

## بررسی تغییرات آبشستگی موضعی پایین دست جت‌های ریزشی با تغییر عمق بحرانی پایاب و شکل روزنه

مجتبی صانعی<sup>۱\*</sup>، هدا حدیدی<sup>۲</sup> و محمدعلی بنی‌هاشمی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، <sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران و <sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۷/۲۹

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۲/۰۱

### چکیده

بررسی پدیده آبشستگی موضعی ناشی از جت‌های ریزشی، در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی، به منظور جلوگیری از فرسایش شدید حاصل از آن و به خطر انداختن ایمنی سازه، امری مهم و ضروری می‌باشد. در این مقاله، نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی درباره تاثیر عمق پایاب بر ابعاد آبشستگی موضعی پایین دست جت‌های ریزشی، ارائه می‌شود. ابتدا جت آب از روزنه‌هایی با مقاطع دایره‌ای، مربع و لوزی شکل، با مساحت یکسان و با دبی‌های در محدوده ۲/۴۶ تا ۴/۸ لیتر بر ثانیه، بر روی بستری از جنس شن با قطر متوسط برابر سه میلی‌متر و با عمق‌های پایاب در محدوده ۱۰ تا ۲۴/۸ سانتی‌متر، ریزش نموده و ابعاد حفره آبشستگی اندازه‌گیری شد. نتایج تحلیل داده‌های آزمایشگاهی بیانگر آن است که با افزایش عمق پایاب تا حد معینی، حداکثر عمق آبشستگی، افزایش یافته و پس از آن، با افزایش بیشتر عمق پایاب، حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. همچنین، مشخص شد که ابعاد حفره آبشستگی با پارامترهای بی‌بعد  $(Tw + ds)/\Delta h$  و  $(v_0/\sqrt{g \cdot \Delta h}) \times Tw/R_H$  (  $Tw$  عمق پایاب،  $ds$  عمق آبشستگی،  $\Delta h$  اختلاف رقوم سطح آب در بالادست و پایین دست روزنه،  $R_H$  شعاع هیدرولیکی روزنه،  $v_0$  سرعت متوسط جریان خروجی از روزنه و  $g$  شتاب ثقل)، رابطه توانی دارند. در نهایت، روابط بی‌بعدی برای برآورد ابعاد آبشستگی برای دبی‌ها و عمق‌های پایاب مختلف، پیشنهاد شد.

**واژه‌های کلیدی:** جریان آبشاری، روزنه، عمق پایاب، فرسایش بستر، مدل آزمایشگاهی

### مقدمه

خروجی از تخلیه کننده‌های تحت فشار روی بدنه یا کناره سدها، جت‌های ایجاد شده توسط سرریزهای روزنه‌ای (مانند سرریزهای به کار رفته در سد کارون ۳) و نیز فرسایش موضعی ناشی از لوله‌های تخلیه سیالات مانند لوله‌های فاضلاب صنعتی یا شهری که به درون رودخانه‌ها تخلیه می‌شوند، نمونه‌هایی از آبشستگی موضعی ایجاد شده در پایین دست سازه‌های

آبشستگی از پدیده‌های مهم در مهندسی هیدرولیک است. از نظر علت به وجود آمدن، آبشستگی به دو دسته عمومی و موضعی تقسیم می‌شود. مبحث مورد نظر در اینجا، آبشستگی موضعی ایجاد شده در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی توسط جت‌های ریزشی، می‌باشد. آبشستگی حاصل از جریان

ابعادی، پارامترهای بدون بعد مؤثر بر پدیده، استخراج و تأثیر آن‌ها بر روی ابعاد آبشستگی بررسی و تحلیل شد. در انتها معادلاتی برای برآورد ابعاد حفره آبشستگی ارائه شده است.

