

پیش بینی ابعاد حفره آبستگي پایین دست سرریز سیفونی تحت شرایط مستغرق

مهدی فولادی پناه^{۱*}، رضا جعفری نیا^۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹-۰۳-۲۷

صص: ۷۰-۵۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷-۱۲-۰۵

چکیده

در این تحقیق، ضمن بررسی آزمایشگاهی حفره ی آبستگي در پایین دست مدل فیزیکی سرریز سیفونی، معادلاتی برای پیش بینی توسعه آبستگي تحت شرایط مستغرق ارائه شده است. یک مدل آزمایشگاهی سرریز سیفونی همراه با سه باکت با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه برای سه نوع مواد رسوبی با اندازه ی متوسط ۸/۱، ۳/۷ و ۱/۴ میلی متر برای مطالعه ی روند شکل گیری چاله ی آبستگي مورد استفاده قرار گرفتند. به ازای چهار دبي ۳۹/۲، ۴۲/۱۲، ۴۵/۱۲ و ۴۹/۷۶ لیتر بر ثانیه و پنج عمق پایاب ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ سانتی متر مشخصات هندسی چاله ی آبستگي در قالب یک شبکه بندی ۱۰×۱۰ سانتی متری برداشت گردید. به کمک تحلیل ابعادی سه پارامتر بی بعد برای تحلیل نتایج آزمایشگاهی استخراج شدند. از بین مشخصات حفره ی آبستگي پارامترهای عمق حفره (d_s)، طول حفره (L_s) و فاصله تپه ی پایین دست تا لبه باکت پرتابی (L_6) مدلسازی عددی شدند. نتایج نشان داد افزایش دبي جریان منجر به افزایش و توسعه همزمان خصوصیات هندسی حفره آبستگي می شود. افزایش اندازه ی ذرات رابطه ی معکوسی با سه بعد حفره نشان داد. همچنین، کاهش زاویه ی پرتابی باکت منجر به کاهش d_s و L_s شد. بیشترین ضریب همبستگی بین عمق، طول حفره و فاصله تپه ی پایین دست تا لبه ی باکت به ترتیب با پارامترهای اندازه ذرات، زاویه پرتاب باکت و دبي/پایاب به دست آمد. در نهایت معادلاتی برای پیش بینی ابعاد فوق الذکر برحسب سه پارامتر بی بعد ارائه گردید.

کلمات کلیدی: مدل فیزیکی؛ سرریز سیفونی، توسعه آبستگي؛ تحلیل ابعادی.

^۱ استادیار، گروه عمران، واحد رامهرمز، دانشگاه آزاد اسلامی، رامهرمز، ایران

^۲ استادیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، گروه مهندسی آب، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

* نویسنده مسؤل مقاله: Email: fuladipناه@gmail.com

مقدمه

که در این معادله a, b, c, d, e, f و i توان‌های مستقل برای هر مطالعه، d_s قطر موثر ذرات، g شتاب ثقل، K ضریب مستقل مربوط به خصوصیات مواد بستری و پخشیدگی آنها، q دبی در واحد عرض روی سازه، u_0 سرعت جت روی سازه، y_{SE} عمق آبشستگی نهایی، Z_d ارتفاع سقوط و β' زاویه برخورد جت ریزشی با مواد بستری می‌باشند. گروه دیگری از معادلات توسط بومان و جولیان (۱۹۹۱)، موسا (۱۹۹۸) و دی‌آگوستین و فرو (۲۰۰۴) در قالب کلی زیر ارائه شدند:

$$\frac{y_{SE}}{Z} = a_1 \left[\frac{b_1}{Z_i} \right]^{a_2} \left[\frac{y_t}{H} \right]^{a_3} \left[\frac{Q}{b_1 Z_i \sqrt{g(G_s - 1) d_{90}}} \right]^{a_4} \left[\frac{d_{90}}{d_{50}} \right]^{a_5} \left[\frac{b_1}{B} \right]^{a_6} \quad (2)$$

که در این معادله a_i ضرایب ثابت مربوط به هر معادله، Q دبی جریان، d_{90} و d_{50} قطر ذرات، g شتاب ثقل، B عرض کانال، b عرض عبوری آب از روی سازه، H ارتفاع ریزشی جت، G_s وزن مخصوص نسبی ذرات رسوبی هستند. محققین مختلف در تحقیقات انجام شده خود طی دهه‌ی اخیر، عدد فرود ذره رسوبی با معادله $Fr = \frac{u}{\sqrt{gd_{50}}}$ را به عنوان یک پارامتر مهم در محاسبات مشخصات حفره‌ی آبشستگی معرفی نمودند که از جمله‌ی آنها می‌توان به بولارت و شلیس (۲۰۰۳)، دی و رایکار (۲۰۰۷)، پاگالیرا و همکاران (۲۰۰۹) اشاره نمود. مطالعه‌ی توسط اسکولاک و همکاران (۲۰۱۲) به منظور بررسی وضعیت فرسایش بستر و تغییرات آن در اثر جت ریزشی پرداختند. آنها در تحقیق خود ضمن اعمال پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی، عدد فرود ذره‌ی رسوبی را نیز در مطالعه خود اعمال نمودند. در نهایت معادله‌ای را برای تعیین حداکثر عمق آبشستگی با تحلیل ابعادی ارائه کردند. چاکراواری و همکاران (۲۰۱۳) با انجام تحقیق آزمایشگاهی به بررسی ابعاد جت دایروی قائم در رسوبات غیرچسبنده پرداختند. عظمت‌الله و همکاران (۲۰۰۵) به منظور برآورد خصوصیات چاله‌ی آبشستگی از هوش مصنوعی استفاده نمودند و با جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی متعدد معادلاتی را به فرم کلی زیر پیشنهاد دادند:

$$\frac{\Psi}{d_w} = a \left(\frac{q}{\sqrt{gd_w^3}} \right)^b \left(\frac{H}{d_w} \right)^c \left(\frac{R}{d_w} \right)^d \left(\frac{d_{50}}{d_w} \right)^e (\phi)^f \quad (3)$$

که در این معادله a, b, c, d, e, f ضرایب ثابت معادله، Ψ خصوصیت حفره آبشستگی (شامل عمق، طول و عرض)، q دبی در واحد عرض کانال، d_w عمق پایاب، H

سرریزها سازه‌های هیدرولیکی هستند که برای جلوگیری از سرریز شدن سیلاب‌های مازاد بر حجم ذخیره‌سازی از روی سد در بدنه‌ی سد یا خارج از آن تعبیه می‌شوند. سرریزهای سیفونی، در زمره‌ی آن دسته از سرریزهایی هستند که مقدار دبی مازاد بر دبی طراحی را با کمترین افزایش در تراز سطح آب در بالادست سد از خود عبور دهند. عدم استفاده از تجهیزات مکانیکی و عملکرد خودکار این گروه از سرریزها از جمله مزایای بسیار مهم آنها هستند. اما باید توجه داشت عبور جریان سیلابی از سرریزها پتانسیل بسیار زیادی برای ایجاد فرسایش و توسعه‌ی چاله‌ی فرسایشی در بستر پایین‌دست رودخانه دارد. ایجاد حفره‌ی فرسایشی پدیده‌ی بسیار مخربی از دیدگاه پایداری سازه‌ی است. دهه‌ی ۱۹۳۰ آغاز مطالعات حفره‌ی فرسایشی است. با توجه به اینکه فرسایش پدیده‌ی ترکیبی و دو فازی (آب و رسوب) است، مطالعه‌ی این فرآیند در پایین‌دست سرریزها جزء مطالعات بسیار پیچیده‌ی هیدرودینامیکی قرار می‌گیرد زیرا خصوصیات حفره‌ی فرسایشی تابعی از متغیرهای مختلف مانند دبی جریان، ذرات رسوبی، زمان، هندسه‌ی مجرا و ... است (خاتسوریا، ۲۰۰۵). عموماً، روش‌های مطالعات فرایند ایجاد چاله‌ی فرسایشی به صورت عددی، آزمایشگاهی و/یا ترکیبی انجام می‌شوند. خروجی مطالعات عددی محض، به تنهایی برای کاربردهای عملی قابل اطمینان نیستند. در مطالعات آزمایشگاهی ضمن برقراری تشابه دینامیکی و سینماتیکی، از تجهیزات پیشرفته و گاه ابزار دقیق برای اندازه‌گیری استفاده می‌شود. با این حال، به دلیل پیش‌بینی شرایط مختلف که امکان تحلیل آزمایشگاهی به دلیل محدودیت‌های زمانی، مکانی و تجهیزاتی وجود ندارد مطالعه‌ی ترکیبی اهمیت بسیار زیادی دارند. تحقیقات مختلفی برای پیش‌بینی خصوصیات چاله‌ی آبشستگی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی که جریان آب از روی آنها و/یا داخل آنها به پایین‌دست منتقل می‌شود ارائه شده است. در این زمینه می‌توان به معادلات تجربی ارائه شده توسط شوکلیچ (۱۹۳۲)، میسن و آروگومان (۱۹۸۵) و بومان (۱۹۸۸) به فرم زیر اشاره کرد:

$$y_{SE} + Z_d = K \left[\frac{q^a u_0^b H^c y_t^d \beta'^e}{g^f d_s^i} \right] \quad (1)$$

همانطور که مشاهده می شود وقوع حفره ی آبستنگی در پایین دست سازه های هیدرولیکی در بستر طبیعی موضوع مورد تحقیق در سال های اخیر نیز بوده است که خصوصیات هندسی بسیار متنوعی دارد و پیش بینی آنها از دیدگاه هیدرولیکی و سازه ای بسیار با اهمیت است. مرور منابع و تحقیقات انجام شده حاکی از عدم وجود مطالعه و بررسی خصوصیات حفره ی آبستنگی در پایین دست سرریز سیفونی می باشد که در این تحقیق ضمن بررسی آزمایشگاهی و عددی این پدیده، تلاش شده است روابط پیش بینی کننده خصوصیات هندسی آن نیز ارائه شود.

