

آبشستگی ناشی از جت‌های مستطیلی در پائین‌دست پرتابه‌های جامی شکل با مصالح غیر یکنواخت

* رضا مؤمنی وصالیان^۱، سیدحبیب موسوی جهرمی^۲ و محمود شفاعی بجمستان^۳

^۱ استادیار گروه کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم‌آباد، استادیار گروه سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه شهید چمران اهواز،

^۲ استاد گروه سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۸۶/۱/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۸۷/۲/۱۱

چکیده

از پرتابه‌های جامی شکل در انتهای سرریز سدهای بلند، به‌منظور کاهش هزینه‌ها، در مقایسه با دیگر سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی، استفاده می‌شود. آبشستگی ناشی از برخورد جت آب با بستر رودخانه می‌تواند پایداری سرریز، سد و سازه‌های مرتبط را به مخاطره بیندازد، ضمن این‌که تجمع مواد فرسایش یافته می‌تواند با تغییر رقوم پایاب، بر عملکرد خروجی سدها یا نیروگاه‌ها تأثیر بگذارد. در این پژوهش برای بررسی پدیده آبشستگی و عوامل مؤثر بر آن، ابتدا با استفاده از آنالیز ابعادی، روابط کلی برای حداکثر عمق آبشستگی، ارتفاع تپه‌های بالادست و پایین‌دست حفرة آبشستگی، به‌صورت تابعی از متغیرهای بدون بعد، حاوی پارامترهای شدت جریان، ضخامت جت، ارتفاع ریزش، اندازه ذرات و SN (نسبت مجموع نیروهای محرک به مجموع نیروهای مقاوم در حرکت ذره تحت تأثیر جریان آب) به‌دست آمده و سپس با انجام آزمایش‌های متعدد، در شرایط هیدرولیکی مختلف و دانه‌بندی‌های مختلف، نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و مدل‌های خطی و توانی چند متغیره، برای پیش‌بینی آنها به‌دست آمده است. بهترین مدل‌ها برای برآورد حداکثر عمق آبشستگی، با استفاده از متغیرهای بدون بعد از شدت جریان، ارتفاع ریزش، اندازه ذرات و عمق پایاب به‌دست آمده و در ضمن متغیر SN رابطه قوی با حداکثر عمق آبشستگی نشان نداده است. برای پیش‌بینی ارتفاع تپه‌های بالادست و پایین‌دست نیز، مدل‌های چندان قوی به‌دست نیامده است. برای بررسی توانمندی مدل‌های به‌دست آمده از این پژوهش، مجموعه‌ای از داده‌های محققان دیگر نیز جمع‌آوری و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان داده‌است که دقت مدل‌های ارائه شده در این پژوهش بیشتر از مدل‌های قبلی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، جت‌های ریزشی، جت‌های مستطیلی، پرتابه جامی شکل، سازه مستهلک‌کننده انرژی

مقدمه

سیلاب‌هایی که از روی سدها عبور می‌کنند، مورد توجه قرار گرفته است. آب‌های اضافی از مخازن سدها به‌وسیله سرریز به یک سیستم استهلاک انرژی جنبشی و

در سال‌های اخیر نیاز به کاهنده‌های انرژی جنبشی به‌منظور استهلاک انرژی جنبشی جت آب ناشی از

تاکنون مطالعات زیادی بر روی آبشستگی انجام شده است از جمله میسن (۱۹۸۵) برخی از روابطی را که محققان بر روی حداکثر عمق آبشستگی ارائه نموده بودند جمع‌آوری و آنها را تجزیه و تحلیل نمود. از جمله روابط شوکلیچ، ورونس (A)، ورونس (B)، اگنبرگر، هارتونگ، فرانکی، دامل (A)، دامل (B)، دامل (C)، چی و پادیر، بی‌ساز و تی‌شاپ، چی و کونگ، مارتینز (B)، تاراموویچ، ماکادو و سوفرلک بود. براساس مطالعات میسن (۱۹۸۵)، روابطی که از شدت جریان، ارتفاع ریزش و اندازه ذرات در پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی استفاده می‌کنند به قدر کافی دقت دارند و وارد کردن پارامترهای دیگر، پیش‌بینی‌ها را در حد قابل قبولی بهبود نمی‌بخشد. همچنین در مقاصد عملی، بدون آنکه زمان به‌عنوان پارامتر مهمی در نظر گرفته شود می‌توان آبشستگی را بررسی نمود. بلایسدل و آندرسون (۱۹۹۱) مطالعات خود را برای ارائه روش طراحی پلانچ‌پول در زیر جت‌های مدور انجام دادند. هافمن (۱۹۹۸) با به‌کار بردن قانون دوم نیوتن رابطه‌ای نیمه‌تحلیلی برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی ارائه نمود. بوهرر و همکاران (۱۹۹۸) روابطی را ارائه نمودند که نحوه استهلاك سرعت جت را، پس از ورود

یا ناحیه‌ای در پایین‌دست رودخانه انتقال داده می‌شوند. برای تخلیه سیلاب از کنار و یا از روی سدها، روش‌های متعددی وجود دارد. یک روش آن است که جریان را به‌صورت آزاد در هوا رها کرد. این هدف با احداث سرریزهای آزاد آبشاری مستقر در تراز نزدیک به تاج سد^۱، یا سرریزهای تند آب^۲ منتهی به جام پرتاب‌کننده^۳، یا با سرریزهای روزنه‌ای و یا دریچه‌های مستقر در ترازهای پایین سد حاصل می‌شود. انتخاب نوع سرریز مشکل عمده نیست بلکه مسئله اصلی آن است که جریان سیلاب به‌نحوی تخلیه گردد که آبشستگی در پایین‌دست سازه رخ ندهد و یا میزان آن محدود باشد. جریان آب به‌صورت یک جت آزاد پرانرژی جنبشی^۴ ریزش و در نهایت به محلی در پایین‌دست سد برخورد می‌نماید که موجب حرکت مواد بستر و ایجاد حفره آبشستگی می‌گردد و در نهایت ممکن است منجر به شکست سرریز شود. مرسوم‌ترین روش استهلاك انرژی جنبشی و کاهش ابعاد حفره آبشستگی ایجاد استخری عمیق در محل برخورد جت با بستر رودخانه است. این امر نیازمند تخمین ابعاد حفره آبشستگی می‌باشد.

جدول ۱- بعضی روابط موجود برای پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی.

رابطه	محقق	رابطه	محقق
$D = 1.663 q^{0.6} H^{0.2} / d_m^{0.1}$	چی و پادیر	$D = 0.521 q^{0.57} H^{0.2} / d_{90}^{0.32}$	شوکلچ
$D = 2.76 q^{0.5} H^{0.25} / d_{90}$	بی‌ساز و تی‌شاپ	$D = 0.202 q^{0.54} H^{0.225} / d_m^{0.42}$	ورونس A
$D = 1.663 q^{0.6} H^{0.2} / d_m^{0.1}$	چی و کونگ	$D = 1.9 q^{0.54} H^{0.225}$	ورونس B
$D = 1.5 q^{0.6} H^{0.1}$	مارتینز B	$D = 1.44 q^{0.6} H^{0.5} / d_{90}^{0.4}$	اگنبرگر
$D = 0.663 q^{0.67} H^{0.25}$	تاراموویچ	$D = 1.44 q^{0.64} H^{0.36} / d_{85}^{0.32}$	هارتونگ
$D = 1.35 q^{0.5} H^{0.3145} / d_{90}^{0.0645}$	ماکادو	$D = 1.13 q^{0.67} H^{0.5} / d_{90}^{0.5}$	فرانکی
$D = 2.30 q^{0.6} H^{0.1}$	سوفرلک	$D = 0.652 q^{0.5} H^{0.5}$	دامل (A)
$D = 0.362 q^{0.5} H^{0.5}$	دامل (C)	$D = 0.543 q^{0.5} H^{0.5}$	دامل (B)
$\frac{D}{h_r} = 6.916 \left(\frac{q}{\sqrt{g h_r^3}} \right)^{0.694} \left(\frac{H}{h_r} \right)^{0.0815} \left(\frac{R}{h_r} \right)^{-0.233} \left(\frac{d_{50}}{h_r} \right)^{0.196} \phi^{0.196}$			عظمت‌اله
$D = k q^x H^y h^w / g^z d^z$			میسن
$k=(6.42-3.1/H^{0.1})$, $x=(0.6-H/300)$, $y=(0.15-H/200)$, $v=0.3$, $w=0.15$, $z=0.1$ برای پروتوتایپ $d=0.25$ و برای مدل $d=d_0$			

