

## بررسی آزمایشگاهی آبشستگی پایین دست سرریز لایرنت مستطیلی با دریچه

سعید گوهری<sup>۱\*</sup> و زهرا کبیری محمودآبادی<sup>۲</sup>

۱ و ۲- به ترتیب: استادیار؛ و دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران  
تاریخ دریافت: ۹۷/۳/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۹/۲۱

### چکیده

با توجه به کارایی مناسب سرریزهای لایرننت، تحقیقات بسیاری در زمینه مزایا و کاربرد این سرریزها صورت گرفته است. این تحقیق به منظور بررسی هیدرولیک جریان و تاثیر سازه ترکیبی سرریز- دریچه بر میزان آبشستگی در پایین دست سازه، به صورت آزمایشگاهی اجرا شده است. در این تحقیق ۱۲ آزمایش در ۳ دبی متفاوت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ لیتر بر ثانیه برای حالت جریان از روی سرریز و جریان همزمان از روی سرریز- دریچه برای دو مدل سرریز خطی و لایرننت اجرا شده است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که در سرریز لایرننت با تخلیه بیشتر انرژی در محل برخورد با کفبند، امکان انتقال بیشتر رسوبات به پایین دست کاهش می‌یابد و ارتفاع موج ماسه در پایین دست کفبند بیشتر است. با افزایش فرود ذره برای عمق پایاب ثابت بیشینه عمق آبشستگی و طول گودال آبشستگی افزایش پیدا می‌کند. در جریان همزمان از روی سرریز و دریچه، در سرریزهای لایرننت و سرریزهای خطی بیشینه عمق آبشستگی و طول حفرة آبشستگی نسبت به جریان از روی سرریز افزایش پیدا می‌کند. بیشینه عمق آبشستگی و طول حفرة آبشستگی با افزایش دبی افزایش می‌یابد و مقدار آن در سرریزهای لایرننت، نسبت به سرریز خطی، در تمام حالات کمتر است.

### واژه‌های کلیدی

جریان همزمان، سرریز خطی، کفبند افقی

### مقدمه

مستقیم به غیر مستقیم (لایرننت) است که می‌تواند به شکل‌های مختلف مثلثی، دوزنقه‌ای، مستطیلی و... ساخته شود. فرضیه اصلی در طرح سرریزهای لایرننت افزایش انتقال جریان روی سرریز با تاج ثابت و به‌زای ارتفاع معین سطح آب در بالادست است.

با ترکیب سرریز و دریچه می‌توان دو مشکل عمده و اساسی رسوب‌گذاری در پشت سرریزها و تجمع رسوب و مواد زائد در پشت دریچه‌ها را رفع کرد اما در سازه‌های ترکیبی شرایط هیدرولیکی جدیدی حاکم خواهد شد که باعث اختلاط شدید در جریان و تغییرات در تنش برشی کف می‌شود که

آبشستگی پدیده‌ای است که معمولاً در پایین دست سازه‌های آبی مانند سدها، سرریزها، شوت‌ها، سازه‌های پلکانی و ... دیده می‌شود. این پدیده ناشی از مستهلک نشدن انرژی در پایین دست، انتقال پرش هیدرولیکی به خارج از حوضچه آرامش و تشکیل پرش هیدرولیکی ناپایدار، و به‌وجود آمدن جریان‌های گردابی در پایین دست سازه‌های آبی است. در فرآیند آبشستگی، ذرات رسوبی از بستر جدا و به پایین دست منتقل می‌شوند. یکی از راه‌های افزایش حجم مخزن، اصلاح تاج سرریز از حالت

هی و تیلور (Hey & Taylor, 1970) روشی برای محاسبه دبی و طراحی این نوع سرریزها ارائه کردند.

حیدرپور و همکاران (Heidarpur et al., 2006) با بررسی سرریزهای چندوجهی با پلان مستطیلی و L شکل نشان دادند ضریب دبی نسبت به  $H_t/P$ : بار هیدرولیکی و P: ارتفاع سرریز) ابتدا افزایش پس از رسیدن به یک مقدار بیشینه، کاهش می‌یابد و نیز اینکه ضریب دبی در سرریزهای با پلان مستطیلی کمتر از ضریب دبی در سرریزهای پلان L شکل و دوزنقه‌ای است.

اسمعیلی‌ورکی و رضوی‌زاده (Esmaili-Varki & Razavizadeh, 2013) با بررسی مشخصات هیدرولیکی جریان روی سرریزهای لایرننت (لبه طولانی) نشان دادند با افزایش هد نسبی مؤثر، سرریزها دچار استغراق نسبی می‌شوند و ضریب‌های دبی جریان سرریزها با هندسه‌های مختلف متمایل به سرریز لبه‌پهن خواهند شد و در نتیجه آن، دبی واحد طول عبوری از سرریزها نسبت به سرریز خطی کاهش می‌یابد.

روی آبشستگی موضعی پایین دست بسترهای حفاظت شده نیز تحقیقات فراوان است. فرهودی و اسمیت (Farhoudi & Smith, 1985) با بررسی تشابه پروفیل آبشستگی در پایین دست پرش هیدرولیکی، گودال آبشستگی را بر حسب پروفیل‌های بی‌بعد ارائه دادند.

درگاهی (Dargahi, 2003) با مطالعه توسعه آبشستگی در پایین دست سرریز نتیجه گرفت بین پروفیل‌های گودال‌های آبشستگی تشابه وجود ندارد.

فاروق و همکاران (Faruque et al., 2006) با بررسی تأثیر عمق پایاب بر آبشستگی موضعی ناشی از جت‌های دیوارهای سه‌بعدی مشاهده کردند که

ممکن است آثاری متفاوت بر آبشستگی پایین دست خود بگذارد.

تا پیش از سال ۱۹۸۵، سال انتشار مقاله احمد (Ahmed, 1985) در زمینه ایده ترکیب دو سازه سرریز و دریچه، اطلاعات بسیار کمی در باره جریان ترکیبی سرریز-دریچه وجود داشت. پس از آن، نجم و همکاران (Negm et al., 1994) متغیرهای هندسی و هیدرولیکی مؤثر بر جریان ترکیبی را بررسی و برای جریان سرریز مثلثی روی دریچه مستطیلی با ابعاد و تنگ‌شدگی‌های مختلف، روابطی را به‌طور جداگانه استخراج کردند.

شیشا و شیواپور (Shesha-Prakash & Shivapur, 2004) با بررسی دبی جریان از روی سرریز مستطیلی و از زیر دریچه V شکل، نتیجه گرفتند زمانی که از زیر دریچه V شکل و کج استفاده می‌شود دبی کانال‌های مستطیلی با بستر ثابت به شکلی دقیق تر قابل تخمین است.

سامانی و مظاهری (Samani & Mazaheri, 2009) به بررسی تخمین رابطه دبی جریان از روی سرریز و دریچه در حالت‌های آزاد و مستغرق پرداختند؛ نتایج بررسی هیدرولیک جریان در این تحقیق نشان می‌دهد در هر دو حالت، پایاب بر عمق بالادست و دبی جریان تأثیر می‌گذارد و با کالیبراسیون ضریب شدت جریان سیستم دریچه-سرریز می‌توان با دقت مناسبی به تخمین دبی جریان رسید.

میرناصری (Mirnaseri, 2013) با بررسی آزمایشگاهی تأثیر ابعاد دریچه بر ضریب آبگذری مدل ترکیبی سرریز لایرننت مستطیلی دریچه‌دار نشان داد که ضریب دبی در حالت ترکیبی بیشتر است تا در حالت سرریز و وجود دریچه موجب افزایش ضریب دبی می‌شود.

