

## بررسی پدیده آبشستگی موضعی در پایین دست حوضچه‌های آرامش در حضور سرریز پلکانی

یونس امین پور<sup>1</sup>، جواد فرهودی<sup>2\*</sup>، رضا روشن<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه تهران  
2- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران  
3- کارشناس ارشد مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو

Jfarhodi@ut.ac.ir

**چکیده** - مسأله آبشستگی یکی از موضوعاتی است که همواره در طراحی انواع مختلف سازه‌های هیدرولیکی اهمیت دارد. از جمله این سازه‌ها، سرریز پلکانی است. هدف از انجام این تحقیق، بررسی تشابه بین نیمرخ‌های آبشستگی موضعی در پایین دست سرریز پلکانی می‌باشد. بدین منظور از نتایج حاصل از انجام 67 آزمایش بر روی دو مدل آزمایشگاهی مختلف در محدوده وسیعی از اعداد فرود ذره، طول حوضچه آرامش، عمق پایاب، دانه‌بندی ذرات رسوبی و دو شیب مختلف سرریز پلکانی استفاده شد. در این تحقیق از 5 طول مختلف حوضچه آرامش در محدوده 37 سانتی‌متر تا 120 سانتی‌متر استفاده شد. هم‌چنین محدوده دبی مورد استفاده 88/95-7/43 لیتر بر ثانیه بود. مدت زمان آزمایش‌ها 6 ساعته، 8 ساعته، 12 ساعته و 24 ساعته بود. در محدوده دبی مورد نظر، در شرایط یکسان آزمایشگاهی، بیشینه عمق آبشستگی در پایین دست حوضچه آرامش با طول 110 سانتی‌متر نسبت به بیشینه عمق آبشستگی در پایین دست حوضچه آرامش با طول 78 سانتی‌متر، 48 الی 78 درصد کاهش پیدا کرد. بر اساس نتایج به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی، تشابه بین نیمرخ‌های حفره آبشستگی در پایین دست سرریزهای پلکانی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور دو روش برای بی‌بعد کردن نیمرخ‌های آبشستگی ارائه شد؛ که بر اساس پارامترهای آماری، بهترین روش برای بی‌بعد کردن نیمرخ‌های آبشستگی انتخاب و تشابه بین نیمرخ‌های آبشستگی در پایین دست سرریزهای پلکانی نشان داده شد. روابط پیش‌بینی کننده عمق بیشینه آبشستگی، فاصله عمق بیشینه از انتهای حوضچه آرامش، طول حوضچه آرامش و حجم رسوبات انتقال یافته به پایین دست بر اساس پارامترهای بدون بعد، در زمان‌های مختلف بسط داده شد. هم‌چنین، تأثیر پارامترهای مختلف بر هندسه حفره آبشستگی مورد بررسی قرار گرفت. در مجموع آزمایش‌ها، 8 پروفیل عرضی در شرایط مختلف (برای دانه‌بندی و طول حوضچه‌های آرامش مختلف) برداشت گردید. در یک شرایط آزمایشگاهی معین، مقایسه‌ای بین آبشستگی در حضور سرریز پلکانی با آبشستگی در حضور سرریز اوجی انجام شد. نتایج بدست آمده نشان داد که وجود سرریز پلکانی بین 42/06 تا 74/82 درصد باعث استهلاک انرژی می‌شود، که این امر، به جهت کاهش ابعاد حفره آبشستگی ایمنی بیشتر سازه سرریز پلکانی را نسبت به سرریز اوجی تحت شرایط مشابه توجیه می‌کند.

**کلیدواژگان:** آبشستگی موضعی، سرریز پلکانی، تشابه، حوضچه آرامش.

بودن استهلاک انرژی و تشکیل جریان‌های گردابی، در  
پایین دست سازه‌های هیدرولیکی نظیر حوضچه‌های

**1- مقدمه**  
آبشستگی موضعی پدیده‌ای است که به دلیل ناکافی

نشده است. برخی از محققان مانند لارسن (1952)، حسن و نارایانان (1985)، فرهودی و اسمیت (1985)، کاترجی و همکاران (1994)، دی و سرکار (2006)، حمیدی‌فر و همکاران (1389) و خلیلی‌شایان (1391) در طی تحقیقات خود چنین گزارش کردند که اگر نیمرخ‌های آب‌شستگی به صورت مناسب بی‌بعد گردند، شکل حفره از نظر هندسه مشابه و مستقل از زمان و اندازه ذرات رسوبی خواهد بود. در این میان، درگاهی (2003)، هیچ‌گونه تشابهی بین نیمرخ‌های آب‌شستگی مشاهده نکرد. همچنین موسوی (1383) بیشینه عمق آب‌شستگی را در پایین‌دست سرریز پلکانی در شرایط جریان ریزشی بررسی و تعیین کرد. ایشان یک سری روابط چندمتغیره به صورت بی‌بعد برای تعیین بیشینه عمق آب‌شستگی ارائه نمودند. تونا و امیرآغلو<sup>1</sup> (2013) پروفیل‌های آب‌شستگی در پایاب سرریزهای پلکانی را برای سه نوع رژیم جریان مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد که نوع رژیم جریان ایجاد شده روی سرریز پلکانی در بیشینه عمق آب‌شستگی بسیار مهم است. بدین ترتیب که در رژیم جریان ریزشی بیشینه عمق آب‌شستگی نسبت به رژیم جریان غیرریزشی کمتر بود. ایشان به این نتیجه رسیدند که افزایش عدد فرود جریان باعث افزایش عمق آب‌شستگی خواهد شد. همچنین بر اساس پروفیل‌های عرضی برداشت شده، الگوی آب‌شستگی متقارن نیست و بیشینه عمق آب‌شستگی در چپ و راست خط طولی مرکزی اتفاق می‌افتد. هدف مطالعه حاضر، بررسی پدیده آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی می‌باشد. مهم‌ترین اهداف این تحقیق عبارتند از: 1- بررسی تشابه بین نیمرخ‌های آب‌شستگی و ارائه رابطه‌ای کلی برای نیمرخ حفره در صورت وجود تشابه 2- ارائه روابط پیش‌بینی‌کننده عمق بیشینه آب‌شستگی، فاصله عمق بیشینه از انتهای حوضچه آرامش، طول حفره و حجم رسوبات انتقال یافته به پایین‌دست بر اساس پارامترهای بی‌بعد.

## 2- مواد و روش‌ها

به منظور مطالعه آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی از دو مدل آزمایشگاهی استفاده شد.

آرامش به وجود می‌آید. سرریزهای پلکانی یکی از سازه‌های هیدرولیکی هستند که به دلیل فناوری پیشرفته در ساخت سدهای بتن غلطکی (RCC)، هزینه نسبتاً کم، ساخت سریع و همچنین استهلاک انرژی بالا، در سال‌های اخیر مورد توجه مهندسان طراح و محققان قرار گرفته و تحقیقات گسترده‌ای بر روی آنها صورت گرفته است که بخش عمده آن مربوط به ارزیابی هیدرولیکی است. بیشتر مطالعات پدیده آب‌شستگی منحصر به پایین‌دست سرریزهای اوجی می‌باشد. سرریزهای پلکانی نسبت به سرریزهای اوجی دارای اختلاف سراب و پایاب قابل توجهی هستند. همچنین در سرریزهای پلکانی برخلاف سرریزهای اوجی نوع جریانی که روی سرریز ایجاد می‌شود و همچنین تعداد پله‌ها و ... می‌تواند در توسعه حفره آب‌شستگی مؤثر باشند.

بخشی از انرژی جریانی که توسط سرریز پلکانی منتقل می‌شود، توسط پله‌ها مستهلک شده و انرژی جنبشی کمتری نسبت به سرریزهای اوجی در پایین‌دست حاصل می‌شود. به همین دلیل در پایین‌دست سرریزهای پلکانی حوضچه آرامش را با طول کمتری احداث می‌کنند. بخشی از انرژی جنبشی رسیده به پایین‌دست بر اثر جهش هیدرولیکی ایجاد شده روی حوضچه آرامش و تبدیل جریان فوق بحرانی به زیر بحرانی تلف می‌شود. با وجود شرایط فوق، هنوز انرژی باقی‌مانده در جریان ورودی به پاشنه سرریز قادر به ایجاد حفره آب‌شستگی در پایین‌دست سازه می‌باشد. چنانچه برداشت مواد بستری به اندازه‌ای شدت یابد که پی سازه ظاهر گردد، می‌تواند به تخریب سازه منجر شود. یک راهکار برای جلوگیری از بروز این امر آن است که پی سازه را در چنان عمقی قرار دهند که تحت تأثیر بزرگترین سیلاب‌ها نیز حفره آب‌شستگی به آن عمق نرسد. این امر مستلزم اطلاع دقیق از روند توسعه حفره با شرایط جریان و مشخصات ذره رسوبی است. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای بر روی سرریز پلکانی صورت گرفته است که در بیشتر آنها بررسی دو رژیم جریان ریزشی و غیرریزشی در سرریزهای پلکانی و تعیین میزان استهلاک انرژی در هر یک مدنظر بوده و در مورد آب‌شستگی پایین‌دست این سازه گزارش زیادی منتشر

