

## مطالعه آزمایشگاهی آبستگی موضعی در پایین دست سازه‌های کنترل تراز بستر با پلان کنگره‌ای

امیر رجائی، مهدی اسمعیلی و رکی\* و بهنام شفیعی ثابت\*\*

\* نگارنده مسئول: گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، مجتمع دانشگاه گیلان، رشت، ایران. تلفن: ۰۲۷۴۰۳۳۶۹ (۰۱۳).

پایم‌نگار: esmaeili.varaki@yahoo.com

\*\* به ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد؛ و استادیار گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی، مجتمع دانشگاه گیلان

تاریخ دریافت: ۹۵/۳/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۷/۲۰

### چکیده

سازه‌های کنترل تراز بستر را برای جلوگیری از افت بستر رودخانه و حفظ پایداری سواحل و جلوگیری از به خطر افتادن سازه‌های احداث شده در آن می‌سازند. یکی از موضوعات مهم در طراحی و ایمن‌سازی این سازه‌ها، پیش‌بینی عمق آبستگی در پایین دست آنها و روش‌های کاهش آن است. در این تحقیق تأثیر پارامترهای هیدرولیکی بر مشخصات آبستگی در پایین دست سازه‌های کنترل تراز بستر با پلان کنگره‌ای در آزمایشگاه بررسی شد. سرریزهای مورد مطالعه دارای هندسه‌های مختلف مستطیلی و دوزنقه‌ای بودند. آزمایش‌ها برای شرایط مختلف دبی و عمق پایاب اجرا شد. مقایسه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با کاهش طول سیکل در جهت جریان سرریزهای کنگره‌ای - دوزنقه‌ای، عملکرد آنها در کاهش عمق آبستگی بیشتر می‌شود به گونه‌ای که کاهش عمق آبستگی به طور متوسط تا ۱۹ درصد می‌رسد. در سرریزهای کنگره‌ای - مستطیلی، هرچه سیکل‌های ورودی عریض‌تر باشد، عملکرد سرریز بهتر خواهد بود. کاهش عمق آبستگی، در مقایسه با سازه کنترل تراز بستر خطی، به طور متوسط تا ۱۰ درصد می‌رسد. در این تحقیق همچنین رابطه جدیدی برای تخمین حداکثر عمق آبستگی برای سازه کنترل تراز بستر کنگره‌ای ارائه شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که رابطه ارائه شده نتایج مناسبی برای داده‌های نمونه اصلی دارد و دقت آن نیز مناسب است.

### واژه‌های کلیدی

کاهش آبستگی، سرریز کنگره‌ای، عدد فرود ذره، جت ریزشی، عمق پایاب

### مقدمه

و تولید رسوب است. روش‌های متداولی برای کنترل آبستگی وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به پوشش سنگی، سازه‌های توری سنگی، آبشکن‌ها، آستانه‌ها و سازه‌های کنترل تراز بستر اشاره کرد (Hoffmans & Verhij, 1997).

برای جلوگیری از توسعه آبستگی و فرسایش بستر رودخانه از سازه‌های کنترل تراز بستر استفاده می‌شود. مهمترین مزیت احداث این سازه‌ها، تثبیت جداره و بستر

آبستگی و رسوبگذاری از پدیده‌های طبیعی هستند که می‌توانند بر اثر عوامل طبیعی یا انسان تشدید یا کنترل شوند. این دو پدیده مشکلاتی را به وجود می‌آورند که ضروری است راهکارهای لازم برای مهار آنها به کار گرفته شود. البته به هیچ وجه نمی‌توان آبستگی و رسوبگذاری را به طور کامل از بین برد و در اینجا منظور از کنترل یعنی به حداقل رساندن میزان آبستگی

آب‌شستگی به‌صورت تابع لگاریتمی است. قدسیان و همکاران (Ghodsian *et al.*, 2006) اثر همزمان عمق پایاب و ارتفاع ریزش جت را بر عمق آب‌شستگی در مصالح یکنواخت بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش عمق پایاب، عمق آب‌شستگی در ابتدا افزایش و پس از رسیدن به مقدار بیشینه سرانجام کاهش می‌یابد.

دی و رایکار (Dey & Raikar, 2007) با بررسی تأثیر عمق پایاب و عدد فرود ذره در پایین دست جت‌های ریزشی از شیب‌شکن نشان دادند که با افزایش عمق پایاب، حداکثر عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد و نیز اینکه افزایش عدد فرود ذره باعث افزایش حداکثر عمق آب‌شستگی می‌شود.

چهرمی و ناصریان (Jahromi & Naserian, 2007) با مطالعه تأثیر عمق پایاب بر آب‌شستگی پایین دست جت‌های ریزشی نشان دادند که عمق پایاب تأثیر بسیار زیادی بر هندسه پشته رسوبی در پایین دست گودال آب‌شستگی دارد به‌طوری‌که در عمق‌های کم پایاب، مواد رسوبی به‌صورت یکنواخت و تقریباً با ارتفاع ثابت در پایین دست حفره آب‌شستگی ته‌نشین می‌شوند ولی در حالتی که عمق پایاب زیاد باشد، پشته رسوبی یک قله دارد و شکل تلماسه به خود می‌گیرد.

بویان و همکاران (Bhuiyan *et al.*, 2007) الگو و ساختار آشفستگی جریان در پایین دست سرریزهای W شکل را بررسی و نمودارهایی از مشخصات جریان از جمله توزیع سرعت، تنش برشی و مشخصات انتقال بار بستر را ارائه کردند. بالاچندر و همکاران (Balachandar *et al.*, 2008) با تحقیق روی آب‌شستگی ناشی از جت مستطیلی ریزشی در مواد بستر غیر چسبنده نشان دادند که برای یک عمق پایاب ثابت، عمق آب‌شستگی در شرایط تعادل با افزایش عدد فرود ذره افزایش می‌یابد.

اسکورلوک و همکاران (Scurlock *et al.*, 2012) آب‌شستگی پایین دست سازه‌های کنترل تراز بستر را بررسی

آبراهه به واسطه کاهش شیب و سرعت جریان است که به کنترل آب‌شستگی می‌انجامد. این سازه‌ها با کنترل فرسایش بستر، از تخریب سازه‌های احداث شده در رودخانه‌ها جلوگیری می‌کنند (Dey & Raikar, 2007). مهمترین سازه‌های کنترل تراز بستر، آبشار، آستانه شیب‌دار، پره قلابی شکل، پره عرضی و سرریز W شکل هستند.

عوامل مختلفی بر ابعاد حفره آب‌شستگی ایجاد شده در اثر جت‌های ریزشی عبوری از این سازه‌ها تأثیر دارند، از این عوامل می‌توان به عمق پایاب، ارتفاع ریزش، سرعت جریان، سطح مقطع و زاویه برخورد جت به بستر، دانه‌بندی، قطر و چگالی رسوبات بستر اشاره کرد (Dey & Sarkar, 2004).

تحقیقات متعددی در خصوص پارامترهای اثرگذار بر ابعاد حفره آب‌شستگی در پایین دست جت‌های ریزشی و سازه‌های کنترل تراز بستر وجود دارد که نشان می‌دهند با افزایش ارتفاع ریزش، ابعاد حفره آب‌شستگی افزایش می‌یابد (Doehring & Abt, 1994; Ojha, 1999).