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری انجام شد. وسایل آزمایشگاهی، شامل یک حوضچه رسوب بود که جت آب به وسیله روزنه‌ای که در انتهای یک فلوم آزمایشگاهی نصب شده، به درون آن تخلیه می‌شد. حوضچه رسوب طول، عرض و عمق به ترتیب ۱/۵، ۱/۵ و ۰/۷ متر داشت، به طوری که آبشستگی درون آن تحت تأثیر دیواره‌های کناری قرار نمی‌گرفت (شکل ۱).



شکل ۱- فلوم آزمایشگاهی و حوضچه پایین دست روزنه

روزنه‌ها از جنس پلکسی گلاس و با مقاطع دایره‌ای، مربع و لوزی شکل ساخته شدند. مساحت مقطع همه روزنه‌ها یکسان بوده است. ارتفاع آب در پشت روزنه، به وسیله دریچه‌ای که در کنار فلوم نصب شده بود، تنظیم می‌شد. عمق پایاب نیز به وسیله دریچه‌ای لولایی در پایین دست حوضچه رسوب، تنظیم شده و دبی عبوری از روزنه‌ها، به وسیله سرریز لبه تیز مثلثی در پایین دست، تعیین شد. آزمایش‌ها، برای هر روزنه با سه دبی مختلف در محدوده ۲/۴۶ تا ۴/۸ لیتر بر ثانیه و برای هر دبی با چهار یا پنج عمق پایاب متفاوت در محدوده ۱۰ تا ۲۴/۸ سانتی‌متر، هر کدام به مدت ۶۰ دقیقه صورت گرفت. این مدت زمان به این دلیل انتخاب شد که در همه آزمایش‌ها پس از

هیدرولیکی می‌باشند. آبشستگی موضعی در صورتی که مهار نشود، می‌تواند باعث فرسایش شدید شده و پایداری سرریز، سد و سازه‌های مرتبط را به مخاطره بیندازد، ضمن این که تجمع مواد فرسایش یافته می‌تواند با تغییر رقوم پایاب بر عملکرد خروجی سازه تأثیر بگذارد. بررسی و مطالعه پدیده آبشستگی به دلیل پیچیدگی شرایط حاکم بر این پدیده، عمدتاً به وسیله روش تحلیل ابعادی به همراه مدل فیزیکی و در برخی موارد به صورت ریاضی و نظری صورت گرفته است. افراد مختلفی از جمله Anderson و Blaisdell (۱۹۹۴) و Abt و Doehring (۱۹۸۸a,b)، و نیز Helalat و Moosavi (۱۹۹۷) و (۲۰۰۷)، بررسی‌هایی را برای تعیین اثر ارتفاع ریزش بر روی هندسه آبشستگی انجام دادند. Raikar و Dey (۲۰۰۷) همبستگی حداکثر عمق آبشستگی را با عدد فرود دانه‌بندی، اندازه نسبی رسوب و عمق نسبی پایاب نشان دادند. Falvey و Ervine (۱۹۸۷)، اعلام کردند که اندازه هسته جت ریزشی آزاد و سرعت جریان با افزایش ارتفاع ریزش، به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابند. همچنین، افزایش ارتفاع جت باعث افزایش عمق آبشستگی و کاهش طول و عرض حفره آبشستگی می‌شود. Ghodsian و همکاران (۲۰۱۲)، آبشستگی در پایین دست جت‌های آبشاری در مصالح غیریکنواخت را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش انحراف معیار رسوبات، پارامترهای حفره آبشستگی و ارتفاع تل‌ماسه افزایش یافته در حالی که طول و عرض حفره آبشستگی کاهش می‌یابد. تحلیل حساسیت متغیرها نشان می‌دهد که ارتفاع ریزش نسبی بر پارامترهای حفره آبشستگی موثرتر از بقیه پارامترها است. از آنجا که به تأثیرات عمق پایاب بر روی ابعاد آبشستگی در پایین دست جت‌های ریزشی اشاره‌ای نشده است، در این مقاله نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی درباره تأثیر عمق پایاب بر آبشستگی موضعی پایین دست جت‌های ریزشی ارائه می‌شود. در آزمایش‌ها، از روزنه‌هایی با اشکال دایره، مربع و لوزی که در انتهای یک فلوم آزمایشگاهی نصب شده بودند، استفاده شد. در انتهای هر آزمایش، ابعاد حفره آبشستگی اندازه‌گیری شده و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. سپس با استفاده از آنالیز