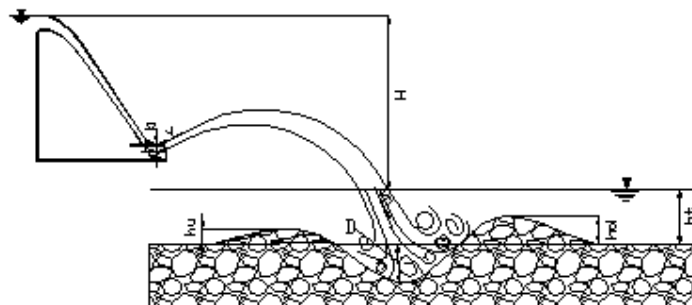
- 1- Overflow Spillway
- 2- Chute Spillway
- 3- Flip Bucket
- 4- Plunging Jet

۱ ارائه شده است. در این جدول q : دبی جریان در واحد عرض (m^2/s) ، اندازه ذرات (m) ، H : ارتفاع ریزش که اختلاف ارتفاع بین سطح آب مخزن و پایاب است، (m) ، ϕ : زاویه پرتابه جامی شکل و D : حداکثر عمق آبشستگی (m) ، است که از سطح پایاب اندازه گیری می شود. همان گونه که در جدول ۱ مشاهده می شود بیشتر روابط از پارامترهای با بعد q ، H و d در تخمین حداکثر عمق آبشستگی استفاده کرده اند ولی در پژوهش حاضر هدف استخراج رابطه بدون بعد می باشد تا کارائی بیشتری داشته باشد. برای رسیدن به این هدف ابتدا با استفاده از آنالیز ابعادی و نظریه باکینگهام، معادله عمومی متشکل از پارامترهای بدون بعد به دست آمده است. سپس با انجام آزمایش های متعدد بر روی مدل فیزیکی، داده های لازم استخراج گردیده و با به کار بردن آنها اثر تک تک متغیرها بر پدیده آبشستگی بررسی شده است. برای پیش بینی حداکثر عمق آبشستگی و ارتفاع تپه های بالادست و پایین دست حفره، مدل های متعدد خطی و توانی بررسی و مدلی که بهترین برازش را بین داده ها برقرار کرده، مشخص گردیده است. در پایان نیز با استفاده از داده های محققان دیگران دقت مدل های به دست آمده بررسی شده است.

استخراج معادله عمومی آبشستگی با استفاده از آنالیز ابعادی: در شکل ۱ نحوه شکل گیری پدیده آبشستگی و پارامترهای مؤثر بر آن نشان داده شده است. پارامترهای متعددی در ایجاد پدیده آبشستگی در زیر جت ها دخیل می باشند که عبارتند از q : دبی جریان در واحد عرض، ρ_s : جرم حجمی مصالح بستر، ρ_w : جرم حجمی آب، μ : لزجت آب، h_t : عمق پایاب، d_s : اندازه ذرات مصالح بستر، g : شتاب ثقل، b : ضخامت جت در جام سرریز H : ارتفاع ریزش یا اختلاف بین رقوم آب سطح مخزن و پایاب، D : حداکثر عمق آبشستگی که از سطح اولیه بستر اندازه گیری می شود، θ : زاویه برخورد جت به پایاب، R : شعاع پرتابه جامی شکل و ϕ : زاویه پرتاب پرتابه جامی شکل. در نتیجه می توان نوشت:

$$f(q, \rho_s, \rho_w, D, d_s, g, b, h_t, H, R, \theta, \phi, \mu) = 0 \quad (1)$$

به استخر آب نشان می دهد. وایتلر و همکاران (۱۹۹۸) با استفاده از نتایج مطالعات بوهرر و همکاران روش جدیدی را در پیش بینی حداکثر عمق آبشستگی ارائه نمودند که به نام روش آناندال خوانده می شود. در این روش با در نظر گرفتن خصوصیات مکانیکی سنگ ها در اعماق مختلف و تعریف شاخصی به نام شاخص فرسایش پذیری، انرژی جنبشی لازم برای فرسایش مصالح بستر در هر عمق به دست می آید، سپس این انرژی با انرژی موجود جریان مقایسه می شود و در نهایت عمق آبشستگی به دست می آید. هگر و کانپا (۲۰۰۳) اثر هوادهی جت را در آبشستگی بررسی نمودند. راجاراتنام و مازورک (۲۰۰۳) آبشستگی ناشی از جت مدور با ریزش قائم را بر روی مصالح غیرچسبنده با پایاب های کوچک بررسی کردند و نتیجه گرفتند که عمق آبشستگی تابعی از عدد فرود ذره^۱ است. هگر و مینور (۲۰۰۴) تغییرات عمق آبشستگی را در شرایط حضور جت و عدم حضور جت مطالعه کردند و نتیجه گرفتند که وقتی جریان جت برقرار است، عمق آبشستگی بیشتر است و این موضوع باید در طراحی ها مدنظر قرار گیرد. عظمت اله و همکاران (۲۰۰۵) مدلی برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی با استفاده از روش شبکه های عصبی ارائه نمودند و آن را با روش های تجربی مقایسه کردند. استفانو و همکاران (۲۰۰۶) هیدرولیک استخر کاهنده انرژی جنبشی^۲، ناشی از جت مدور را بررسی کردند. زاویه برخورد جت، مقدار هوای جت، دانه بندی مصالح و عمق پایاب از موضوعات مورد مطالعه ایشان بود. قدسیان و همکاران (۱۹۹۹) حداکثر عمق آبشستگی را در پایین دست سرریزهای ریزشی آزاد بررسی کردند. فرهودی و ناصحی (۱۹۹۹) پروفیل آبشستگی را در پایین دست آبشارهای قائم مطالعه نمودند. قدسیان و عباسی (۲۰۰۱) تغییرات توپوگرافی بستر را در پایین دست سرریزهای ریزشی آزاد بررسی کردند. نصیری و منتظر (۲۰۰۱) تعیین ابعاد حفره آبشستگی را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی بررسی کردند. بعضی از روابط موجود برای پیش بینی حداکثر عمق آبشستگی در جدول



شکل ۱- شمای کلی و عناصر تأثیرگذار بر پدیده آبشستگی.

متغیر Vb/v عدد رینولدز می‌باشد که در این پژوهش به دلیل وجود تلاطم جریان بی‌تأثیر است؛ R و ϕ هم در این تحقیق ثابت هستند و از آنها صرف‌نظر می‌شود.

θ با عکس‌برداری دیجیتالی با قدرت تفکیک بالا از آزمایش‌ها و انتقال آنها به نرم‌افزار اتوکد اندازه‌گیری می‌گردد. در مقاصد عملی، θ می‌تواند با رسم مماس بر منحنی مسیر حرکت جت در نقطه برخورد به پایاب به صورت تئوریکی محاسبه شود. از آنجا که محاسبه θ به سختی امکان‌پذیر است و وجود آن در رابطه نهایی کاربری آن را مشکل می‌کند ابتدا از آن صرف‌نظر می‌شود ولی چنانچه رابطه مناسبی به‌دست نیامد به‌عنوان یک متغیر جدید وارد تجزیه و تحلیل خواهد شد.