دهقانی و بشیری (Dehghani & Bashiri, 2010) با بررسی آزمایشگاهی آبشستگی در پایین دست سازه ترکیبی سرریز-دریچه نشان دادند در دبی و سرریز ثابت، با افزایش مقدار بازشدگی دریچه، بیشینه عمق آبشستگی و طول رسوب گذاری افزایش می یابد.

شهابی و همکاران (Shahabi *et al.*, 2011) نیز با بررسی آزمایشگاهی اثر انقباض جریان بر حفره آبشستگی پایین دست سازه ترکیبی نشان دادند با ایجاد انقباض در دریچه با سرریز به دلیل تمرکز جت جریان، بیشینه عمق آبشستگی افزایش، طول حفره آبشستگی افزایش و طول رسوب گذاری کاهش می یابد.

رجایی و همکاران (Rajaei *et al.*, 2018) با مطالعه آبشستگی در پایین دست سرریزهای کنگره ای کاهش میزان آبشستگی را در پایین دست این نوع سرریزها، نسبت به سرریزهای خطی، ۱۹ درصد گزارش دادند. این محققان همچنین شکل دوزنقه ای سرریز کنگره ای (در پلان) را بهترین نوع سرریز برآورد کرده اند.

جاستریچ و همکاران (Jüstrich *et al.*, 2016) با بررسی آبشستگی در پایین دست سرریزهای کلید پیانویی گزارش دادند که شیب بیشینه عمق آبشستگی در پایین دست این سرریزها متأثر از زاویه ایستایی مصالح بستر است و نیز ابعاد آبشستگی در سرریزهای کلید پیانویی شباهت زیادی به آبشستگی در جریان های جت مانند دارد. تاکنون تحقیقاتی زیادی درباره مزیت ها و از جمله ضریب دبی در سرریزهای لایبرنت شده است، اما مطالعات در زمینه تأثیر لایبرنت بودن سرریز بر میزان و ابعاد حفره آبشستگی اندک است. در این پژوهش، تأثیر این نوع سرریزها بر آبشستگی پایین دست در حالت جریان از

برای اعداد فرود ذره کمتر از ۵، متغیر عمق پایاب بدون بعد تأثیری بر بیشینه عمق آبشستگی ندارد اما برای اعداد فرود ذره بیشتر از ۱۰، تأثیر عمق پایاب قابل توجه است. مهرآیین و قدسیان (Mehraein & Ghodsian, 2009) با مطالعه حفره آبشستگی ایجاد شده بر اثر جت های دیواره ای به این نتیجه رسیدند که بیشینه عمق حفره در نسبت های عمق پایاب کم به صورت متناوب افزایش و کاهش می یابد در حالی که در شرایط عمق پایاب زیاد ابعاد حفره آبشستگی بعد از رسیدن به زمان تعادل ثابت می ماند.

حسینی و همکاران (Hosseini *et al.*, 2008) تغییرات زمانی پروفیل آبشستگی پایین دست جت افقی مستغرق را بررسی کردند و نشان دادند که پروفیل های بی بعد آبشستگی، طولی مستقل از زمان دارند.

امید و حمیدی فر (Omid & Hamidifar, 2006) با بررسی پروفیل های آبشستگی پایین دست دریچه کشویی در رسوبات چسبنده نشان دادند که در رسوبات غیر چسبنده پروفیل بی بعد را نمی توان بر حسب منحنی منفرد ارائه کرد.

سیفی و همکاران (Seyfi *et al.*, 2013) با بررسی تأثیر شکل هندسی سرریز لبه پهن بر ابعاد حفره آبشستگی در پایین دست پرداختند و با وجود تشابه بین پروفیل ها رابطه ای برای تعیین پروفیل گودال در شرایط مختلف تعیین کردند.

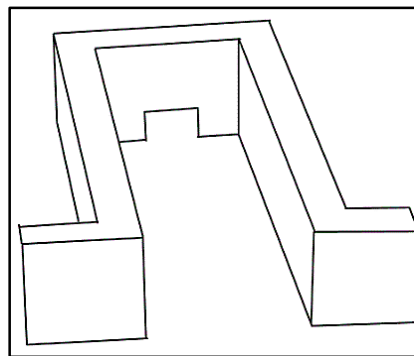
اولین بار اویماز (Uyumaz, 1988) روی آبشستگی در سازه ترکیبی سرریز-دریچه با دو دانه بندی و رسوب غیر چسبنده به آزمایش هایی پرداخت. نتایج پژوهش وی نشان می دهد که آبشستگی در پایین دست سازه ترکیبی سرریز-دریچه کمتر از زمانی است که تنها جریان از زیر دریچه وجود داشته باشد.

طول پرش هیدرولیکی از یک اشل نواری استفاده شده است. مدل‌های فیزیکی سرریز-دریچه ترکیبی در دو حالت خطی و لایرننت با پلان مستطیلی به ضخامت ۵ سانتی‌متر از جنس پلاستیک فشرده ساخته شده است. دریچه تعبیه شده به ابعاد ۱۲×۶ سانتی‌متر و در فاصله ۳/۵ سانتی‌متری از کف سرریزها ساخته شده است (شکل ۱). یک کفبند به طول ۷۵ و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر برای کنترل پرش هیدرولیکی بعد از سرریز در نظر گرفته شده است. در این آزمایش‌ها از رسوبات غیرچسبنده با  $d_{50} = 1$  میلی‌متر به طول ۲ متر و ضخامت ۱۵ سانتی‌متر استفاده شده است.

روی سرریز و عبور جریان به‌طور همزمان از روی سرریز و دریچه بررسی شده است.

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در فلومی به طول ۱۰ متر، ارتفاع و عرض ۰/۵ متر اجرا شد که دیواره‌هایی از جنس شیشه و کف گالوانیزه دارد. در انتهای کانال، سرریز مثلثی واسنجی شده برای اندازه‌گیری دبی جریان و یک دریچه کشویی برای تنظیم عمق پایاب تعبیه شده است. برای برداشت پروفیل گودال آبشستگی و اندازه‌گیری عمق آب، از یک عمق‌سنج با دقت ۰/۱ میلی‌متر قابل حرکت در سه بعد و برای اندازه‌گیری



شکل ۱- نمایی از مدل سرریز لایرننت-دریچه آزمایشگاهی در تحقیق حاضر

Fig. 1 - Schematic of the labyrinth spillway-gate model in this study

با بستن دریچه انتهای کانال و پس از آن قطع جریان، بستر زه‌کشی و پروفیل بستر برداشت می‌شود. سپس بستر رسوبی دوباره تسطیح و شرایط برای آغاز آزمایش بعدی آماده می‌شود. برای بررسی بیشینه عمق آبشستگی ( $d_{sm}$ )، در ابتدا متغیرهای مؤثر شناسایی و به شرح رابطه ۱ انتخاب شدند:

$$f(Q, \rho, \rho_s, g, \mu, B, S_0, h_u, h_d, y, P, \sigma, d_{50}, w, a, L_{sm}, L_e, L_a, L_d, L_0, t) = 0 \quad (1)$$

در این تحقیق، ۱۲ آزمایش در ۳ دبی متفاوت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ لیتر بر ثانیه برای حالت جریان از روی سرریز و جریان همزمان از روی سرریز و دریچه برای دو مدل سرریز خطی و لایرننت اجرا شده است. عمق پایاب از طریق میزان بازشدگی دریچه انتهای کانال با هدف کنترل پرش هیدرولیکی روی کفبند انتخاب می‌شود. مدت زمان برای ایجاد تعادل در گودال آبشستگی به‌صورت تجربی به‌دست آمد و این‌گونه معلوم شد که تقریباً ۹۵ درصد آبشستگی در ۶ ساعت اول اتفاق می‌افتد. در پایان هر آزمایش ابتدا

