

## بررسی هندسه آبشستگی در حوضچه مستهلک کننده پایین دست سرریز سیفونی

آرش خیرالهی\*<sup>۱</sup>، مهدی فولادی پناه<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: تاریخ پذیرش:

۱- مربی، گروه عمران، واحد رامهرمز، دانشگاه آزاد اسلامی، رامهرمز

۲- استادیار، گروه عمران، واحد رامهرمز، دانشگاه آزاد اسلامی، رامهرمز

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: arash.khairollahi@yahoo.com

### چکیده

از جمله سازه‌های اقتصادی مستهلک کننده انرژی جریان عبوری از روی سرریزهای بلند، پرتابه‌های جامی هستند که جریان ریزشی باعث وقوع آبشستگی در حوضچه پایین دست آنها می‌شود. در این تحقیق تغییرات بستر حوضچه بصورت حفره آبشستگی در پایین دست سرریز سیفونی همراه با پرتابه مورد بررسی قرار گرفته است. ابعاد و موقعیت به صورت آزمایشگاهی و تئوریک آنالیز شدند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد بیشینه عمق آبشستگی تابعی از شدت جریان و عمق پایاب است. همچنین زاویه پرتاب باکت روی فاصله‌های پشته بالادست و کف حفره از لبه سرریز بیشترین تاثیر را داشت. طول حفره، فاصله انتهای پشته پایین دست تا لبه سرریز و فاصله بیشینه عمق آبشستگی تا لبه سرریز تابعی از شرایط هیدرولیکی بودند و کمترین تاثیر را از زاویه پرتابه و اندازه ذرات رسوبی بستر داشتند. ارتفاع پشته بالادست ضریب همبستگی زیادی با زاویه پرتابه دارا بود. ارتفاع پشته پایین دست متاثر از دبی و عمق پایاب بود. بر مبنای تحلیل تئوریک و با استفاده از تئوری پی باکینگهام معادلات خطی سه متغیره برای پیش بینی خصوصیات ابعاد و موقعیت حفره و پشته‌ها بدست آمد. مقایسه نتایج حاصل از مقادیر پیش بینی و اندازه گیری شده موید دقت مناسب معادلات استخراج شده بود.

واژه‌های کلیدی: آنالیز ابعادی، پرتابه جامی، پلانچ پول، حفره آبشستگی، سرریز سیفونی

## Study of the Scour Hole Geometry in Downstream Plunge Pool of Siphon Spillway

A Khairollahi<sup>\*1</sup>, M Fuladipanah<sup>2</sup>

Received: Accepted:

<sup>1</sup>Lecturer, Department of Civil Engineering, Ramhormoz Branch, Islamic Azad University, Ramhormoz, Iran

<sup>2</sup>Assist. Prof., Department of Civil Engineering, Ramhormoz Branch, Islamic Azad University, Ramhormoz, Iran

\* Corresponding Author, Email: arash.khairollahi@yahoo.com

### Abstract

One of the economical energy dissipater structures applying in high spillways is flip-bucket which falling flow causes scouring in plunge-pool at downstream. In this research, the bed variation as a scour hole at the downstream of a siphon spillway has been investigated. Dimensions and position of the scour hole were analyzed both experimentally and theoretically. The experimental results showed that the maximum scour hole depth was a function of discharge rate and downstream tail water depth. Also, flip-bucket angle had the most significant effect on distances of upstream hill and scour hole bottom from the spillway. It was found that the scour hole length, distances of downstream hill end point and maximum scour from the spillway were affected by the hydraulic conditions but they were less effected by the flip bucket angle and bed particle size. Also, it was seen that the flip bucket angle had a significant effect on upstream hill height. The height of downstream hill height was a function of flow discharge and tail water. Applying Buckingham  $\pi$ -theory, three variable linear equations were extracted to predict the dimension and situation of the scour hole and hills. The comparison between the measured versus the predicted values showed a good agreement between them.

**Keywords:** Dimensional analysis, Flip bucket, Plunge pool, Sour hole, Siphon spillway

### مقدمه

این زمینه دارند. جت خروجی از این پرتاب کننده در پایین دست وارد استخر کاهنده انرژی جنبشی می-شود و در نهایت به پایین دست، جریان می یابد. مسئله اصلی در تعبیه این استخر علاوه بر کنترل و کاهش انرژی جنبشی، عدم وقوع آبشستگی یا محدود نمودن ابعاد حفره آبشستگی در استخر است. در این راستا استفاده از معادلاتی که با دقت مناسب قادر به پیش بینی موقعیت و ابعاد حفره آبشستگی در پایین دست سرریز جامی پرتاب کننده باشند نقش مهم و کلیدی ایفا خواهند کرد. پلانچ پول ها در چند دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته اند که دلیل آن مزایای زیاد آنها در مقایسه با حوضچه های آرامش است. پلانچ پول ها در موضعی که عمق پایاب نامشخص است و آبشستگی سازه ای را به

مدیریت منابع آبی مستلزم ایجاد سازه های آبی و هیدرولیکی روی رودخانه ها است که تغییرات دبی جریان و بار رسوبی از تبعات ساخت آنها هستند. عبور جریان مازاد بر ظرفیت ذخیره سازی سد از روی سرریز آن که دارای انرژی جنبشی بسیار زیادی است باعث بروز تغییرات شدید در بستر پایین دست رودخانه در قالب پدیده ای به نام حفره فرسایشی می گردد. در صورت عدم مهار و کنترل انرژی جنبشی جریان مازاد عبوری از روی سرریز، گسترش ابعاد حفره تخریب و شکست سازه ای سد را به دنبال خواهد داشت. استفاده از پرتابه آزاد یا به اصطلاح جام پرتاب کننده همراه با استخر کاهنده انرژی جنبشی از جمله تمهیدات سازه ای مستهلک کننده انرژی هستند که کاربرد بسیار زیادی در

دوم، روابطی هستند که علاوه بر پارامترهای معادله ۴ عمق پایاب،  $y_t$ ، را نیز در محاسبه بیشینه عمق آبخستگی لحاظ کرده‌اند. شاخص‌ترین رابطه در این گروه توسط یاگر با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ورونیسی ارائه داده است (میسن و آروموگان ۱۹۸۵):

$$d_s = 0.6H^{0.25} q^{0.50} \left(\frac{y_t}{d_{50}}\right)^{0.333} \quad [3]$$

که در این معادله  $y_t$  برحسب  $m$  است روابط دسته سوم، بیان کیفی از موضوع را تشریح می‌نمایند. به عنوان مثال هارتونگ و هاسلر (۱۹۷۳) ادعا کرده‌اند که بیشینه عمق آبخستگی ناشی از جت‌های پرتابی استوانه‌ای تقریباً ۲۰ برابر قطر جت است. روابط گروه چهار شامل فرمول‌های محققین روسی است. این روابط به مراتب از روابط دیگر پیچیده‌تر هستند.

جدول ۱- مقادیر عددی ضرایب معادله ۲.

