



## Experimental investigation of apron installation level on variation of local scour at the downstream of block ramps

Sama Mirmohammadi<sup>1</sup> | Mahdi Esmaili Varaki<sup>2✉</sup> | Sahameddin Mahmoudi Kurdistani<sup>3</sup>

1. Department of water engineering, Faculty of Agriculture Science, University of Guilan, Rasht, Iran. Email: samamirmohammadi983@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture Science, University of Guilan, Rasht, Iran; Department of Water and Environmental Engineering, Caspian Sea Basin Research Center, University of Guilan, Rasht, Iran, Email: esmaeili@Guilan.ac.ir and [esmaeili.varaki@yahoo.com](mailto:esmaeili.varaki@yahoo.com)
3. IA.ING, Lecce, Italy, Email: kurdistani@iaing.it

### Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** June. 29, 2023

**Revised:** Aug. 15, 2023

**Accepted:** Aug. 21, 2023

**Published online:** Sep. 23, 2023

**Keywords:**

Apron,  
Block Ramp,  
River Restoration,  
Roughness, Scour.

### ABSTRACT

Maintaining the level of rivers bed, especially in a reach where their's slope increased due to many reasons specifically sand and gravel mining is an essential issue to the conservation of rivers. Grade control structures are eco-friendly structures that are common to stabilize river's beds and banks. Control and reduction of scour hole at the downstream basin is an important issue in the prevention of undercut and failure. In the current research, the effect of installation level of the apron on the variation of scour depth at downstream of the block ramp with slopes of 1:3 and 1:5 was considered experimentally under a range of flow discharges, the block ramp's surface roughness size and configuration. The comparison of the results indicated that there is a direct relationship between the level of the apron level and the scour depth so that by reducing the level of the apron to 1/10 and 1/6 of the block ramp height, the maximum scour depth increases in an average 36 and 41 for slope of 1:3 and 32 and 35 for slope of 1:5, respectively. By increasing the size of surface roughness such that the overpass flow regime changes to nappe flow, the reduction of installation of the level of block ramp does not noticeable effect on the increase of the scour depth.

Cite this article: Mirmohammadi, S., Esmaili Varaki, M., & Mahmoudi Kurdistani, S. (2023). Experimental investigation of installation level apron on variation of local scour at the downstream of block ramps, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (7), 1043-1061. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361474.669520>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361474.669520>



## مطالعه آزمایشگاهی اثر تراز کارگذاری کفبند بر تغییرات آب‌شستگی موضعی در پایین دست سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار

سما میرمحمدی<sup>۱</sup> | مهدی اسمعیلی ورکی<sup>۲</sup> | سهام‌الدین محمودی کردستانی<sup>۳</sup>

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: [samamirmohammadi983@gmail.com](mailto:samamirmohammadi983@gmail.com)

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: [esmaeili@guilan.ac.ir](mailto:esmaeili@guilan.ac.ir)

دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: [esmaeili@guilan.ac.ir](mailto:esmaeili@guilan.ac.ir)

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

### چکیده

### اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۴/۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۵/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۷/۱

### واژه‌های کلیدی:

کفبند، سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، احیاء رودخانه، زبری، آب‌شستگی.

حفظ تراز بستر رودخانه‌ها به‌ویژه در بازه‌هایی از مسیر آن که شیب بستر به دلایل مختلف از جمله برداشت شن و ماسه دچار افزایش موضعی شده است، از منظر حفاظت رودخانه اهمیت زیادی دارد. از جمله سازه‌های سازگار با محیط زیست که برای تثبیت بستر و کمک به پایداری دیواره‌های رودخانه کاربرد زیادی دارد، سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار می‌باشد. یکی از موضوعات مهم در حفظ پایداری این سازه‌ها، کنترل یا کاهش آب‌شستگی در پایین دست آن می‌باشد. در تحقیق حاضر تاثیر نصب کفبند در ترازهای مختلف نسبت به بستر اولیه در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۳ و ۱:۵ بر تغییرات عمق آب-شستگی برای المان‌های زبری با چیدمان و اندازه‌های مختلف نصب شده بر روی سطح سازه مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج نشان داد که تغییر تراز کف بند رابطه‌ی مستقیمی بر مقدار آب‌شستگی دارد به طوری که با کاهش آن از حالت هم تراز بستر به یک دهم و یک ششم ارتفاع سازه، عمق آب‌شستگی در شرایط بدون اعمال زبری برای شیب ۱:۳ به‌طور متوسط ۳۶ و ۴۱ درصد و برای شیب ۱:۵ به‌طور متوسط ۳۲ و ۳۵ درصد افزایش پیدا کرد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش اندازه زبری به‌گونه‌ای که رژیم جریان عبوری از روی سازه به ریزشی تغییر یابد، اثر کاهش تراز کارگذاری کفبند بر افزایش عمق آب‌شستگی ناچیز می‌گردد.

استناد: میرمحمدی، سما؛ اسمعیلی ورکی، مهدی؛ و محمودی کردستانی، سهام‌الدین (۱۴۰۲). مطالعه آزمایشگاهی اثر تراز کارگذاری کفبند بر تغییرات آب‌شستگی موضعی در پایین دست سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴ (۷)، ۱۰۶۱-۱۰۴۳.



© نویسنده‌گان.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361474.669520>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.361474.669520>

## مقدمه

جریان رودخانه‌ها با بستر آبرفتی، همواره با آب‌شستگی و انتقال رسوب همراه می‌باشد. در فرآیند آب‌شستگی، ذرات رسوبی از بستر جدا شده و به پایین‌دست منتقل می‌شوند. وقوع فرسایش و آب‌شستگی غیر طبیعی در بستر رودخانه‌ها که معمولاً ناشی از دخالت انسان در رودخانه است، منجر به تغییراتی در شکل مقطع عرضی، پلان مسیر و مشخصه‌های هیدرولیکی رودخانه‌ها می‌شود که معمولاً همراه با خسارات یا مشکلات مختلفی می‌باشد. یکی از روش‌های سازه‌ای برای حفاظت بازه‌های با شیب غیر تعادلی و ناپایدار در رودخانه‌ها، استفاده از سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار است که از نظر هیدرولیکی با انتقال جریان از تراز بالاتر به پایین‌تر، باعث اتلاف چشم‌گیر شیب خط انرژی جریان می‌شود. سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با تثبیت جداره و بستر رودخانه از طریق کاهش شیب و سرعت جریان، توان فرساینده‌ی جریان و به تبع آن وقوع آب‌شستگی را کنترل می‌کند (Esmaeili Varaki et al. 2021).

پارامترهای متعددی بر مشخصات هیدرولیکی جریان و آب‌شستگی در پایین‌دست سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار موثر است که از جمله آن‌ها می‌توان به دانه‌بندی و تراکم پوشش سنگ‌چین، شیب کارگذاری، دبی جریان، عمق جریان و عمق پایاب اشاره نمود.

Bormann & Julien (1991) آب‌شستگی پایین‌دست سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از تئوری پخشیدگی جت و پایداری ذرات و ترکیب با نظریه آستانه حرکت، معادلاتی را برای تخمین عمق حداکثر و طول آب‌شستگی پیشنهاد دادند. (D'Agostino & Ferro (2004 بر اساس یافته‌های Bormann & Julien (1991)، مطالعه آزمایشگاهی خود را در رابطه با آب‌شستگی پایین‌دست سازه‌های کنترل تراز بستر آبرفتی انجام دادند.

Robinson et al. (1998) پارامترهای شیب و اندازه سنگ‌چین را بر پایداری سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های انجام شده در محدوده شیب‌های مختلف ۲ تا ۴۰ درصد و سنگ‌های خرد شده گوشه‌دار نشان داد که ضعیف‌ترین بخش در طول سطوح شیب‌دار سنگی، بخش تاج ورودی آن است و هنگامی که اندازه پوشش سنگی افزایش یابد یا شیب استقرار آن کم شود، سطح شیب‌دار پایدارتر می‌شود.

Pagliara & Chiavaccini (2006a) به بررسی اتلاف انرژی در سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار پرداختند. مقایسه نتایج در محدوده شیب‌های ۰/۰۸ تا ۰/۳۳، طول سطوح شیب‌دار ۰/۸ تا ۱/۲ متر، عرض سطح شیب‌دار ۰/۲۵ متر با آرایش زبری‌های بزرگ مقیاس (LR) در محدوده  $h_c/d_{50} < 2/5$  (که در آن  $h_c$  عمق بحرانی و  $d_{50}$  قطری است که ۵۰ درصد ذرات از آن کوچک‌تر است)، متوسط مقیاس (IR) در محدوده  $2/5 < h_c/d_{50} < 6/6$  و کوچک مقیاس (SR) در محدوده  $6/6 < h_c/d_{50} < 6/6$  به صورت تصادفی و ردیفی نشان داد که حداکثر میزان افزایش استهلاک انرژی به مقدار ۱۲-۱۰ درصد و در محدوده تراکم زبری‌های بزرگ مقیاس ۳۵-۳۰ درصد حاصل می‌گردد. همچنین اتلاف انرژی از زبری کوچک مقیاس به بزرگ مقیاس، کاهش یافته و آرایش تصادفی اتلاف انرژی کم‌تری نسبت به وضعیت ردیفی دارد.

Pagliara & Chiavaccini (2006b) وضعیت اتلاف انرژی بر روی سطح شیب‌دار را در دامنه شیب‌های ۱:۱۲ تا ۱:۴ و با مصالح مختلف بستر از ماسه بسیار درشت تا سنگ ریزه کوچک مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج برای شرایط زبری مشابه نشان داد میزان اتلاف انرژی با پارامترهای نسبت عمق بحرانی به ارتفاع سازه و شیب آن رابطه‌ی معکوس داشته و با افزایش شیب، مقدار اتلاف انرژی نسبی کاهش می‌یابد. همچنین تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که استهلاک انرژی با افزایش زبری، افزایش می‌یابد.

Pagliara (2007) اثر دانه‌بندی رسوب بر آب‌شستگی پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار را در محدوده شیب‌های مختلف (۱:۱۲ تا ۱:۴)، سه مصالح مختلف برای بستر رسوبی و پارامتر غیریکنواختی در محدوده ۱/۱۷-۲/۷۷ مورد بررسی قرار داد. پدیده آب‌شستگی با توجه به تاثیر پارامترهای اصلی هیدرولیکی و هندسی، عدد فرود متغیر ذره ( $F_{d90}$  و  $F_{d50}$ ) و شیب سازه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مقایسه نتایج نشان داد که عدد فرود ذره  $F_{d50}$  رابطه معکوس با پارامتر غیریکنواختی و عمق حداکثر آب‌شستگی دارد. درحالی که با استفاده از عدد فرود ذره  $F_{d90}$ ، بین پارامتر غیریکنواختی و عمق حداکثر آب‌شستگی، رابطه مستقیم وجود دارد.

Pagliara & palermo (2008) آب‌شستگی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار را برای دامنه شیب‌های مختلف (۱:۱۲ تا ۱:۴)، دبی‌های مختلف و در حضور سه نوع آستانه در موقعیت‌های مختلف کارگذاری در حوضچه آرامش مورد مطالعه قرار دادند. مقایسه نتایج نشان داد که آستانه سنگی در مقایسه با آستانه دندانه‌دار و پیوسته، آب‌شستگی کم‌تری ایجاد می‌کند.

Pagliara & palermo (2008) کنترل آب‌شستگی و توزیع رسوب سطحی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار را



مورد مطالعه قرار دادند. آزمایش‌ها در دامنه شیب‌ها و دبی‌های مختلف، وجود آستانه سنگی در پایین دست سازه و در مصالح بستر غیریکنواخت انجام شد. مقایسه نتایج نشان داد بیش‌ترین آب‌شستگی در شیب ۰/۲۵ رخ می‌دهد. هم‌چنین شکل گودال آب‌شستگی در حضور آستانه‌ها براساس تاثیر موقعیت آستانه و شیب سازه به چهار نوع قابل تفکیک می‌باشد.

Pagliara & palermo (2009) آب‌شستگی و پرش هیدرولیکی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار را برای شرایط واگرایی حوضچه آرامش مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های انجام شده در محدوده شیب‌های مختلف (۱:۱۲ تا ۱:۴)، دو نسبت واگرایی (نسبت عرض حوضچه به عرض سطح شیب‌دار: ۱/۸ و ۲/۸) و مصالح بستر یکنواخت و غیریکنواخت تحت عمق‌های پایاب مختلف نشان داد با افزایش نسبت واگرایی حوضچه آرامش، عمق گودال آب‌شستگی افزایش می‌یابد. هم‌چنین افزایش عمق پایاب باعث کاهش عمق گودال آب‌شستگی می‌شود. مقایسه نتایج نشان داد که حوضچه‌های واگرا از نظر اتلاف انرژی نسبت به حوضچه آرامش منشوری عملکرد بهتری دارند.