می شود. با ترکیب عدد فرود و نسبت جرم واحد حجم ماسه مستغرق به آب  $(s_g - 1) = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$  و نسبت اندازه ذرات به عمق آب روی تاج سرریز، عدد فرود ذره به دست می آید (Dey, 2014). متغیرهای بی بعد مؤثر عبارتند از (رابطه ۲):

$$\frac{d_{sm}}{y} = f\left(Fr_0, \frac{L_{sm}}{y}, \frac{L_d}{y}, \frac{L_0}{y}\right) \quad (2)$$

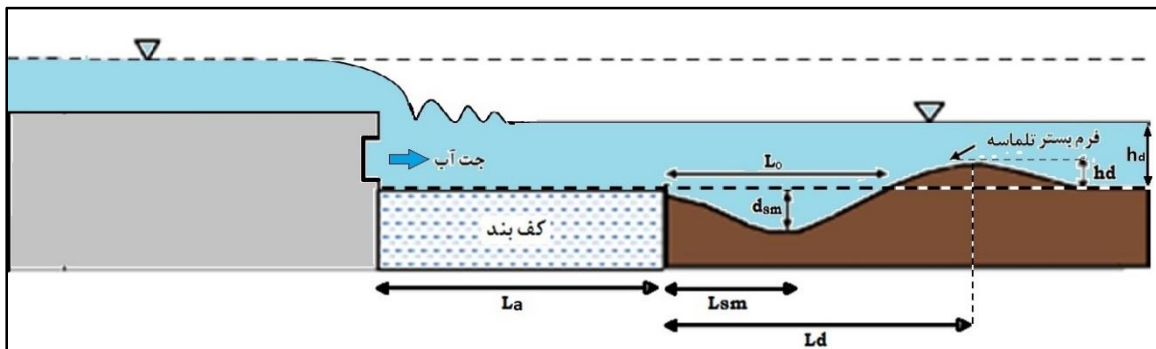
که در آن،

$Fr_0 = \frac{U_0}{\sqrt{gd_{50}(s_g - 1)}}$  = فرود ذره به صورت  $U_0$  = سرعت جریان روی کف بند.

متغیرهای حفره آبشستگی شامل بیشینه عمق آبشستگی ( $d_{sm}$ )، ارتفاع تلماسه ( $h_d$ )، محل وقوع بیشینه عمق آبشستگی ( $L_{sm}$ )، طول حفره آبشستگی ( $L_d$ )، و فاصله انتهای کف بند تا نوک تلماسه ( $L_0$ ) است. در شکل ۲ شمایی از حفره آبشستگی پایین دست جریان همزمان سرریز لایرننت و دریاچه نشان داده شده است.

که در آن،  $Q$  = دبی جریان؛  $\rho$  = جرم مخصوص سیال؛  $\rho_s$  = جرم مخصوص ذرات بستر؛  $g$  = شتاب ثقل؛  $\mu$  = لزوجت دینامیکی سیال؛  $B$  = عرض کانال؛  $S_0$  = شیب کانال؛  $h_u$  = عمق جریان بالادست؛  $h_d$  = عمق جریان پایین دست؛  $y$  = عمق آب روی کف بند سرریز؛  $P$  = ارتفاع سرریز؛  $\sigma$  = کشش سطحی؛  $d_{50}$  = اندازه متوسط ذرات؛  $w$  = عرض دریاچه؛  $a$  = ارتفاع دریاچه؛  $L_{sm}$  = طول حداکثر عمق آبشستگی؛  $L_e$  = طول موثر تاج سرریز؛  $L_a$  = طول کف بند؛  $L_d$  = طول نقطه اوج فرم بستر؛  $L_0$  = طول حفره آبشستگی؛ و  $t$  = زمان آبشستگی.

با استفاده از تئوری  $\Pi$ -باکینگهام اعداد بدون بعد استخراج می شوند. با حذف متغیرهای ثابت هندسی، هیدرولیکی و مربوط به سیال، متغیرهای بی بعد نهایی استخراج می شوند. با توجه به عمق مناسب جریان (حذف تاثیر کشش سطحی) و با توجه به اینکه جریان در تمامی آزمایش ها آشفته است ( $Re > 24500$ )، عدد رینولدز نیز از روابط حذف



شکل ۲- شمایی از حفره آبشستگی پایین دست جریان همزمان سرریز لایرننت و دریاچه

Fig. 2. Schematic of scour downstream of simultaneously flow over labyrinth spillway- gate

آبشستگی، سرانجام متغیرهای بیشینه عمق آبشستگی ( $d_{sm}$ ) و فاصله افقی انتهای کف بند تا تاج تلماسه ( $L_d$ ) به ترتیب برای بی بعد کردن گسترش عمقی و طولی حفره آبشستگی انتخاب شدند.

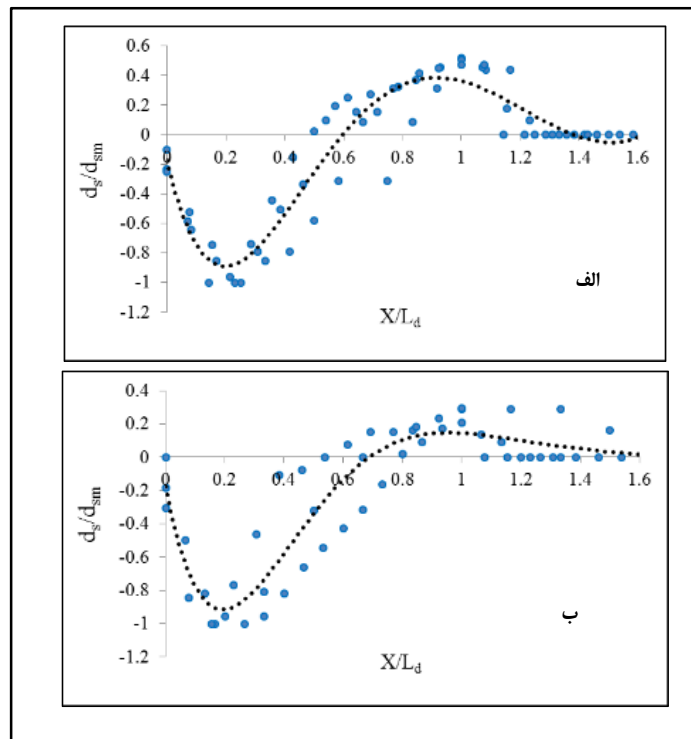
## نتایج و بحث

### تشابه پروفیل های آبشستگی

با توجه به تحقیقات گذشته و آزمودن متغیرهای مختلف برای بی بعد کردن پروفیل حفره

این ناحیه جدا می‌کند که می‌تواند ناپایداری سازه را ایجاد کند. بنابراین باید در هنگام طراحی سازه، مقدار آبشستگی بستر در مجاورت کفبند پیش‌بینی شود. با توجه به شکل پروفیل آبشستگی، به‌نظر می‌رسد در سرریز لایرننت با تخلیه بیشتر انرژی در محل برخورد با کفبند، امکان انتقال بیشتر رسوبات به پایین دست کاهش می‌یابد و ارتفاع موج ماسه در پایین دست کفبند بیشتر است.