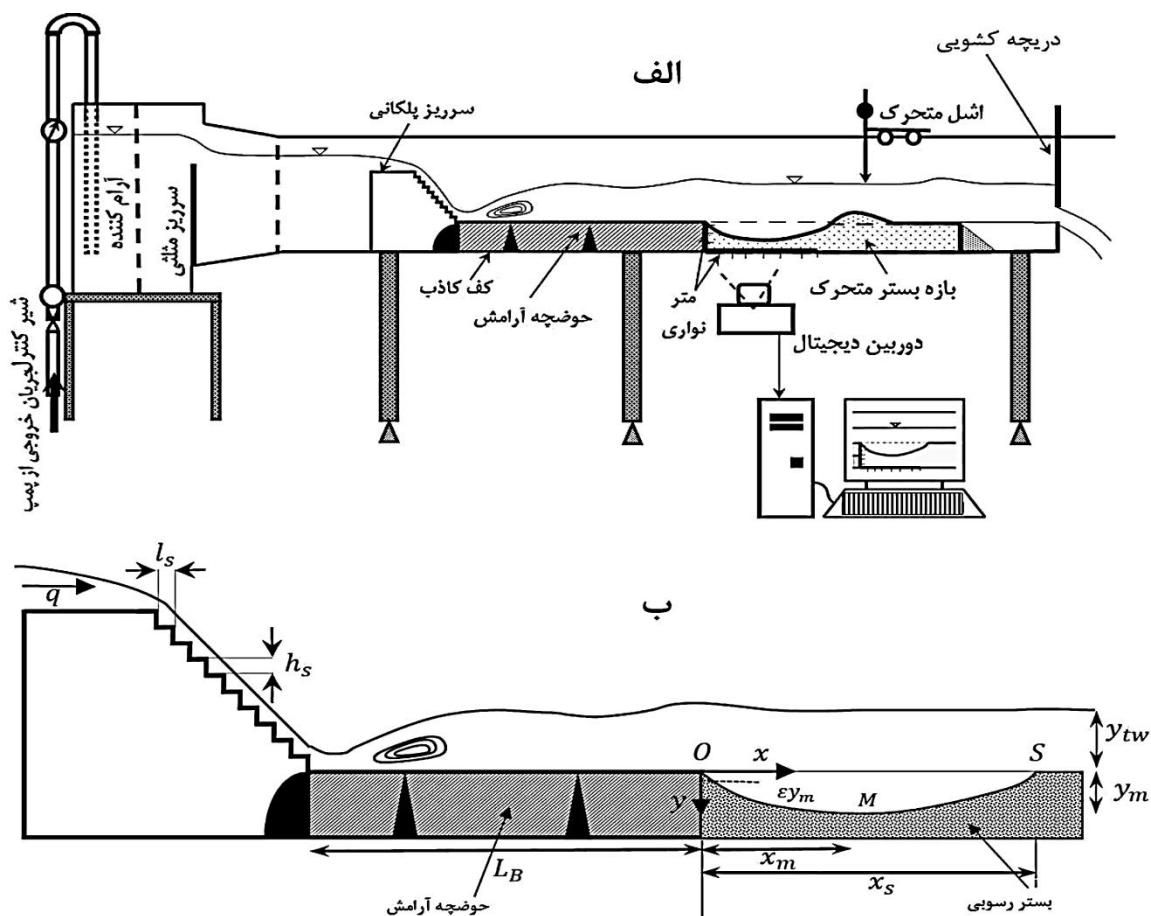
1. Tuna and Emiroglu

وزارت نیرو مورد استفاده قرار گرفت. نمای کلی مدل‌های مورد استفاده در شکل 1 ارایه شده‌اند. همچنین نمای جانبی مدل در شکل 2- الف و پارامترهای مؤثر بر پدیده مورد نظر در شکل 2- ب نشان داده شده است.

مدل اول در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران قرار داشت و مدل دوم در مؤسسه تحقیقات آب



شکل 1 نمایی از مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق الف- مدل موجود در مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو ب- مدل موجود در آزمایشگاه تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران



شکل 2 الف- نمای جانبی از مدل آزمایشگاهی ب- پارامترهای مؤثر بر پدیده مورد نظر

### 1-2- سامانه اندازه‌گیری جریان

برای اندازه‌گیری جریان در مدل اول از یک فلومتر الکترومغناطیسی فلنچی از نوع مگاب 3000 ساخت شرکت ایران مدار شیراز با دقت  $\pm 0/2$  تا  $\pm 0/5$  درصد حداکثر مقدار قابل قبول تمام مقیاس استفاده شد. هم‌چنین برای اندازه‌گیری جریان در مدل دوم از یک سرریز لبه‌تیز مستطیلی به ارتفاع 30 سانتی‌متر و عرض 90 سانتی‌متر استفاده شده است.

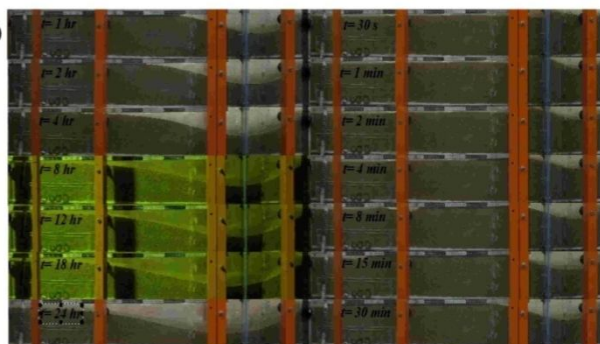
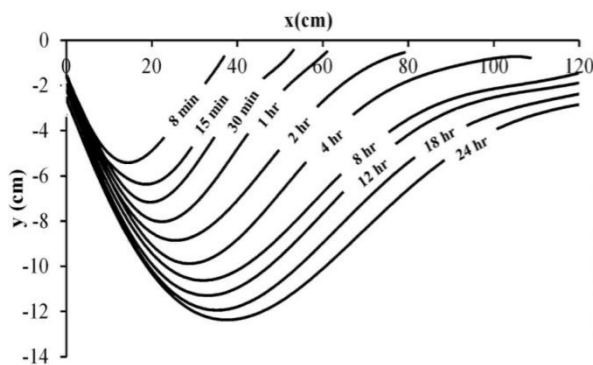
**جدول 2** خلاصه‌ای از مشخصات نیمرخ‌های آب‌شستگی برداشت شده

تعداد آزمایش	زمان‌های برداشت نیمرخ حفره (دقیقه)	مدت زمان آزمایش	نوع مدل
46	0/5, 1, 2, 4, 8, 15, 30	12	مدل اول
	60, 120, 240, 480, 720	ساعته	
9	0/5, 1, 2, 4, 8, 15, 30	24	مدل دوم
	60, 120, 240, 480, 1080, 1440	ساعته	
10	0/5, 1, 2, 4, 8, 15, 30	6 ساعته	مدل دوم
	60, 120, 180, 240, 300, 360		
2	0/5, 1, 2, 4, 8, 15, 30	8 ساعته	مدل اول
	60, 120, 180, 240, 360, 480		

در پایین‌دست سرریز پلکانی، از حوضچه آرامش با 5 طول مختلف به‌ترتیب برابر 37، 55، 74، 110 و 120 سانتی‌متر استفاده شد. در مجموع، 9 آزمایش به مدت 24 ساعت، 46 آزمایش به مدت 12 ساعت، 2 آزمایش به مدت 8 ساعت و 10 آزمایش به مدت 6 ساعت انجام شد و در نهایت 824 نیمرخ آب‌شستگی برداشت گردید. نمونه‌ای از نیمرخ‌های برداشت‌شده در زمان‌های مختلف در شکل 3 مشاهده می‌شوند. مشخصات کلی مربوط به آزمایش‌ها و محدوده پارامترهای مؤثر در جدول 1 ذکر شده است. در جدول 2 خلاصه‌ای از نیمرخ‌های آب‌شستگی برداشت شده، آمده است.

**جدول 1** دامنه تغییرات پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق

پارامتر	محدوده تغییرات	
	مدل اول	مدل دوم
دبی (l/s)	7/43-29/888	31/518-88/951
دانه‌بندی (mm)	0/58, 1/11, 1/78	1/11, 1/78
ارتفاع پله (cm)	3	4
طول پله (cm)	5	10
طول حوضچه آرامش (cm)	10, 37, 55, 74	120
ارتفاع سرریز (cm)	45	60
عرض فلوم (cm)	41	90
عمق پایاب (cm)	8/04-18/43	11/63-21/71
تعداد آزمایش	55	12



**شکل 3** نمونه برداشت نیمرخ‌های آب‌شستگی با زمان (مدل اول،  $Q=16.07$  Lps،  $L_B=55$  cm،  $D_{50}=1.11$  mm)

## 2-2- سامانه برداشت نیمرخ‌های عرضی و طولی

### آب‌شستگی

برای این کار از روش عکس‌برداری و سپس رقومی ساختن عکس‌ها با استفاده از نرم‌افزار Grapher 7 با بهره‌گیری از یک دوربین کانن مدل G9 عمود به ناحیه آب‌شستگی روی یک سه پایه در میدان جریان استفاده شد. همچنین برای برداشت نیمرخ‌های عرضی، چندین آزمایش شاهد به مدت 24 ساعت انجام شد. بعد از اتمام آزمایش، دریچه انتهایی کمی بسته شد تا جریان مستغرق شود. سپس پمپ خاموش می‌شد تا آب موجود در فلوم به تدریج و بدون اینکه حفره آب‌شستگی را به هم بزند، تخلیه شود. در نهایت یک مقدار آب داخل حفره باقی می‌ماند که با استفاده از لوله مانومتر این مقدار آب هم زهکشی می‌شد. در مرحله بعد 24 ساعت زمان برای خشک شدن و تثبیت حفره آب‌شستگی کافی بود. بعد از این مدت زمان، اقدام به برداشت نیمرخ عرضی آب‌شستگی با استفاده از یک اشل با دقت 0/1 میلی‌متر می‌شد.