Pagliara & palermo (2010) تاثیر عمق پایاب و موقعیت شمع بر آب‌شستگی پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش‌های انجام شده در محدوده شیب‌های مختلف (۱:۱۲ تا ۱:۴) با مصالح یکنواخت سطح شیب‌دار ۱۹/۷-۱۴/۸ میلی‌متر و چندین مصالح یکنواخت و غیریکنواخت بستر رسوبی پایین‌دست نشان داد که افزایش عمق پایاب تاثیر زیادی بر هندسه آب‌شستگی داشته و با افزایش آن، آب‌شستگی کاهش می‌یابد. هم‌چنین با بررسی سه ارتفاع شمع بلند، کوتاه و متوسط، مشخص گردید که با افزایش تراز شمع، عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد.

Pagliara *et al.* (2012) الگوی آب‌شستگی بستر متحرک در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار برای عدد فرود ذره، در محدوده شیب‌های مختلف (۱:۱۴، ۱:۸ و ۱:۴)، و دبی‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که آب‌شستگی بستر متحرک در مقایسه با آب‌شستگی آب زلال، تعادل در هندسه خود را از رسوبات بالادست تامین می‌کند. هم‌چنین هندسه گودال آب‌شستگی به سطح آب پایین دست، عدد فرود ذره و غلظت رسوب بستگی دارد.

Pagliara *et al.* (2015) فرآیند اتلاف انرژی و هندسه گودال آب‌شستگی از جمله نیمرخ طولی بی‌بعد را در حضور چهار سازه سرریز گابیونی-پلکانی، سازه‌های کنترل تراز بستر سنگی، سرریزهای متقاطع و سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج حاکی از آن بود که سرریزهای گابیونی-پلکانی، سازه‌های کنترل تراز بستر سنگی و سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار از نظر اتلاف انرژی رفتار مشابهی را برای نسبت استغراق پایین نشان می‌دهند. هم‌چنین افزایش میزان استغراق به دلیل تشکیل پرش هیدرولیکی روی سازه، منجر به کاهش میزان اتلاف انرژی در سرریزهای گابیونی-پلکانی و سازه‌های کنترل تراز بستر سنگی شده و به این ترتیب بیش‌ترین اتلاف انرژی بر روی سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار و کم‌ترین میزان اتلاف انرژی بر روی سرریزهای متقاطع رخ می‌دهد. عمق آب‌شستگی برای نسبت استغراق کم‌تر از یک برای سه سازه سرریزهای گابیونی-پلکانی، سازه‌های کنترل تراز شیب سنگی و سرریزهای متقاطع یکسان است ولی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار کم‌تر است.

Ortel & Bung (2015) پایداری و توسعه آب‌شستگی مصالح بستر در فضای بین دیواره عرضی ایجاد شده بر سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار را با هدف توسعه روابط جدید طراحی برای تعیین اندازه دانه مصالح مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های انجام شده در محدوده شیب‌های مختلف (۱:۵۰ تا ۱:۲۰)، دبی‌های مختلف، سه حوضچه آرامش و سه توزیع دانه‌بندی مختلف (۴، ۸ و ۱۶ mm) و دیواره‌های عرضی با ابعاد مختلف (ارتفاع ۱۲ و ۱۵ سانتی‌متر و ضخامت ۶ سانتی‌متر) نشان داد که توسعه آب‌شستگی وابستگی زیادی به  $D_{65}$  دارد و برای تضمین پایداری مصالح بستر و تشکیل لایه سپرشدگی، باید معیار  $D_{65} h_B^{-1} > 0.2$  (ارتفاع دیواره عرضی) برای دیواره عرضی سطوح شیب‌دار رعایت گردد.

Weitbrecht *et al.* (2016) پایداری سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار بدون ساختار را مورد مطالعه قرار دادند. پارامترهای مختلف سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار و مصالح بستر برای رسیدن به یک ترکیب مطلوب از نظر پایداری سطح سازه با حداکثر شیب در محدوده ۱ تا ۳ درصد، دبی‌های مختلف و با توزیع مختلف اندازه ذرات (ریزدانه و درشت‌دانه) مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج حاکی از آن بود که اگر نسبت قطر المان‌های زبری نصب شده بر روی سازه به  $d_{90}$  مصالح بستری رسوبی پایین‌دست (D/d<sub>90</sub>) بین ۶/۵ تا ۷/۴ و تراکم قرارگیری بلوک (λ) ۰/۲۵ باشد، سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار پایدار بوده و اگر تراکم قرارگیری بلوک ۰/۱۵ باشد، شیب تعادلی در محدوده ۳۰ تا ۵۰ درصد حاصل می‌شود. علاوه‌براین آزمایش‌های انجام شده در شرایط انتقال رسوب از بالادست، پایداری مصالح سنگی افزایش می‌یابد.

Pagliara et al. (2020) و Palermo et al. (2021)، مشخصات هندسی آبشستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب دار در قوس رودخانه با و بدون آستانه انتهایی را مورد بررسی قرار دادند. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در شرایط مذکور، الگوی آبشستگی سه بعدی بوده و تابعی از فاصله کارگذاری آستانه انتهایی، عمق پایاب، عدد فرود ذره و انحنا مسیر جریان بستگی دارد. همچنین روابط تجربی برای برآورد عمق آبشستگی ارائه شد.

Esmaeili Varaki et al. (2021) ریخت‌شناسی آبشستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر مستغرق را مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج برای شرایط آب زلال در سه شیب مختلف (۰/۱۴، ۰/۲ و ۰/۳۳)، سطح صاف سازه و سه اندازه زبری (۱۰ mm، ۷/۲، ۴) و در محدوده  $0.4 < \eta < 1/35$  (که در آن  $\eta$  معرف عدد فرود ذره است)، نشان داد که افزایش زبری سطح سازه کنترل تراز بستر سطح شیب دار در شرایط پرش هیدرولیکی مستغرق، عمق آبشستگی را کاهش می‌دهد. همچنین افزایش شیب کارگذاری سازه کنترل تراز بستر سطح شیب دار، مقدار عمق آبشستگی را افزایش می‌دهد.

Moayedi moshkaposhti et al. (2022) اثر نصب کفبند بر کاهش آبشستگی موضعی در پایین دست سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب دار را مورد مطالعه قرار دادند. مقایسه نتایج برای شیب‌های کارگذاری ۱:۳ و ۱:۵، نسبت عمق بحرانی به ارتفاع سازه ۰/۲-۰/۱۴، شرایط بدون زبری و زبری سطح سازه با اندازه‌های ۵/۲-۱/۱۵ سانتی‌متر با چیدمان‌های مختلف و نیز کفبند با طول‌های برابر و نصف ارتفاع سازه نشان داد که ایجاد کفبند رابطه مستقیم با کاهش عمق حداکثر نهایی آبشستگی دارد به گونه‌ای 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.

همانطور که اشاره شد، کنترل آبشستگی در پایین دست سازه‌های کنترل تراز بستر به عنوان یک سازه حفاظتی در پروژه‌های احیاء و مهندسی رودخانه از نظر اطمینان از پایداری سازه دارای اهمیت زیادی است. اگرچه تاکنون تحقیقات متنوعی در رابطه با مشخصات هیدرولیک جریان بر روی سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب دار، ریخت‌شناسی آبشستگی در پایین دست آن و اثر ابعاد کفبند بر کاهش برکاهش آبشستگی انجام شده است ولی، مشاهده‌های میدانی از وضعیت رودخانه‌هایی که به دلایل غیر طبیعی نظیر برداشت بی‌رویه شن و ماسه دچار افت تراز بستر پیش‌رونده به بالادست و نیز افزایش شیب بستر شده‌اند، حاکی از آن است که حتی با احداث سازه‌های کنترل تراز بستر برای پایدارسازی بازه‌های ناپایدار، به دلیل تداوم افت رقوم بستر رودخانه در پایین دست، وضعیت پایداری کفبند دچار مخاطره می‌شود (شکل ۱). یکی از راه‌کارهای قابل اجرا در این شرایط، اجرای سازه کفبند برای این سازه‌ها در تراز پایین تر از بستر فعلی رودخانه است. در تحقیق حاضر اثر تراز کارگذاری کفبند بر تغییرات آبشستگی موضعی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب دار تحت شرایط مختلف هیدرولیکی و زبری سطح سازه مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱. تصاویری از افت تدریجی بستر رودخانه در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب دار در رودخانه پلرود استان گیلان، الف) سال ۱۳۹۰ و ب) سال ۱۳۹۸

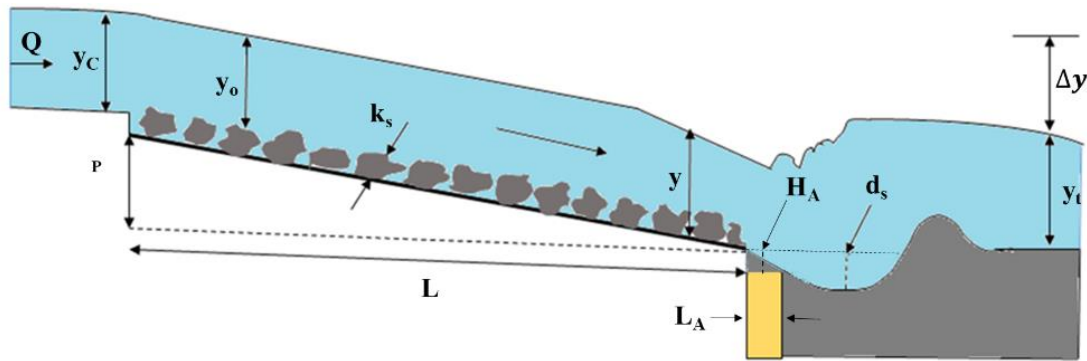
## مواد و روش

### تحلیل ابعادی

عوامل متعددی بر مقدار آبشستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب دار تاثیر می گذارد که هر یک تاثیری متفاوت بر روند آبشستگی داشته و باعث افزایش یا کاهش مقدار آن می شود. از این رو با توجه به محدودیت های موجود، پارامترهای مهم و موثر بر روی میزان آبشستگی پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب دار را می توان به صورت رابطه تابعی (۱) بیان نمود:

$$d_s = f_1(Q, B, W, P, y_c, y_0, y, y_t, \Delta y, H_A, L_A, D_{50}, k_s, \rho_s, \rho, g, \mu, S, R) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه،  $d_s$ : عمق حداکثر آبشستگی،  $Q$ : دبی جریان،  $B$ : عرض کانال،  $W$ : عرض سازه،  $P$ : ارتفاع سازه،  $y_c$ : عمق بحرانی جریان،  $y_0$ : عمق جریان روی سازه،  $y$ : عمق جریان یکنواخت در پای سازه،  $y_t$ : عمق پایاب،  $\Delta y$ : اختلاف ارتفاع تراز سطح آب در بالادست و پایین دست سازه،  $H_A$ : تراز نصب کف بند،  $L_A$ : طول کف بند،  $D_{50}$ : قطری که ۵۰ درصد ذرات از آن کوچک تر است،  $k_s$ : اندازه زبری،  $\rho_s$ : جرم مخصوص رسوبات بستر،  $\rho$ : جرم مخصوص آب،  $g$ : شتاب ثقل،  $\mu$ : لزجت دینامیک،  $S$ : شیب سازه و  $R$ : مشخصات هندسی زبری سطح سازه شامل اندازه و چیدمان آن ها می باشد. در شکل (۲) نمایی از پارامترهای هندسی موثر بر آبشستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب دار نشان داده شده است.



