

# بررسی آزمایشگاهی رابطه بین ابعاد حفره آبشستگی موضعی پایین دست جت‌های ریزشی و حجم آن

هدی حدیدی<sup>۱</sup>، مجتبی صانعی<sup>۲</sup>، محمد علی بنی هاشمی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی دانشکده عمران - پردیس دانشکده فنی - دانشگاه تهران

۲- استادیار پژوهشی مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری - Mojtabasaneie@yahoo.com

۳- استادیار دانشکده عمران - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

hh\_hadidi@yahoo.com

## خلاصه

در این مقاله، نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی درباره رابطه ابعاد آبشستگی موضعی پایین دست جت‌های ریزشی با حجم آن، ارائه می‌شود. جت آب از روزنه‌هایی با مقاطع دایره، مربع و لوزی شکل، با مساحت‌های یکسان و دبی‌های مختلف در محدوده ۲/۴۶ تا ۴/۸ لیتر بر ثانیه، از ارتفاع ۲۹ سانتیمتری، بر روی بستری از جنس شن با  $d_{50}$  برابر ۳ میلی‌متر، با عمق‌های پایاب متفاوت در محدوده ۱۰ تا ۲۴/۸ سانتیمتر، به مدت ۶۰ دقیقه، ریزش می‌نمود. مشخص شد که حجم حفره آبشستگی حدود ۲۰٪ ضرب طول، عرض و عمق حفره بوده و با افزایش دبی در عمق پایاب ثابت، افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: آبشستگی موضعی، حجم حفره، جت‌های ریزشی، مدل آزمایشگاهی

## مقدمه

آبشستگی، پدیده بسیار مهمی می‌باشد که تعاریف بسیاری برای آن مطرح شده 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 سازه های هیدرولیکی توسط جت‌های ریزشی، می‌باشد. آبشستگی حاصل از جریان خروجی از تخلیه کننده‌های تحت فشار روی بدنه یا کناره سدها، جت‌های ایجاد شده توسط سرریزهای روزنه ای (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 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 اینکه تجمع مواد فرسایش یافته می‌تواند با تغییر رقوم پایاب بر عملکرد خروجی سازه تاثیر بگذارد. بررسی و مطالعه پدیده آبشستگی به دلیل پیچیدگی شرایط حاکم بر این پدیده، عمده‌تاً توسط روش تحلیل ابعادی به همراه مدل فیزیکی و در برخی موارد به صورت ریاضی و نظری صورت گرفته است. مطالعات متعددی در مورد هندسه آبشستگی در محل فرود جت‌های پرتابی [۳-۱] و هندسه آبشستگی در پایین دست سرریز ریزشی آزاد [۹-۴]، صورت گرفته است. بررسی‌های آزمایشگاهی درباره تاثیر ارتفاع ریزش بر آبشستگی پایین دست جت‌های دایره ای و جعبه ای [۱۰] و نیز تاثیر هندسه جت بر آبشستگی پایین دست [۱۱] انجام شده است. حجم حفره آبشستگی و ارتباط آن با ابعاد حفره، به عنوان یکی از پارامترهای مهم در پدیده آبشستگی، لزوم بررسی آزمایشگاهی این موضوع را موجب شده است. 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. رابطه ابعاد حفره آبشستگی با حجم آن، به دست آمد. سپس با استفاده از آنالیز ابعادی، پارامترهای بدون بعد مؤثر بر پدیده، استخراج شده و در انتها معادلاتی برای برآورد حجم حفره آبشستگی ارائه شده است.

## مواد و روش‌ها

وسایل آزمایشگاهی، شامل یک حوضچه رسوب بود که جت آب توسط روزنه‌ای که در انتهای یک فلوم آزمایشگاهی نصب شده بود، به درون آن تخلیه می‌شد. حوضچه رسوب ۱/۵ متر طول، ۱/۵ متر عرض و ۰/۷ متر عمق داشت، به طوری که آبشستگی درون آن تحت تاثیر دیواره‌های کناری قرار نمی‌گرفت. روزنه‌ها از جنس پلکسی گلاس و با مقاطع دایره ای، مربعی و لوزی شکل ساخته شدند. مساحت مقطع همه روزنه ها یکسان بوده است. ارتفاع آب در پشت روزنه، توسط دریچه ای که در کنار فلوم، نصب شده بود، تنظیم می‌شد. عمق پایاب نیز توسط دریچه ای لولایی در پایین دست حوضچه