بنابراین از بین متغیرهای بدون بعد می‌توان تابع زیر را تعریف نمود:

$$\frac{D}{h_t} = f\left(SN, \frac{q}{\sqrt{gh_t^3}}, \frac{b}{h_t}, \frac{H}{h_t}, \frac{d_s}{h_t}\right) = 0 \quad (3)$$

مطابق روش بالا، معادلات زیر برای ارتفاع تپه بالادست (h_u) و ارتفاع تپه پایین‌دست (h_d) به‌دست می‌آید:

$$\frac{h_u}{h_t} = f\left(SN, \frac{q}{\sqrt{gh_t^3}}, \frac{b}{h_t}, \frac{H}{h_t}, \frac{d_s}{h_t}\right) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{h_d}{h_t} = f\left(SN, \frac{q}{\sqrt{gh_t^3}}, \frac{b}{h_t}, \frac{H}{h_t}, \frac{d_s}{h_t}\right) = 0 \quad (5)$$

محققان بیشتر از d_{50} ، d_{85} و d_{90} به‌عنوان اندازه ذرات استفاده کرده‌اند، در این پژوهش از d_{50} به‌عنوان نماینده

اندازه ذرات استفاده می‌شود، بنابراین: $d_s = d_{50}$

با انتخاب سه متغیر تکراری h_t ، ρ_w و q و به‌کار بردن تئوری باکینگهام، معادله بدون بعد زیر به‌دست می‌آید:

$$f\left(\frac{Vb}{v}, \frac{\rho_w}{\rho_s}, \frac{q}{\sqrt{gh_t^3}}, \frac{d_s}{h_t}, \frac{D}{h_t}, \frac{H}{h_t}, \frac{R}{h_t}, \frac{b}{h_t}, \theta, \phi\right) = 0 \quad (2)$$

از ترکیب متغیرهای ρ_s/ρ_w ، $q/\sqrt{gh_t^3}$ ، d_s/h_t و b/h_t متغیر بدون بعد $V/\sqrt{g(S_s-1)d_s}$ به‌دست می‌آید که در آن S_s : چگالی ذرات و V : سرعت جت می‌باشد. سرعت جت می‌تواند سرعت جت در جام سرریز (V_p)، سرعت جت در لحظه نفوذ به پایاب (V_b) و یا سرعت در مجاورت بستر در حال فرسایش (V_b) باشد. این متغیر اگر به شکل $V_b/\sqrt{g(S_s-1)d_s}$ نوشته شود عدد فرود ذره نامیده می‌شود که در واقع نسبت مجموع نیروهای محرک به مجموع نیروهای مقاوم در حرکت یک ذره است که تحت تأثیر جریان آب قرار گرفته است (شفاعی بجزستان، ۱۹۹۹).

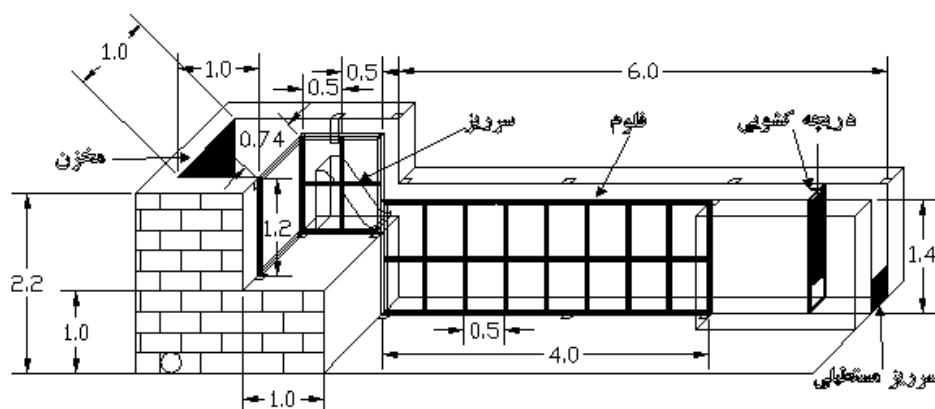
از آنجا که اندازه‌گیری V_b مشکل است از V در این پژوهش استفاده می‌شود و مقدار آن می‌تواند با اندازه‌گیری مشخصات جریان در پرتابه به‌دست آید یا به‌صورت تئوریکی از رابطه $V = \sqrt{2gZ}$ که در آن Z : اختلاف ارتفاع بین مخزن و پرتابه است، تخمین زده شود. بنابراین چون حرکت ذرات بیشتر محتمل است که تحت تأثیر متغیر $V/\sqrt{g(S_s-1)d_s}$ باشد آن را عدد پایداری^۱ نامیده و با SN نشان داده می‌شود.

مواد و روش‌ها

برای رسیدن به اهداف این تحقیق، یعنی مدل‌بندی آبشستگی در پایین‌دست پرتابه‌های جامی شکل مدل فیزیکی مطابق شکل ۲ ساخته شد. این مدل دارای مخزنی مکعبی به ابعاد $1 \times 1 \times 2,2$ متر (طول \times عرض \times ارتفاع) می‌باشد که سه وجه آن با مصالح بنایی ساخته شده است، وجه دیگر آن سکویی به ارتفاع ۱ متر است که روی این سکو قاب فلزی به ارتفاع ۱,۲ متر نصب شده است و سرریز روی این سکو نصب گردیده است. توسط یک لوله فلزی ۶ اینچی آب از منبع به مخزن مدل پمپ می‌گردد که برای کنترل مقدار جریان یک شیر ۶ اینچ فلزی روی آن نصب شده است. سرریز از نوع اوجی است که در انتهای شوت دارای پرتابه جامی شکل می‌باشد. اسکلت آن از جنس چوب است و بر روی آن صفحه فلزی کوبیده شده است. این سرریز براساس معیارهای U.S.B.R به عرض ۰,۲۵ متر، ارتفاع ۰,۷۵ متر و شعاع انحنای باکت ۰,۱ متر ساخته شده است. جریان عبوری از روی سرریز به داخل یک فلوم پرتاب می‌شود.

طول فلوم ۶ متر است، یک وجه آن به‌طور کامل با مصالح بنایی ساخته شده است و چهار متر از وجه دیگر، قابی فلزی و شیشه‌ای است تا بتوان داخل فلوم را دید و ۲ متر انتهایی آن هم با مصالح بنایی ساخته شده است. شیشه مورد استفاده از نوع لمینت یا طلقی با ضخامت ۸ میلی‌متر می‌باشد. عرض فلوم همان عرض سرریز و مساوی ۰,۲۵ متر و ارتفاع فلوم ۱,۴ متر است. بنابراین گسترش عرضی حفره آبشستگی، به دلیل رسیدن به دیواره‌های فرسایش‌ناپذیر فلوم محدود شده است.

به منظور کنترل سطح آب داخل فلوم از دریچه‌ای کشویی استفاده شده است. این دریچه با ابعاد $1 \times 0,25$ متر (ارتفاع \times عرض) در انتهای فلوم و در بخش آجری نصب شده است. برای کاهش انرژی جنبشی مؤثر بر روی دریچه، ارتفاع آب در پایین‌دست دریچه با نصب سرریزهای مستطیلی از جنس چوب افزایش داده شده است. برای اندازه‌گیری جریان در کانال پایین‌دست مدل، یک فلوم W.S.C نصب گردیده و منحنی دبی-اشل سرریز بر اساس آن به دست آمده است.



شکل ۲- امتداد طولی مدل فیزیکی این پژوهش.

جدول ۲- مشخصات مصالح بستر.