شکل ۲. نمایی از پارامترهای هیدرولیکی موثر بر آبشستگی پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب دار

با بکارگیری تئوری باکینگهام در تحلیل ابعادی، پارامترهای معرفی شده را می توان به صورت کمیت های بی بعد (۲) در آورد:

$$\frac{d_s}{P} = f_2\left(\frac{Q^2}{P^5 g}, \frac{B}{P}, \frac{W}{P}, \frac{y_c}{P}, \frac{y_t}{P}, \frac{\Delta y}{P}, \frac{H_A}{P}, \frac{L_A}{P}, \frac{k_s}{P}, \frac{D_{50}}{P}, \frac{\rho_s}{\rho}, S, R'\right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

از میان پارامترهای بی بعد استخراج شده، از اثر پارامتر  $B/W$  به دلیل ثابت بودن عرض فلوم و عرض سازه،  $L_A/P$  به دلیل ثابت بودن طول کف بند و همچنین از انحراف معیار هندسی به دلیل یکنواختی رسوبات مورد استفاده صرف نظر شده است. همچنین 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، مناسب تر می باشد. بنابراین رابطه (۲) بعد از ساده سازی به صورت رابطه (۳) خلاصه می شود:

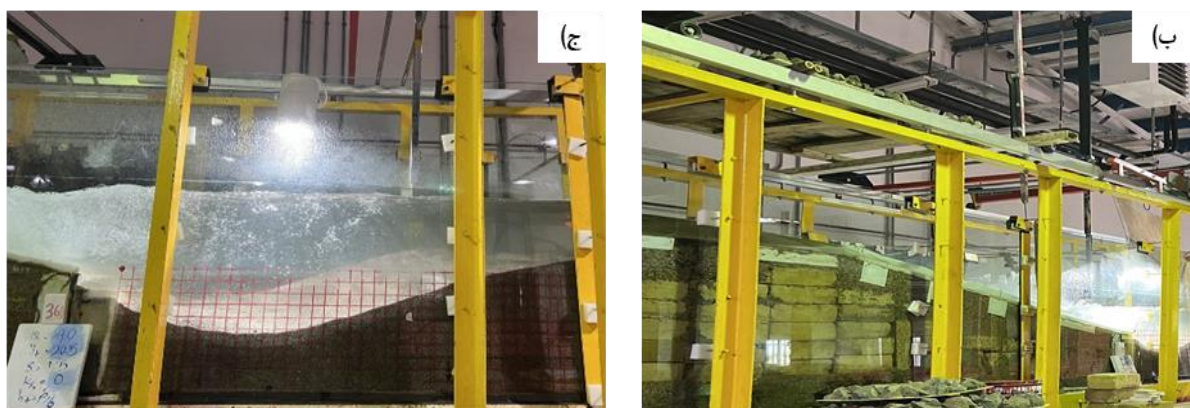
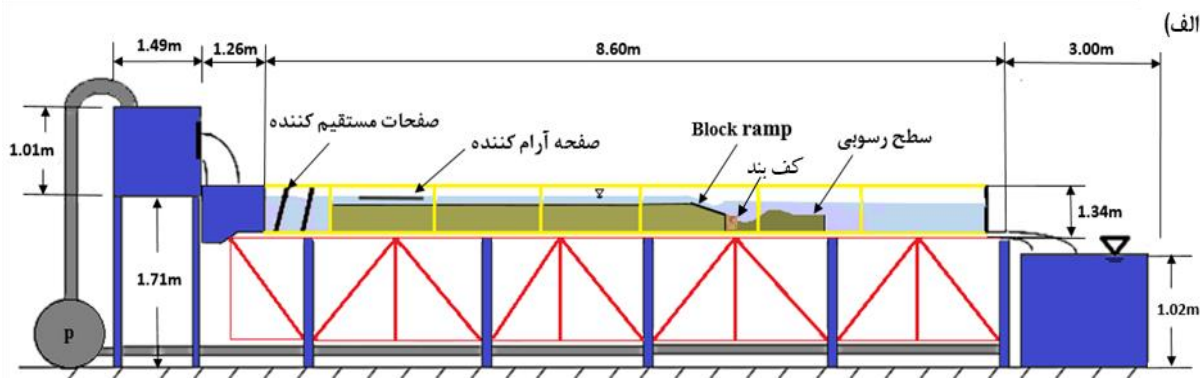
$$\frac{d_s}{P} = f_3\left(\eta, \frac{y_c}{P}, \frac{y_t}{P}, \frac{H_A}{P}, \frac{k_s}{P}, S, R'\right) \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه (۳)،  $\eta = Fr_d^2 (\Delta y / P)$  و  $Fr_d = Q / BP (g(G_s - 1) D_{50})^{0.5}$  عدد فرود بی بعد ذره می باشد. در این تحقیق، رابطه (۳) به عنوان یک

معادله پایه ای در انجام آزمایش ها بکار گرفته شد.

### تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش

برای دستیابی به اهداف مورد نظر در پژوهش حاضر، مدل آزمایشگاهی سازه کنترل تراز بستر سطح شیب دار در آزمایشگاه هیدرولیک و مدل های فیزیکی گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان طراحی و ساخته شد. آزمایش ها در فلومی به طول ۸/۱۵ متر، عرض ۰/۸۹ متر و عمق ۱ متر دارای سیستم بازچرخانی و دیواره هایی از جنس شیشه و کف فلزی اجرا شد. در شکل (۳) طرح کلی فلوم آزمایشگاهی و نمایی از آن نشان داده شده است.

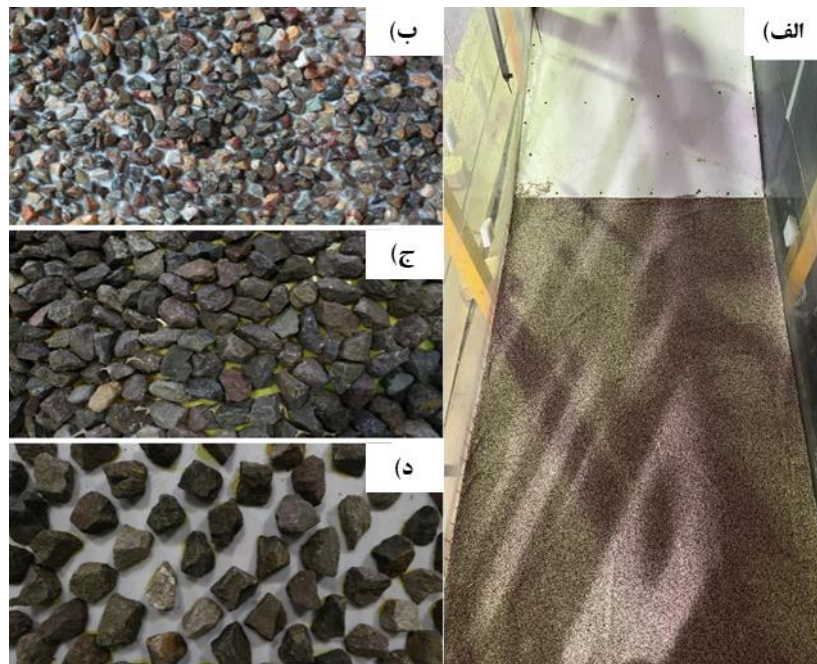


شکل ۳. الف) و ب) طرح کلی و نمای جانبی از فلوم آزمایشگاهی و ج) تصویری از گودال آبشستگی در پایین دست سازه مورد مطالعه

به منظور تامین دبی آزمایش‌ها، از یک پمپ سانتریفیوژ مجهز به دستگاه کنترل و تنظیم دور موتور که قادر به تامین دبی تا ۷۰ لیتر بر ثانیه بود، استفاده شد. برای تنظیم دقیق دبی جریان مورد نظر، از دستگاه کنترل دور موتور و برای اندازه‌گیری آن، دستگاه دبی‌سنج فراصوتی با دقت  $\pm 0.01$  لیتر بر ثانیه به کار گرفته شد. جریان آب از مخزن پایین دست به مخزن بالادست فلوم پمپاژ شده و پس از عبور از یک حوضچه آرامش، وارد فلوم می‌گردد. به جهت جلوگیری از شکل‌گیری جریان‌های عرضی در ورودی آن، از مستقیم‌کننده جریان در ابتدای فلوم استفاده شد. در انتها با ریزش جریان از فلوم به مخزن جمع‌آوری پایین دست، آب مجدداً توسط لوله‌های برگشتی به مخزن ورودی منتقل می‌گردد. برای تنظیم عمق جریان در فلوم از دریچه پروانه‌ای که در انتهای آن نصب شده بود استفاده شد.

سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار مورد بررسی در این تحقیق، از صفحات پلگسی گلاس و PVC با شیب‌های کارگذاری ۱:۳ و ۱:۵ به صورت هم‌عرض با فلوم (عرض ۰/۸۹ متر) و اختلاف ارتفاع ۰/۳ متر ساخته و در فلوم نصب شد. با توجه به اهداف این تحقیق، برای بررسی اثر تراز کارگذاری کفبند بر آبشستگی موضعی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، کفبند با طول  $P/3$  علاوه بر شرایط هم تراز بستر، در دو تراز مختلف  $P/6$  و  $P/10$  در زیر بستر نصب شد.

به منظور بررسی اثر اندازه و چیدمان زبری بر کاهش آبشستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، ۲ اندازه زبری (قطر سنگ‌چین‌ها)، ۱/۱۵ و ۵/۲ سانتی‌متر که براساس طبقه‌بندی Pagliara & Chiavaccini (2006a) به ترتیب زبری متوسط مقیاس (IR) در محدوده  $2/5 < y_0/k_s$  بود، تهیه و این زبری‌ها بر روی صفحات PVC به ضخامت ۰/۲ سانتی‌متر با دو چیدمان متراکم و یک در میان با استفاده از چسب صنعتی چسبانیده و روی سازه مورد مطالعه نصب شدند. نمایی از سطوح زبری مورد بررسی در تحقیق حاضر در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴. تصاویری از: الف) بستر رسوبی و سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار بدون 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 پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، پس از الک کردن ماسه معدنی، مصالح یکنواخت با قطر ۰/۷۳ میلی‌متر تهیه و در بازه‌ای به طول ۱/۵، عرض ۰/۸۹ و ارتفاع ۰/۳ متر در پایین دست سازه مورد مطالعه قرار داده شد. همچنین، بالادست و پایین‌دست بازه مورد بررسی با رسوبات درشت دانه که در مرحله الک کردن باقی مانده بود، پوشانده شد. به طور کلی پدیده آب‌شستگی یک فرآیند زمان‌بر بوده و تعیین زمان تعادل در مطالعه مربوط به آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. (Rajaratnam & Macdougall (1983) با مطالعه آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست جت‌های ریزشی اعلام کردند که بعد از گذشت ۳۰ دقیقه تغییر قابل ملاحظه‌ای در هندسه آب‌شستگی رخ نمی‌دهد. این زمان در مطالعه Pagliara & Palermo (2013) برابر با ۴۰ دقیقه، در بررسی Jüstrich *et al.* (2016) معادل با ۹۰ دقیقه، در مطالعه Scurlock *et al.* (2012) ۱۲ ساعت و در تحقیق Bhuiyan *et al.* (2007) ۲ تا ۴ روز در نظر گرفته شده است. در این تحقیق برای بدست آوردن زمان تعادل آب‌شستگی چندین آزمایش ۲۴ ساعته انجام شد. مشاهدات آزمایشگاهی و اندازه‌گیری عمل لحظه‌ای آب‌شستگی نشان داد که پس از گذشت ۶ ساعت هیچ تغییر مهمی در گودال آب‌شستگی مشاهده نشد از این رو، در همه آزمایش‌ها، اندازه‌گیری‌ها برای مدت زمان یاد شده دنبال شد.

در هر یک از آزمایش‌ها، بعد از نصب سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، کف‌بند و تراز کردن بستر رسوبی، صفحه نازکی از جنس پلکسی گلاس روی بستر رسوبی تراز شده قرار می‌گرفت تا مانع از شکل‌گیری آب‌شستگی ناگهانی در ابتدای آزمایش‌ها گردد. سپس جریان به تدریج وارد فلول آزمایشگاهی می‌شد. پس از تنظیم دقیق دبی جریان این صفحه به آرامی برداشته و عمق پایاب با مانور دریچه انتهایی فلول و با عمق سنج نصب شده با دقت  $\pm 0/01$  میلی‌متر معادل با  $3/5\%$  که در آن جریان پایین‌دست دارای سرعت کمتر از آستانه حرکت باشد، تنظیم می‌گردید.

در کلیه آزمایش‌ها، توسعه زمانی گودال آب‌شستگی به مدت ۶ ساعت در گام‌های زمانی مختلف به وسیله یک دستگاه دوربین دیجیتال، تصویربرداری شد و سپس با استفاده از نرم افزار Grapher15، نیمرخ زمانی آب‌شستگی استخراج و در انتهای هر آزمایش نیمرخ نهایی آب‌شستگی با استفاده از عمق سنج لیزری با دقت  $\pm 1$  میلی‌متر اندازه‌گیری می‌شد.