رسوب، تنظیم می‌شد. دبی عبوری از روزنه‌ها، توسط سرریز لبه تیز مثلثی در پایین‌دست، تعیین می‌شد. 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 گرفتند. این مدت زمان به این دلیل انتخاب شد که، در همه آزمایش‌ها پس از حداکثر زمان ۴۵ دقیقه، تغییر در کلیه 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 ۳ میلی‌متر، به عنوان 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 می‌شد. برای تأمین پایاب، آب توسط پمپی از پایین‌دست، به آرامی وارد حوضچه رسوب می‌شد. به منظور 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 بودند، به طور دستی حرکت می‌کرد و مختصات هر نقطه را در سه جهت، در اختیار قرار می‌داد. تراز آب پشت روزنه نیز، توسط شاخص مدرج دیگری، کنترل می‌شد. خلاصه مشخصات مقطع روزنه‌ها، در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- خلاصه مشخصات روزنه‌ها و دبی‌ها

شکل روزنه	مساحت مقطع روزنه (cm <sup>2</sup> )	شعاع هیدرولیکی (cm)	دبی (lit/s)
دایره به قطر ۸/۰۰ سانتیمتر	۵۰/۶۲۵	۲/۰۰	۲/۵۳,۳/۶۹,۴/۶۵
مربع به ضلع ۷/۰۹ سانتیمتر	۵۰/۶۲۵	۱/۷۸	۲/۴۶,۳/۶۹,۴/۸۰
لوزی با اقطار ۱۰/۰۳ سانتیمتر	۵۰/۶۲۵	۱/۷۸	۲/۷۰,۳/۵۰,۴/۶۵

#### آنالیز ابعادی

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

- پارامترهای مشخصه جریان: شدت حجمی جریان (Q)، عمق پایاب (T<sub>w</sub>)، چگالی سیال (ρ<sub>w</sub>)، شتاب ثقل زمین (g) و ارتفاع آب پشت روزنه (H).
- پارامترهای مشخصه ذرات بستر: اندازه مؤثر ذرات رسوب (d<sub>50</sub>)، چگالی ذرات بستر (ρ<sub>s</sub>).
- پارامترهای مشخصه روزنه: ارتفاع ریزش جت آب از وسط مقطع روزنه تا سطح آب (Δh)، شکل روزنه، شعاع هیدرولیکی روزنه (R<sub>H</sub>) و مساحت روزنه (A).
- پارامتر زمان (t).

بدین ترتیب اگر،  $\phi$  نشانگر ابعاد حفره آبشستگی باشد، آنگاه:

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

برخی از پارامترهای ذکر شده در فوق، به دلایل زیر، قابل صرفنظر کردن می‌باشند:

$d_{50}$ ، زیرا در همه آزمایش‌ها از یک نوع دانه‌بندی استفاده شده است. A، زیرا مساحت هر سه روزنه یکسان بوده است. H، زیرا Q خود تابعی از آن می‌باشد. t، زیرا تغییرات زمانی آبشستگی مورد بررسی قرار نگرفته است و صرفاً به مقایسه نتایج در زمان‌های یکسان پرداخته شده است. بنابراین رابطه (1) به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\phi = f(Q, T_w, \rho_w, g, \rho_s, \Delta h, R_H) \quad (2)$$

با انجام آنالیز ابعادی به روش باکینگهام (π) بر روی رابطه (2)، پارامترهای بدون بعد زیر حاصل می‌شوند:

$$\frac{\phi}{\Delta h} = f\left(\frac{T_w}{\Delta h}, \frac{Q}{\sqrt{g \cdot \Delta h} \cdot A}, \frac{R_H}{\Delta h}, \frac{\rho_w}{\rho_s}\right) \quad (3)$$

با حذف  $\frac{\rho_w}{\rho_s}$  به دلیل ثابت بودن در آزمایش‌ها، و ترکیب پارامترهای بی بعد موجود در رابطه (3)، رابطه نهایی زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{\phi}{\Delta h} = f\left(\frac{T_w + ds}{\Delta h}, \frac{Fr \cdot T_w}{R_H}\right) \quad (4)$$