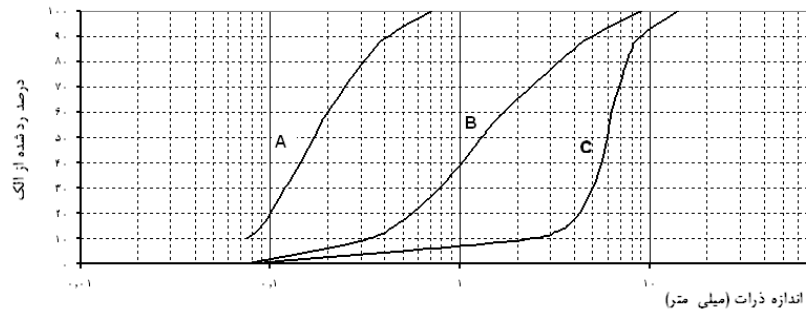
مصالح	σ_g	γ_s (gr/cm ³)
A	۱/۹۷	۲/۷۳
B	۲/۹۵	۲/۷۴
C	۱/۴۵	۲/۶۲

از سه نوع مصالح غیریکنواخت که با نام‌های A ، B و C نام‌گذاری شده‌اند، به‌عنوان مصالح بستر استفاده شده است. شکل ۳ منحنی‌های دانه‌بندی مصالح بستر و جدول ۲ مشخصات مصالح بستر را نشان می‌دهد. در این جدول σ_g : انحراف استاندارد هندسی است که از رابطه $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ محاسبه شده و γ_s : وزن مخصوص ذرات است.

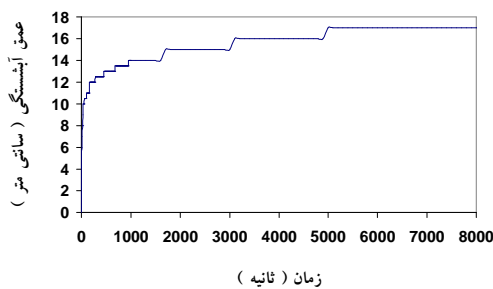
روش انجام آزمایش: ابتدا در کف فلوم مقدار لازم از مصالح A ، B یا C ریخته می‌شود، سطح آن با ماله چوبی صاف می‌گردد و برای ایجاد تراکمی یکنواخت، به‌منظور حصول اطمینان از شرایط یکسان و عدم وقوع تغییرات موضعی غیرقابل پیش‌بینی، سطح مصالح با الوار کوبیده می‌شود. یکی از سرریزهای مستطیلی انتخاب و در محل خود در انتهای فلوم نصب می‌شود و دریاچه کشویی کاملاً بسته می‌شود. سپس شیرکنترل باز و جریان وارد مخزن می‌گردد. وقتی آب به لبه سرریز برسد، جریان از روی سرریز عبور می‌کند و از جام انتهایی به داخل فلوم پرتاب می‌شود. برای این‌که جریان اولیه در مصالح ایجاد آبشستگی نکند باید اجازه داد تا فلوم از آب پر شود، سپس جت به داخل آن رها شود. بدین‌منظور ابتدا با تنظیم

شیرکنترل، جریان کمی وارد مدل می‌شود و دریاچه نیز بسته می‌ماند تا فلوم پر از آب شود. برای جلوگیری از پرتاب جت به داخل فلوم از الوار در مقابل سرریز استفاده می‌گردد تا جت به آن برخورد کند و به سمت دیواره‌های فلوم منحرف شود. در این حالت جت، ضمن پخش شدن، انرژی فرسایشی خود را نیز از دست می‌دهد. در طول زمانی که آب در فلوم بالا می‌آید باید دبی را با استفاده از شیر کنترل و اشل مخزن به‌صورت دقیق تنظیم کرد، پس از آن الوار از جلوی جریان برداشته شده و جت به داخل فلوم پرتاب می‌شود. دریاچه به تدریج باز می‌شود و سطح آب داخل فلوم پایین می‌رود. با عملکرد همزمان دریاچه کشویی و سرریز انتهای فلوم، سطح آب در رقوم مورد نظر تثبیت می‌شود.

برای تعیین زمان لازم برای آزمایش‌ها، نمودار پیشرفت آبشستگی با زمان بررسی ترسیم گردید و در جایی که آبشستگی با زمان تغییری نکرد، زمان پایان آزمایش‌ها به دست آمد؛ با در نظر گرفتن یک حاشیه اطمینان، زمان آزمایش برای مصالح A و B ، ۳ ساعت و برای مصالح C ، ۲ ساعت به دست آمد.



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی مصالح بستر.



شکل ۴- نمودار پیشرفت آبشستگی با زمان برای مصالح C در شرایط $q=0.44 \text{ (m}^2/\text{s)}$ ، $h_t=4.5 \text{ (cm)}$.

h_t	d_{50}	q
m	mm	(m ² /s)
۰,۰۶-۰,۲۷	۰,۰۷۴-۱,۲۷	۰,۰۱۹۲-۰,۰۷۶

و حمل ذرات نمی‌باشد عمق نهایی آبشستگی به دست می‌آید. گرداب‌های موجود ذرات زیادی را به صورت معلق نگه می‌دارند که با قطع جریان این ذرات نهشته می‌شوند. عمده مصالح فرسایش یافته در پایین دست چاله ترسیب و تپه‌ای را به وجود می‌آورند. بخشی از مصالح نیز در بالادست حفره شکل گرفته تجمع می‌کنند. ابعاد این تپه‌ها در همه آزمایش‌ها یکسان نبود.

تپه بالادست: با تغییر مصالح به انواع A، B و C و افزایش قطر ذرات از $d_{50}=0.18$ تا $d_{50}=6$ میلی‌متر، نحوه تشکیل تپه بالادست کاملاً متفاوت بود، به طوری که در مصالح C تپه بالادست تشکیل نگردید. انرژی جنبشی جت باعث حرکت ذرات بستر شده و این ذرات در داخل حفره آبشستگی معلق می‌گردند. بخشی از این ذرات تحت تأثیر قدرت حمل جریان به سمت پایین دست حرکت کرده و از محدوده تأثیر جت خارج می‌شوند، بخش دیگری از ذرات تحت تأثیر جریان‌های ثانویه ناشی از تلاطم جریان در داخل حفره آبشستگی، به سمت بالادست حرکت کرده و در بالادست حفره ته‌نشین می‌شوند و تپه بالادست را تشکیل می‌دهند. وقتی ذرات کوچک‌ترند زمان تعلیق بیشتر است، از این رو ذرات بیشتر تحت تأثیر جریان‌های ثانویه قرار می‌گیرند و احتمال شکل‌گیری تپه بالادست بیشتر است. عمق پایاب نیز روی ارتفاع این تپه مؤثر است، به طوری که در پایاب‌های عمیق‌تر، تعلیق ذرات ریز بیشتر است و فرصت کافی برای جریان‌های ثانویه وجود دارد که آنها را به سمت بالادست حرکت دهند.

تپه پایین دست: عامل مؤثر در نحوه تشکیل تپه پایین دست قدرت حمل جریان می‌باشد که آن هم تحت تأثیر انرژی جنبشی جت، عمق پایاب و اندازه ذرات می‌باشد. تحت تأثیر این عوامل ممکن است بلافاصله در

شکل ۴ نمودار پیشرفت آبشستگی با زمان را در یکی از آزمایش‌ها نشان می‌دهد. دبی جریان، رقوم تنظیم شده پایاب و رقوم تنظیم شده مصالح بستر در ابتدای آزمایش یادداشت می‌شود و پروفیل طولی آبشستگی در پایان آزمایش برداشت می‌شود. برای سه نوع مصالح A، B و C با d_{50} (mm) ۶ و ۱,۲، ۰,۱۸ در پنج دبی جریان، ۳۲ آزمایش در عمق‌های متفاوت پایاب انجام گردید. جدول ۳ محدوده تغییرات متغیرها را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

در این بخش ابتدا با ارائه نتایج حاصل از مشاهدات، اجزاء پدیده آبشستگی به صورت کیفی بررسی شده و سپس با به‌کارگیری روش‌های آماری، بررسی‌های کمی انجام شده است. در انتها نیز نتایج با تحقیقات قبلی مقایسه شده است.

