده شیب‌های مختلف (۰/۱۴ تا ۰/۳۳)، نشان داد که در شیب ۰/۳۳، عمق پایاب رابطه مستقیم با عمق حداکثر آبشستگی دارد درحالی که با کاهش شیب به ۰/۱۴ و ۰/۲۰، افزایش عمق پایاب رابطه معکوس با عمق حداکثر آبشستگی ایجاد می‌کند. مقایسه نتایج حاکی از آن بود که افزایش زبری در دامنه دبی‌ها و عمق‌های پایاب مختلف، منجر به کاهش عمق حداکثر آبشستگی به میزان متوسط ۲۱-۵ درصد در دامنه زبری‌های حداقل و حداکثر می‌شود.

با وجود آن که سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار از کاهش تراز اضافی بستر در کانال‌های آبرفتی جلوگیری می‌کنند، اما تشکیل جریانی با توان فرساینده بالا در پایین‌دست آن، باعث آبشستگی موضعی قابل توجهی در پایین‌دست این سازه‌ها می‌شود. استفاده از کفبندها یکی از متداول‌ترین روش‌های حفاظت بستر در پایین‌دست سازه‌های آبی که جریان خروجی از آن دارای سرعت بالایی است، می‌باشد. کفبندها سازه‌هایی هستند که در عرض و بستر رودخانه به‌گونه‌ای ساخته می‌شوند که تراز بالای آن‌ها هم‌تراز کف طبیعی رودخانه بوده و مانند یک بند انحرافی با ارتفاع صفر از کف بستر احداث می‌شوند (Petersen, 1986). در صورت اجرای صحیح کفبندها، تاثیر قابل توجهی بر کاهش آبشستگی و دور شدن محل وقوع آن از پی سازه اصلی و در نتیجه حفاظت از آن خواهند داشت. (Mehboudi, 2009). تاکنون تحقیقات مختلفی در رابطه با اثر کفبند بر کاهش آبشستگی انجام شده است که عمدتاً مربوط به جت‌های افقی آزاد و مستغرق شامل بررسی آبشستگی ناشی از جت افقی مستغرق در رسوبات یکنواخت و غیریکنواخت در پایین‌دست کفبند (Sarkar and Dey, 2005)، بررسی آزمایشگاهی آبشستگی رسوبات غیرچسبیده در پایین‌دست کفبند (Hamidifar and Omid, 2010)، بررسی روابط بین پارامترهای گودال آبشستگی ناشی از پرش هیدرولیکی در پایین‌دست کفبند موج‌دار (Ali et al., 2014)، پیش‌بینی عمق آبشستگی موضعی ناشی از جت دیواره‌ای در پایین‌دست کفبند (Aamir et al., 2017)، برآورد عمق حداکثر آبشستگی ناشی از جت افقی مستغرق در پایین‌دست کفبند (Aamir and Ahmad, 2019)، بررسی آبشستگی ناشی از جت افقی در پایین‌دست کفبند موج‌دار (Chaudhary et al., 2021) و بررسی تاثیر زبری کفبند روی مشخصات جریان و عمق آبشستگی ناشی از جت افقی مستغرق (Aamir and Ahmad, 2022) می‌باشد.

طول کفبند یکی از نکات مهم در طراحی آن است. در نشریه (CBIP., 1989) طول حداقل کفبند ۱/۵ برابر عمق حداکثر تعادل گودال آبشستگی توصیه شده است. افزایش طول کفبند با تاثیر بر موقعیت گردابه‌های اصلی ایجاد کننده گودال آبشستگی می‌تواند ابزار مناسبی برای کاهش و دور شدن گودال آبشستگی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی مورد استفاده قرار گیرد. همانطور که اشاره شد بررسی مقدار آبشستگی در پایین‌دست سازه‌های کنترل تراز بستر به عنوان یک سازه حفاظتی در پروژه‌های احیاء و مهندسی رودخانه از نظر اطمینان از پایداری سازه از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از راه‌کارهای کاهش آبشستگی در پایین‌دست سازه‌های مذکور استفاده از کفبند به عنوان یک عامل حفاظتی می‌باشد. از این‌رو، هدف اصلی در تحقیق حاضر بررسی تاثیر حضور کفبند با طول‌های مختلف بر آبشستگی موضعی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار تحت شرایط مختلف هیدرولیکی و اعمال المان‌های زبری با اندازه و چیدمان‌های مختلف می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

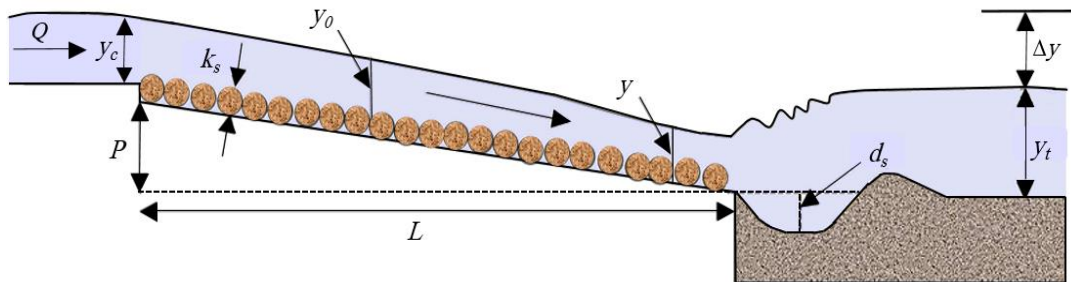
### الف) تحلیل ابعادی

پارامترهای متعددی بر مقدار عمق آبشستگی پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار موثر می‌باشند. از طرفی بیان کمی برخی از آن‌ها مانند شکل ذرات، چسبندگی مواد، تغییرات در رژیم جریان یا رسوب و غیره بسیار دشوار می‌باشد. از این رو با توجه به محدودیت‌های موجود، پارامترهای مهم و مؤثر بر روی میزان عمق آبشستگی پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار را می‌توان به صورت رابطه تابعی (۱) بیان نمود:

$$d_{se}, d_{st} = f_1(y_t, \Delta y, Q, B, P, L_A, D_{50}, \rho_s, \rho, g, S_0, R) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه،  $d_{se}$  و  $d_{st}$ : عمق حداکثر لحظه‌ای و نهایی آبشستگی،  $y_t$ : عمق پایاب،  $\Delta y$ : اختلاف ارتفاع تراز سطح آب در بالادست و پایین‌دست سازه،  $Q$ : دبی جریان،  $B$ : عرض سازه،  $P$ : ارتفاع سازه،  $L_A$ : طول کفبند،  $D_{50}$ : قطری که ۵۰ درصد ذرات از آن کوچک‌تر است،

$\rho_s$ : جرم مخصوص رسوبات بستر،  $\rho$ : جرم مخصوص آب،  $g$ : شتاب ثقل،  $S_0$ : شیب سازه و  $R$ : مشخصات هندسی زبری سطح سازه می‌باشد. در شکل (۱) برخی از پارامترهای هندسی مورد بررسی نشان داده شده است.



شکل ۱- نمایی از پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مؤثر بر آب‌شستگی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار

با بکارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی، پارامترهای معرفی شده را می‌توان به صورت کمیت‌های بی‌بعد (۲) در آورد:

$$\frac{d_{se}}{P}, \frac{d_{st}}{P} = f_2\left(\frac{y_t}{P}, \frac{\Delta y}{P}, \frac{Q^2}{P^5 g}, \frac{B}{P}, \frac{L_A}{P}, \frac{D_{S0}}{P}, \frac{\rho_s}{\rho}, S_0, R'\right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در مبحث آب‌شستگی به کارگیری پارامترهای  $\rho$  و  $\rho_s$  به صورت ترکیبی به شکل  $\Delta = G_s - 1$  که در آن  $G_s = \rho_s / \rho$  است، مناسب‌تر می‌باشد. Scurlock et al. (2012) عدد فرود بی‌بعد ذره را برای سازه کنترل تراز بستر که متأثر از هندسه سازه است به صورت  $Fr_d = Q/BP(g(G_s - 1)D_{50})^{0.5}$  ارائه نمودند. بنابراین رابطه (۲) بعد از ساده‌سازی به صورت رابطه (۳) خلاصه گردید:

$$\frac{d_{se}}{P}, \frac{d_{st}}{P} = f_3\left(\eta, \frac{y_t}{P}, \frac{L_A}{P}, S_0, R'\right) \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه (۳)،  $\eta = Fr_d^2 (\Delta y / P)$  می‌باشد که (Pagliara and Kurdistani 2013) آن را به عنوان پارامتر خود مشابه آب‌شستگی پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر پیشنهاد کردند. در تحقیق حاضر رابطه (۳) به عنوان یک رابطه پایه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است.

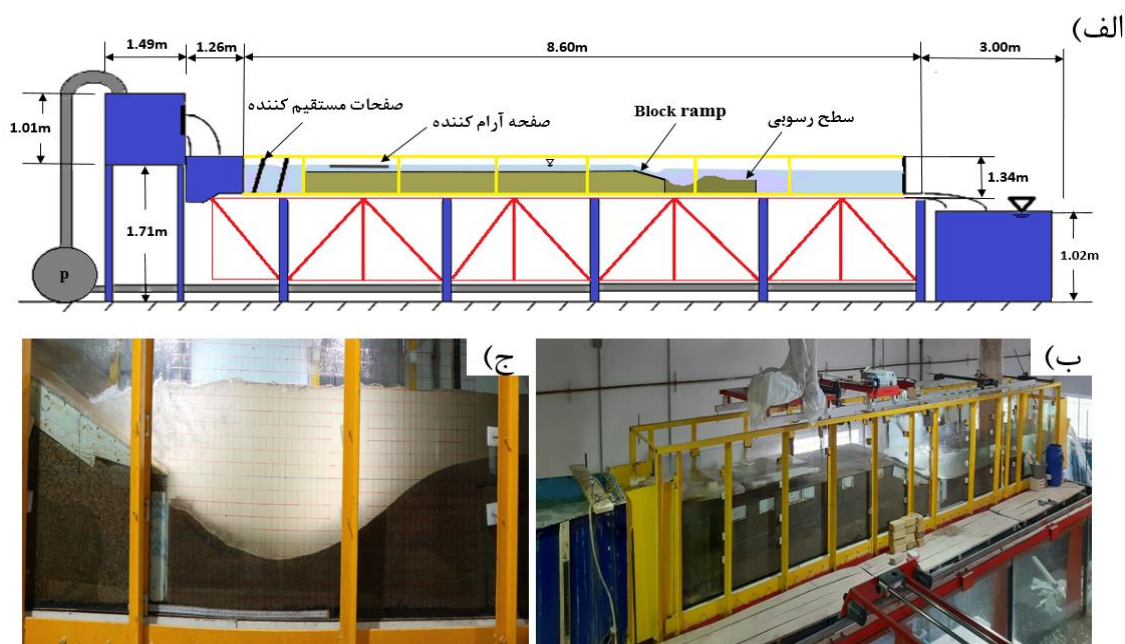
### ب) تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش‌ها

برای دستیابی به اهداف مورد نظر در پژوهش حاضر، مدل آزمایشگاهی سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار در آزمایشگاه هیدرولیک و مدل‌های فیزیکی-هیدرولیکی دانشگاه گیلان طی سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰، طراحی و ساخته شد. آزمایش‌ها در فلومی مجهز به سیستم بازچرخانی به طول ۸/۱۵ متر، عرض ۰/۸۹ متر، عمق ۱ متر و دارای دیواره‌هایی از جنس شیشه و کف فلزی انجام پذیرفت (شکل ۲). برای تأمین دبی مورد نیاز، از یک پمپ گریز از مرکز مجهز به دستگاه کنترل و تنظیم دور موتور که قادر به تأمین دبی تا ۷۰ لیتر بر ثانیه بود، استفاده شد. به منظور تنظیم دقیق دبی جریان مورد نظر، از دستگاه کنترل دور موتور و برای اندازه‌گیری آن دستگاه دبی‌سنج فراصوت با دقت  $\pm 0.1$  لیتر بر ثانیه به کار گرفته شد. جریان آب از مخزن پایین‌دست به مخزن بالادست فلوم پمپاژ شده و پس از عبور از یک حوضچه آرام‌کننده، جریان وارد کانال می‌گردد. جریان خروجی از فلوم وارد مخزن ذخیره که در انتهای فلوم مستقر بود، شده و مجدداً توسط لوله‌های برگشتی به مخزن ورودی منتقل می‌گردد. برای تنظیم عمق جریان در فلوم، از دریچه پروانه‌ای که در انتهای آن تعبیه شده بود، استفاده گردید.