ردیف	نام محقق	ضریب $K$	ضریب $x$	ضریب $y$	ضریب $z$	قطر $d$
۱	شوکلیچ	۰/۵۲۱	۰/۵۷	۰/۲	۰/۳۲	$d_{90}$
۲	ورونسی A	۰/۲۰۲	۰/۵۴	۰/۲۲۵	۰/۴۲	$d_m$
۳	ورونسی B	۱/۹	۰/۵۴	۰/۲۲۵	۰/۴۰	-
۴	اکنبرگر	۱/۴۴	۰/۶۰	۰/۵۰	۰/۴۰	$d_{90}$
۵	هارتونگ	۱/۴۴	۰/۶۴	۰/۳۶	۰/۳۲	$d_{85}$
۶	فرانکی	۱/۱۳	۰/۶۷	۰/۵۰	۰/۵۰	$d_{90}$
۱۰	چی و پادیر	۱/۶۶۳	۰/۶۰	۰/۲۰	۰/۱۰	$d_m$
۱۱	بی‌ساز و تی‌شاپ	۲/۷۶	۰/۵۰	۰/۲۵	۱/۰	$d_{90}$
۱۲	چی و کونگ	۱/۶۶۳	۰/۶۰	۰/۲۵	۰/۱۰	$d_m$
۱۳	تارایمویچ	۰/۶۶۳	۰/۶۷	۰/۲۵	-	-
۱۴	ماکادو	۱/۳۵	۰/۵۰	۰/۳۱۴۵	۰/۰۶۴۵	$d_{90}$
۱۵	سوفرلک	۲/۳۰	۰/۶۰	۰/۱۰	-	-
۱۶	عظمت‌اله	۶/۶۱۹	۰/۶۹۴	۰/۰۸۱۵	۰/۱۹۶	$d_{50}$

میسون و آروموگان (۱۹۸۵) عقیده دارند که از میان این روابط تنها روابط میخایلیف<sup>۲</sup>، روبینستین<sup>۳</sup> و میتسخالوا<sup>۴</sup> به ترتیب در سال‌های ۱۹۶۰، ۱۹۶۵ و ۱۹۶۷ را می‌توان با اطمینان کامل به ترتیب زیر به کار گرفت:

$$d_s = \frac{1.804 q \sin \alpha}{1 - 0.215 \cot \alpha} \left( \frac{1}{d_{90}^{0.33} h^{0.5}} - \frac{1.126}{H} \right) \quad [4]$$

$$d_s = h + 0.19 \left( \frac{H+h}{d_{90}} \right)^{0.75} \left( \frac{q^{1.2}}{H^{0.47} h^{0.33}} \right) \quad [5]$$

خطر نمی‌اندازد مؤثر هستند و ممکن است محدودیت‌های فضا که در استفاده از حوضچه‌های آرامش وجود دارد رفع شود. در این زمینه مطالعات مختلفی صورت گرفته است که در ادامه به آنها اشاره می‌شود. برای اولین بار شوکلیچ<sup>۱</sup> در سال ۱۹۲۸ پدیده آبخستگی را بر روی استخر کاهنده انرژی جنبشی با استفاده از پنج نوع مصالح ماسه‌ای با دانه‌بندی یکنواخت و غیریکنواخت مورد مطالعه قرار داد. آزمایش‌های وی روی سرریز لبه‌تیز با هوادهی کامل صورت گرفت. نتایج تحقیقات او منجر به رابطه زیر شد (مومنی‌وصالیان و همکاران ۱۳۸۵):

$$d_s = 4.75H^{0.2} q^{0.57} d_{90}^{0.32} \quad [1]$$

که در این معادله  $d_s$  عمق آبخستگی زیر سطح آب بر حسب  $m$   $q$  دبی واحد عرض بر حسب  $m^2 s^{-1}$  اختلاف ارتفاع ریزش آب بین بالادست و سطح آب پایین‌دست بر حسب  $d_{90}$  قطری از ذرات که ۹۰ درصد وزنی مصالح از آن کوچکترند برحسب  $m$  هستند. مطالعه جامعی توسط میسون و آروموگان (۱۹۸۵) به منظور جمع‌آوری معادلات برآورد کننده بیشینه عمق آبخستگی صورت گرفت. آنها اظهار داشتند این معادلات در پنج گروه اصلی قابل طبقه‌بندی هستند. دسته اول روابطی هستند که عمق آبخستگی را بر حسب ارتفاع ریزش، دبی واحد عرض و در بعضی مواقع اندازه مواد بستر پیش‌بینی می‌کنند. فرم کلی این معادلات از رابطه زیر تبعیت می‌کند:

$$d_s = K \frac{H^y q^x}{d^z} \quad [2]$$

که در آن  $d_s$  بیشینه عمق آبخستگی برحسب  $m$   $H$  اختلاف بین سطح آب استخر مستهلک کننده و تراز سطح آب بالادست سرریز برحسب  $q$  دبی در واحد عرض جریان برحسب  $m^2 \cdot s^{-1}$  و  $K$ ،  $x$  و  $y$  ضرایب ثابتی هستند که در روابط مختلف مقادیر متفاوتی دارند. جدول ۱ خلاصه‌ای از این روابط را نشان می‌دهد. در این جدول  $d_m$  قطر متوسط ذرات رسوبی است. دسته

<sup>2</sup> Mikhalev

<sup>3</sup> Rubinstein

<sup>4</sup> Mirtskhulava

<sup>1</sup> Schoklitsch

مورفولوژیکی و ژئوتکنیکی است. آبخستگی فرایندی کاملاً پویاست که به اندرکنش سه فاز مختلف (هوا، آب و مصالح بستر) مرتبط می‌شود و با ایجاد فشار انتقالی ناشی از امواج و کاهش نیروهای چسبندگی مابین مصالح بستر اهمیت می‌یابد. روند آبخستگی را می‌توان به صورت یک سری فرایندهای فیزیکی-مکانیکی که بصورت پیوسته هستند، تشریح کرد. این روند به ترتیب با اثر جت هوادهی، پخش لایه برشی آشفته در پایاب، اختلاف فشار در برخورد آب و سنگ، انتقال این فشارها به سنگ‌های زیرین و شکسته شدن آنها، بالابردن ذرات خرد شده و در نهایت جابه‌جایی آنها به سمت پایین دست کامل می‌شود. هگر و کانپا (۲۰۰۳) به بررسی اثر هوادهی در جت آب عامل آبخستگی در حوضچه‌های مستهلک کننده انرژی پرداختند. عظمت‌اله و همکاران (۲۰۰۵) مدلی برای تخمین بیشینه عمق آبخستگی با استفاده از روش شبکه‌های عصبی ارائه نمودند و آن را با روش‌های تجربی مقایسه کردند. گویال (۲۰۱۱) بیان داشته است به دلیل محدودیت‌های مدل آزمایشگاهی، استفاده از رویکرد شبکه هوشمند یا شبکه عصبی جایگزین روش‌های آزمایشگاهی شده و نتایج رضایتبخشی نیز به دنبال داشته است. در داخل کشور نیز مطالعاتی توسط محققین مختلف در این زمینه انجام شده است. فرهودی و ناصحی (۱۳۷۸) آبخستگی موضعی در پایین دست آبشارهای قائم را بررسی کردند و رابطه‌ای سینوسی برای پیش‌بینی پروفیل آبخستگی به شکل زیر ارائه نمودند:

$$\frac{d}{d_s} = \sin\left(-\frac{\alpha x}{L_h} - \beta\right) \quad [8]$$

که در آن  $T$  عمق آبخستگی در فاصله  $x$  از  $T_s$  بیشینه عمق آبخستگی،  $L_h$  طول حفره آبخستگی و  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب ثابتی هستند که مقادیر آنها به ترتیب ۰/۹ و ۰/۴۵ می‌باشند. قدسیان و همکاران (۱۳۷۷) آبخستگی پایین دست سرریزهای ریزشی را بررسی کردند. آنها عمق آبخستگی را تابعی از پارامترهای  $d_{50}$ ،  $y_t$ ،  $H$ ،  $q$

$$d_s = \left( \frac{0.97}{\sqrt{d_{90}}} - \frac{1.35}{\sqrt{H}} \right) \frac{q \sin \alpha}{1 - 0.175 \cot \alpha} + 0.25 y_t \quad [6]$$

که در این روابط  $\alpha$  زاویه برخورد جت با سطح پایاب برحسب درجه است. دسته پنج روابط محققینی است که سعی کرده‌اند تأثیر زمان راهم در نظر بگیرند. از مهمترین روابط این گروه می‌توان به رابطه کوتولاس (۱۹۶۷) اشاره کرد که بقرار زیر است:

$$d_s = \frac{1.9H^{0.35}q^{0.7}}{g^{0.35}d_{95}^{0.2}} (1 - \exp(0.55t^{0.2})) \quad [7]$$