پروفیل‌های بی‌بعد به‌دست آمده از رگرسیون بین داده‌های آزمایشگاهی در تحقیق حاضر (شکل ۳) از معادله‌هایی به‌صورت روابط جدول ۱ پیروی می‌کنند که در آن  $d^* = d_s/d_{sm}$  و  $X^* = x/L_d$  است. با توجه به اینکه در لبه انتهایی کفبند جداسازی جریان اتفاق می‌افتد، جریان برگشتی درون حفره آبشستگی می‌شود، جریان برگشتی در هنگام برخورد با دیواره عمودی کفبند، رسوبات را از



شکل ۳- پروفیل بی‌بعد آبشستگی الف) سرریز لایرننت و ب) سرریز خطی  
 Fig. 3. Non-dimensional scour profile: a) labyrinth spillway, b) linear spillway

جدول ۱- روابط برازش داده شده به شکل پروفیل بستر

Table 1. Equations fit to the bed profile shape

Fitted curve	Spillway type
$d^* = 0.31x^{*6} - 3.2x^{*5} + 12.6x^{*4} - 23.6x^{*3} + 20.2x^{*2} - 5.8x^* - 0.28$	linear without gate
$d^* = 8.6x^{*6} + 44.6x^{*5} - 85.1x^{*4} + 72.6x^{*3} - 26.1x^{*2} + 3.4x^* - 0.77$	linear with gate
$d^* = -2.8x^{*5} + 16.8x^{*4} - 34.9x^{*3} + 29.7x^{*2} - 8.2x^* - 0.18$	labyrinth without gate
$d^* = 11.4x^{*5} - 37.8x^{*4} + 39.2x^{*3} - 10.6x^{*2} - 1.7x^* - 0.25$	labyrinth without gate

همزمان از سرریز و دریچه برقرار است. در حالت اول با عبور جریان زیر بحرانی روی سرریز و پرش هیدرولیکی روی کفبند مشاهده می‌شود. در حالت دوم نیز دو حالت جریان از جت‌های ریزشی مایل (سرریز) و جریان در جت‌های افقی وجود دارد.

در جت ریزشی مایل، فرآیند آبشستگی اولیه خیلی سریع است در این حالت جت پس از برخورد با بستر، مواد فرسایش یافته را از ته حفره آبشستگی به سمت پایین دست انتقال می‌دهد. آبشستگی در جت‌های ریزشی در حالت مستغرق و آزاد اندکی متفاوت است زیرا سیال در جت‌های آزاد مقداری را در آب طی می‌کند تا به سطح بستر برسد ولی در جت‌های مستغرق تمام مسیر را در آب طی می‌کند. این مسئله باعث می‌شود تأثیر برخی از متغیرها بر آبشستگی پایین دست جت‌های مستغرق نسبت به جت‌های آزاد متفاوت باشد. از جمله این متغیرها عمق پایاب است که در آبشستگی پایین دست جت‌های مستغرق اثر کمتر ولی در جت‌های آزاد اثر بیشتری دارد. در جت‌های افقی جریان موازی بستر اولیه و حفره آبشستگی نیز معمولاً در جهت عرض متقارن است. در جت‌های افقی، سرعت زیاد جریان در برخورد با بستر فرسایش پذیر باعث جدا شدن ذرات بستر می‌شود و به خاطر گرداب‌های ایجاد شده، بخشی از ذرات به صورت معلق درمی‌آید و به سمت پایین دست حمل می‌شود. رسوبات حمل شده در پایین دست حفره آبشستگی ته‌نشین می‌شوند و یک برآمدگی تشکیل می‌دهند. در این آزمایش، تداخل دو جت روی کفبند اتفاق می‌افتد. جت برخوردکننده افقی به بستر رسوبات، در حالت مستغرق است که از ویژگی‌های ایجاد یک حفره و برآمدگی در پایین دست آن است. عمق آب با توسعه

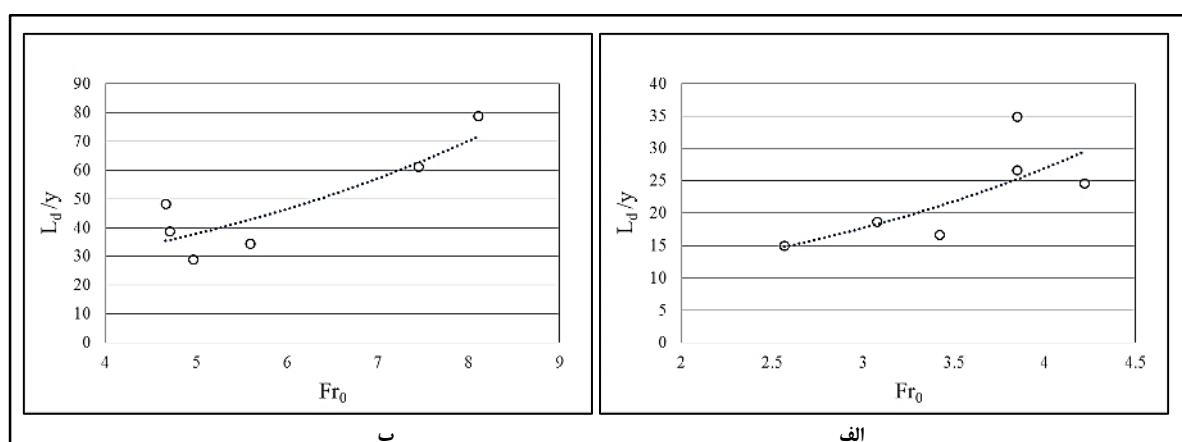
روابط به دست آمده از رگرسیون بین داده‌های آزمایشگاهی در تحقیق حاضر در سرریز خطی در هر دو حالت جریان از روی سرریز و جریان ترکیبی از معادله درجه ۶ و در سرریز لایبرنت از معادله درجه ۵ پیروی می‌کنند که تشابه بین پروفیل‌های آبشستگی را بیشتر نیز محققان بررسی و تایید کرده بودند. موسوی‌چهرمی و حلت‌ناصریان (Musavi- Jahromi & Hellat-Nasserian, 2010) یک معادله درجه ۶ برای پروفیل بی‌بعد آبشستگی ارائه داده‌اند. با وجود تشابه بین پروفیل‌های بی‌بعد یک نوع سرریز، می‌توان رابطه‌ای برای تعیین پروفیل گودال در شرایط مختلف ارائه کرد. با آنالیز ابعادی، دو متغیر مهم و تاثیرگذار بر پدیده آبشستگی عدد فرود ذره ( $Fr_0$ ) و نسبت عمق پایاب بدون بعد ( $L_0/y$ ) و همچنین بیشینه طول ( $d_{sm}/y$ ) و عمق ( $L_0/y$ ) بدون بعد شناسایی شده‌اند. در این پژوهش، در حالت جریان ترکیبی جت به صورت مستغرق است و در جت‌های مستغرق عمق پایاب بر ابعاد آبشستگی تأثیر کمی دارد.

تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه تأثیر عمق پایاب بر حفره آبشستگی و وابستگی آن به عدد فرود ذره گزارش شده است. در اینجا با ثابت در نظر گرفتن عمق پایاب، تأثیر مستقیم عدد فرود ذره بر متغیرهای مهم ابعاد حفره آبشستگی بررسی شده است. با توجه به شکل‌های ۴ تا ۶، با افزایش فرود ذره برای عمق پایاب ثابت بیشینه عمق آبشستگی و طول گودال آبشستگی افزایش پیدا می‌کند که نمودار آن در سرریز خطی از همبستگی بیشتری برخوردار است. در این تحقیق با دو نوع حالت جریان مواجه هستیم که شرایط آبشستگی پایین دست متفاوتی دارند. اول زمانی که تنها جریان از روی سرریز برقرار است و دوم وقتی که جریان

