

# مطالعه آزمایشگاهی میزان آبشستگی ناشی از برخورد

## جت‌های مستغرق و ریزشی

محمدرضا پیرستانی<sup>i</sup>، مهدی رضازاده<sup>ii</sup>، مهرداد کاویانی<sup>iii</sup>

### چکیده

میزان آبشستگی بستر قابل فرسایش و توسعه آن در اثر برخورد جت‌ها توجه بسیاری از مهندسين هیدرولیک را به خود جلب کرده است. در این پژوهش، تغییرات بستر پایین دست یک جت در دو حالت مستغرق و ریزشی و با اعمال تغییرات دبی مورد بررسی قرار می‌گیرد. خروجی کالورت در حالت مستغرق دقیقاً مماس بر سطح مصالح بستر و در حالت غیرمستغرق ۴۶ سانتیمتر از سطح مصالح بستر متحرک فاصله دارد. جت‌ها در هر دو حالت زاویه‌ی ۱۰ درجه با افق می‌سازند. نتایج حاصله مؤید این واقعیت بود که در دقایق نخست آزمایش تغییرات ابعاد آبشستگی بسیار شدید است، اما با گذشت زمان، از شدت آن در هر دو حالت مستغرق و غیر مستغرق کاسته می‌شود. بطوریکه در حالت مستغرق نزدیک به ۸۰٪ از عمق نهایی حفره در ۵ دقیقه اول رخ می‌دهد و این میزان در حالت غیرمستغرق حدوداً ۷۰٪ خواهد بود.

**کلمات کلیدی:** آبشستگی، کالورت، جت مستغرق، جت ریزشی.

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۷/۲۵

تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۲/۱۰

<sup>i</sup> استادیار گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی - تهران جنوب، [mrpirestani@azad.ac.ir](mailto:mrpirestani@azad.ac.ir)

<sup>ii</sup> کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه آزاد اسلامی - تهران جنوب، [st\\_m\\_rezazadeh@azad.ac.ir](mailto:st_m_rezazadeh@azad.ac.ir)

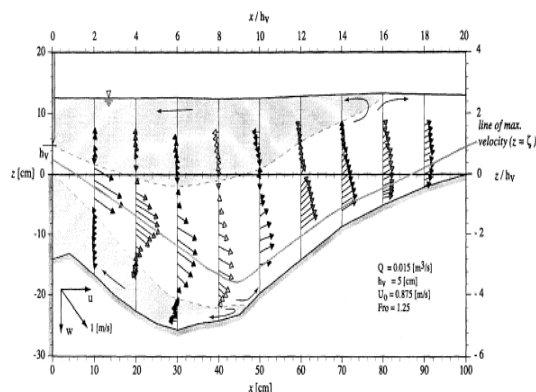
<sup>iii</sup> کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه آزاد اسلامی - تهران جنوب، [st\\_m\\_kaviani@azad.ac.ir](mailto:st_m_kaviani@azad.ac.ir)

### ۱- مقدمه

نگرانی‌هایی است که مهندسين هیدرولیک را بر آن داشت تا توجه بیشتری به این پدیده پویا و پیچیده نمایند. برخی از محققین نظیر بروسرز (۱۹۶۶) فرایند آبشستگی را به چهار مرحله ابتدایی، توسعه، تثبیت و تعادل تقسیم کرده‌اند. در مرحله ابتدایی ظرفیت فرسایش بسیار بالاست. در مرحله توسعه گرچه تغییرات عمق حفره قابل ملاحظه است اما ابعاد حفره آبشستگی تغییرات محسوسی ندارد. در مرحله تثبیت نرخ رشد حداکثر حفره آبشستگی

مطالعات گسترده در زمینه شناخت رفتار بستر پایین دست انواع سازه‌های هیدرولیکی نظیر سرریزها، کالورتها، جت‌های ریزشی و ... علاوه بر نمایان ساختن اهمیت رخداد آبشستگی در بین مهندسين هیدرولیک، نشان از پیچیدگی این پدیده و عوامل موثر بر آن دارد. تغییرات زیست محیطی، تغییر در عمق پایاب در اثر تجمع مواد رسوبی، ناپایداری کف رودخانه و شیب کناره‌های آن و خطر ناپایداری سازه‌های هیدرولیکی از طریق افزایش میزان تراوش از زیر آنها، بخشی از

شایان ذکر است که بیشتر تحقیقات صورت گرفته در رابطه با پدیده آبشستگی، مدلسازی شرایط جت‌های ریزشی بوده‌است و مطالعات کمتری در خصوص شرایط مستغرق انجام شده‌است. لذا در این پژوهش ضمن برقراری شرایط جت ریزشی، مدلسازی کالورت مستغرق نیز انجام پذیرفته تا از این طریق مقایسه‌ای بین توسعه زمانی ابعاد آبشستگی در این دو حالت صورت گیرد.