## 3- نتایج و بحث

### 3-1- بررسی عوامل مؤثر بر پدیده آب‌شستگی در

#### پایین‌دست سرریزهای پلکانی

با در نظر گرفتن مجموعه پارامترهای مؤثر بر پدیده آب‌شستگی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی و صرف‌نظر کردن از پارامترهایی که تأثیر چندانی بر ابعاد حفره آب‌شستگی در پایین‌دست ندارند، هندسه حفره آب‌شستگی را می‌توان تابع عوامل زیر دانست:

$$F(Scour) = f(y_m, x_m, x_s) \rightarrow$$

$$F(\rho, \mu, \rho_s, D_{50}, h_s, l_s, L_B, q, y_{rw}, g, t, y_m, x_m, x_s) = 0 \quad (1)$$

در رابطه (1)،  $y_m$  عمق بیشینه آب‌شستگی،  $x_m$  فاصله عمق بیشینه از انتهای حوضچه آرامش،  $x_s$  طول حفره آب‌شستگی،  $\rho$  جرم حجمی سیال،  $\mu$  گرانروی دینامیکی سیال،  $D_{50}$  دانه‌بندی ذرات رسوبی و  $\rho_s$  جرم حجمی ذرات رسوبی می‌باشد. همچنین  $h_s$  و  $l_s$  به ترتیب ارتفاع و طول پله،  $L_B$  طول حوضچه آرامش،  $H_d$  ارتفاع سرریز،  $q$  دبی در واحد عرض سرریز،  $y_{rw}$  عمق

پایاب،  $g$  شتاب ثقل و  $t$  زمان است.

محاسبات نشان داد که جریان در پایاب سرریز همیشه آشفته ( $Re > 4000$ ) بود. لذا از تأثیر عدد رینولدز در طول آزمایش‌ها صرف‌نظر شد. با توجه به شرایط فوق و با استفاده از روش باکینگهام تحلیل ابعادی به صورت رابطه (2) انجام می‌شود:

$$f\left(\frac{h_s}{l_s}, \frac{L_B}{D_{50}}, \frac{y_{rw}}{D_{50}}, \frac{t}{t_0}, Fr_D, \frac{y_m}{D_{50}}, \frac{x_m}{D_{50}}, \frac{x_s}{D_{50}}\right) = 0 \quad (2)$$

در این رابطه،  $t_0$  زمان مشخصه می‌باشد که در این تحقیق به صورت  $t_0 = \frac{h_s^2}{\sqrt{g(S_s - 1)D_{50}^3}}$  در نظر گرفته شده است. همچنین  $Fr_D$  عدد فرود ذره است که از رابطه (3) به دست می‌آید:

$$Fr_D = \frac{q}{\sqrt{g(S_s - 1)D_{50}^3}} \quad (3)$$

که در این رابطه،  $S_s = \frac{\rho_s}{\rho}$  در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که تمامی آزمایش‌های انجام‌شده در این تحقیق در محدوده رژیم جریان غیر ریزشی بوده است. انتخاب رژیم جریان غیر ریزشی به این دلیل بود که کمترین میزان استهلاک انرژی توسط سرریز پلکانی، در این نوع رژیم روی می‌دهد. بنابراین بیشترین میزان آب‌شستگی نسبت به رژیم جریان ریزشی و رژیم جریان بینابینی، در رژیم جریان غیر ریزشی اتفاق می‌افتد. به همین منظور، از معیار چانسون (2002) برای تفکیک انواع رژیم جریان به قرار زیر استفاده شد:

- مرز بین جریان ریزشی و جریان بینابینی:

$$\frac{y_c}{h_s} = 0.89 - 0.4 \frac{h_s}{l_s} \quad (4)$$

- مرز بین جریان بینابینی و جریان غیر ریزشی:

$$\frac{y_c}{h_s} = 1.2 - 0.325 \frac{h_s}{l_s} \quad (5)$$

که در این روابط،  $y_c$  عمق بحرانی،  $h_s$  ارتفاع پله و  $l_s$  طول پله می‌باشد. در شکل 4 نوع رژیم جریان مربوط به آزمایش‌ها برای هر دو مدل مورد استفاده، بر اساس معیار فوق تعیین شده است.

می‌شود  $(x_m, y_m)$ ، فاصله عمق بیشینه تا انتهای حوضچه آرامش و  $x_s$ ، طول حفره آبشستگی است). اما در این تحقیق شکل بی‌بعد به صورت  $(\frac{x}{x_m}, \frac{y}{y_m})$  به جهت کارایی و سهولت مورد توجه قرار گرفته است. با تقسیم موقعیت طولی هر نقطه در هر زمان  $(x)$  به  $(x_m)$  و موقعیت طولی عمقی هر نقطه در هر زمان  $(y)$  به بیشینه عمق آبشستگی در آن زمان  $(y_m)$ ، مجموعه نیمرخ‌های بدون بعد آبشستگی مطابق شکل (3) از مجموعه نتایج آزمایشگاهی استنتاج شده‌اند. از مجموعه این نتایج وجود یک نوع تشابه در هندسه حفره در پایاب سرریز پلکانی قابل درک است. از برآزش داده‌های بدست آمده، معادله عمومی توصیف کننده نیمرخ حفره به شکل یک معادله درجه سوم به صورت رابطه (6) قابل ارائه خواهد بود:

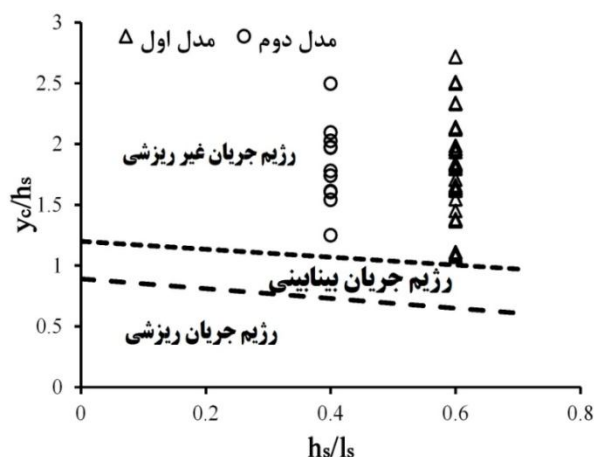
$$\frac{y}{y_m} = a_0 + a_1 \frac{x}{x_m} + a_2 \left(\frac{x}{x_m}\right)^2 + a_3 \left(\frac{x}{x_m}\right)^3 \quad (6)$$

با تعریف ضرایب  $K_1 = \frac{x_m}{y_m}$  و  $K_2 = \frac{x_s}{y_m}$  و استفاده از شرایط مرزی ابتدای حفره  $O(0, -\varepsilon y_m)$ ، انتهای حفره  $S(K_2 y_m, 0)$  و محل حفره با حداکثر عمق و با دو شرط  $M(K_1 y_m, -1)$  و  $\frac{dy}{dx}(x = x_m) = 0$ ، خواهیم داشت:

$$a_0 = -\varepsilon, a_1 = \frac{(\varepsilon-1) \left[ 2 \left(\frac{K_2}{K_1}\right)^3 - 3 \left(\frac{K_2}{K_1}\right)^2 \right] + \varepsilon}{\left(\frac{K_2}{K_1}\right)^3 - 2 \left(\frac{K_2}{K_1}\right)^2 + \left(\frac{K_2}{K_1}\right)},$$

$$a_2 = \frac{(1-\varepsilon) \left[ \left(\frac{K_2}{K_1}\right)^3 - 3 \left(\frac{K_2}{K_1}\right)^2 \right] - 2\varepsilon}{\left(\frac{K_2}{K_1}\right)^3 - 2 \left(\frac{K_2}{K_1}\right)^2 + \left(\frac{K_2}{K_1}\right)},$$

$$a_3 = \frac{(\varepsilon-1) \left[ \left(\frac{K_2}{K_1}\right)^2 - 2 \left(\frac{K_2}{K_1}\right) \right] + \varepsilon}{\left(\frac{K_2}{K_1}\right)^3 - 2 \left(\frac{K_2}{K_1}\right)^2 + \left(\frac{K_2}{K_1}\right)} \quad (7)$$



شکل 4 تعیین رژیم جریان روی سرریز پلکانی بر اساس معیار چانسون (2002)، برای دو مدل مورد استفاده