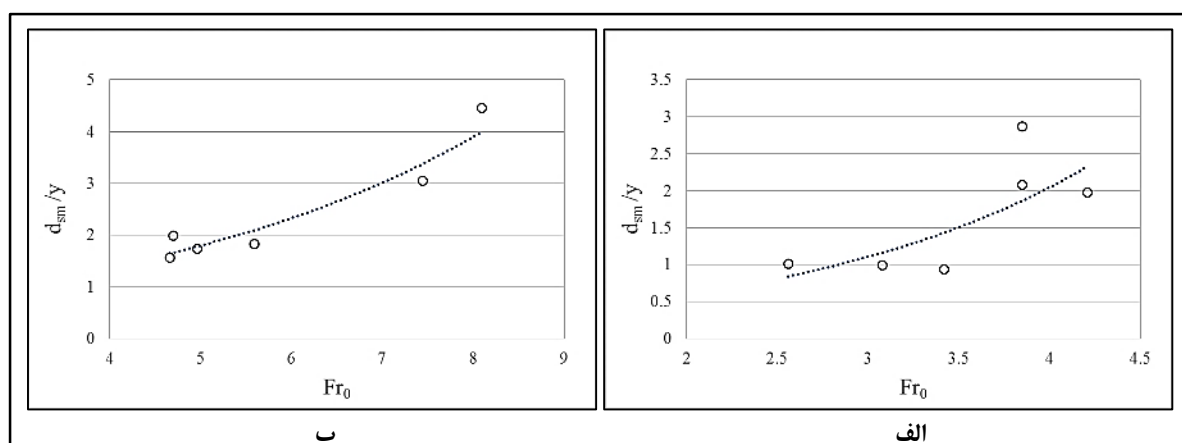
ایجاد عمق تعادل در گودال آبشستگی می‌انجامد. شکل ۷ تأثیر درجه در میزان آبشستگی را در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه بر دو سرریز خطی و سرریز لایبرنت نشان می‌دهد.

دو متغیر مهم حفره آبشستگی که همواره برای طراحی باید مدنظر طراحان قرار بگیرد بیشینه عمق آبشستگی ( $d_{sm}$ ) و طول حفره آبشستگی ( $L_0$ ) است.

آبشستگی افزایش می‌یابد، بنابراین سرعت موضعی در نزدیکی کف حفره با افزایش عمق کاهش می‌یابد. جت با سرعت بالا از روی کف‌بند خارج می‌شود و تنش برشی زیادی را به بستر وارد می‌کند که از تنش برشی بحرانی برای شروع حرکت ذرات بیشتر است. با گذشت زمان، آبشستگی مصالح بستر باعث افزایش عمق و کاهش تنش برشی می‌شود که کاهش میزان آبشستگی را در پی دارد و سرانجام به

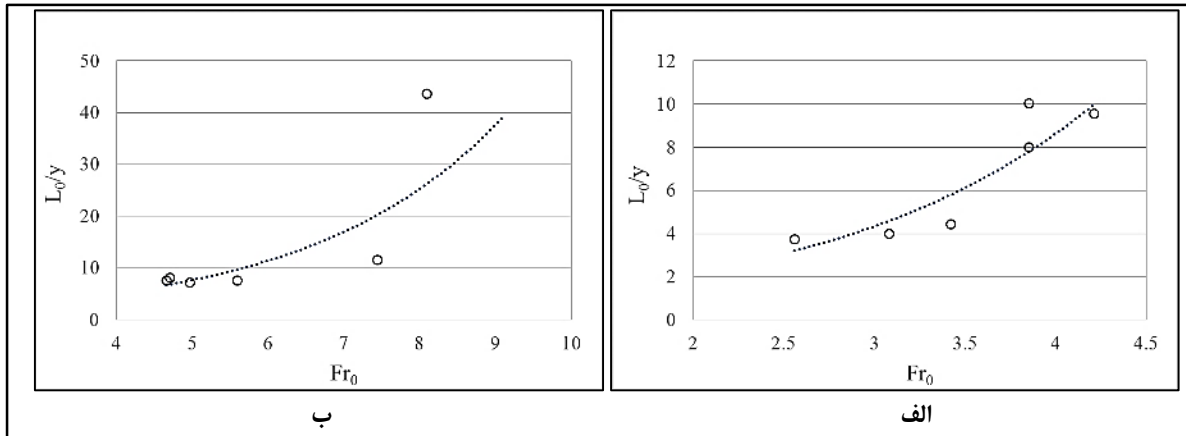


شکل ۴- تغییرات  $Fr_0$  به‌ازای  $L_a/y$  در الف) سرریز خطی و ب) سرریز لایبرنت  
 Fig. 4. Variations of  $Fr_0$  with  $L_a/y$ : a) Linear spillway, b) Labyrinth spillway

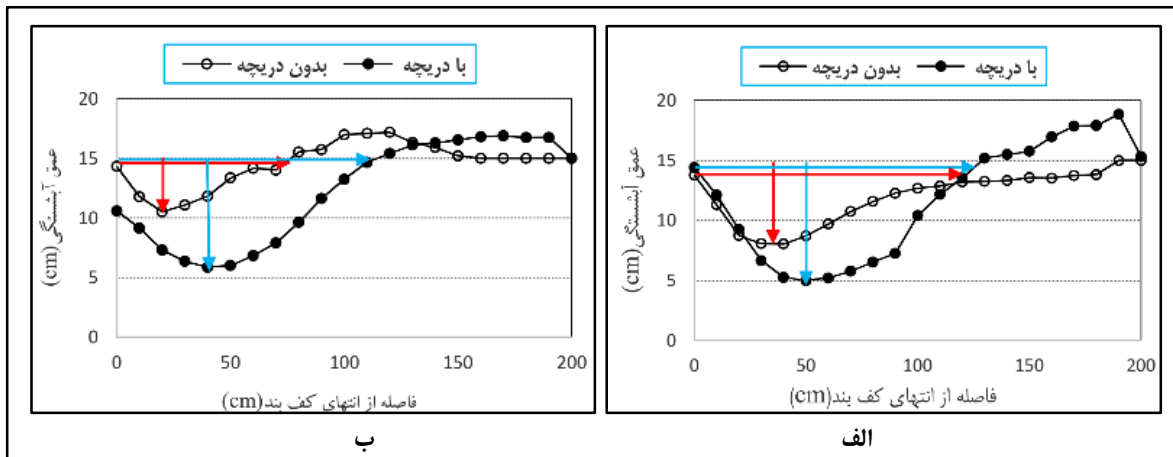


شکل ۵- تغییرات  $Fr_0$  به  $d_{sm}/y$  در الف) سرریز خطی و ب) سرریز لایبرنت  
 Fig. 5. Variations of  $Fr_0$  with  $d_{sm}/y$ : a) Linear spillway, b) Labyrinth spillway





شکل ۶- تغییرات  $Fr_0$  به  $L_0/y$  در الف) سرریز خطی و ب) سرریز لایبرنت  
 Fig. 6. Variations of  $Fr_0$  with  $L_0/y$ : a) Linear spillway, b) Labyrinth spillway



شکل ۷- پروفیل آبشستگی در الف) سرریز خطی و ب) سرریز لایبرنت  
 Fig. 7. Scour profile: a) Linear spillway, b) Labyrinth spillway

سیستم ترکیبی که جت افقی است، جت به صورت مستقیم و با انرژی زیاد به مصالح بستر برخورد می کند و در نتیجه آبشستگی بیشتری اتفاق می افتد.