در این تحقیق برای بررسی تاثیر تراز کارگذاری کف‌بند و زبری سطح سازه بر تغییرات آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، در مجموع ۹۶ آزمایش برای تراز کارگذاری کف‌بند به صورت هم‌سطح با بستر و مدفون، اندازه و چیدمان‌های مختلف زبری‌ها سطح سازه 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

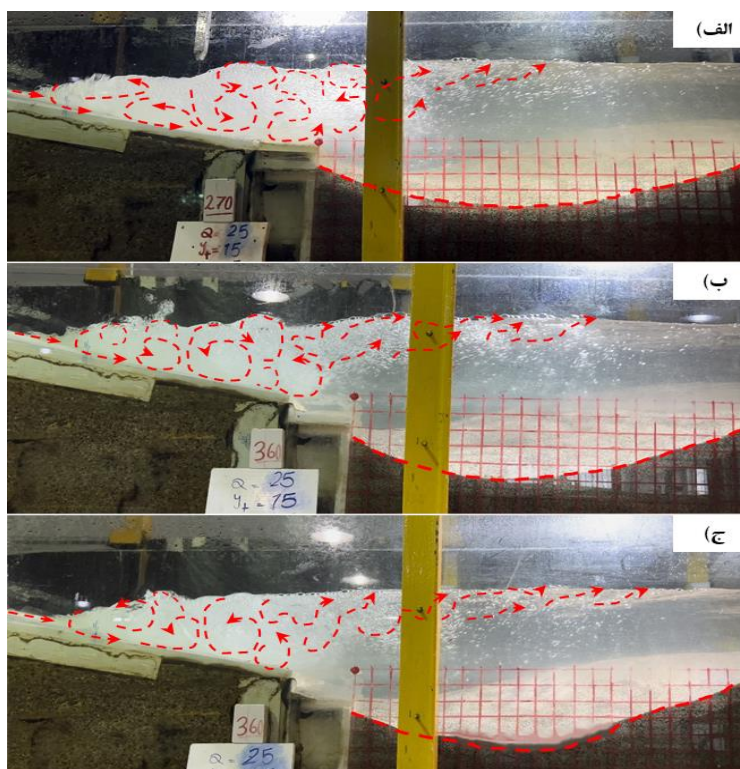
نماد	معرفی پارامتر	واحد	محدوده تغییرات
S	شیب سازه	%	۳۳-۲۰
q	دبی واحد عرض	m <sup>3</sup> /m.s	۰/۰۲۸-۰/۰۴۵
y <sub>c</sub> /P	نسبت عمق بحرانی به ارتفاع سازه	بی‌بعد	۰/۱۴-۰/۲
η	معرف عدد فرود ذره	بی‌بعد	۰/۳-۱
k <sub>s</sub>	ارتفاع زبری سازه	cm	۱/۱۵-۵/۲
H <sub>p</sub>	تراز کفبند	cm	۰ - P/۶

## نتایج و بحث

بررسی تاثیر تراز کارگذاری کفبند بر توسعه زمانی نیمرخ آب‌شستگی پایین دست سازه کنترل تراز بستر

رژیم جریان عبوری از سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار به صورت ریزشی، انتقالی و سطحی طبقه‌بندی می‌شود. بر این اساس، رژیم جریان ریزشی در  $y < k_s$ ، رژیم جریان انتقالی در  $k_s < y < 1.5k_s$  و رژیم جریان سطحی در  $y > 1.5k_s$  رخ می‌دهد که  $y$  عمق متوسط جریان و  $k_s$  اندازه مصالح سنگی نصب شده بر روی سازه می‌باشد (Oertei, 2013). در تحقیق حاضر، با توجه به محدوده عمق جریان (۱/۵ تا ۳/۵ سانتی‌متر) و دامنه زبری‌های (۱/۱۵ تا ۵/۲ سانتی‌متر) نصب شده بر روی سازه‌ها، برای شرایط زبری متوسط مقیاس جریان از نوع سطحی و برای زبری بزرگ مقیاس جریان از نوع ریزشی به وقوع پیوست.

پرش هیدرولیکی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار می‌تواند روی بستر رسوبی پایین دست، سطح سازه و یا ترکیبی از آن‌ها تشکیل شود. از آنجاکه بیشترین بخش پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش پایین دست سازه ایجاد می‌شود، ایجاد کفبند می‌تواند قسمت همراه با تنش برشی بالای جریان در محدوده غلظابه پرش هیدرولیکی که توان فرساینده‌گی بالایی دارد را از بستر رسوبی دور نگه داشته و منجر به کاهش عمق آب‌شستگی شود (Esmaeili Varaki et al. 2021). با کاهش تراز قرارگیری کفبند، به تدریج با فرسایش مصالح بستر، سطح رویی آن آشکار و نقش یک پله در پای سازه را ایفا می‌کند. این نقش مشابه با وضعیتی است که رودخانه‌ها در بازه پایین دستی خود دچار افت تراز بستر شده و به تدریج، بستر رودخانه در پای سازه پایین بیافتد. در شکل (۵) اثر حضور کفبند با ترازهای مختلف کارگذاری بر الگوی جریان در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار نشان داده شده است.



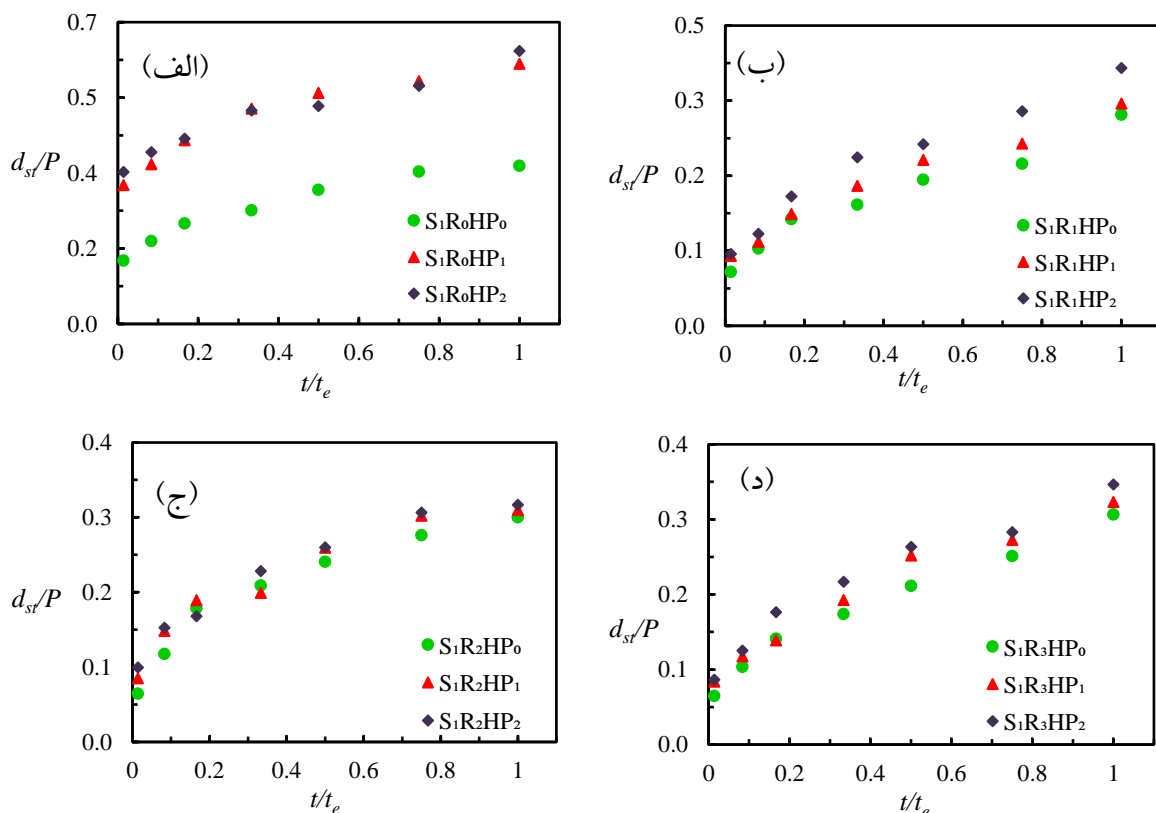
شکل ۵. الگوی پرش هیدرولیکی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار برای ترازهای مختلف کارگذاری کفبند: الف) هم تراز بستر،

ب) P/۱۰ و ج) P/۶

مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که نرخ آب‌شستگی عمودی در مرحله آغازین و در دقایق اولیه از آزمایش، با شدت بیشتری اتفاق می‌افتد، اما با گذشت زمان به تدریج از شدت آب‌شستگی کاسته و توسعه طولی گودال آب‌شستگی شکل خواهد گرفت. با نزدیک شدن به دقایق پایانی، تغییرات محسوسی در روند آب‌شستگی مشاهده نشد و گودال به حالت پایدار و تعادلی درآمد. مشاهدات آزمایشگاهی حاکی از آن بود که در دقایق ابتدایی با ایجاد یک گردابه ساعت‌گرد، حداکثر آب‌شستگی در مجاورت پای کف‌بند رخ می‌دهد و با گذشت زمان با فعالیت گردابه‌ها، گودال آب‌شستگی به پایین دست رشد طولی نموده و به تدریج کاملاً توسعه یافته و تغییرات آن ناچیز می‌شود.

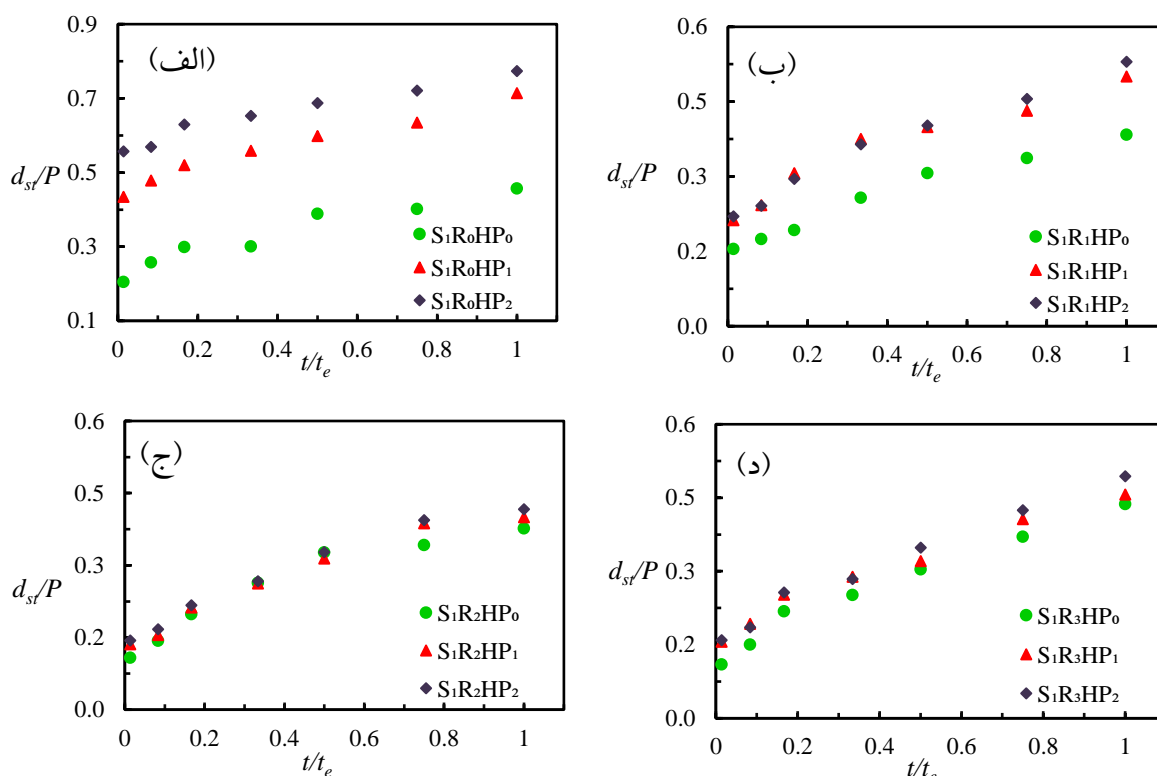
نتایج حاصل از مقایسه توسعه زمانی عمق آب‌شستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار برای شیب ۱:۳ و ۱:۵ برای دبی‌های حداقل و حداکثر، اعمال‌های زبری با چیدمان و اندازه‌های مختلف در شکل‌های (۶) تا (۹) نشان داده شده است. در این شکل‌ها، نمایه  $S_1$  معرف شیب سازه، نمایه‌های  $R_0, R_1, R_2$  و  $R_3$  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  $HP_0, HP_1$  و  $HP_2$  به ترتیب برای معرفی نصب کف‌بند هم‌تراز بستر، تراز کارگذاری  $P/10$  و تراز کارگذاری  $P/6$  استفاده شد.