### 3-2- تشابه نیمرخ‌های آبشستگی

نیمرخ‌های حفره آبشستگی با گذشت زمان در شرایط مختلف از دانه‌بندی ذرات رسوبی، عمق پایاب، طول حوضچه، ارتفاع و طول پله به جهت شکل و ابعاد تغییر می‌کنند. اما بر اساس آنچه قبلاً از مشاهدات سایر محققان ذکر گردید، چنانچه نیمرخ‌های آبشستگی به شکلی مناسب بی‌بعد شوند، نوعی تشابه بین مجموعه نیمرخ‌ها را می‌توان انتظار داشت. در نتیجه مجموعه نیمرخ‌های آبشستگی در محدوده مورد بررسی را می‌توان با یک نیمرخ واحد و بدون بعد توصیف کرد. در این میان محققان مختلف معادلات متنوعی را به منظور توصیف نیمرخ‌های آبشستگی بی‌بعد ارائه کرده‌اند. شکل 2- ب پارامترهای مختلف مورد بررسی در پدیده تشابه پروفیل‌های آبشستگی را نشان می‌دهد. در این تحقیق به منظور بررسی تشابه پروفیل‌های آبشستگی، شکل‌گیری تلماسه در پایین دست سرریز پلکانی مورد توجه نبوده است، زیرا اعتقاد بر این است که شکل‌گیری تلماسه منحصر به شرایط آزمایشگاهی است. در مورد پدیده رسوبگذاری بر خلاف پدیده فرسایش نمی‌توان انتظار داشت هر آنچه که در مدل آزمایشگاهی رخ می‌دهد، لزوماً در نمونه اصلی نیز رخ دهد، اگرچه شکل‌گیری تلماسه در شرایط آزمایشگاهی مؤثر بر توسعه هندسه گودال آبشستگی است. روش‌های مختلفی برای بی‌بعد نمودن نیمرخ‌های آبشستگی توسط محققان پیشنهاد شده است. یک روش استفاده از شکل بی‌بعد به صورت  $(\frac{x}{y_m}, \frac{y}{y_m})$  است. استفاده از شکل‌هایی به صورت:

سعی و خطا بدست آمده است. در شکل 6- الف رابطه بین  $\frac{x}{x_m}$  و  $\frac{y}{y_m}$  برای داده‌های آزمایشگاهی و همچنین نیمرخ عمومی پیشنهادی مشاهده می‌شود. همچنین شکل 6- ب دقت معادله (6) را نسبت به نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

### 3-3- تعیین ابعاد حفره آب‌شستگی $(x_m, y_m, x_s)$

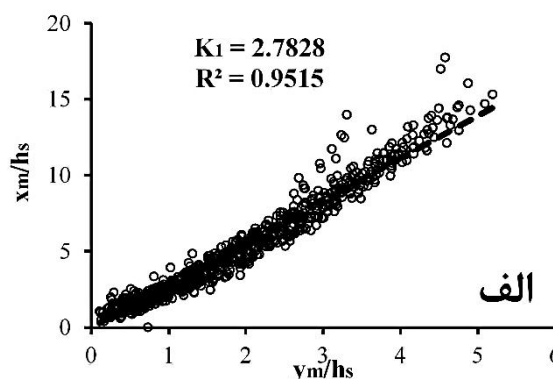
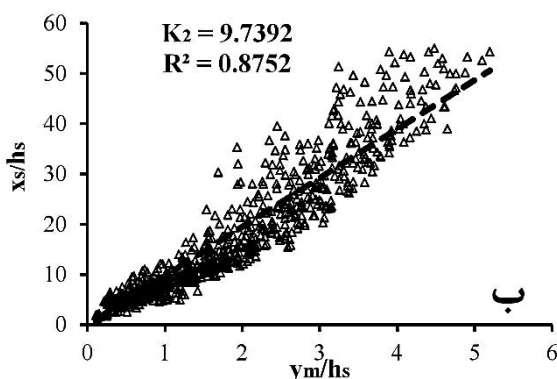
در زمان طراحی، با اطلاع از عمق آب‌شستگی بیشینه حاصل از بزرگترین سیلاب‌ها، پی سازه را می‌توان در عمقی تعبیه کرد که در شرایط تعادل، پایین‌تر از حفره آب‌شستگی بوده و در نتیجه پایداری سازه را به مخاطره نیندازد

در این روابط،  $K_1$  از شیب نمودار تغییرات  $(\frac{x_m}{h_s}, \frac{y_m}{h_s})$  و  $K_2$  از شیب نمودار تغییرات  $(\frac{x_s}{h_s}, \frac{y_m}{h_s})$  از مجموعه داده‌های آزمایشگاهی بدست می‌آید که در این جا  $h_s$  ارتفاع پله می‌باشد. شکل 5 استخراج ضرایب  $K_1$  و  $K_2$  را نشان می‌دهد.

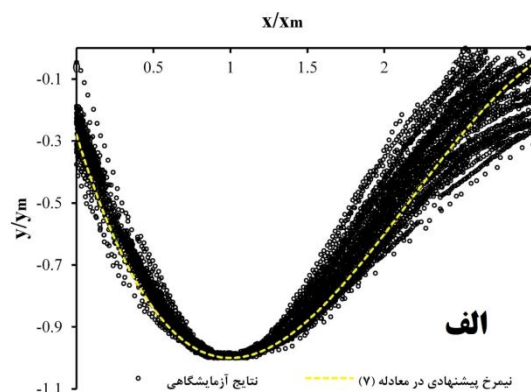
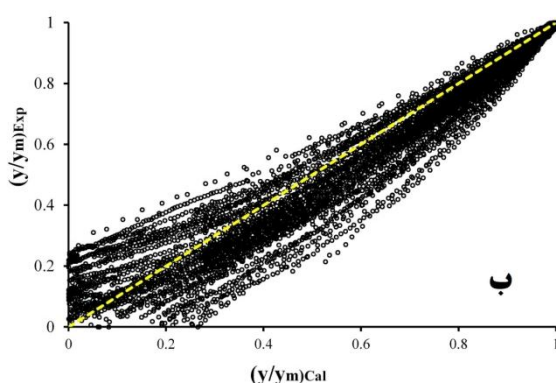
بر اساس مقادیر  $K_1$  و  $K_2$  استخراج‌شده، ضرایب  $a_0, a_1, a_2, a_3$  طبق معادلات مذکور و با فرض  $\varepsilon = 0.2801$  به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$a_0 = -0.2801, a_1 = -1.5998, a_2 = +1.0399, a_3 = -0.16 \quad (8)$$

مقدار  $\varepsilon$  بر اساس حداقل شدن اختلاف بین مقادیر  $\frac{y}{y_m}$  محاسباتی از معادله (6) و مقادیر  $\frac{y}{y_m}$  آزمایشگاهی و با



شکل 5 الف- تعیین ضریب  $K_1 = \frac{x_m}{y_m}$  بر اساس داده‌های آزمایشگاهی ب- تعیین ضریب  $K_2 = \frac{x_s}{y_m}$  بر اساس داده‌های آزمایشگاهی



شکل 6 الف- نیمرخ‌های آب‌شستگی بی‌بعد شده حاصل از نتایج آزمایشگاهی و نیمرخ آب‌شستگی پیشنهادی ب- ارزیابی دقت پروفیل پیشنهادی (حوضچه آرامش با طول 55 سانتی‌متر و ذره رسوبی با دانه‌بندی 1/11 میلی‌متر)

حفره آب‌شستگی،  $h_s$ ، ارتفاع پله،  $l_s$ ، طول پله،  $L$ ، طول حوضچه آرامش،  $D_{50}$ ، متوسط اندازه ذره رسوبی،  $Fr_D$ ، عدد فرود ذره،  $V$ ، حجم حفره آب‌شستگی در واحد عرض،  $t$ ، زمان و  $t_0$ ، زمان معادل می‌باشد. شکل 7 دقت معادلات پیشنهادی را نسبت به نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که معادلات رگرسیونی فوق تنها

می‌توانند برای درونیابی در محدوده  $0.4 \leq \frac{h_s}{l_s} \leq 0.6$

$$87.014 \leq Fr_D \leq 1032.16, \quad 333.333 \leq \frac{L}{D_{50}} \leq 1896.55$$

و  $1.873 \leq \frac{t}{t_0} \leq 29005.323$  به کار روند. به منظور تعیین

ابعاد نهایی حفره آب‌شستگی، از نیمرخ‌های آب‌شستگی در پایان مدت زمان 12 ساعت استفاده شد. یک فرض محافظه‌کارانه در استخراج معادلات تعیین ابعاد نهایی حفره، آن است که در پایان مدت زمان 12 ساعت، حفره آب‌شستگی به جهت توسعه عمقی و نیز توسعه طولی به شرایط تعادل رسیده است. بدیهی است که حفره آب‌شستگی در راستای عمقی سریع‌تر از راستای طولی به تعادل خواهد رسید.