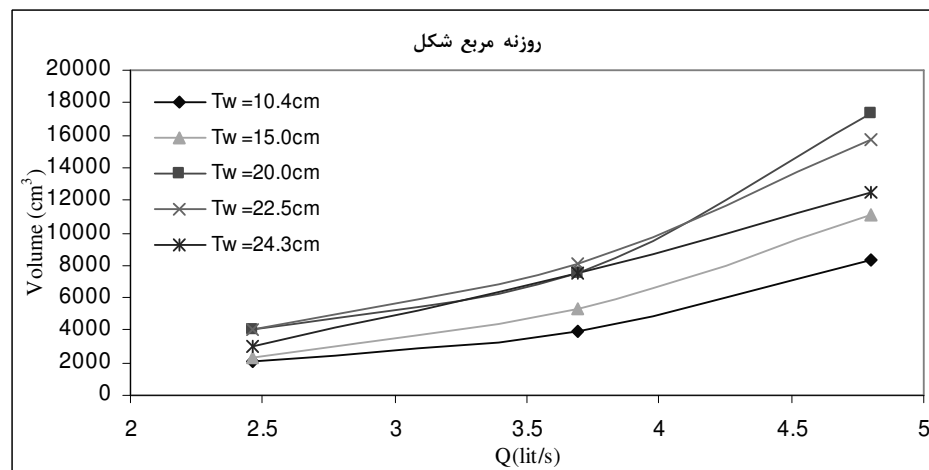
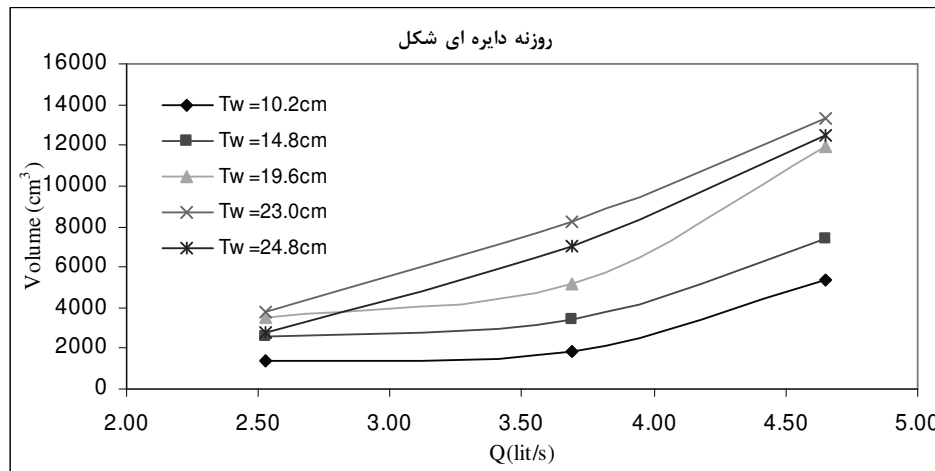
که در آن Fr، عدد فرود جریان بوده و به صورت زیر تعریف شده است:

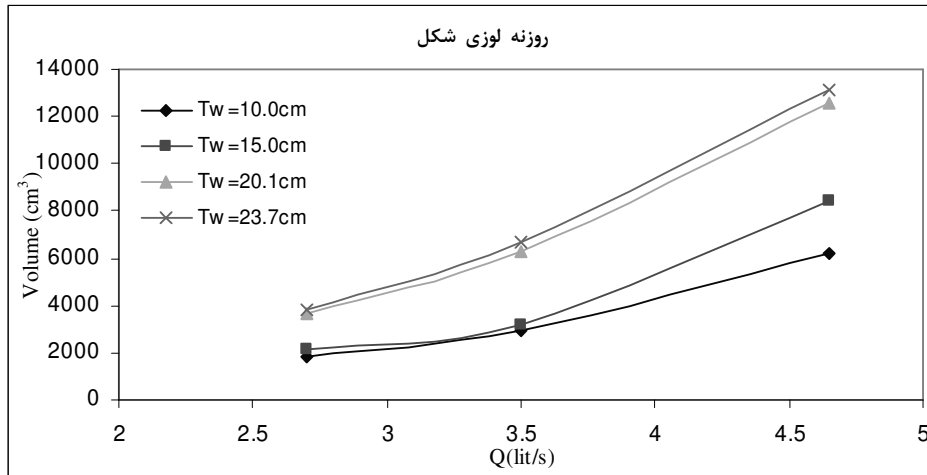
$$Fr = \frac{Q}{\sqrt{g \cdot \Delta h} \cdot A} = \frac{V_0}{\sqrt{g \cdot \Delta h}} \quad (5)$$