وارد حوضچه رسوب شده و پس از برقراری عمق پایاب، دبی پمپ قطع می‌شود. به‌منظور اندازه‌گیری مشخصات حفره آبشستگی و نیز برآمدگی رسوبات پایین‌دست آن، از شاخص مدرج استفاده شد. این شاخص مدرج بر روی ریل‌هایی که در جهت طولی و عرضی حوضچه رسوب نصب شده بود، به‌صورت دستی حرکت کرده و مختصات هر نقطه در سه جهت، به‌دست می‌آید. تراز آب پشت روزنه نیز، به‌وسیله شاخص مدرج دیگری کنترل شد (شکل ۲). خلاصه مشخصات مقطع روزنه‌ها، در جدول ۱ آورده شده است.

زمان ۶۰ دقیقه، تغییری در ابعاد حفره آبشستگی مشاهده نشد. ارتفاع ریزش جریان آب، از وسط مقطع روزنه تا سطح بستر، ۲۹ سانتی‌متر و برای همه روزنه‌ها، ثابت بود.

در همه آزمایش‌ها، از شن با دانه‌بندی یک‌نواخت با  $d_{50}$  برابر سه میلی‌متر، به‌عنوان مصالح بستر استفاده شد. حوضچه رسوب تا ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر از مواد بستر پر شد. پیش از شروع هر آزمایش، سطح مواد بستر در سراسر حوضچه رسوب، کاملاً صاف شد. برای تأمین اولیه عمق پایاب و همچنین، ممانعت از آبشستگی، آب به‌وسیله پمپی از پایین‌دست، به آرامی

جدول ۱- مشخصات روزنه‌ها و دبی‌ها

شکل روزنه	مساحت مقطع روزنه ( $\text{cm}^2$ )	شعاع هیدرولیکی (cm)	دبی (lit/s)
دایره به قطر ۸ سانتی‌متر	۵۰/۲۶۵	۲	۴/۶۵ و ۳/۶۹، ۲/۵۳
مربع به ضلع ۷/۰۹ سانتی‌متر	۵۰/۲۶۵	۱/۷۸	۴/۸۰ و ۳/۶۹، ۲/۴۶
لوزی با اقطار ۱۰/۰۳ سانتی‌متر	۵۰/۲۶۵	۱/۷۸	۴/۶۵ و ۳/۵۰، ۲/۷۰

روزنه، شعاع هیدرولیکی روزنه ( $R_H$ ) و مساحت روزنه (A).

- پارامتر زمان (t).

اگر  $\phi$  نشانگر ابعاد حفره آبشستگی و  $d_s$  عمق آبشستگی باشد، آن‌گاه:

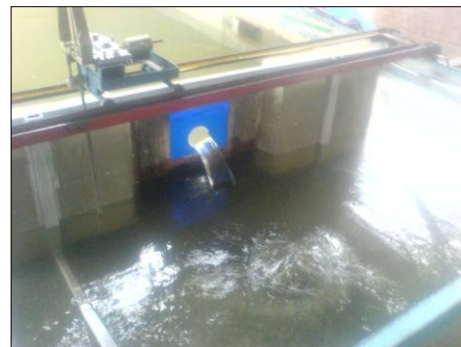
$$\phi = d_s = f(Q, Tw, \rho_w, g, H, d_{50}, \rho_s, \Delta h, R_H, A, t) \quad (1)$$