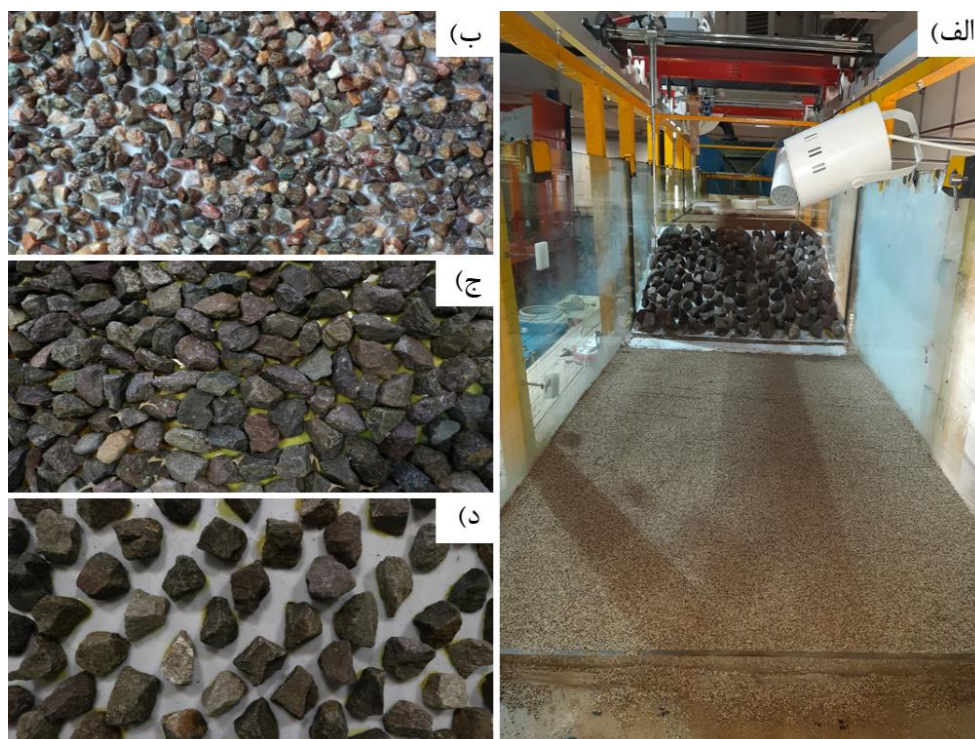
سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار مورد بررسی در این تحقیق از جنس پلاکسی گلاس و چوب با شیب‌های کارگذاری ۱:۵ و ۱:۳ که در دامنه عمده تحقیقات پیشین بوده و امکان اجرایی از نظر ایجاد شرایط برای پایداری مصالح روی سازه دارد به صورت هم‌عرض فلوم (عرض ۰/۸۹ متر) و اختلاف ارتفاع ۰/۳ متر طراحی و در فلوم نصب گردید. به جهت بررسی اثر حضور کف‌بند بر آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، دو اندازه طول کف‌بند (برابر و نصف ارتفاع سازه) از صفحات PVC ساخته و در پایین‌دست سازه سطح شیب‌دار نصب گردید.

به‌منظور بررسی اثر اندازه و چیدمان زبری بر کاهش آب‌شستگی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، ۲ اندازه زبری (قطر سنگ‌چین‌ها)، ۱/۱۵ و ۵/۲ سانتی‌متر که براساس طبقه‌بندی (Pagliara and Chiavaccini 2006a) به ترتیب زبری متوسط مقیاس (IR) در محدوده  $2/5 < y_0/k_s < 6/6$  و زبری بزرگ مقیاس (LR) در محدوده  $2/5 < y_0/k_s < 2/5$  بود، تهیه و این زبری‌ها بروی صفحات پی‌وی‌سی به ضخامت ۰/۱۵ سانتی‌متر با دو چیدمان متراکم و یک در میان با استفاده از چسب صنعتی چسبانیده شد و سپس روی سازه نصب گردید.

نمایی از سطوح زبری مورد بررسی در تحقیق حاضر در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۲- الف) طرح کلی از فلوم آزمایشگاهی، ب) نمایی از فلوم آزمایشگاهی و ج) تصویری از گودال آب‌شستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار



شکل ۳- تصاویری از: الف) بستر رسوبی و سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار همراه با زبری، ب) چیدمان متراکم با اندازه متوسط زبری ۱/۱۵ سانتی‌متر، ج) چیدمان متراکم با اندازه متوسط زبری ۵/۲ سانتی‌متر و د) چیدمان یک در میان با زبری اندازه متوسط ۵/۲ سانتی‌متر

برای ایجاد بستر رسوبی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر شیب‌دار، پس از الک کردن ماسه معدنی، مصالح یکنواخت با قطر ۰/۷۳ میلی‌متر تهیه و در بازه‌ای به طول ۱/۵ متر، عرض ۰/۸۹ متر، و ارتفاع ۰/۳ متر در پایین دست سازه مورد مطالعه قرار داده شد. همچنین، بالادست و پایین دست بازه مورد بررسی با رسوبات درشت دانه که در مرحله الک کردن باقی مانده بود، پوشانده شد.

پدیده آبشستگی یک فرآیند زمان بر است و گرچه بدلیل تداوم فرسایش در حفره، هر چند اندک و نامحسوس، نمی‌توان به صورت مطلق انتهایی برای رسیدن به زمان تعادل بدست آورد، لیکن تعیین زمانی برای تعادل در مطالعه مربوط به آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. (Rajaratnam and Macdougall (1983) با بررسی آبشستگی موضعی در پایین دست جت‌های ریزشی اعلام کردند که بعد از گذشت ۳۰ دقیقه، افزایش قابل ملاحظه‌ای در فرسایش بستر رخ نمی‌دهد. زمان تعادل آبشستگی توسط Pagliara and Palermo (2013) ۴۰ دقیقه، در تحقیقات Jüstrich et al. (2016) ۹۰ دقیقه، در مطالعه Scurlock et al. (2012) ۱۲ ساعت و در مطالعه Bhuiyan et al. (2007) ۲ تا ۴ روز در نظر گرفته شده است. در تحقیق حاضر به منظور تعیین زمان تعادل، در زمان‌های مختلف از چاله آبشستگی عکس برداری بعمل آمد. مقایسه نتایج نشان داد که بعد از گذشت ۶ ساعت از شروع آزمایش، تغییرات قابل اندازه‌گیری در عمق چاله آبشستگی رخ نمی‌دهد. لذا در کلیه آزمایش‌ها، اندازه‌گیری‌ها برای مدت یاد شده صورت گرفت.

در ابتدای هر آزمایش بعد از تراز کردن بستر رسوبی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، سطح رسوبات با صفحه‌ای نازک از جنس پلاکسی گلاس پوشانده و پس از تنظیم دقیق دبی و عمق پایاب، این پوشش به آرامی برداشته می‌شد تا مانع از شکل‌گیری آبشستگی ناگهانی در ابتدای آزمایش‌ها گردد.

در تمام آزمایش‌ها از توسعه زمانی گودال آبشستگی در گام‌های زمانی مختلف تصویربرداری گردید و سپس با استفاده از نرم‌افزار Grapher15، آبشستگی پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار رقومی‌سازی شد. در انتهای هر آزمایش نیز نیم‌رخ نهایی آبشستگی با استفاده از عمق‌سنج لیزری با دقت  $\pm 0/1$  میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

در تحقیق حاضر برای بررسی تاثیر حضور کف‌بند و زبری سطح سازه بر کاهش آبشستگی موضعی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، در مجموع ۱۴۴ آزمایش در شرایط بدون حضور کف‌بند و نیز نصب کف‌بند با دو طول مختلف، تغییر اندازه و چیدمان زبری‌ها در شیب‌های کارگذاری ۱:۳ و ۱:۵ انجام شد. در جدول (۱) دامنه پارامترهای آزمایشگاهی مورد بررسی در این تحقیق نشان داده شده است.

جدول ۱- دامنه پارامترهای آزمایشگاهی

نماد	معرفی پارامتر	واحد	محدوده تغییرات
$S_0$	شیب سازه	%	۱:۵-۱:۳
$q$	دبی واحد عرض	$m^3/m.s$	۰/۰۲۸-۰/۰۴۵
$y_0/P$	نسبت عمق بحرانی به ارتفاع سازه	بی‌بعد	۰/۱۴-۰/۲
$\eta$	معرف عدد فرود ذره	بی‌بعد	۰/۳-۱
$k_s$	زبری سازه	cm	۱/۱۵-۵/۲
$L_A$	طول کف‌بند	cm	۱۵-۳۰

## نتایج و بحث

### الف) بررسی الگوی جریان عبوری از سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار و شکل‌گیری آبشستگی پایین دست آن

رژیم‌های جریان در سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار به صورت ریزشی، انتقالی و سطحی طبقه‌بندی می‌شود. با توجه به طبقه‌بندی ارائه شده در خصوص رژیم‌های جریان در سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، رژیم جریان ریزشی در  $h < h_B$ ، رژیم جریان انتقالی در  $h_B < h < 1.5h_B$  و رژیم جریان سطحی در  $h > 1.5h_B$  رخ می‌دهد که  $h$  عمق متوسط جریان و  $h_B$  ارتفاع مصالح سنگی نصب شده بر روی سازه می‌باشد (Oertei, 2013).