بورمن و جولین (Borman & Julien, 1991) آب‌شستگی پایین دست سازه‌های کنترل تراز بستر را به شکلی وسیع بررسی کردند و با به‌کار بردن تئوری پخشیدگی جت و ترکیب با نظریه آستانه حرکت، معادلاتی برای تخمین حداکثر عمق و طول آب‌شستگی پیشنهاد دادند. علی و نیشابوری (Ali & Neyshabouri, 1991) دریافتند که در یک زمان مشخص، ارتفاع ریزش ثابت و سرعت جت ثابت، حجم گودال آب‌شستگی با کاهش اندازه ذرات افزایش می‌یابد. آگوستینو و فرو (D'Agostino & Ferro, 2004) روی سرریز و سازه‌های کنترل تراز بستر مطالعه و معادلاتی را برای تخمین حداکثر عمق آب‌شستگی ارائه کردند. دی و سرکار (Dey & Sarkar, 2006) با بررسی آب‌شستگی پایین دست دریچه کشوی می‌گویند نیمرخ آب‌شستگی در زمان‌های مختلف، تشابه هندسی خاصی دارند و نمودار توسعه زمانی

## مواد و روش‌ها

### الف) تحلیل ابعادی

مقدار آبشستگی در پایین دست سازه‌های کنترل ترزاز بستر به پارامترهای متعددی بستگی دارد که هر یک تأثیری خاص و متفاوت بر مکانیزم آبشستگی دارد و باعث افزایش یا کاهش فرسایش بستر در پایین دست آن می‌شود. شکل ۱- الف نمایی از آبشستگی را در پایین دست سازه کنترل ترزاز بستر و پارامترهای موثر نشان می‌دهد. مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر حداکثر عمق آبشستگی در جت ریزشی پایین دست سازه کنترل ترزاز بستر با پلان کنگره‌ای را می‌توان به صورت رابطه ۱ بیان کرد:

$$f_1(U_0, d_s, d_{st}, U_c, \gamma_0, \gamma_e, h_0, h_t, \rho, \rho_s, g, \vartheta, d, H_F, p, A, w, B, L_e, \alpha, t, t_e) \quad (1)$$

که در آن،

$U_0$  = سرعت جت ورودی؛  $d_s$  = حداکثر عمق آبشستگی در شرایط تعادل؛  $d_{st}$  = عمق لحظه‌ای آبشستگی؛  $U_c$  = سرعت بحرانی؛  $\gamma_0$  = ضخامت جت ورودی؛  $\gamma_e$  = عمق آب در بالای لبه سرریز؛  $h_0$  = ارتفاع ریزش در بالای سطح عمق پایاب؛  $h_t$  = عمق پایاب؛  $\rho$  = جرم مخصوص آب؛  $\rho_s$  = جرم مخصوص ذرات؛  $g$  = شتاب ثقل؛  $\vartheta$  = لزوجت سینماتیکی آب؛  $d$  = قطر ذرات؛  $H_F$  = ارتفاع ریزش؛  $p$  = ارتفاع سرریز نسبت به بستر پایاب؛  $w$  = عرض سیکل؛  $B$  = طول سیکل؛  $A$  = عرض رأس سیکل؛  $L_e$  = طول مؤثر سرریز؛  $\alpha$  = زاویه ریس سیکل‌ها؛  $t$  = مدت زمان از شروع آبشستگی؛ و  $t_e$  = مدت زمان تعادل آبشستگی.

و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی معادلاتی را برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی ارائه کردند. چاخلو و همکاران (Chakherloo *et al.*, 2012) تأثیر دبی‌های مختلف را بر آبشستگی رسوبات پایین دست سرریز لبه تیز بررسی کردند و نشان دادند که افزایش دبی تأثیر عمده‌ای در عمق آبشستگی پایین دست سرریز می‌گذارد، اما طول گودال آبشستگی وابستگی چندانی با دبی نشان نمی‌دهد و نیز عمق پایاب اثر شدیدی بر عمق آبشستگی می‌گذارد.

قدسیان و همکاران (Ghodsian *et al.*, 2012) اثر غیریکنواختی مصالح را بر ابعاد حفره آبشستگی پایین دست جت‌های ریزشی آزاد بررسی و روابطی را که محققان به دست آورده بودند مقایسه کردند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که رابطه‌ای را که آگوستینو و فرو (Agostino & Ferro, 2004) به دست آورده‌اند نسبت به داده‌های نمونه اصلی خطای کمتری نشان می‌دهد.

یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر ابعاد چاله آبشستگی در پایین دست سازه‌های کنترل ترزاز بستر، ضخامت تیغه ریزشی آن است. اگر بتوان با تغییر هندسه این نوع سازه‌ها، ضخامت تیغه ریزشی را کاهش داد، می‌توان انتظار داشت که عمق آبشستگی کاهش یابد. یکی از راهکارهای اجرایی در این خصوص کنگره‌ای کردن پلان سازه کنترل ترزاز بستر است. در خصوص آبشستگی در پایین دست سازه‌های کنترل ترزاز بستر کنگره‌ای تاکنون تحقیق نشده است و از این رو هدف از این تحقیق بررسی ابعاد چاله آبشستگی در پایین دست سازه‌های کنترل ترزاز بستر کنگره‌ای با هندسه‌های مختلف مستطیلی و دوزنقه‌ای در شرایط مختلف ارتفاع ریزش و عمق پایاب است.

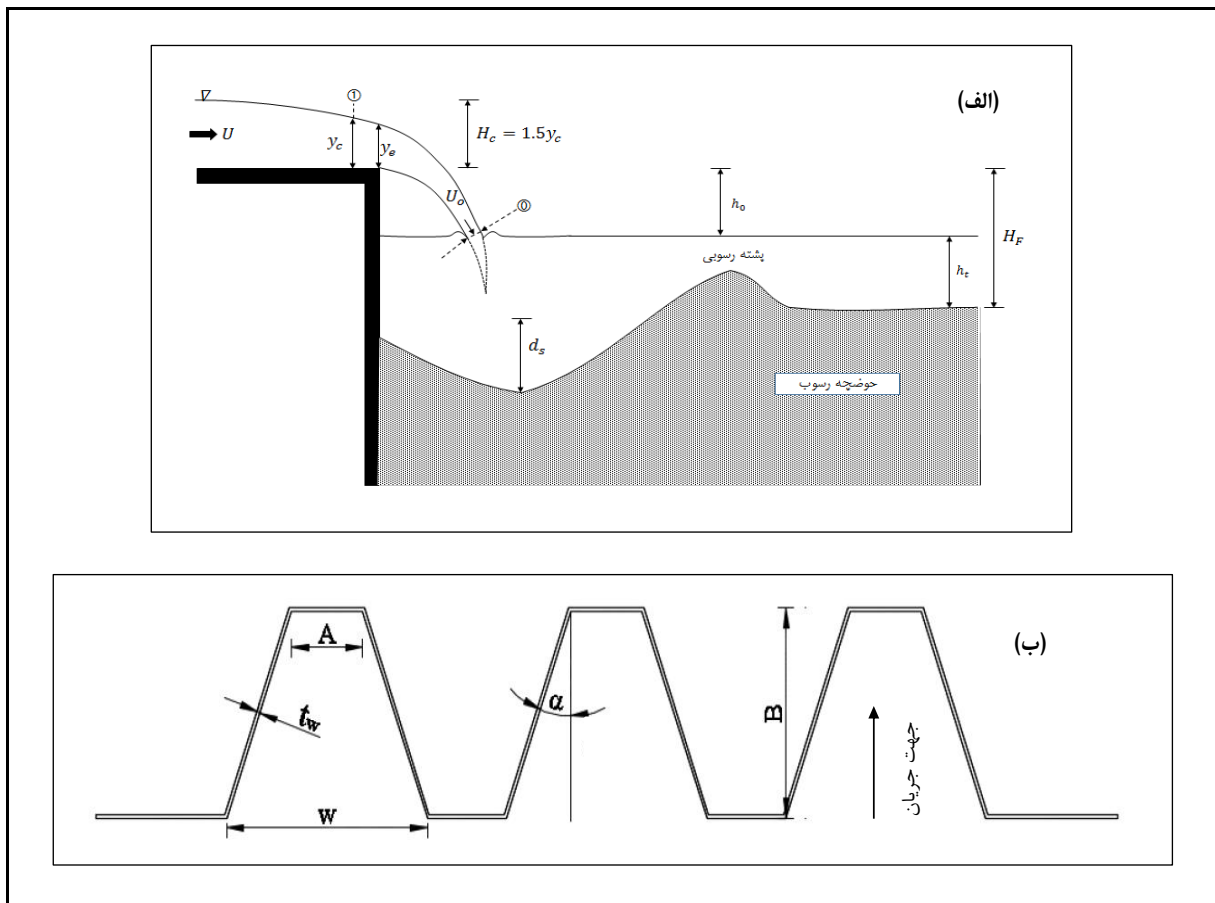
در شکل ۱- ب پارامترهای هندسی گفته شده در بالا در طرح کلی از پلان سرریز کنگره‌ای آورده شده است. با به‌کارگیری تئوری  $\pi$  باکینگهام در تحلیل ابعادی، رابطه ۱ را می‌توان به‌صورت رابطه بی بعد ۲ نوشت:

$$f_2(F_0, \dot{F}, \frac{d_s}{H_F}, \frac{d_{st}}{H_F}, \frac{d}{H_F}, \frac{h_t}{H_F}, \frac{y_0}{H_F}, \frac{y_e}{H_F}, \frac{y_e}{y_0}) \quad (2)$$

$$(\frac{h_0}{H_F}, \frac{L_e}{H_F}, \frac{p}{H_F}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{p}{w}, \frac{A}{w}, \frac{w}{B}, \frac{L_e}{w}, \frac{t}{t_e}, \alpha, Re)$$

در مبحث آب‌شستگی، مناسب‌تر است پارامترهای  $\rho_s$  و  $\rho$  به‌صورت ترکیبی به شکل  $\Delta = G_s - 1$  به‌کار برده شود که در آن  $G_s = \rho_s / \rho$  است. علاوه بر این، از اثر عدد رینولدز ( $Re$ ) به‌علت آشفته بودن جریان در آزمایش‌ها

$$\frac{d_s}{H_F}, \frac{d_{st}}{H_F} f_3(\eta, \frac{d}{H_F}, \frac{h_t}{H_F}, \frac{y_0}{H_F}, \frac{y_e}{H_F}, \frac{y_e}{y_0}, \frac{h_0}{H_F}, \frac{L_e}{H_F}, \frac{p}{H_F}, \frac{p}{w}, \frac{L_e}{w}, \frac{w}{B}, \frac{t}{t_e}, \alpha) \quad (3)$$



شکل ۱- الف) نمایی از آب‌شستگی پایین‌دست سازه کنترل تراز بستر و ب) علائم اختصاری پارامترهای هندسی موثر

مطالعه آزمایشگاهی آبستگي موضعي در پايين دست...

با جاگذاري عمق آب در بالاي لبه آبشار برابر  
 $y_e = 0.715 y_c$  در رابطه ۵ داريم:

$$U_0 = C_0 \sqrt{2g(h_0 + 2.1y_e)} \quad (۶)$$

با جاگذاري رابطه ۶ در رابطه ۴، ضخامت جت ريزشي  
 به صورت رابطه ۷ استخراج مي شود:

$$y_0 = \frac{1.17y_e^{1.5}}{C_0(h_0 + 2.1y_e)^{1.5}} \quad (۷)$$

(ب) تجهيزات آزمایشگاهی و روش اجرای آزمایشها  
 آزمایشهای این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک و  
 مدل های فیزیکی هیدرولیکی گروه مهندسی آب دانشگاه  
 گیلان و در فلومی با سیستم بازچرخانی به طول ۱۵،  
 عرض ۱/۵ و عمق ۱ متر با دیواره هایی از جنس شیشه و  
 کف فلزی شیب پذیر اجرا شد (شکل ۲).

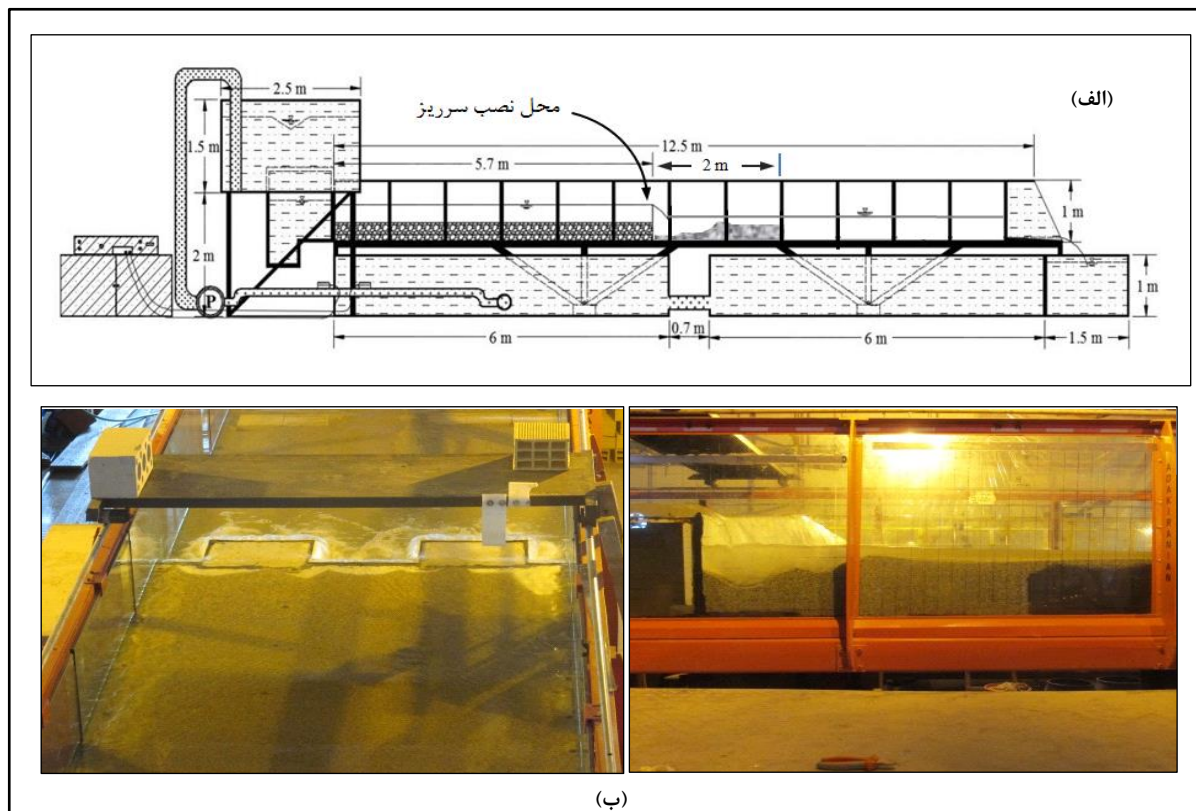
برای محاسبه ضخامت جت، ابتدا معادله پیوستگی  
 بین محل تشکیل عمق بحرانی (مقطع ۱ در شکل ۱) و  
 محل ورودی جت به عمق پایاب (مقطع ۰ در شکل ۱)  
 برقرار می گردد (Dey & Raikar, 2007) (رابطه ۴).

$$U_c y_c = U_0 y_0 \quad (۴)$$

سرعت جت ورودی را می توان با استفاده از رابطه باخمتف  
 به صورت رابطه ۵ محاسبه کرد (Dey & Raikar, 2007):

$$U_0 = C_0 \sqrt{2g(h_0 + 1.5y_c)} \quad (۵)$$

که در آن،  
 $C_0$  = ضریب سرعت جریان (برابر ۰/۶۷۲)؛ و  $h_0$  = ارتفاع  
 ریزش تا تراز عمق پایاب (Dey & Raikar, 2007).