که در آن  $V_0$ ، سرعت جریان در مقطع روزنه می‌باشد. ابعاد حفره آبستنگی که در آزمایش‌ها اندازه‌گیری شده‌اند، عبارتند از: حداکثر عمق حفره آبستنگی (ds)، حداکثر فاصله عرضی بین برآمدگی‌های اطراف حفره آبستنگی (Ws)، فاصله محل شروع آبستنگی تا حداکثر برآمدگی رسوبات پایین-دست (Ls) و حجم کنده شده حفره آبستنگی (Volume). حجم کنده شده حفره آبستنگی، با استفاده از نرم‌افزار Surfer به دست آمده است. به این ترتیب که، برای هر آزمایش انجام شده، مختصات قرائت شده نقاط در سه جهت طول، عرض و عمق، وارد نرم‌افزار مذکور شده و با مشخص نمودن تراز سطح بستر در آزمایش مربوطه، حجم جابجا شده در انتهای آبستنگی، از این نرم‌افزار دریافت می‌شود. این برنامه، احجام کنده شده یا پر شده حفره را در اختیار قرار می‌دهد، که در آزمایش‌های انجام شده به این علت که همان حجمی که از بستر کنده شده است، در پایین‌دست و اطراف حفره به صورت برآمدگی تشکیل شده است، این احجام با یکدیگر مساوی می‌باشند.

### تحلیل نتایج آزمایشگاهی

به طور کلی، ۴۲ آزمایش بر روی سه روزنه دایره، مربع و لوزی شکل با مساحت‌های یکسان، هر کدام با سه دبی متفاوت و هر دبی با ۴ یا ۵ عمق مختلف پایاب، انجام گرفت. مدت زمان هر آزمایش ۶۰ دقیقه بوده و پس از پایان هر آزمایش، ابعاد حفره آبستنگی و نیز برآمدگی رسوبات پایین‌دست اندازه‌گیری شده و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. با توجه به هدف انجام آزمایش‌ها در اینجا، که بررسی حجم حفره آبستنگی و ارتباط آن با ابعاد حفره می‌باشد، می‌توان ذکر نمود که در هر عمق پایاب ثابت، با ثابت بودن فاصله مرکز روزنه تا سطح بستر، با افزایش دبی حجم حفره آبستنگی افزایش یافته است. این نتیجه در مورد هر سه روزنه، صادق بوده است. شکل ۱، تغییرات حجم حفره آبستنگی را با افزایش دبی در عمق پایاب ثابت، برای هر سه روزنه نشان می‌دهد.





شکل ۱- تأثیر دبی بر حجم حفره آبشستگی در عمق پایاب ثابت برای هر سه روزنه

با توجه به نمودارها به طور مثال برای روزنه دایره‌ای شکل مشاهده می‌شود که، در عمق پایاب ۱۰ سانتیمتر، با افزایش دبی از ۲/۵۳ به ۳/۶۹ و سپس ۴/۶۵ لیتر بر ثانیه، حجم حفره آبشستگی به ترتیب از ۱۴۲۳/۹۱ به ۱۸۰۸/۵۶ و سپس به ۵۳۱۸/۸۶ سانتیمتر مکعب رسیده است. به همین ترتیب در بقیه نمودارها نیز، روند صعودی حجم حفره آبشستگی با افزایش دبی مشهود می‌باشد.

نتیجه دیگری که از آزمایش‌ها به دست آمده است، رابطه بین ابعاد حفره آبشستگی و حجم آن می‌باشد. برای رسیدن به رابطه‌هایی که بتوانند پاسخگوی تمامی شرایط برقرار شده در حین آزمایش‌ها باشند، مطابقت این روابط با داده‌های مشاهده شده و در عین حال سادگی روابط در نظر گرفته شده است.