مقایسه مقادیر عمق نسبی حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی ( $d_{st}/P$ ) برای دبی حدافل ( $q=0/028 \text{ m}^3/\text{m.s}$  و  $y/P=0/14$ ) و شیب ۱:۳ در سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با و بدون اعمال زبری در زمان‌های نسبی  $0/14$  و  $0/75$  (به ترتیب ۵ و ۲۷۰ دقیقه پس از شروع آزمایش) در جدول (۲) نشان داد که با کاهش تراز گذاری کف بند به  $P/10$ ، پارامتر  $d_{st}/P$  در مقایسه با کف‌بند هم‌تراز بستر ۸ تا ۵۴ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با تغییر تراز کارگذاری کف‌بند به  $P/6$ ، پارامتر  $d_{st}/P$  در مقایسه با کف‌بند هم‌تراز بستر، ۱۰ تا ۵۸ درصد افزایش پیدا کرد. بررسی نتایج نشان داد که با افزایش دبی جریان به مقدار حداکثر ( $q=0/045 \text{ m}^3/\text{m.s}$  و  $y/P=0/2$ ) در زمان‌های نسبی  $0/14$  و  $0/75$ ، کاهش تراز کارگذاری کف‌بند به  $P/10$ ، پارامتر  $d_{st}/P$  را در مقایسه با کف‌بند هم‌تراز بستر ۹ تا ۵۳ درصد افزایش داد. همچنین با تغییر تراز کارگذاری کف‌بند به  $P/6$ ، عمق نسبی حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی ۱۳ تا ۶۳ درصد افزایش یافت.



شکل ۶. تاثیر تراز کارگذاری کف‌بند بر توسعه زمانی عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۳ و دبی

$0/028 \text{ m}^3/\text{m.s}$ : 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 ۷. تاثیر تراز کارگذاری کفبند بر توسعه زمانی عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۳ و دبی

۰/۰۴۵ m<sup>3</sup>/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. تاثیر تراز کارگذاری کفبند بر توسعه زمانی عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۳ برای زمان‌های مشخصه  $t/t_e = ۰/۰۱۴$  و  $t/t_e = ۰/۰۷۵$

نام سازه	q (m <sup>3</sup> /m.s)	y <sub>c</sub> /P	درصد افزایش عمق آب‌شستگی در	
			تراز کارگذاری (HP <sub>1</sub> ) کفبند P/۱۰	تراز کارگذاری (HP <sub>2</sub> ) کفبند P/۶
			t/t <sub>e</sub> =۰/۰۷۵	t/t <sub>e</sub> =۰/۰۱۴
S <sub>1</sub> R <sub>0</sub>	۰/۰۲۸	۰/۱۴	۳۷	۵۸
			۵۴	۴۴
S <sub>1</sub> R <sub>1</sub>	۰/۰۲۸	۰/۱۴	۱۲	۲۵
			۲۳	۲۴
S <sub>1</sub> R <sub>2</sub>	۰/۰۲۸	۰/۱۴	۹	۳۵
			۲۴	۱۰
S <sub>1</sub> R <sub>3</sub>	۰/۰۲۸	۰/۱۴	۱۲	۲۵
			۲۱	۱۳
S <sub>1</sub> R <sub>3</sub>	۰/۰۲۸	۰/۱۴	۸	۲۵
			۲۳	۱۱
S <sub>1</sub> R <sub>3</sub>	۰/۰۴۵	۰/۲۰	۹	۳۱
			۳۰	۱۳

مقایسه نتایج نشان داد با اعمال زبری ۱/۱۵ سانتی‌متر با چیدمان متراکم در سازه S<sub>1</sub>R<sub>1</sub>HP<sub>1</sub>، مقدار عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی برای زمان‌های نسبی ۰/۰۱۴ و ۰/۰۷۵ در تراز کارگذاری P/۱۰ نسبت به شرایط مشابه در سازه S<sub>1</sub>R<sub>1</sub>HP<sub>0</sub>، در دبی حداقل به ترتیب ۲۳ و ۱۲ درصد زیاد شد و با افزایش دبی جریان به مقدار حداکثر، به ترتیب ۲۷ و ۲۲ درصد افزایش پیدا کرد. با کاهش تراز کارگذاری کفبند به ۶، مقدار پارامتر  $d_{st}/P$  در دبی حداقل به ترتیب ۲۵ و ۲۴ درصد و در دبی حداکثر ۳۰ و ۲۶ درصد افزایش یافت. با افزایش اندازه المان‌های زبری به ۵/۲ سانتی‌متر با چیدمان متراکم در سازه S<sub>1</sub>R<sub>2</sub>HP<sub>1</sub>، مقدار پارامتر  $d_{st}/P$  در زمان‌های نسبی



۰/۰۱۴ و ۰/۷۵ در دبی حداقل نسبت به شرایط مشابه در سازه  $S_1R_2HP_0$  در تراز کارگذاری  $P/10$  به ترتیب ۲۴ و ۹ درصد و در دبی حداکثر ۲۱ و ۱۲ درصد افزایش پیدا کرده است. با کاهش تراز کارگذاری کفبند به  $P/6$ ، پارامتر  $d_{st}/P$  در دبی حداقل به ترتیب ۳۵ و ۱۰ درصد و در دبی حداکثر ۲۵ و ۱۳ درصد زیاد شد.

بررسی نتایج حاکی از آن است که با تغییر چیدمان زبری با قطر  $5/2$  سانتی‌متر از متراکم به یک در میان در سازه  $S_1R_3HP_1$ ، مقدار پارامتر  $d_{st}/P$  در تراز کارگذاری  $P/10$  برای زمان‌های نسبی  $0/014$  و  $0/75$  در دبی حداقل به ترتیب ۲۳ و ۸ درصد و در دبی حداکثر ۳۰ و ۹ درصد نسبت به شرایط مشابه در سازه  $S_1R_3HP_0$ ، زیاد می‌شود. با کاهش تراز کارگذاری کفبند به  $P/6$  در سازه  $S_1R_3HP_2$ ، در دبی حداقل پارامتر  $d_{st}/P$  در زمان‌های نسبی مشخصه به ترتیب ۲۵ و ۱۱ درصد و در دبی حداکثر ۳۱ و ۱۳ درصد افزایش یافت.

مقایسه تغییرات عمق لحظه‌ای آب‌شستگی در سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب  $1:3$ ، نشان داد که با افزایش اندازه زبری، تاثیر آن‌ها بر استهلاک انرژی جریان عبوری از سطح سازه بیشتر شده و به این ترتیب، توان فرساینده‌گی جریان در پای سازه کاهش می‌یابد.

اگرچه با کاهش تراز کارگذاری کفبند، بخش غلطابه پرش هیدرولیکی که بیشترین سهم از توان فرساینده‌گی در حوضچه آرامش را به خود اختصاص می‌دهد، تماس بیشتری با بستر فرسایش پذیر داشته و در سازه کنترل تراز بستر با سطح صاف و زبری متوسط، عمق آب شستگی را به میزان زیادی افزایش داده است ولی، افزایش اندازه زبری‌ها، توانسته است با کاهش سرعت جریان جت ورودی به حوضچه آرامش، نقش مثبتی در کاهش فرساینده‌گی داشته باشد. به این ترتیب می‌توان در این شیب کارگذاری سازه کنترل تراز بستر، نصب کف بند را در تراز پایین‌تر از بستر اولیه را با درجه بالاتری از اعتماد به پایداری سازه انجام داد.

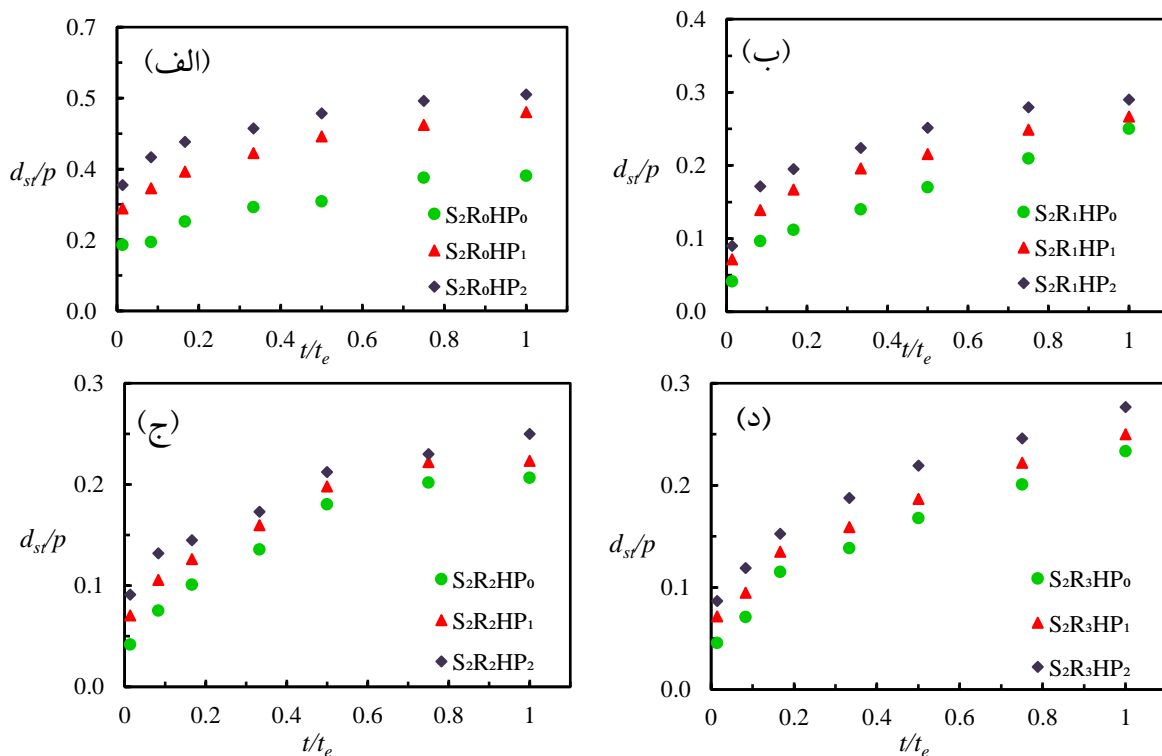
مقایسه مقادیر پارامتر  $d_{st}/P$  در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب  $1:5$  برای دبی حداقل و در شرایط با و بدون اعمال زبری در زمان‌های نسبی  $0/014$  و  $0/75$  نمودارهای شکل (۸) و (۹) و نیز جدول (۳) نشان داد که با کاهش تراز کارگذاری کفبند به  $P/10$  مقدار  $d_{st}/P$  نسبت به کفبند هم‌تراز بستر در زمان‌های نسبی مشخصه به ترتیب ۱۰ تا ۴۲ درصد افزایش یافت. با تغییر تراز کارگذاری کفبند به  $P/6$ ، مقدار  $d_{st}/P$  نسبت به کفبند هم‌تراز بستر در زمان‌های نسبی مورد بررسی، ۹ تا ۳۶ درصد بیشتر شد. مقایسه نتایج نشان داد برای دبی حداکثر در زمان‌های نسبی مشخصه، پارامتر  $d_{st}/P$  در تراز کارگذاری کفبند  $P/10$  در مقایسه با کفبند هم‌تراز بستر به ترتیب ۱۲ تا ۵۴ و با کاهش تراز کارگذاری کفبند به  $P/6$ ، نسبت به کفبند هم‌تراز بستر، ۱۵ تا ۵۶ درصد افزایش یافت.

با اعمال زبری  $1/15$  سانتی‌متر با چیدمان متراکم در سازه  $S_2R_1HP_1$ ، پارامتر  $d_{st}/P$  نسبت به شرایط مشابه در سازه  $S_2R_1HP_0$  در تراز کارگذاری  $P/10$  برای زمان‌های نسبی مذکور در دبی حداقل به ترتیب ۴۲ و ۲۲ درصد و در دبی حداکثر ۳۶ و ۲۱ درصد بیشتر شد. با کاهش تراز کارگذاری کفبند به  $P/6$ ، پارامتر  $d_{st}/P$  در دبی حداقل برای زمان‌های نسبی مورد بررسی به ترتیب ۵۴ و ۲۵ درصد و در دبی حداکثر ۵۶ و ۲۳ درصد افزایش پیدا کرد.