شکل ۲- الف) طرح کلی از فلوم آزمایشگاهی و ب) تصاویری از فلوم آزمایشگاهی

تراز بستر، از سرریزی خطی استفاده شد. برای آنکه جریان قبل از رسیدن به سرریزها به شکلی مناسب توسعه یابد، موقعیت هر سرریز در فاصله ۵/۷ متری از ورودی کانال در نظر گرفته شد.

قطر ذرات رسوبی یکی از پارامترهای اثرگذار بر مقدار آب‌شستگی است. برای تامین ذرات رسوبی، ماسه معدنی در دامنه قطرهای ۴-۰/۵ میلی‌متر تهیه شد و بعد از الک کردن، قطر یکنواخت ۲/۳۶ میلی‌متر به‌دست آمد و در بستر رسوبی به طول ۲، عرض ۱/۵ و ارتفاع ۰/۳ متر در پایین‌دست سرریز قرار داده شد. جهت شبیه‌سازی بهتر بستر رسوبی کانال، بالادست بازه مورد مطالعه از رسوبات درشت‌دانه‌ای پوشیده شد که در مرحله الک کردن باقی مانده بود.

جریان آب در سیستم بازچرخانی از مخزن پایین دست به مخزن بالادست فلوم پمپاژ و پس از عبور از حوضچه آرام‌کننده جریان، وارد کانال می‌شود. برای تأمین دبی جریان، از پمپ سانتریفیوژ استفاده شد که می‌تواند دبی جریان را تا ۹۰ لیتر بر ثانیه تامین کند. برای اندازه‌گیری دبی، از دبی‌سنج اولتراسونیک با دقت ۰/۰۱ لیتر بر ثانیه و برای اندازه‌گیری عمق آب از عمق‌سنج دیجیتالی با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد.

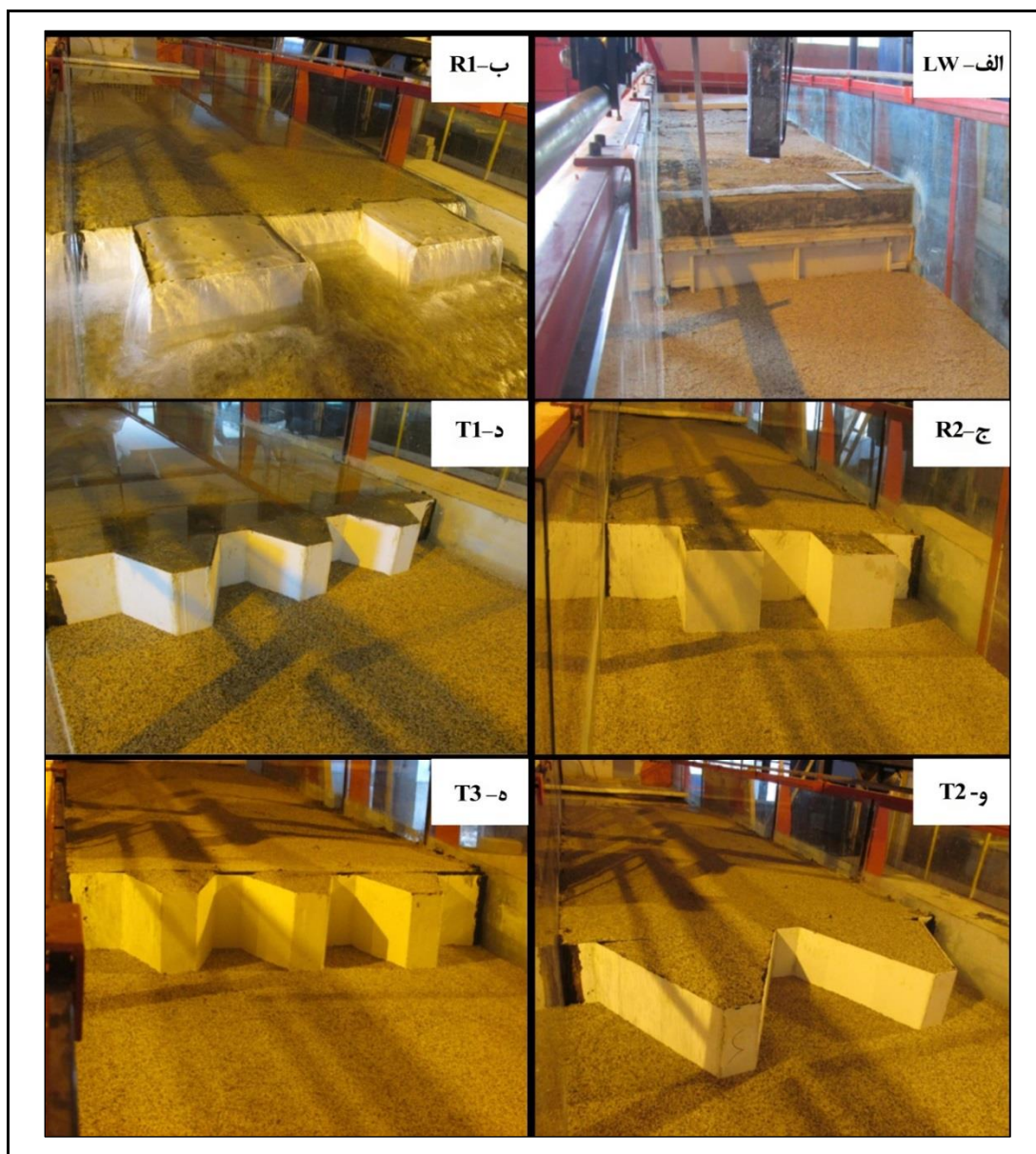
سرریزهای مورد مطالعه در این تحقیق دارای پلان کنگره‌ای و مستطیلی بودند که از ورق‌های فلزی به ضخامت ۳ میلی‌متر ساخته شدند. شکل ۳ و جدول ۱ مشخصات این سرریزها را نشان می‌دهند. برای مقایسه عمق آب‌شستگی در شرایط خطی بودن سازه کنترل

جدول ۱- مشخصات هندسی سرریزهای مورد بررسی

شماره سرریز	شکل پلان سرریز کنگره‌ای	زاویه رأس سرریز ( $\alpha$ )	عرض سیکل (سانتی‌متر)	طول سیکل در جهت جریان (سانتی‌متر)	تعداد سیکل در جهت جریان	طول مؤثر سرریز (سانتی‌متر)
LW	خطی	-	-	-	-	۱۵۰
R1	مستطیلی	۹۰	۴۰	۳۰	۲	۲۶۸
R2	مستطیلی	۹۰	۳۰	۳۰	۲	۲۶۸
T1	دوزنقه‌ای	۳۰	۳۰	۱۷	۳	۲۱۰
T2	دوزنقه‌ای	۳۰	۶۰	۴۳	۲	۲۵۰
T3	دوزنقه‌ای	۲۰	۳۰	۲۶	۳	۲۶۰

به‌طور کلی، آب‌شستگی فرآیندی است زمان‌بر و به‌هنگام مطالعه آن، تعیین زمان تعادل اهمیت ویژه‌ای دارد. یادآوری می‌شود که به‌طور مطلق نمی‌توان انتهای برای رسیدن به زمان تعادل به‌دست آورد زیرا هر اندازه از زمان شروع آب‌شستگی گذشته باشد، باز هم فرآیند فرسایش در حفره، هرچند اندک و نامحسوس، ادامه می‌یابد و در زمان طولانی نمودار تغییرات آن مجانب‌وار با خط افق امتداد خواهد یافت. در تحقیق حاضر برای تعیین زمان تعادل، در زمان‌های مختلف از چاله آب‌شستگی عکس‌برداری شد. مقایسه‌ها نشان می‌دهد که ۶ ساعت بعد از شروع آزمایش، تغییرات قابل توجهی در ابعاد چاله آب‌شستگی رخ نمی‌دهد. از این‌رو در کلیه آزمایش‌ها، اندازه‌گیری‌ها در مدت‌زمان یاد شده دنبال شد.