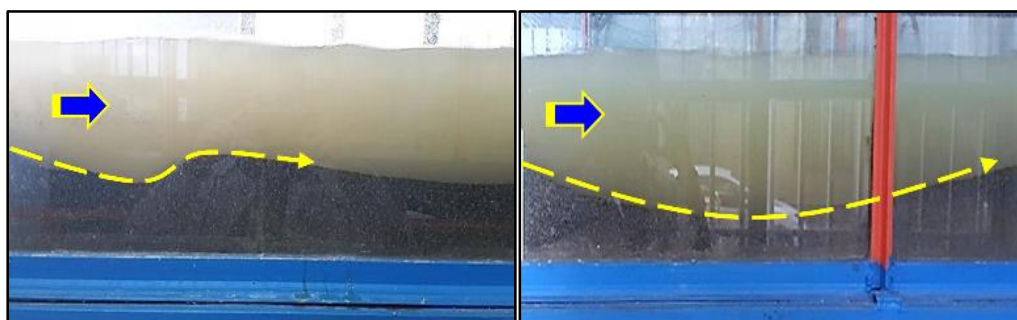
#### شکل پروفیل های آبشستگی

گودال های آبشستگی در شکل ۸ تا ۱۰ نشان می دهد که هندسه گودال آبشستگی به شدت تحت تأثیر نوع سرریز است به طوری که در سرریزهای خطی تقریباً در هر دو حالت جریان از روی سرریز و جریان همزمان سرریز و دریچه پروفیل آبشستگی ایجاد شده به شکل سینوسی (ابتدا حفره و بعد یک

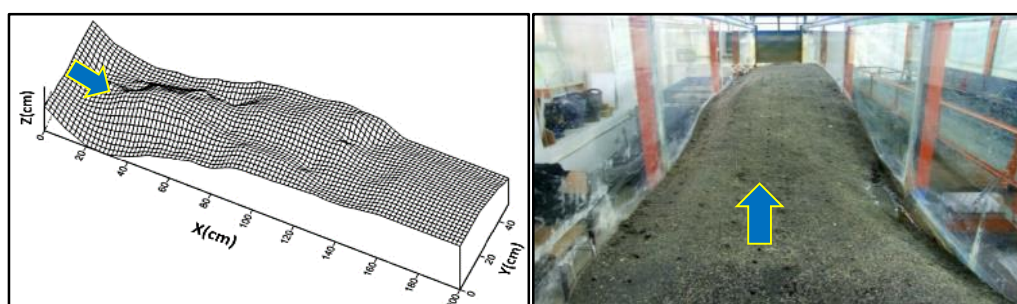
با توجه به نمودارهای شکل ۷، بیشینه آبشستگی و طول حفره آبشستگی به ترتیب در سیستم سرریز-دریچه در سرریز خطی ۶۰ و ۵۰ درصد و در سرریز لایبرنت ۴۰ و ۲۰ درصد بیشتر از حالت جریان از روی سرریز است. بیشینه عمق و طول حفره آبشستگی در حالت جریان ترکیبی نسبت به حالت جریان تنها از روی سرریز (جریان ریزشی) بیشتر است. در حالت جریان ریزشی، استهلاک انرژی از طریق تشکیل پرش هیدرولیکی روی کف بند اتفاق می افتد در صورتی که استهلاک انرژی در حالت

می‌شود در نتیجه ذرات رسوبی بیشتری جابه‌جا می‌شوند. همچنین به دلیل همگرایی و جوه جانبی سرریز سطح آب در طول قسمت همگرا (جوه جانبی) در بالادست سرریز افزایش پیدا می‌کند و داخل تیغه‌های ریزشی جریان از روی تاج سرریز باعث می‌شود که ظرفیت جریان عبوری از واحد طول تاج سرریز لایرننت کمتر از مقدار نظیر آن روی سرریز خطی باشد. می‌توان گفت به دلیل این شرایط در سرریزهای لایرننت شدت جریان در جوه جانبی بیشتر و به تبع آن آبشستگی پایین‌دست نظیر آنها بیشتر است.

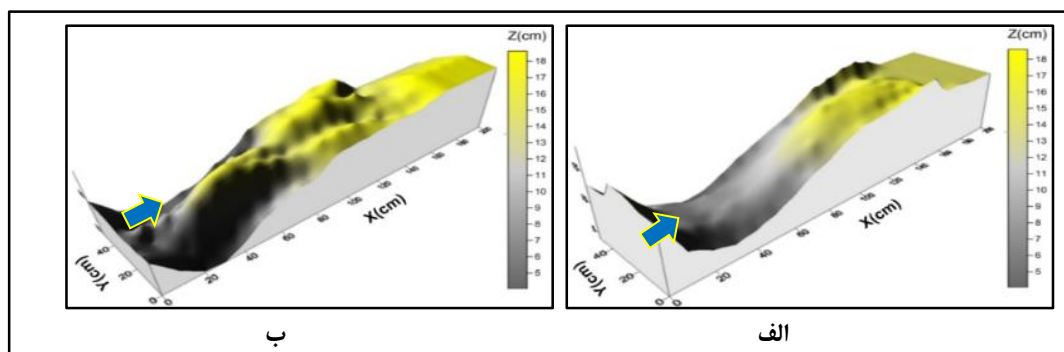
تلماسه) و در سرریزهای لایرننت مستطیلی در هر دو حالت در پلان به شکل محدب است. با بررسی شکل پروفیل آبشستگی پایین‌دست سرریز لایرننت مشاهده می‌شود که در دیواره‌های کانال میزان آبشستگی زیادی رخ داده است، ذرات رسوبی در کناره‌ها کاملاً شسته شده‌اند و به مرکز کانال جابه‌جا و به صورت یک تپه انباشته شده تشکیل شده‌اند. جریان از روی سرریزهای لایرننت سه‌بعدی است. در جریان‌های سه‌بعدی سرعت جریان در سه امتداد متغیر است و هنگامی که جریان پس از سرریز به دیواره‌ها برخورد می‌کند دچار تلاطم بیشتری



شکل ۸- گودال آبشستگی در پایین‌دست سرریز  
Fig. 8. Scour profile at downstream of spillway



شکل ۹- نمای آزمایشگاهی و پروفیل خروجی از نرم‌افزار Surfer آبشستگی پایین‌دست سرریز لایرننت  
Fig. 9. Experimental view and output of surfer software at downstream scour hole of labyrinth spillway



شکل ۱۰- پروفیل آبشستگی از نرم افزار Surfer الف - سرریز لایبرنت ب- سرریز خطی

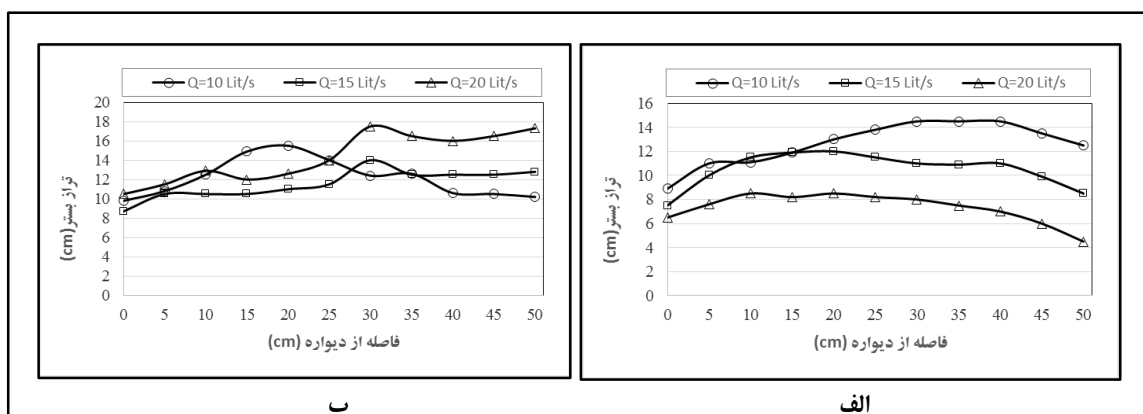
Fig. 10. Scour profile view by surfer software: a) Labyrinth spillway, b) Linear spillway

در عرض حفره را به دلیل جریان‌های ثانویه بزرگ ناشی از پرش هیدرولیکی دانسته‌اند. موسوی خندان (Musavi-Khandan, 2000) غیر یکنواختی پروفیل در عرض حفره را به آشفته بودن جریان در پایاب پرش هیدرولیکی و تصادفی بودن بردارهای سرعت در این ناحیه نسبت داده است.