مواد و روش ها

عوامل تاثیرگذار در ابعاد حفره ی فرسایشی در چهار گروه زیر قابل بررسی هستند: (۱) مشخصات جریان مشتمل بر دبی جریان (Q)، جرم مخصوص سیال (ρ)، لزجت سیال (μ)، شتاب ثقل (g)، ارتفاع ریزش جت (H) و عمق پایاب (h_t)، لزجت سینماتیکی (ν)؛ (۲) مشخصه ی ذرات رسوبی مشتمل بر قطر مشخصه ی ذرات رسوبی (d₅₀)، وزن مخصوص نسبی ذرات رسوبی (G_s)، ضریب یکنواختی منحنی دانه بندی رسوب (C_u)، زاویه ایستایی ذرات رسوبی (θ)، فاکتور شکل (S.F.)؛ (۳) مشخصات هندسی مجرا مشتمل بر زاویه ی پرتابه باکت (α)، قطر مجرا (D)، شیب مجرا (S)، ضریب زبری مانینگ (n)؛ (۴) زمان. شدت ایجاد و توسعه چاله ی فرسایشی تابعی از زمان است به طوری که شدت آن در اوایل ایجاد حفره بسیار زیاد می باشد و با گذشت زمان از شدت آن کاسته می شود. در نهایت پس از رسیدن به حالت تعادل، چاله ی فرسایشی دچار تغییر نمی شود و ابعاد آن به حالت نهایی خود می رسند. در چنین حالتی تغییرات قابل توجهی در ترازهای بستر مشاهده نمی شود. لازم به ذکر است چون در این تحقیق، وضعیت نهایی ابعاد حفره آبستنگی مورد تحلیل قرار خواهد گرفت بنابراین از پارامتر زمان صرف نظر خواهد شد.

تحلیل ابعادی حفره ی آبستنگی

اگر Φ بیان کننده خصوصیات حفره ی آبستنگی در حالت کلی باشد رابطه بین خصوصیات هندسی حفره ی آبستنگی با پارامترهای موثر در آن را می توان به فرم زیر نوشت:

ارتفاع سقوط آب، d₅₀ اندازه متوسط ذرات رسوبی، R شعاع پرتابه و φ زاویه پرتابه باکت هستند. رجایی و همکاران (۱۳۹۶) در تحقیق خود به بررسی آبستنگی در پایین دست سازه ی کنترل بستر با پلان کنگره ای پرداختند. آنها در تحقیق خود ضمن مطالعه ی آزمایشگاهی، معادله ای برای پیش بینی حداکثر عمق آبستنگی ارائه دادند. مدل آنها انطباق رضایت بخشی با داده های اندازه گیری شده داشت. رضازاده و ستاری (۱۳۹۴) ضمن بررسی چاله ی آبستنگی در پایه ی پل، معادله ای برای پیش بینی حداکثر عمق آبستنگی از روش فرآیند گوسی پیشنهاد دادند. نتایج آنها حاکی از انطباق نسبتا مناسب نتایج مدل عددی با آزمایشگاهی داشت. نجفی و قدسیان (۱۳۸۴) ابعاد حفره ی آبستنگی در پایین دست کالورت دایره ای را به صورت آزمایشگاهی مطالعه نمودند. نتایج تحقیق آنها نشان داد عمق و عرض حفره با افزایش عمق پایاب کمتر ولی طول حفره و ارتفاع برآمدگی رسوبات بیشتر می شوند. مطالعه ای توسط نقی خانی و همکاران (۱۳۹۳) در خصوص تخمین ابعاد حفره ی آبستنگی پایین دست جام پرتابی سدها بر مبنای مدل محاسبات دانه ای انجام شده است. نتایج نشان داد ابعاد حفره تاثیرپذیری زیادی از تغییرات دبی، ارتفاع آبشار و متوسط اندازه ی ذرات رسوبی دارد ولی تاثیرپذیری ناچیزی از زاویه لبه ی قوس جام دارند. تحقیقی بر مبنای روش ماشین بردار (SVM) در دو حالت با بعد و بدون بعد توسط رحیمی و همکاران (۱۳۹۶) در مطالعه خود به صورت آزمایشگاهی ابعاد چاله ی فرسایشی را در آبشکن ها تحت شرایط مستغرق بررسی نمودند. نتایج آنها حاکی از کاهش ابعاد چاله با افزایش ضریب نفوذپذیری آبشکن ها بود. مطالعه ای توسط هوشیاری پور و نوری (۱۳۹۲) به منظور بررسی ابعاد چاله ی آبستنگی در پایین دست پرتابه ی جامی شکل انجام شد. آنها ضمن مقایسه ی این روش با روش های تجربی و ANN به این نتیجه رسیدند که هر دو روش ANN و SVM دقت قابل قبولی دارند و برتری هر دو روش نسبت به فرمول های تجربی کاملا مشخص است. اسمعیلی ورکی و همکاران (۱۳۹۴) حداکثر عمق آبستنگی را در اطراف گروه پایه ی کج بر مبنای سیستم استنتاج فازی-عصبی انجام دادند. نتایج تحقیق آنها حاکی از دقت بسیار زیاد مدل ANFIS در پیش بینی نتایج بود.

انجام آزمایش‌ها یک سرریز سیفونی از جنس پلاستیکی - گلاس به طول ۷۷ سانتیمتر، ارتفاع ۹۵ سانتیمتر و عرض ۳۰ سانتیمتر طراحی و در ابتدای قسمت میانی فلوم آزمایشگاهی در وسط عرض فلوم و به فاصله ۳۰ سانتیمتری از کف فلوم طوری نصب گردید که چاله‌ی فرسایشی ایجاد شده در پایین دست آن، تحت تاثیر دیواره‌های فلوم قرار نگیرد. همچنین سه باکت با زوایای پرتاب ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه برای این سرریز طراحی و کلیه آزمایشات تحت تاثیر زوایای پرتاب مختلف ذکر شده صورت پذیرفت. آزمایش‌ها با سه تیپ ذره‌ی رسوبی طبیعی با منحنی دانه‌بندی نشان داده شده در شکل ۲ با اندازه‌ی d_{50} برابر با $1/4$ (mm)، $3/7$ (mm) و $1/1$ (mm) به ترتیب با ضریب یکنواختی منحنی دانه‌بندی $1/5$ ، $1/38$ و $1/54$ و وزن مخصوص نسبی $2/64$ محاسبه شدند. هریک از آزمایش‌ها با یکی از مصالح با قطر مشخص که درون فلوم ریخته شده بود با یک دبی و عمق پایاب ثابت انجام می‌شد و بعد از هر آزمایش و انجام اندازه‌گیری‌های لازم مصالح شسته شده مجدداً به درون حفره‌ی آبشستگی برگردانده می‌شد و سطح مصالح هموار می‌گردید. سپس با افزایش پایاب به میزان پنج سانتیمتر، دوباره با همان شرایط قبلی آزمایش تکرار می‌شد. تمام آزمایش‌ها برای هر باکت جدید تکرار شد. برای تنظیم عمق پایاب، از دریچه‌ی مستطیلی تعبیه شده در انتهای فلوم استفاده شد. در مجموع ۱۲۵ آزمایش انجام گرفت. ابعاد مورد نظر با استفاده از یک عمق سنج لیزری با دقت ± 1 (mm) اندازه‌گیری شد. داده‌ها بر روی شبکه‌ای با ابعاد $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ برداشت می‌شدند. برای رسیدن به زمان تعادل چندین آزمایش با شرایط متفاوت هیدرولیکی و زمان‌های مختلف انجام شد و مشاهده شد که پس از گذشت یک ساعت و سی دقیقه از شروع آزمایش، آبشستگی تقریباً به حالت تعادل می‌رسد و تغییرات پروفیل بستر بعد از گذشت این مدت بسیار ناچیز است. لذا مدت زمان یک ساعت و سی دقیقه برای تمام آزمایشات در نظر گرفته شد.