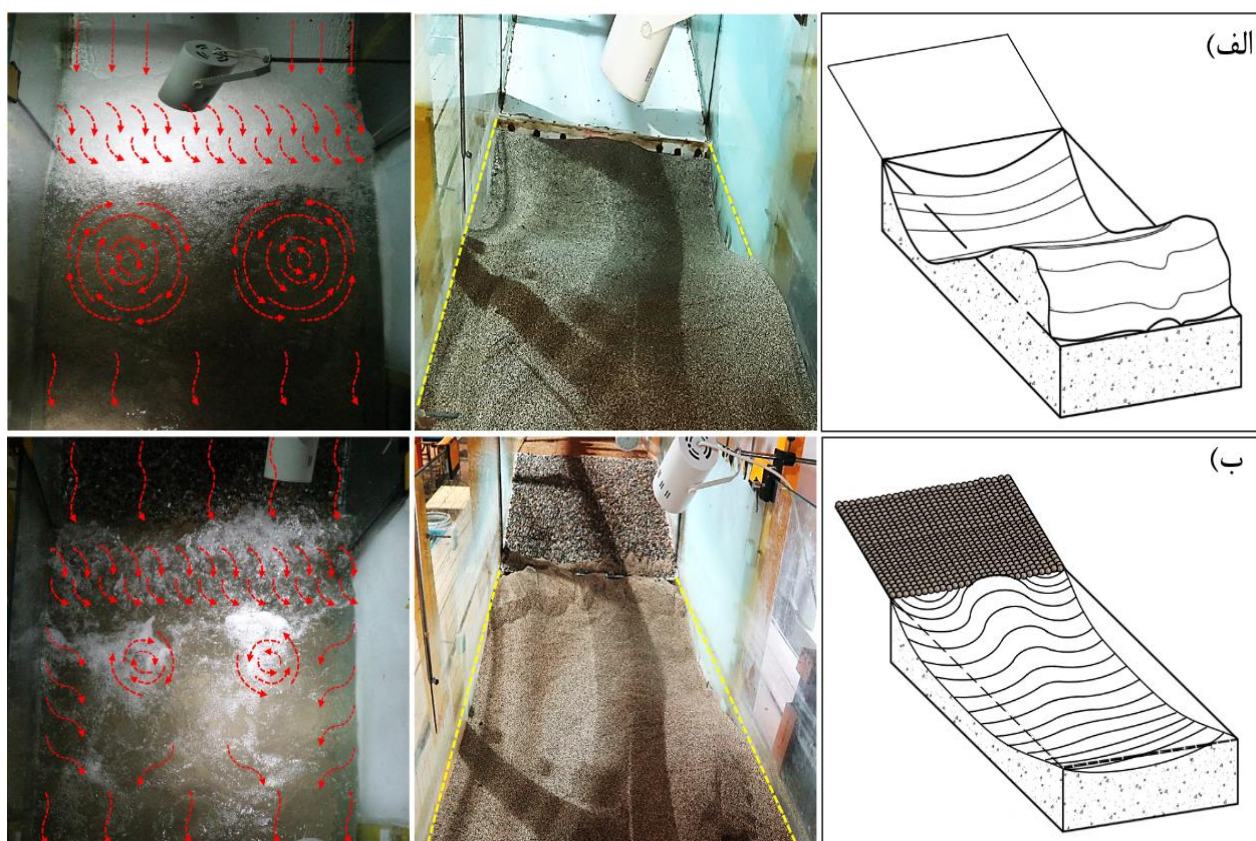
مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که ساختار زبری روی سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار تاثیر زیادی بر الگوی عبوری از روی سازه دارد به این ترتیب که با ایجاد زبری بزرگ مقیاس در تمامی دبی‌ها و زبری متوسط مقیاس در دبی‌های پایین، تیغه‌های جریان بر روی سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار تا قبل از تشکیل پرش هیدرولیکی در جهت‌های مختلف از روی المان‌های زبری ریزش کرده و در نتیجه تداخل جریان در طول سازه افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، از یکنواختی جریان در طول سازه کاسته شده و باعث ناپیوستگی آن می‌گردد. همچنین، با ایجاد زبری، پرش هیدرولیکی شکل گرفته در پایین دست سازه، به صورت نوسانی تشکیل شده و با ظهور گردابه‌های نامتقارن در طول ناحیه غلطابه پرش هیدرولیکی، آبشستگی به صورت نامتقارن و سه‌بعدی رخ می‌دهد. برای شرایط بدون اعمال زبری،



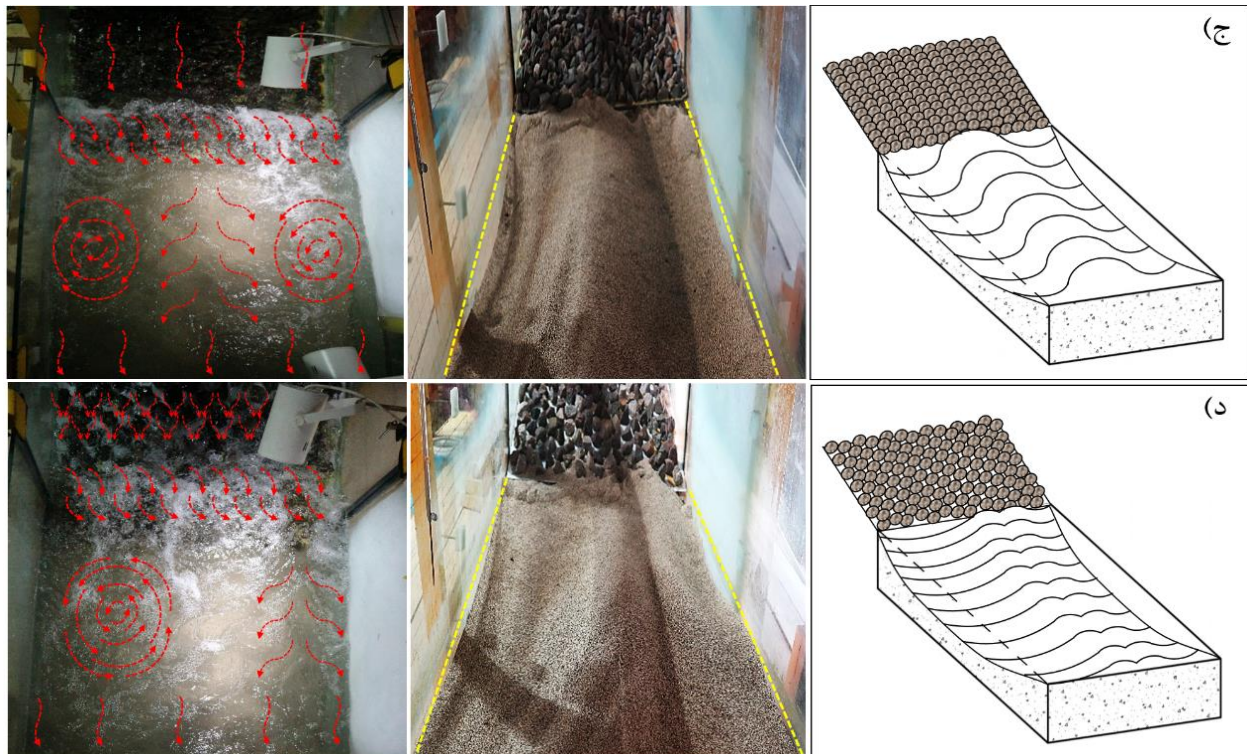
در همه دبی‌ها و نیز اعمال زبری متوسط مقیاس، با افزایش دبی جریان (به علت مستغرق شدن کامل زبری‌ها)، جریان عبوری از ابتدای سطح شیب‌دار تا قبل از تشکیل پرش هیدرولیکی به صورت رژیم سطحی بوده و با توجه به آنکه پرش هیدرولیکی به صورت متقارن تشکیل می‌گردد، الگوی آب‌شستگی نیز به صورت متقارن و دو بعدی شکل می‌گرفت. نمونه‌هایی از الگوهای آب‌شستگی شکل گرفته در پایین دست سازه‌های کنترل تراز بستر مورد مطالعه در شکل (۴) نشان داده شد.

همانطور که در شکل (۴-الف) مشخص است، گودال آب‌شستگی در حالت بدون اعمال زبری به صورت دو بعدی و همراه با یک پشته رسوبی هموار در پایین دست آن می‌باشد. در این شرایط جریان با یک پرش هیدرولیکی متقارن وارد حوضچه رسوبی می‌گردد. همچنین وجود پشته رسوبی نیز نقش بسزایی در حرکت گردابه‌ها در طول پرش هیدرولیکی و گودال آب‌شستگی شکل گرفته دارد. با اعمال زبری متوسط مقیاس به صورت متراکم (شکل ۴-ب)، جریان با یک پرش هیدرولیکی نوسانی وارد حوضچه رسوبی می‌شد. در این شرایط، خطوط جریان به صورت متناوب از هر دو سمت دیواره‌ی حوضچه رسوبی منحرف شده و با تشکیل دو ناحیه‌ی چرخش جریان، منجر به شکل‌گیری گودال آب‌شستگی با دو بخش مجزا در طرفین حوضچه رسوبی که توسط یک خط‌الراس مرکزی (به صورت پشته رسوبی) تفکیک شده بود، شد. این شکل از پشته رسوبی از پای سازه شروع شده و به تدریج به سمت انتهای گودال آب‌شستگی محو می‌گردد. در واقع دو بخش مذکور از گودال آب‌شستگی تمایل به همگرایی و اتصال بهم داشته که در پایین دست حوضچه رسوبی تبدیل به یک گودال آب‌شستگی متقارن می‌شود. عمق حداکثر آب‌شستگی می‌تواند در هریک از دو بخش گودال آب‌شستگی یا قسمتی از گودال آب‌شستگی که در پایین دست شکل گرفته، رخ دهد.

با تغییر مشخصات هندسی و اعمال زبری بزرگ مقیاس به صورت متراکم (شکل ۴-ج)، دو ناحیه آب‌شستگی متقارن در دو سمت خط مرکزی جریان شکل گرفت که با یک پشته رسوبی در مرکز حوضچه رسوبی از هم تفکیک شدند. این وضعیت شبیه به شرایط مشاهده شده در شکل (۴-ب) است با این تفاوت که در این وضعیت به دلیل افزایش زبری و طبیعتاً افزایش افت انرژی جریان در طول سازه، چرخش جریان‌های جانبی و حرکت گردابه‌ها به سمت پایین دست حوضچه رسوبی توسعه پیدا می‌کند و در نتیجه دو ناحیه گودال آب‌شستگی بدون هیچگونه تمایلی به همگرا شدن تا انتهای حوضچه رسوبی ادامه دارند و منجر به یک آب‌شستگی طولانی‌تر می‌گردد.



شکل ۴- تصاویری از اثر حضور زبری بر الگوی جریان و شکل‌گیری آب‌شستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار (الف) بدون اعمال زبری، (ب) چیدمان متراکم با اندازه متوسط زبری ۱/۱۵ سانتی‌متر



ادامه شکل ۴- تصاویری از اثر حضور زبری بر الگوی جریان و شکل‌گیری آب‌شستگی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار (ج) چیدمان متراکم با اندازه متوسط زبری ۵/۲ سانتی‌متر و (د) چیدمان یک در میان با اندازه متوسط زبری ۵/۲ سانتی‌متر

با تغییر چیدمان زبری بزرگ مقیاس به یک در میان (شکل ۴-د)، فرآیند آب‌شستگی و رسوب‌گذاری به صورت سه‌بعدی شکل می‌گرفت. پرش هیدرولیکی شکل گرفته در این وضعیت، با توجه به چیدمان زبری‌ها و شکل عبور جریان از روی سازه که با تلاطم و افت و خیزهای زیادی همراه است، به صورت نوسانی موجی بود. در این شرایط، در یک سمت از دیواره جانبی فلوام، یک گردابه پادساعتگرد ایجاد می‌شد و گودال آب‌شستگی اصلی در این ناحیه به صورت پیوسته و هموار شکل گرفته که عمق حداکثر آب‌شستگی در آن ناحیه رخ می‌دهد. در سمت مقابل آن، بخش عمده ناحیه پرش هیدرولیکی را در بر می‌گیرد و تمرکز عبور جریان از آن ناحیه است، آب‌شستگی به شکل سه‌بعدی و ناهموار می‌شد.