غیر متقارن بودن را می‌توان به دلیل خطوط جدایی جریان، تداخل گردابه‌های زیر دریاچه با جریان روی سرریز و جریان‌های برگشتی در اثر افزایش تلماسه پایین دست دانست.

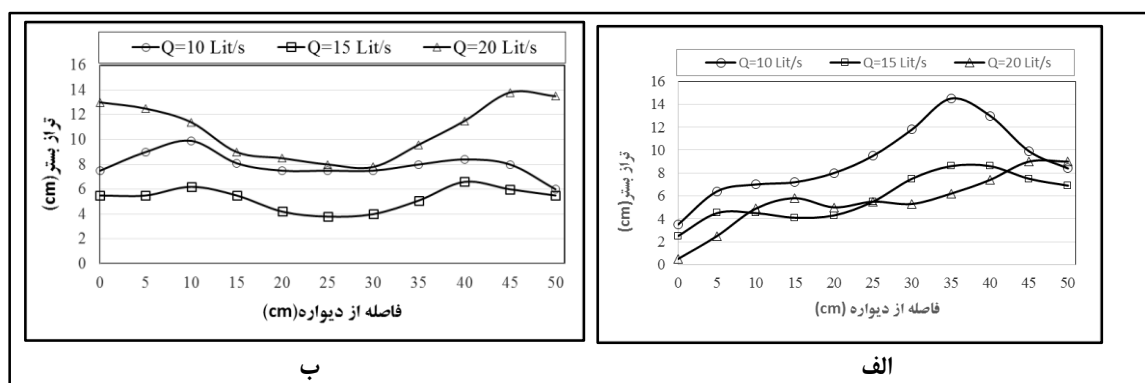
### بررسی پروفیل عرضی

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد پروفیل آبشستگی در عرض کانال متغیر است و با توجه به شکل آبشستگی سه‌بعدی علاوه بر طول در عرض نیز نامتقارن است. تغییرات عرضی پروفیل حفره آبشستگی در مقطع مربوط به بیشینه عمق آبشستگی برای آزمایش‌های اجرا شده آورده شده است (شکل‌های ۱۱ تا ۱۳). گفتنی است که متغیر بودن پروفیل آبشستگی در تحقیقات قبلی نیز گزارش شده است. به‌طور مثال امینی و پیرستانی (Amini & Pirestani, 2015) غیر یکنواختی پروفیل



شکل ۱۱- پروفیل عرضی در الف) سرریز لایبرنت بدون دریاچه و ب) سرریز خطی بدون دریاچه

Fig. 11. Across profile: a) Labyrinth spillway without gate, b) Linear spillway without gate



شکل ۱۲- پروفیل عرضی در الف) سرریز لایبرنت با دریچه و ب) سرریز خطی با دریچه  
 Fig. 12. Across profile: a) Labyrinth spillway with gate, b) Linear spillway with gate

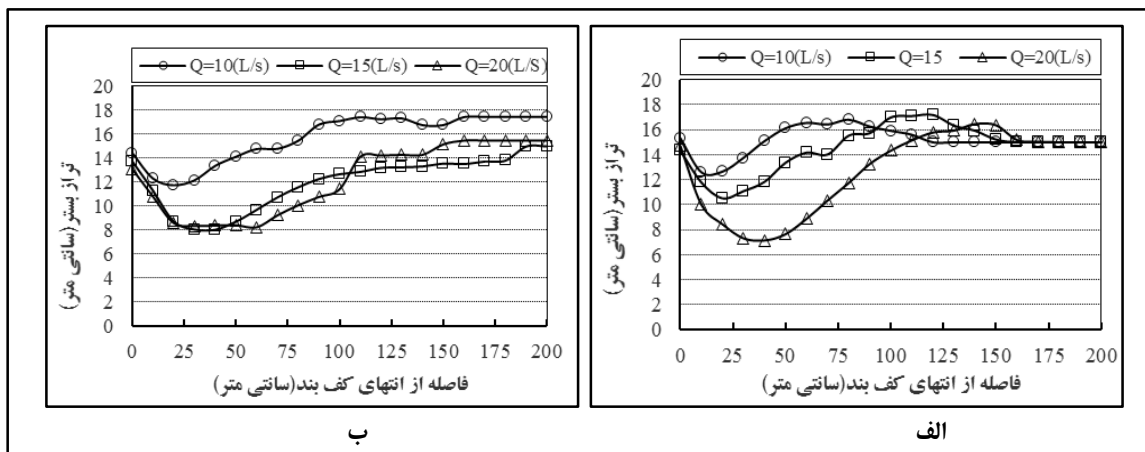


شکل ۱۳- نمای آزمایشگاهی پروفیل آبشستگی در عرض کانال در پایین دست سرریز خطی با دریچه  
 Fig. 13. Experimental view of scour profile at across of downstream labyrinth spillway-gate

معناداری دارد در صورتی که در سرریز لایبرنت در تمامی دبی‌ها تغییرات پروفیل طولی حفره آبشستگی از نظم خاصی تبعیت می‌کند ( شکل ۱۴). با افزایش مقدار دبی و در نتیجه قدرت حمل جریان، امکان انتقال رسوبات بیشتری به سمت پایین دست ایجاد می‌شود. با افزایش سرعت جریان قطرهای بزرگتری از رسوبات می‌توانند در آستانه حرکت قرار گیرند و همراه جریان به سمت پایین منتقل گردند.

### تأثیر دبی بر ابعاد حفره آبشستگی

بررسی ابعاد حفره آبشستگی نشان می‌دهد با افزایش دبی جریان (و در نتیجه افزایش سرعت جریان‌های خروجی)، طول پروفیل آبشستگی و همچنین حجم حفره آبشستگی افزایش می‌یابد و باعث رسوبگذاری بیشتر در پایین دست می‌شود. نکته قابل توجه این است که در سرریز خطی، پروفیل طولی حفره آبشستگی در دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه، نسبت به دبی ۱۰ و ۱۵ لیتر بر ثانیه، تفاوت



شکل ۱۴- تغییرات پروفیل میانگین طولی آبشستگی در الف) سرریز خطی و ب) سرریز لایرننت

Fig. 14. Variations of mean longitudinal profile: a) Linear spillway, b) Labyrinth spillway

آبشستگی ( $d_{sm}$ ) و فاصله ابتدای کف بند تا نوک تلماسه ( $L_d$ ) در سرریز خطی و سرریز لایرننت افزایش می یابند.

- در زمانی که جریان به طور همزمان از روی سرریز و زیر دریچه عبور می کند، بیشینه عمق آبشستگی و طول حفره آبشستگی در سرریزهای لایرننت و سرریزهای خطی، نسبت به جریان از روی سرریز، افزایش پیدا می کند.

- به دلیل شرایط هیدرولیکی سرریز لایرننت و میزان دبی عبوری بیشتر از وجوه جانبی هندسه پروفیل آبشستگی از حالت خاصی تبعیت می کند که در دیواره های کانال آبشستگی بیشتری مشاهده می شود.

- بیشینه عمق آبشستگی و طول حفره آبشستگی با افزایش دبی افزایش می یابد و در سرریزهای لایرننت در تمام حالت مقدارش کمتر از سرریز خطی است.

- میانگین حداکثر عمق آبشستگی در حالت جریان ترکیبی به طور میانگین ۶۳ درصد بیشتر از میانگین حداکثر عمق آبشستگی در حالت جریان از روی سرریز است.