$$\Phi = f(Q, \rho, \mu, g, H, h_t, v, d_{50}, G_s, C_u, \theta, S.F., \alpha, D, S, n) \quad (4)$$

با توجه به تعدد پارامترهای موثر در آبشستگی و عدم امکان بررسی نقش هر یک در حفره‌ی آبشستگی به دلیل محدودیت‌های زمانی، آزمایشگاهی و تجهیزاتی از تعدادی متغیرهای مستقل که نقش مهمی ندارند صرف‌نظر می‌شود. لذا با لحاظ متغیرهای اساسی، پارامترهای بی‌بعد با استفاده از تئوری پی-باکینگهام به دست خواهند آمد. به دلیل ثابت بودن شیب مجرا، ابعاد مجرا و زبری مجرای جریان می‌توان مقدار این متغیرها را ثابت فرض نمود. با توجه به یکنواخت بودن دانه‌بندی رسوبات، متغیرهای انحراف معیار، زاویه ایستایی و شکل ذرات نیز چشمپوشی شد. بنابراین با توجه به مطالب بالا، معادله ۴ به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\Phi = f(Q, \rho, g, H, h_t, d_{50}, G_s, \alpha) \quad (5)$$

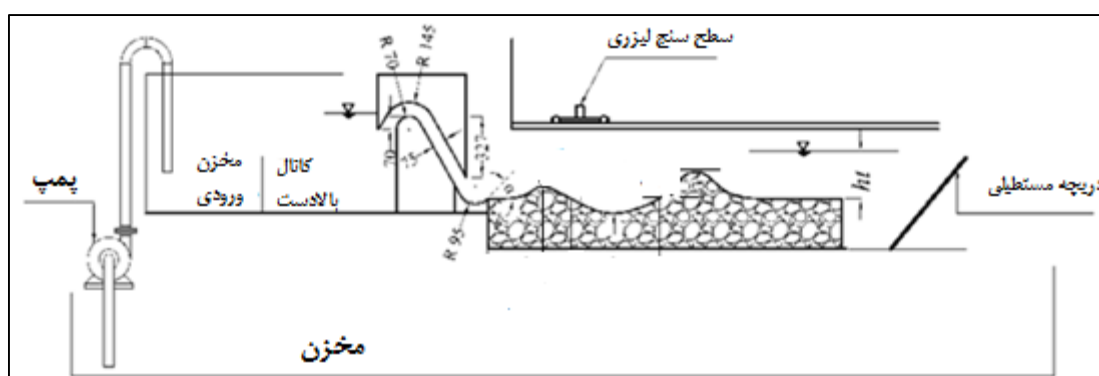
با آنالیز ابعادی به کمک تئوری پی-باکینگهام، معادله‌ی ۵ را می‌توان به فرم زیر نوشت:

$$\frac{\Phi}{h_t} = f\left(\frac{d_{50}}{h_t}, \frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s - 1)h_t}}, \alpha\right) \quad (6)$$

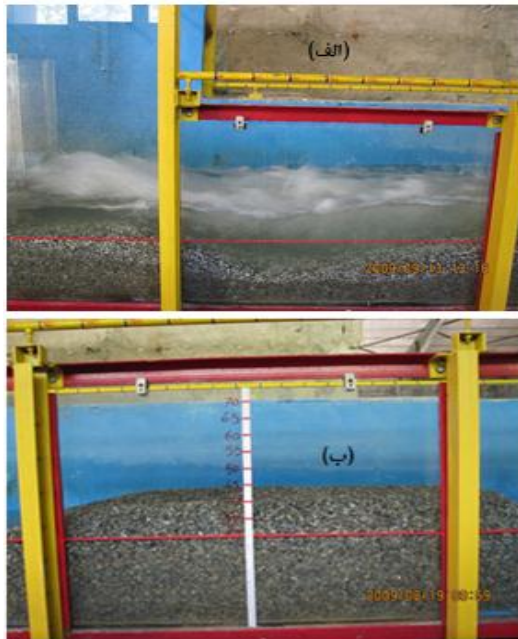
همانطور که ذکر شد در این معادله Φ بیانگر خصوصیات حفره‌ی آبشستگی در این تحقیق است. لازم به ذکر است تنها آن دسته از ابعاد حفره که ضریب همبستگی زیادی با پارامترهای مستقل بی‌بعد داشته‌اند در این مقاله ارائه شده‌اند.

برپایی چیدمان آزمایشگاهی

در شکل ۱ نمایی شماتیک از مدل فیزیکی سرریز سیفونی و حفره‌ی آبشستگی نشان داده شده است. آزمایش‌ها روی فلوم با شیب تغییرپذیر به طول ۱۹ متر، عرض ۱۰۰ سانتیمتر و ارتفاع ۷۰ سانتیمتر انجام شد. برای



شکل ۱ نمایی شماتیک از مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه



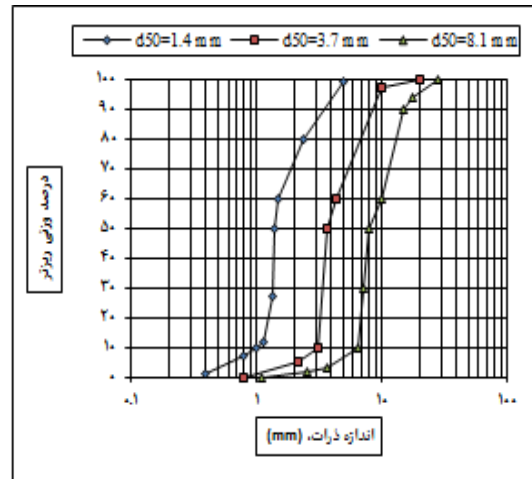
شکل ۴ حفره آبشستگی حین (الف) و پس از تشکیل (ب)

نتایج و بحث

همانطور که ذکر شد جت آب پس از خروج از پرتابه‌ی سرریز سیفون با مواد بستری کف فلوم برخورد می‌کند و باعث جابجا شدن ذرات رسوبی می‌شود. این جابجایی باعث شکل‌گیری حفره می‌گردد. سرعت تشکیل چاله در ابتدا زیاد و پس از گذشت زمان به تعادل می‌رسد. با تغییرات مشخصات جریان و رسوب، ابعاد حفره نیز تغییر می‌کند. در این راستا، به تحلیل تغییرات چاله همراه با معادلات پیش‌بینی کننده‌ی هر یک خصوصیات چهارگانه فوق‌الذکر چاله‌ی آبشستگی پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است در ادامه $X1, Y, X2$ و $X3$ به ترتیب نشان دهنده‌ی پارامترهای بی‌بعد $\frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)h_t}}$ ، $\frac{d_{50}}{h_t}$ ، $\frac{\phi}{h_t}$ و α هستند که در آن ϕ بیانگر خصوصیات حفره‌ی آبشستگی است.

عمق آبشستگی ماکزیمم

حداکثر مقدار آبشستگی برای تعیین عمق محافظت در پایین‌دست سرریز سیفونی کاربرد دارد. جدول ۲ آماره‌های توصیفی پارامترهای بی‌بعد و ماتریس ضریب همبستگی را نشان می‌دهد.

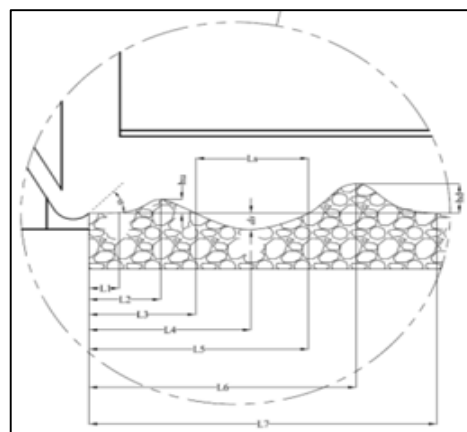


شکل ۲ منحنی دانه‌بندی مواد رسوبی

در انتهای فلوم، یک سرریز مستطیلی برای اندازه‌گیری دبی جریان نصب شده بود. سطح آب به کمک یک سطح‌سنج با دقت ± 0.1 (mm) ثبت می‌گردید. محدوده‌های داده‌های آزمایشگاهی در جدول ۱ ارائه شده‌اند. در شکل ۳ نمایی از ابعاد حفره‌ی آبشستگی که در این تحقیق اندازه‌گیری شده‌اند نشان داده شده است. شکل‌های ۴-الف و ۴-ب تصاویری از حفره‌ی آبشستگی در حین تشکیل شدن و در انتهای آزمایش و رسیدن به حالت تعادل را نمایش می‌دهند.