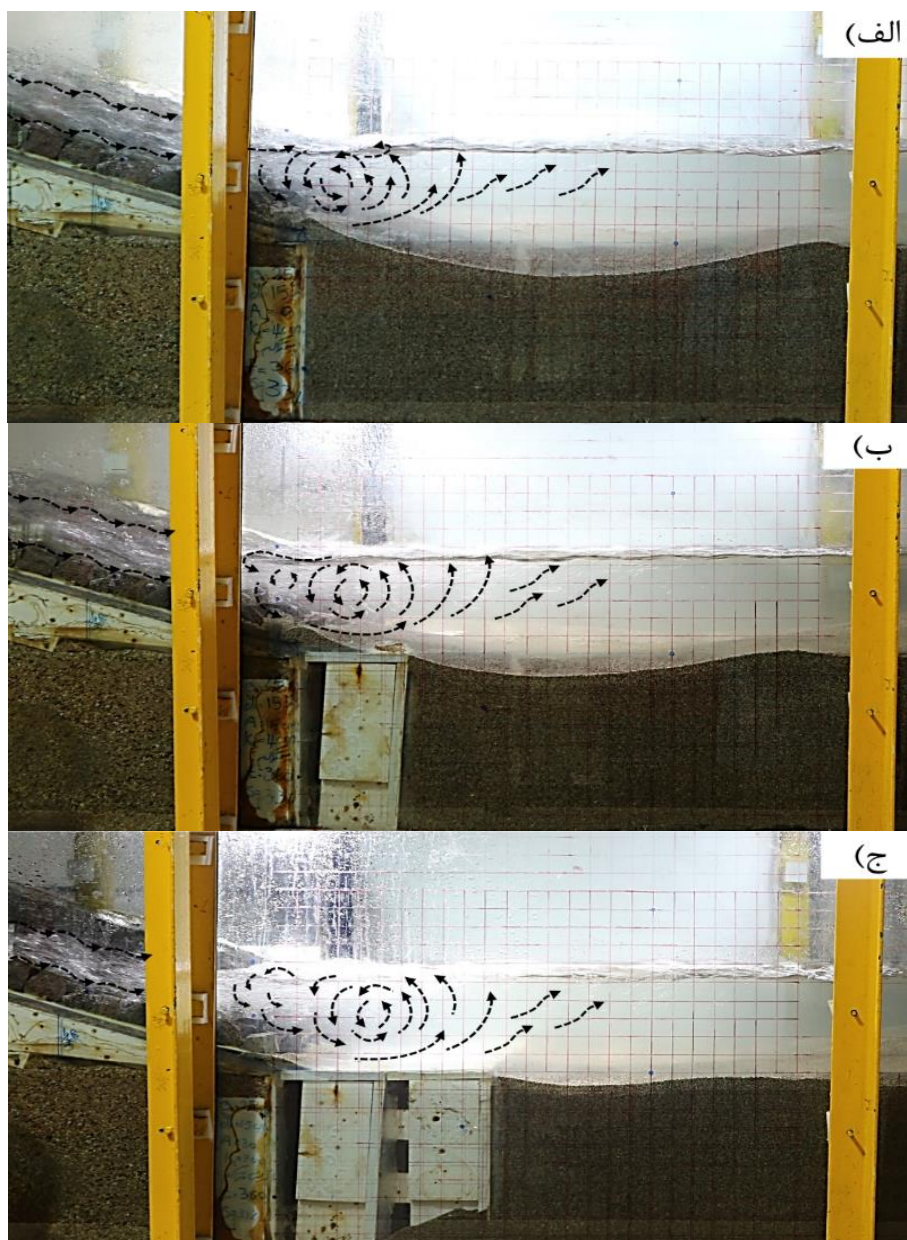
مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در لحظات اولیه بعد از شروع آزمایش، ذراتی که در نزدیکی پای سازه قرار داشتند بلافاصله و به صورت کاملاً تصادفی، نامنظم و با اغتشاش زیاد جابه‌جا می‌شوند و بخش زیادی از عمق آب‌شستگی را در دقایق اولیه ایجاد می‌نمود. با گذشت زمان به تدریج نرخ توسعه طولی آب‌شستگی نسبت به توسعه عمقی بیش‌تر شده و با پدیدار شدن حالت تعادل نسبی، رسوبات درون گودال حالت غلطشی داشته و به ندرت از گودال خارج می‌شدند.

با ایجاد کف‌بند، بخش غلطابه پرش هیدرولیکی که بیش‌ترین سهم در شکل‌دهی گردابه‌ها در حوضچه پایین‌دست سازه را دارد، بر روی کف‌بند تشکیل شده و با کاهش قدرت گردابه‌ها در اثر استهلاک انرژی بر روی کف‌بند، قسمت همراه با تنش برشی بالای جریان در محدوده غلطابه پرش هیدرولیکی که توان فرساینده بالایی دارد، از بستر فرسایش‌پذیر دور می‌گردد و منجر به کاهش عمق آب‌شستگی می‌شود. در شکل (۵) اثر حضور کف‌بند بر الگوی جریان در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار نشان داده شده است.

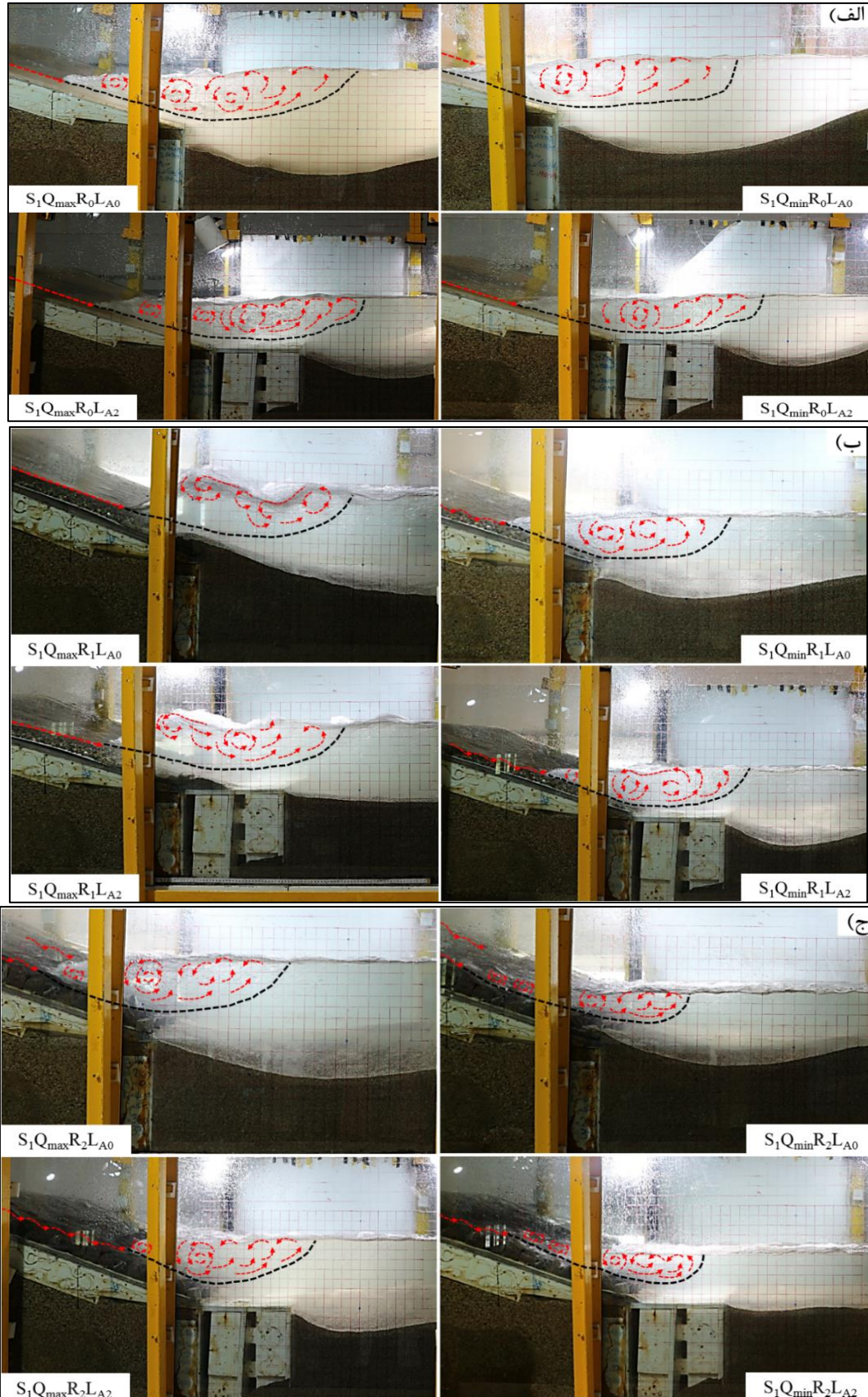
یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر عمق حداکثر آب‌شستگی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، طول غلطابه پرش هیدرولیکی است که بر مقدار عمق حداکثر آب‌شستگی موثر می‌باشد. بررسی اثر دبی جریان بر طول بخش غلطابه پرش هیدرولیکی برای تمامی زبری‌ها و چیدمان‌ها در محدوده حوضچه رسوبی که همراه با حباب‌های زیاد است، نشان داد که در دبی حداکثر، سرعت جریان عبوری از روی سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار نسبت به دبی حداقل افزایش یافته و با زاویه تندتر و برخورد شدیدتری وارد حوضچه آرامش می‌شود و در نتیجه، طول ناحیه حباب‌دار در حوضچه پای‌دست سازه افزایش می‌یابد.

همانطور که پیشتر بیان شد، در شرایط بدون زبری، جریان عبوری از ابتدای سطح شیب‌دار تا قبل از تشکیل پرش هیدرولیکی به صورت رژیم سطحی و تقریباً بدون حباب می‌باشد. پرش هیدرولیکی در این شرایط با تلاطم بیش‌تری نسبت به حالت حضور زبری وارد

حوضچه آرامش شده که طول و حجم بیش‌تری از ناحیه حباب‌دار در ناحیه غلطابه‌ای پرش هیدرولیکی را دربر می‌گیرد. مشاهدات آزمایشگاهی حاکی از آن است که با ایجاد زبری بر روی سطح سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، امکان ریزش تیغه های جریان در جهت‌های مختلف در طول سازه فراهم می‌شود. به عبارت دیگر، از یکنواختی جریان در طول سازه کاسته شده و باعث ناپیوستگی آن می‌گردد. در نتیجه میزان تداخل جریان در طول سازه افزایش یافته و مقدار حباب‌های تشکیل شده بر روی آن بیش‌تر می‌گردد. در واقع بخش زیادی از پرش هیدرولیکی تا قبل از یک سوم حوضچه آرامش رخ می‌دهد که نسبت به حالت بدون اعمال زبری از طول کم‌تری برخوردار است. با کاهش شیب (افزایش طول سازه)، جت جریان با زاویه ملایم‌تری وارد حوضچه گردیده و در نتیجه از قدرت جت جریان فوق بحرانی ورودی به حوضچه آرامش برای تشکیل پرش هیدرولیکی و ناحیه حباب‌دار کاسته می‌شود. با نصب کفبند، بخش اعظمی از پرش هیدرولیکی و گردابه‌های اصلی ایجاد کننده گودال آب‌شستگی، پیش از ورود به بستر رسوبی تشکیل می‌شود و جریان با آشفستگی کم‌تری وارد حوضچه رسوبی می‌گردد. با این ترتیب، از توان آب‌شستگی جت در محل برخورد بستر فرسایش‌پذیر به میزان قابل ملاحظه‌ای کاسته می‌شود. در شکل (۶) موقعیت پرش هیدرولیکی در حالت نصب کفبند به طول برابر با ارتفاع سازه و بدون کفبند نشان داده شده است.



