

## بررسی آزمایشگاهی آب‌شستگی موضعی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار

گیتا نورمحمدی<sup>۱</sup>، مهدی اسمعیلی<sup>۲\*</sup>، Alessio Radice<sup>۳</sup> و بهنام شفیعی ثابت<sup>۴</sup>

۱، ۲ و ۴- به ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی؛ استادیار مهندسی رودخانه، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی و وابسته گروه پژوهشی مهندسی آب و محیط زیست پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر دانشگاه گیلان؛ و استادیار سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، مجتمع دانشگاه گیلان، رشت، ایران  
۳- دانشیار مهندسی رودخانه، گروه مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه پلی تکنیک میلان  
تاریخ دریافت: ۹۶/۴/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۹/۲۰

### چکیده

حفظ تراز بستر رودخانه به‌ویژه 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. از جمله سازه‌های محیط زیست‌دوست که برای تثبیت بستر و دیواره‌های رودخانه کاربرد زیادی دارد، سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار هستند. از پارامترهای مهم در طراحی این سازه‌ها، آگاهی از مقدار ابعاد گودال آب‌شستگی در پایین دست آنها می‌باشد. در تحقیق حاضر، تأثیر پارامترهای مختلف هندسی و هیدرولیکی بر عمق حداکثر آب‌شستگی پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. آزمایش‌هایی برای شیب‌های کارگذاری سطح شیب‌دار ۱۴، ۲۰ و ۳۳ درصد، دبی‌های واحد عرض ۴/۵-۲۸/۴۵ لیتر بر ثانیه بر متر، عمق‌های پایاب ۵/۷-۳/۶ و اندازه زبری‌های ۴ تا ۱۰ میلی‌متر اجرا گردید. تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در شیب کارگذاری سطح شیب‌دار ۳۳ درصد، عمق پایاب رابطه مستقیم با افزایش عمق حداکثر آب‌شستگی دارد به طوری که با افزایش عمق پایاب از ۴/۵ به ۶/۷، عمق حداکثر آب‌شستگی در دامنه دبی‌ها و زبری‌های حداقل و حداکثر، به طور متوسط ۱۳ درصد افزایش می‌یابد. با کاهش شیب سطح شیب‌دار به ۲۰ و ۱۴ درصد، افزایش عمق پایاب رابطه معکوس با عمق حداکثر آب‌شستگی خواهد داشت به گونه‌ای که با افزایش عمق پایاب از ۳/۵ به ۴/۵، مقدار عمق حداکثر آب‌شستگی به طور متوسط در هر یک از شیب‌های مذکور ۹ و ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج به دست آمده حاکی از آن است که افزایش اندازه زبری در دامنه دبی‌ها و عمق‌های پایاب مختلف، منجر به کاهش حداکثر عمق آب‌شستگی به میزان متوسط ۲۱-۵ درصد در دامنه زبری‌های حداقل و حداکثر می‌شود.

### واژه‌های کلیدی

آب‌شستگی موضعی، زبری، سازه کنترل تراز بستر، شیب کارگذاری، عمق پایاب

### مقدمه

دیواره‌های رودخانه‌ها موجب وارد آمدن خسارت به زمین‌های کشاورزی حاشیه آن، تخریب تاسیسات عبوری از آن، کاهش کیفیت آب، از بین رفتن زیست‌گاه‌های گیاهی و جانوری و غیره می‌گردد. تغییر ویژگی‌های جریان در هر رودخانه در حال تعادل سبب می‌شود تا ویژگی‌های

فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه از مسائل مهمی است که ارتباط مستقیم با حفاظت از رودخانه‌ها دارد و لازم است مهندسان هیدرولیک آشنایی کافی با آن داشته باشند. به طور کلی، رودخانه‌ها در وضعیت طبیعی همواره در حال فرسایش و رسوب‌گذاری هستند. فرسایش بستر و

آب‌شستگی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر پیشنهاد دادند.

رابینسون و همکاران (Robinson *et al.*, 1997) اثر پارامترهای شیب و اندازه سنگ‌چین را بر پایداری سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های این محققان در محدوده شیب‌های ۲ تا ۴۰ درصد و سنگ‌های خردشده گوشه‌دار با  $D_{50}$  بین ۱۵-۲۷۸ میلی‌متر 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 با ثبات‌تر خواهد شد.

هافمنس (Hoffmans, 1998) پدیده آب‌شستگی در پایین‌دست جت‌های ریزشی را بررسی و بر اساس معادله مومنتوم، رابطه‌ای کلی برای پیش‌بینی ویژگی‌های آب‌شستگی معادل پایین‌دست ساختارهای کنترل تراز، از جمله اثر یکنواختی رسوب، استخراج کرد. تحقیقات هافمنس را دی و رایکار (Dey & Raikar, 2007) توسعه دادند؛ این محققان اثر اندازه مواد بستر را روی مکانیزم آب‌شستگی در حضور انقباض‌های طولانی بررسی کردند.

آگوستینو و فرو (Agostino & Ferro, 2004) آب‌شستگی پایین‌دست سازه‌های کنترل تراز بستر را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و با به کار بردن تئوری تشابه کامل در تحلیل ابعادی و داده‌های آزمایشگاهی، معادلات بی‌بعدی را برای تخمین حداکثر عمق و طول گودال آب‌شستگی و همچنین طول و ارتفاع تلماسه پایین‌دست آن ارائه دادند.

پایارا (Pagliara, 2007) اثر دانه‌بندی رسوب بر آب‌شستگی پایین‌دست سطوح شیب‌دار را در شیب‌های مختلف به صورت آزمایشگاهی بررسی کرد. مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری عمق آب‌شستگی برای شیب‌های مختلف (۲۵-۸/۳ درصد) نشان داد که با افزایش شیب،

هندسی بستر رودخانه در جهت نیل به حالت تعادل جدید، چه به صورت رسوب‌گذاری و چه به صورت فرسایش، تغییر کند. از روش‌های متداول برای کنترل مستقیم فرسایش و آب‌شستگی در رودخانه‌ها می‌توان به پوشش سنگ‌چین، سازه‌های توری‌سنگی، آب‌شکن‌ها، سازه‌های کنترل تراز بستر اشاره کرد (Hoffmans & Verhij, 1997).

برای جلوگیری از توسعه آب‌شستگی و فرسایش بستر رودخانه به بازه‌های بالادستی، از سازه‌های کنترل تراز بستر استفاده می‌شود. مهم‌ترین مزیت احداث این سازه‌ها، تثبیت جداره و بستر آبراهه از طریق کاهش شیب و سرعت جریان و در نتیجه کنترل فرسایش است. این سازه‌ها با کنترل فرسایش بستر، از تخریب سازه‌های احداث شده در رودخانه‌ها جلوگیری می‌کنند (Dey & Raikar, 2007).

سازه‌های کنترل تراز بستر که بتوانند از فرسایش بستر و کناره آبراهه جلوگیری کنند و با محیط زیست نیز سازگار باشند، سال‌هاست که مورد توجه محققان قرار گرفته است و مهم‌ترین آنها از این قرارند: سطح شیب‌دار سنگی، آبشار، آستانه شیب‌دار، پره قلابی‌شکل، پره عرضی، و سرریز  $w$  شکل. از این میان، سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار سنگی دارای کاربرد زیادی برای اصلاح شیب رودخانه‌ها می‌باشد. پارامترهای متعددی بر خصوصیات هیدرولیک جریان عبوری از آن و نیز آب‌شستگی در پایین‌دست این سازه اثرگذار هستند که از جمله آنها می‌توان به دانه‌بندی و تراکم پوشش سنگ‌چین روی آن، شیب کارگذاری، عمق پایاب و دبی جریان اشاره کرد.

تحقیقات در خصوص پارامترهای اثرگذار بر ابعاد حفرة آب‌شستگی در پایین‌دست سازه‌های کنترل تراز بستر فراوان است. بورمن و جولین (Borman & Julien, 1991) با به کار بردن تئوری پخشیدگی جت و ترکیب با نظریه آستانه حرکت، معادلاتی برای تخمین حداکثر عمق و طول

شیب‌دار محدود به شرایط پرش هیدرولیکی آزاد روی بستر رسوبی با مصالح درشت‌دانه و نیز اثر زبری به‌صورت المان‌ها درشت‌دانه که هموار بودن نیم‌رخ سطح آب در سطح شیب‌دار را تحت تأثیر قرار می‌دهد، می‌باشد، هدف از تحقیق حاضر بررسی اثر پارامترهای مختلف نظیر شیب کارگذاری و زبری سطح بر مقدار آب‌شستگی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار تحت شرایط مختلف هیدرولیکی از نظر دبی و عمق پایاب است.