به‌طور کلی، آب‌شستگی فرآیندی است زمان‌بر و به‌هنگام مطالعه آن، تعیین زمان تعادل اهمیت ویژه‌ای دارد. یادآوری می‌شود که به‌طور مطلق نمی‌توان انتهای برای رسیدن به زمان تعادل به‌دست آورد زیرا هر اندازه از زمان شروع آب‌شستگی گذشته باشد، باز هم فرآیند فرسایش در حفره، هرچند اندک و نامحسوس، ادامه می‌یابد و در زمان طولانی نمودار تغییرات آن مجانب‌وار با



شکل ۳- سرریزهای مورد مطالعه

اندازه‌گیری شد. در این تحقیق برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف هندسی و هیدرولیکی بر عمق آبشستگی پایین دست سازه کنترل تراز بستر، ۱۰۵ آزمایش به اجرا در آمد که دامنه پارامترهای آزمایشگاهی در جدول ۲ نشان داده شده است.

در تمام آزمایش‌ها، بعد از عکس‌برداری از توسعه زمانی چاله آبشستگی در گام‌های زمانی مختلف، با استفاده از نرم‌افزار Grapher9، نیمرخ زمانی آبشستگی استخراج و در انتهای هر آزمایش نیز نیمرخ نهایی آبشستگی با استفاده از عمق‌سنج لیزری با دقت ۰/۱ میلی‌متر

جدول ۲- دامنه پارامترهای آزمایشگاهی

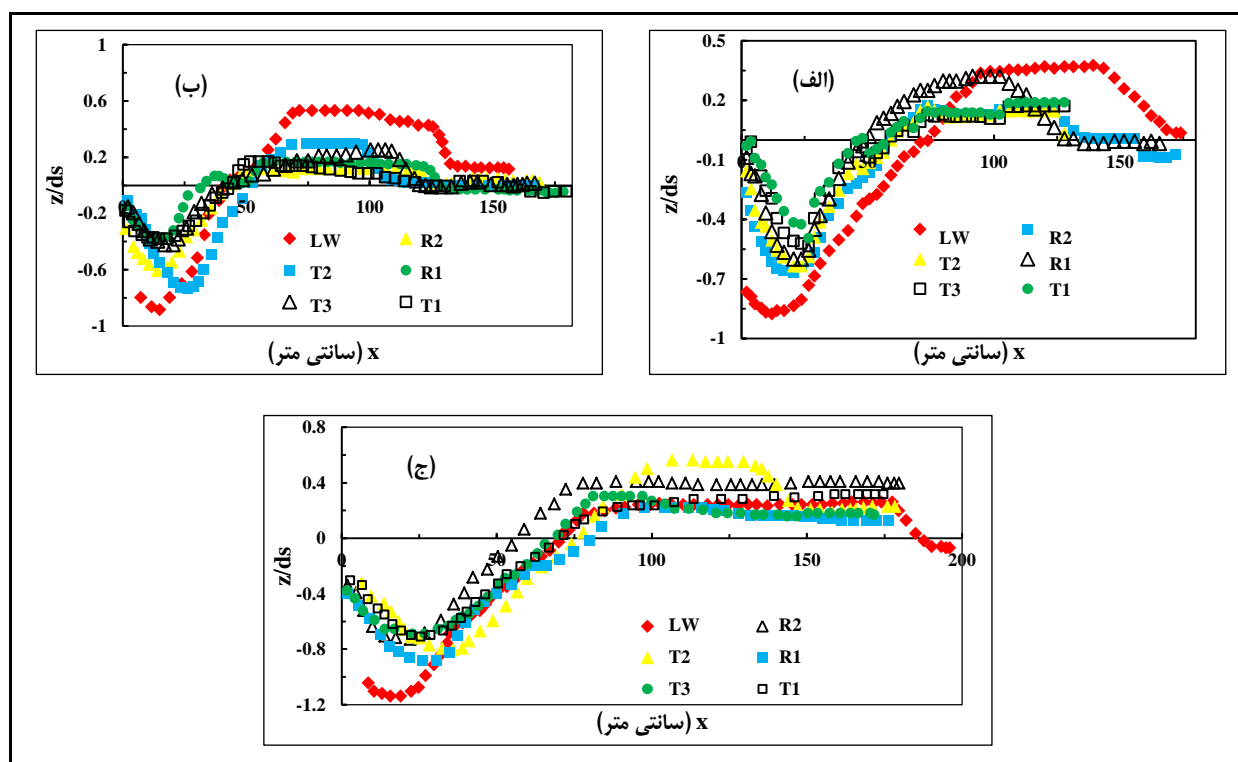
پارامترها	واحد	حداقل	حداکثر
دبی (Q)	لیتر بر ثانیه	۳۰	۷۰
ارتفاع ریزش (H <sub>F</sub> )	سانتی‌متر	۲۰	۲۵
عمق پایاب (h <sub>i</sub> )	سانتی‌متر	۶/۸	۱۸/۲
عدد فرود جریان در بالادست سرریز (Fr)	بی‌بعد	۰/۵۵	۰/۸

## نتایج و بحث

### الف) توسعه زمانی آبشستگی پایین دست سازه‌های کنترل تراز بستر

در شکل های ۴ و ۵ به ترتیب توسعه زمانی نیمرخ آبشستگی و حداکثر عمق لحظه‌ای آبشستگی برای سرریز های مورد مطالعه نشان داده شده است. در دقایق اولیه، آبشستگی با شدت بیشتری رخ می‌دهد ولی با گذشت زمان از این شدت کاسته می‌شود و گودال آبشستگی به حالت پایدار می‌رسد؛ در این حالت، ذرات رسوبی در درون گودال حالت غلتشی و جهشی دارند و به ندرت از درون گودال به سمت پایین دست منتقل می‌شوند.

همان طوری که در نمودارهای شکل ۵ مشخص است، عمق لحظه‌ای آبشستگی به صورت تابع لگاریتمی از زمان افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج برای زمان‌های نسبی مختلف، حاکی از آن است که برای سرریزهای کنگره‌ای R1 و T1 (که در میان سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای و مستطیلی بهترین عملکرد را در کاهش عمق آبشستگی داشتند) حداکثر عمق لحظه‌ای آبشستگی نسبت به سرریز خطی، به ترتیب ۳۳ و ۴۵ درصد در زمان نسبی ۵ دقیقه ( $t/t_e=0.013$ ), ۲۰ و ۳۹ درصد در زمان نسبی ۳۰ دقیقه ( $t/t_e=0.083$ ), ۱۴ و ۲۵ درصد در زمان نسبی ۲۷۰ دقیقه ( $t/t_e=0.75$ ) کاهش می‌یابد.