شکل ۵- تصاویری از اثر حضور کفبند بر الگوی جریان در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار:  
 (الف) در حالت بدون کفبند، (ب) ایجاد کفبند به طول  $P/2$  و (ج) ایجاد کفبند به طول  $P$



شکل ۶- موقعیت پرش هیدرولیکی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار در حضور کفبند به طول  $P$  ( $L_{A2}$ ) و بدون کفبند ( $L_{A0}$ ): الف) بدون اعمال زبری، ب) چیدمان متراکم با زبری متوسط  $1/15$  سانتی‌متر، ج) چیدمان متراکم با زبری متوسط  $5/2$  سانتی‌متر و د) چیدمان یک در میان با زبری متوسط  $5/2$  سانتی‌متر



شکل ۶- موقعیت پرش هیدرولیکی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار در حضور کفبند به طول  $P$  ( $L_{A2}$ ) و بدون کفبند ( $L_{A0}$ ): الف) بدون اعمال زبری، ب) چیدمان متراکم با زبری متوسط  $1/15$  سانتی‌متر، ج) چیدمان متراکم با زبری متوسط  $5/2$  سانتی‌متر و د) چیدمان یک در میان با زبری متوسط  $5/2$  سانتی‌متر- ادامه

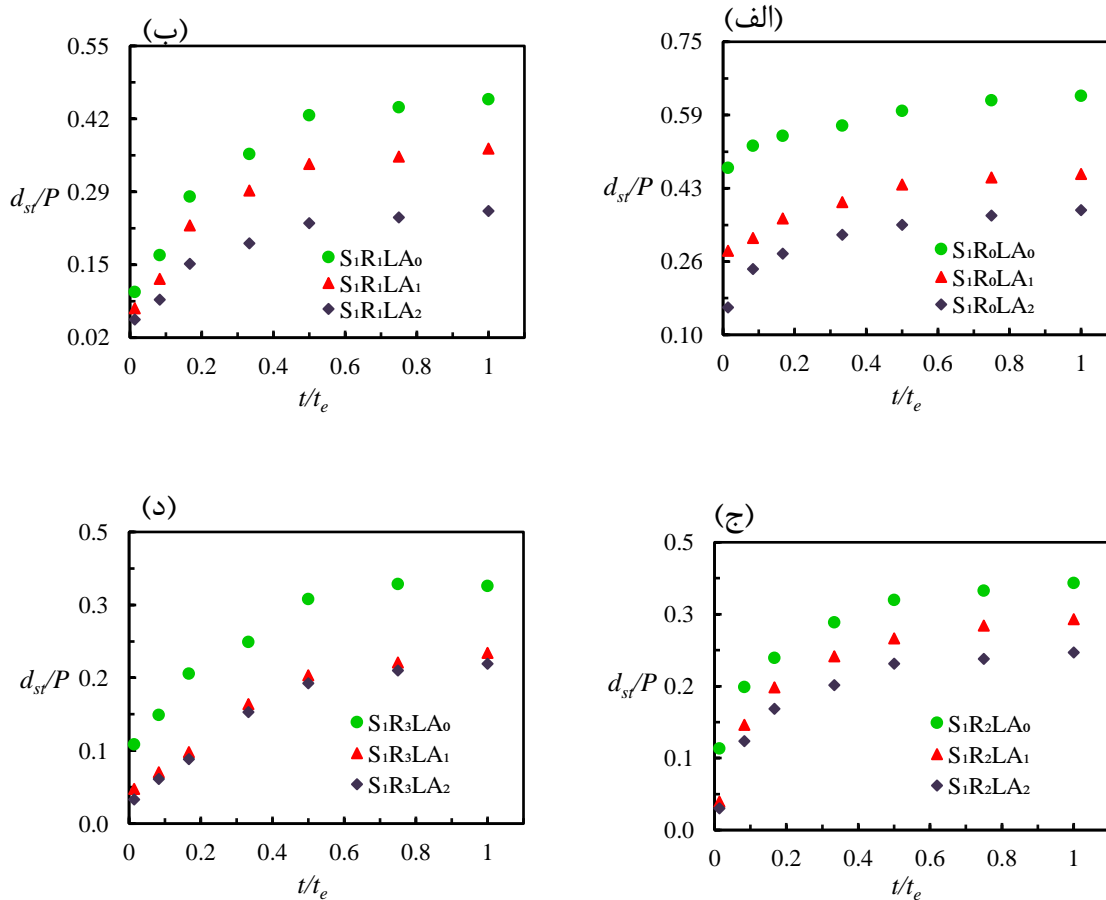
بررسی تاثیر ایجاد کفبند بر توسعه زمانی نیم‌رخ آب‌شستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های لحظه‌ای نیم‌رخ آب‌شستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار مورد بررسی در شیب‌های  $1:5$  و  $1:3$  برای دبی حداکثر در شکل‌های (۷) و (۸)، نشان داده شده است. در این شکل‌ها، نمایه‌های  $R_0$ ،  $R_1$ ،  $R_2$  و  $R_3$  به ترتیب معرف شرایط بدون زبری، زبری با قطر متوسط  $1/15$  سانتی‌متر و چیدمان متراکم، زبری با قطر متوسط  $5/2$  سانتی‌متر با چیدمان متراکم و یک در میان می‌باشد. همچنین از نمایه‌های  $L_{A0}$ ،  $L_{A1}$  و  $L_{A2}$  به ترتیب برای معرفی حالت بدون نصب کفبند، کفبند به طول  $P/2$  (۱۵ سانتی‌متر) و کفبند به طول  $P$  (۳۰ سانتی‌متر) استفاده شد. در جداول (۲) و (۳) مقایسه مقادیر عمق نسبی حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی برای دبی حداقل و حداکثر در زمان‌های نسبی مشخصه  $0.14$  و  $0.75$  به ترتیب ۵ و ۲۷۰ دقیقه از شروع آزمایش نشان داده شده است. مقایسه مقادیر عمق نسبی حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی در پایین دست سازه سطح شیب‌دار با شیب  $1:3$  برای دبی حداقل ( $m^3/m.s$ )  $0.28$  تا  $0.14$  ( $q/P=0.14$ ) در زمان‌های نسبی  $0.14$  و  $0.75$ ، در سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با و بدون اعمال زبری نشان داد که ایجاد کفبند با طول  $L_{A1}$ ، عمق نسبی حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی را ۲۶ تا ۹۱ درصد نسبت به حالت بدون کفبند کم می‌کند. با افزایش طول کفبند به  $L_{A2}$  و شکل‌گیری بخش عمده پرش هیدرولیکی و گردابه‌های آن در طول کفبند، مقدار کاهش عمق حداکثر لحظه‌ای ۴۴ تا ۹۴ درصد در زمان‌های نسبی ذکر شده حاصل گردید.

با افزایش دبی جریان به مقدار حداکثر ( $m^3/m.s$ )  $0.45$  ( $q/P=0.2$ )، ایجاد کفبند با طول‌های  $L_{A1}$  و  $L_{A2}$ ، عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی را ۲۸ تا ۹۳ درصد در زمان‌های نسبی  $0.14$  و  $0.75$  کاهش می‌دهد. همانطور که در نمودارها مشخص است نصب کفبند تاثیر محسوسی بر تغییر روند توسعه لحظه‌ای عمق آب‌شستگی دارد. این تغییر در زمان‌های فاز شروع و توسعه آب‌شستگی اثرگذارتر از فازهای تثبیت و تعادل می‌باشد. همچنین ایجاد زبری روی سازه، با افزایش تداخل تیغه‌های جریان بین المان‌های زبری، نقش موثری در استهلاک انرژی داشته و سرعت جت خروجی از سازه را کاهش می‌دهد و در نتیجه منجر به کم‌ترین مقدار آب‌شستگی می‌گردد. مقایسه نتایج حاکی از آن است که سازه  $S_1R_3L_{A2}$  (اعمال زبری با قطر متوسط  $5/2$  سانتی‌متر و چیدمان یک در میان)، دارای بهترین عملکرد در کاهش عمق نسبی حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی با متوسط ۷۹ درصد بود.

مقایسه مقادیر عمق نسبی حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی در پایین دست سازه سطح شیب‌دار با شیب  $1:5$  برای دبی حداقل و برای شرایط بدون اعمال زبری حاکی از آن است که در زمان‌های نسبی  $0.14$  و  $0.75$  با ایجاد کفبند با طول  $L_{A1}$ ، مقدار کاهش عمق نسبی حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی ۴ تا ۷۶ درصد نسبت به حالت بدون کفبند حاصل گردید. با افزایش طول کفبند به  $L_{A2}$ ، آن بخش از جریان

خروجی از سازه که همراه با تلاطم زیاد ناشی از پرش هیدرولیکی می‌باشد، پیش از ورود به بستر رسوبی در سطح کفبند شکل می‌گیرد. در این شرایط مقدار عمق حداکثر لحظه‌ای ۱۲ تا ۸۸ درصد در زمان‌های نسبی ذکر شده تقلیل پیدا کرد. با افزایش دبی جریان به مقدار حداکثر، ایجاد کفبند با طول‌های  $L_{A1}$  و  $L_{A2}$ ، عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی را ۶ تا ۸۹ درصد در زمان‌های نسبی ۰/۱۴ و ۰/۷۵ کاهش می‌دهد. همانطور که بیان شد ایجاد زبری منجر به افزایش مقاومت در مقابل جریان و کاهش عدد فرود عمق اولیه پرش هیدرولیکی در پای سازه شده و به تبع آن عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج نشان داد که سازه  $S_2R_2L_{A2}$  (اعمال زبری با قطر متوسط ۵/۲ سانتی‌متر و چیدمان متراکم) با متوسط ۷۷ درصد، بیش‌ترین عملکرد را در کاهش عمق نسبی حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی دارا بود.