شکل ۱: توزیع سرعت متوسط در جت دیواره ای مستغرق (کورنیاوان)

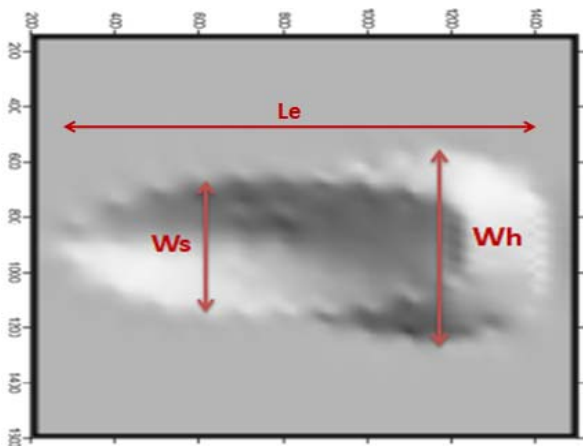
## ۲- مشخصات مدل آزمایشگاهی

تجهیزات آزمایشگاهی شامل یک فلوم مستقیم به ابعاد  $0.55 \times 0.5 \times 2$  (متر) که در انتهای آن لوله‌ای زاویه‌دار با مقطع دایره‌ای به قطر ۴ سانتیمتر و از جنس پی وی سی با زاویه‌ی ۱۰ درجه نسبت به افق به عنوان کالورت، که در حالت مستغرق، تماس بر مصالح بستر و در حالت غیرمستغرق جریان را از ارتفاع ۴۶ سانتی متری به درون حوضچه رسوبی به ابعاد  $1/17 \times 1/5 \times 2$  (متر) هدایت می‌کند. به منظور مشاهده نحوه شکل‌گیری آبشستگی، دیواره‌های حوضچه از جنس شیشه ساخته شد. مصالح بستر مورد استفاده در این پژوهش از جنس سیلیس با قطر متوسط ذرات،  $d_{50}$  معادل با  $1/27$  میلی‌متر، و انحراف معیار هندسی  $[\sigma = \sqrt{d_{84}/d_{16}}]$  برابر با  $1/1$  و وزن مخصوص  $S_{\gamma}$  برابر با  $2/65$  گرم بر سانتیمتر مکعب بوده است. قبل از شروع هر آزمایش مصالح بستر بدقت صاف و هم‌تراز می‌شد. در تمام آزمایشات ارتفاع پایاب ثابت و برابر با ۱۶ سانتیمتر در نظر گرفته شد. به‌منظور ثابت ماندن

کاهش یافته و در مرحله تعادل ابعاد حفره آبشستگی تقریباً بدون تغییر خواهد ماند.

محققین بسیاری نظیر موسوی جهرمی و ناصریان (۱۳۸۶)، صانعی (۱۳۸۷)، قدسیان و همکاران (۱۳۸۷) آبشستگی را در حالت تعادل مورد بررسی قرار داده‌اند ولی به توسعه زمانی ابعاد هندسی آبشستگی کمتر توجه شده است. محققینی نظیر قدسیان و همکاران (۱۳۸۵)، صانعی و علی حسینی (۱۳۸۷)، پیرستانی و مهدوی‌زاده (۱۳۸۸)، راجاراتنام (۱۹۸۱)، بلیزدل و اندرسون (۱۹۸۸)، ماسورک و احسان (۲۰۰۵) در تحقیقات خود دریافتند بیشترین آبشستگی در دقایق اولیه رخ داده و نرخ رشد عمق حفره با گذشت زمان کاهش و به سمت صفر میل می‌کند، ایشان بر این نکته تاکید کرده‌اند که افزایش عمق حفره با گذشت زمان از تابعی لگاریتمی پیروی می‌کند. قدسیان و همکاران (۱۳۸۵) با تحقیق بر روی آن، به این نتیجه رسیدند که بالغ بر ۷۵٪ آبشستگی در ۸۰ دقیقه ابتدایی رخ داده و پس از آن نرخ رشد ابعاد حفره کاهش می‌آید. صانعی و همکاران (۱۳۸۷) نیز دریافتند که با گذشت زمان ابعاد پروفیل آبشستگی افزایش می‌یابد اما روند افزایشی آن در طول زمان رو به کاهش می‌گذارد. کورنیاوان و همکاران با تحقیقی بر روی جت دیواره‌ای مستغرق، توانستند توزیع سرعت متوسط در درون حفره آبشستگی ایجاد شده را به کمک دستگاه ADV ترسیم نمایند. شکل (۱) توزیع سرعت متوسط در این نوع جت را نمایش می‌دهد.