در همه آزمایش‌ها از یک نوع دانه‌بندی استفاده شد. مساحت هر سه روزنه یکسان بود (شدت حجمی جریان خود تابعی از ارتفاع آب پشت روزنه می‌باشد). تغییرات زمانی آبشستگی مورد بررسی قرار نگرفت و صرفاً به مقایسه نتایج در زمان‌های یکسان پرداخته شد. با انجام آنالیز ابعادی به‌روش باکینگهام ( $\pi$ )، پارامترهای بدون بعد زیر حاصل می‌شوند:

$$\frac{\phi}{\Delta h} = f\left(\frac{Tw}{\Delta h}, \frac{Q}{\sqrt{g \cdot \Delta h \cdot A}}, \frac{R_H}{\Delta h}, \frac{\rho_w}{\rho_s}, \frac{d_{50}}{\Delta h}, \frac{A}{(\Delta h)^2}\right) \quad (2)$$

با حذف  $A/d_{50}^2$  و  $\rho_w/\rho_s$  به‌دلیل ثابت بودن در آزمایش‌ها و ترکیب پارامترهای بی‌بعد موجود در رابطه (۲)، رابطه نهایی زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{\phi}{\Delta h} = f\left(\frac{Tw + ds}{\Delta h}, \frac{Fr Tw}{R_H}\right) \quad (3)$$



شکل ۲- شاخص بالادست روزنه

آنالیز ابعادی: در اینجا تنها به پارامترهای مؤثر بر فرایند آبشستگی موضعی پایین‌دست جت‌های ریزشی که در آزمایش‌های انجام شده، امکان بررسی و تغییر آن‌ها وجود داشت، اشاره می‌شود. این پارامترها به‌شرح زیر می‌باشند:

- پارامترهای مشخصه جریان: شدت حجمی جریان (Q)، عمق پایاب (Tw)، چگالی سیال ( $\rho_w$ )، شتاب ثقل زمین (g) و ارتفاع آب پشت روزنه (H).
- پارامترهای مشخصه ذرات بستر: اندازه مؤثر ذرات رسوب ( $d_{50}$ )، چگالی ذرات بستر ( $\rho_s$ ).
- پارامترهای مشخصه روزنه: ارتفاع ریزش جت آب از وسط مقطع روزنه تا سطح آب ( $\Delta h$ )، شکل

سپس با افزایش عمق پایاب به ۲۴/۸ سانتی‌متر، این اعداد به ترتیب به ۷/۷، ۱۱/۱ و ۱۲/۷ سانتی‌متر در سه دبی فوق، نزول پیدا کرده‌اند. نتایج مشابهی برای حداکثر عمق حفره آبشستگی ناشی از دو روزنه مربع و لوزی شکل نیز حاصل شده است که در نمودارها قابل ملاحظه می‌باشد.

برای دستیابی به یک حد معین از عمق بحرانی، از عدد بدون بعد  $\frac{Tw}{Tw + \Delta h}$  در نقطه بحرانی استفاده شده است. این نسبت برای روزنه دایره‌شکل در همه دبی‌ها ۰/۸ و برای دو روزنه دیگر ۰/۷ به دست آمد. در ادامه، با توجه به نتایج آنالیز ابعادی و پارامترهای بدون بعد حاصل شده، با بررسی شکل‌های مختلف معادله و با توجه به رگرسیون و میزان خطای این معادلات، بهترین و در عین حال ساده‌ترین شکل معادله به صورت زیر پیشنهاد شده است:

$$\frac{\varphi}{\Delta h} = a \left( Tw + ds / \Delta h \right)^b \left( Fr \cdot \left( Tw / R_H \right) \right)^c \quad (5)$$

ضرایب  $a$ ،  $b$  و  $c$  و  $d$  ثابت‌های تجربی می‌باشند که مقادیر آن‌ها برای روزنه‌های مختلف، در جداول زیر ارائه شده است. همچنین، شکل‌های مختلفی برای توان  $c$  در نظر گرفته شده است که در زیر مشاهده می‌شود. شکل چهارم رابطه (۵) به صورت رابطه (۶) می‌باشد.

$$\frac{\varphi}{\Delta h} = a \left( Fr \cdot Tw / R_H \right)^b \left( Tw + ds / \Delta h \right)^c \cdot \left( Tw + ds / \Delta h \right)^d \quad (6)$$

در جداول ۲، ۳ و ۴ ضرایب مربوط به هر روزنه به‌طور جداگانه، برای حالتی که  $\varphi$ ، نمایانگر حداکثر عمق حفره آبشستگی می‌باشد، محاسبه و ذکر شده است.