شکل ۴- توسعه زمانی نیمرخ آبشستگی برای دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه و ارتفاع ریزش ۲۵ سانتی‌متر (الف) ۵ دقیقه، (ب) ۳۰ دقیقه و (ج) ۲۷۰ دقیقه

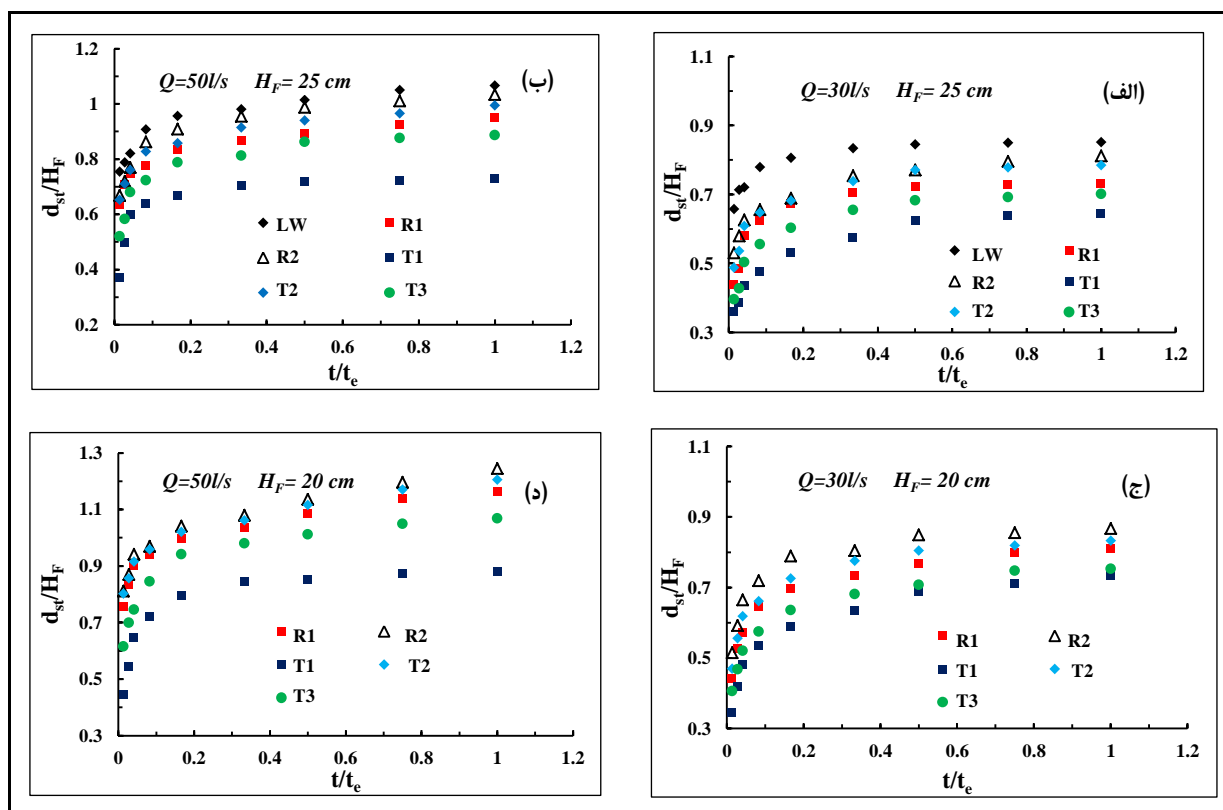


فضای بین سیکل‌ها شسته و به پایین دست منتقل می‌شوند. اندازه‌گیری‌های حاصل از نیم‌رخ نهایی آبشستگی حاکی از آن است که حداکثر عمق آبشستگی در انتهای سیکل ورودی رخ می‌دهد. در این سیکل‌ها، به دلیل ریزش سه تیغه ریزشی، بیشترین تداخل و قدرت جریان گردابه‌ای در مقایسه با سیکل‌های خروجی شکل می‌گیرد. همچنین، مشاهدات آزمایشگاهی و مقایسه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که هرچه طول سیکل در جهت جریان کمتر باشد، حداکثر عمق آبشستگی در مقایسه با سرریز خطی بیشتر کاهش می‌یابد. به همین رو، در سرریزهای کنگره‌ای مستطیلی هرچه عرض سیکل کمتر باشد، به دلیل افزایش تداخل تیغه‌های ریزشی و قدرت جریان گردابه‌ای در سیکل ورودی، حداکثر عمق آبشستگی بیشتر می‌شود.

### ب) بررسی تغییرات حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست سازه‌های کنترل تراز بستر

در شکل ۶، تاثیر همزمان کلیه پارامترهای هیدرولیکی شامل ارتفاع ریزش، عمق پایاب و دبی جریان که در پارامتر  $\eta$  خلاصه می‌شود بر حداکثر عمق آبشستگی نشان داده شده است. مقایسه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در سرریزهای کنگره‌ای مورد مطالعه، سرریز T1 به طور متوسط با کاستن ۳۰ درصد و سرریز کنگره‌ای R2 با کاستن ۵ درصد از عمق آبشستگی به ترتیب بهترین و نامناسب‌ترین عملکرد را دارند.

مشاهدات آزمایشگاهی و بررسی هندسه سرریزهای مورد بررسی نشان می‌دهد که در فضای بین سیکل‌ها، ریزش تیغه‌های جریان از سرریز منجر به شکل‌گیری جریان گردابه‌ای می‌شود که در نتیجه آن رسوبات از