به‌طور کلی مشاهدات این پژوهش نشان داده است که تحت تأثیر متقابل عوامل مؤثر بر آبشستگی، الگوهای متفاوتی از آبشستگی به دست می‌آید. به‌طور مسلم، عامل اصلی آبشستگی، انرژی جنبشی جت می‌باشد. وقتی جت آب به درون پایاب نفوذ می‌کند طبق قوانین جت به تدریج انرژی جنبشی آن مستهلک می‌شود. چنانچه عمق پایاب کم باشد جت با انرژی جنبشی زیادی به بستر می‌رسد و باعث حرکت ذرات رسوبی می‌گردد. تلاطم زیادی که جت ایجاد می‌کند باعث افزایش آنی نیروهای بالابرنده می‌شود که این عامل نیز در معلق کردن ذرات مؤثر می‌باشد. حرکت عمومی جریان هم ذرات رسوبی را منتقل می‌کند. با افزایش عمق آبشستگی انرژی جنبشی جت به تدریج کاهش می‌یابد، به همین دلیل در ابتدا سرعت پیشروی آبشستگی زیاد و سپس کاهش می‌یابد و در عمقی که دیگر انرژی جنبشی جت قادر به جابه‌جایی

پایین دست حفره، تپه تیز بلند یا کوتاه شکل بگیرد. ممکن است مصالح شسته شده به صورت لایه‌ای روی مصالح بستر قرار گیرد و برآمدگی شکل نگیرد. گسترش این لایه به سمت پایین دست بوده و طول و ضخامت آن تحت تاثیر قدرت حمل جریان تغییر می‌کند.

چنانچه عمق پایاب خیلی کم باشد، چون جریان در عمق کم و سرعت بیشتر شکل می‌گیرد، قدرت حمل جریان زیاد است و مصالح شسته شده به پایین دست منتقل شده، تپه کوتاه یا لایه‌ای شکل می‌گیرد. چنانچه عمق پایاب زیادتر شود ولی انرژی جنبشی اولیه قادر باشد حجم زیادی از مصالح را بلافاصله از حفره خارج نماید، از طرفی قدرت حمل جریان نیز در حدی نباشد که مصالح را به پایین دست منتقل کند، ارتفاع تپه زیاد خواهد بود و چنانچه باز هم عمق پایاب زیاد شود، کاهش انرژی جنبشی جت باعث آهسته‌تر شدن روند آبشستگی، تعلیق طولانی‌تر ذرات و حمل بیشتر ذرات روی تپه به پایین دست شده و دوباره ارتفاع تپه کاهش یافته یا تپه لایه‌ای شکل می‌گیرد. بنابراین تحت تأثیر عمق پایاب رفتارهای متفاوتی برای تشکیل تپه پایین دست مشاهده می‌شود.

بررسی شیب بالادست و پایین دست حفره آبشستگی: با توجه به این که آزمایش‌ها با یک زاویه پرتاب انجام شده

است بررسی تغییرات تحت تأثیر زاویه پرتاب میسر نمی‌باشد، ولی تغییرات تحت تأثیر تغییر مصالح قابل بررسی است. جدول ۴ تغییرات شیب بالادست و پایین دست حفره آبشستگی را در مصالح مختلف نشان می‌دهد. در این جدول α شیب بالادست حفره و β شیب پایین دست حفره آبشستگی است. شیب بالادست حفره در مصالح B و C تقریباً با شیب پایین دست برابر است. در مصالح A به دلیل تشکیل تپه بالادست بلندتر، شیب بالادست کمی تندتر است. با درشت‌تر شدن ذرات، شیب پایین دست تندتر می‌شود.

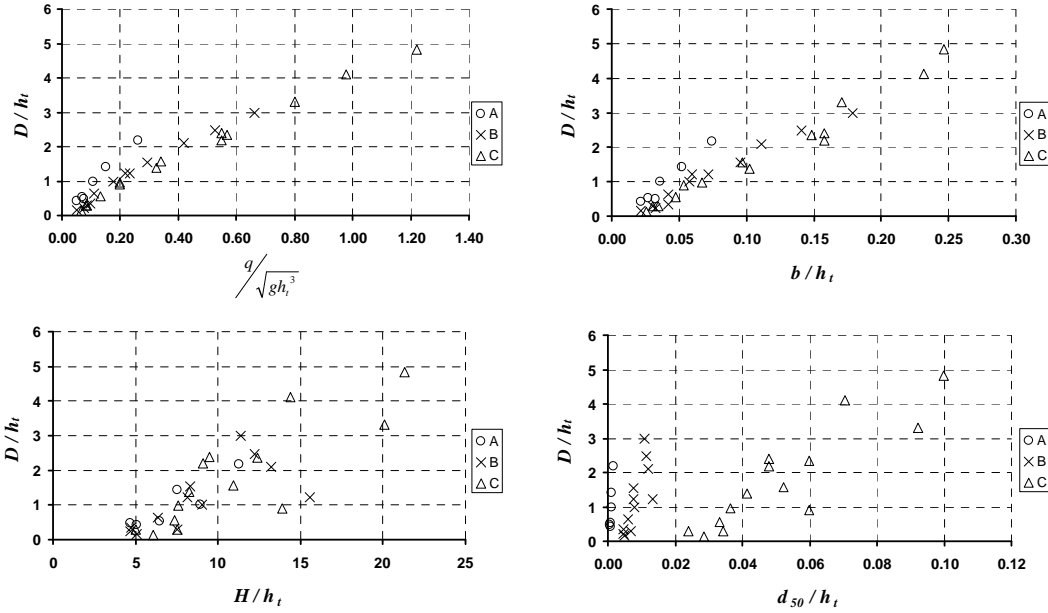
تجزیه و تحلیل داده‌ها: شکل ۵ نمودارهای پراکندگی D/h_t را در مقابل متغیرهای بدون بعد نشان می‌دهد. پراکندگی داده‌ها در این شکل حکایت از این دارد که دبی جریان، ضخامت جت، اندازه ذرات، ارتفاع ریزش و عمق پایاب از جمله مهمترین پارامترهای موثر در آبشستگی می‌باشند. نحوه پراکندگی داده‌ها شکل ارتباط را در متغیرهای حاوی دبی جریان و ضخامت جت، به صورت خطی نشان می‌دهد. در جدول ۵ نیز ضریب همبستگی بین متغیرها نشان داده شده است. همان‌گونه که در جدول مشخص است، متغیر دبی جریان با ضریب همبستگی ۰٫۹۸ قوی‌ترین ارتباط خطی را با حداکثر عمق آبشستگی دارد.

جدول ۴- تغییرات شیب بالادست و پایین دست حفره آبشستگی (درجه).

	مصالح بستر		
	A	B	C
Max α	۲۶	۲۱	۲۴
Min α	۱۶	۹	۱۱
Max β	۱۶	۲۱	۲۶
Min β	۱۰	۱۳	۱۲

جدول ۵- ضریب همبستگی بین D/h_t و متغیرهای دیگر.

	$\frac{q}{\sqrt{gh_t^3}}$	$\frac{q}{\sqrt{gh_t^3}}$	b/h_t	d_{50}/h_t	H/h_t
D/h_t	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۹۸	۰٫۶۵	۰٫۸۳



شکل ۵- نمودارهای پراکندگی D/h_t در مقابل متغیرهای بدون بعد دیگر.

از آنجا که متغیر SN که مشخصات جریان، اندازه ذرات و چگالی آنها را با خود دارد نتوانست برازش خوبی بین داده‌ها ایجاد کند، در نتیجه به منظور پوشش کامل پارامترهای دخیل و توصیف بهتر پدیده، مدل‌های چند متغیره برای پیش‌بینی عمق آبستنگی بررسی می‌گردد.

بررسی مدل‌های چند متغیره پیش‌بینی عمق نهایی آبستنگی: با توجه به نمودارهای پراکندگی به دست آمده دو نوع مدل خطی و توانی مدنظر قرار می‌گیرد ضمن این‌که کاربری این مدل‌ها نسبت به مدل‌های دیگر نیز راحت‌تر می‌باشد.