### مواد و روش‌ها

#### تحلیل ابعادی

میزان آب‌شستگی پایین‌دست سازه‌های کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار متأثر از عوامل متعددی است که هر یک تأثیری متفاوت بر روند آب‌شستگی دارد و باعث افزایش یا کاهش مقدار آن می‌شود. شکل ۱ نمایی از آب‌شستگی را در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار و پارامترهای هندسی موثر بر آن نشان می‌دهد. از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر حداکثر عمق آب‌شستگی پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار می‌توان به پارامترهای هندسی سازه، شرایط هیدرولیکی جریان، مشخصات سیال، رسوبات بستر و مدت‌زمان اشاره کرد که به‌صورت رابطه تابعی ۱ بیان می‌شوند:

$$d_s = f_1(y, y_0, y_c, u_0, u_c, y_t, b, W, P, L, k_s, D_{50}, \sigma_g, \rho_s, \rho, \mu, g, t, t_g) \quad (1)$$

که در آن،

$d_s$  = حداکثر عمق آب‌شستگی؛  $y$  = عمق جریان یک‌نواخت در پای سطح شیب‌دار؛  $y_0$  = عمق جریان روی سطح شیب‌دار؛  $y_c$  = عمق بحرانی جریان؛  $u_0$  = سرعت متوسط جریان؛  $u_c$  = سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی؛  $y_t$  = عمق پایاب؛  $b$  = عرض کانال؛  $W$  = عرض سازه؛  $P$  = ارتفاع سازه؛  $L$  = طول سازه؛  $k_s$  = اندازه زبری؛  $D_{50}$  = قطری که ۵۰ درصد

میزان عمق آب‌شستگی حدود ۸ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، تجزیه و تحلیل‌ها حاکی از آن است که با افزایش پارامتر غیریک‌نواختی ذرات رسوبی ( $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ ) از ۱/۲ به ۲/۸، عمق آب‌شستگی ۷۵ درصد کم می‌شود.

اسکورلوک و همکاران (Scurlock *et al.*, 2012) آب‌شستگی پایین‌دست سازه‌های کنترل تراز بستر را بررسی و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی معادلاتی برای تخمین حداکثر عمق آب‌شستگی ارائه کردند.

پایارا و همکاران (Pagliara *et al.*, 2012) آب‌شستگی پایین‌دست سطوح شیب‌دار سنگی را برای اعداد فرود کم ذرات رسوبی بررسی و رابطه‌ای برای تخمین حداکثر عمق آب‌شستگی پیشنهاد کردند که تابعی از عدد فرود ذره، درصد تراکم رسوبات و شیب است.

پایارا و همکاران (Pagliara *et al.*, 2013) هیدرولیک جریان، میزان استهلاک انرژی و آب‌شستگی را در پایین‌دست سرریزهای گابیونی-پلکانی، سرریزهای عرضی و سطوح شیب‌دار سنگی تجزیه و تحلیل کردند. مقایسه نتایج به‌دست آمده نشان داد که با افزایش نسبت استغراق (نسبت عمق جریان یک‌نواخت  $y$  به اندازه متوسط ذرات  $D_{50}$ )، به‌دلیل افزایش طول پخشیدگی آشفتگی در توده پرش هیدرولیکی، عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد. تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که سازه‌های یاد شده برای نسبت استغراق کم (کمتر از ۰/۳) از نظر استهلاک انرژی، رفتاری مشابه نشان می‌دهند. همچنین با افزایش نسبت استغراق، عملکرد سرریزهای گابیونی-پلکانی و سطوح شیب‌دار سنگی در استهلاک انرژی، کاهش می‌یابد. مقایسه‌ها نشان می‌دهد که از میان سازه‌های مورد بررسی، سطح شیب‌دار سنگی بیشترین استهلاک انرژی را دارد.

توسعه روش‌های سازگار با محیط زیست در حفاظت از رودخانه‌ها حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به اینکه مطالعات صورت گرفته در خصوص تأثیر عوامل اثرگذار بر آب‌شستگی پایین‌دست سازه‌های کنترل تراز بستر سطح

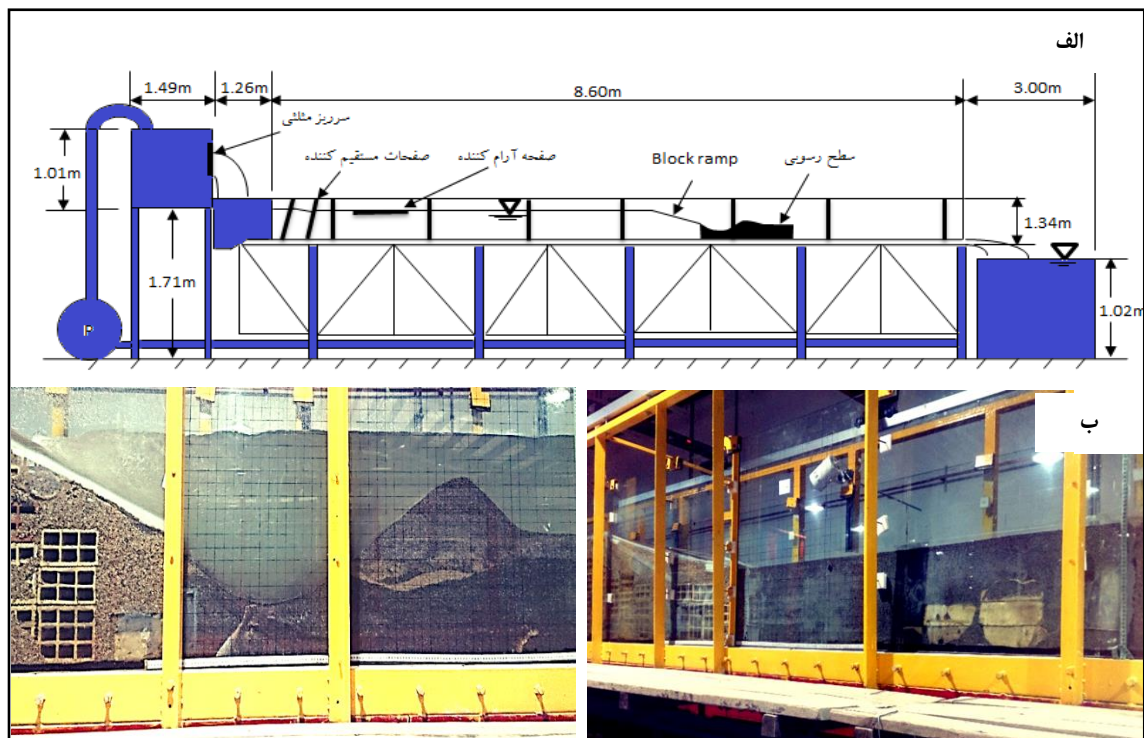


اندازه زبری ۴، ۷/۳، و ۱۰ میلی‌متر استفاده گردید که از مصالح رودخانه‌ای تهیه شده بود. اندازه زبری‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شد که استهلاک انرژی و در نتیجه میزان آب‌شستگی پایین‌دست سطح شیب‌دار چشمگیر باشد. این زبری‌ها روی صفحات پلاکسی‌گلاس به ضخامت ۲ میلی‌متر با استفاده از چسب صنعتی چسبانیده و روی سطوح شیب‌دار مورد مطالعه نصب شدند. نمایی از سطوح زبری مورد بررسی در تحقیق حاضر در شکل ۳ نشان داده شده است.

برای ایجاد بستر رسوبی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر شیب‌دار، پس از الک کردن ماسه معدنی، مصالح یکنواخت با قطر ۰/۷۳ میلی‌متر تهیه و در بازه‌ای به طول ۲/۵، عرض ۰/۸۸ و ارتفاع ۰/۳ متر در پایین‌دست سازه مورد مطالعه قرار داده شد. همچنین، بالادست و پایین‌دست بازه مورد بررسی با رسوباتی درشت‌دانه پوشانده شد که در مرحله الک کردن باقی مانده بود.

در ورودی آن، از صفحات مستقیم‌کننده جریان در ابتدای کانال استفاده شد. برای تنظیم عمق جریان در کانال از دریچه پروانه‌ای استفاده گردید که در انتهای آن نصب شده است. با توجه به اینکه در آزمایش‌ها تنظیم دقیق دبی بسیار بااهمیت است، از یک دستگاه کنترل‌کننده دور موتور برای تنظیم سرعت دورانی الکتروموتور پمپ استفاده گردید؛ این دستگاه امکان تنظیم دقیق دبی جریان را با حداقل اتلاف وقت میسر می‌سازد. برای حصول اطمینان از توسعه‌یافتگی جریان قبل از رسیدن به سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، محل نصب آن ۵ متر بعد از ورودی انتخاب شد.

سازه کنترل تراز بستر شیب‌دار مورد بررسی در این تحقیق، از صفحات پلاکسی‌گلاس در طول‌های مختلف ۹۰، ۱۵۳ و ۲۱۰ سانتی‌متر، عرض ثابت ۰/۸۸ متر و اختلاف ارتفاع ثابت ۳۰ سانتی‌متر تهیه و در فلوم نصب شد. با توجه به اهداف این تحقیق، به‌منظور بررسی اثر اندازه زبری بر آب‌شستگی پایین‌دست سطح شیب‌دار، از ۳



شکل ۲- الف) طرح کلی از فلوم آزمایشگاهی و ب) تصاویری از فلوم آزمایشگاهی و سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار

عمق آب بالادست سازه و پایاب، از یک عمق سنج نقطه‌ای متصل به کالسکه متحرک با دقت  $\pm 0/01$  میلی‌متر استفاده شد.

در کلیه آزمایش‌ها تغییرات عمق آب‌شستگی به مدت ۶ ساعت با یک دستگاه دوربین، تصویربرداری و با استفاده از نرم‌افزار Grapher9، آب‌شستگی پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار رقومی‌سازی شد. پس از اتمام هر آزمایش، ابتدا آب داخل فلوم به‌طور کامل تخلیه و پس از آن نیمرخ نهایی آب‌شستگی بستر با استفاده از متر لیزری با دقت  $\pm 1$  میلی‌متر برداشت شد؛ این متر لیزری روی کالسکه فلزی با حرکات طولی و عرضی مستقر بود.