در اینجا ابتدا به بیان این روابط برای هر روزنه به تنهایی و سپس برای هر سه روزنه با هم، پرداخته شده است. برای روزنه دایره‌ای شکل، بین حجم جابجا شده حفره آبشستگی و ضرب ابعاد آن، رابطه‌های زیر برقرار می‌باشد:

$$Volume = 0.1963(Ws.ds.Ls) + 142.56, R^2 = 0.9786 \quad (6)$$

$$Volume = 0.5881(Ws.ds.Ls)^{0.890}, R^2 = 0.9703 \quad (7)$$

این روابط در محدوده  $35 \leq Ws \leq 57cm, 3.7 \leq ds \leq 15.7cm, 37 \leq Ls \leq 84cm$  برقرار می‌باشند. برای روزنه مربع شکل نیز داریم:

$$Volume = 0.2320(Ws.ds.Ls) - 713.63, R^2 = 0.9684 \quad (8)$$

$$Volume = 0.1731(Ws.ds.Ls)^{1.0172}, R^2 = 0.9582 \quad (9)$$

این روابط در محدوده  $38.5 \leq Ws \leq 56cm, 5.7 \leq ds \leq 16.9cm, 36.5 \leq Ls \leq 86cm$  برقرار می‌باشند. و در آخر برای روزنه لوزی شکل، روابط زیر برقرار می‌باشد:

$$Volume = 0.2185(Ws.ds.Ls) - 319.03, R^2 = 0.9637 \quad (10)$$

$$Volume = 0.2126(Ws.ds.Ls)^{0.9964}, R^2 = 0.9676 \quad (11)$$

این روابط نیز، در محدوده  $40 \leq Ws \leq 55cm, 6.1 \leq ds \leq 15cm, 34 \leq Ls \leq 77cm$  صحت دارند.

اگر نتایج هر سه روزنه با هم در نظر گرفته شود، روابطی با رگرسیون‌های مطلوب به شرح زیر حاصل می‌شود که در محدوده ابعاد ذکر شده در بالا قابل استناد می‌باشند:

$$Volume = 0.2161(Ws.ds.Ls) - 285.98, R^2 = 0.9654 \quad (12)$$

$$Volume = 0.3097(Ws.ds.Ls)^{0.9599}, R^2 = 0.9630 \quad (13)$$

همانطور که مشاهده می‌شود، طبق روابط بالا، حجم کنده شده حفره آبشستگی، حدود ۲۰٪ ضرب طول، عرض و عمق حفره، می‌باشد. در انتها، روابط بدون بعد حجم حفره آبشستگی با پارامترهای بدون بعد حاصل شده در قسمت آنالیز ابعادی، ارائه شده است. به این منظور، حجم حفره آبشستگی با تقسیم کردن آن بر توان سوم ارتفاع ریزش  $(\Delta h)^3$ ، بدون بعد شده است. نتایج به دست آمده در جداول ۲ و ۳، آمده است.

جدول ۲- روابط بدون بعد حجم حفره آبستگي

نوع روزنه	رابطه بدون بعد با پارامتر اول
دایره‌ای شکل	$\frac{Volume}{(\Delta h)^3} = 0.4514 \left( \frac{Tw + ds}{\Delta h} \right)^{2.4330}, R^2 = 0.9670$
مربع شکل	$\frac{Volume}{(\Delta h)^3} = 0.5442 \left( \frac{Tw + ds}{\Delta h} \right)^{2.3506}, R^2 = 0.9363$
لوزی شکل	$\frac{Volume}{(\Delta h)^3} = 0.4510 \left( \frac{Tw + ds}{\Delta h} \right)^{2.4100}, R^2 = 0.9519$
هر سه روزنه با هم	$\frac{Volume}{(\Delta h)^3} = 0.4769 \left( \frac{Tw + ds}{\Delta h} \right)^{2.4069}, R^2 = 0.9535$