که در این معادله  $t$  زمان آبخستگی بر حسب ثانیه است (میسون و آروموگان ۱۹۸۵). مطالعات نشان می‌دهد وارد نمودن پارامتر زمان در محاسبه عمق آبخستگی از دقت فرمول می‌کاهد. همچنین نتایج حاصل از تحقیقات بر روی حوضچه استغراق ۲۶ سد و ۴۷ مدل آزمایشگاهی، روشن ساخته است که استفاده از قطر شاخص  $d_{50}$  نسبت به دو قطر  $d_{85}$  و  $d_{90}$  نتایج بهتر و رضایتبخش‌تری در پی دارد (میسون و آروموگان ۱۹۸۵). هافمن (۱۹۹۸) با بکارگیری قانون دوم نیوتن رابطه‌ای نیمه‌تحلیلی برای تخمین بیشینه عمق آبخستگی ارائه نمود. بوهرر و همکاران (۱۹۹۸) روابطی را ارائه نمودند که نحوه استهلاک سرعت جت را پس از ورود به استخر آب نشان می‌دهد. وایتلر و همکاران (۱۹۹۸) با استفاده از نتایج مطالعات بوهرر و همکاران روش جدیدی را در پیش‌بینی بیشینه عمق آبخستگی ارائه نمودند که به نام روش آناندال خوانده می‌شود. در این روش با در نظر گرفتن خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها در اعماق مختلف و تعریف شاخصی بنام شاخص فرسایش‌پذیری، انرژی جنبشی لازم برای فرسایش مصالح بستر در هر عمق محاسبه می‌گردد. سپس این انرژی با انرژی موجود جریان مقایسه می‌شود و در نهایت عمق آبخستگی بدست می‌آید. بولارت و شلیس (۲۰۰۳) بیان داشته‌اند مهمترین مشکل در استفاده از این سازه، پدیده آبخستگی ناشی از جت‌های ریزشی در پایین دست آن است که به عنوان پدیده ای کاملاً غیرخطی، تابعی از عوامل هیدرولیکی،

اختلاف ارتفاع سطح آب در بالادست و پایین دست سرریز برحسب ( $m$ ) می‌باشند. لشگرآرا و همکاران (۱۳۹۵) در تحقیق خود به مطالعه آزمایشگاهی رفتار دینامیکی جت قائم برخوردی در حوضچه استغراق پرداختند. نتایج به دست آمده علاوه بر معرفی طبقه بندی نوینی در فرم چاله آبشستگی تحت شرایط دینامیکی، منجر به معرفی معادله‌ای جهت تعیین تفاضل عمق‌های بدون بعد دینامیکی و استاتیکی گردید. شفافی‌بجستان و رضوی‌نبوی (۱۳۹۳) در تحقیق خود به بررسی اثر نشت در تغییر عمق آبشستگی در پایین دست جت‌های آزاد قائم پرداختند. ترسیم مولفه عمودی سرعت جریان نشان داد که مولفه‌ی رو به پائین سرعت در نزدیکی بستر در شرایط نشت می‌تواند تا ۴۷ درصد کاهش یابد و این باعث کاهش نیروی بالابرنده و در نتیجه کاهش ابعاد حفره آبشستگی می‌گردد. نقی‌خانی و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از مدل محاسباتی دانه‌ای، تحقیقی را برای تعیین ابعاد حفره آبشستگی در پایین دست سرریزهای پرتابی انجام دادند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد استفاده از این روش نسبت به فرمول‌های تجربی ابعاد حفره آبشستگی را با دقت بهتری پیش‌بینی می‌نماید. لشگرآرا و همکاران (۱۳۹۴) طی تحقیقی به مطالعه ابعاد حفره آبشستگی تحت جت قائم دایره‌ای مستغرق پرداختند. برای انجام آزمایش‌ها، سناریوهای مختلفی با تغییر در ارتفاع ریزش جت مستغرق نسبت به بستر اولیه رسوبات و همچنین تغییر در سرعت جریان خروجی از جت تدوین گردید. از بررسی روند تغییرات عمق و طول نسبی متعادل شده آبشستگی در مقابل عدد فرود جت در حوضچه استغراق ملاحظه شد که با افزایش عدد فرود جت، میزان عمق و طول نسبی متعادل شده حفره آبشستگی افزایش یافته است. از طرفی نتایج نشان می‌دهند که افزایش یک درصدی ارتفاع نصب جت منجر به کاهش ۳۳ درصدی تفاضل نسبی عمق آبشستگی دینامیکی و استاتیکی خواهد شد. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که بیشتر آنها بر روی

$\rho_s \rho_w$  در نظر گرفته و با آنالیز ابعادی رابطه زیر را بدست آوردند:

$$\frac{d_s}{y_t} = 0.75 Fr^{0.524} \left( \frac{d_{50}}{y_t} \right)^{-3.66} \left( \frac{H}{y_t} \right)^{0.255} \quad [9]$$

که در آن  $Fr = \frac{q}{\sqrt{g y_t^3}}$  است. نصیری صالح و

منتظر (۱۳۸۰)، تعیین ابعاد حفره آبشستگی در پایین دست سرریزهای ریزشی آزاد را با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی بررسی کردند. با طراحی شبکه‌ای دو لایه، روش جدیدی برای محاسبه ابعاد حفره آبشستگی پایین دست سرریزهای ریزشی آزاد ارائه شده و نتایج حاصل از آن مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که شبکه به خوبی روال آموزش را فرا گرفته است و پس از آن می‌تواند یادگیری خود را به حالت‌های بسیار متفاوت تعمیم داده و خروجی‌های هر یک از ورودی‌ها را تعیین کند. مومنی و صالحیان و همکاران (۱۳۸۷) به بررسی ابعاد حفره آبشستگی در اثر برخورد جت‌های مستطیلی ناشی از پرتابه جامی شکل در حوضچه‌های مستهلک کننده با پر شده توسط مواد رسوبی با دانه بندی غیریکنواخت پرداختند. آنها با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، روابط تجربی خطی و توانی برای پیش بینی خصوصیات حفره آبشستگی شامل عمق آبشستگی و ارتفاع پشته بالادست و پایین دست به دست آوردند که در این بین، معادلات توسعه داده شده برای عمق آبشستگی دارای دقت مطلوب بودند. این روابط به قرار زیر است:

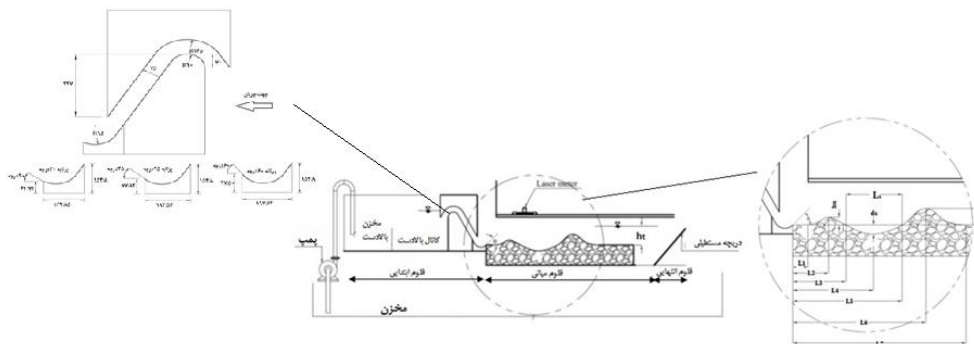
$$\frac{D}{h_t} = -0.012 + 4.146 \left[ \frac{q}{\sqrt{g h_t^3}} \right]^{-0.915} - 9.439 \left[ \frac{d_{50}}{h_t} \right] + 0.004 \left[ \frac{H}{h_t} \right] \quad [10]$$

$$\frac{D}{h_t} = 1.679 \left[ \frac{q}{\sqrt{g h_t^3}} \right]^{0.915} \left[ \frac{d_{50}}{h_t} \right]^{-1.33} \left[ \frac{H}{h_t} \right]^{0.189} \quad [11]$$

که در این معادلات  $d_{50}$  قطری که ۵۰ درصد

وزنی ذرات از آن کوچک هستند برحسب متر،  $q$  دبی در واحد عرض بر حسب  $(m^2 s^{-1})$ ،  $g$  شتاب ثقل بر حسب  $(m s^{-2})$ ،  $h_t$  ارتفاع سطح آب پایاب بر حسب  $(m)$ ،  $H$