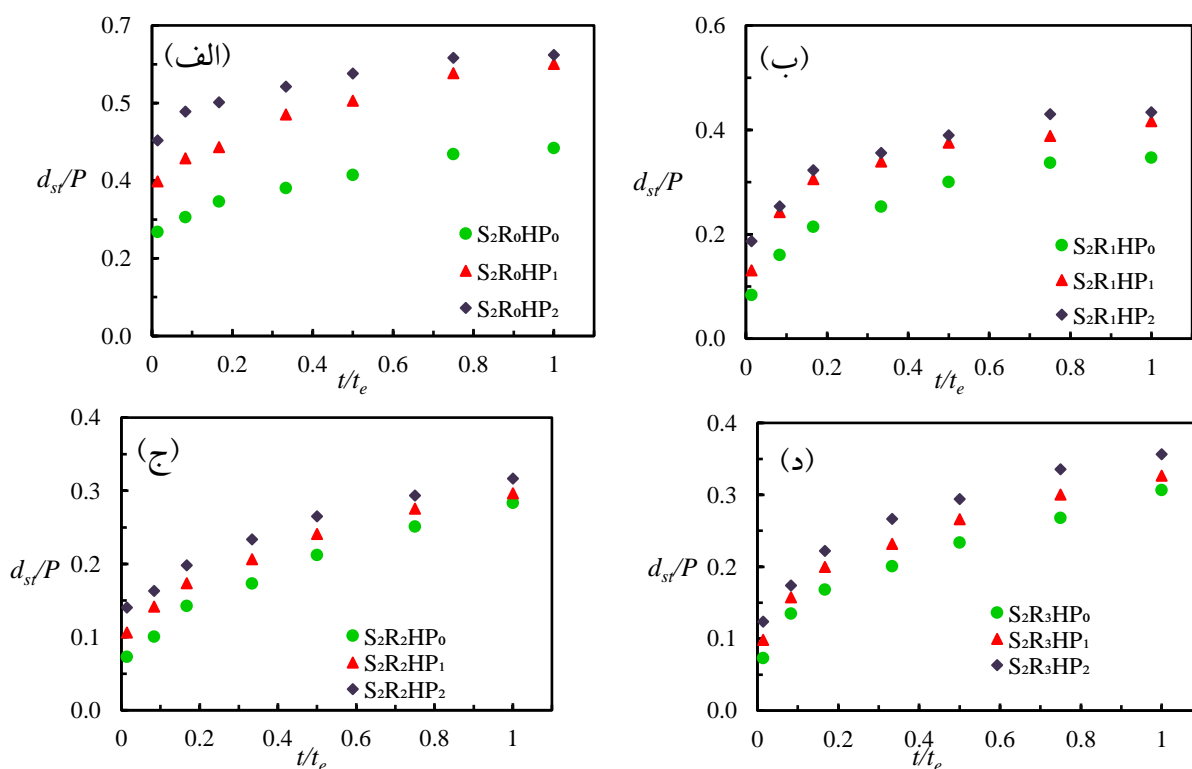
مقایسه نتایج نشان داد با اعمال زبری  $5/2$  سانتی‌متر با چیدمان متراکم در سازه  $S_2R_2HP_1$ ، پارامتر  $d_{st}/P$  برای زمان‌های نسبی مشخصه در تراز کارگذاری  $P/10$  نسبت به شرایط مشابه در سازه  $S_2R_2HP_0$ ، در دبی حداقل به ترتیب ۴۰ و ۱۰ درصد و با افزایش دبی جریان به مقدار حداکثر به ترتیب ۳۱ و ۹ درصد بیشتر شد. با کاهش تراز کارگذاری کفبند به  $P/6$ ، پارامتر  $d_{st}/P$  در دبی حداقل برای زمان‌های نسبی مشخصه به ترتیب ۵۴ و ۱۲ درصد و در دبی حداکثر ۴۸ و ۱۵ درصد افزایش یافت.

با تغییر چیدمان زبری  $5/2$  سانتی‌متر از متراکم به یک در میان در سازه  $S_2R_3HP_1$  در مقایسه با سازه  $S_2R_3HP_0$ ، پارامتر  $d_{st}/P$  در تراز کارگذاری  $P/10$  برای زمان‌های نسبی مذکور برای دبی حداقل به ترتیب ۳۶ و ۱۰ درصد و در دبی حداکثر ۲۶ و ۱۱ درصد افزایش پیدا کرد. مقایسه نتایج حاکی از آن است که با کاهش تراز کارگذاری کفبند به  $P/6$  در دبی حداقل مقدار پارامتر  $d_{st}/P$  برای زمان‌های مشخصه به ترتیب ۴۷ و ۱۹ درصد و در دبی حداکثر ۴۱ و ۲۱ درصد بیشتر می‌گردد.

همانطور که بیان شد افزایش اندازه زبری باعث استهلاک انرژی، کاهش سرعت جریان و کاهش عدد فرود شده و به تبع آن عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد. در نتیجه سازه عملکرد بهتری را در حالت نصب کفبند در تراز پایین‌تر از بستر اولیه و با کاهش شیب سازه کنترل تراز بستر و افزایش اندازه زبری، در کاهش مقدار عمق آب‌شستگی دارد.



شکل ۸. تاثیر تراز کارگذاری کفبند بر توسعه زمانی عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۵ و دبی  $0.28 \text{ m}^3/\text{s}$  (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 ۹. تاثیر تراز کارگذاری کفبند بر توسعه زمانی عمق حداکثر لحظه‌ای آب‌شستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۵ و دبی  $0.45 \text{ m}^3/\text{s}$  (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

جدول ۳. 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  $t/t_c = 0.14$  و  $t/t_c = 0.75$

نام سازه	$q(m^3/m.s)$	$y_c/P$	درصد تغییر عمق آب شستگی در	
			تراز کارگذاری (HP <sub>1</sub> ) کفبند P/۱۰	تراز کارگذاری (HP <sub>2</sub> ) کفبند P/۶
			$t/t_c = 0.14$	$t/t_c = 0.75$
S <sub>2</sub> R <sub>0</sub>	-/۰.۲۸	-/۰.۱۴	۳۶	۴۵
	-/۰.۴۵	-/۰.۲۰	۳۱	۳۵
	-/۰.۲۸	-/۰.۱۴	۴۲	۲۵
S <sub>2</sub> R <sub>1</sub>	-/۰.۴۵	-/۰.۲۰	۲۱	۲۳
	-/۰.۲۸	-/۰.۱۴	۱۰	۱۲
S <sub>2</sub> R <sub>2</sub>	-/۰.۴۵	-/۰.۲۰	۹	۱۵
	-/۰.۲۸	-/۰.۱۴	۱۰	۱۹
S <sub>2</sub> R <sub>3</sub>	-/۰.۴۵	-/۰.۲۰	۲۶	۲۱

بررسی تاثیر تراز کارگذاری کفبند و اعمال زبری بر عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر مقایسه نتایج تاثیر تراز کارگذاری کفبند بر عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی ( $d_{se}/P$ ) در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر با شیب ۱:۳ برای شرایط با و بدون اعمال زبری در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

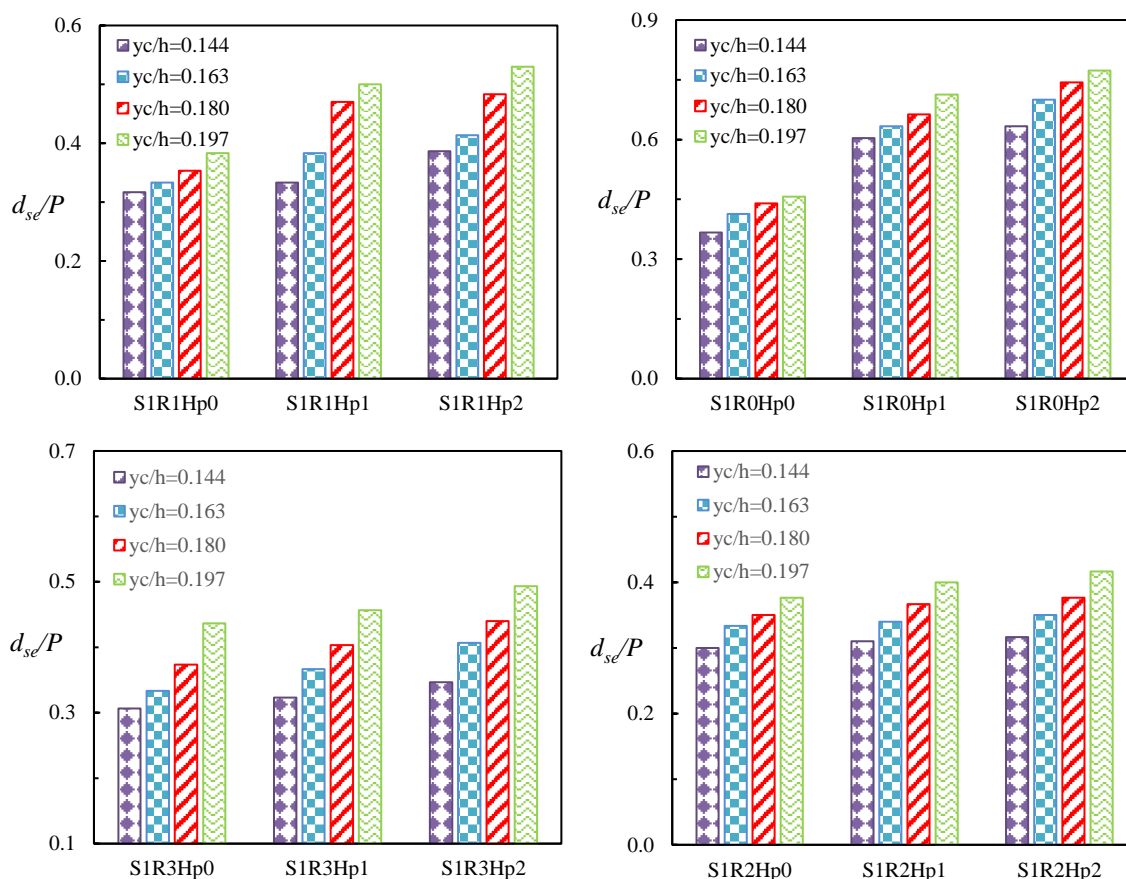
تجزیه و تحلیل مقادیر پارامتر  $d_{se}/P$  در دامنه دبی حداقل ( $q = 0.28 m^3/m.s$ ،  $y_c/P = 0.14$  و  $\eta = 0.3$ ) تا حداکثر ( $q = 0.45 m^3/m.s$ ) پارامتر  $d_{se}/P$  در شرایط دبی حداقل از  $0.37$  به  $0.6$  و در دبی حداکثر از  $0.46$  به  $0.71$  افزایش پیدا کرد. همچنین با کاهش تراز کارگذاری کفبند از  $HP_0$  به  $HP_2$ ، پارامتر  $d_{se}/P$  در دبی حداقل از  $0.37$  به  $0.63$  و در دبی حداکثر از  $0.46$  به  $0.77$  افزایش یافت. بنابراین برای شرایط سازه کنترل تراز بستر با سطح صاف، با کاهش تراز کارگذاری کفبند مقدار عمق آب‌شستگی افزایش قابل توجه پیدا کرد.

با اعمال زبری در سازه  $R_1$  (چیدمان زبری متراکم با قطر متوسط  $1/15$  سانتی‌متر) با کاهش تراز کفبند از  $HP_0$  به  $HP_1$ ، پارامتر  $d_{se}/P$  در دبی حداقل از  $0.32$  به  $0.33$  و در دبی حداکثر از  $0.38$  به  $0.5$  افزایش یافت. همچنین با تغییر تراز کفبند از  $HP_0$  به  $HP_2$  پارامتر  $d_{se}/P$  در دبی حداقل از  $0.32$  به  $0.39$  و در دبی حداکثر از  $0.38$  به  $0.53$  افزایش یافته است. به عبارت دیگر، برای شرایط سازه کنترل تراز بستر با زبری مذکور، جابجایی تراز کفبند به  $P/6$  در محدوده دبی حداقل تاثیر محسوس بر تغییر عمق آب‌شستگی نداشته ولی با افزایش دبی اثر آن بیشتر می‌گردد. با وجود این، در محدوده دبی حداکثر، کاهش تراز کارگذاری از  $P/10$  به  $P/6$ ، تاثیری معنی‌داری بر افزایش عمق آب شستگی نداشت.