این ضرایب، با همین چهار شکل معادله، برای هر سه روزنه با هم نیز، به دست آمده است. درصد خطا در زیر، با توجه به معادله خطای بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی، محاسبه شده است:

$$Error = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_{observed} - X_{calculated}}{X_{observed}} \right| \quad (7)$$

که در آن،  $X_{observed}$  مقادیر مشاهداتی،  $X_{calculated}$  مقادیر محاسباتی و  $n$  نیز تعداد مقادیر می‌باشد.

که در آن،  $Fr$  عدد فرود جریان بوده و به صورت زیر تعریف شده است:

$$Fr = \frac{Q}{\sqrt{g \cdot \Delta h} \cdot A} = \frac{V_0}{\sqrt{g \cdot \Delta h}} \quad (4)$$

که در آن،  $V_0$  سرعت جریان در مقطع روزنه می‌باشد.

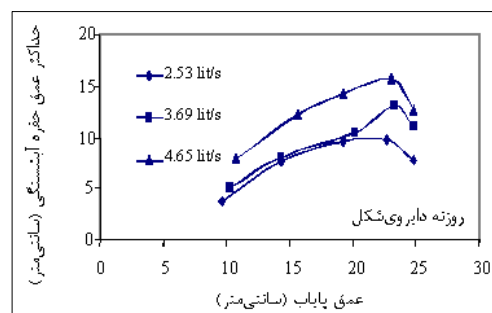
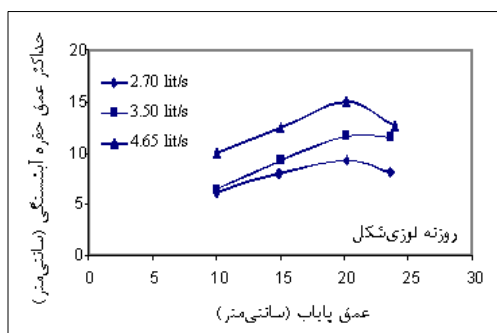
ابعاد حفره آبشستگی که در آزمایش‌ها اندازه‌گیری شده‌اند، شامل حداکثر عمق حفره آبشستگی ( $d_s$ )، حداکثر فاصله عرضی بین برآمدگی‌های اطراف حفره آبشستگی ( $W_s$ )، فاصله محل شروع آبشستگی تا حداکثر برآمدگی رسوبات پایین دست ( $L_s$ )، فاصله حداکثر برآمدگی رسوبات پایین دست تا انتها ( $L_m$ )، فاصله افقی محل شروع آبشستگی تا روزنه ( $L_{up}$ )، حداکثر ارتفاع برآمدگی رسوبات پایین دست ( $h_m$ ) و حجم کنده شده حفره آبشستگی ( $V$ ) می‌باشد.