عمق پایاب و دبی بر پشته بالادست و پایین دست چاله فرسایشی هستند. نمایی از فلوم آزمایشگاهی همراه با متعلقات مربوط به آن در شکل ۱ نشان داده شده است. پارامترهای هندسی حفره شامل  $d_s$  ماکزیمم عمق آبشستگی،  $h_u$  ارتفاع پشته بالادست،  $h_d$  ارتفاع پشته پایین دست،  $L_1$  فاصله نقطه آغاز تغییر بستر تا لبه سرریز،  $L_2$  فاصله ارتفاع پشته ایجاد شده در بالادست تا لبه سرریز،  $L_3$  فاصله نقطه شروع حفره آبشستگی تا لبه سرریز،  $L_4$  فاصله ماکزیمم عمق آبشستگی تا لبه سرریز،  $L_5$  فاصله نقطه اتمام آبشستگی تا لبه سرریز،  $L_6$  فاصله پشته ایجاد شده در پایین دست تا لبه سرریز،  $L_7$  فاصله نقطه اتمام پشته پایین دست تا لبه سرریز و  $L_s$  طول حفره آبشستگی هستند. آزمایش‌ها روی فلومی به ابعاد  $7/0 \times 0/5 \times 0/6$  :  $L \times W \times H$  (بر حسب متر) که دارای دیواره‌های پلگسی‌گلاس و بستر گالوانیزه بود انجام گرفت. جریان آب ورودی به فلوم ابتدایی، از یک مخزن وارد کانال بتنی شده و پس از وارد شدن به حوضچه آرامش و عبور از صفحه مشبک که برای کاهش تلاطم تعبیه شده است وارد فلوم میانی می‌شود.



شکل ۱- شمایی از فلوم آزمایشگاهی، مشخصات حفره آبشستگی و ملحقات آن.

$0/77$ ، ارتفاع  $m/95$  و عرض  $m/3$  در ابتدای قسمت میانی فلوم آزمایشگاهی و در وسط عرض فلوم و به فاصله  $30$  سانتی‌متری از کف فلوم طوری نصب گردید که چاله فرسایشی ایجاد شده در پایین دست آن تحت تاثیر دیواره‌های فلوم قرار نگیرد. همچنین سه باکت با زوایای پرتاب  $30$ ،  $45$  و  $60$  درجه نیز برای این سرریز

پیش‌بینی ماکزیمم عمق آبشستگی متمرکز هستند و کمتر به هندسه حفره آبشستگی پرداخته‌اند. در این تحقیق، علاوه بر بیشینه عمق آبشستگی در حوضچه مستهلک کننده پایین دست سرریز سیفونی دیگر پارامترهای هندسی شامل بیشینه عمق آبشستگی ( $d_s$ )، طول حفره آبشستگی ( $l_s$ )، فاصله بیشینه عمق آبشستگی نسبت به لبه سرریز ( $l_4$ )، فاصله نقطه تشکیل حفره از لبه سرریز ( $l_3$ ) و پشته‌های بالادست و پایین دست (شامل ارتفاع  $h_u$  و  $h_d$ ) و فاصله از لبه سرریز ( $l_2$  و  $l_7$ ) مورد مطالعه قرار گرفته است. در نهایت با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و تئوری باکینگهام، معادلاتی برای پیش‌بینی خصوصیات حفره آبشستگی در دو حالت خطی و غیرخطی ارائه شده است.

#### مواد و روش‌ها

اهداف اصلی این تحقیق شناخت مکانیزم آبشستگی در پایین دست سرریز سیفونی در شرایط هیدرولیکی و سازه‌ای متفاوت، تعیین معادلاتی برای پیش‌بینی ابعاد حفره آبشستگی با استفاده از مدل فیزیکی، تعیین اثر تغییر مصالح (دانه‌بندی‌های مختلف)،

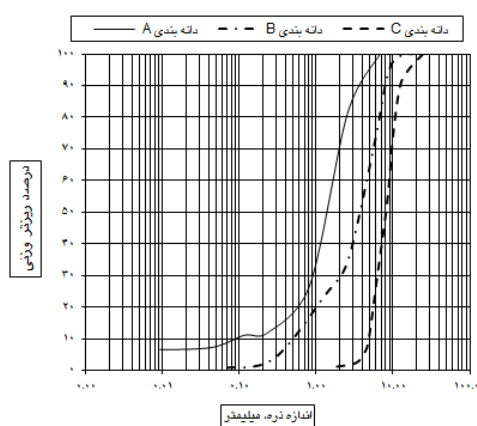
به منظور اندازه‌گیری دبی جریان از یک سرریز مستطیلی مجهز به لیمینتر با دقت  $0/1$  میلی‌متر در پایین دست فلوم انتهایی تعبیه شده بود. برای تثبیت عمق پایاب، یک دریچه مستطیلی در میانه پایین دست فلوم میانی به کار گرفته شده بود (شکل ۱). سرریز سیفونی ساخته شده از پلکسی‌گلاس در این تحقیق به طول  $m$

صورت تابع مجانبی نسبت به زمان عمل می‌کند. به عبارتی عمق آبخستگی پس از مدت زمان معینی به حالت تعادل می‌رسد. البته وضعیت تعادل به معنی اتمام فرسایش نیست بلکه نشان دهنده سرعت بسیار ناچیز فرسایش است. در این تحقیق، پایان هر آزمایش لحظه-ای در نظر گرفته شد که ذرات هیچ گونه حرکتی به پایین دست نداشته باشند. مدت زمان هر آزمایش برای رسیدن به این حالت یک ساعت و نیم لحاظ گردید. به منظور تعیین رابطه‌ای بین پارامترهای موثر بر ابعاد حفره آبخستگی نشان داده شده در شکل ۱ و یافتن تابع حاکم بر فضای نگاشت بین آنها از تئوری  $\pi$  باکینگهام استفاده شد. متغیرهای اصلی شامل دبی،  $Q$ ، جرم حجمی آب،  $\rho_w$ ، جرم حجمی رسوب،  $\rho_s$ ، لزجت دینامیکی آب،  $\mu$ ، عمق پایاب،  $h_t$ ، اندازه ذرات مصالح بستر،  $d_{50}$ ، زاویه پرتاب،  $\alpha$ ، شعاع پرتاب،  $R$ ، شتاب ثقل،  $g$ ، هستند. پارامترهای وابسته مشتمل بر بیشینه عمق آبخستگی،  $d_s$ ، ارتفاع پشته بالادست،  $h_u$ ، ارتفاع پشته پایین دست،  $h_d$ ، فاصله ارتفاع پشته ایجاد شده در بالادست تا لبه سرریز،  $L_2$ ، فاصله نقطه شروع حفره آبخستگی تا لبه سرریز،  $L_3$ ، فاصله ماکزیم عمق آبخستگی تا لبه سرریز،  $L_4$ ، فاصله پشته ایجاد شده در پایین دست تا لبه سرریز،  $L_6$ ، و طول حفره آبخستگی،  $L_s$ ، هستند. بنابراین تعداد متغیرهای تعریف کننده خصوصیات هندسی حفره آبخستگی به هشت پارامتر خواهد بود که دو پارامتر ابعاد حفره ( $L_s$ ،  $d_s$ )، دو پارامتر ارتفاع پشته-ها ( $h_d$ ،  $h_u$ ) و چهار پارامتر دیگر به موقعیت حفره اشاره دارند ( $L_2$ ،  $L_3$ ،  $L_4$  و  $L_6$ ). اگر  $\Phi$  شاخص پارامترهای وابسته باشد در این صورت می‌توان نوشت:

$$\phi = f(Q, \rho_w, \rho_s, \mu, h_t, d_{50}, \alpha, R, g) \quad [12]$$

با انتخاب پارامتر  $Q$  به نماینده خصوصیات جریان، پارامتر  $\rho_w$  یا  $\mu$  به عنوان شاخص خصوصیات سیال و پارامتر  $h_t$  یا  $d_{50}$  به عنوان بعد طولی به عنوان سه پارامتر تکراری، متغیرهای بی‌بعدی به شرح جدول

طراحی و کلیه آزمایشات تحت تاثیر زوایای پرتاب سه گانه فوق صورت پذیرفت (شکل ۱). در این تحقیق از سه نوع مصالح با دانه‌بندی یکنواخت با مقادیر  $d_{50}$  برابر با  $1/4$  میلی‌متر،  $2/7$  میلی‌متر و  $8/1$  میلی‌متر به نام‌های دانه‌بندی  $A$ ،  $B$  و  $C$  با منحنی دانه‌بندی ارائه شده در شکل ۲ استفاده گردید.