از آنجا که مدت‌زمان یکی از پارامترهای اثرگذار بر حداکثر عمق آب‌شستگی است، آزمایشی به مدت ۲۴ ساعت اجرا و تغییرات حداکثر عمق لحظه‌ای آب‌شستگی بررسی شد. مقایسه نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که بعد از گذشت ۶ ساعت، تغییرات عمق آب‌شستگی ناچیز بوده است و از این‌رو این زمان به‌عنوان زمان تعادل نهایی انتخاب گردید.

در هر یک از آزمایش‌ها، بعد از نصب سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، آب به‌تدریج به کانال وارد و عمق پایاب مورد نظر در کانال با مانور دریچه انتهایی برقرار و سپس دبی موردنظر تنظیم می‌گردید. برای اندازه‌گیری



شکل ۳- تصاویری از سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار و زبری‌های مختلف مورد مطالعه  
 الف) نمایی از بستر رسوبی و سطح شیب‌دار پس از نصب زبری، ب) بدون زبری با قطر ۴ میلی‌متر، ج) زبری با قطر ۴ میلی‌متر،  
 د) زبری با قطر ۷/۳ میلی‌متر و ه) زبری با قطر ۱۰ میلی‌متر

در این تحقیق، به منظور بررسی اثر پارامترهای مختلف هندسی و هیدرولیکی بر مقدار آب‌شستگی پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار، در مجموع ۹۶ آزمایش برای دبی‌های مختلف، عمق‌های پایاب ۳/۵، ۴/۵، ۶ و برابر عمق بحرانی و سه اندازه زبری اجرا شد. جدول ۱ دامنه پارامترهای مورد بررسی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- دامنه پارامترهای آزمایشگاهی

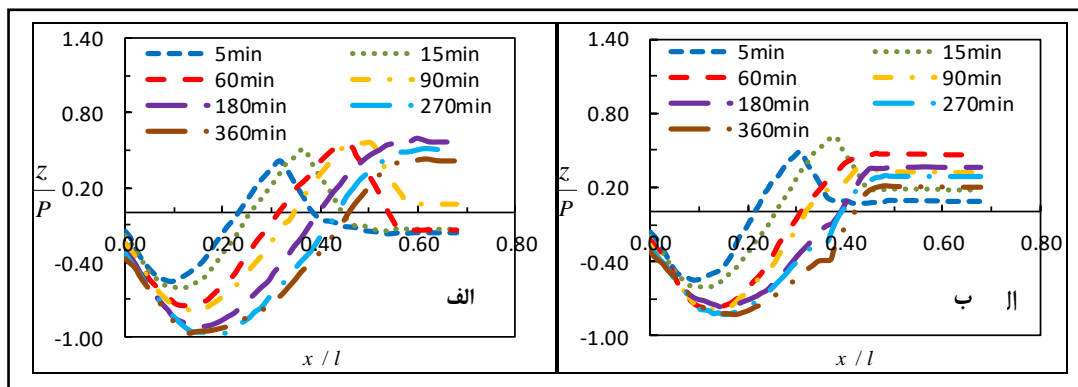
پارامترها	واحد	حداقل	حداکثر
دبی ( $q$ )	لیتر بر ثانیه بر متر	۲۸/۴	۴۵/۵
شیب ( $S_0$ )	درصد	۱۴	۳۳
زبری ( $k_s$ )	میلی‌متر	۴	۱۰
طول ( $L$ )	سانتی‌متر	۹۰	۲۱۰
عمق پایاب ( $y_i$ )	سانتی‌متر	۱۵/۱	۳۵/۵
عدد فرود جریان ( $Fr$ )	بی‌بعد	۱/۵	۴/۹
عدد فرود بی‌بعد ذره ( $Fr_d$ )	بی‌بعد	۱۰/۶	۱۸/۱
$\eta$	بی‌بعد	۱/۲	۱۷/۳

### نتایج و بحث

آزمایشگاهی نشان می‌دهد که دبی و عمق پایاب تأثیر زیادی بر شکل پشته رسوبی دارد. در دبی‌های پایین (دبی واحد عرض کمتر از ۳۴/۱ لیتر بر ثانیه بر متر و پارامتر  $\eta$  کمتر از ۱۰)، به دلیل سرعت کم جریان روی پشته رسوبی، جریان توانایی جابه‌جایی رسوبات روی آن را ندارد و حرکت پشته رسوبی به طرف پایین دست کند است. در این محدوده از دبی‌ها، پشته رسوبی به صورت ناهموار تشکیل می‌شود. با افزایش دبی و سرعت جریان، پشته رسوبی به طرف پایین دست جابه‌جا و به تدریج سطح پشته رسوبی پایین دست هموار می‌شود.

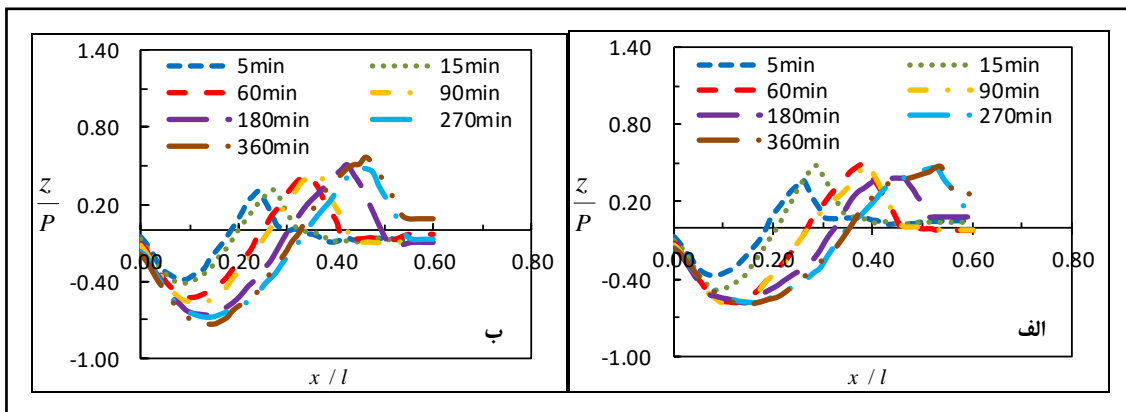
### بررسی توسعه زمانی نیمرخ آب‌شستگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار

نمونه‌ای از نتایج حاصل از اندازه‌گیری لحظه‌ای نیمرخ آب‌شستگی برای شیب‌های کارگذاری ۳۳، ۲۰ و ۱۴ درصد، عمق‌های پایاب مختلف و برای سطح صاف و سطوح با زبری ۴، ۷/۳ و ۱۰ میلی‌متر در دامنه دبی‌های واحد عرض مورد بررسی در نمودارهای شکل ۴ تا ۷ نشان داده شده است. در این نمودارها  $x$  فاصله از پای سازه و  $l$  طول سطح رسوبی پایین دست (۲/۵ متر) است. مشاهدات

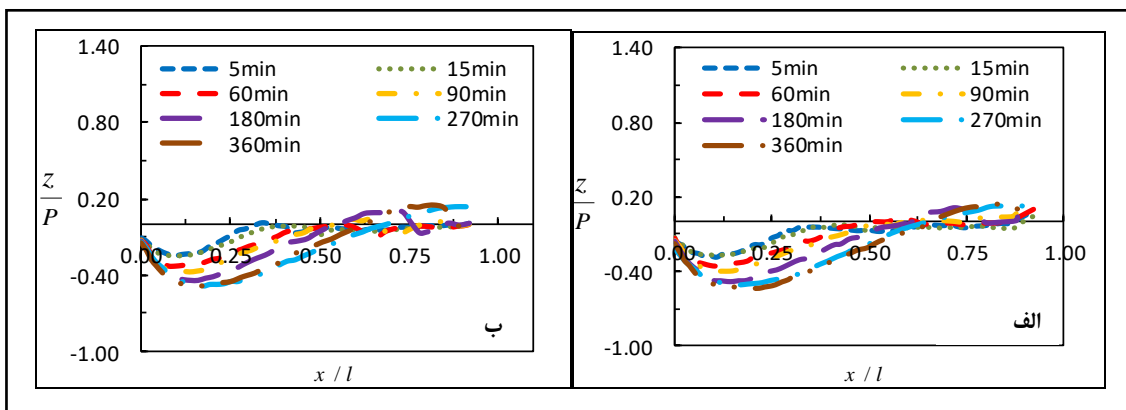


شکل ۴- نیمرخ لحظه‌ای تغییرات بستر در پایین دست سطح شیب‌دار برای شیب کارگذاری ۳۳ درصد،