با به‌کارگیری نرم‌افزار SPSS بهترین مدل‌ها به شرح زیر به دست آمد:

مدل خطی:

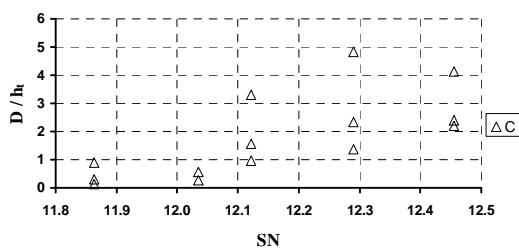
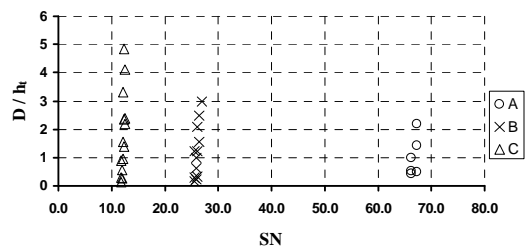
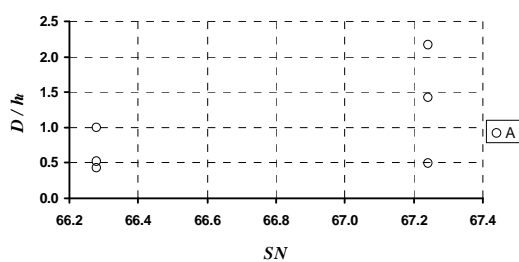
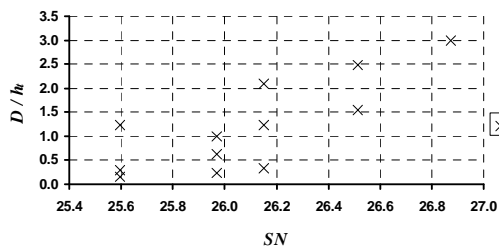
$$\frac{D}{h_t} = -0.012 + 4.146 \left(\frac{q}{\sqrt{gh_t^3}} \right) - 9.439 \left(\frac{d_{50}}{h_t} \right) + 0.004 \left(\frac{H}{h_t} \right)$$

(۶) مدل توانی:

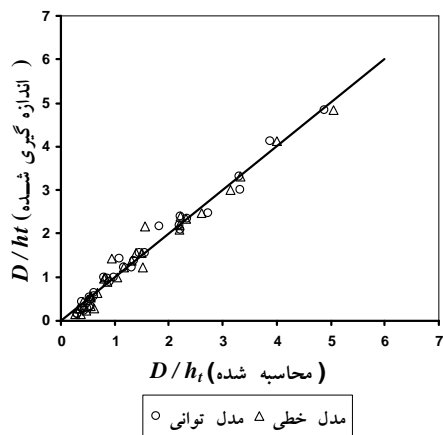
$$\frac{D}{h_t} = 1.679 \left(\frac{q}{\sqrt{gh_t^3}} \right)^{0.915} \left(\frac{d_{50}}{h_t} \right)^{-1.33} \left(\frac{H}{h_t} \right)^{0.189} \quad (7)$$

شکل ۶ نمودارهای پراکندگی D/h_t در مقابل SN را در مصالح مختلف A, B و C نشان می‌دهد. متغیر SN ، اندازه ذرات و مشخصات جریان را با خود دارد. نمودارهای پراکندگی رابطه معنی‌داری را بین متغیر SN با عمق آبستنگی در هیچ‌یک از مصالح A, B و C نشان نمی‌دهد. با انتقال داده‌ها بر روی یک نمودار، مشاهده می‌شود که تغییر اندازه مصالح باعث جابه‌جایی مجموعه داده‌ها روی محور Xها و پراکندگی بیشتر داده‌ها شده است به طوری که ضریب همبستگی در جدول ۵ به ۰/۲۲۸- کاهش یافته است. بنابراین، رابطه خطی یا توانی مناسبی برای پیش‌بینی عمق آبستنگی با SN به دست نمی‌آید.

اگرچه ارتباط خطی مناسبی برای پیش‌بینی عمق آبستنگی با پارامترهای بدون بعد $q/\sqrt{gh_t^3}$ و b/h_t به دست آمده است ولی این متغیرها به تنهایی توصیف‌کننده پدیده آبستنگی نمی‌باشند، چون فقط پارامترهای جریان را با خود دارند. از بررسی نمودارهای پراکندگی مشخص گردید که اندازه ذرات و ارتفاع ریزش نیز بر آبستنگی مؤثرند و آن را کنترل می‌نمایند به طوری که تغییر اندازه ذرات باعث ایجاد پراکندگی داده‌ها در نمودارها می‌شود.



شکل ۶- نمودارهای پراکندگی D/h_t در مقابل SN در مصالح A, B و C.



شکل ۷- نتایج مدل خطی و توانی در پیش‌بینی عمق آبستگی.

پیش‌بینی ارتفاع تپه بالادست: برای پیش‌بینی ارتفاع تپه بالادست نیز مدل‌های خطی و توانی مختلف بررسی و بهترین نتایج به شرح زیر به دست آمد:

$$\frac{h_u}{h_t} = 0.007 SN - 0.027 \quad (8)$$

$$\frac{h_u}{h_t} = 0.012 SN^{0.769} \left(\frac{d_{50}}{h_t} \right)^{-1.112} \left(\frac{H}{h_t} \right)^{-0.207} \quad (9)$$

مقدار R^2 در معادله ۸ برابر ۰,۴۹۹ و در معادله ۹ برابر ۰,۵۲۳ می‌باشد.

که مقدار R^2 در معادله ۶ برابر ۰,۹۶۹ و در معادله ۷ برابر ۰,۹۸۲ می‌باشد.

شکل ۷ نتایج مدل خطی و توانی را با یکدیگر مقایسه می‌نماید. تراکم نقاط اطراف خط ۴۵ درجه نشان از توانایی هر دو مدل در پیش‌بینی حداکثر عمق آبستگی دارد، بنابراین هم مدل خطی و هم مدل توانی در پیش‌بینی عمق آبستگی موفق می‌باشند. دقت مدل توانی کمی بیش از مدل خطی است.

پیش‌بینی ارتفاع تپه پایین دست: برای پیش‌بینی ارتفاع تپه پایین دست نیز مدل‌های خطی و توانی مختلف بررسی و بهترین نتایج به شرح زیر به دست آمد:

$$\frac{h_d}{h_t} = 0.315 - 0.885 \left(\frac{q}{\sqrt{gh_t^3}} \right) + 5.512 \left(\frac{d_{50}}{h_t} \right) + 0.033 \left(\frac{H}{h_t} \right) \quad (10)$$

$$\frac{h_d}{h_t} = 0.24 \left(\frac{q}{\sqrt{gh_t^3}} \right)^{-0.22} \left(\frac{d_{50}}{h_t} \right)^{0.12} \left(\frac{H}{h_t} \right)^{0.412} \quad (11)$$

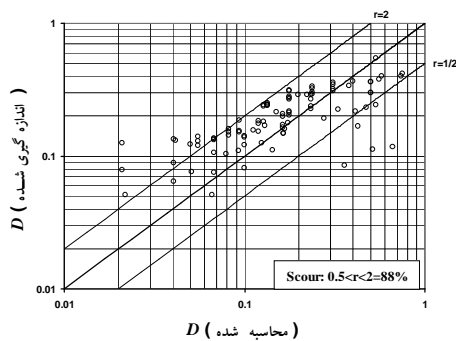
مقدار R^2 در معادله ۱۰ برابر ۰٫۳۴۵ و در معادله ۱۱ برابر ۰٫۱۸۸ می‌باشد.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود مدل‌های قوی‌ای برای پیش‌بینی ارتفاع تپه‌های بالادست و پایین دست به دست نیامده است. از مشاهدات آزمایش‌ها چنین برمی‌آید که تشکیل تپه‌ها بیشتر تحت تأثیر جریان‌های ثانویه ناشی از تلاطم جریان در داخل حفره، زمان تعلیق ذرات و قدرت حمل جریان افقی است که مصالح فرسایش یافته را به سمت پایین دست منتقل می‌کند. بنابراین، باید آزمایش‌های دیگری ترتیب داد و متغیرهای دیگری را بررسی کرد.