جدول ۳- روابط بدون بعد حجم حفره آبستگي

نوع روزنه	رابطه بدون بعد با پارامتر دوم
دایره‌ای شکل	$\frac{Volume}{(\Delta h)^3} = 0.0180 \left( Fr \cdot \frac{Tw}{R_H} \right)^{3.1795}, R^2 = 0.9689$
مربع شکل	$\frac{Volume}{(\Delta h)^3} = 0.0248 \left( Fr \cdot \frac{Tw}{R_H} \right)^{2.8781}, R^2 = 0.9756$
لوزی شکل	$\frac{Volume}{(\Delta h)^3} = 0.0166 \left( Fr \cdot \frac{Tw}{R_H} \right)^{2.9463}, R^2 = 0.9719$
هر سه روزنه با هم	$\frac{Volume}{(\Delta h)^3} = 0.0193 \left( Fr \cdot \frac{Tw}{R_H} \right)^{3.0122}, R^2 = 0.9593$

در روابط بالا، منظور از عدد فرود،  $\frac{V_0}{\sqrt{g \cdot \Delta h}}$  می‌باشد، که در قسمت آنالیز ابعادی به آن اشاره شده است. با توجه به رگرسیون‌های به‌دست آمده در بالا،

می‌توان نتیجه گرفت که روابط ارائه شده مطابقت خوبی با مقادیر مشاهده شده دارند.

#### نتیجه گیری

خلاصه نتایج مطالعه آزمایشگاهی صورت گرفته درباره بررسی حجم حفره آبستگي موضعی پایین‌دست جت‌های ریزشی و ارتباط آن با ابعاد حفره، بصورت زیر می‌باشد:

۱. حجم حفره آبستگي با افزایش دبی در عمق پایاب ثابت، برای هر سه روزنه افزایش یافته است.
۲. با توجه به روابط به‌دست آمده بین حجم حفره آبستگي و ابعاد آن در این آزمایش‌ها، نتیجه شده است که حجم جایجا شده حفره حدود ۲۰٪ ضرب طول، عرض و عمق حفره آبستگي می‌باشد.
۳. حجم بدون بعد شده حفره آبستگي نسبت به توان سوم ارتفاع ریزش، رابطه توانی با پارامترهای بدون بعد  $\frac{Fr \cdot Tw}{R_H}$ ،  $\frac{Tw + ds}{\Delta h}$  دارد، که عدد فرود جریان،  $R_H$  شعاع هیدرولیکی و  $T_w$  عمق پایاب می‌باشد.

## مراجع

1. Breusers H.N.C, Raudkivi A.J., 1991, "Scouring Hydraulic Structures Design Manual", IAHR, A.A. Balkema, The Netherlands, pp.143.
  2. Mason, P.J., Arumugam, K., 1985, "Free Jet Scour below Dams and Flip Buckets", ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 111, No. 2, pp. 220-235.
  3. Chian Min Wu, 1973, "Scour at downstream end of dams in Taiwan", Proc.IAHR Symp. On river mechanics, Bangkok, paper A13.
  4. Afify, M. and Gilberto E. Uvroz, (1994), "Plunge-Pool Scour by Inclined jets", Hydraulic Engineering 94-, 1040-1044.
  5. Amanian, N., (1993), "Scour below a flipbucket spillway", PHD dissertation, Civil and Environmental Engineering, Utah state university Logan, Utah.
  6. Bormann, N.E. and Julien, P.Y., (1991), "Scour downstream of grade-control structures", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 5, pp. 579-594.
  7. Breusers, H.N.C. Westrich, B., (1979), "Flow field Scouring effect of steady and pulsating jets impinging on a movable bed", Journal of Hydraulic Research, Vol. 17, No. 3, pp. 175-192.
  8. Locher, F.A. and S.T. Hsu, (1984), "Energy dissipation at high dams-in Development in Hydraulic Engineering, Vol. 2, P. Novak (Ed.), London, Elsevier Applied Science.
  9. Stein, O.R., & Julien, P.Y. and C.V. Alonso, (1993), "Mechanics of jet scour downstream of a head-cut", Journal of Hydraulic Research, Vol. 31, No. 6, pp. 723-737.
۱۰. موسوی جهرمی، ح. و هلالات ناصریان، ح.، (۱۳۸۶). " بررسی آزمایشگاهی تأثیر ارتفاع ریزش بر آبشستگی پایین دست جت های دایره ای و جعبه ای "، سومین کنگره ملی مهندسی عمران.
۱۱. موسوی جهرمی، ح. و هلالات ناصریان، ح.، (۱۳۸۵). " بررسی تأثیر هندسه جت بر آبشستگی پایین دست با استفاده از مدل های فیزیکی "، مجموعه مقالات هفتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.