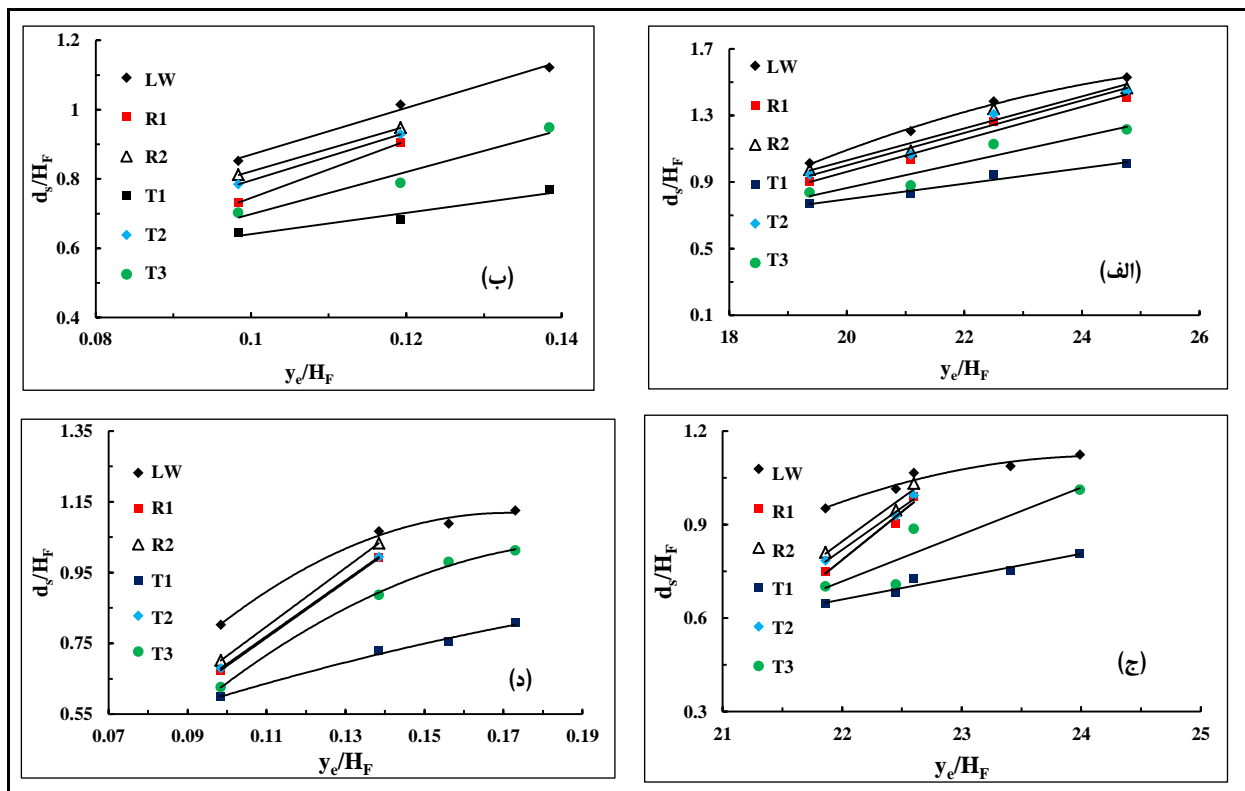


شکل ۵- نمودار توسعه زمانی آبشستگی

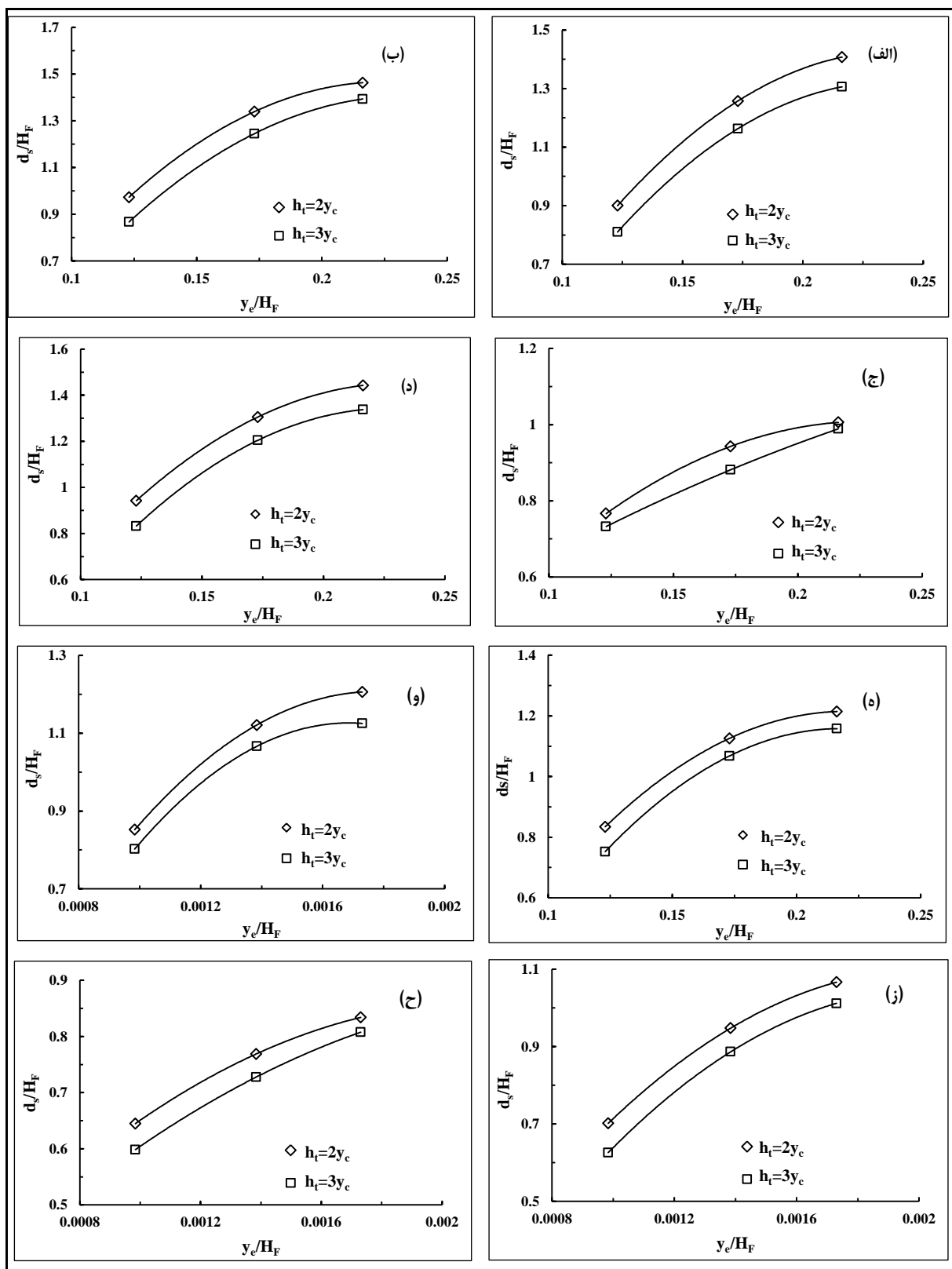
الف) دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه، ارتفاع ریزش ۲۵ سانتی‌متر، (ب) دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه، ارتفاع ریزش ۲۵ سانتی‌متر،  
ج) دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه، ارتفاع ریزش ۲۰ سانتی‌متر و د) دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه، ارتفاع ریزش ۲۰ سانتی‌متر

همان‌طور که پیشتر گفته شد، عمق پایاب یکی از پارامترهای اثرگذار بر حداکثر عمق آبشستگی است. در شکل ۷ تاثیر این پارامتر برای سرریزهای مورد مطالعه نشان شده است. مقایسه نتایج به دست آمده از سرریزهای مورد مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش عمق پایاب از دو برابر به سه برابر عمق بحرانی، برای ارتفاع ریزش ۲۰ سانتی‌متر، حداکثر عمق آبشستگی در سرریزهای R1، R2، T1، T2، T3 به طور متوسط به ترتیب ۸، ۲، ۵ و ۸ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، برای ارتفاع ریزش ۲۵ سانتی‌متر، حداکثر عمق آبشستگی در سرریزهای

همان‌طور که پیشتر گفته شد، عمق پایاب یکی از پارامترهای اثرگذار بر حداکثر عمق آبشستگی است. در شکل ۷ تاثیر این پارامتر برای سرریزهای مورد مطالعه نشان شده است. مقایسه نتایج به دست آمده از سرریزهای مورد مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش عمق پایاب از دو برابر به سه برابر عمق بحرانی، برای ارتفاع ریزش ۲۰ سانتی‌متر، حداکثر عمق آبشستگی در سرریزهای R1، R2، T1، T2، T3 به طور متوسط به ترتیب ۸، ۲، ۵ و ۸ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، برای ارتفاع ریزش ۲۵ سانتی‌متر، حداکثر عمق آبشستگی در سرریزهای



شکل ۶- مقایسه و تاثیر پارامتر  $y_e$  روی حداکثر عمق آبشستگی برای سرریزهای مورد مطالعه (الف و ب) ارتفاع ریزش ۲۵ سانتی‌متر، ج و د) ارتفاع ریزش ۲۰ سانتی‌متر



شکل ۷- تاثیر عمق پایاب برای ارتفاع ریزش ۲۰ سانتی متر (الف) R1، (ب) R2، (ج) T1، (د) T2، (ه) T3  
 برای ارتفاع ریزش ۲۵ سانتی متر، (و) LW، (ز) T3، (ح) T1

$$EF = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_{Exp} - \bar{x}_{Exp})^2]}{[\sum_{i=1}^n (x_c - x_{Exp})^2]} \quad (9)$$

که در آن،

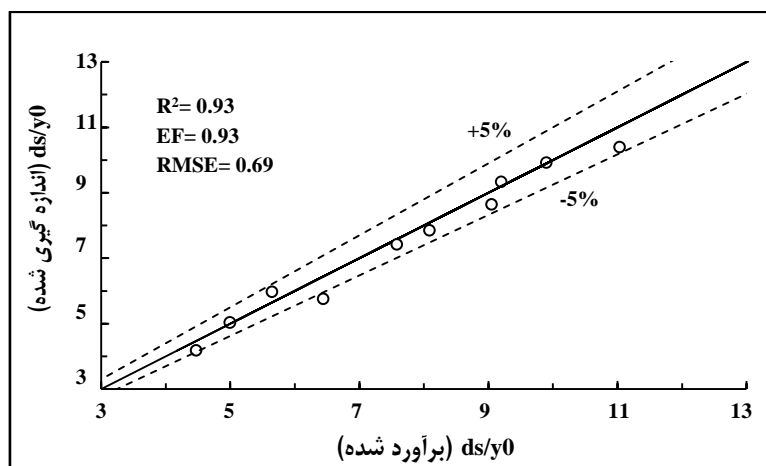
$x_{Exp}$  و  $\bar{x}_{Exp}$  به ترتیب مقادیر داده‌های آزمایشگاهی و مقدار میانگین آنها و  $x_c$  مقدار برآورد شده است.