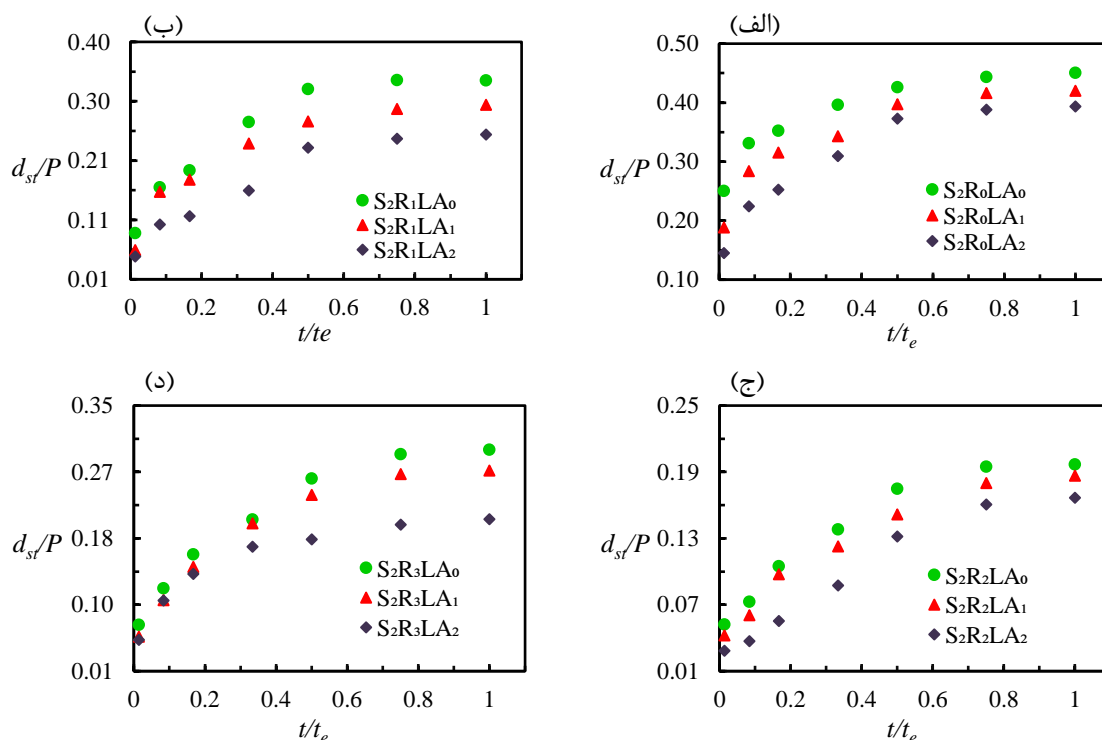
ج) بررسی تاثیر نصب کفبند بر عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار مقادیر نتایج حاصل از تاثیر نصب کفبند بر راندمان تغییرات عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب‌های ۱:۳ و ۱:۵ نسبت به حالت بدون کفبند و بدون زبری در جدول (۴) و (۵) و مقایسه نتایج حاصل از تاثیر ایجاد کفبند در سازه مذکور با طول‌های مختلف و اعمال المان‌های زبری با چیدمان و اندازه‌های مختلف در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. مقایسه مقادیر عمق نسبی حداکثر نهایی آب‌شستگی در پایین‌دست سازه سطح شیب‌دار با شیب ۱:۳ حاکی از آن است که با ایجاد کفبند با طول  $L_{A1}$  (به مقدار  $P/2$ ) در سازه  $S_1R_0$  (بدون اعمال زبری)، از مقدار عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در دامنه دبی‌های حداقل  $(q=0/028 m^3/m.s, y_o/P=0/14, \eta=0/3)$  تا حداکثر  $(q=0/045 m^3/m.s, y_o/P=0/2, \eta=1)$  به ترتیب ۳۱ و ۲۷ درصد نسبت به حالت بدون کفبند کاسته می‌شود. با افزایش طول کفبند به  $L_{A2}$  (به مقدار  $P$ )، مقدار عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر به ترتیب ۴۹ و ۴۰ درصد کاهش یافت.



شکل ۷- تاثیر نصب کفبند بر توسعه زمانی عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۳ و دبی  $0/045 m^3/m.s$ : (الف) بدون اعمال زبری، (ب) چیدمان متراکم با زبری متوسط ۱/۱۵ سانتی‌متر، (ج) چیدمان متراکم با زبری متوسط ۵/۲ سانتی‌متر و (د) چیدمان یک در میان با زبری متوسط ۵/۲ سانتی‌متر

جدول ۲- مقایسه تاثیر نصب کفبند بر توسعه زمانی عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۳ برای زمان‌های مشخصه  $t/t_e = 0.14$  و  $t/t_e = 0.75$

نام سازه	$q(m^3/m.s)$	$y_0/P$	درصد عملکرد اثر کفبند $L_{A1}$		درصد عملکرد اثر کفبند $L_{A2}$	
			$t/t_e = 0.14$	$t/t_e = 0.75$	$t/t_e = 0.14$	$t/t_e = 0.75$
$S_1R_0$	0.28	0.14	50	26	44	65
			39	28	41	66
$S_1R_1$	0.28	0.14	87	61	70	91
			84	44	61	89
$S_1R_2$	0.28	0.14	90	52	58	94
			90	49	57	93
$S_1R_3$	0.28	0.14	91	68	70	92
			89	60	62	92



شکل ۸- تاثیر نصب کفبند بر توسعه زمانی عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۵ و دبی  $0.45 m^3/m.s$  (الف) بدون اعمال زبری، (ب) چیدمان متراکم با زبری متوسط (ج) چیدمان متراکم با زبری متوسط  $1/15$  سانتی‌متر، (د) چیدمان متراکم با زبری متوسط  $5/2$  سانتی‌متر

جدول ۳- مقایسه تاثیر نصب کفبند بر توسعه زمانی عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۵ برای زمان‌های مشخصه  $t/t_e = 0.14$  و  $t/t_e = 0.75$

نام سازه	$q(m^3/m.s)$	$y_0/P$	درصد عملکرد اثر کفبند $L_{A1}$		درصد عملکرد اثر کفبند $L_{A2}$	
			$t/t_e = 0.14$	$t/t_e = 0.75$	$t/t_e = 0.14$	$t/t_e = 0.75$
$S_1R_0$	0.28	0.14	49	4	12	55
			25	6	12	42
$S_1R_1$	0.28	0.14	63	22	32	73
			77	34	46	81
$S_1R_2$	0.28	0.14	76	64	70	88
			83	59	64	89



۵۹	۷۹	۴۷	۷۶	۰/۱۴	۰/۰۲۸	$S_1R_3$
۵۵	۸۰	۴۱	۷۸	۰/۲۰	۰/۰۴۵	

مقایسه نتایج نشان داد که در سازه  $S_1R_1$  (اعمال زبری با قطر متوسط ۱/۱۵ سانتی‌متر و چیدمان متراکم) با ایجاد کف‌بند با طول  $L_{A1}$ ، مقدار عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر نسبت به حالت بدون کف‌بند و بدون زبری به ترتیب ۵۹ و ۴۲ درصد کاهش می‌یابد. با تغییر طول کف‌بند به  $L_{A2}$ ، مقدار عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر به ترتیب ۶۹ و ۶۰ درصد کاهش یافت.

با تغییر مشخصات هندسی زبری در سازه  $S_1R_2$  (اعمال زبری با قطر متوسط ۵/۲ سانتی‌متر و چیدمان متراکم)، نصب کف‌بند با طول  $L_{A1}$  مقدار عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی را در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر به ترتیب ۵۳ و ۴۸ درصد نسبت به حالت بدون کف‌بند و بدون زبری کم می‌کند. با تغییر طول کف‌بند به  $L_{A2}$ ، مقدار عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر به ترتیب ۶۰ و ۵۶ درصد کم شد.

مقایسه نتایج عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی با لحاظ تغییر چیدمان زبری در سازه  $S_1R_3$  (اعمال زبری با قطر متوسط ۵/۲ سانتی‌متر و چیدمان یک در میان)، حاکی از آن است که ایجاد کف‌بند با طول  $L_{A1}$  عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی را در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر نسبت به حالت بدون کف‌بند و بدون زبری به ترتیب ۶۲ و ۵۸ درصد کاهش می‌دهد. با افزایش طول کف‌بند به  $L_{A2}$ ، مقدار عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در دامنه دبی‌های حداقل و حداکثر به ترتیب ۶۹ و ۶۱ درصد کاهش یافت. از میان گزینه‌های مختلف مورد بررسی در این شیب، سازه‌های  $S_1R_1L_{A2}$  و  $S_1R_3L_{A2}$  عملکرد مطلوب‌تری در کاهش آب‌شستگی داشتند.

بررسی مقادیر عمق نسبی حداکثر نهایی آب‌شستگی در پایین دست سازه سطح شیب‌دار با شیب ۱:۵ نشان داد که با ایجاد کف‌بند با طول  $L_{A1}$  در سازه  $S_2R_0$  (بدون اعمال زبری)، از مقدار عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر به ترتیب ۳ و ۷ درصد نسبت به حالت بدون کف‌بند کاسته می‌شود. با افزایش طول کف‌بند  $L_{A2}$ ، مقدار عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر به ترتیب ۱۱ و ۱۳ درصد کاهش یافت.

مقایسه نتایج حاکی از آن است که در سازه  $S_2R_1$  (اعمال زبری با قطر متوسط ۱/۱۵ سانتی‌متر و چیدمان متراکم) با ایجاد کف‌بند با طول  $L_{A1}$ ، مقدار عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر نسبت به حالت بدون کف‌بند و بدون زبری به ترتیب ۲۲ و ۳۴ درصد کاهش می‌یابد. با تغییر طول کف‌بند به  $L_{A2}$ ، مقدار کاهش عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر به ترتیب ۳۱ و ۴۵ درصد حاصل گردید.

تجزیه و تحلیل نتایج حاکی از آن است که با افزایش قطر زبری در سازه  $S_2R_2$  (اعمال زبری با قطر متوسط ۵/۲ سانتی‌متر و چیدمان متراکم)، نصب کف‌بند با طول  $L_{A1}$  مقدار عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی را در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر به ترتیب ۶۲ و ۵۸ درصد نسبت به حالت بدون کف‌بند و بدون زبری کم می‌کند. با تغییر طول کف‌بند به  $L_{A2}$ ، از مقدار عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر به ترتیب ۶۸ و ۶۳ درصد کاسته شد.

با تغییر چیدمان زبری در سازه  $S_2R_3$  (اعمال زبری با قطر متوسط ۵/۲ سانتی‌متر و چیدمان یک در میان)، ایجاد کف‌بند با طول  $L_{A1}$  عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی را در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر نسبت به حالت بدون کف‌بند و بدون زبری به ترتیب ۴۵ و ۴۱ درصد کاهش می‌دهد. با افزایش طول کف‌بند به  $L_{A2}$ ، مقدار عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در دامنه دبی‌های حداقل و حداکثر به ترتیب ۵۷ و ۵۵ درصد کاهش یافت. مقایسه نتایج نشان داد که از میان گزینه‌های مختلف مورد بررسی در این شیب، سازه  $S_2R_2L_{A2}$  عملکرد به نسبت بهتری در کنترل آب‌شستگی در بین سازه‌های مورد بررسی در این شیب دارد.