Rouse (1940) فرضیه تغییرات لگاریتمی عمق حفره نسبت به زمان را مطرح کرده است. Clark (1962) اعتقاد داشت که ۷۰٪ از تغییرات حفره در ثانیه‌های ابتدایی از شروع آزمایش شکل می‌گیرد. در سال ۱۹۹۳ سامر و همکاران از طریق رابطه‌ی  $d_s = d_{se} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right]$  که در آن  $d_{se}$  حداکثر عمق حفره آبشستگی در زمان تعادل (T) می‌باشد- ارتباط بین عمق حفره و زمان را نشان داد.



شکل ۴: پلان حفره و تپه آبستکی

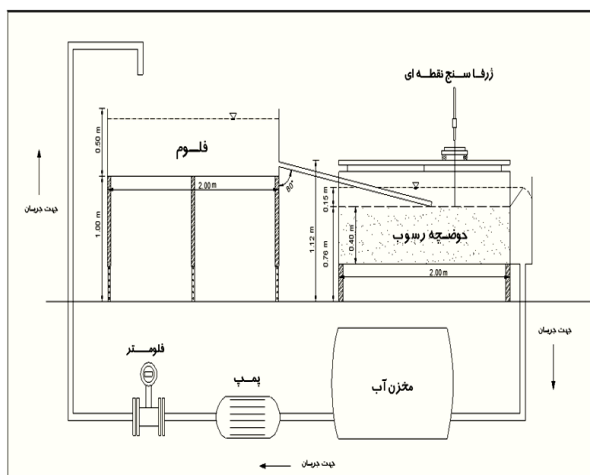
(point gauge) اندازه‌گیری شد. این شاخص مدرج از طریق یک ارابه مستقر بر ریل قادر به اندازه‌گیری مشخصات هندسی حفره آبستکی در طول و عرض بود. شکل‌های شماره (۲) و (۳) نمای شماتیکی از تجهیزات به‌کار گرفته شده در هر دو حالت مستغرق و ریزشی در این پژوهش است. شدت جریان‌های عبوری از این کالورت برابر با ۱/۵، ۱/۷ و ۱/۹ لیتر بر ثانیه بوسیله یک دبی‌سنج (Flowmeter) الکترومگنتیک در تمام طول آزمایشات کنترل می‌شد. رقوم سطح آب پشت کالورت در حالت مستغرق برای هر مقدار دبی به- ترتیب ۹، ۲۲ و ۳۰ و برای حالت ریزشی بترتیب ۱۱، ۱۷ و ۲۴/۵ سانتی‌متر بود. ابعاد حفره آبستکی و تپه بالادست آن شامل حداکثر عرض حفره ( $W_h$ )، حداکثر عمق حفره ( $h_{st}$ )، حداکثر عرض تپه ( $W_s$ )، طول موثر آبستکی ( $L_e$ ) (فاصله ابتدای حفره تا انتهای تپه)، حجم تپه بالادست در مقاطع مختلف زمانی برداشت شد. شکل (۴) پلان حفره و تپه پایین دست آن را نمایش می‌دهد.

### ۳- آنالیز ابعادی

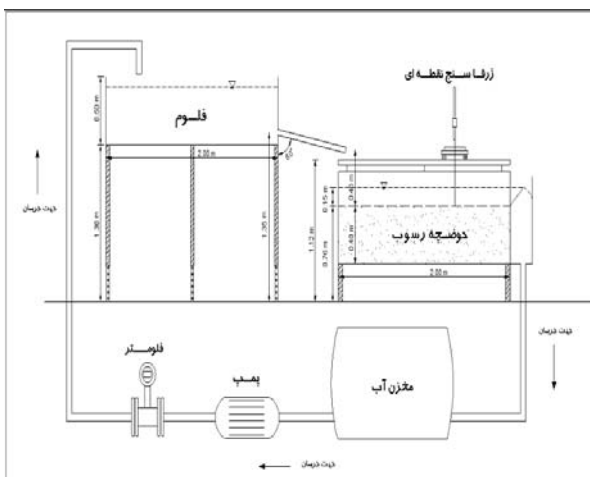
با در نظرگیری پارامترهای موثر بر میزان آبستکی ناشی از برخورد جت، اقدام به انجام آنالیز ابعادی برای کشف وابستگی آنها به یکدیگر و به تبع آن استخراج روابطی بی بعد شد.

$$f(g, v, d_{50}, H_c, \alpha, \rho_s, \rho_w, t, \varphi) \quad (1)$$

پایاب در این ارتفاع از دریچه تنظیمی در انتهای حوضچه استفاده شد. با انجام آزمایشات مقدماتی در هر دو حالت مورد تحقیق، مدت زمان انجام آزمایش برای حالت مستغرق ۳۳۰ دقیقه و برای حالت ریزشی ۲۶۰ دقیقه در نظر گرفته شد. تغییرات هندسی حفره آبستکی توسط شاخص مدرج