سرانجام، بهترین رابطه بر اساس شاخص‌های آماری به صورت رابطه ۱۰ استخراج شد. در شکل ۸، که مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده عمق آبستنگی نسبی را نشان می‌دهد، مطابقت مطلوبی بین مقادیر آزمایشگاهی و برآورد شده با رابطه رگرسیونی وجود دارد.

$$\frac{d_s}{y_0} = 0.8746 \left(\frac{y_e}{y_0}\right)^{1.3668} \left(\frac{w}{B}\right)^{-0.3964} \left(\frac{L_e}{w}\right)^{-0.2764} \quad (10)$$

برای برآورد عمق آبستنگی در پایین دست سازه کنترل تراز بستر کنگره‌ای، با توجه به نتایج تحلیل ابعادی و پارامترهای بی بعد استخراج شده، تجزیه و تحلیل آماری صورت گرفت. برای این منظور، ۷۰ درصد داده‌ها برای استخراج معادله رگرسیونی به کار گرفته شد. به منظور ارزیابی معادله رگرسیونی، از شاخص‌های ضریب تبیین ( $R^2$ )، راندمان مدل (EF) و میانگین مجذور مربعات (RMSE) استفاده شد که به صورت روابط ۸ و ۹ معرفی می‌شوند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_c - x_{Exp})^2}{n}} \quad (8)$$



شکل ۸- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده عمق نسبی آبستنگی

شد. مقایسه نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تغییر هندسه سرریزهای کنگره‌ای تاثیر زیادی بر کاهش عمق آبستنگی دارد. در سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای، هرچه طول سیکل در جهت جریان کمتر شود، عمق آبستنگی، در مقایسه با سازه کنترل تراز بستر خطی، کمتر می‌شود به گونه‌ای که در هندسه T1 که نسبت به سایر سرریزهای دوزنقه‌ای طول مؤثر کمتری دارد، کاهش مقدار عمق آبستنگی به ۳۰ درصد می‌رسد. در سرریزهای

## نتیجه‌گیری

یکی از موضوعات مهم در حفاظت از رودخانه‌ها، کنترل تراز بستر است و برای این کار از سازه‌های مختلف استفاده می‌شود. از آنجا که کاهش ضخامت تیغه ریزشی جریان از این سرریزها نقش مهمی در کاهش آبستنگی در پایین دست آنها دارد در این تحقیق آبستنگی موضعی در پایین دست سازه‌های کنترل تراز بستر کنگره‌ای با هندسه‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای در آزمایشگاه بررسی

افزایش عمق پایاب از ۲ برابر به ۳ برابر عمق بحرانی، عمق آبشستگی بین ۲ تا ۸ درصد در سرریزهای کنگره‌ای کاهش می‌یابد. با استفاده از تحلیل رگرسیون رابطه‌ای برای پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی در سازه‌های کنترل تراز بستر با پلان کنگره‌ای ارائه شد که می‌تواند با دقت مطلوبی عمق آبشستگی را برآورد کند.

کنگره‌ای مستطیلی، عرض سیکل نقش مؤثری در کاهش عمق آبشستگی دارد و با افزایش آن به دلیل کاهش تداخل تیغه‌های ریزی در سیکل ورودی، عمق آبشستگی در مقایسه با سرریز خطی کاهش بیشتری می‌یابد به گونه‌ای که در سرریز کنگره‌ای - مستطیلی R1، کاهش عمق آبشستگی به ۱۲ درصد می‌رسد. مقایسه نتایج به دست آمده همچنین نشان می‌دهد که با

## مراجع

- Ali, K. H. M. and Neyshabouri, A. A. S. 1991. Localized scour downstream of a deeply submerged horizontal jet. *Proceedings Institution of Civil Engineers. Part 2.* 91(2): 1-18.
- Balachandar, R., Faruque, M. A. A. and Sarathi, P. 2008. Influence of tail water depth, sediment size and dencimetric Froude number on scour by submerged square wall jets. *J. Hydraul. Res.* 46(2):158-175.
- Bhuiyan, F., Hey, R. D. and Wormleaton, P. R. 2007. Hydraulic evaluation of w-weir for river restoration. *J. Hydraul. Eng.* 133(6): 596-609.
- Borman, N. E. and Julien, P. Y. 1991. Scour downstream of grade control structures. *J. Hydraul. Eng.* 117(5): 579-594.
- Chakherloo, M., Tavakoli, A. and Hosseini, M. 2012. Effects of three dimensional flow on local scour at the downstream of sharp crested weir. *Proceeding of 11<sup>th</sup> Iranian Hydraulics Conference.* Oct. 8-10. University of Urmia. Urmia. Iran. (in Persian)
- D'Agostino, V. and Ferro, V. 2004. Scour on alluvial bed downstream of grade control structures. *J. Hydraul. Eng.* 130(1): 24-37.
- Dey, S. and Sarkar, A. 2004. Review on local scour due to jets. *Int. J. Sediment Res.* 19(3): 210-238.
- Dey, S. and Sarkar, A. 2006. Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets. *J. Hydraul. Eng.* 132(3): 246-257.
- Dey, S. and Raikar, R. V. 2007. Scour below a high vertical drop. *J. Hydraul. Eng.* 133(5): 564-568.
- Doehring, K. F. and Abt, S. 1994. Drop height influence on outlet scour. *J. Hydraul. Eng.* 120(12): 1470-1476.
- Ghodsian, M., Melville, B. and Tajkarimi, D. 2006. Local scour due to free overfall jet. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management.* 159(4): 253-260.
- Ghodsian, M., Mehraein, M. and Ranjbar, H. R. 2012. Local scour due to free fall jets in non-uniform sediment. *Sci. Iran.* 19(6): 1437-1444.
- Hoffmans, G. J. C. M. and Verhij, H. J. 1997. *Scour manual.* Rotterdam. Brookfield. Netherlands. Balkema Pub.
- Jahromi, H. and Naserian, H. H. 2007. Influence of tail water depth on local scour downstream of free jets. *Proceeding of 6<sup>th</sup> Iranian Hydraulics Conference.* Sep. 4-6. Shahrekord University. Shahrekord. Iran. (in Persian)
- Ojha, P. 1999. Outlet scour modeling for drop height influence. *J. Hydraul. Eng.* 125(1): 83-85.
- 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.



## **Laboratory Study on Local Scour at the Downstream of Grade Control Structures with Labyrinth Planform**

**A. Rajaei, M. Esmaeili-Varaki\* and B. Shafiei-Sabet**

\* Corresponding Author: Assistant Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Gilan, Rasht, Iran. Email: esmaeili.varaki@yahoo.com

Received: 10 June 2016, Accepted: 11 October 2016

Grade control structures are commonly used to prevent degradation, increase bank and bed of rivers stability and prevent cross structures failure in rivers. In order to design a safe grade control structures, estimation of local scour depth downstream of these structures is crucial. In this study effect of different parameters on local scour at the downstream of grade control structures with labyrinth planform was experimentally investigated. Different types of rectangular and trapezoidal labyrinth planform weirs were studied. Experimental results showed that labyrinth planform has a high effect on reducing scour depth. It was found that decreasing the length of cycles in trapezoidal weirs decreases the depth of scour while, decreasing the width of cycles in rectangular weirs increases the depth of scour. It was found that by increasing parameter and drop height, depth of scour increases, while increasing tailwater depth decreases the depth of scour and it varied from 2 to 8 percent for labyrinth weirs. Results showed that the scour depth follows an exponential law, dimensional equation for prediction of scour depth is presented. The accuracy of developed equation was examined with the available prototype data.

**Keywords:** Dencimetric Froude Number, Impinging Jet, Labyrinth Weir, Reduction of Scour Depth, Tail Water Depth.