در این پژوهش، بیشینه عمق آبشستگی برای بیشترین دبی در حالت سرریز خطی با دریچه برابر با ۱۴ سانتی متر و کمینه عمق آبشستگی برای کمترین دبی در حالت سرریز لایرننت بدون دریچه برابر ۵/۲ سانتی متر است. بیشینه عمق آبشستگی در سرریز لایرننت کمتر از سرریز خطی است.

### نتیجه گیری

در این تحقیق، به بررسی آزمایشگاهی آبشستگی پایین دست سرریز لایرننت مستطیلی و خطی با دریچه پرداخته شده است. مهمترین نتایج به صورت خلاصه به شرح زیر است:

- با توجه به سه بعدی و پیچیده بودن جریان روی سرریز لایرننت، پروفیل آبشستگی پایین دست آنها از نظر هندسی متفاوت است با آنچه در سرریز خطی ایجاد می شود. در سرریز خطی، مصالح خارج شده در پایین دست حفره ته نشین می شوند اما در سرریزهای لایرننت به مرکز کانال تمایل می یابند.

- با افزایش عدد فرود ذره، متغیر بیشینه عمق

## مراجع

- Ahmed, F. H. 1985. Characteristics of discharge of combined flow through sluice gate and over weir. *J. Eng. Technol.* 3 (2): 49-63.
- Amini, A. and Pirestani, M. R. 2015. Investigation of the scour hole size due to submerged horizontal jets at the downstream of chute spillway. Second National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management. March 4. Tehran, Iran. (in Persian)
- Dargahi, B. 2003. Scour downstream of a spillway. *J. Hydraul. Res.* 41(4): 417-426. (in Persian)
- Dehghani, A. and Bashiri, H. 2010. Study of scouring profile at downstream of combined weir-gate structure. National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering. Apr. 28. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (in Persian)
- Dey, S. 2014. *Fluvial Hydrodynamics: Hydrodynamic and Sediment Transport Phenomena.* Springer.
- Esmaili-Varki M. and Razavizadeh M., 2013. Investigation of hydraulic properties on labyrinth weirs with semicircular plan. *J. Water Soil.* 27(1): 2234-224. (in Persian)
- Farhoudi, J. and Smith, K. 1985. Local scour downstream of hydraulic jump. *J. Hydraul. Res.* 23(4): 343-385.
- Faruque, M. A., Sarathi, P. and Balachandar, R. 2006. Clear water local scour by submerged three dimensional wall jets effect of tail water depth. *J. Hydraul. Eng.* 132(6): 575-580.
- Heidarpur, M., Mousavi, F. and Roushani-Zarmehri, A. 2006. Investigating multi-faceted weirs with U-shaped rectangular plan. *Sci. Technol. Agric. Nat. Res.* 10(3): 1-12. (in Persian)
- Hey, N. and Taylor, G. 1970. Performance and design of labyrinth weir. *J. Hydraul. ASCE.* 96(1): 2237-2357.
- Hosseini, P., Ebrahimi, K. and Mashal, M. 2008. Laboratory Investigation of scour profiles at the downstream of submerged hydraulic jump. 7<sup>th</sup> Iranian Hydraulic Conference. Nov. 12-15. Shahid Abbaspour University, Tehran, Iran. (in Persian)
- Jüstrich, S., Pfister, M. and Schleiss, A. J. 2016. Mobile riverbed scour downstream of a Piano Key Weir. *ISH J. Hydraul. Eng.* 142(11): 04016043.
- Mehraein, M. and Ghodsian, M. 2009. Local scouring due to three-dimensional wall jets. *J. Hydraul.* 4(4): 51-69. (in Persian)
- Mirnasari, M. 2013. Simulation of simultaneous flow in combined rectangular weir-gate structure. M. Sc. Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran. (in Persian)
- Musavi-Khandan, S. E. 2000. Laboratory Investigation of scour profile under hydraulic jump. M. Sc. Thesis. Sharif University of Technology, Tehran, Iran. (in Persian)
- Musavi-Jahromi, S. H. and Helalat-Nasserian, H. 2010. Effect if tail water depth on the scour downstream of falling Jets. 5<sup>th</sup> International Conference on Scour and Erosion. Nov. 7-10. San Francisco, California, USA.
- Negm, A. M., El-Saiad, A. A., Alhamid A. A. and Husain, D. 1994. Characteristics of simultaneous flow over Weirs and below inverted V-Notches Gate. *Civil Eng. Res. Magazine (CERM).* 16(9): 786-799.

- Omid, M. and Hamidifar, H. 2006. Influence of tailwater depth on local scouring in the downstream of apron. 8th Congress of Civil Engineering, May 11-13, Shiraz University. (in Persian)
- Rajaei, A., Esmacili-Varaki, M. and Shafei-Sabet, B. 2018. Experimental investigation on local scour at the downstream of grade control structures with labyrinth planform. *ISH J. Hydraul. Eng.* Doi: doi.org/10.1080/09715010.2018.1502627.
- Samani, J. and Mazaheri, M. 2009. Combined flow over weir and under gate. *J. Hydraul. Eng. ASCE.* 135(3): 224-227.
- Seyfi, A., Hosseinzadeh-Dalir, A. V. and Frasadi-Zadeh, D. 2013. Scouring in a broad-double edged weir. *J. Water Soil Sci.* 23(4): 177-188. (in Persian)
- Shahabi, M., Tale-Bidokhti, N., Dehghani, A. A. and Telvari, V. A. 2011. Laboratory study of flow contraction in downstream scour hole in combined weir-gate structure. 6<sup>th</sup> National Congress on Civil Engineering. April 26-27. Semnan, Iran. (in Persian)
- Shesha-Prakash, M. N. and Shivapur. A. V. 2004. Generalized head discharge equation for flow over sharp-crested inclined inverted V-Notch weir. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE.* 130(4): 325-330.
- Uyumaz, A. 1988. Scour downstream of vertical gate. *J. Hydraul. Eng. ASCE.* 114(8): 811-816.

## **Laboratory Study Downstream Scour of Rectangular Labyrinth Weir with Gate**

**S. Gohari\* and Z. Kabiri Mahmoud-Abadi**

\* Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Water Science Engineering, Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran. Email: saeedgohari@yahoo.com

Received: 2 June 2018, Accepted: 12 December 2018

### **Abstract**

Labyrinth weirs can be used to increase outlet capacity for a given spillway crest elevation and length or to increase storage by raising the crest while maintaining spillway capacity. Downstream scour dimensions of spillway are important parameters in designing of this structures. By combining the spillway and the gate, two major problems of sedimentation on upstream of spillway and the accumulation of waste materials can be solved. In this study, totally 12 experiments were carried out in 3 different discharges, 10, 15 and 20 liters per second. In this study overflow and flow simultaneously from top of weir and gate for two linear and labyrinth spillway were explored. A layer sand with  $d_{50}=1$  mm and thickness of 15 cm were covered at downstream apron to make a mobile bed. Results showed that by increasing the particle Froude for a constant depth, the maximum scour depth and scour hole length increased. Also it was found that when the flow passed through the spillway and gate simultaneously, in both labyrinth and linear spillway, the maximum scour depth and scour hole length increased with respect to discharge. Transverse profiles at the maximum scour depth also showed that there was a relative symmetry in the case of a linear spillway without a gate, and in this case the bottom profile could be considered as two-dimensional. The maximum scour depth and scour hole length increased with increasing discharge, and its magnitude in labyrinth spillways, was less than that in linear spillways.

**Keywords:** Apron, Linear Spillway, Rectangular Labyrinth Spillway, Scour