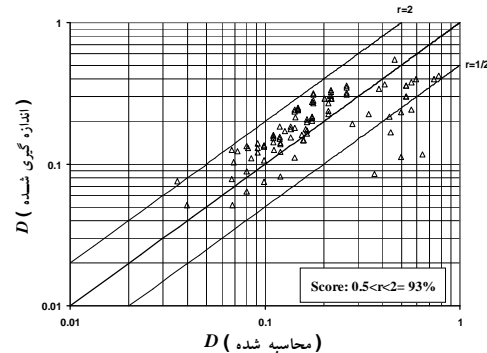
بررسی توانایی مدل‌ها: با هدف بررسی توانایی مدل‌های ارائه شده در این پژوهش، تعداد ۹۵ داده آزمایشگاهی مربوط به مطالعات محققان دیگر که اخیراً توسط عظمت‌اله و همکاران (۲۰۰۵) منتشر شده است، مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور ابتدا نسبت $r = D_m/D$ که در آن D_m عمق آبستگي پیش‌بینی شده از مدل‌های این پژوهش و D عمق آبستگي اندازه‌گیری شده توسط سایر محققان است، محاسبه شد.

مسلم است که هرچه این نسبت به یک نزدیک‌تر باشد دقت مدل بیشتر است. سپس درصد داده‌هایی که مقدار r در آنها در بازه $2 < r < 0.5$ قرار گرفته است به‌عنوان امتیاز مدل منظور گردید (هافمن، ۱۹۹۸). نتایج در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌گونه که از این جدول ملاحظه می‌شود امتیاز مدل خطی، معادله ۶، برابر ۸۸ درصد و امتیاز مدل توانی، معادله ۷، برابر ۹۳ درصد به دست آمده است. این اعداد نشان‌دهنده توانایی بالای هر دو مدل در پیش‌بینی حد اکثر عمق آبستگي می‌باشد. نتایج در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. با توجه به تراکم بیشتر نقاط در اطراف خط ۴۵ درجه در شکل ۸، در مقایسه با شکل ۹، مدل توانی بهتر از مدل خطی پیش‌بینی نموده است.

به‌منظور مقایسه مدل‌های ارائه شده در این پژوهش با مدل‌های سایر محققان، مقدار نسبت r به همان روشی که گفته شد، محاسبه گردید و مقدار امتیاز هر مدل محاسبه گردید. نمودارهای مربوط در شکل‌های ۱۰ تا ۱۴ مشاهده می‌شود و امتیاز محاسبه شده هر مدل در جدول ۶ نیز ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که امتیاز مدل‌های این پژوهش پس از مدل عظمت‌اله و همکاران (۲۰۰۵) قرار دارد. البته عظمت‌اله رابطه خود را با استفاده از همین ۹۵ داده به دست آورده است، بنابراین انتظار می‌رود امتیاز بالایی هم کسب کند. مدل عظمت‌اله و همکاران (۲۰۰۵)، متأسفانه ماهیت فیزیکی پدیده را تعریف نمی‌کند، زیرا در این مدل توان d_0 مثبت است یا به عبارتی براساس این مدل افزایش اندازه ذرات باعث افزایش عمق آبستگي می‌گردد که خلاف واقع است.



شکل ۹- امتیاز مدل خطی در پیش‌بینی عمق آبستگي.



شکل ۸- امتیاز مدل توانی در پیش‌بینی عمق آبستگي.

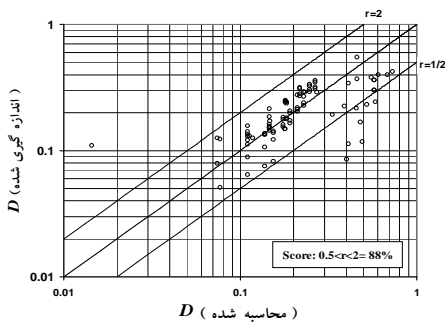
مارتینز B رابطه خود را براساس داده‌های حاصل از نمونه‌های واقعی به دست آورده است.

امتیازهای جدول ۶ همچنین نشان می‌دهد که جلوگیری از گسترش عرضی حفره آبستتگی، تاثیری در حداکثر عمق آبستتگی نداشته است و این عمق تحت تأثیر انرژی موجود جریان برای خروج مصالح از حفره و انتقال آنها به پایین دست است و در صورت وقوع گسترش عرضی حفره فقط حجم مصالحی که به پایین دست منتقل می‌شود، بیشتر خواهد شد.

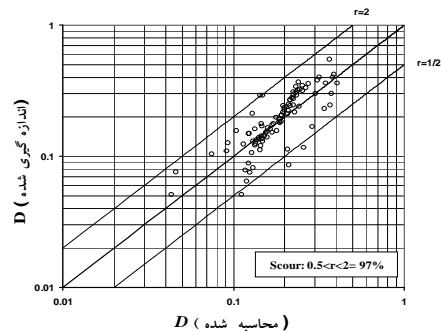
رابطه ورونس A در شرایط $q=0.01-0.07 (m^2/s)$ و $d_{50}=9, 14, 21, 36 (mm)$ به دست آمده است. رابطه ورونس B در شرایط $d_{50} < 5$ میلی متر به دست آمده است، استفاده از این رابطه توسط U.S.B.R (۱۹۷۳) توصیه شده است (بروسرز و رادکیوی، ۱۹۹۱). میسن (۱۹۸۵) رابطه خود را براساس کلیه روابطی که تا آن زمان به دست آمده بود و با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از مدل‌ها و نمونه‌های واقعی^۱ ارائه نموده است.

جدول ۶- امتیاز بعضی از مدل‌های موجود.

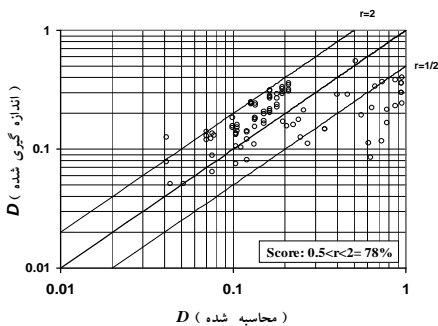
امتیاز	مدل
۹۷ درصد	عظمت‌اله
۹۳ درصد	توانی (معادله ۷)
۸۸ درصد	خطی (معادله ۶)
۸۸ درصد	ورونس B
۸۶ درصد	میسن
۷۸ درصد	ورونس
۷۸ درصد	مارتینز B



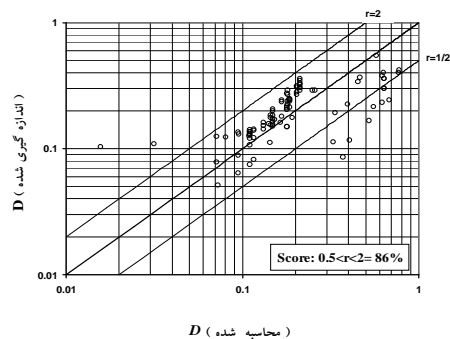
شکل ۱۱- امتیاز و پیش‌بینی‌های مدل ورونس (B).



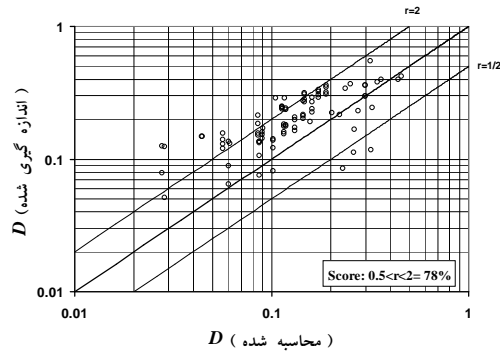
شکل ۱۰- امتیاز و پیش‌بینی‌های مدل عظمت‌اله.