با تغییر مشخصات هندسی زبری در سازه  $R_2$  (چیدمان زبری متراکم با قطر متوسط  $5/2$  سانتی‌متر)، با کاهش تراز کفبند از  $HP_0$  به  $HP_1$  مقدار پارامتر  $d_{se}/P$  در دامنه دبی‌های حداقل از  $0.3$  به  $0.31$  و در دبی‌های حداکثر از  $0.38$  به  $0.4$  افزایش پیدا می‌کند. با کاهش بیشتر تراز کفبند از  $HP_0$  به  $HP_2$ ، پارامتر  $d_{se}/P$  در دبی حداقل از  $0.3$  به  $0.32$  و در دبی حداکثر از  $0.4$  به  $0.42$  افزایش یافت.

بررسی نتایج حاکی از آن است که با تغییر چیدمان زبری‌ها در سازه  $R_3$  (چیدمان زبری یک در میان با قطر متوسط  $5/2$ )، با کاهش تراز کفبند از  $HP_0$  به  $HP_1$ ، مقدار پارامتر  $d_{se}/P$  در دبی حداقل از  $0.31$  به  $0.32$  و در دبی حداکثر از  $0.44$  به  $0.46$  افزایش پیدا کرد. همچنین با کاهش بیشتر تراز کفبند به  $HP_2$ ، مقدار پارامتر  $d_{se}/P$  در دبی حداقل از  $0.31$  به  $0.35$  و در دبی حداکثر از  $0.44$  به  $0.49$  افزایش یافت.

همانطور که ملاحظه گردید، ساختار زبری روی سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با افزایش اتلاف انرژی جریان عبوری از آن، منجر به کاهش مقدار آب شستگی می‌گردد. در این میان افزایش اندازه زبری و تغییر رژیم جریان عبوری از آن به ریزشی ( $y < k_s$ ) منجر به کاهش قابل توجه عمق آب شستگی شده و نیز اثر کاهش تراز کارگذاری کفبند بر افزایش عمق آب‌شستگی که در شرایط سازه کنترل تراز بستر بدون زبری قابل توجه بود، تقریباً ناچیز می‌شود. بنابراین در این شیب کارگذاری سازه کنترل تراز بستر، می‌توان از این تمهید به عنوان یک راه‌کار حفاظتی مناسب‌تر برای رودخانه‌های با بستر نامتعادل و افت تدریجی تراز بستر، به‌منظور جلوگیری از زیرشویی کفبند در افت تراز بستر پایین‌دست، استفاده نمود.



شکل ۱۰. تأثیر تراز کارگذاری کفبند و زبری بر عمق حداکثر نهایی آبشستگی در سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۳

نتایج تأثیر تراز کارگذاری کفبند بر عمق حداکثر نهایی آبشستگی ( $d_{se}/P$ ) در پایین دست سازه کنترل تراز بستر با شیب ۱:۵ برای شرایط با و بدون اعمال زبری در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

مقایسه مقادیر عمق نسبی حداکثر نهایی آبشستگی ( $d_{se}/P$ ) در پایین دست سازه سطح شیب‌دار با شیب ۱:۵ حاکی از آن است برای سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار صاف با تغییر تراز کارگذاری کفبند از  $H_{P0}$  به  $H_{P1}$ ، مقدار پارامتر  $d_{se}/P$  در دامنه دبی حداقل ( $m^3/m.s$ )  $q=0.028$ ،  $y_c/P=0.14$  و  $\eta=0.3$  از  $0.33$  به  $0.49$  و در دبی حداکثر ( $q=0.045 m^3/m.s$  و  $y_c/P=0.2$  و  $\eta=0.9$ ) از  $0.42$  به  $0.61$  افزایش یافت. با تغییر تراز کفبند از  $H_{P0}$  به  $H_{P2}$ ، مقدار پارامتر  $d_{se}/P$  در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر به ترتیب از  $0.33$  به  $0.53$  و  $0.42$  به  $0.63$  تغییر پیدا کرد. بنابراین با کاهش شیب کارگذاری سازه و در شرایط بدون اعمال زبری نیز پایین بردن تراز کارگذاری کفبند، عمق آبشستگی افزایش قابل توجهی می‌یابد.

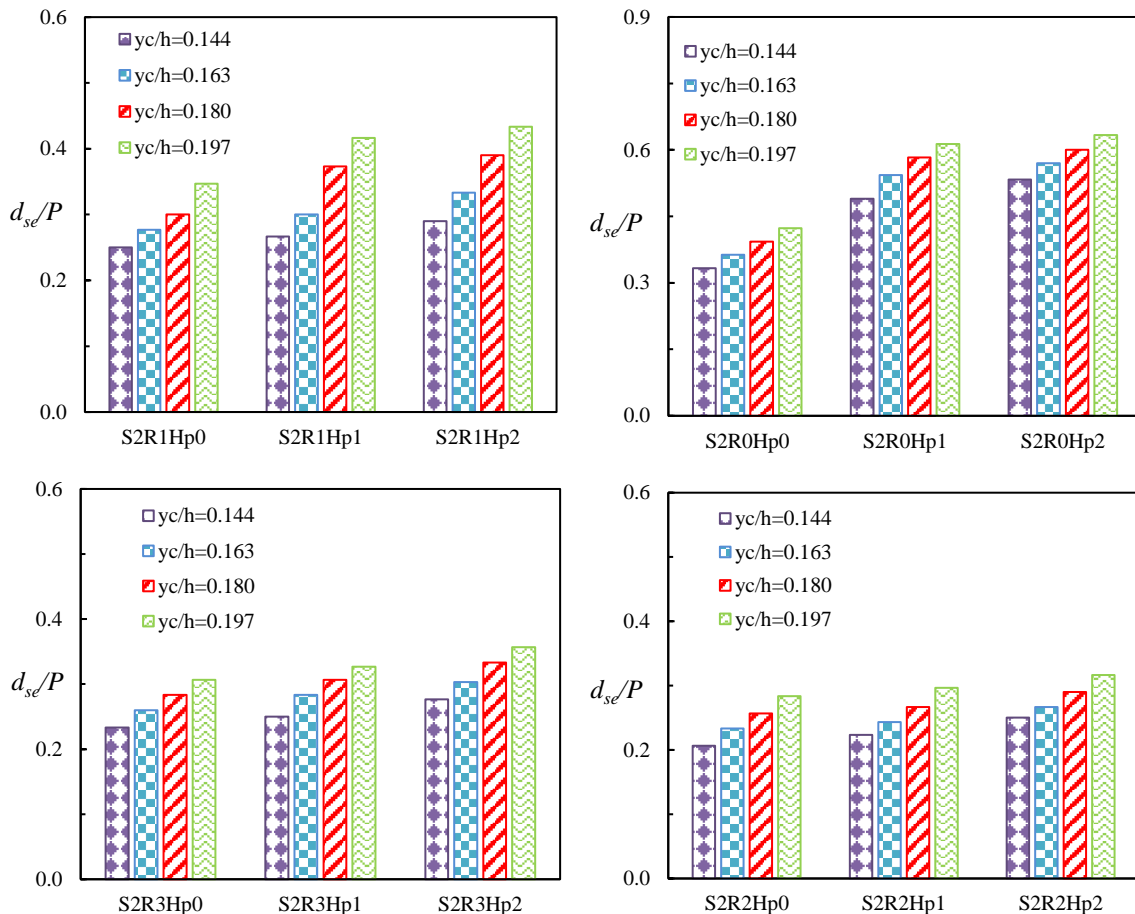
مقایسه نتایج حاکی از آن است که با اعمال زبری  $R_1$  (زبری با قطر متوسط  $1/15$  سانتی‌متر و چیدمان متراکم)، تغییر تراز کارگذاری کفبند از  $H_{P0}$  به  $H_{P1}$ ، مقدار پارامتر  $d_{se}/P$  را در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر به ترتیب از  $0.25$  به  $0.27$  و از  $0.35$  به  $0.42$  تغییر می‌دهد. همچنین، با تغییر تراز کفبند از  $H_{P0}$  به  $H_{P2}$ ، مقدار پارامتر  $d_{se}/P$  در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر به ترتیب از  $0.25$  به  $0.29$  و از  $0.35$  به  $0.43$  افزایش می‌یابد.

با افزایش قطر زبری در سازه  $R_2$  (اعمال زبری با قطر متوسط  $5/2$  سانتی‌متر و چیدمان متراکم)، با کاهش تراز کارگذاری کفبند از  $H_{P0}$  به  $H_{P1}$ ، پارامتر  $d_{se}/P$  در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر به ترتیب از  $0.21$  به  $0.22$  و از  $0.28$  به  $0.3$  افزایش پیدا کرد. همچنین با کاهش بیشتر تراز کفبند از  $H_{P0}$  به  $H_{P2}$ ، مقدار پارامتر  $d_{se}/P$  در دامنه دبی‌های حداقل و حداکثر به ترتیب از  $0.21$  به  $0.25$  و  $0.28$  به  $0.32$  تغییر یافت.

تجزیه و تحلیل نتایج حاکی از آن است که با تغییر چیدمان زبری درشت‌دانه در سازه  $R_3$  (اعمال زبری با قطر متوسط  $5/2$  سانتی‌متر و چیدمان یک در میان) و در شرایط دبی حداقل تا دبی حداکثر با کاهش تراز کفبند از  $H_{P0}$  به  $H_{P1}$  پارامتر  $d_{se}/P$  به ترتیب از  $0.23$  به

۰/۲۵ و از ۰/۳۳ به ۰/۳۵ افزایش پیدا کرد. با کاهش بیشتر تراز کارگذاری کفبند از  $H_{P0}$  به  $H_{P2}$ ، پارامتر  $d_{se}/P$  برای دبی حداقل از ۰/۲۳ به ۰/۲۸ و در دبی حداکثر از ۰/۳۱ به ۰/۳۶ افزایش پیدا کرد.

همانطور که ملاحظه گردید، با کاهش شیب سازه کنترل تراز بستر و به تبع آن کاهش سرعت جت ورودی به حوضچه آرامش و قدرت آشفته‌گی گردابه‌ها در پرش هیدرولیکی، مقدار عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی کاهش قابل توجه‌ای یافت. همچنین در این شیب کارگذاری سازه نیز با افزایش اندازه زبری‌ها، تاثیر کاهش تراز کارگذاری کف بند بر افزایش عمق آب‌شستگی ناچیز شده و می‌توان مانند شیب ۱:۳، کفبند را در تراز کارگذاری  $P/6$ ، اجرا نمود.



شکل ۱۱. تاثیر تراز کارگذاری کفبند و زبری بر عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی در سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۵

مقایسه نتایج اثر شیب کارگذاری سازه بر عمق حداکثر نهایی ( $d_{se}/P$ ) در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار حاکی از آن است که در شرایط نصب کفبند هم‌تراز بستر ( $H_{P0}$ ) و بدون اعمال زبری، با تغییر شیب تراز کارگذاری سازه از ۱:۳ به ۱:۵، مقدار پارامتر  $d_{se}/P$  در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر بطور متوسط از ۰/۴۲ به ۰/۳۸ کاهش یافت. با اعمال زبری  $R_1$  (زبری با قطر متوسط ۱/۱۵ سانتی‌متر و چیدمان متراکم) مقدار پارامتر  $d_{se}/P$  در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر بطور متوسط از ۰/۳۹ به ۰/۲۹ کاهش پیدا کرد. همچنین با افزایش اندازه زبری به هندسه  $R_2$  (اعمال زبری با قطر متوسط ۵/۲ سانتی‌متر و چیدمان متراکم) مقدار پارامتر  $d_{se}/P$  در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر بطور متوسط از ۰/۳۴ به ۰/۲۴ کم شد. همچنین با تغییر چیدمان زبری به  $R_3$  (اعمال زبری با قطر متوسط ۵/۲ سانتی‌متر و چیدمان یک در میان) مقدار پارامتر  $d_{se}/P$  در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر بطور متوسط از ۰/۳۶ به ۰/۲۷ کاهش یافت.