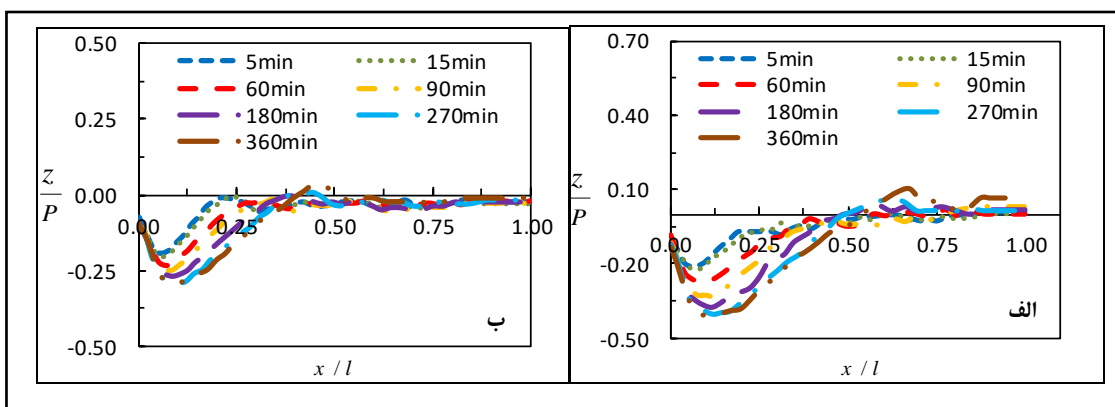
$q = 45/5 \text{ l/s/m}$ ، سطح بدون زبری و عمق‌های پایاب مختلف: الف)  $y_i = 4/5 y_c$  و  $\eta = 7$ ، ب)  $y_i = 6 y_c$  و  $\eta = 17/3$



شکل ۵- نیمرخ لحظه‌ای تغییرات بستر در پایین دست سطح شیب‌دار برای شیب کارگذاری ۳۳ درصد،  
 $\eta = 2/6$  و  $y_t = 6 y_c$  (ب)  $\eta = 8/8$  و  $y_t = 4/5 y_c$  (الف) مختلف: پایاب و عمق‌های پایاب مختلف:  $k_s = 4 \text{ mm}$ ،  $q = 39/8 \text{ l/s/m}$



شکل ۶- نیمرخ لحظه‌ای تغییرات بستر در پایین دست سطح شیب‌دار برای شیب کارگذاری ۲۰ درصد،  
 $\eta = 9/5$  و  $y_t = 4/5 y_c$  (ب)  $\eta = 15/2$  و  $y_t = 3/5 y_c$  (الف) مختلف: پایاب و عمق‌های پایاب مختلف:  $k_s = 7/3 \text{ mm}$ ،  $q = 34/1 \text{ l/s/m}$



شکل ۷- نیمرخ لحظه‌ای تغییرات بستر در پایین دست سطح شیب‌دار برای شیب کارگذاری ۱۴ درصد،  
 $\eta = 10$  و  $y_t = 4/5 y_c$  (ب)  $\eta = 15$  و  $y_t = 3/5 y_c$  (الف) مختلف: پایاب و عمق‌های پایاب مختلف:  $k_s = 10 \text{ mm}$ ،  $q = 28/4 \text{ l/s/m}$

است ولی با افزایش عمق پایاب، سطح پشته رسوبی صاف نیست و به صورت برجسته و تلماسه‌ای شکل درمی‌آید.

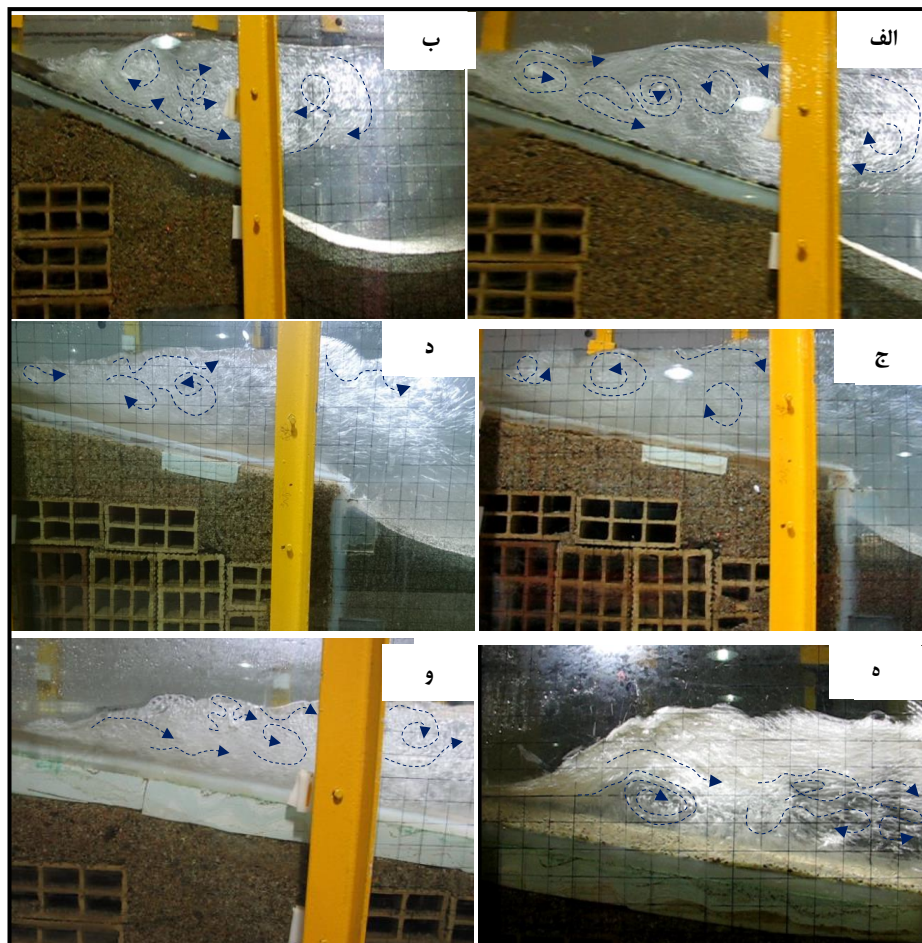
تأثیر عمق پایاب بر شکل پشته رسوبی برخلاف تأثیر دبی است. برای عمق پایاب کم، شکل پشته رسوبی هموار



روی سطح شیب‌دار، منجر خواهد شد به طولانی‌تر شدن مسیر جت ورودی تا بستر و استهلاک بیشتر انرژی ناشی از پخشیدگی جت (کاهش انرژی جنبشی جت در بستر)؛ در نتیجه، تنش برشی موضعی در مجاورت ذرات بستر کاهش می‌یابد و از عمق حفره آب‌شستگی کاسته می‌شود. در شکل ۸، تأثیر تغییر عمق پایاب بر موقعیت شکل‌گیری گردابه (جت) در جریان و ایجاد غلتابه در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار نشان داده شده است.

به‌عبارت دیگر با افزایش عمق پایاب، سرعت جریان روی پشته رسوبی در پایین‌دست حفره آب‌شستگی کاهش می‌یابد و جریان توان کافی را برای حمل ذرات رسوبی ندارد.

بررسی نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که در شیب کارگذاری ۳۳ درصد، عمق آب‌شستگی با عمق پایاب رابطه مستقیم دارد. اما با کاهش شیب به ۲۰ و ۱۴ درصد، افزایش عمق پایاب و توسعه بخشی از پرش هیدرولیکی



شکل ۸- نمایی از گردابه‌های تشکیل شده روی سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار برای شیب و عمق‌های پایاب مختلف:

$$S_0 = 20\% \text{ و } y_t = 3/5 y_c \text{ (ج), } S_0 = 33\% \text{ و } y_t = 6 y_c \text{ (ب), } S_0 = 33\% \text{ و } y_t = 4/5 y_c \text{ (الف)}$$

$$S_0 = 14\% \text{ و } y_t = 4/5 y_c \text{ (و), } S_0 = 14\% \text{ و } y_t = 3/5 y_c \text{ (ه), } S_0 = 20\% \text{ و } y_t = 4/5 y_c \text{ (د)}$$

واحد عرض، شیب‌های مختلف، و سطح بدون زبری سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار نشان داده شده است.

در نمودارهای شکل ۹ تأثیر عمق پایاب بر توسعه زمانی حداکثر عمق لحظه‌ای آب‌شستگی برای دبی‌های

شکل می‌گیرد.