جدول ۱ محدوده‌ی متغیرهای مستقل آزمایشگاهی

α (Degree)	h_t (cm)	d_{50} (mm)	Q (l/s)
۳۰-۶۰	۱۵-۳۵	۱/۴-۸/۱	۳۹/۲-۴۹/۷۶



شکل ۳ نمادگذاری ابعاد حفره‌ی آبشستگی در

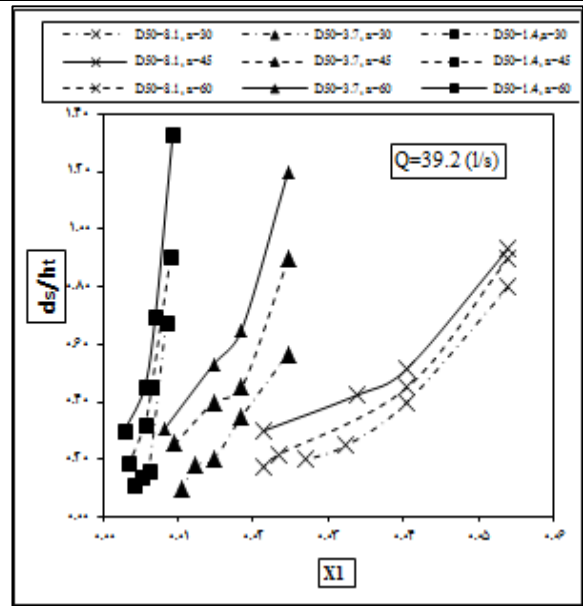
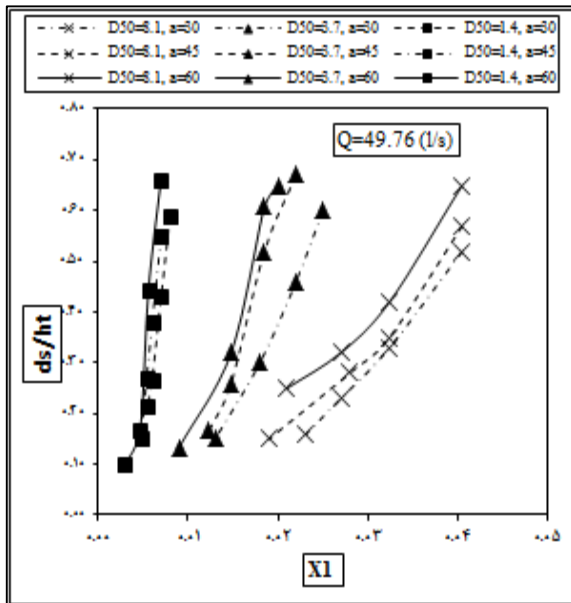
تحقیق (منبع: نویسنده مقاله)

پارامترهای مستقل $X1 = \frac{d_{50}}{h_t}$ و $X2 = \frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)h_t}}$ برای پرتابه‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. طبق شکل ۵، به ازای یک دبی معین، با کاهش عمق پایاب و در نتیجه افزایش $X1$ به ازای یک قطر از مصالح رسوبی، عمق حفره‌ی آبشستگی افزایش می‌یابد. این افزایش در قطرهای کوچکتر، شدت بیشتری دارد. همچنین شکل ۵ نشان می‌دهد در دبی‌های زیاد، شدت تغییرات برای هر نوع دانه‌بندی نسبت به دبی‌های کم بیشتر است. با افزایش دبی، عمق ماکزیمم آبشستگی برای هر دانه‌بندی افزایش نشان می‌دهد. نکته دیگر تاثیر زاویه‌ی پرتابه باکت می‌باشد. با افزایش زاویه، عمق آبشستگی بیشتر می‌شود که دلیل آن کاهش مولفه‌ی افقی سرعت جت و در نتیجه افزایش مولفه‌ی قائم بردار سرعت می‌باشد که نهایتاً زیاد شدن عمق حفره را در پی دارد. روند افزایش عمق آبشستگی با افزایش $X2$ در شکل ۶ نیز قابل مشاهده است. در این شکل نیز بیشترین عمق آبشستگی مربوط به پرتابه‌ی ۶۰ درجه و کمترین مقدار مربوط به باکت ۳۰ درجه است. اما نمودارهای مربوط به باکت ۳۰ درجه رفتار متمایزتری نسبت به دو باکت دیگر تحت پایاب‌های کم دارند. همانطور که مشخص است عمق آبشستگی برای باکت ۳۰ درجه از پایاب ۱۵ تا ۲۰ سانتیمتر کاهش نشان می‌دهد. کمترین عمق آبشستگی در پایاب ۲۰ سانتیمتری رخ داده است. پس از آن، عمق آبشستگی حفره افزایش نشان می‌دهد. دلیل این پدیده می‌تواند وقوع جریان‌های ثانویه و گردابی باشد که در باکت ۳۰ درجه از قدرت بیشتری نسبت به دیگر پرتابه‌ها برخوردار هستند و باعث بازگشت مواد رسوبی معلق به کف بستر می‌شود. با کاهش عمق پایاب، قدرت جریان‌های ثانویه در باکت ۳۰ درجه نیز کاهش می‌یابد و نحوه تغییرات منحنی آن مشابه دو پرتابه‌ی دیگر می‌شود. همچنین می‌توان مشاهده نمود با افزایش دبی، شدت تغییرات عمق آبشستگی نیز افزایش می‌یابد.

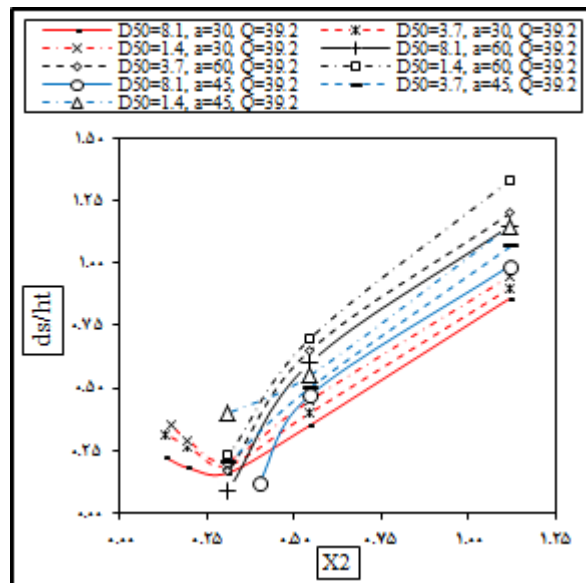
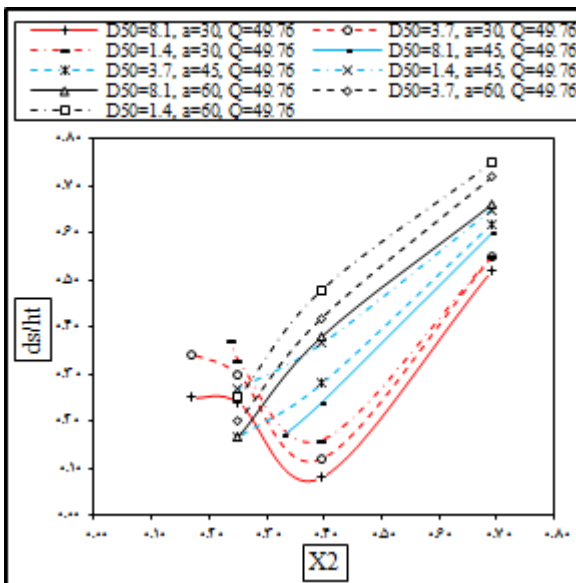
جدول ۲ آماره‌های توصیفی و ماتریس همبستگی $\frac{d_s}{h_t}$

آماره‌های توصیفی				
متغیر	X1	X2	X3	Y
تعداد داده‌ها	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸
مقدار ماکزیمم	۰/۰۵۴	۱/۲۰۱۴۰	۱/۰۴۷۲۰	۱/۳۳۳۳
مقدار مینیمم	۰/۰۰۴	۰/۱۳۴۴	۰/۵۲۳۶	۰/۰۴۰۰
متوسط	۰/۰۱۹۹	۰/۵۱۰۹۴	۰/۷۵۶۵۶	۰/۴۳۳۴
انحراف معیار	۰/۰۱۳۸	۰/۳۱۳۰	۰/۲۲۱۲	۰/۳۱۱۱
ماتریس همبستگی				
	X1	X2	X3	Y
X1	۱	۰/۳۷۷	۰/۰۳۷۴	۰/۲۸۲۸
X2	۰/۳۷۷	۱	۰/۱۷۴۱	۰/۹۱۵۱
X3	۰/۰۳۷۴	۰/۱۷۴۱	۱	۰/۲۲۸۲
Y	۰/۲۸۲۸	۰/۹۱۵۱	۰/۲۲۸۲	۱