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی مصالح بستر.

این اندازه‌ها با توجه به مصالح در دسترس انتخاب شدند. این مصالح در پایین دست مدل سرریز سیفونی مورد آزمایش از ابتدای خروج جت آب از باکت سرریز تا فاصله  $3\text{ m}$  و به ضخامت  $0.30\text{ m}$  ریخته شد. عمق تخصیص داده شده برای ضخامت مصالح، به منظور عدم تاثیر کف فلوم روی عمق آبخستگی انتخاب شد. برای برداشت توپوگرافی بستر از متر لیزری استفاده شد. محدوده متغیرهای آزمایشگاهی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- محدوده متغیرهای آزمایشگاهی به کار گرفته شده در تحقیق.

متغیر	دبی	ضخامت مصالح بستر	عمق پایاب	زاویه پرتاب
نماد	$Q (m^3s^{-1})$	$(m)$	$h_t (m)$	$\alpha (^\circ)$
محدوده	$0.1 - 0.497/0.392$	$0.30$	$0.1 - 15/35$	$60$ و $45$ و $30$

مدت زمان آزمایش یکی از عوامل تاثیرگذار بر میزان آبخستگی است. بیشینه عمق آبخستگی به

جدول ۴- پارامترهای بی بعد منتج از کمیات جدول ۳

ردیف	معادله
۱	$f\left(\frac{\phi}{d_{50}}, \frac{h_t}{d_{50}}, \frac{Q}{d_{50}^2 \sqrt{g(G_s-1)d_{50}}}, \alpha\right) = 0$
۲	$f\left(\frac{\phi}{d_{50}}, \frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)h_t}}, \alpha\right) = 0$
۳	$f\left(\frac{\phi}{h_t}, \frac{Q}{d_{50}^2 \sqrt{g(G_s-1)d_{50}}}, \alpha\right) = 0$
۴	$f\left(\frac{\phi}{h_t}, \frac{Q}{d_{50}^2 \sqrt{g(G_s-1)h_t}}, \alpha\right) = 0$
۵	$f\left(\frac{\phi}{h_t}, \frac{d_{50}}{h_t}, \frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)h_t}}, \alpha\right) = 0$
۶	$f\left(\frac{\phi}{d_{50}}, \frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)d_{50}}}, \alpha\right) = 0$

۳ و سپس پنج رابطه طبق جدول ۴ به دلیل ضریب تبیین بیشتر برای ابعاد حفره به عنوان معادله هدف انتخاب شدند.

جدول ۳- خلاصه نتایج تعیین متغیرهای تکراری و کمیت-

های بی بعد.

ردیف	متغیر تکراری	$\Pi_1$	$\Pi_2$	$\Pi_3$	$\Pi_4$	$\Pi_5$	$\Pi_6$
۱	$h_t, \rho_w, Q$	$\frac{\rho_s}{\rho_w}$	$\frac{Q \rho_w}{\mu h_t}$	$\frac{\phi}{h_t}$	$\frac{d_{50}}{h_t}$	$\frac{Q^2}{gh_t^5}$	$\alpha$
۲	$d_{50}, \rho_w, Q$	$\frac{\rho_s}{\rho_w}$	$\frac{Q \rho_w}{\mu d_{50}}$	$\frac{\phi}{d_{50}}$	$\frac{d_{50}}{d_{50}}$	$\frac{Q^2}{gd_{50}^5}$	$\alpha$
۳	$h_t, \mu, Q$	$\frac{Q \rho_s}{\mu d_{50}}$	$\frac{Q \rho_w}{\mu h_t}$	$\frac{\phi}{h_t}$	$\frac{d_{50}}{h_t}$	$\frac{Q^2}{gh_t^5}$	$\alpha$
۴	$d_{50}, \mu, Q$	$\frac{Q \rho_s}{\mu d_{50}}$	$\frac{Q \rho_w}{\mu h_t}$	$\frac{\phi}{d_{50}}$	$\frac{d_{50}}{d_{50}}$	$\frac{Q^2}{gd_{50}^5}$	$\alpha$

نتایج و بحث

پس از نصب سرریز سیفونی در ثلث وسط ابتدای فلوم میانی و به فاصله سی سانتیمتر از کف کانال، آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌ها برای سه نوع مصالح ذکر شده در تحقیق انجام گرفت. هر یک از مصالح به ضخامت سی سانتیمتر روی کف فلوم میانی ریخته شده و پس از تسطیح با پاروی چوبی، با استفاده از پمپ کفکش آب از انتهای قسمت میانی فلوم به داخل آن پمپ گردید. این کار ضمن حفظ سطح تسطیح شده مصالح، عمق پایاب مورد نظر را نیز تامین می‌کند. پس از روشن شدن پمپ اصلی، جریان آب با دبی از قبل تعیین شده پس از عبور از سرریز سیفونی به حالت پرتابی از روی باکت انتهایی وارد حوضچه استهلاک انرژی گردید. لحظه برخورد جت با سطح آب پایاب لحظه شروع هر آزمایش بود. پس از گذشت یک ساعت و سی دقیقه از هر آزمایش، برداشت توپوگرافی بستر که شامل اندازه‌گیری کلیه پارامترهای نشان داده شده در شکل ۱ است، انجام گرفت. با استفاده از پارامترهای بی بعد به دست آمده در ردیف پنج جدول ۴، تغییرات شاخص‌های هندسی حفره آبشستگی نسبت مورد بررسی قرار گرفت. تعداد کل آزمایش‌ها ۱۱۸ مورد ثبت گردید.

بررسی تغییرات ابعاد و موقعیت حفره

در این قسمت به بررسی تغییرات ابعاد و موقعیت حفره و نیز استخراج معادلات خطی و غیرخطی برای پیش‌بینی آنها پرداخته شده است. قبل از پرداختن به این موضوع، با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده ضریب همبستگی بین شاخص‌های حفره با سه پارامتر  $\frac{d_{50}}{h_t}$ ،  $\alpha$  و  $\frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)h_t}}$  محاسبه شدند که در جدول ۵ ارائه شده‌اند. با توجه به جدول ۵، بیشینه عمق آبشستگی همبستگی زیادی با شدت جریان و عمق پایاب دارد. البته باید توجه داشت رابطه بین  $d_s$  با  $Q$  رابطه مستقیم و با  $h_t$  رابطه عکس است. با افزایش دبی جریان به ازای عمق پایاب ثابت، سرعت جریان و به تبع آن انرژی جنبشی جت افزایش یافته و در نتیجه باعث جابجایی بیشتر ذرات و عمیق شدن حفره آبشستگی می‌شود.

در حالتی که مقدار دبی ثابت باشد با افزایش عمق پایاب قدرت استهلاک استخر نیز افزایش یافته و به دنبال آن قدرت فرسایشی جت کاهش خواهد یافت. نحوه تغییرات  $d_s$  در برابر  $\frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)h_t}}$  برای سه باکت با سه دانه‌بندی در شکل ۳ نشان داده شده است.