### نتایج و بحث

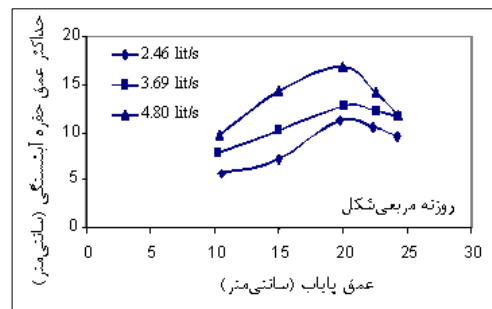
به‌طور کلی، ۴۲ آزمایش بر روی سه روزنه دایره، مربع و لوزی شکل با مساحت یکسان، هر روزنه با سه دبی متفاوت و هر دبی با چهار یا پنج عمق مختلف پایاب، انجام گرفت. مدت زمان هر آزمایش ۶۰ دقیقه بود (بعد از ۶۰ دقیقه تغییری در ابعاد حفره آبشستگی مشاهده نمی‌شد) و پس از پایان هر آزمایش، ابعاد حفره آبشستگی و نیز برآمدگی رسوبات پایین دست اندازه‌گیری شده و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در هر دبی، با افزایش عمق پایاب تا حد معینی، حداکثر عمق حفره آبشستگی افزایش یافته و پس از آن با افزایش بیشتر عمق پایاب، عمق حفره آبشستگی کاهش می‌یابد. این نتیجه در مورد هر سه روزنه و همه دبی‌ها، صادق بوده است. در شکل ۳، نمودارهایی از نتایج به دست آمده در مورد هر سه روزنه، ارائه شده است. همان‌طور که در نمودارها مشهود است، در آزمایش‌هایی که بر روی روزنه دایره‌ای شکل، با سه دبی ۲/۵۳، ۳/۶۹ و ۴/۶۵ لیتر بر ثانیه، با افزودن عمق پایاب از حدود ۱۰ سانتی‌متر به ۲۳ سانتی‌متر، حداکثر عمق حفره آبشستگی برای هر دبی به ترتیب از ۳/۷، ۵ و ۷/۹ سانتی‌متر به ۹/۸، ۱۳/۱ و ۱۵/۷ سانتی‌متر افزایش پیدا کرده است.

جدول ۲- ضرایب معادله (۵) و میزان درصد خطا برای روزنه دایره‌ای شکل (عمق حفره)

فرم توان	a	b	c	d	R <sup>2</sup>	E (%)
C	۰/۱۸	۰/۲۹	۰/۷۹	-	۰/۹۸	۱۲/۰
C	۰/۴۶	۰/۶۹	۰/۰۱	-	۰/۹۴	۱۹/۳
c.(Tw + ds)/Δh	۰/۱۳	۰/۴۹	-۰/۱	-	۰/۹۹	۸/۳
(Tw + ds)/Δh <sup>c</sup>	۰/۱۱	۱/۰۹	-۰/۲	۰/۵۳	۰/۹۹	۸/۲



شکل ۳- منحنی‌های حداکثر عمق آبشستگی بر حسب عمق پایاب برای هر سه روزنه



بنابر جدول‌های ۲، ۳ و ۴، در حالتی که شکل توان به صورت  $b.(Tw + ds/\Delta h)^c$  باشد، معادله در همه روزنه‌ها، بیشترین ضریب تعیین و کمترین درصد خطا را دارد.

جدول ۳- ضرایب معادله (۵) و میزان درصد خطا برای روزنه مربع شکل (عمق حفره)

فرم توان	a	b	C	d	R <sup>2</sup>	E (%)
C	۰/۳۳	۰/۵۱	۰/۳۶	-	۰/۹۸	۹/۵
c.(Tw + ds)/Δh	۰/۵۱	۰/۷۴	۰/۰۱	-	۰/۹۵	۱۳/۱
(Tw + ds)/Δh <sup>c</sup>	۰/۱۴	۰/۹۴	-۰/۵	-	۰/۹۹	۵/۸
b.(Tw + ds)/Δh <sup>c</sup>	۰/۱۸	۰/۷۸	-۰/۴	۰/۸۲	۰/۹۹	۵/۲

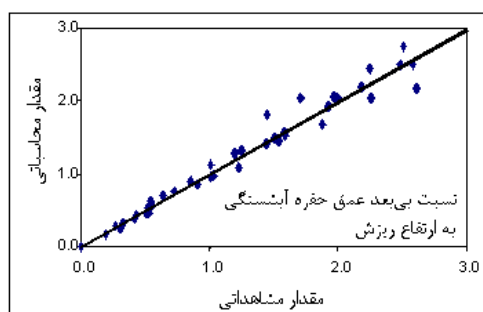
جدول ۴- ضرایب معادله (۵) و میزان درصد خطا برای روزنه لوزی شکل (عمق حفره)