همانطور که در این جدول مشخص است، ماکزیمم عمق آبشستگی همبستگی زیادی با شدت جریان و عمق پایاب دارد و این امر نشان دهنده‌ی آن است که پارامتر $X2$ ، پارامتری مهم و موثر در آبشستگی می‌باشد. مشاهده‌ی های آزمایشگاهی نیز موید این مطلب هستند. دو پارامتر بی‌بعد $X1$ و $X3$ در رتبه‌های بعدی همبستگی قرار دارند. متغیر $X2$ هم شدت جریان و هم عمق پایاب را در خود دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت این دو پارامتر سهم بسیار مهمی در تعیین عمق آبشستگی ایفا می‌کنند. البته با توجه به تاثیر سه پارامتر مستقل $X1$ ، $X2$ و $X3$ در تعیین ماکزیمم عمق آبشستگی، برای نمایش تاثیر تغییرات دبی، دانه‌بندی و زاویه‌ی پرتابه باکت، نمودار تغییرات $\frac{d_s}{h_t}$ به ازای دو دبی برای دانه‌بندی‌های سه گانه نسبت به تغییرات



شکل ۵ تغییرات $\frac{d_s}{h_t}$ نسبت به $\frac{d_{50}}{h_t}$ با لحاظ متغیرهای آزمایشگاهی مختلف



شکل ۶ تغییرات $\frac{d_s}{h_t}$ نسبت به $\frac{Q}{h_t^2 \sqrt{G_s - 1} h_t}$ با لحاظ متغیرهای آزمایشگاهی مختلف

اطمینان ۹۵ درصد (خطوط قرمز) رسم شده است. جدول ۳ خلاصه‌ی شاخص‌های آماری داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط معادله‌ی ۷ در خصوص ماکزیمم عمق آبستگي را ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند مدل عددی ارائه شده در معادله‌ی ۷ نتایج بسیار رضایت‌بخشی در بر داشته است.

با استفاده از روش تحلیل آماری، معادله‌ی پیش‌بینی کننده حداکثر عمق آبستگي به طوری که بیشترین همبستگی را با داده‌های اندازه‌گیری شده داشته باشد به فرم زیر به دست آمد:

$$\frac{d_s}{h_t} = 0.748 \left(\frac{d_{50}}{h_t} \right)^{-0.068} \left(\frac{Q}{h_t^2 \sqrt{G_s - 1} h_t} \right)^{1.14} \alpha^{0.367} \quad (7)$$

در شکل ۷ داده‌های محاسبه شده از فرمول فوق در برابر داده‌های اندازه‌گیری شده همراه با محدوده سطح

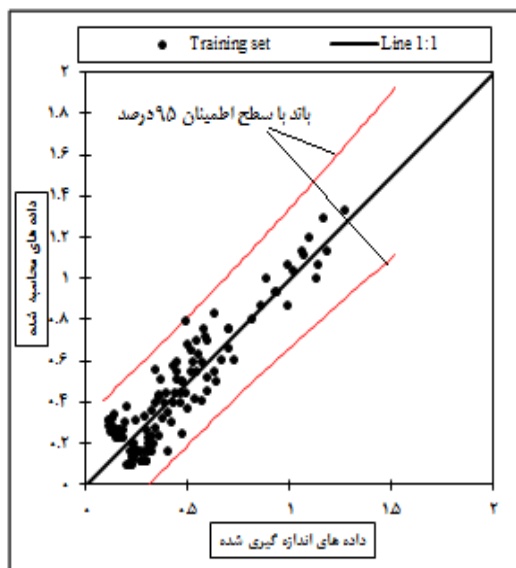
فرسایشی است. جدول ۴ آماره‌های توصیفی پارامترهای بی بعد را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود از بین سه پارامتر بی بعد، زاویه پرتاب باکت با ضریب همبستگی ۰/۸۳۵۷، بیشترین تاثیر را در طول حفره‌ی آبستنگی به خود اختصاص داده است. اندازه‌ی ذرات رسوبی و دبی به ترتیب با ضرایب همبستگی ۰/۱۲۸۵ و ۰/۰۹۳۶ در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

جدول ۴ آماره‌های توصیفی و ماتریس همبستگی $\frac{L_s}{h_t}$

آماره‌های توصیفی				
متغیر	X1	X2	X3	Y
تعداد داده‌ها	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸
مقدار ماگزیمم	۰/۰۵۴	۱/۲۰۱	۱/۰۴۷	۲/۳۳
مقدار مینیمم	۰/۰۰۴	۰/۱۳۴	۰/۵۲۳	۰/۰
متوسط	۰/۰۱۹۸	۰/۵۱۱	۰/۷۵۶	۰/۷۳۳
انحراف معیار	۰/۰۱۳۸	۰/۳۱۳	۰/۲۲۱	۰/۷۴۳

ماتریس همبستگی				
	X1	X2	X3	Y
X1	۱	۰/۳۷۷۳	۰/۳۷۴	۰/۱۲۸۵
X2	۰/۳۷۷۳	۱	۰/۱۷۴۱	۰/۰۹۳۶
X3	۰/۳۷۴	۰/۱۷۴۱	۱	۰/۸۳۵۷
Y	۰/۱۲۸۵	۰/۰۹۳۶	۰/۸۳۵۷	۱

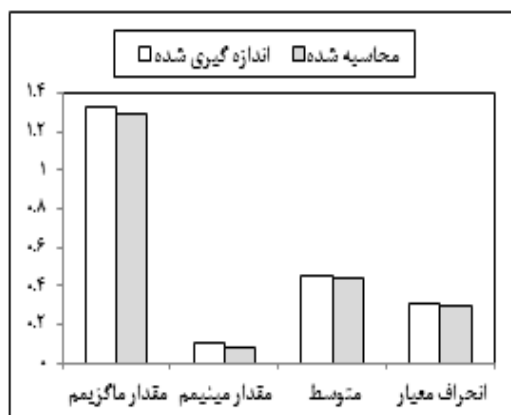
به منظور مشاهده‌ی تاثیر تغییرات متغیرهای هیدرولیکی و رسوبی روی طول چاله‌ی آبستنگی، تغییرات طول نسبی حفره‌ی آبستنگی در برابر X1 و X2 تحت دو دبی مختلف به ازای سه دانه‌بندی و زوایای پرتابه‌های سه گانه به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. طبق شکل ۹، به ازای یک دبی معین، با افزایش زاویه‌ی پرتابه باکت طول حفره‌ی آبستنگی کاهش پیدا می‌کند که دلیل آن کاهش مولفه‌ی افقی سرعت و در نتیجه کاهش قدرت جریان در جابجا کردن افقی ذرات رسوبی است. همچنین با بیشتر شدن دبی جریان، نرخ افزایش طول حفره‌ی آبستنگی نیز زیاد می‌شود. در شکل ۱۰، افزایش طول حفره همزمان با افزایش متغیر X2 نیز قبل مشاهده است. همانطور که انتظار می‌رود منحنی تغییرات مربوط به زاویه‌ی پرتابه‌ی ۳۰ درجه بالاتر از منحنی تغییرات مربوط به پرتابه‌های ۴۵ و ۶۰ درجه قرار دارد. طبق شکل ۱۰، شدت تغییرات طول حفره با افزایش دبی، بیشتر می‌شود.