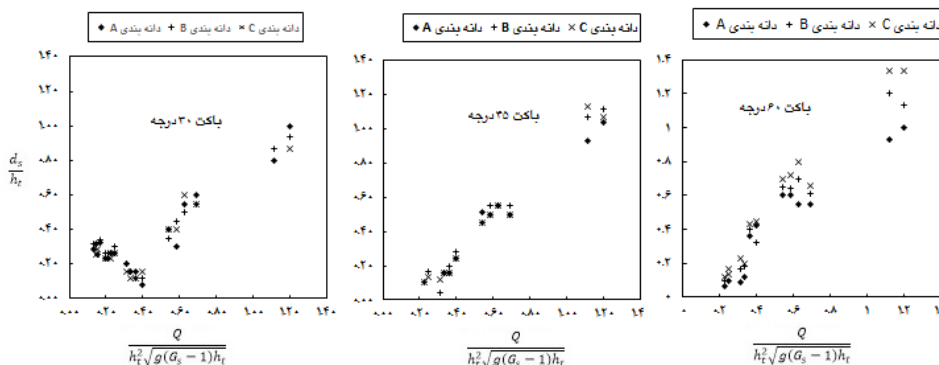


**جدول ۵- ضریب همبستگی شاخص‌های هندسی حفره با متغیرهای مستقل بی‌بعد.**

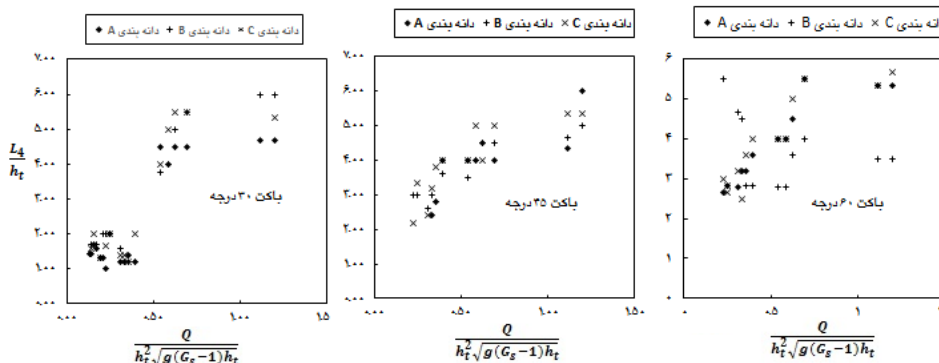
ردیف	متغیر حفره آبشستگی	ضریب همبستگی	
		$\frac{d_{50}}{h_t}$	$\frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)h_t}}$
۱	$d_s$	۰/۲۸۲۶	۰/۹۱۵۱
۲	$L_2$	۰/۱۲۸۵	۰/۰۹۳۶
۳	$L_3$	۰/۰۳۱۴	۰/۱۶۱۲
۴	$L_4$	۰/۲۲۳۵	۰/۸۰۹۰
۵	$L_6$	۰/۲۵۳۷	۰/۸۹۱۷
۶	$L_s$	۰/۲۳۸۲	۰/۸۶۶۱

شدت جریان‌های ثانویه و گردابی رو به بالادست است که منجر به جابجایی ذرات رسوبی و تشکیل پشته در خلاف جهت جریان می‌شوند. فاصله بیشینه عمق آبشستگی تا لبه سرریز،  $L_4$ ، فاصله پشته ایجاد شده در پایین‌دست تا سرریز،  $L_6$ ، و همچنین طول حفره آبشستگی،  $L_s$ ، تابعی از شرایط هیدرولیکی و کمترین تاثیر را از شرایط پرتاب جت و نیز اندازه ذرات رسوبی می‌گیرند. در شکل‌های ۴ تا ۶ نمودار تغییرات این سه پارامتر نسبت به متغیر  $\frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)h_t}}$  در سه باکت پرتابی نشان داده شده است. در نمودار مربوط به پارامتر  $L_6$  پراکندگی بیشتری مشاهده می‌شود. علت این پراکندگی تاثیر اندازه ذرات در تشکیل پشته پایین‌دست است که می‌توان با اعمال نقش آن، از پراکندگی نقاط کاست.

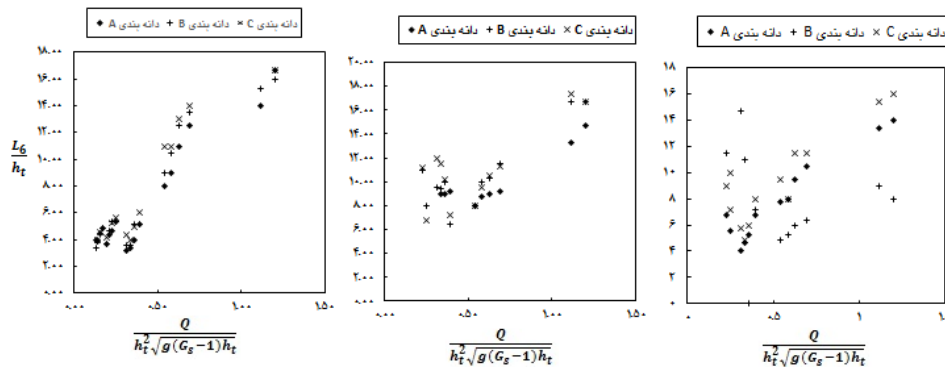
زاویه پرتاب باکت بیشترین تاثیر را در فاصله ارتفاع پشته بالادست،  $L_2$ ، و همچنین فاصله نقطه شروع حفره آبشستگی از سرریز،  $L_3$ ، دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت نحوه پرتاب و شرایط سقوط جت نقش بسیار مهمی در این زمینه ایفا می‌کنند. باید به این نکته توجه داشت که عامل اصلی در تشکیل پشته بالادست،



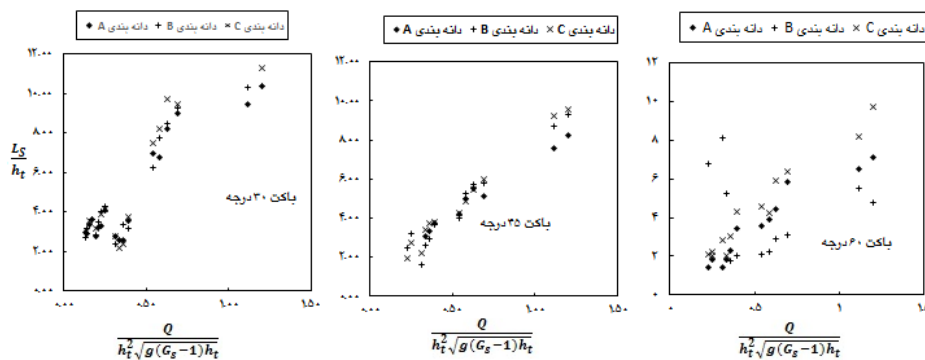
**شکل ۳- نمودار تغییرات  $\frac{d_s}{h_t}$  در برابر  $\frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)h_t}}$**



**شکل ۴- نمودار تغییرات  $\frac{L_4}{h_t}$  در برابر  $\frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)h_t}}$**



شکل ۵- نمودار تغییرات  $\frac{L_6}{h_t}$  در برابر  $\frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)h_t}}$



شکل ۶- نمودار تغییرات  $\frac{L_5}{h_t}$  در برابر  $\frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)h_t}}$

شبهه‌سازی شده و اندازه‌گیری معادلات خطی انجام گرفته است.

جدول ۶- ضرایب معادلات پیش‌بینی کننده ابعاد و موقعیت حفره آبشستگی.