تجزیه و تحلیل نتایج حاکی از آن است که با کاهش تراز کارگذاری کفبند از  $H_{P0}$  به  $H_{P1}$  و در شرایط بدون اعمال زبری، با تغییر شیب کارگذاری سازه از ۱:۳ به ۱:۵ مقدار پارامتر  $d_{se}/P$  در دامنه دبی حداقل تا حداکثر از ۰/۶۵ به ۰/۵۶ کاهش پیدا کرد. با اعمال زبری  $R_1$  مقدار پارامتر  $d_{se}/P$  در دامنه دبی‌های حداقل تا حداکثر از ۰/۴۲ به ۰/۳۴ کاهش یافت. با افزایش قطر زبری به هندسه  $R_2$ ، مقدار پارامتر  $d_{se}/P$  در محدوده دبی حداقل تا حداکثر از ۰/۳۵ به ۰/۲۶ کاهش پیدا کرد. همچنین با تغییر آرایش زبری به  $R_3$ ، مقدار پارامتر  $d_{se}/P$



دامنه دبی حداقل تا حداکثر از ۰/۳۹ به ۰/۲۹ کم شد.

مقایسه نتایج نشان داد با کاهش بیشتر تراز کارگذاری کفبند از  $H_{P0}$  به  $H_{P2}$ ، تغییر شیب کارگذاری سازه از ۱:۳ به ۱:۵ مقدار پارامتر  $d_{se}/P$  را در شرایط بدون اعمال زبری، در محدوده دبی حداقل تا حداکثر بطور متوسط از ۰/۷۱ به ۰/۵۸ کاهش داد. همچنین با اعمال زبری  $R_1$ ، مقدار پارامتر  $d_{se}/P$  در دامنه دبی حداقل تا حداکثر بطور متوسط از ۰/۴۵ به ۰/۳۶ تغییر پیدا کرد. با اعمال زبری با قطر بزرگتر  $R_2$  مقدار  $d_{se}/P$  در دامنه دبی حداقل تا حداکثر بطور متوسط از ۰/۳۶ به ۰/۲۸ کم شد و با تغییر آرایش زبری به  $R_3$ ، مقدار پارامتر  $d_{se}/P$  در محدوده دبی حداقل تا حداکثر بطور متوسط از ۰/۴۲ به ۰/۳۲ کم شد.

## نتیجه گیری

یکی از موضوعات مهم در حفاظت از رودخانه‌هایی که تغییرات تراز بستر در آن‌ها از تعادل خارج شده و وارد چرخه افت تدریجی شده‌اند، استفاده از سازه‌های مناسب برای ایجاد شیب مناسب در آن‌ها است. از جمله این اقدامات، احداث سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار می‌باشد. در تحقیق حاضر، تغییرات عمق آب‌شستگی برای ترازهای مختلف کارگذاری کفبند در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۳ و ۱:۵ تحت شرایط مختلف هیدرولیکی و اعمال زبری‌های مختلف روی سطح سازه به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که با اعمال زبری‌های درشت‌دانه به گونه‌ای که امکان برقراری جریان با رژیم ریزشی از روی زبری فراهم شود، عمق آب‌شستگی کاهش زیادی پیدا می‌کند. همچنین در این شرایط اثر کاهش تراز کفبند به عنوان یک راهکار پیش‌گیرانه از زیرشویی این سازه‌ها در رودخانه‌هایی که افت بستر پیش‌رونده دارند، بر افزایش عمق آب‌شستگی، تقریباً ناچیز می‌گردد. مقایسه نتایج حاکی از آن است برای سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار در شیب ۱:۳ با سطح صاف، با تغییر تراز کارگذاری کفبند از هم‌تراز بستر به  $P/6$ ، پارامتر  $d_{se}/P$  در دبی حداقل از ۰/۳۷ به ۰/۶۳ و برای دبی حداکثر از ۰/۴۶ به ۰/۷۷ افزایش یافت. با اعمال زبری درشت دانه با چیدمان متراکم ( $y_c/k_s < 2/5$ ) که امکان برقراری جریان ریزشی بر روی سازه را فراهم کرد، مقدار پارامتر  $d_{se}/P$  با کاهش تراز کارگذاری کفبند شرایط هم‌تراز به  $P/6$ ، در دامنه دبی حداقل از ۰/۳ به ۰/۳۲ و برای دبی حداکثر از ۰/۳۸ تا ۰/۴۲ افزایش پیدا کرد. بررسی نتایج نشان داد که با تغییر شیب کارگذاری سازه از ۱:۳ به ۱:۵ با کاهش تراز کارگذاری کفبند به  $P/6$  مقدار پارامتر  $d_{se}/P$  بطور متوسط در دامنه دبی حداقل از ۰/۵۸ به ۰/۲۸ و در دبی حداکثر از ۰/۷۱ به ۰/۳۶ کاهش پیدا کرد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Bormann, N.E., & Julien, P.Y. (1991). Scour downstream of grade control structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(5):579–594.
- Bhuiyan, F., Hey, R. D., & Wormleaton, P. R. (2007). Hydraulic evaluation of W-weir for river restoration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6): 596-609.
- Esmaili Varaki, M., Mahmoudi Kurdistani, S., & Noormohammadi, G. (2021). Scour morphology downstream of submerged block ramps. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 9(3): 241–250.
- D'Agostino, V., & Ferro, V. (2004). Scour on alluvial bed downstream of grade-control structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(1):1–14.
- Jüstrich, S., Pfister, M., & Schleiss, A. J. (2016). Mobile riverbed scour downstream of a Piano Key weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(11): 04016043.
- Moayed moshkaposhti, M., Esmaili Varaki, M., & 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.
- Oertei, M. (2013). In-Situ Measurements on cross-bar block ramps. *Journal of Hydraulic Engineering Repository*, 111-119.
- Ortel, M., & Bung, D.B. (2015). Stability and scour development of bed material on crossbar block ramps. *International Journal of Sediment Research*, 30(4): 334–350.
- Palermo, M., Stefano, P., Mahmoudi Kurdistani, S., & Sagvand Hassanabadi, L. (2015). Erosive and



- hydrodynamic processes downstream of low-head control structures. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 3(2): 122-131.
- Pagliara, S., & Chiavaccini, P. (2006a). Energy dissipation on reinforced block ramps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(3): 293-297.
- Pagliara, S., & Chiavaccini, P. (2006b). Energy dissipation on block ramps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(1): 41-48.
- Pagliara, S. (2007). Influence of sediment gradation on scour downstream of block ramps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(11): 1241-1248.
- Pagliara, S., & Palermo, M. (2008). Scour control downstream of block ramps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(9): 1376-1382.
- Pagliara, S., & 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., & Palermo, M. (2010). Influence of tailwater depth and pile position on downstream of block ramps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(2): 120-130.
- Pagliara, S., & Palermo, M. (2008). Scour control and surface sediment distribution downstream of block ramps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 46(3): 334-343.
- Pagliara, S., Palermo, M., & Carnacia, I. (2012). Live-bed scour downstream of block ramps for low densimetric Froude numbers. *International Journal of Sediment Research*, 27(3): 337-350.
- Pagliara, S., & Palermo, M. (2013). Rock grade control structures and stepped gabion weirs: Scour analysis and flow features. *Acta Geophysica*, 61(1): 126-150.
- Pagliara, S., Palermo, M., & Roy, D. (2020). Experimental investigation of erosion processes downstream of block ramps in mild curved channels. *Environmental Fluid Mechanics*, 20: 339-356.
- Palermo, M., Roy, D., & Pagliara, S. (2021). Morphological characteristics of eco-friendly protected basins downstream of block ramps in river bends. *Geomorphology*, 377(15): 107587.
- Rajaratnam, N., & 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., & Kadavy, K.C. (1998). Design of rock chutes. *Transactions of the ASAE*, 41(3): 621-626.
- Scurlock, S. M., Thornton, C. I., & Abt, S. R. (2012). Equilibrium scour downstream of three-dimensional grade-control structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(2): 167-176.
- Weitbrecht, V., Tamagni, S., & Boes, R. M. (2016). Stability of Unstructured Block Ramps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(4): 04016095-1-9.

## Experimental investigation of apron installation level on variation of local scour at the downstream of block ramps

### EXTENDED ABSTRACT

#### Introduction

One of the structural methods to protect river reaches with unstable bed slope, is the construction of block ramps that decreases flow energy grade line by passing flow via a sloping surface. Application of these structures reduces and stabilizes the upstream river's bed slope that causes the decreased velocity of flow and corresponding capacity of sediment transport, which leads to stability of the bank of rivers at upstream reaches (Esmaeili Varaki *et al.* 2021). Several types of research have been conducted on local scour downstream of grade-control structures. Some studies were conducted to investigate the hydraulic characteristics of passing flow over the surface of block ramps, the downstream scour process, and energy dissipation, i.e., Bormann & Julien (1991), D'Agostino & Ferro (2004), Pagliara & Chiavaccini (2006a), Pagliara & palermo (2008), Pagliara & palermo (2009), Pagliara *et al.* (2012), Ortel & Bung (2015) and Esmaeili Varaki *et al.* (2021). Furthermore, the design criteria and scour countermeasures downstream of block ramps were investigated by Robinson *et al.* (1998), Pagliara & palermo (2008), Pagliara & palermo (2010), Weitbrecht *et al.* (2016), and Moayedi moshkaposhti *et al.* (2022). The main purpose of the current study is to investigate the effect of the macro roughness, and indtallation level of the downstream apron as scouring countermeasures on the maximum scour depth downstream of the block ramp.

#### Experimental Setup and procedure

All the experiments have been conducted at the Physical Hydraulic Laboratory of the Department of Water Engineering, University of Guilan (IRAN). The experimental setup included a rectangular recirculation flume 8.4 m long, 0.88 m wide, and 1 m deep where the ramp was made in such a way that the height of the structure for all experiments was  $P = 0.3$  m. The flow rate was measured by an ultrasonic flow meter with a precision of  $\pm 0.01$  L/s. A flow straightener was placed at the flume entrance to avoid inlet effects. Block ramps were made in three ramp slopes of  $S_0 = 0.2$  (1V:5H) and 0.33 (1V:3H). Smooth block ramp and two values of the macro roughness  $k_s = 1.15$  cm and  $k_s = 5.2$  cm was used to make block ramps. Furthermore, in case of  $k_s = 5.2$  cm, two configurations including compact and stagerd was used to investigate arrangements of large element of surface roughness on scour depth. A rectangular channel with dimensions of 2.5 m long, 0.3 m deep and 0.88 m wide was used as a stilling basin downstream of the block ramp filled with uniform sand of mean particle size  $d_{50} = 0.7$  mm and  $G_s = 2.65$  that the well-leveled stilling basin bed before starting a test. At the end of each run, temporal scour development was measured using digital camera under different interval time and the final scour was surveyed using a Laser scanner Leica with  $\pm 1$  mm accuracy.

#### Results and discussion

Flow passing over sloping surface of block ramps has three distinguished regimes including nappe flow ( $y < k_s$ ), skimming flow ( $y > 1.5y_s$ ) and transition flow ( $y_s < y < 1.5y_s$ ) (Oertei, 2013). For current study, Flow depth on block ramp was in range of 1.5-3.5 cm that led to cover all flow regimes for meadim and large surface roughness of block ramp. Comparison of the maximum equilibrium scour depth for the block ramp with slope 1:3 indicated that by reduction of the installation level of apron to  $P/6$ ,  $d_{se}/P$  changed from 0.37 to 0.63 and 0.46 to 0.77, for low and high discharges, respectively. Furthermore, as surface of block ramp changed to compact roughness with  $k_s = 5.2$  cm,  $d_{se}/P$  reduced considerably and changed from 0.3 to 0.32 and 0.4 to 0.42, for low and high discharges, respectively. As the slope of the block ramp was reduced to 1:5, the effect of the surface roughness on the reduction of the scour depth became more noticeable. A comparison of results indicated that for compact roughness with  $k_s = 5.2$  cm,  $d_{se}/P$  changed from 0.21 to 0.25 and from 0.28 to 0.32, for low and high discharges, respectively.

#### Conclusion

The comparison of results indicated that there is a direct relationship between the level of the apron level and the scour depth so that by reducing the level of the apron to  $1/10$  and  $1/6$  of the block ramp height, the maximum scour depth increases in an average 36 and 41 for slope of 1:3 and 32 and 35 for slope of 1:5, respectively. By increasing the size of surface roughness such that the overpass flow regime changes to nappe flow, the reduction of installation of the level of the block ramp does not noticeable effect on the increase of the scour depth.

**Keywords:** Apron, Block Ramp, River Restoration, Roughness, Scour.