شکل ۷ داده‌های پیش بینی شده و اندازه گیری شده $\frac{d_s}{h_t}$

جدول ۳ مقایسه‌ی داده‌های اندازه گیری شده و محاسبه شده $\frac{d_s}{h_t}$

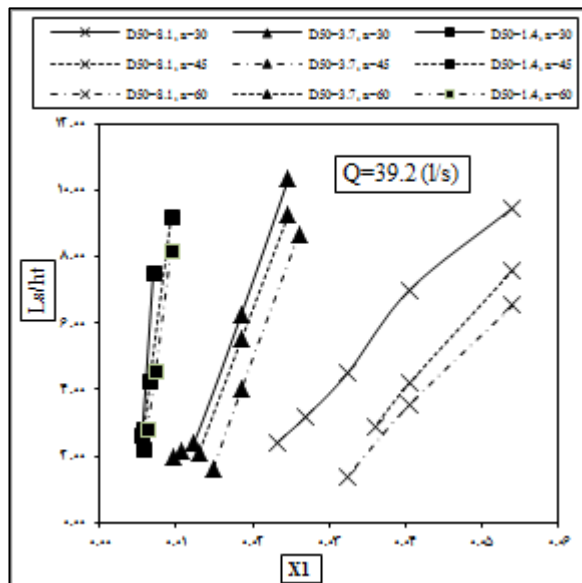
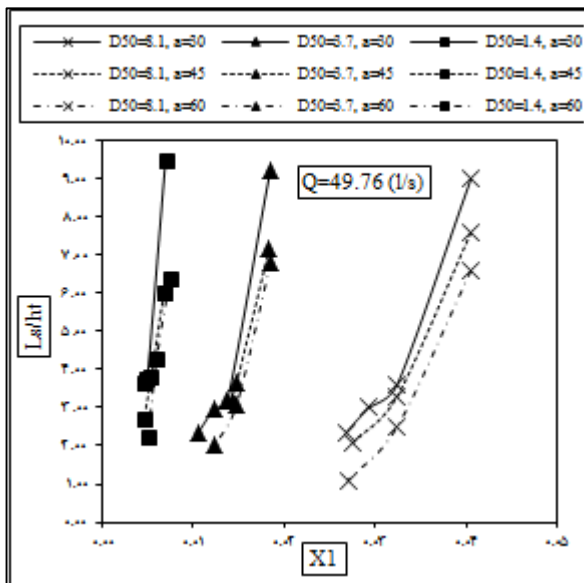
آماره‌های توصیفی		
متغیر	داده‌های اندازه گیری شده	داده‌های محاسبه شده
تعداد داده‌ها	۱۲۵	
مقدار ماگزیمم	۱/۳۳	۱/۲۹۳
مقدار مینیمم	۰/۱۰۰	۰/۰۷۷
متوسط	۰/۴۵۵	۰/۴۴۰
انحراف معیار	۰/۳۰۶	۰/۲۹۹



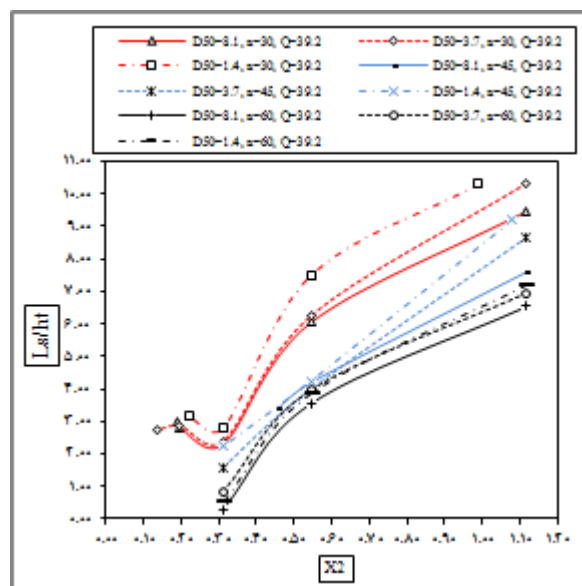
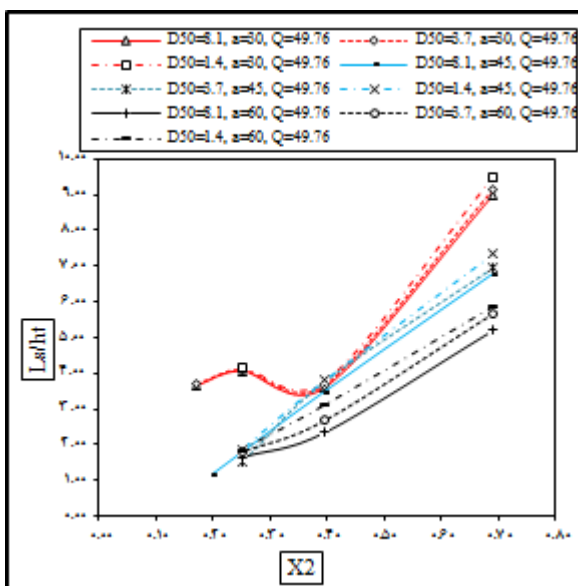
شکل ۸ بیان گرافیکی از مقایسه شاخص‌های آماری d_s

طول حفره‌ی آبستنگی

این طول، نشان دهنده‌ی فاصله‌ی بین نقطه انتهایی تپه‌ی بالادست و نقطه‌ی شروع تپه‌ی پایین دست چاله‌ی



شکل ۹ تغییرات $\frac{L_s}{h_t}$ در برابر $\frac{d_{50}}{h_t}$ به ازای متغیرهای مختلف آزمایشگاهی



شکل ۱۰ تغییرات $\frac{L_s}{h_t}$ در برابر $\frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)h_t}}$ به ازای متغیرهای مختلف آزمایشگاهی

۵ خلاصه‌ی شاخص‌های آماری مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده را ارائه می‌دهد. در شکل ۱۲ بیان گرافیکی از جدول ۵ ارائه شده است.

با استفاده از روش تحلیل آماری، معادله‌ی پیش‌بینی کننده طول حفره‌ی آبستگي به طوری که بیشترین همبستگی را با داده‌های اندازه‌گیری شده داشته باشد به فرم خطی زیر به دست آمد:

$$\frac{L_s}{h_t} = 7.809 \left(\frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)h_t}} \right) - 20.815 \left(\frac{d_{50}}{h_t} \right) - 3.627\alpha + 3.935 \quad (8)$$

در شکل ۱۱ داده‌های محاسبه شده از معادله‌ی ۸ در برابر داده‌های اندازه‌گیری شده همراه با محدوده‌ی سطح اطمینان ۹۵ درصد (خطوط قرمز) رسم شده است. جدول

فاصله تپه پایین‌دست از لبه باکت

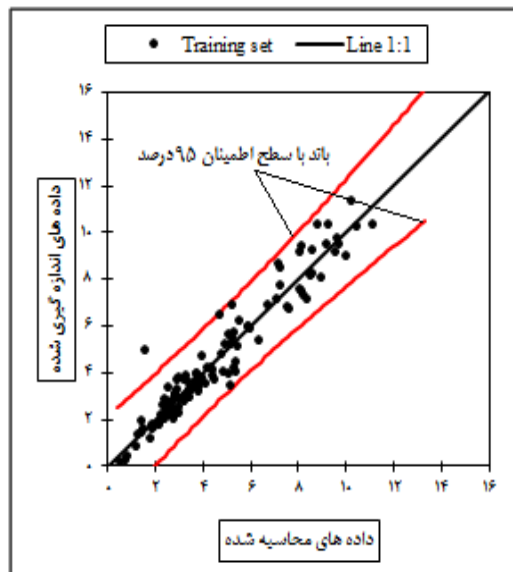
همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است این فاصله بیانگر ماگزیمم ارتفاع پشت‌پشته‌ی پایین‌دست حفره آبستنگی از لبه‌ی باکت می‌باشد که با L_6 نمادگذاری شده است. جدول ۶ شاخص‌های توصیفی پارامترهای بی‌بعد مربوط به L_6 را نشان می‌دهد.

جدول ۶ آماره‌های توصیفی و ماتریس همبستگی $\frac{L_6}{h_t}$

آماره‌های توصیفی				
متغیر	X1	X2	X3	Y
تعداد داده‌ها	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸	۱۱۸
مقدار ماگزیمم	۰/۰۵۴	۱/۲۰۱	۱/۰۴۷	۲/۳۳
مقدار مینیمم	۰/۰۰۴	۰/۱۳۴	۰/۵۲۳	۰/۰
متوسط	۰/۰۱۹۸	۰/۵۱۱	۰/۷۵۶	۰/۷۳۳
انحراف معیار	۰/۰۱۳۸	۰/۳۱۳	۰/۲۲۱	۰/۷۴۳

ماتریس همبستگی				
	X1	X2	X3	Y
X1	۱	۰/۳۲۶۵	۰/۱۱۷۸	۰/۲۵۳۷
X2	۰/۳۲۶۵	۱	۰/۱۷۴۱	۰/۸۹۱۷
X3	۰/۱۱۷۸	۰/۱۷۴۱	۱	۰/۰۱۹۸۲
Y	۰/۲۵۳۷	۰/۸۹۱۷	۰/۰۱۹۸۲	۱