فرم توان	a	b	C	d	R <sup>2</sup>	E (%)
C	۰/۲۳	۰/۳۷	۰/۵۶	-	۰/۹۹	۶/۰
c.(Tw + ds)/Δh	۰/۴۷	۰/۵۷	۰/۰۳	-	۰/۹۴	۱۴/۱
(Tw + ds)/Δh <sup>c</sup>	۰/۱۳	۰/۵۴	-۰/۲	-	۰/۹۹	۵/۴
b.(Tw + ds)/Δh <sup>c</sup>	۰/۱۴	۰/۹۰	-۰/۲	۰/۴۸	۰/۹۹	۵/۰

جدول ۵- ضرایب معادله (۷) و میزان درصد خطا برای هر سه روزنه با هم

ابعاد آبستتگی ( $\Phi$ )	a	b	c	D	$R^2$	E (%)
$d_s$	۰/۱۴	۰/۹۱	-۰/۴۴	۰/۹۲	۰/۹۷۰	۷/۴
$L_s$	۱/۶۳	۰/۴۲	۰/۳۰	۰/۰۷	۰/۹۸۵	۷/۳
$W_s$	۲/۱۳	۰/۰۹	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۹۹۲	۴/۱
$h_m$	۰/۱۷	۰/۷۱	۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۹۵۳	۱۰/۵
$L_m$	۱/۱۹	-۰/۵	-۰/۷	۰/۵۰	۰/۷۳۶	۱۹/۳
$L_{up}$	۰/۴۸	۰/۶۷	۰/۲۰	-۰/۱	۰/۹۷۰	۱۱/۱

برای دبی‌های مشابه بین هر سه روزنه برابر با ۰/۷۲ به دست آمده است.



شکل ۴- مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی نسبت بی بعد عمق حفره آبستتگی به ارتفاع ریزش

این نسبت نمایانگر حد بحرانی عمق پایابی می‌باشد که در دبی ثابت به ازای آن، عمق آبستتگی به حداکثر خود رسیده و پس از آن کاهش می‌یابد. این نسبت به‌طور جداگانه و بدون میانگین‌گیری، برای روزنه دایره‌شکل در همه دبی‌ها ۰/۸ و برای دو روزنه دیگر در همه دبی‌ها ۰/۷ به دست آمده است.

نسبت ابعاد آبستتگی به ارتفاع ریزش جریان  $\rho/\Delta h$ ، تابعی از پارامترهای بی بعد  $(Tw + ds)/\Delta h$  و  $Fr$  که عدد فرود جریان،  $R_H$  شعاع هیدرولیکی و  $Tw$  عمق پایاب می‌باشد.

همه ضرایب به دست آمده در مورد حداکثر عمق حفره آبستتگی، طی مراحل مشابهی برای دیگر ابعاد حفره آبستتگی نیز، محاسبه شده‌اند، بدین ترتیب از رابطه (۷)، برای ابعاد مختلف آبستتگی استفاده شد که ضرایب آن برای هر سه روزنه با هم در جدول ۵ آمده است.

در ضمن قابل ذکر است که فرم اول معادله نیز در حین سادگی، به علت رگرسیون و درصد خطای مناسب، قابل استفاده می‌باشد.

$$\frac{\varphi}{\Delta h} = a \left( \frac{Fr Tw}{R_H} \right)^b \left( \frac{Tw + ds}{\Delta h} \right)^c \left( \frac{Tw + ds}{\Delta h} \right)^d \quad (8)$$

در شکل ۴ به‌طور نمونه، مقادیر مشاهداتی و محاسباتی نسبت بی بعد عمق حفره آبستتگی به ارتفاع ریزش با هم مقایسه شده‌اند. با توجه به نمودار می‌توان گفت که رابطه پیشنهادی تطابق خوبی با مقادیر مشاهداتی عمق حفره آبستتگی داشته است.