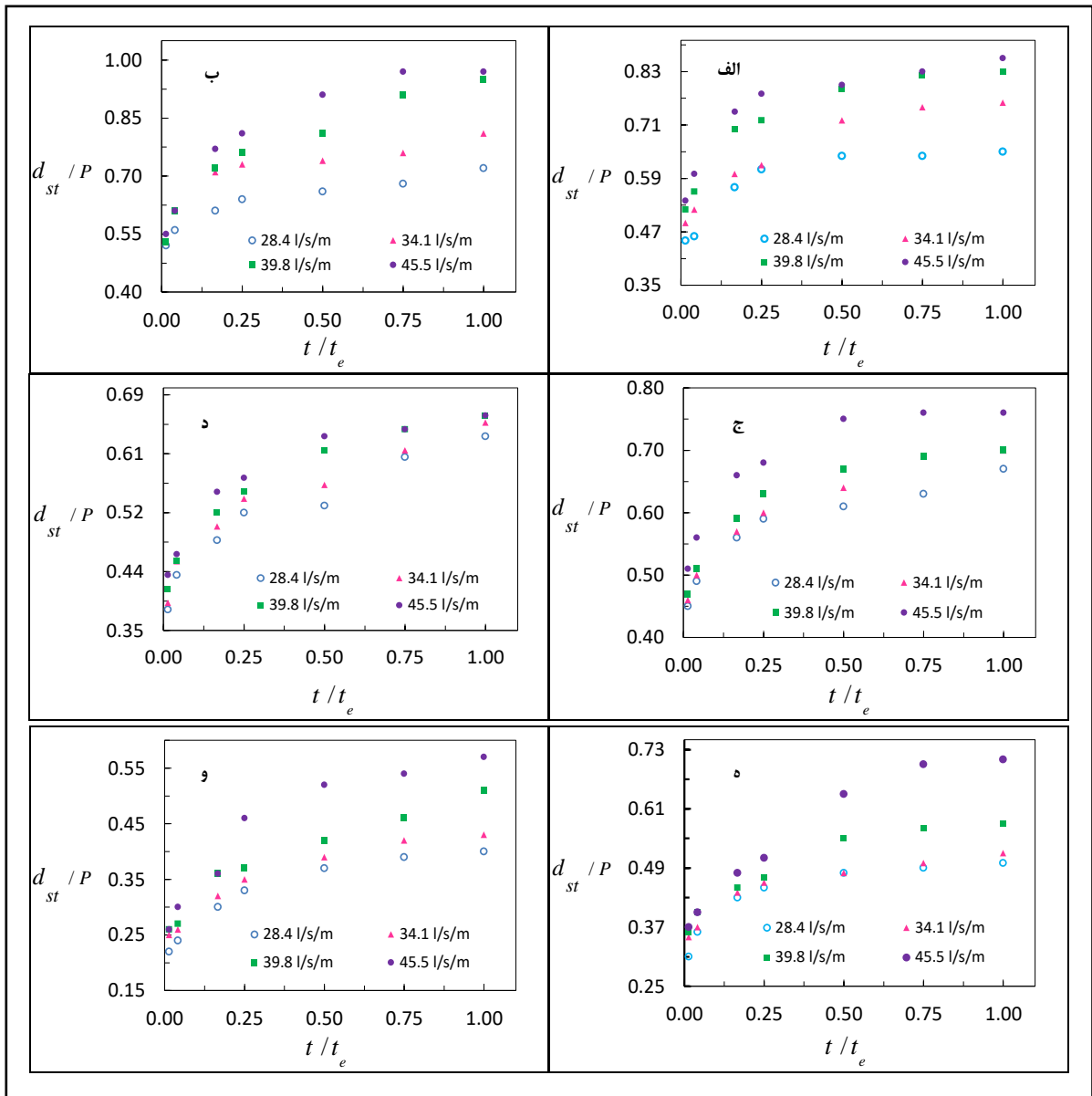
تأثیر افزایش عمق پایاب در شیب مورد بررسی به صورت کاهش در حداکثر عمق لحظه‌ای آب‌شستگی ظاهر شده است به گونه‌ای که در  $y_t = 4/5 y_c$  و زمان‌های نسبی  $0.5$  و  $t/t_e = 1/167$  به ترتیب  $25/5$  و  $21$  درصد از حداکثر عمق لحظه‌ای آب‌شستگی نسبت به عمق پایاب اول کاسته می‌شود.

در شکل ۱۰ مقایسه نتایج حداکثر عمق لحظه‌ای آب‌شستگی برای شرایط مختلف زبری و هیدرولیکی سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اعمال زبری با حداکثر قطر (۱۰ میلی‌متر)، در هر دو عمق پایاب، تأثیر بیشتری بر کاهش عمق آب‌شستگی لحظه‌ای دارد، به گونه‌ای که بیشترین کاهش در عمق نسبی بحرانی  $0.144$  (دبی واحد عرض  $28/4$  لیتر بر ثانیه بر متر و پارامتر  $\eta$  کمتر از  $12$ ) و عمق پایاب  $y_t = 4/5 y_c$  رخ داده است. در این شرایط، برای دو زمان دلخواه  $60$  و  $180$  دقیقه (زمان‌های نسبی  $0.5$  و  $t/t_e = 1/167$ )، در اثر اعمال زبری با قطرهای  $4$ ،  $7/3$  و  $10$  میلی‌متر، عمق آب‌شستگی لحظه‌ای به ترتیب  $33.47$  و  $58$  درصد در زمان نسبی  $t/t_e = 1/167$  و  $0.5$ ،  $45$  و  $50$  درصد در زمان نسبی  $t/t_e = 1/5$  نسبت به حالت بدون زبری سطح شیب‌دار کاهش می‌یابد. در عمق پایاب  $y_c = 6$  میزان کاهش عمق آب‌شستگی لحظه‌ای در محدوده  $20-54$  درصد در زمان نسبی  $0.167$  و محدوده  $50-20$  درصد در زمان نسبی  $0.5$  نسبت به حالت بدون زبری حاصل شده است.

مقایسه نتایج به دست آمده برای شیب  $33$  درصد حاکی از آن است که در محدوده دبی‌های واحد عرض مورد بررسی و عمق پایاب  $y_t = 4/5 y_c$ ، به طور متوسط  $84$  درصد از آب‌شستگی نهایی تا زمان نسبی  $t/t_e = 1/167$  (۶۰ دقیقه پس از شروع آزمایش) رخ داده است و با گذشت زمان (  $180$  دقیقه پس از شروع آزمایش)  $t/t_e = 1/5$ ،  $95$  درصد آب‌شستگی نهایی رخ داده است. تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عمق پایاب ( $y_t = 6 y_c$ )، عمق لحظه‌ای آب‌شستگی در زمان‌های نسبی  $0.5$  و  $t/t_e = 1/167$  به ترتیب  $7$  و  $5$  درصد نسبت به عمق پایاب اول افزایش می‌یابد.

مقایسه مقادیر حداکثر عمل لحظه‌ای آب‌شستگی برای شیب  $20$  درصد نشان می‌دهد که در عمق پایاب  $y_t = 3/5 y_c$  تقریباً  $87$  و  $94$  درصد از آب‌شستگی نهایی به ترتیب در زمان‌های نسبی  $0.5$  و  $t/t_e = 1/167$  شکل گرفته است. با افزایش عمق پایاب به  $4/5$  برابر عمق بحرانی، از حداکثر عمق لحظه‌ای آب‌شستگی به ترتیب حدود  $14$  و  $13$  درصد در زمان‌های  $60$  و  $180$  دقیقه پس از شروع آزمایش کاسته می‌شود.

بررسی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با کاهش شیب سطح شیب‌دار به  $14$  درصد در محدوده دبی‌های واحد عرض حداقل و حداکثر، عمق پایاب  $y_t = 3/5 y_c$  و زمان نسبی  $t/t_e = 1/167$ ، حدود  $86-68$  درصد از آب‌شستگی نهایی رخ می‌دهد و با افزایش زمان آزمایش به زمان نسبی  $t/t_e = 1/5$ ،  $96-90$  درصد آب‌شستگی نهایی



شکل ۹- توسعه زمانی حداکثر عمق لحظه‌ای آبشستگی برای دبی‌های واحد عرض، شیب و عمق‌های پایاب مختلف:

الف)  $s_0 = 33\%$  و  $y_t = 6y_c$  (ب)  $s_0 = 33\%$  و  $y_t = 6y_c$  (ج)  $s_0 = 20\%$  و  $y_t = 3/5y_c$

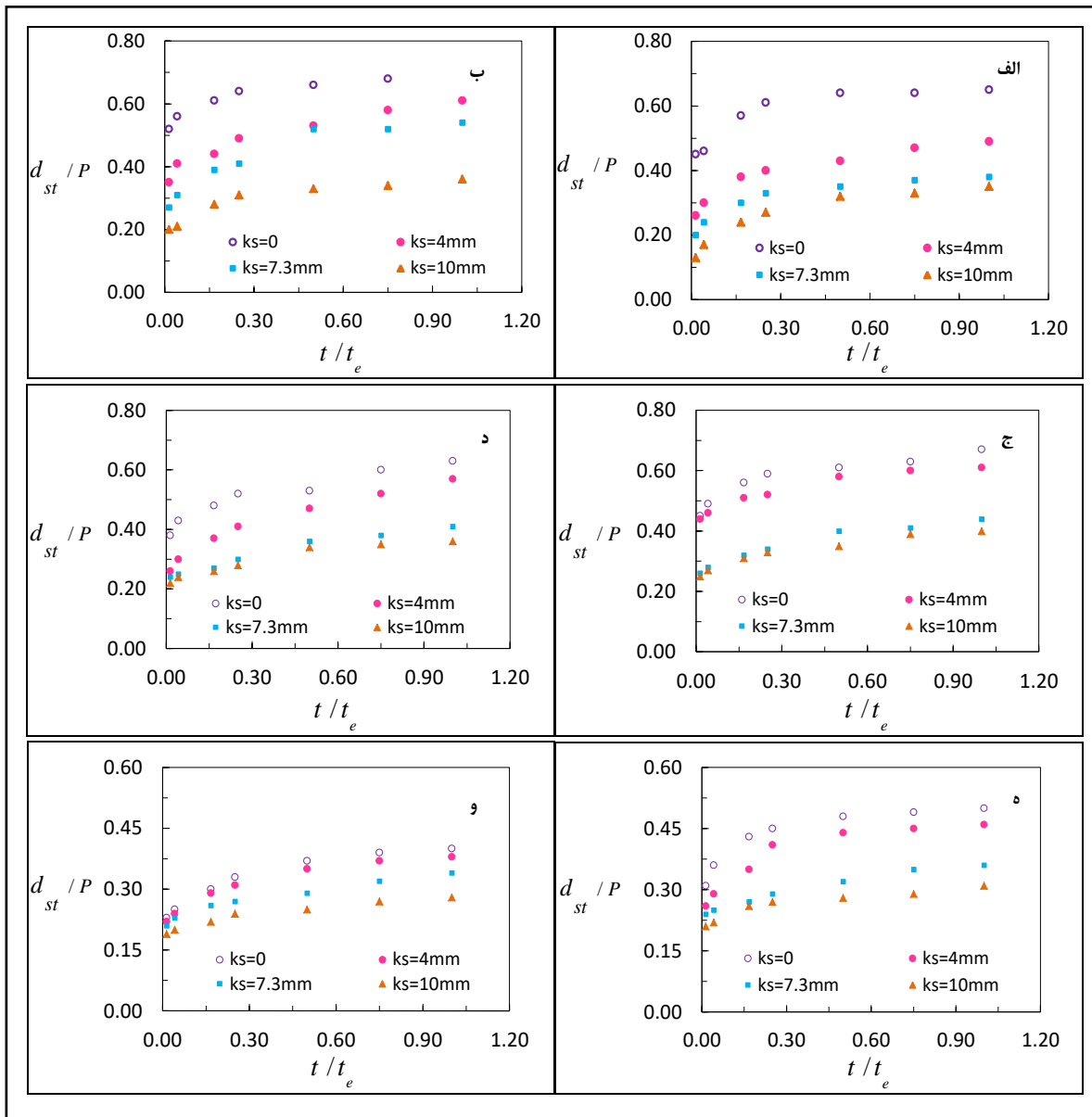
د)  $s_0 = 20\%$  و  $y_t = 4/5y_c$  (ه)  $s_0 = 14\%$  و  $y_t = 3/5y_c$  (و)  $s_0 = 14\%$  و  $y_t = 4/5y_c$