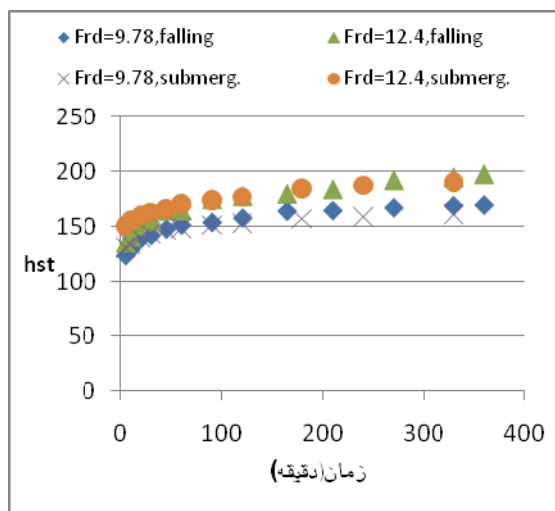


شکل ۲: شکل شماتیک از تجهیزات آزمایشگاه (جت مستغرق)



شکل ۳: شکل شماتیک از تجهیزات آزمایشگاه (جت ریزشی)

تحقیق ضمن انجام آزمایشات ابتدایی، با توجه به روند کاهشی در تغییرات بستر در زمان‌های طولانی، حداکثر مدت زمان انجام آزمایش ۵/۵ ساعت برای حالت مستغرق و ۶ ساعت برای حالت ریزشی در نظر گرفته شد. در هر دو حالت مذکور ۳ دبی با مقادیر ۱/۵، ۱/۷ و ۱/۹ لیتر بر ثانیه و پایاب ثابتی معادل با ۱۶ سانتیمتر اعمال گردید. ابعاد حفره آبشستگی در هر دو حالت ریزشی و مستغرق و در زمانهای مختلف ثبت و با یکدیگر مقایسه شد. همانگونه که در شکل (۵) دیده می‌شود، در هر دو حالت جت مستغرق و ریزشی نرخ رشد عمق حفره با گذشت زمان کاهش می‌یابد. با مقایسه تغییرات عمق در زمانهای مختلف در دو حالت مذکور دیده می‌شود که در زمانهای ابتدایی از شروع آزمایش عمق حفره در حالت ریزشی به نسبت مقدار متناظر آن در حالت مستغرق کمتر است اما با گذشت زمان این روند برعکس خواهد بود بدین معنا که هرچه به



شکل ۵: مقایسه نرخ تغییرات عمق حفره جت ریزشی با جت مستغرق

پایان مدت زمان آزمایش نزدیک می‌شویم مقدار حداکثر عمق در حالت ریزشی در مقایسه با همین مقدار در حالت مستغرق بیشتر خواهد شد. این روند برای تمامی دبی‌های اعمال شده صادق می‌باشد. این واقعیت را با تحقیق در الگوی جریان هر دو حالت میتوان بخوبی توجیه نمود. در حالت جت ریزشی، پس از برخورد جت با سطح آب ضمن مستهلک شدن انرژی جت-که عامل اصلی ایجاد

در معادله (۱)،  $t$  زمان سپری شده از ابتدای آزمایش،  $\phi$  ابعاد آبشستگی،  $T_w$  ارتفاع پایاب،  $\rho_w$  جرم حجمی،  $\rho_s$  جرم حجمی ذرات مصالح بستر،  $\alpha$  زاویه ی جت نسبت به افق،  $H_c$  اختلاف ارتفاع بین سطح پایاب و سطح آب در فلوم،  $d_{50}$  قطر متوسط،  $V$  سرعت متوسط در بالا دست جت،  $g$  شتاب ثقل زمین. از آنجایی‌که در این پژوهش عمق پایاب ( $T_w$ ) و زاویه‌ی جت نسبت به افق ( $\alpha$ ) ثابت در نظر گرفته شده است، از بکارگیری آنها در انجام آنالیز ابعادی صرفنظر می‌کنیم. بنابر این با بکارگیری روش  $\pi$  باکینگهام خواهیم داشت:

$$\pi_1 = \frac{V}{\sqrt{g \times H_c}} : (Fr)$$

$$\pi_2 = \frac{\rho_w}{\rho_s}$$

$$\pi_3 = \frac{d_{50}}{H_c}$$

$$\pi_4 = t \sqrt{\frac{d_{50}}{H_c}}$$

$$\pi_5 = \frac{h_t}{H_c}$$

با ترکیب پارامترهای بی بعد  $\pi_1, \pi_2, \pi_3$  به پارامتر بی بعد دیگری تحت عنوان فرود دنسیمتریک ( $Fr_d$ ) می‌رسیم:

$$Fr_d = \frac{V_j}{\sqrt{g \times d_{50} \times (G_s - 1)}}$$

در نهایت حداکثر عمق حفره آبشستگی براساس پارامترهای بدون بعد به شکل زیر خواهد بود:

$$\frac{\phi}{H_c} = f(Fr_d, \log(t \sqrt{\frac{g}{H_c}})) \quad (2)$$

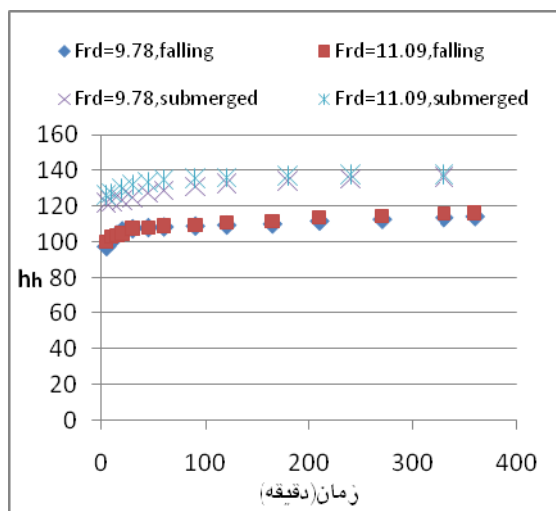
## ۴- انجام آزمایشات و تجزیه و تحلیل نتایج

در هر آزمایش، بیشترین تغییرات حفره آبشستگی و ارتفاع تپه ناشی از تجمع رسوبات در زمان‌های اولیه اتفاق می‌افتاد که با افزایش زمان روند آن کاهش یافته تا به مرحله تعادل می‌رسید. در این

کمک بیشتر می‌کند. همانگونه که در شکل زیر مشاهده می‌شود ارتفاع تپه در حالت جت مستغرق بیشتر از حالت جت ریزشی می‌باشد. این موضوع برای هر سه دبی اعمال شده صادق بود.

همانگونه که در بالا ذکر شد، بدلیل برخورد مستقیم جت با سطح مصالح، سهم بیشتری از انرژی جت صرف افزایش میزان عمق حفره و به تبع آن افزایش طول آن می‌شود. این واقعیت با مشاهده شکل‌های ۸، ۱۰ و ۱۱ بهتر درک می‌شود.

ضمناً این موضوع که در حالت جت ریزشی بدلیل برخورد با سطح آب بخشی از انرژی آن مستهلک شده و قسمتی از جریان نیز به طرفین منحرف شده و به فرسایش عرضی بیشتر منجر می‌شود و در قیاس با جت مستغرق، تغییرات بستر در جهت طولی و عمودی کمتر خواهد بود، در این اشکال بخوبی درک می‌شود.

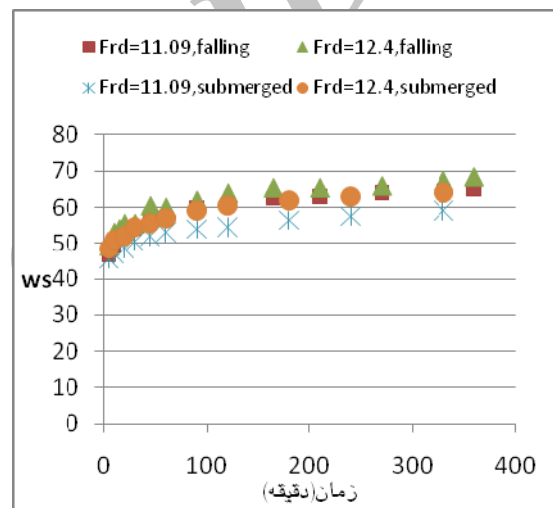


شکل ۷: مقایسه نرخ تغییرات ارتفاع تپه جت ریزشی با جت مستغرق

یکی دیگر از ابعاد مهم آبشستگی عرض تپه است که نظیر سایر ابعاد مورد بحث، نرخ افزایش آن با گذشت زمان کاهش می‌یابد. با انجام آزمایشات در هر دو حالت ریزشی و مستغرق و اعمال دبی‌های متفاوت می‌توان به این نتیجه رسید که عرض تپه در حالت مستغرق تقریباً بین ۱/۲۵ تا ۱/۵ برابر عرض حفره و در حالت ریزشی بین ۱/۲ تا ۱/۳۵ برابر آن می‌باشد.