همچنین توصیف نیمرخ حفره آب‌شستگی در هر لحظه با بهره‌گیری از نیمرخ بی‌بعد معادله (6)، نیازمند تعیین عمق آب‌شستگی بیشینه در هر لحظه ( $y_m$ )، است. به منظور تعیین ابعاد حفره آب‌شستگی در هر لحظه در یک شرایط معین از طول و ارتفاع پله، طول حوضچه آرامش، دانه‌بندی ذرات رسوبی و ... روابط رگرسیونی زیر از مجموعه نتایج آزمایشگاهی استخراج گردید:

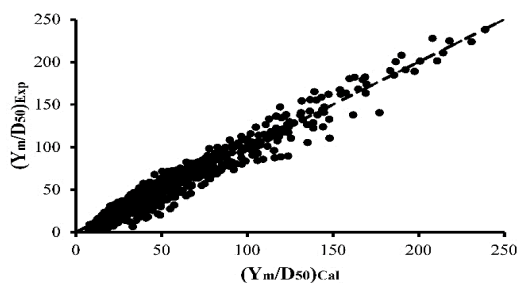
$$\frac{y_m}{D_{50}} = 16.1737 \left( \frac{h_s}{l_s} \right)^{-0.4746} \left( \frac{L}{D_{50}} \right)^{-0.5977} \left( \frac{t}{t_0} \right)^{0.2222} (Fr_D)^{1.4287} \quad (9)$$

$$\frac{x_m}{D_{50}} = 0.4058 \left( \frac{h_s}{l_s} \right)^{-0.5313} \left( \frac{L}{D_{50}} \right)^{-0.6446} \left( \frac{t}{t_0} \right)^{0.2483} (Fr_D)^{1.4623} \quad (10)$$

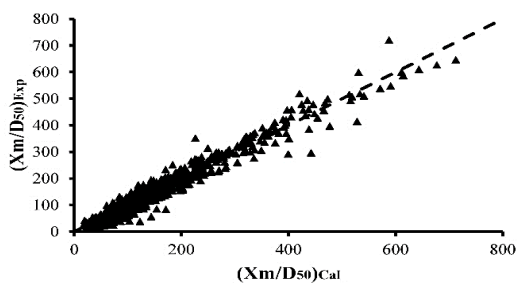
$$\frac{x_s}{D_{50}} = 0.4145 \left( \frac{h_s}{l_s} \right)^{-0.7034} \left( \frac{L}{D_{50}} \right)^{-0.3745} \left( \frac{t}{t_0} \right)^{0.2803} (Fr_D)^{1.3122} \quad (11)$$

$$\frac{V}{D_{50}^2} = 0.1055 \left( \frac{h_s}{l_s} \right)^{-0.9963} \left( \frac{L}{D_{50}} \right)^{-0.7829} \left( \frac{t}{t_0} \right)^{0.4545} (Fr_D)^{2.4386} \quad (12)$$

که در این روابط،  $y_m$ ، بیشینه عمق آب‌شستگی،  $x_m$ ، فاصله عمق بیشینه تا انتهای حوضچه آرامش،  $x_s$ ، طول

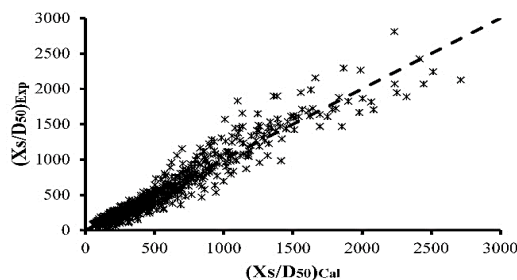


ب- بیشینه عمق آب‌شستگی نسبی ( $y_m/D_{50}$ )

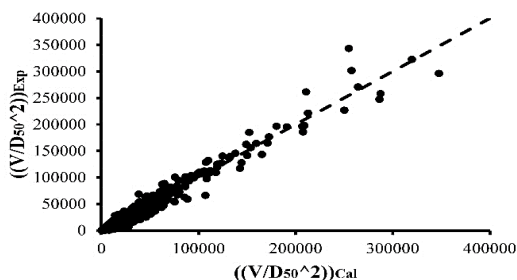


الف- فاصله نسبی بیشینه عمق آب‌شستگی از انتهای

حوضچه آرامش ( $x_m/D_{50}$ )



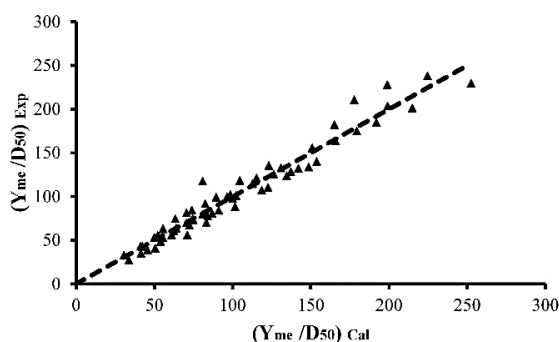
ت- طول نسبی حفره آب‌شستگی ( $x_s/D_{50}$ )



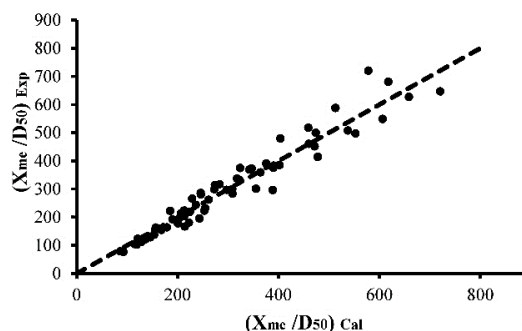
پ- حجم نسبی رسوبات انتقال یافته به پایین‌دست ( $V/D_{50}^2$ )

شکل 7 ارزیابی دقت معادلات برآورد کننده ابعاد حفره آب‌شستگی (معادلات 9، 10، 11 و 12)

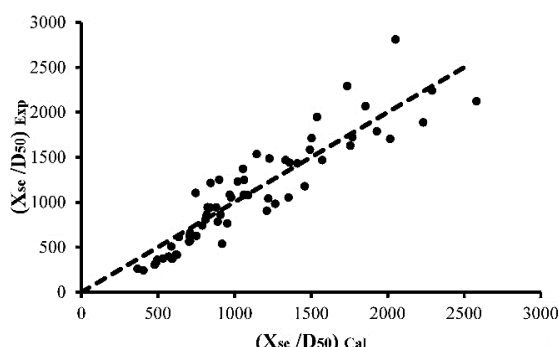




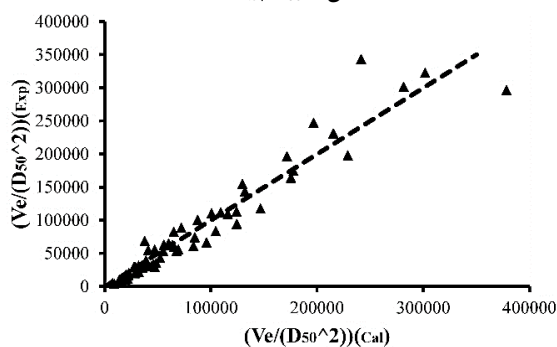
ب- پیشنه عمق آبشستگی نسبی  $(y_{me}/D_{50})$



الف- فاصله نسبی پیشینه عمق آبشستگی از انتهای حوضچه آرامش  $(x_{me}/D_{50})$



ت- طول نسبی حفره آبشستگی  $(x_{se}/D_{50})$



ب- حجم نسبی رسوبات انتقال یافته به پایین دست  $(V_e/D_{50}^2)$

شکل 8 ارزیابی دقت معادلات برآورد کننده ابعاد حفره آبشستگی در شرایط تعادلی (معادلات 13، 14، 15 و 16)

### 3-4- تأثیر پارامترهای مختلف بر ابعاد حفره آبشستگی

**الف- شیب سرریز پلکانی  $(h_s/l_s)$ :** شکل 9 تأثیر شیب سرریز پلکانی را به ازای دبی‌های مختلف و دانه‌بندی 1/11 میلی‌متر بر روی ابعاد حفره آبشستگی نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که در شرایط معین از طول نسبی حوضچه آرامش  $(L/D_{50})$  و عدد فرود ذره  $(Fr_D)$ ، با افزایش شیب سرریز پلکانی، ابعاد حفره آبشستگی در شرایط جریان غیر ریزشی کاهش می‌یابد. طبق مطالعات چانسون (2002) در جریان غیر ریزشی، با افزایش شیب سرریز، استهلاک انرژی توسط سرریز پلکانی افزایش می‌یابد. در این حالت مقدار انرژی کمتری به پایین‌دست منتقل شده و باعث ایجاد آبشستگی کمتر خواهد شد. هم‌چنین از این نمودارها این برداشت را می‌توان کرد که با افزایش دبی در یک شرایط ثابت، ابعاد حفره آبشستگی افزایش خواهد یافت.

**ب- طول حوضچه آرامش  $(L/D_{50})$ :** شکل 10 تأثیر طول حوضچه آرامش را بر ابعاد حفره آبشستگی نشان می‌دهد.

با در نظر گرفتن این مسائل، معادلات زیر برای تعیین عمق آبشستگی پیشینه  $(y_{me})$  فاصله عمق آبشستگی پیشینه تا انتهای حوضچه  $(x_{me})$ ، طول حفره آبشستگی  $(x_{se})$  و حجم حفره آبشستگی  $(V_e)$  در یک شرایط تعادل فرضی استخراج شدند.