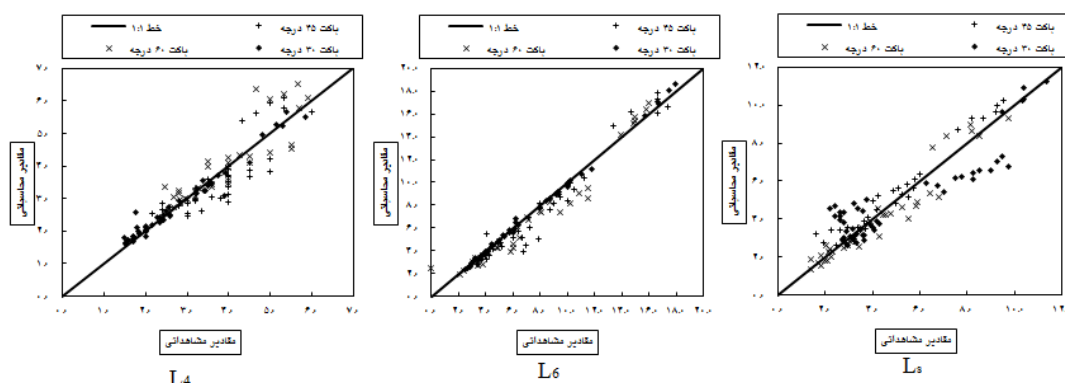
پارامتر						ضرایب	نوع معادله
$L_5$	$L_6$	$L_4$	$L_3$	$L_2$	$d_5$		
-۲۰/۸۱۵	-۳۵/۵۸	-۹/۱۲۵	-۰/۴۲۱	۷/۳۲	-۱/۵۸۹	a	۱
۷/۸۰۹	۱۴/۸۶	۳/۷۰	۰/۰۳۷۳	-۰/۲۵۱	۰/۹۲۴	b	
-۳/۶۲۷	-۳/۱۴۲	۱/۶۱۹	۴/۲۵	۲/۸۵۱	۰/۰۹۷	c	
۳/۹۳۵	۲/۷۷۶	۰/۴۶۱	-۱/۹۶	-۱/۴۴	-۰/۰۸۰۸	d	
۰/۹۲۱۹	۰/۹۳۸۱	۰/۸۷۱۸	۰/۸۷۱۸	۰/۸۴۲۶	۰/۹۱۶۵	ضرایب همبستگی	
-	-	-	-	-۰/۰۸۳	-۰/۰۶۸	a	۲
-	-	-	-	-۰/۰۹۵	۱/۱۴	b	
-	-	-	-	۲/۵۸	۰/۳۶۷	c	
-	-	-	-	۱/۷۸۴	۰/۷۴۸	d	
-	-	-	-	۰/۸۰	۰/۹۳۲۷	ضرایب همبستگی	

لازم به ذکر است نمودارهای ۴ تا ۶ براساس تغییر شاخص ابعاد و موقعیت حفره برحسب یک عامل بی‌بعد اصلی ترسیم شده‌اند. در ادامه با استفاده از نرم-افزار SPSS معادلات خطی و غیرخطی چند متغیره به منظور پیش‌بینی ابعاد و موقعیت حفره در قالب دو معادله زیر به دست آمد:

$$\frac{\phi}{h_t} = a \left( \frac{d_{50}}{h_t} \right) + b \left( \frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)h_t}} \right) + c\alpha + d \quad [13]$$

$$\frac{\phi}{h_t} = d \left( \frac{d_{50}}{h_t} \right)^a \left( \frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)h_t}} \right)^b \alpha^c \quad [14]$$

در جدول ۶ ضرایب به دست آمده برای هر دسته از معادلات ۱۳ و ۱۴ ارائه شده‌اند. لازم به ذکر است برای چهار پارامتر  $L_5$ ,  $L_6$ ,  $L_4$ ,  $L_3$  و  $d_5$  معادله غیرخطی حاصل نگردید. در شکل ۷ مقایسه‌ای بین نتایج



شکل ۷- مقایسه مقادیر برخی خصوصیات پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده حفره آبخستگی با استفاده از معادلات خطی.

### بررسی تغییرات و ابعاد پشته

غیرخطی پیش‌بینی کننده ارتفاع پشته‌های بالادست و پایین‌دست مربوط به معادلات (۱۳) و (۱۴) ارائه شده است.

جدول ۸- ضرایب معادلات پیش‌بینی کننده ابعاد پشته آبخستگی.

ردیف	نوع معادله	ضرایب	پارامتر	
			$h_d$	$h_u$
۱	خطی	$a$	۰/۱۶۴	-۰/۶۱۷
		$b$	۰/۴۶۸	-۰/۱۲۸
		$c$	-۰/۱۸۵	۰/۳۳۱
		$d$	۰/۲۷۸	-۰/۱۴
۲	غیرخطی	ضریب همبستگی	۰/۶۱۶۴	۰/۷۸۱۰
		$a$	۰/۱۸	-۰/۱۶۷
		$b$	۰/۶۱۸	-۰/۱۰
		$c$	-۰/۱۶۱	۲/۴۰
		$d$	۰/۶۱۲	۰/۰۷۴
		ضریب همبستگی	۰/۵۸۳۱	۰/۷۴۸۳

همانطور که از اعداد جدول ۸ مشخص است ضریب همبستگی هر دو مدل خطی و غیرخطی در پیش‌بینی ارتفاع پشته بالادست و پایین‌دست تقریباً معادل با یکدیگر بوده و دارای دقت نسبتاً قابل قبولی است. در مقایسه، مدل خطی دارای دقت بیشتری می‌باشد. شکل ۸ مقدار ارتفاع پشته‌های بالادست و پایین‌دست اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از معادلات خطی با ضرایب جدول ۸ را نشان می‌دهد. به منظور ارزیابی معادلات به دست آمده، مقایسه‌ای بین نتایج شبیه‌سازی پیشینه عمق آبخستگی با معادلات

عامل اصلی حرکت ذرات رسوبی به سمت پایین‌دست و تشکیل پشته پایین‌دست انرژی جریان و علت تشکیل پشته بالادست جریان گردابی و ثانویه ناشی از برخورد جت به بستر رسوبی است. در جدول ۷ ضریب همبستگی بین شاخص‌های پشته با سه پارامتر  $\frac{d_{50}}{h_t}$ ،  $\frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s - 1)h_t}}$  و  $\alpha$  ارائه شده‌اند.

جدول ۷- ضریب همبستگی شاخص‌های هندسی پشته با متغیرهای مستقل بی‌بعد.

ردیف	متغیر حفره آبخستگی	ضریب همبستگی	
		$\alpha$	$\frac{d_{50}}{h_t}$
۱	$h_u$	۰/۷۷۲۹	-۰/۰۷۸۴
۲	$h_d$	-۰/۰۶۵۹	۰/۵۹۵۸

همانطور که مشاهده می‌شود ارتفاع پشته بالادست ضریب همبستگی زیادی با زاویه پرتاب دارد و همبستگی آن با رسوب و شرایط هیدرولیکی جریان بسیار ناچیز است. به عبارت دیگر، قدرت جریان‌های ثانویه بوجود آمده پس از برخورد جت با کف بستر عامل اصلی تشکیل پشته بالادست می‌باشد. این تاثیر بخصوص در باکت ۳۰ درجه در آزمایش‌ها خود را نشان داد. در این زاویه پرتابه، پشته بالادست تحت هیچ شرایطی تشکیل نگردید. مشاهدات آزمایشگاهی نیز موید ضعف و عدم وقوع جریان روبه بالا در این پرتابه بود. ارتفاع پشته پایین‌دست متاثر از دبی و عمق پایاب جریان است. در جدول ۸ ضرایب معادلات خطی و

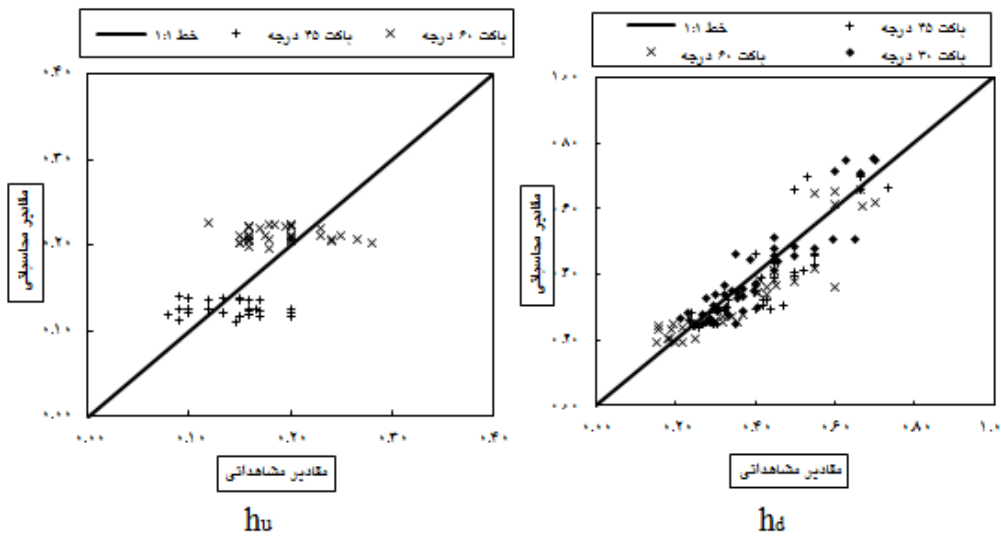
۰/۸۹۶۸	مومنی و همکاران	۳
۰/۸۶۵۴	بی‌ساز و تی‌شاپ	۴
۰/۹۳۲۷	معادله (۱۴)	۵

ضرایب همبستگی به دست آمده در این جدول ضمن تایید صحت مبانی این مدل نشان از دقت بسیار مناسب آن نسبت به روابط دیگر محققان را دارد.