تغییرات بستر می‌باشد- مقداری از جریان به کناره‌ها منحرف شده که همین عامل ضمن تاثیر بر میزان عمق حفره آبشستگی، باعث افزایش فرسایش عرضی بستر در قیاس با حالت جت مستغرق می‌شود. شکل (۶) به خوبی نشان می‌دهد که میزان عرض فرسایش یافته در حالت جت ریزشی در مقایسه با همین مقدار در حالت مستغرق بیشتر است.

اما عاملی که باعث می‌شود پس از گذشت زمان میزان حداکثر عمق حفره در حالت جت ریزشی از میزان حداکثر عمق حفره در حالت مستغرق افزایش یابد می‌توان محل خروجی جریان در زیر سطح آب عنوان نمود که استهلاك انرژی جت بدلیل برخورد

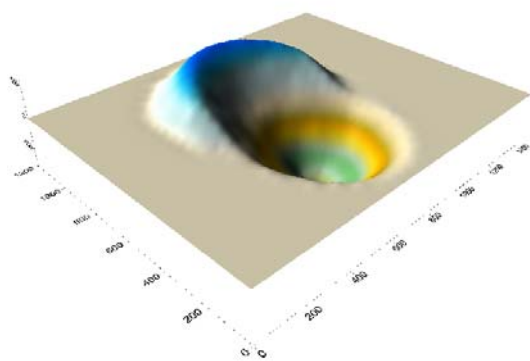


شکل ۶: مقایسه نرخ تغییرات عرض حفره جت ریزشی با جت مستغرق

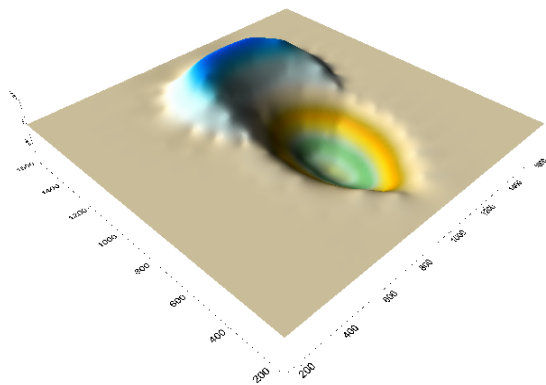
به سطح آب - همانند آن چیزی که در حالت ریزشی دیده می‌شود- وجود نداشته و جت به صورت مستقیم به سطح مصالح بستر برخورد می‌کند. از اینرو در ابتدا میزان فرسایش عمودی (عمق حفره) در مقایسه با همین مقدار در حالت ریزشی بیشتر است، اما با گذشت زمان و در اثر افزایش ارتفاع تپه بالادست که بصورت مانعی در برابر افزایش تغییرات بستر عمل می‌کند، از میزان افزایش عمق حفره کاسته شده و در نهایت در مدت زمانی مشخص این مقدار از مقدار متناظر در حالت ریزشی کمتر می‌شود. مقایسه روند افزایش میزان ارتفاع تپه که در شکل (۷) دیده می‌شود، به درک این موضوع

آبشستگی و تپه بالادست آن در حالت جت مستغرق از طول آبشستگی در حالت جت ریزشی بیشتر است و در عوض عرض فرسایش یافته در حالت جت ریزشی از عرض مورد فرسایش در حالت مستغرق بیشتر است.

در خصوص حجم جا به جا شده بستر، ناشی از برخورد جت با آن، همانگونه که در شکل (۱۲) دیده می‌شود، در تمامی دبی‌های اعمال شده، جت ریزشی توانایی بیشتری در جابه جا کردن مصالح بستر از خود نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: وضعیت توپوگرافی بستر در حالت جت ریزشی