ای آبشستگی تقریباً ۹، ۴۳ و ۴۵ درصد برای زمان ۶۰ دقیقه ( $t/t_e = 1/167$ ) و ۵، ۳۴ و ۴۳ درصد و زمان ۱۸۰ دقیقه ( $t/t_e = 1/5$ ) ایجاد می‌شود. با افزایش عمق پایاب به  $y_t = 4/5y_c$  مقدار کاهش عمق لحظه‌ای آبشستگی در محدوده ۲۳-۴۶ درصد در زمان نسبی ۰/۱۶۷ و ۱۱-۳۶ درصد در زمان نسبی ۰/۵ حاصل گردیده است.

مقایسه نتایج حاصل از تأثیر افزایش زبری بر کاهش عمق آبشستگی لحظه‌ای در شیب ۲۰ درصد و دو زمان ۶۰ و ۱۸۰ دقیقه (۰/۵ و  $t/t_e = 1/167$ ) نشان می‌دهد که در دبی واحد عرض ثابت ۲۸/۴ لیتر بر ثانیه بر متر (پارامتر  $\eta$  کمتر از ۱۲)، در اثر اعمال زبری با قطرهای ذکر شده برای عمق پایاب  $y_t = 3/5y_c$  مقدار کاهش عمق لحظه

آب‌شستگی بین ۴۲-۸ تغییر کرده است. با افزایش عمق پایاب به ۴/۵ برابر عمق بحرانی، مقدار کاهش عمق لحظه‌ای آب‌شستگی در زمان‌های نسبی ذکر شده به ترتیب در محدوده ۳-۲۷ درصد و ۵-۳۲ درصد حاصل شده است.

با کاهش شیب سطح شیب‌دار به ۱۴ درصد و عمق پایاب  $y_t = 3/5 y_c$ ، در اثر اعمال زبری‌های مختلف، عمق آب‌شستگی لحظه‌ای در محدوده ۱۹-۳۹ درصد در زمان نسبی  $t/t_e = 1/167$  کاهش یافته است. با گذشت زمان به زمان نسبی  $t/t_e = 1/5$ ، حداکثر عمق لحظه‌ای



شکل ۱۰- توسعه زمانی حداکثر عمق لحظه‌ای آب‌شستگی برای دبی واحد عرض ۲۸/۴ لیتر بر ثانیه بر متر،

$F_d = 12/60$ ، شیب، دانه‌بندی و عمق‌های پایاب مختلف:

الف)  $y_t = 4/5 y_c$  و  $S_0 = 33\%$  (ب)  $y_t = 6 y_c$  و  $S_0 = 33\%$  (ج)  $y_t = 3/5 y_c$  و  $S_0 = 20\%$

د)  $y_t = 4/5 y_c$  و  $S_0 = 20\%$  (ه)  $y_t = 3/5 y_c$  و  $S_0 = 14\%$  (و)  $y_t = 4/5 y_c$  و  $S_0 = 14\%$

درصد از حداکثر عمق آبشستگی نهایی کاسته شده است. مقایسه نتایج حداکثر عمق آبشستگی برای شیب کارگذاری ۱۴ درصد (شکل ۱۳) نشان می‌دهد که با ایجاد زبری، حداکثر عمق آبشستگی در محدوده ۱۵-۱۰/۴۰=η، بین ۶ تا ۱۰ درصد برای عمق پایاب  $y_t=4/5y_c$  و دامنه ۱۰-۵/۶۰=η، کاهش یافته است. اثر افزایش عمق پایاب بر حداکثر عمق آبشستگی نهایی مشابه شیب ۲۰ درصد است به‌گونه‌ای که با کارگذاری این شیب حداکثر عمق آبشستگی نهایی برای دامنه مقادیر پارامتر η یاد شده و زبری‌های مختلف بین ۱۵ تا ۴۳ درصد کاهش یافته است. تجزیه و تحلیل نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که در عمق پایاب و اندازه زبری ثابت، به‌ازای دبی‌های مختلف، در اثر کاهش شیب از ۳۳ به ۲۰ درصد و ۲۰ به ۱۴ درصد، به‌ترتیب و به‌طور متوسط حداکثر عمق آبشستگی حدود ۹ و ۱۳ درصد کاهش می‌یابد.

همان‌طور که پیشتر اشاره شد، محققان با بررسی آبشستگی در پایین‌دست سطوح شیب‌دار، رابطه‌هایی برای برآورد حداکثر عمق آبشستگی ارائه داده‌اند. پایارا و پالمو (Pagliara & Palermo, 2010) رابطه ۴ را برای آبشستگی پایین‌دست سطح شیب‌دار در محدوده شیب ۰/۰۸۳ تا ۰/۲۵ ارائه دادند.

$$(Z_{max} + h_0)/h_1 = (11.64i + 0.7) \exp[(-0.64i + 0.17)F_{d90}] \quad (4)$$

که در آن،

$Z_{max}$  = حداکثر عمق آبشستگی؛  $h_0$  = عمق پایاب؛  $h_1$  = عمق جریان در پای سازه؛  $i$  = شیب سطح شیب‌دار؛

### مقایسه نتایج حداکثر عمق نهایی آبشستگی در پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار

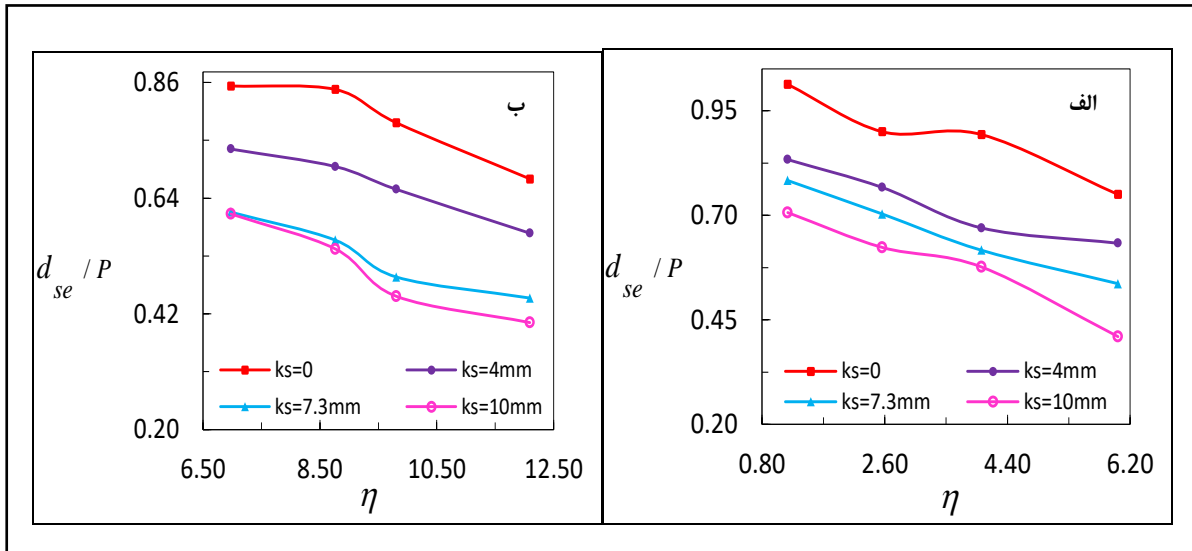
بررسی مقادیر حداکثر عمق آبشستگی برای شیب‌ها، η و زبری‌های مختلف در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. مقایسه نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش شیب کارگذاری از ۱۴ به ۳۳ درصد و با افزایش مقدار پارامتر η از ۱/۲۰ به ۱۷/۳۰، حداکثر عمق آبشستگی نهایی به‌ازای هر دو عمق پایاب افزایش می‌یابد.