خلاصه نتایج مطالعه آزمایشگاهی صورت گرفته درباره تأثیر عمق پایاب بر آبستتگی موضعی پایین دست جت‌های ریزشی به‌صورت زیر می‌باشد: حداکثر عمق آبستتگی، با افزایش عمق پایاب تا حد معینی افزایش یافته و پس از آن، با افزایش بیشتر عمق پایاب کاهش می‌یابد. میانگین نسبت بحرانی

#### منابع مورد استفاده

1. Abt, S.R., P.L. Thompson and M.L. Todd. 1997. Enhancement of the culvert outlet scours estimation equation. Transportation Research Record, 1523, Transportation Research Board, Washington, D.C., Pages 178-185.
2. Blaisdell, F.W. and C.L. Anderson. 1988a. A comprehensive generalized study of scour at cantilevered pipe outlets, I: Background. Journal of Hydraulic Research, 26(4): 357-376.
3. Blaisdell, F.W. and C.L. Anderson. 1988b. A comprehensive generalized study of scour at cantilevered pipe outlets, II: Results. Journal of Hydraulic Research, 26(5): 509-524.
4. Dey, S. and R.V. Raikar. 2007. Scour below a high vertical drop. Journal of Hydraulic Engineering, (5)133: 564-568.
5. Doehring, F.K. and S.R. Abt. 1994. Drop height influence on outlet scour. Journal of Hydraulic Engineering, 120(12): 1470-1476.

6. Ervine, A. and H.T. Falvey. 1987. Behavior of turbulent water jets in the atmosphere and in plunge pools. ICE Proceedings, Institution of Civil Engineers, 2(83): 295-314.
7. Ghodsian M., M. Mehraein and H.R. Ranjbar. 2012. Local scour due to free fall jets in non-uniform sediment. Scientia Iranica, 19(6): 1437-1444.
8. Moosavi, J.H. and N.H. Helalat. 2007. Experimental study on height of jet on hole scour downstream of box and circular orifices. 3rd National Congress on Civil Engineering, Tabriz-Iran (in Persian).

## Determination of critical tail water depth of local scour in the downstream of overflow

Mojtaba Saneie<sup>\*1</sup>, Hoda Hadidi<sup>2</sup> and Mohammad Ali Bani Hashemi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Iran, <sup>2</sup> MSc Student, Faculty of Engineering and Technology, Tehran University, Iran and <sup>3</sup> Associate Professor, Faculty of Engineering and Technology, Tehran University, Iran

Received: 21 April 2013

Accepted: 21 October 2013

### Abstract

Investigating local scour phenomena due to jet flow on downstream of hydraulic structure is an important and necessary issue. In this article, the results of a laboratory study about the impact of tail water depth on local scour below of jet flow are provided. Circular, square and rhombus sections with a water jet from a hole, and, with a discharge of 2.46 to 4.8 liters per second, on a medium material bed of  $d_{50}$  of three mm made of sand, with tail water depth ranged from 10 to 24.8 cm, for 60 minutes, was simulated. The dimensions of scour holes were measured and analyzed. Results demonstrated that the maximum scour depth, with increased tail water depth to a certain extent, increased, and then, tail water will be reduced with more depth. It also became clear that the dimensions of scour holes with the following parameters of  $T_w + ds/\Delta h$ ,  $(v_0/\sqrt{g \cdot \Delta h}) \times (T_w/R_H)$  and their relation with power. Finally, the dimensional relationships for the estimation of scour depth of discharge and the tail water variety have been proposed.

**Key words:** Bed erosion, Experimental study, Free fall flow, Orifice, Tail water depth

---

\* Corresponding author: mojtbasaneie@yahoo.com