ارائه شده در این تحقیق با معادلات دیگر محققان انجام گرفته است که نتایج آن در جدول ۹ نشان داده شده است.

جدول ۹- مقایسه معادلات ارزیابی کننده بیشینه عمق آبشستگی ارائه شده توسط محققان مختلف.

ردیف	نام معادله	ضریب همبستگی
۱	شوکلچ	۰/۸۳۴۲
۲	عظمت‌اله	۰/۹۵۶۴



شکل ۸- مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده پشته‌ها با استفاده از معادلات خطی.

### نتیجه‌گیری کلی

حفره آبشستگی به دست آمدند. پارامتر بی‌بعد  $\frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)} h_t}$  بیشترین تاثیر را در پارامترهای بیشینه عمق آبشستگی، طول حفره آبشستگی، فاصله بیشینه عمق آبشستگی تا لبه سرریز و فاصله پشته ایجاد شده در پایین‌دست تا لبه سرریز و زاویه پرتابه مهمترین نقش را در تعیین فاصله ارتفاع پشته ایجاد شده در بالادست تا لبه سرریز و فاصله نقطه شروع حفره آبشستگی تا لبه سرریز داشت. همچنین مشخص شد ترکیب خطی سه متغیر بی‌بعد مذکور بیشترین دقت را در پیش‌بینی ابعاد و موقعیت حفره دارد. تحلیل مشابه روی ارتفاع پشته‌های بالادست و پایین‌دست نشان داد زاویه پرتاب باکت و  $\frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)} h_t}$  به ترتیب بیشترین تاثیرگذاری در ارتفاع پشته بالادست و پایین‌دست دارند. معادله به دست آمده از ترکیب خطی سه متغیره،

در این تحقیق، بررسی خصوصیات مورفولوژیکی حفره آبشستگی همراه با ویژگی‌های پشته بالادست و پایین‌دست سرریز سیفونی با مقطع مستطیلی تحت سه زاویه پرتاب برای سه تیپ دانه‌بندی مواد بستری مورد مطالعه قرار گرفت. با استفاده از تئوری پی باکینگهام، سه متغیر بی‌بعد  $\frac{d_{50}}{h_t}$  و  $\frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)} h_t}$  با ترکیب متغیرهای تاثیرگذار در پدیده آبشستگی به منظور تحلیل ماکزیمم عمق آبشستگی، ارتفاع پشته بالادست و پایین‌دست، فاصله ارتفاع پشته ایجاد شده در بالادست تا لبه سرریز، فاصله نقطه شروع حفره آبشستگی تا لبه سرریز، فاصله ماکزیمم عمق آبشستگی تا لبه سرریز، فاصله پشته ایجاد شده در پایین‌دست تا لبه سرریز و طول

**تقدیر و تشکر**

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی داخلی با عنوان «عملکرد سازه‌ای سرریز سیفونی بر روی عمق آبشستگی پایین دست» می‌باشد که نویسندگان مقاله از دانشگاه آزاد اسلامی واحد رامهرمز بابت تامین کلیه هزینه‌های طرح، تقدیر و تشکر می‌نمایند.

بیشترین دقت را در پیش‌بینی ارتفاع پشته‌ها نتیجه داد. نتایج مقایسه نتایج به دست آمده از معادلات خطی با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد معادلات ارائه شده در این تحقیق از دقت قابل قبولی برای پیش‌بینی خصوصیات حفره آبشستگی و پشته‌های بالادست و پایین دست برخوردار هستند.

**منابع مورد استفاده**

- Azmathullah H Md, Deo MC and Deolalikar PB, 2005. Neural networks for estimation of scour downstream of ski-jump bucket. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 131(10): 898- 908.
- Bohrer JG, Abt SR and Wittler RJ, 1998. Prediction plunge pool velocity decay of free-falling rectangular jet. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE 124(10): 1043-1048.
- Bollaert E and Schleiss A, 2003. Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jet 2: experimental results of dynamic pressures at pool bottoms in one and two dimensional closed-end rock joints. *Journal of Hydraulics Research*. 41(5): 465-489.
- Farhodi G and Nasehi M, 1999. Scour profile at the downstream of vertical falling jet. Pp 71-78, *Proceeding of the 2nd National Hydraulic Conference, 25-27 November, Tehran, Iran*. (In Farsi).
- Ghodsian M, Azar A and abbasi A, 1999. Estimating of the maximum scour depth downstream of free-falling jet. Pp 372-278. *Proceeding of the 5th River Engineering Conference, 8-10 February, Ahvaz, Iran*. (In Farsi)
- Goyal MK, 2011. Estimation of Scour Downstream of a Ski Jump Bucket Using Support Vector and M5 Model Tree. *Journal of Water Resources Management*. 25: 2177-2195.
- Hager WH and Canepa S, 2003. Effect of jet air content on plunge pool scour. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE 129(5): 358-365
- Hartung F and Hausler E, 1973. Scours, stilling basins and downstream protection under free overall jets at dams. *Trans. of the 11th Congress on Large Dams*. Madrid, Spain.
- Hoffmans GJCM, 1998. Jet scour in equilibrium phase. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 124(4): 430-437.
- Lashkar-Ara B, Dehghani I and Zakermoshfegh B, 2016. Study of the vertical impinging jet's dynamic behavior in plunge pool. *Water and Soil Science-University of Tabriz*, 26(1/4): 1-11. (In Farsi)
- Lashkar-Ara1 B, Lashkar-Ara A and Fathi-Moghadam M, 2015. Estimation of scour hole dimensions due to vertical circular submerged jet. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 45(1): 41-52. (In Farsi)
- Mason PJ and Arumugan K, 1985. Free Jet Scour Below Dams and Flip Buckets. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 111(2): 220-235.
- Momeni Vesalian R, Mousavi Jahromi H and Shafaei Bajestan M, 2007. Scour of the rectangular jets at downstream of the ski-jump buckets. Pp 45-55. *Proceeding of the 7th River Engineering Conference, 13-15 February, Ahvaz, Iran*.
- Momeni Vesalian R, Mousavi Jahromi H and Shafaei Bajestan M, 2008. Local scour due to rectangular jet downstream of flip-bucket spillways with no uniform bed sediment. *Journal of Agriculture science and Natural Resources*, 15(2): 23-38. (In Farsi)
- Naghikhani A, Noori R, Sheikhan H and Ghiasi B, 2014. Estimating scour hole dimensions of ski jump downstream of dams using granular computing model. *Journal of Hydraulics*, 9(3): 45-60. (In Farsi)
- Nasiri S and Montazer G, 2001. Estimating of scour hole dimension downstream of free-falling jet by neural networks. Pp 301-108. *Proceeding of the 3rd national Hydraulic conference, Tehran, Iran*. (In Farsi)

- Shafaei Bejestan M and Razavi-Nabavi SM, 2013. Effects of upward seepage on scour depth downstream of the free-falling jets. Water and soil Science-University of Tabriz, 24(2): 81-92. (In Farsi)
- Veronese A, 1937. Erosion of a Bed Downstream from an Outlet. Colorado A&M College, Fort Collins, Colo.
- Wittler RJ, Annandale GW, Abt SR and Ruff JF, 1998. New technology for estimating plunge pool or spillway scour. Proceeding of 1998 annual conference of the association of state safety officials. October 11-14 Las Vegas.