تجزیه و تحلیل نتایج به‌دست آمده برای شیب ۳۳ درصد نشان می‌دهد که با اعمال زبری روی سطح شیب‌دار، از حداکثر عمق آبشستگی نهایی در دامنه ۱۰-۱۲/۷=η، به‌طور متوسط ۱۶-۱۰ درصد در عمق پایاب  $y_t=4/5y_c$  کاهش یافته است. مقدار کاهش عمق آبشستگی برای عمق پایاب  $y_t=6y_c$  و دامنه ۶-۱۲/۲۰=η، حدود ۱۸-۱۱ درصد به‌دست آمده است. مقایسه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش عمق پایاب از ۴/۵ به ۶ برابر عمق بحرانی به‌ازای زبری ۴ میلی‌متر و محدوده η ذکر شده، حداکثر عمق آبشستگی نهایی بین ۱۲-۲ درصد، در زبری ۷/۳ میلی‌متر، تقریباً ۲۰ درصد و برای زبری ۱۰ میلی‌متر در محدوده ۲/۵-۱/۵ درصد افزایش می‌یابد.

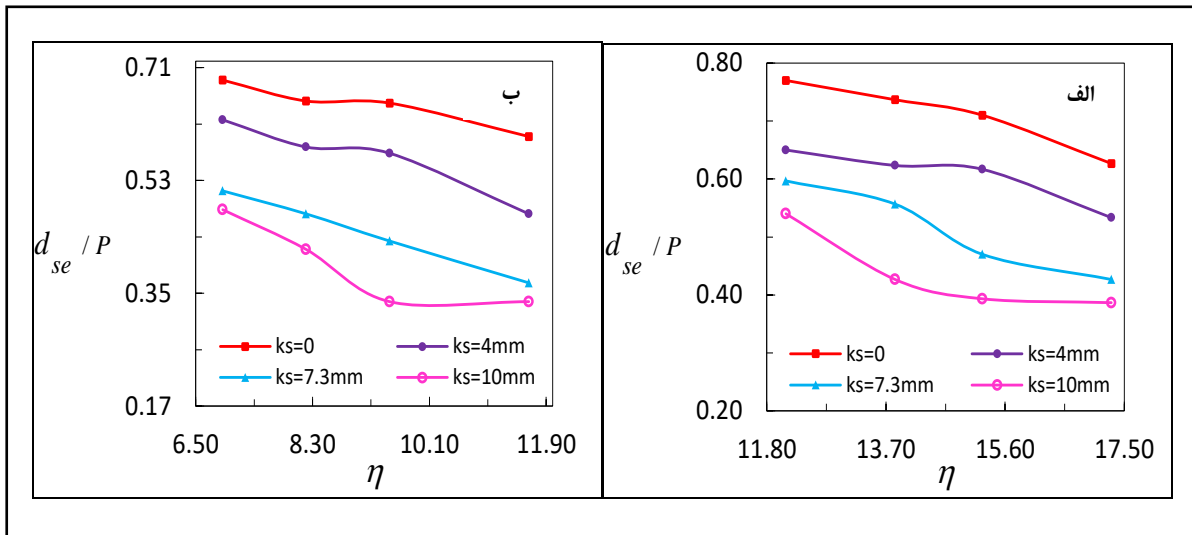
بررسی نتایج به‌دست آمده از شیب کارگذاری ۲۰ درصد (شکل ۱۲) نشان می‌دهد که اعمال زبری روی سطح شیب‌دار سبب کاهش حداکثر عمق آبشستگی نهایی در محدوده ۱۷/۳۰-۱۲/۱۰=η، به‌میزان متوسط ۱۵ درصد در عمق پایاب  $y_t=3/5y_c$  می‌شود. با افزایش عمق پایاب به  $y_t=4/5y_c$  حداکثر عمق آبشستگی نهایی برای دامنه ۱۱/۶۰-۶/۹۰=η، حدود ۱۵ درصد کاهش یافته است. مقایسه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش عمق پایاب به‌ازای زبری‌های ذکر شده، به‌ترتیب ۷، ۱۳ و ۱۰

تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی / جلد ۱۹ / شماره ۷۲ / پاییز ۱۳۹۷ / ص ۶۸-۵۱

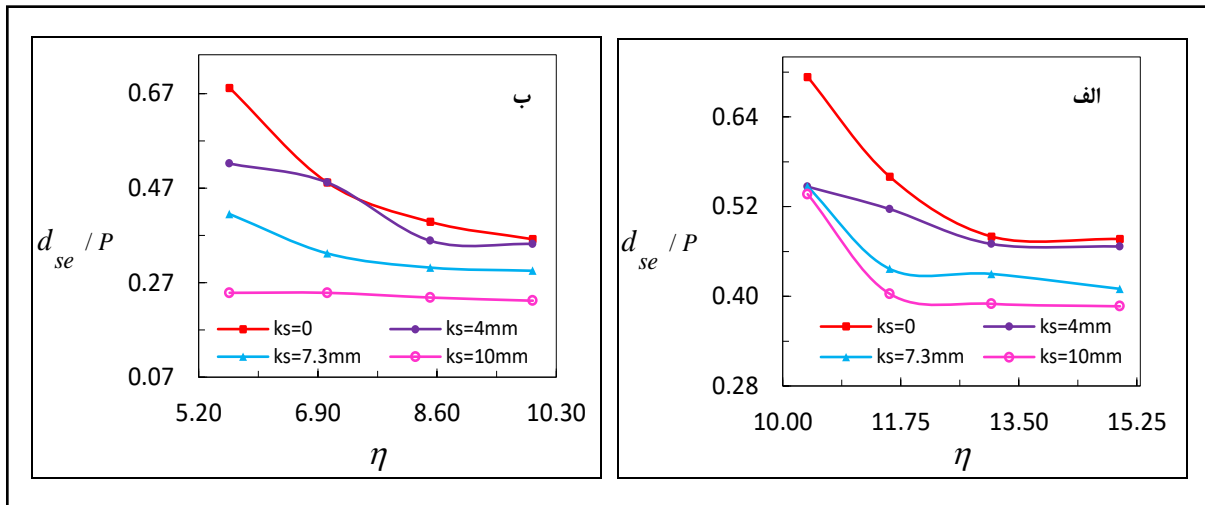
سرعت متوسط جریان در پای سطح شیب‌دار است؛  $F_d = v_1 / \sqrt{g'd_{90}}$  = عدد فرود بی‌بعد ذره (که در آن  $v_1$  = شتاب  $g' = [(\rho_s - \rho) / \rho] g$  = شتاب ثقل کاسته شده؛  $g =$  شتاب قطری =  $d_{90}$  که ۹۰ درصد ذرات از آن کوچکترند؛ و  $\rho =$  جرم مخصوص رسوبات؛ و  $\rho =$  جرم مخصوص آب.



شکل ۱۱- مقایسهٔ مقادیر حداکثر عمق نهایی آب‌شستگی برای شیب ۳۳ درصد،  $\eta$  و زبری‌های مختلف: (الف)  $y_t = 4/5 y_c$  و (ب)  $y_t = 6 y_c$



شکل ۱۲- مقایسهٔ مقادیر حداکثر عمق نهایی آب‌شستگی برای شیب ۲۰ درصد،  $\eta$  و زبری‌های مختلف: (الف)  $y_t = 3/5 y_c$  و (ب)  $y_t = 4/5 y_c$



شکل ۱۳- مقایسه مقادیر حداکثر عمق نهایی آبشستگی برای شیب ۱۴ درصد،  $\eta$  و زبری‌های مختلف:

$$y_t = 3/5 y_c \text{ (الف) و } y_t = 4/5 y_c \text{ (ب)}$$

آزمایشگاهی؛ و  $n$  = تعداد داده‌ها. تجزیه و تحلیل‌ها نشان می‌دهد که مقدار شاخص میانگین مجذور مربعات ( $RMSE$ ) و خطای نسبی ( $RE$ ) برای برآورد عمق آبشستگی به ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۱۶ برای سطح شیب‌دار بدون زبری، ۰/۰۶ و ۰/۳۳ برای زبری ۴ میلی‌متر، ۰/۰۹ و ۰/۶ برای زبری ۷/۳ میلی‌متر و ۰/۱۱ و ۰/۸۹ برای زبری ۱۰ میلی‌متر به دست آمده است. با توجه به نمودارهای شکل ۱۴، مقایسه نتایج حاصل از مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر به دست آمده برای حداکثر عمق آبشستگی توسط رابطه ارائه شده (رابطه ۴) نشان می‌دهد که تقریباً در شرایط بدون زبری، سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار توانسته است مقدار حداکثر عمق آبشستگی را در محدوده خطای  $\pm 20$  تا  $\pm 40$  درصد برآورد کند ولی با اعمال زبری، بر خطای حاصل افزوده شد به گونه‌ای که برای زبری ۱۰ میلی‌متر از دامنه خطای  $\pm 40$  درصد نیز خارج گردید.