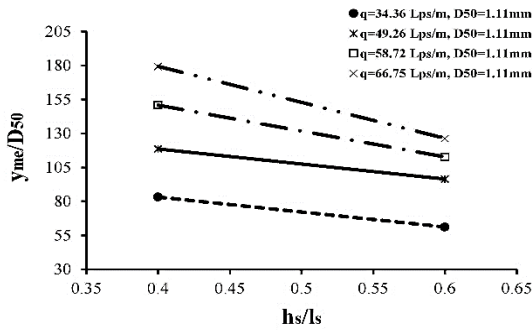
$$\frac{y_{me}}{D_{50}} = 2 \left( \frac{h_s}{l_s} \right)^{-0.7501} \left( \frac{L}{D_{50}} \right)^{-0.4444} (Fr_D)^{1.1253} \quad (13)$$

$$\frac{x_{me}}{D_{50}} = 7.5061 \left( \frac{h_s}{l_s} \right)^{-0.9253} \left( \frac{L}{D_{50}} \right)^{-0.5629} (Fr_D)^{1.2018} \quad (14)$$

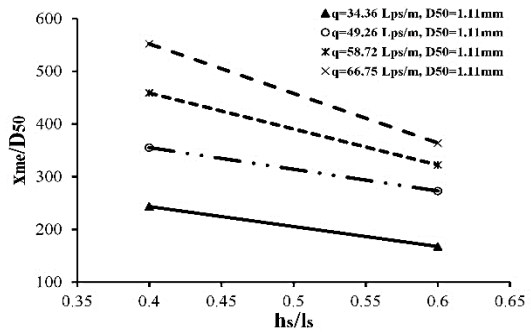
$$\frac{x_{se}}{D_{50}} = 27.145 \left( \frac{h_s}{l_s} \right)^{-0.5338} \left( \frac{L}{D_{50}} \right)^{-0.3624} (Fr_D)^{1.0112} \quad (15)$$

$$\frac{V_e}{D_{50}} = 49.845 \left( \frac{h_s}{l_s} \right)^{-1.0958} \left( \frac{L}{D_{50}} \right)^{-0.783} (Fr_D)^{2.058} \quad (16)$$

که پارامترهای موجود، قبلاً معرفی شدند. شکل 8 دقت معادلات پیشنهادی را نسبت به نتایج آزمایشگاهی در شرایط تعادلی نشان می‌دهد.

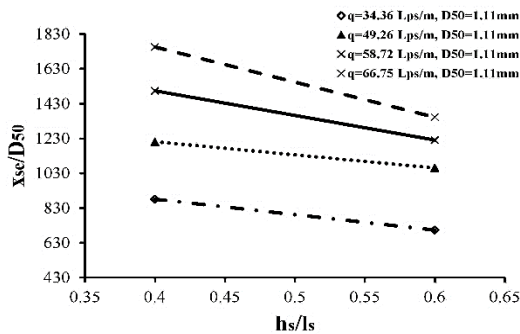


ب- بیشه عمق آبشستگی نسبی ( $y_{me}/D_{50}$ )

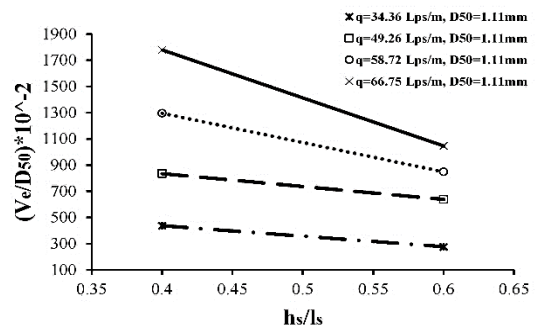


الف- فاصله نسبی بیشه عمق آبشستگی از انتهای حوضچه

آرامش ( $x_{me}/D_{50}$ )

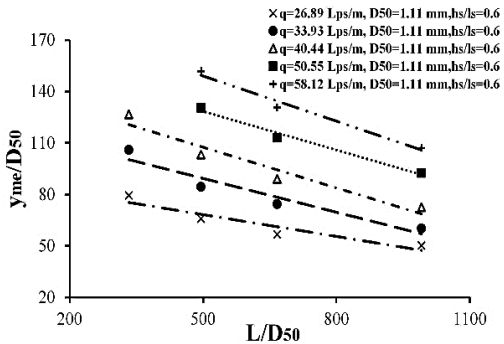


ت- طول نسبی حفره آبشستگی ( $x_{sc}/D_{50}$ )

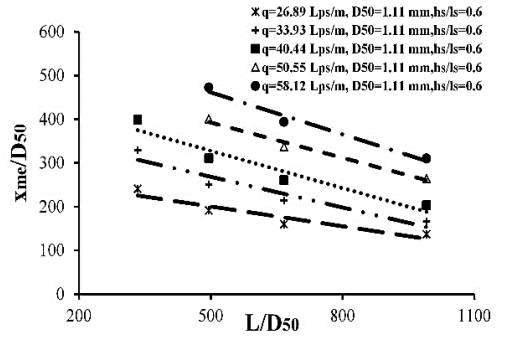


ب- حجم نسبی رسوبات انتقال یافته به پایین دست ( $V_e/D_{50}^2$ )

شکل 9 تأثیر شیب سرریز پلکانی بر ابعاد حفره آبشستگی برای دانه بندی 1/11 میلی متر

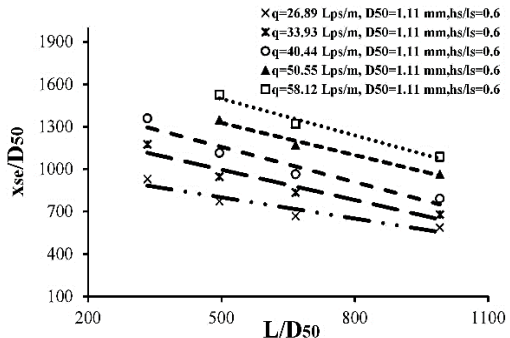


ب- بیشه عمق آبشستگی نسبی ( $y_{me}/D_{50}$ )

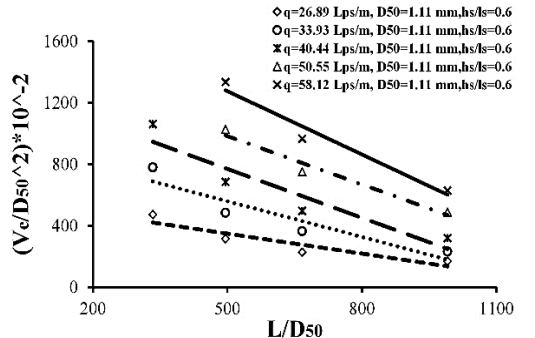


الف- فاصله نسبی بیشه عمق آبشستگی از انتهای حوضچه

آرامش ( $x_{me}/D_{50}$ )



ت- طول نسبی حفره آبشستگی ( $x_{sc}/D_{50}$ )



ب- حجم نسبی رسوبات انتقال یافته به پایین دست ( $V_e/D_{50}^2$ )

شکل 10 تأثیر طول حوضچه آرامش بر ابعاد حفره آبشستگی

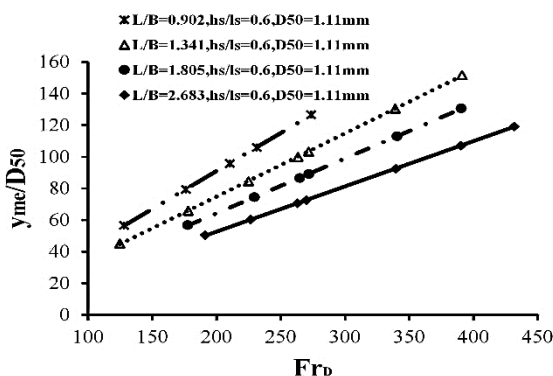
این شکل، با افزایش دبی جریان و به تبع آن افزایش عدد فرود ذره، ابعاد حفره آبشستگی بیشتر شده و حجم رسوبات انتقال یافته به پایین دست افزایش می یابد. در محدوده عدد فرود ذره 124 الی 511، بیشینه عمق آبشستگی تا 72 درصد افزایش می یابد.

#### 4- مقایسه عملکرد سازه سرریز پلکانی در کاهش آبشستگی نسبت به سرریز اوجی

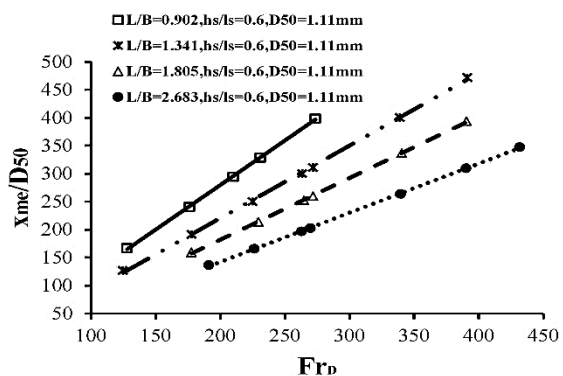
یکی از مزیت های سرریز پلکانی نسبت به سرریز اوجی، استهلاك انرژی بالا در این نوع سازه است. بدین منظور در این تحقیق مقایسه ای بین ابعاد حفره آبشستگی در پایین دست دو نوع سازه مذکور انجام گرفته است. برای انجام این مقایسه، از یک سری داده آزمایشگاهی مربوط به فرهودی و اسمیت (1980) استفاده شد. ایشان آبشستگی موضعی در پایین دست سرریزهای اوجی را مورد مطالعه قرار دادند.