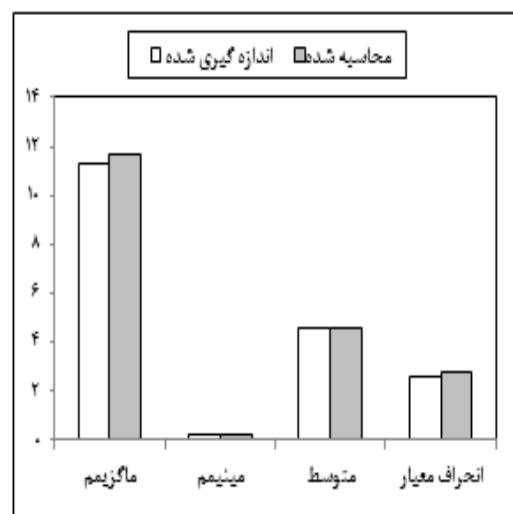
طبق ماتریس همبستگی جدول ۶، پارامتر مستقل X_2 با ضریب همبستگی ۰/۸۹۱۷، بیشترین تاثیر را در مقدار L_6 دارد. پارامترهای X_1 و X_3 به ترتیب با ضریب همبستگی ۰/۲۵۳۷ و ۰/۰۱۹۸۲ در رتبه‌های بعدی قرار دارند. به عبارتی، دبی جریان و عمق پایاب در رشد و گسترش طولی حفره‌ی آبستنگی نقش بسیار پر اهمیتی دارند. واضح و روشن است زاویه‌ی پرتاب باکت کمترین همبستگی را پارامتر L_6 دارد. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب تاثیر جداگانه تغییرات پارامترهای X_2 و X_3 بر روی L_6 نشان داده شده است. در شکل ۱۳، افزایش فاصله‌ی بین تپه پایین‌دست تا لبه باکت نسبت به پارامتر X_1 مشهود است. با افزایش دبی، شدت تغییرات L_6 نیز افزایش نشان می‌دهد. طبق این شکل، با کاهش زاویه پرتابه باکت، متغیر L_6 افزایش پیدا می‌کند. افزایش متغیر L_6 نسبت به افزایش پارامتر X_2 در شکل ۱۴ مشخص است. اما نرخ و نحوه‌ی تغییرات با افزایش دبی متفاوت است. با بیشتر شدن دبی جریان، منحنی‌های محدب به منحنی‌هایی مقعر



شکل ۱۱ داده‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده

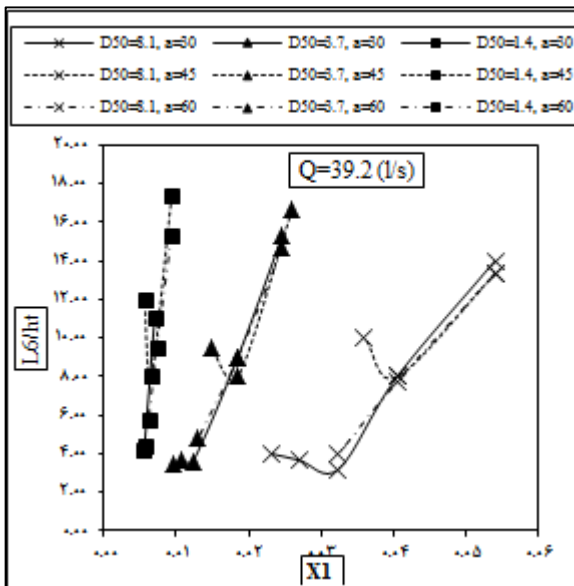
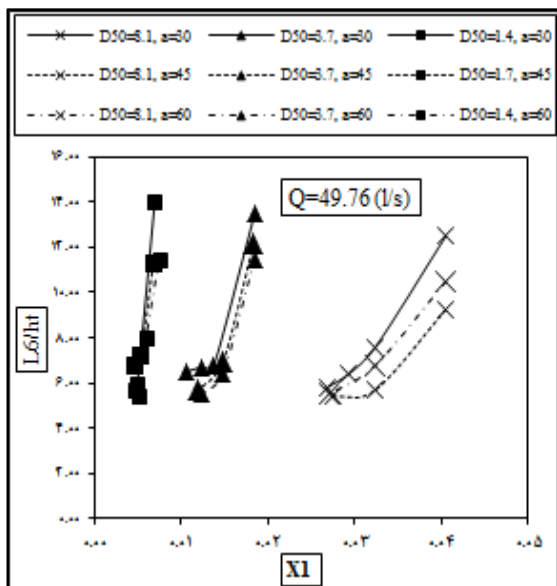
جدول ۵ مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده $\frac{L_6}{h_t}$

آماره‌های توصیفی		
متغیر	داده‌های اندازه‌گیری شده	داده‌های محاسبه شده
تعداد داده‌ها	۱۲۵	
مقدار ماگزیمم	۱۱/۳۳	۱۱/۷۲
مقدار مینیمم	۰/۲۰	۰/۱۹۸۸
متوسط	۴/۵۷۲	۴/۶۲۲
انحراف معیار	۲/۶۳۸	۲/۷۷۶

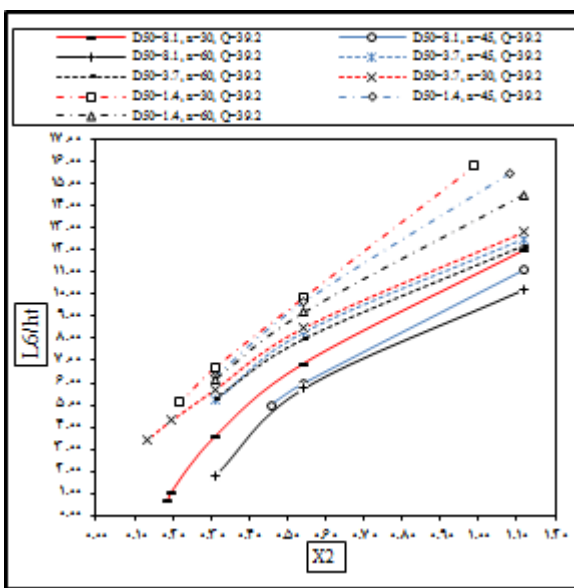
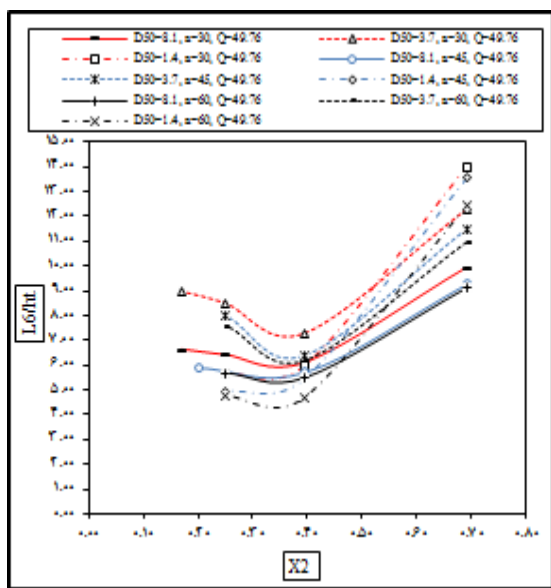


شکل ۱۲ بیان گرافیکی مقایسه شاخص‌های آماری $\frac{L_6}{h_t}$

با شیب نسبتا زیاد تبدیل می شوند. این تغییر وضعیت، نشان دهنده ی تاثیر چشمگیر دبی و پایاب بر L_6 است.



شکل ۱۳ نمودار تغییرات $\frac{L_6}{h_t}$ در برابر $\frac{d_{50}}{h_t}$ به ازای متغیرهای مختلف آزمایشگاهی



شکل ۱۴ تغییرات $\frac{L_6}{h_t}$ در برابر $\frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)h_t}}$ به ازای متغیرهای مختلف آزمایشگاهی

اطمینان ۹۵ درصد (خطوط قرمز) رسم شده است. جدول ۷ خلاصه ی شاخص های آماری مقادیر اندازه گیری شده و پیش بینی شده را ارائه می دهد. در شکل ۱۶ بیان گرافیکی از جدول ۷ ارائه شده است.

با انجام محاسبات آماری، معادله ی پیش بینی کننده ی خطی زیر که بیشترین انطباق را بین مقادیر محاسباتی و اندازه گیری نشان می دهد به دست آمد:

$$\frac{L_6}{h_t} = 14.86 \left(\frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)h_t}} \right) - 35.58 \left(\frac{d_{50}}{h_t} \right) - 3.142a + 2.776 \quad (9)$$

در شکل ۱۵ داده های محاسبه شده از فرمول فوق در برابر داده های اندازه گیری شده همراه با محدوده ی سطح

باکینگهام به دست آیند. بدین منظور مدل آزمایشگاهی یک سرریز سیفونی با جنس پلاکسی‌گلاس تحت شرایط هیدرولیکی، سازه‌ای و رسوبی مختلف برای مطالعه حفره آبشستگی ساخته شد. عمق آبشستگی، طول حفره و فاصله تپه پایین‌دست از لبه باکت ابعادی بودند که مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفتند. به کمک تحلیل ابعادی سه پارامتر مستقل بی‌بعد شامل α ، $\frac{d_{50}}{h_t}$ و $\frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)h_t}}$ برای پیش‌بینی ابعاد چاله به دست آمدند. نتایج به دست آمده نشان داد:

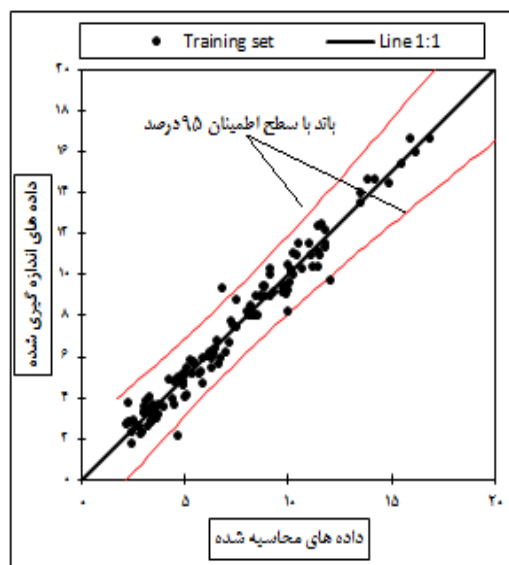
۱. اندازه‌ی ذرات رابطه‌ی معکوس با عمق آبشستگی دارد به طوری که افزایش اندازه‌ی ذرات باعث کاهش عمق آبشستگی می‌گردد. بیشترین ضریب همبستگی بین $\frac{L_6}{h_t}$ و $\frac{L_6}{h_t}$ برابر با ۰/۹۱۵۱ به دست آمد. مشاهده گردید عمق پایاب تأثیر معکوس در عمق آبشستگی دارد. افزایش عمق پایاب باعث استهلاک بهتر انرژی جت می‌گردد که نتیجه‌ی آن کاهش عمق آبشستگی است.

۲. طول حفره‌ی آبشستگی نیز با اندازه ذرت، زاویه-ی پرتابی و عمق پایاب رابطه‌ی معکوس ولی با دبی جریان رابطه‌ی مستقیم دارد. بیشترین ضریب همبستگی برای توصیف طول حفره، متعلق به زاویه‌ی پرتابی باکت، α ، معادل با ۰/۸۱۵۱ به دست آمد. مولفه‌ی افقی سرعت در زاویه‌ی پرتابی باکت، نقش مهمی در طول حفره‌ی آبشستگی ایفا می‌کند.

۳. گسترش طولی چاله‌ی آبشستگی رابطه‌ی معکوسی با اندازه‌ی ذرات، عمق پایاب و زاویه‌ی پرتابی و رابطه‌ی مستقیمی با دبی جریان نشان داد. بیشترین ضریب همبستگی فاصله‌ی تپه‌ی پایین‌دست تا لبه‌ی باکت معادل $\frac{Q}{h_t^2 \sqrt{g(G_s-1)h_t}}$ با پارامتر حاصل شد.

منابع

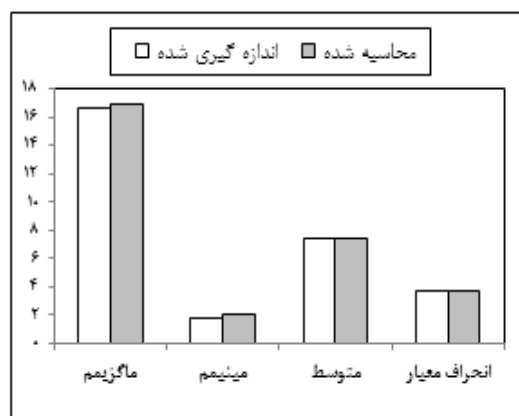
- اسمعیلی‌ورکی م، کنعانی ا، نوابیان م، اشرف سح، ۱۳۹۴. پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی اطراف گروه پایه کج با استفاده از سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۲(۸): ۲۸۳-۲۹۴.
- رضازاده ع، ستاری م، ۱۳۹۴. تخمین عمق چاله آبشستگی پایه پل در سازه‌های آبی با روش رگرسیون فرایند گاوسی. مجله تحقیقات مهندسی سازه‌های آبی و زهکشی، ۱۶(۶۵): ۱۹-۳۶.



شکل ۱۵ داده‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده

جدول ۷ مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده $\frac{L_6}{h_t}$

آماره‌های توصیفی		
متغیر	داده‌های اندازه‌گیری شده	داده‌های محاسبه شده
تعداد داده‌ها	۱۲۵	
مقدار ماگزیمم	۱۶/۶۷	۱۶/۹۴
مقدار مینیمم	۱/۸۰	۲/۰۸۲
متوسط	۷/۳۹۵	۷/۴۱۰
انحراف معیار	۳/۶۶۳	۳/۶۳۲



شکل ۱۶ بیان گرافیکی مقایسه شاخص‌های آماری $\frac{L_6}{h_t}$

نتیجه‌گیری

در این مقاله، تلاش شد تا معادلات غیرخطی برای توصیف و پیش‌بینی ابعاد حفره آبشستگی در پایین‌دست سرریز سیفونی با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و تئوری

- 16) Mason PJ, Arumugam K, 1985. Free jet scour below dams and flipbuckets. *J. Hydraul. Eng., ASCE*, 111(2): 220-235.
- 17) Mossa M, 1998. Experimental study on the scour downstream of grade-control structures. *Proc., 26th Convengno di Idraulica e Construzioni Idrauliche, Cataniai, Italy, September*, 3: 581-594.
- 18) Pagliara S, Roy D, Palermo M, 2009. 3D plunge pool scour with protection measures. *J. of Hyd.- Env. Res.*, 4: 225-233.
- 19) Schoklitsch A, 1932. Kolkbildung unter uberfallstrahlen. *Wasserwirtschaft*, 343.
- 20) Scurlock SM, Thornton CI, Abt SR, 2012. Equilibrium Scour Downstream of Three-Dimensional Grade-Control Structures. *J. Hydraul. Eng., ASCE*, 138: 167-176.
- ۳) رجایی ا، اسمعیلی ورکی م، شفیع ثابت ب، ۱۳۹۶. مطالعه آزمایشگاهی آبستگي موضعی در پایین دست سازه های کنترل تراز بستر با پلان کنگره ای. تحقیقات مهندسی سازه های آبیاری و زهکشی. ۶۸(۱۸): ۱۲۹-۱۴۲.
- ۴) رحیمی س، کاشفی پور س م، شفاعةی بجستان م، فتحی ا، ۱۳۹۶. بررسی آزمایشگاهی ابعاد هندسی چاله آبستگي در آبشکن های مختلف در قوس ۹۰ درجه در شرایط غیرمستغرق. نشریه آب و خاک. ۳۱(۱): ۱۰۱-۱۱۱.
- ۵) نجفی ج، قدسیان م، ۱۳۸۳. بررسی آزمایشگاهی ابعاد حفره آبستگي پایین دست کالورت لوله ای. نشریه دانشکده فنی، ۳۸(۲): ۳۲۹-۳۳۸.
- ۶) نقی خانی ا، نوری ر، شیخیان ح، قیاسی ب، ۱۳۹۳. تخمین ابعاد چاله آبستگي پایین دست جام پرتابی سدها با استفاده از مدل محاسبات دانه ای. مجله هیدرولیک. ۹(۳): ۴۵-۶۰.
- ۷) هوشیاری پور ف، نوری ر، ۱۳۹۲. استفاده از تکنیک ماشین بردار پشتیبان در پیش بینی ابعاد چاله آبستگي پایین دست یک پرتابه جامی شکل. مهندسی آب و محیط- زیست ایران. ۱۱(۱): ۳۵-۴۵.
- 8) Azmathullah HMD, Deo MC, Deolalikar PB, 2005. Neural networks for estimation of scour downstream of ski-jump bucket. *J. of Hydraul. Eng., ASCE*, 131(10): 898-908.
- 9) Bollaert EFR, Schleiss AJ, 2003. Scour of rock due to the impact of plunging high-velocity jets", Part II: experimental results of dynamic pressures at pool bottoms and in one and two dimensional closed end rock joints", *J. Hydraul. Res.* 40(5): 15-30.
- 10) Bormann NE, Julien PY, 1991. Scour downstream of grade-control structures. *J. Hydraul. Eng., ASCE*, 117(5): 579-594.
- 11) Bormann NE, 1988. Equilibrium local scour depth downstream of grade-control structures." Ph.D. dissertation, Dept. of Civil Engineering, Colorado State Univ., Fort Collins, CO.
- 12) Chakravarti A., Jain RK, Kothiyari UC, 2013. Scour under Submerged Circular Vertical Jets in Cohesion-less Sediments. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 17(2): 175-192.
- 13) D'Agostino V, Ferro V, 2004. Scour on alluvial bed downstream of grade-control structures. *J. Hydraul. Eng.*, 130(1): 24-37.
- 14) Dey S, Raikar RV, 2007. Scour below a high vertical drop. *J. Hydraul. Eng., ASCE*, 133(5): 564-568.
- 15) Khatsuria RM, 2005. *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipaters*. Marcel Dekker Press., New York: 129-147.