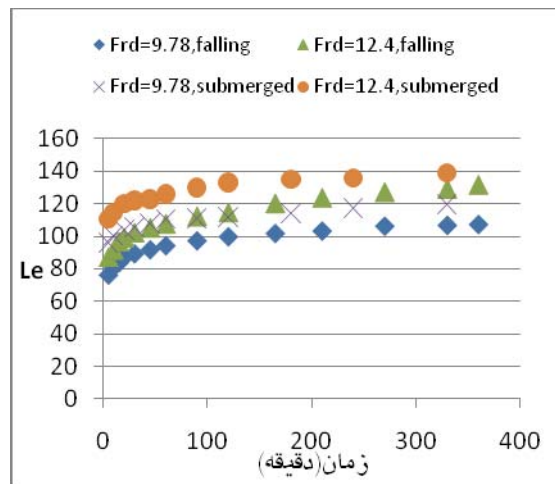


شکل ۱۱: وضعیت توپوگرافی بستر در حالت جت ریزشی

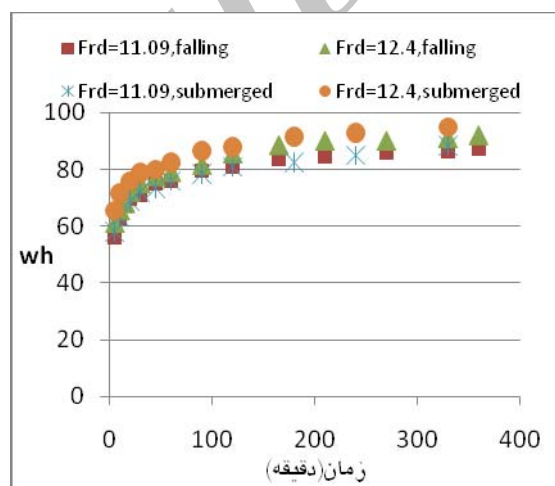
با توجه به آنالیز ابعادی صورت گرفته و با در نظر گرفتن پارامتر وابسته  $(h_{st}/H_c)$  به عنوان تابعی از

پارامترهای مستقل  $Fr_d, t \sqrt{\frac{g}{H_c}}$  می‌توان رابطه‌ی

کلی بدون بعدی بصورت زیر نوشت:



شکل ۸: مقایسه نرخ تغییرات طول موثر جت ریزشی با جت مستغرق



شکل ۹: مقایسه نرخ تغییرات عرض تپه جت ریزشی با جت مستغرق

در این تحقیق با استفاده از ژرفاسنج نقطه‌ای (pointgauge) و شبکه بندی سطح حوضچه رسوب به فواصل ۵ سانتیمتری در عرض و طول و قرائت نقاط تقاطع آن و سپس وارد کردن آن به نرم افزار surfer نسخه ۹، اقدام به محاسبه‌ی حجم تغییرات بستر شد. که بصورت نمونه، حفره ایجاد شده توسط دبی ۱/۵ لیتر بر ثانیه، در هر دو حالت مورد بحث این پژوهش در دو شکل ۱۰ و ۱۱ به نمایش درآمده است.

پس از ورود داده‌ها به نرم افزار surfer، تغییرات بستر شامل حفره و تپه بالادست آن به شکل بالا نمایش داده می‌شود. همانگونه که در دو شکل ۱۰ و ۱۱ دیده می‌شود، طول آبشستگی شامل حفره

ضرایب  $K, b, a$  را بدست آورد. در این روش مقادیر این ضرایب چنان تعیین می‌شود که مجموع مربعات مقدار خطای بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی کمینه شود. بنابراین با در نظر گرفتن حداقل میزان خطا و حداکثر ضریب همبستگی رابطه زیر برای برآورد مقدار  $(h_{st}/H_c)$  در نظر گرفته شد:

$$\frac{\phi}{H_c} = K \cdot (Fr_d)^a \times \left( \log \left( t \times \sqrt{\frac{g}{H_c}} \right) \right)^b \quad (3)$$

با بهره‌گیری از داده‌های آزمایشگاهی و بکارگیری روش حداقل مجموع مربعات می‌توان مقادیر

## ۵- نتایج

بر اساس بررسی‌های صورت گرفته بر روی تاثیر افزایش دبی و گذشت زمان بر تغییرات بستر ناشی از برخورد جریان خروجی از یک جت مستغرق و ریزشی زیر بدست آمد:

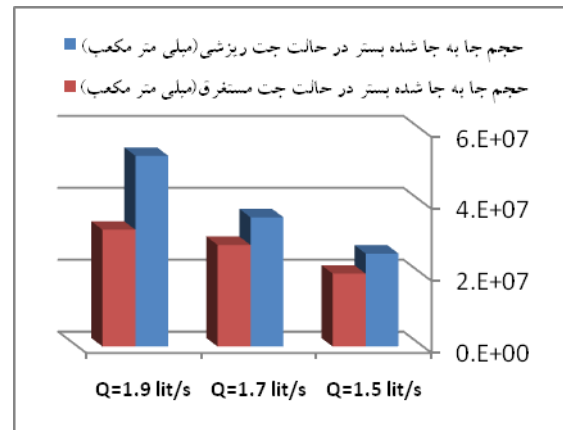
۱- با افزایش دبی تمام ابعاد هندسی حفره آبشستگی و تپه پایین دست آن در هر دو حالت افزایش یافت.  
۲- با گذشت زمان از شدت تغییرات بستر کاهش می‌یابد.

۳- میزان افزایش ابعاد هندسی آبشستگی از تابع لگاریتمی پیروی می‌کند.