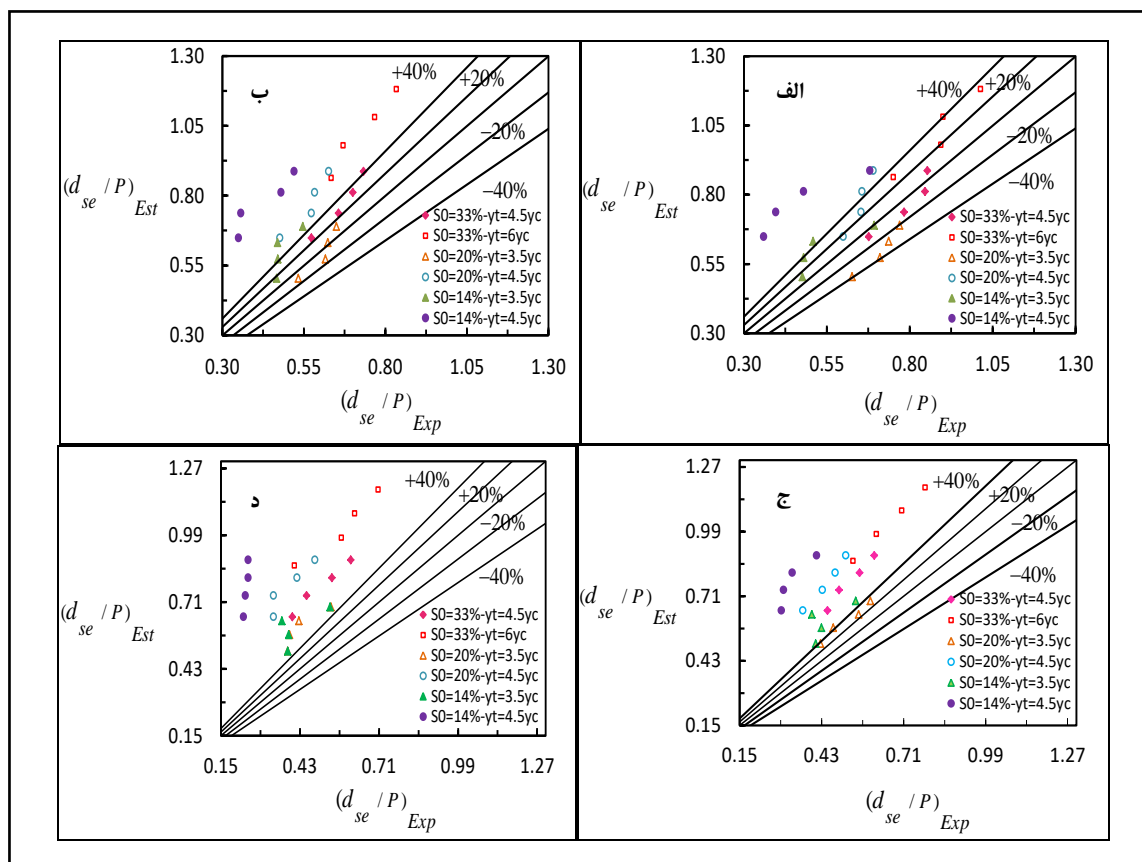
برای ارزیابی و بررسی معادله ارائه شده در برآورد مقدار حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست سطح شیب‌دار در شرایط هندسی و هیدرولیکی تحقیق حاضر، از شاخص‌های آماری مجذور میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) و خطای نسبی ( $RE$ ) استفاده گردید (روابط ۵ و ۶).

$$RMSE = \sqrt{\frac{(\sum (d_{se(Exp)} - d_{se(Est)})^2)}{n}} \quad (5)$$

$$RE = (d_{se(Est)} - d_{se(Exp)}) / d_{se(Exp)} \quad (6)$$

که در آن،

$d_{se(Est)}$  = عمق آبشستگی محاسبه شده از رابطه ۴؛  
 $d_{se(Exp)}$  = عمق آبشستگی به دست آمده از داده‌های



شکل ۱۴ - مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده حداکثر عمق نهایی آب‌شستگی، برای شیب و عمق‌های پایاب مختلف:  
 الف) بدون زبری، ب)  $k_s = 4 \text{ mm}$ ، ج)  $k_s = 7/3 \text{ mm}$  و د)  $k_s = 10 \text{ mm}$

### نتیجه‌گیری

یکی از موضوعات مهم در حفاظت از رودخانه‌ها، جلوگیری از پایین‌افتادن تراز بستر است. برای این منظور از سازه‌های مختلفی استفاده می‌شود که از جمله آنها می‌توان به سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار اشاره کرد. در پژوهش حاضر، آب‌شستگی موضعی پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. مقایسه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزایش عمق پایاب برای کارگذاری سازه با شیب ۳۳ درصد، به دلیل تقویت گردابه‌های شکل گرفته در گودال آب‌شستگی توسط گردابه‌های پرش هیدرولیکی، عمق حداکثر آب‌شستگی نهایی را بین ۲ تا ۲۲ درصد در دامنه دبی‌ها و اندازه زبری‌های حداقل تا حداکثر افزایش

می‌دهد. تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که برای شیب‌های ۲۰ و ۱۴ درصد، افزایش عمق پایاب به طور متوسط به ترتیب ۹/۵ و ۲۵/۳ درصد عمق حداکثر آب‌شستگی نهایی را کاهش می‌دهد. همچنین، با ایجاد زبری ۴ تا ۱۰ میلی‌متر روی سطح سازه، عمق حداکثر آب‌شستگی نهایی در کارگذاری سازه با شیب ۳۳ درصد در دامنه ۱۶-۳۵ درصد کاهش می‌یابد. نتایج تأثیر اعمال زبری بر کاهش عمق حداکثر آب‌شستگی نهایی در شیب ۲۰ درصد در محدوده ۱۳-۳۹ درصد به دست آمده است و با کاهش شیب کارگذاری به ۱۴ درصد، اعمال زبری مذکور منجر به کاهش ۸-۳۴ درصد در عمق حداکثر آب‌شستگی نهایی گردیده است. نتایج بررسی‌ها در ارتباط با اثر تغییر شیب بر عمق حداکثر آب‌شستگی نشان



می‌دهد که با کاهش شیب از ۳۳ به ۲۰ درصد، در دامنه می‌یابد و با کاهش شیب کارگذاری از ۲۰ به ۱۴ درصد، زبری‌های مورد بررسی و سطح بدون زبری، عمق حداکثر نهایی آب‌شستگی کم می‌شود. نهایتاً آب‌شستگی به‌طور متوسط حدود ۸ درصد کاهش می‌شود.

## مراجع

- Agostino, D. and Ferro, V. 2004. Scour on alluvial bed downstream of grade control structures. *J. Hydraul. Eng.* 130(1): 24-37.
- Borman, N. E. and Julien, P. Y. 1991. Scour downstream of grade control structures. *J. Hydraul. Eng.* 117(5): 579-594.
- Dey, S. and Raikar, R. V. 2007. Scour in long contractions. *J. Hydraul. Eng.* 131(12): 1036-1049.
- Hoffmans, G. J. C. M. 1998. Jet scour in equilibrium phase. *J. Hydraul. Eng.* 124(4): 430-437.
- Hoffmans, G. J. C. M. and Verhij, H. J. 1997. Scour manual. Rotterdam, Netherlands, Brookfield.
- Pagliara, S. 2007. Influence of sediment gradation on scour downstream of block ramps. *J. Hydraul. Eng.* 133(11): 1241-1248.
- Pagliara, S. and Palermo, M. 2010. Influence of tailwater depth and pile position on scour downstream of block ramps. *J. Irrig. Drain. Eng.* 136(2): 120-130.
- Pagliara, S., Palermo, M., Kurdistani, S. M. and Sagvand-Hassanabadi, H. 2013. Erosive and hydrodynamic processes analysis downstream of low-head rock made control structures. *J. Appl. Water Eng. Res.* 3(2): 122-131.
- Pagliara, S., Palermo, M. and Carnacina, I. 2012. Live-bed scour downstream of block ramps for low densimetric Froude numbers. *Int. J. Sediment. Res.* 27(3): 337-350.
- Robinson, K. M., Rice, C. E. and Kadavy, K. C. 1997. Design of rock chutes. *T. Am. Soc. Agr. Eng.* 41(3): 621-626.
- Scurlock, S. M., Cristopher, L. T. and Steven, R. A. 2012. Equilibrium scour downstream of three-dimensional grade control structures. *J. Hydraul. Eng.* 138(2): 167-176.



## Experimental Investigation on Local Scour at Downstream of the Inclined Grade Control Structure

G. Noormohammadi, M. Esmaeili-Varaki\*, A. Radice and B. Shafiee-Sabet

\* Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Science, Department of Water and Environmental Engineering, Caspian Sea Basin Research Center, Rasht, Iran. Email: esmaeili.varaki@yahoo.com

Received: 19 July 2017, Accepted: 11 December 2017

In river conservation practices, maintenance of a river bed level especially at under situations where the slopes of bed increases due to different reasons such as sand mining is very important. The inclined grade control structure is one of eco-friendly structures that is applied in order to stabilize rivers beds and banks. One of the important parameters for design of such structures, is estimation of a local scour depth around downstream of the structures. In present study, the effect of different hydraulic and geometric parameters on the maximum scour depth at the downstream of inclined grade control structure was experimentally investigated. Experiments were conducted for slopes of 14 to 33%, unit discharges of 28.4-45.5, tail water depths of 3.5-6 yc and roughness sizes of 4 to 10 mm. Comparison of results of the maximum scour depth for the grade control structure with slope of 33% showed that the tail water depth had direct effect on the scour depth increased from 4.5 to 6 yc, and the maximum scour depth increased by 13 percent. By decreasing the installation bed level to 20 and 14, increasing the tail water had inverse effect on the maximum scour depth in such a way that by increase of the tail water depth from 3.5 to 4.5 yc, average reduction of the maximum scour depth was found to be 9 and 25 percent for slopes of 20 and 14 percent, respectively. Comparison of the results indicated that increasing the roughness of bed caused decrease in the maximum scour depth from 5 to 21 percent within the range of the minimum and maximum roughness.

**Key words:** Bed Slope, Inclined Grade Control Structure, Local Scour, Roughness, Tail Water Depth