جدول ۴- تاثیر نصب کف‌بند بر کاهش عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۳

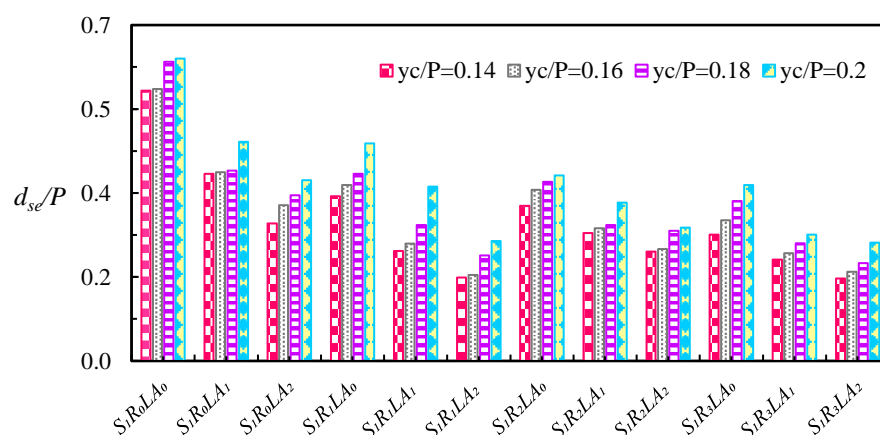
درصد عملکرد اثر طول کف‌بند در سازه $S_1R_3$		درصد عملکرد اثر طول کف‌بند در سازه $S_1R_2$		درصد عملکرد اثر طول کف‌بند در سازه $S_1R_1$		درصد عملکرد اثر طول کف‌بند در سازه $S_1R_0$		$\eta$	$y/P$	$q(m^3/m.s)$
$L_{A2}$	$L_{A1}$	$L_{A2}$	$L_{A1}$	$L_{A2}$	$L_{A1}$	$L_{A2}$	$L_{A1}$			
۶۹	۶۲	۶۰	۵۳	۶۹	۵۹	۴۹	۳۱	۰/۳	۰/۱۴	۰/۰۲۸
۶۷	۶۰	۵۹	۵۱	۶۸	۵۷	۴۳	۳۱	۰/۵	۰/۱۶	۰/۰۳۴



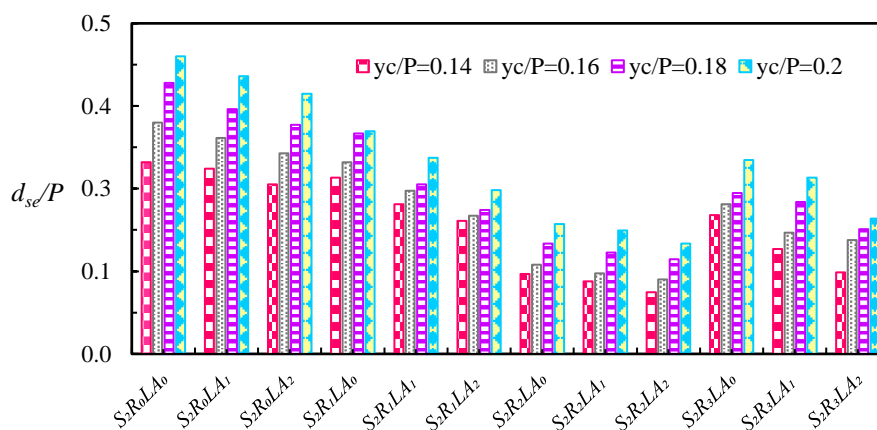
۶۷	۶۱	۵۶	۵۴	۶۵	۵۴	۴۵	۳۶	۰/۷	۰/۱۸	۰/۰۳۹
۶۱	۵۸	۵۶	۴۸	۶۰	۴۲	۴۰	۲۷	۱	۰/۲۰	۰/۰۴۵

جدول ۵- تاثیر نصب کفبند بر کاهش عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۵

درصد عملکرد اثر طول کفبند در سازه S <sub>2</sub> R <sub>3</sub>		درصد عملکرد اثر طول کفبند در سازه S <sub>2</sub> R <sub>2</sub>		درصد عملکرد اثر طول کفبند در سازه S <sub>2</sub> R <sub>1</sub>		درصد عملکرد اثر طول کفبند در سازه S <sub>2</sub> R <sub>0</sub>		η	y/P	q(m <sup>3</sup> /m.s)
L <sub>A2</sub>	L <sub>A1</sub>	L <sub>A2</sub>	L <sub>A1</sub>	L <sub>A2</sub>	L <sub>A1</sub>	L <sub>A2</sub>	L <sub>A1</sub>			
۵۷	۴۵	۶۸	۶۲	۳۱	۲۲	۱۱	۳	۰/۳	۰/۱۴	۰/۰۲۸
۵۱	۴۸	۶۸	۶۵	۴۰	۲۹	۱۳	۷	۰/۵	۰/۱۶	۰/۰۳۴
۵۴	۴۴	۶۵	۶۳	۴۷	۳۷	۱۵	۱۰	۰/۷	۰/۱۸	۰/۰۳۹
۵۵	۴۱	۶۳	۵۸	۴۵	۳۴	۱۳	۷	۱	۰/۲۰	۰/۰۴۵



شکل ۹- تاثیر نصب کفبند بر کاهش عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۳



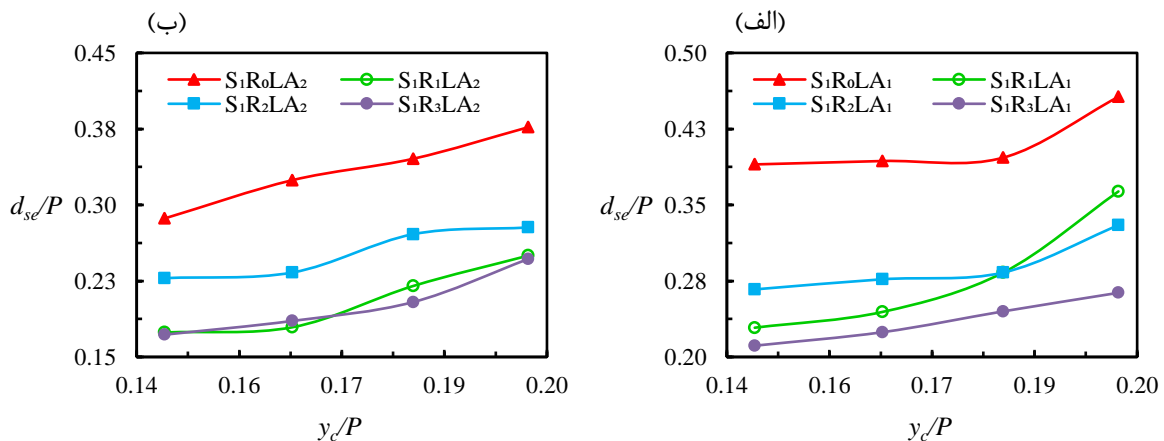
شکل ۱۰- تاثیر نصب کفبند بر کاهش عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۵

د) بررسی تاثیر اعمال زبری بر عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار  
 بررسی نتایج تاثیر اعمال زبری سطح شیب‌دار بر مقدار عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار نشان داد که بطور کلی افزایش قطر زبری روی سطح شیب‌دار منجر به افزایش مقاومت در مقابل جریان، افزایش شیب اصطکاکی و در نتیجه کاهش عدد فرود جریان روی سطح شیب‌دار می‌گردد. بنابراین انتظار می‌رود که به ازای افزایش زبری، مقدار عمق آب‌شستگی کاهش یابد.

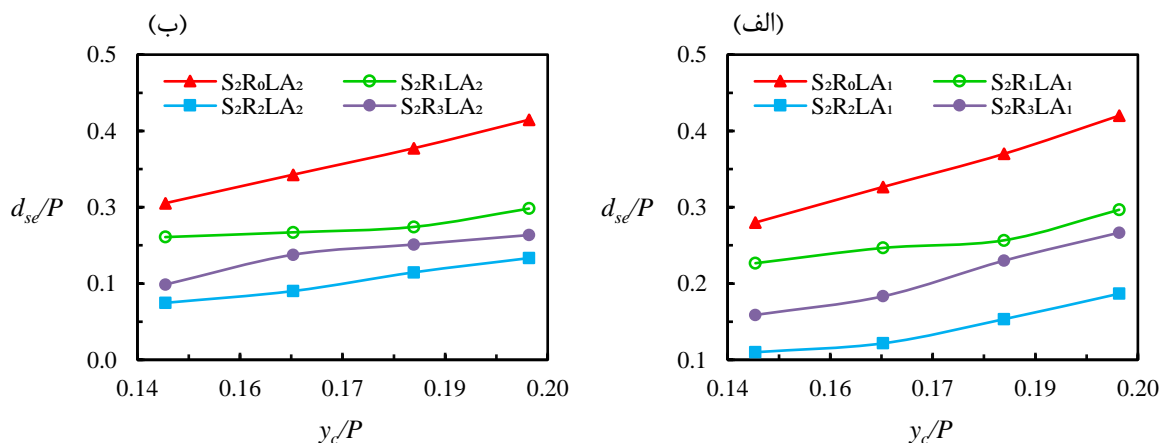
مقایسه نتایج حاصل از تاثیر اعمال زبری با چیدمان و اندازه‌های مختلف بر عمق نسبی حداکثر نهایی آب‌شستگی در پایین دست

سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب‌های ۱:۳ و ۱:۵ برای شرایط یکسان طول کف‌بند در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است. در سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۳، با اعمال زبری با قطر متوسط ۱/۱۵ سانتی‌متر در شرایط یکسان طول کف‌بند  $L_{A1}$ ، مقدار عمق نسبی حداکثر نهایی آب‌شستگی ( $d_{se}/P$ ) در سازه  $S_{1R1LA1}$  (چیدمان متراکم) در مقایسه با سازه  $S_{1R0LA1}$  (بدون اعمال زبری) در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر بطور متوسط از ۰/۴۱ به ۰/۲۸ کاهش می‌یابد. با افزایش قطر زبری به ۵/۲ سانتی‌متر در سازه  $S_{1R2LA1}$  (چیدمان متراکم)، مقدار عمق نسبی حداکثر نهایی آب‌شستگی در مقایسه با شرایط بدون زبری، در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر بطور متوسط به ۰/۲۹ تغییر می‌یابد. مقایسه نتایج نشان داد که با تغییر چیدمان زبری مذکور به یک در میان در سازه  $S_{1R3LA1}$ ، مقدار عمق نسبی حداکثر نهایی آب‌شستگی در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر بطور متوسط به ۰/۲۴ کاهش می‌یابد.

بررسی نتایج نشان داد که با افزایش طول کف‌بند به  $L_{A2}$  که معادل با ارتفاع سازه است، با اعمال زبری‌های مختلف در سازه‌های  $S_{1R1LA2}$ ،  $S_{1R2LA2}$  و  $S_{1R3LA2}$  مقدار عمق نسبی حداکثر نهایی آب‌شستگی در مقایسه با سازه  $S_{1R0LA2}$  در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر بطور متوسط از ۰/۳۳ به ۰/۲۱، ۰/۲۵ و ۰/۲۰ کاهش می‌یابد. همانطور که ملاحظه گردید، ایجاد زبری درشت‌دانه یک در میان، عملکرد بهتری در کاهش عمق آب‌شستگی دارد.