همانطور که در شکل دیده می شود، با افزایش طول حوضچه آرامش، ابعاد حفره آبشستگی به ازای شیب ثابت  $(h_s/l_s)$  و عدد فرود ذره معین  $(Fr_D)$ ، کاهش می یابد. زمانی که طول حوضچه آرامش افزایش می یابد، جهش هیدرولیکی به صورت کامل در داخل حوضچه تشکیل شده و انرژی بیشتری مستهلک می شود. در حالی که بخشی از جهش هیدرولیکی برای حوضچه آرامش با طول کم، بر روی بستر رسوبی منتقل شده و باعث افزایش ابعاد حفره آبشستگی خواهد شد و در این حالت انرژی کمتری توسط حوضچه آرامش تلف می شود. در محدوده دبی مورد نظر، در شرایط یکسان آزمایشگاهی، بیشینه عمق آبشستگی در پایین دست حوضچه آرامش با طول 110 سانتی متر نسبت به بیشینه عمق آبشستگی در پایین دست حوضچه آرامش با طول 37 سانتی متر، 48 الی 78 درصد کاهش پیدا کرد.

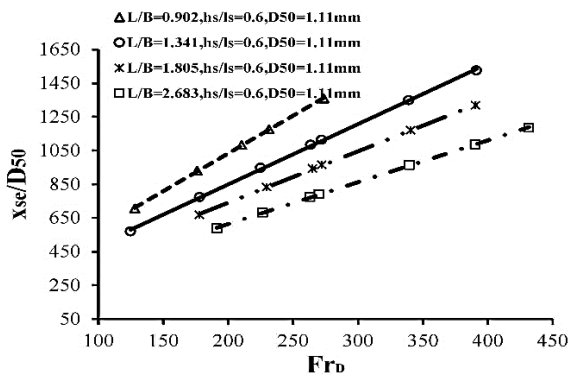
ج- عدد فرود ذره  $(Fr_D)$ : شکل 11 تغییرات ابعاد حفره را نسبت به عدد فرود ذره نشان می دهد. با توجه به



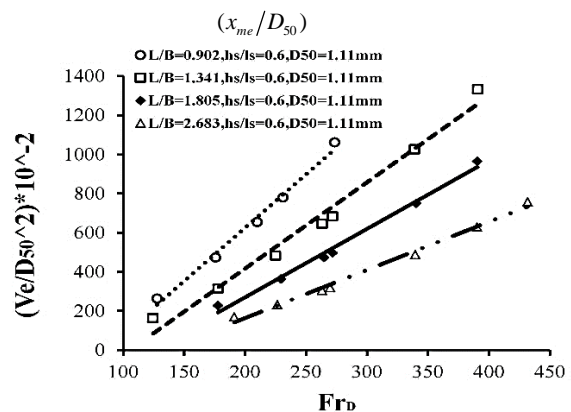
ب- بیشینه عمق آبشستگی نسبی  $(y_{me}/D_{50})$



الف- فاصله نسبی بیشینه عمق آبشستگی از انتهای حوضچه آرامش



ت- طول نسبی حفره آبشستگی  $(x_{sc}/D_{50})$

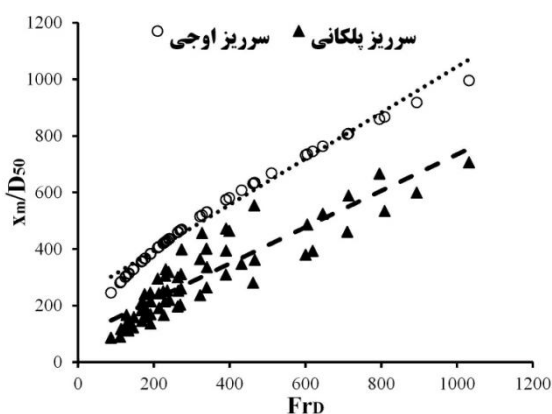


پ- حجم نسبی رسوبات انتقال یافته به پایین دست  $(V_e/D_{50}^2)$

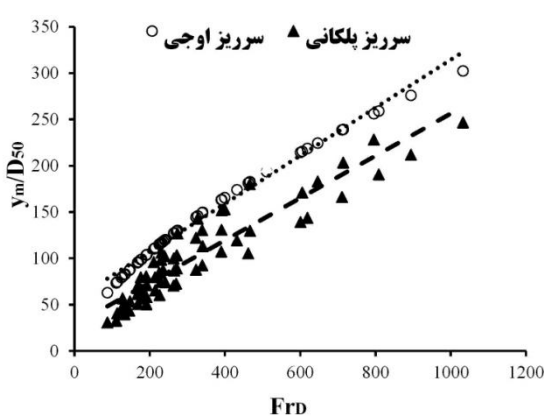
شکل 11 تأثیر عدد فرود ذره بر ابعاد حفره آبشستگی

استهلاک انرژی می‌شود که این امر، به جهت کاهش ابعاد حفره آب‌شستگی ایمنی بیشتر سازه سرریز پلکانی را نسبت به سرریز اوجی تحت شرایط مشابه توجیه می‌کند. در شکل 13 نمونه‌ای از برداشت نیمرخ‌های عرضی و طولی حفره آب‌شستگی نشان داده شده است. آنچه تاکنون در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته، نیمرخ‌های طولی حفره آب‌شستگی است که در مجاور جداره با عکس برداشت شده است. برداشت عرضی نیمرخ آب‌شستگی نشان‌دهنده توسعه عرضی حفره علاوه بر توسعه طولی است.

این مطالعه بر روی سه نوع سرریز اوجی با ارتفاع‌های مختلف انجام شد. رابطه بین عدد فرود ذره و ابعاد نسبی حفره آب‌شستگی به صورت شکل 12 برای دو نوع سازه رسم شد. مطابق شکل، در شرایط یکسان و محدوده معین از اعداد فرود ذره، عمق نسبی آب‌شستگی ( $y_m/D_{50}$ ) برای سرریز پلکانی نسبت به سرریز اوجی کمتر است. این پدیده را این‌گونه می‌توان توجیه کرد که بخش زیادی از انرژی جریان قبل از رسیدن به پایین‌دست، توسط سرریز پلکانی مستهلک شده و در پایاب باعث کاهش ابعاد حفره آب‌شستگی می‌شود. با توجه به شکل، مشاهده می‌شود که وجود سرریز پلکانی بین 42/06 تا 74/82 درصد باعث



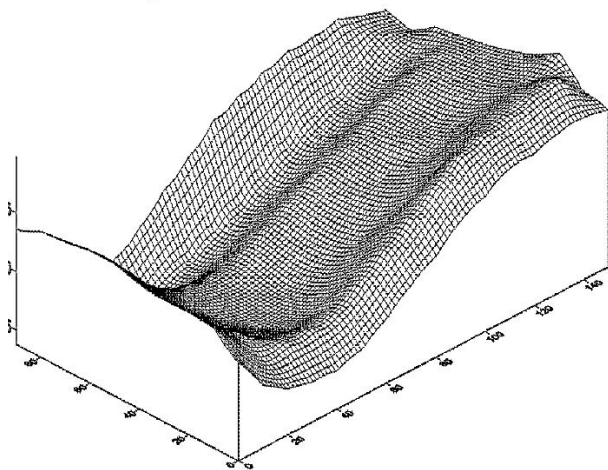
ب- فاصله بیشینه عمق آب‌شستگی از انتهای حوضچه آرامش



الف- بیشینه عمق آب‌شستگی

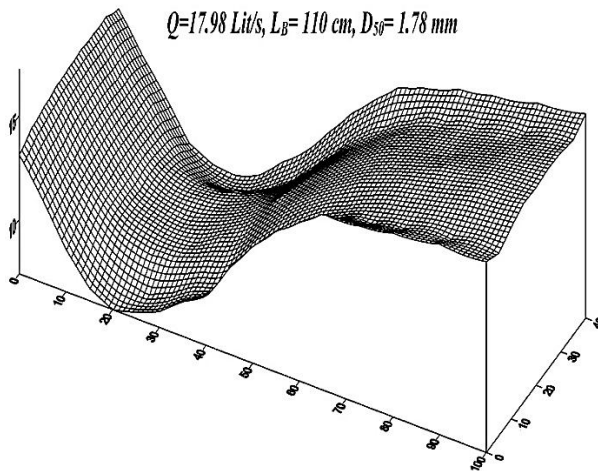
شکل 12 مقایسه ابعاد حفره آب‌شستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی و سرریز اوجی