شکل ۱۳- امتیاز و پیش‌بینی‌های مدل ورونس (A).



شکل ۱۲- امتیاز و پیش‌بینی‌های مدل میسن.



شکل ۱۴- امتیاز و پیش‌بینی‌های مدل مارتینز (B).

هم توانی در پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی موفق می‌باشند و بهترین مدل‌ها با استفاده از متغیرهای بدون بعد حاوی پارامترهای شدت جریان، ارتفاع ریزش و اندازه ذرات و عمق پایاب به‌دست آمد ولی مدل‌های قوی‌ای برای پیش‌بینی ارتفاع تپه‌ها به‌دست نیامد که نشان می‌دهد متغیرهای انتخابی برای این منظور مناسب نمی‌باشند. به‌کارگیری داده‌های محققان دیگر نشان داد که روابط به‌دست آمده از این پژوهش از دقت بالا برخوردار بوده و پیش‌بینی‌های بهتری برای حداکثر عمق آبشستگی نسبت به روابط موجود دارند. به‌رغم جلوگیری از گسترش عرضی حفره آبشستگی، حداکثر عمق آبشستگی تحت تأثیر آن قرار نگرفت و این عمق بیشتر به انرژی موجود جریان برای خروج مصالح از حفره آبشستگی و انتقال آنها به پایین‌دست مرتبط است و چنانچه گسترش عرضی حفره اتفاق بیفتد فقط حجم مصالح انتقال یافته بیشتر خواهد بود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش پدیده آبشستگی پایین‌دست پرتابه‌های جامی‌شکل مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت. ابتدا با استفاده از آنالیز ابعادی، روابط کلی برای حداکثر عمق آبشستگی، ارتفاع تپه‌های بالادست و پایین‌دست حفره آبشستگی، به‌صورت تابعی از متغیرهای بدون بعد، حاوی پارامترهای شدت جریان، ضخامت جت، ارتفاع ریزش، اندازه ذرات و SN ، که نسبت مجموع نیروهای محرک به مجموع نیروهای مقاوم در حرکت ذره تحت تأثیر جریان آب می‌باشد، به‌دست آمد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که متغیر SN که حاوی پارامترهای سرعت جت، شتاب ثقل، اندازه و چگالی ذرات می‌باشد، ارتباط قوی با حداکثر عمق آبشستگی ندارد، برای پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی و ارتفاع تپه‌های بالادست و پایین‌دست حفره آبشستگی مدل‌های رگرسیونی خطی و توانی با استفاده از متغیرهای بدون بعد بررسی گردید. هم مدل‌های خطی و

منابع

1. Azmathullah, H. Md., Deo, M.C., and Deolalikar, P.B. 2005. Neural networks for estimation of scour downstream of ski-jump bucket. Journal of Hydr. Engrg, ASCE, vol. 131, No. 10, Pp: 898-908.
2. Blaisdell, F.W., and Anderson, C.L. 1991. Pipe plunge pool energy dissipater. Journal of Hydr. Engrg, ASCE, Vol. 117, No.3, Pp: 303-323.
3. Bohrer, J.G., Abt, S.R., and Wittler, R. J. 1998. Prediction plunge pool velocity decay of free falling rectangular jet. Journal of Hydr. Engrg, ASCE, Vol. 124, No.10, Pp: 1043-1048.
4. Breusers, H.N.C., and Raudkivi, A.J. 1991. Scouring. 2nd Hydraulics Structures Design Manual. International Association for Hydraulic Research, A.A. Bakema, Rotterdam/Brook eld. 125p.

5. Farhoudi, J., and Nasehi, M. 1999. Scour profile downstream of vertical falling jet. 2nd hydraulic conference, Iran university of science and technology, Tehran, Iran, pp: 71-78.
6. Ghodsian, M., Azar Faradonbe, A., and Abbasi, A. 1999. Estimating of maximum scour depth downstream of free falling jet. 5th River Engrg. Conference, Shahid Chamran Univ. Ahvaz, Iran, Pp:372-378.
7. Ghodsian, M., and Abbasi, A. 2001. Laboratory investigation of scour profile downstream of free falling jet. 2nd Hydr. conference , Iran university of science and technology, Tehran, Iran, Pp: 87-93
8. Hager, W.H., and Canepa, S. 2003. Effect of jet air content on plunge pool scour. Journal of Hydr. Engrg, ASCE, Vol. 129. No. 5. Pp: 358-365.
9. Hager, W.H., and Minor, H.E. 2004. Plunge pool scour in prototype and laboratory. Proceeding of 2004 International hydraulics of dam and river structures, April 29-28, Tehran, Iran.
10. Hoffmans, G.J.C.M., and Verheij, H.J. 1997. Scour Manual. A.A. Balkema , Rotterdam, Netherlands, 205p.
11. Hoffmans, G.J.C.M. 1998. Jet scour in equilibrium phase. Journal of Hydr. Engrg, ASCE, Vol. 124, No.4, Pp: 430-437
12. Mason, P.J., and Arumugan, K. 1985. Free jet scour below dams and flip bucket. Journal of Hydr. Engrg, ASCE, Vol. 111, No. 2, Pp:220-235.
13. Momeni Vesalian, R. 2006. Investigation of Scour downstream of dam by physical mode. Ph.D. thesis, Science and Research Branch, Islamic Azad Univ. Tehran, Iran, 170 p.
14. Nasiri, S., and Montazer, G. 2001. Estimating of scour hole dimension downstream of free falling jet by neural networks. 3th hydr. Conference, Tehran Univ. Tehran, Iran, Pp:301-308.
15. Rajaratnam, N., and Mazurek, K. 2003. Erosion of sand by circular impinging water jets with small tailwater. Journal of Hydr. Engrg, ASCE, Vol. 129, No. 3, Pp:225-229.
16. Shafaei Bajestan, M. 1999. Hydraulic of sediment. Shahid Chamran Univ. press. 2nd edition. 480p.
17. Stefano, P., Hager, W.H., and Minor, H.E. 2006. Hydraulic of plunge pool scour. Journal of Hydr. Engrg, ASCE, Vol. 132, No.5, Pp: 450-461.
18. Wittler, R.J., Annandale, G.W., Abt, S.R., and Ruff, J.F. 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.

Local scour due to rectangular jet downstream of flip-bucket spillways with no uniform bed sediment

***R. Momeni Vesalian¹, H. Mousavi Jahromi² and M. Shafaei Bajestan³**

¹Assistant Prof. Dept., of Islamic Azad University Khoram Abad Branch, Iran, ²Assistant Prof. of Hydraulic Structures Dept., Shahid Chamran University, Iran, ³Professor of Hydraulic Structures Dept., Shahid Chamran University, Iran

Abstract

Bucket spillways are used at the end of high dam spillways due to low cost compare to other types of energy dissipater structures. Impingement of falling jet on the river bed can create scour hole which can cause damage to the spillways, dams body or nearby structures. Accumulation of sediment downstream of scour hole, can increase the tailwater and reduce the hydropower generation. Therefore it is important to predict the scour depth when using flip bucket as energy dissipater. The purpose of this study is to conduct experimental tests to understand the mechanism of this phenomenon and to develop relationships for predicting the scour holes dimensions. To reach these goals, at first by dimensional analysis, general relation was developed. The maximum depth of scour holes was found as a function of variable containing discharge, jet thickness, height of falling, particle size and densimetric froude number (SN), which is the ratio of the total active force to the total resistance force acting on a single particle. Then an extensive experimental program was conducted under different size materials and flow conditions. Using the experimental data, different models were examined and the best models were selected. The best models for predicting the maximum scour hole were achieved with variables of discharge, height of falling and particle size. No accurate models were achieved to predict the height of point bar upstream and downstream of scour hole. Finally, these models were tested by applying experimental data from other investigators and it was found that the models presented in this paper can predict the scour depth accurately.

Keywords: Scouring; Falling jet; Rectangular jet; Flip-Bucket; Energy dissipater