۴- نسبت حداکثر عمق حفره در ۵ دقیقه ابتدایی به همین مقدار در پایان آزمایش برای تمام دبی‌های اعمال شده در حالت مستغرق حدوداً ۸۰٪ و در حالت ریزشی حدوداً ۷۰٪ می‌باشد. این یعنی جت مستغرق در ابتدا قدرت تخریب بیشتری از خود نشان می‌دهد.

۵- در ابتدای آزمایش میزان حداکثر عمق حفره آبشستگی در حالت جت مستغرق از مقدار متناظرش در حالت ریزشی بیشتر است اما با گذشت زمان این روند برعکس می‌شود.

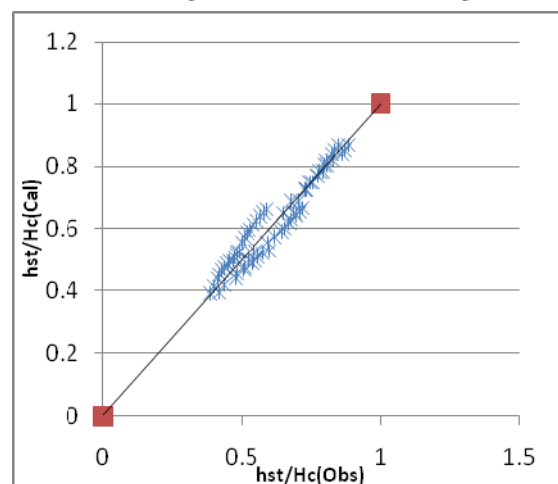
۶- فرسایش طولی بستر ناشی از برخورد جت مستغرق بیشتر از فرسایش طولی ناشی از جت ریزشی است اما این جت ریزشی است که در قیاس با جت مستغرق، بستر را با فرسایش عرضی بیشتری مواجه می‌کند. از اینرو توصیه می‌شود در صورت بهره‌گیری از جت مستغرق، توجه بیشتری به راستای طولی بستر قابل فرسایش پایین دست



شکل ۱۲: مقایسه حجم جا به جا شده بستر در جت ریزشی و مستغرق

$$\frac{h_{st}}{H_c} = 30.4 \times (Fr_d)^{-2.03} \times \left( \log \left( t \times \sqrt{\frac{g}{H_c}} \right) \right)^{0.656} \quad (4)$$

شکل (۱۳) مقادیر مشاهداتی را در مقابل مقادیر محاسباتی از رابطه‌ی (۴) نمایش می‌دهد.



شکل ۱۳: مقادیر محاسباتی و مشاهداتی حداکثر عمق حفره آبشستگی

صانعی م و علی حسینی پ. (۱۳۸۷)، بررسی تغییرات زمانی پروفیل آبشستگی پایین دست جت افقی مستغرق با استفاده از مدل آزمایشگاهی، هفتمین کنفرانس هیدرولیک، دانشگاه تهران.

پیرستانی م و مهدوی زاده ا.ح. (۱۳۸۸)، بررسی آزمایشگاهی تأثیر پارامترهای هندسی - هیدرولیکی بر آبشستگی پایین دست جت های ریزشی، هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز.

Contilevered Pipe Outlets, I. Background , J. Hydraulic Research, IAHR, 26(4), 357-376.

U.S Department Of Transportation, (2006), Hydraulic Disgn Of Energy Dissipators For Culverts And Channele, chapter 5, Hydraulic Engineering, Circular No.14, office Of Engineering, Federal Highway Adminstartion, Washington D.c., July, Third Edition.

Kurniawan A., Altinakar M.S. and Graf W.H. " FLOW PATTERN OF AN ERODING JET". Laboratoire de Recherches Hydrauliques Ecole Polytechnique Federale, Lausanne, Switzerland.(2002).

[۷] آن و در صورت استفاده از جت ریزشی به راستای عرضی آن، از طریق ایجاد سیستم های محافظ شود.

[۸] Rouse, H. (1940). "Criteria for similarity in transportation of sediment." State Univ.of iowa bull,20,33-39

[۲] Rouse, H. (1950). "Diffusion of submerged jets ."Transactions,ACSE 115:637-697.

[۲] Rajaratnam, N. (1981).Erosin by plane turbulent Jets. J.Hydraulic Research, IAHR, 19(4):339-358.

[۴] Blaisdell, F.W.,and Anderson, C.L., (1988), A Comprehensive Generalized Study Of Scour

[۵] Masurek, K.A, Rajib Ahsan Md., (2005), Effect Of Tailwater Depth On Time Evolution Of Scour By Plane Wall Jets In Cohesionless Material.

[۶] قدسیان م، رنجبر م و سلامتیان ا. (۱۳۸۵)، تغییرات زمانی حفره آبشستگی پایین دست جت های ریزشی آزاد، هفتمین سمینار مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.

## ۶- منابع

Archive