$Q=68.407 \text{ Lit/s}, L_B=120 \text{ cm}, D_{50}=1.11 \text{ mm}$



ب -  $Q = 68.407 \text{ lit/s}, L_B = 120 \text{ cm}, D_{50} = 1.11 \text{ mm}$

$Q=17.98 \text{ Lit/s}, L_B=110 \text{ cm}, D_{50}=1.78 \text{ mm}$



الف -  $Q = 17.98 \text{ lit/s}, L_B = 110 \text{ cm}, D_{50} = 1.78 \text{ mm}$

شکل 13 نمونه‌هایی از پروفیل‌های عرضی برداشت شده در دو مدل مورد استفاده در شرایط مختلف آزمایشگاهی

آب‌شستگی بیشینه، در مجاورت جداره‌ها برداشت شده است. در یک شرایط معین از طول نسبی حوضچه آرامش، عمق پایاب نسبی، عدد فرود ذره و شیب سرریز پلکانی، ابعاد حفره آب‌شستگی با افزایش دانه‌بندی ذرات رسوبی، کاهش می‌یابد. در یک شرایط معین از دانه‌بندی ذره رسوبی، شیب سرریز پلکانی، عمق پایاب نسبی و عدد فرود ذره، هندسه حفره آب‌شستگی با افزایش طول حوضچه آرامش، کاهش می‌یابد. در محدوده دبی موردنظر، در شرایط یکسان آزمایشگاهی، بیشینه عمق آب‌شستگی در پایین‌دست حوضچه آرامش با طول 110 سانتی‌متر نسبت به بیشینه عمق آب‌شستگی در پایین‌دست حوضچه آرامش با طول 37 سانتی‌متر، 48 الی 78 درصد کاهش پیدا کرد. با افزایش عدد فرود ذره، با در نظر گرفتن شرایط ثابت برای سایر پارامترها، ابعاد حفره آب‌شستگی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی افزایش می‌یابد. با افزایش شیب سرریز پلکانی، هندسه حفره آب‌شستگی در پایین‌دست سرریز کاهش می‌یابد. با افزایش عمق پایاب، در صورت ثابت بودن سایر پارامترهای مؤثر، گودالی با عمق بیشتر، و در فاصله طولی بیشتر شکل خواهد گرفت. برای یک عدد فرود ذره معین و تحت شرایط ثابت، عمق بیشینه آب‌شستگی برای سرریز اوجی بیشتر از سرریز پلکانی است. وجود سرریز پلکانی بین 42/06 تا 74/82 درصد باعث استهلاک انرژی می‌شود که این امر، به جهت کاهش ابعاد حفره آب‌شستگی ایمنی بیشتر سازه سرریز پلکانی را نسبت به سرریز اوجی تحت شرایط مشابه توجیه می‌کند.

### 5- فهرست علائم

$B$ (cm)	عرض فلوام
$D_{50}$ (mm)	اندازه ذره رسوبی
$Fr_D$	عدد فرود ذره
$g$ ( $m/s^2$ )	شتاب ثقل
$h_s$ (cm)	ارتفاع پله سرریز
$L_B$ (cm)	طول حوضچه آرامش
$Q$ (lit/s)	دبی جریان
Re	عدد رینولدز
$t$	زمان
$V$	رسوبات انتقال یافته به پایین دست

با توجه به شکل، مقدار آب‌شستگی در نزدیکی جداره‌ها بیشتر بوده و در میانه عرضی بستر کمترین مقدار ممکن است. در واقع عمق آب‌شستگی بیشینه در مجاورت جداره‌ها برداشت شده است. این پدیده را این‌گونه می‌توان توجیه نمود که جریان‌های عرضی پس از برخورد با جداره کانال و در بازگشت به میانه عرضی بستر رسوبی، بخشی از رسوبات موجود در مجاورت جداره را به میانه عرضی بستر منتقل می‌کنند. این حالت برای هر دو جداره اتفاق می‌افتد. همین موضوع سبب گودشدن بیشتر جداره نسبت به میانه عرضی بستر می‌شود. این مسأله از سوی برخی محققان به آشفتگی بودن جریان در پایاب جهش هیدرولیکی و تصادفی بودن خطوط جریان در این ناحیه نسبت داده شده است (موسوی خندان، 1379؛ حمیدی‌فر و همکاران، 1389).

### 5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تشابه بین نیمرخ‌های آب‌شستگی مورد بررسی قرار گرفت و انتخاب  $\left(\frac{x}{x_m}, \frac{y}{y_m}\right)$  برای بی‌بعد کردن نیمرخ‌های حفره، نتایج بهتری را نسبت به بی‌بعد سازی با روش‌های دیگر بدست داد. هم‌چنین با استفاده از نیمرخ بدون بعد شده آب‌شستگی، مشخصات هندسی و حجم رسوب انتقال‌یافته از حفره قابل محاسبه خواهد بود. روابط پیش‌بینی‌کننده عمق بیشینه آب‌شستگی، فاصله عمق بیشینه از انتهای حوضچه آرامش، طول حفره و حجم رسوبات انتقال یافته به پایین‌دست بر اساس پارامترهای بی‌بعد، در زمان‌های مختلف بسط داده شد. هم‌چنین این روابط برای حالت تعادل نهایی هم بدست آمد. زمان رسیدن به تعادل عمق بیشینه آب‌شستگی و زمان تعادل رسیدن به فاصله طولی عمق بیشینه از انتهای حوضچه، تقریباً با هم برابر است. اما برای رسیدن به تعادل نسبی در وجه پایین‌دست حفره، به زمان بیشتری نیاز است. برداشت عرضی نیمرخ آب‌شستگی، نشان‌دهنده توسعه عرضی حفره علاوه بر توسعه طولی است. مقدار آب‌شستگی در نزدیکی جداره‌ها بیشتر بوده و در میانه عرضی بستر کمترین مقدار ممکن است. در واقع عمق

Dargahi, B. (2003). "Scour development downstream of a spillway". *Journal of Hydraulic Research*, 41(4), pp. 417-426.

Dey, S. and Sarkar, A. (2007). "Effect of upward seepage on scour and flow downstream of an apron due to submerged jets". *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(1), pp. 59-69.

Farhoudi, J. and Smith, K.V. (1985). "Local scour profiles downstream of hydraulic jump". *Journal of Hydraulic Research*, 23(4), pp. 343-358.

Kothyari, U.C., Garde, R.C.J. and Ranga Raju, K.G. (1992). "Temporal variation of scour around circular bridge piers". *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(8), pp. 1091-1106.

Laursen, E.M. (1952). "Observations on the nature of scour". *Proceedings of the Fifth Hydraulics Conference, State University of Iowa, Iowa City, Iowa*. pp. 179-197.

Nik Hassan, N., Narayanan, R. (1985). "Local scour downstream of an apron". *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(11), pp. 1371-1384.

Raudkivi, A.J. (1998). *Loose boundary hydraulics*. CRC Press.

Tuna, M. and Emiroglu, M. (2011). "Scour profiles at downstream of cascades". *Scientia Iranica*, 18(3), pp. 338-347.

Farhoudi, J. and Shayan, H. K. (2014). "Investigation on local scour downstream of adverse stilling basins", *Ain Shams Engineering Journal* 5, pp. 361-375.

Shayan, H.K. and Farhoudi, J. (2015). "Local scour profiles downstream of adverse stilling basins". *Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering*, 22(1), 1

Shayan, H.K., Farhoudi, J. and Hamidifar, H. (2015). "Estimation of maximum scour depth downstream of horizontal and adverse stilling basins using a semi-theoretical approach", *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 1-15.

$V_e$	رسوبات انتقال یافته به پایین دست در شرایط تعادلی
$x_m$ (cm)	فاصله بیشینه عمق آبشستگی از انتهای حوضچه آرامش در مدت زمان $t$
$x_s$ (cm)	بیشینه طول حفره آبشستگی در مدت زمان $t$
$x_{me}$ (cm)	فاصله بیشینه عمق آبشستگی از انتهای حوضچه آرامش در شرایط تعادلی
$x_{se}$ (cm)	بیشینه طول حفره آبشستگی در شرایط تعادلی
$y_c$	عمق بحرانی جریان
$y_m$ (cm)	بیشینه عمق آبشستگی
$y_{me}$ (cm)	بیشینه عمق آبشستگی در شرایط تعادلی
$y_{rw}$ (cm)	عمق پایاب
$\mu \left( \frac{N-s}{m^2} \right)$	لزجت دینامیکی سیال
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	گرانروی سیال

## 6- منابع

حمیدی‌فر، ح.، امید، م. ح. و نصرآبادی، م. (1389). "آبشستگی موضعی در پایین‌دست دریچه‌های کشویی"، نشریه آب و خاک، شماره 4، جلد 24، دانشگاه فردوسی مشهد.

خلیلی‌شایان، ح. و فرهودی، ج. (1391). "نیمرخ‌های آبشستگی و تغییرات تنش‌های برشی در حفره در پایاب حوضچه‌های آرامش با شیب معکوس"، نشریه هیدرولیک، دوره 7، شماره 4.

موسوی خ. (1379). "بررسی پروفیل آبشستگی پایین‌دست جهش هیدرولیکی با استفاده از تحقیقات آزمایشگاهی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

Chanson, H. (2002). *Hydraulics of stepped chutes and spillways*. CRC Press.