شکل ۱۱- تاثیر زبری بر کاهش عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۳ در شرایط یکسان طول کف‌بند: الف) کف‌بند به طول  $P/2$  و ب) کف‌بند به طول  $P$



شکل ۱۲- تاثیر زبری بر کاهش عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۵ در شرایط یکسان طول کف‌بند: الف) کف‌بند به طول  $P/2$  و ب) کف‌بند به طول  $P$

بررسی نتایج عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۵ نشان داد که در شرایط یکسان طول کف‌بند  $L_{A1}$ ، با اعمال زبری با قطر متوسط ۱/۱۵ سانتی‌متر، مقدار عمق نسبی حداکثر نهایی آب‌شستگی ( $d_{se}/P$ ) در سازه  $S_{2R1LA1}$

(چیدمان متراکم) در مقایسه با سازه  $S_2R_0L_{A1}$  (بدون اعمال زبری) در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر بطور متوسط از  $0/35$  به  $0/26$  کاهش می‌یابد. با تغییر مشخصات هندسی زبری‌ها در سازه  $S_2R_2L_{A1}$  (اعمال زبری با قطر متوسط  $5/2$  سانتی‌متر و چیدمان متراکم)، مقدار عمق نسبی حداکثر نهایی آب‌شستگی در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر بطور متوسط به  $0/14$  تغییر می‌یابد. مقایسه نتایج حاکی از آن است که با تغییر چیدمان زبری مذکور به یک در میان در سازه  $S_2R_3L_{A1}$ ، مقدار عمق نسبی حداکثر نهایی آب‌شستگی در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر بطور متوسط به  $0/21$  کاهش می‌یابد. با افزایش طول کفبند به  $L_{A2}$ ، اعمال زبری‌های مختلف در سازه‌های  $S_2R_1L_{A2}$ ،  $S_2R_2L_{A2}$  و  $S_2R_3L_{A2}$  مقدار عمق نسبی حداکثر نهایی آب‌شستگی را در مقایسه با سازه  $S_2R_0L_{A2}$  در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر بطور متوسط از  $0/33$  به  $0/22$ ،  $0/13$  و  $0/17$  کاهش می‌یابد. در این شیب کارگذاری زبری درشت دانه متراکم، عملکرد بهتری در کاهش عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی داشت.

## نتیجه‌گیری

یکی از مباحث مهم در حفاظت از رودخانه‌ها، ساخت سازه‌های کنترل تراز بستر برای جلوگیری از افت تراز بستر و ممانعت تخریب فزاینده بستر و دیواره‌های رودخانه و خسارت به سازه‌های احداث شده در آن‌ها می‌باشد. در تحقیق حاضر تاثیر نصب کفبند و ایجاد زبری با اندازه و چیدمان مختلف بر کاهش آب‌شستگی موضعی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب‌های کارگذاری  $1:3$  و  $1:5$  برای شرایط مختلف هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت.

مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که ایجاد زبری بزرگ مقیاس در تمامی دبی‌ها و زبری متوسط مقیاس در دبی‌های پایین، منجر به برقراری جریان غیر یکنواخت در طول سازه تا قبل از تشکیل پرش هیدرولیکی می‌گردد. با ظهور گردابه‌های نامتقارن در طول ناحیه غلطابه پرش هیدرولیکی نوسانی شکل گرفته در پایین دست سازه، آب‌شستگی به صورت نامتقارن و سه‌بعدی رخ می‌دهد. برای شرایط بدون اعمال زبری، در همه دبی‌ها و نیز اعمال زبری متوسط مقیاس، با افزایش دبی جریان، جریان عبوری از ابتدای سطح شیب‌دار تا قبل از تشکیل پرش هیدرولیکی به صورت رژیم سطحی بوده و با توجه به آنکه پرش هیدرولیکی به صورت متقارن تشکیل می‌گردد، الگوی آب‌شستگی نیز به صورت متقارن و دو بعدی شکل می‌گرفت. مشاهدات آزمایشگاهی حاکی از آن است که ایجاد کفبند با تاثیر بر موقعیت گردابه‌های اصلی ایجاد کننده گودال آب‌شستگی منجر به کاهش عمق آب‌شستگی و دور شدن محل وقوع آن از پی سازه مورد بررسی می‌شود.

مقایسه نتایج حاصل از تاثیر نصب کفبند با طول‌های مختلف بر عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در دامنه عمق‌های نسبی  $(V_0/P)$   $0/14$  تا  $0/2$  در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار در شیب  $1:3$  حاکی از آن است که با نصب کفبند به طول‌های  $(P/2) L_{A1}$  و  $(P) L_{A2}$ ، مقدار عمق نسبی حداکثر نهایی آب‌شستگی  $(d_{se}/P)$  در شرایط بدون اعمال زبری به ترتیب از  $0/41$  تا  $0/33$  به  $0/28$  و  $0/21$  در سازه  $S_1R_1$  (اعمال زبری با قطر متوسط  $1/15$  سانتی‌متر و چیدمان متراکم) کاهش یافت. با تغییر اندازه و چیدمان زبری به وضعیت متراکم و یک در میان با قطر متوسط  $5/2$  سانتی‌متر در سازه‌های  $S_1R_2$  و  $S_1R_3$ ، مقدار پارامتر  $d_{se}/P$  با نصب کفبند‌های مذکور بطور متوسط  $0/27$  و  $0/22$  حاصل شد.

تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که با تغییر شیب کارگذاری سازه به  $1:5$ ، در دامنه عمق‌های نسبی حداقل تا حداکثر با نصب کفبند به طول‌های  $L_{A1}$  و  $L_{A2}$ ، مقدار عمق نسبی حداکثر نهایی آب‌شستگی در شرایط بدون اعمال زبری به ترتیب از  $0/35$  تا  $0/33$  به  $0/26$  و  $0/22$  در سازه  $S_2R_1$  تقلیل یافت. با تغییر اندازه و چیدمان زبری در سازه‌های  $S_2R_2$  و  $S_2R_3$ ، مقدار پارامتر  $d_{se}/P$  با نصب کفبند‌های مذکور بطور متوسط  $0/14$  و  $0/19$  حاصل گردید. مقایسه نتایج عمق حداکثر آب‌شستگی نشان داد که برای شیب‌های مورد بررسی، انتخاب کفبند به طول برابر با ارتفاع سازه  $(L_{A2})$  و اعمال زبری در محدوده درشت‌دانه  $(V_0/K_s < 2/5)$ ، مطلوب‌ترین عملکرد را در کاهش عمق آب‌شستگی دارد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Ali, H. M., El Gendy, M. M., Miridan, A. M. H., Ali, A. A. M., and Abdelhaleem, F. S. F. (2014). Minimizing downstream scour due to submerged hydraulic jump using corrugated aprons. *Ain Shams Engineering Journal*, 5(4), 1059-1069.
- Aamir, M., and Ahmad, Z. (2017). Prediction of Local Scour Depth Downstream of an Apron Under Wall Jets. *Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Roorkee*, 375-385.
- Aamir, M., and Ahmad, Z. (2019). Estimation of maximum scour depth downstream of an apron under



- submerged wall jets. *Journal of Hydroinformatics*, 21(4), 523–540.
- Aamir, M., & Ahmad, Z. (2022). Effect of apron roughness on flow characteristics and scour depth under submerged wall jets. *Acta Geophysica*, 70(5), 2205-2221.
- Basic Design for Erosion Control in Streams and Channels Structures No. 417. (2009). *Islamic Republic of Iran Vice presidency for strategic planning and supervision*.
- Bhuiyan, F., Hey, R. D. and Wormleaton, P. R. (2007). Hydraulic evaluation of W-weir for river restoration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6), 596-609.
- CBIP. 1989. River behavior management and traing, CBIP Rep. *Central Board Irrigation power, New Dehli, India*.
- Chaudhary, R.K., Ahmad, Z. and Mishra, S.K. (2021). Scour downstream of a corrugated apron under wall jets. *Water Practice and Technology*, 17(1), 204-222.
- Dey, S. and Raikar, V. (2005). Scour in long contractions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(12), 1036–1049.
- Dey, S. and Raikar, R.V. (2007). Scour below a high vertical drop. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(5), 564-568.
- Esmaeili Varaki, M., Mahmoudi Kurdistani, S., and Noormohammadi, G. (2021). Scour Morphology Downstream of Submerged Block Ramps. *Journal of Applied Water Engineering and Research*. 1-10.
- Hoffmans, G.J.C.M. and H.J. Verhij. (1997). Scour Manual. A.A Balkema. Rotterdam. Brookfield
- Hoffmans Gijs, J.C.M. (1998). Jet scour in equilibrium phase. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(4), 430–437.
- Hamidifar, H. and Omid, M.H. (2010). Noncohesive Sediment Scour Downstream of an Apron. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 11(2), 17-28.
- Jarrett, R.D. (1984). Hydraulics of high gradient streams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(11), 1519–1539.
- 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), 1227-1241.
- López, C.D.L. F. (1993). Torrent control and streambed stabilization. [Food and Agriculture Organization of the United Nations](#), 166PP.
- Mehboudi, A. (2009). Experimental Study on Control of Scouring in Rivers due to Submerged Horizontal jet. M. SC. dissertation, *Power and Water University of Technology in IRAN, Tehran*
- Oertei, M. (2013). In-Situ Measurements On Cross-Bar Block Ramps. *Journal of Hydraulic Engineering Repository*, 111-119.
- Ortel, M. and Bung, D.B. (2015). Stability and scour development of bed material on crossbar block ramps. *International Journal of Sediment Research*, 30(4), 334–350.
- Petersen, M. (1986). River engineering. *Prentice Hall, USA*, 580PP.
- Pagliara, S. and Chiavaccini, P. (2006a). Energy dissipation on reinforced block ramps. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(3), 293–297.
- Pagliara, S. and Chiavaccini, P. (2006b). Energy dissipation on block ramps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(1), 41–48.
- Pagliara, S. and Chiavaccini, P. (2006c). Flow resistance of rock chutes with protruding boulders. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(6): 545–552.
- Pagliara, S. (2007). Influence of sediment gradation on scour downstream of block ramps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(11), 1241–1248.
- Pagliara, S., Das, R., and Carnacina, L. (2008). Flow resistance in large-scale roughness condition. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(11), 1285–1293.
- Pagliara, S. and Palermo, M. (2008). Scour control downstream of block ramps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(9), 1376-1382.
- Pagliara, S. and Palermo, M. (2009). Scour and hydraulic jump downstream of block ramps in expanding stilling basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 47(4), 503–511.
- Pagliara, S. and Palermo, M. (2010). Influence of tailwater depth and pile position on downstream of block ramps. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(2), 120–130.
- Pagliara, S. and Palermo, M. (2011). Effect of stilling basin geometry on clear water scour morphology downstream of a block ramp. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137(9), 593–601.
- Pagliara, S. and Palermo, M. (2013). Rock grade control structures and stepped gabion weirs: Scour analysis and flow features. *Acta Geophysica*, 61(1), 126-150.
- Pagliara, S. and Kurdistani, S.M. (2013). Scour downstream of crossvane structures. *Journal of Hydraulic-*

*Environ Repository*, 7(4), 236–242.

- Pagliara, S., Palermo, M., Kurdistani, S. M., and Hassanabadi, L. S. (2015). Erosive and hydrodynamic processes analysis downstream of low-head rock made control structures. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 3(2), 122–131.
- Pagliara, S., Radecki-Pawlik, A., Palermo, M., and Plesiński, K. (2017). Block ramps in curved rivers: morphology analysis and prototype data supported design criteria for mild bed slopes. *River Research and Applications*, 33(3), 427–437.
- Pagliara, S., Palermo, M., and Roy, D. (2020). Experimental investigation of erosion processes downstream of block ramps in mild curved channels. *Environmental Fluid Mechanics*, 20(8), 339–356.
- Rajaratnam, N. and Macdougall, R. K. (1983). Erosion by plane wall jets with minimum tailwater. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(7), 1061-1064.
- Robinson, K.M., Rice, C.E., and Kadavy, K.C. (1998). Design of rock chutes. *Transactions of the ASAE*, 41(3), 621–626.
- Sarkar, A., and Dey, S. (2005). Scour downstream of aprons caused by sluices. *In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 158(2), 55-64.
- Scurlock, S.M., Thornton, C.I., and Abt, S.R. (2012). Equilibrium scour downstream of three-dimensional grade control structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(2), 167–176.