علوم و مهندسی آبیاری
جلد ۴۱، شماره‌ی۴، زمستان ۹۷، ص. ۱۵۹-۱۴۷

بررسی تأثیر تراکم زبری‌های مصنوعی مکعبی بر آب‌راهه شیبدار روی عمق آبشستگی پایین‌دست آن

فاطمه فرج زاده[۱] و احمد فتحی[۲*]

۱- کارشناسی ارشد آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۲*- نویسنده مسئول ، استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز fathiahmad2000@yahoo.com

دریافت: ۹۵/۹/۲۲ بازنگری: ۹۶/۲/۱۲ پذیرش: ۹۶/۲/۱۳

چکیده

عبور آب از شیب‌های تند در مسائل مهندسی رودخانه و طرح سازه‌های انتقال آب امری اجتناب ناپذیر است. به دلیل شیب تند بستر عمدتاً سرعت جریان ونرخ فرسایش سطحی بالا می‌باشد. لذا توسعه حفره آبشستگی در پایین دست سازه‌های انتقال آب که منجر به تخریب خود سازه می‌گردد از دیر باز مورد توجه محققین بوده است. در این تحقیق، یک مدل آزمایشگاهی شامل سرریز با ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر وطول ۱۸۰ سانتی مترساخته شد. سطح بستر سرریز پوشیده از زبری‌های مصنوعی مکعبی در سه تراکم ۵، ۱۰ و۱۵ درصد و آبشستگی داخل حوضچه در٤ عدد آبشار مختلف از ۰/۰۰۰۸ تا ۰/۰۰۳ بررسی شد. نتایج حاکی از آن است که در یک عدد آبشار ثابت با افزایش تراکم زبری‌ها قدرت جریان عبوری از آبراهه شیبدار به دلیل مقاومت برشی تضعیف می‌گردد. از این رو با تاثیرگذاری زبری بر کاهش قدرت گردابه‌های بوجود آمده در جریان پرش هیدرولیکی پایین‌دست آبراهه شیبدار از میزان عمق آبشستگی کاسته می‌شود. در صورت افزایش تراکم به میزان ۱۵ درصد عمق آبشستگی در عدد آبشار حداکثر ۳۰ درصد کاهش می‌یابد که این میزان کاهش در تراکم ۵ درصد به حداکثر ۱۰ درصد می‌رسد.

کلید واژه‌ها: زبری مصنوعی ،آبشستگی ، استهلاک انرژی، آب‌راهه شیبدار.

مقدمه

عبور آب از شیب‌های تند در مسائل مهندسی رودخانه و طرح سازه‌های انتقال آب امری اجتناب ناپذیر است. احداث سرریزها و تند آب‌ها و غیره در طرح سازه‌های انتقال آب جزئی انکار ناپذیر است. حال کنترل انرژی در جریان‌هایی با سرعت بالا، یکی از چالش‌های این چنین سازه‌هایی می‌باشد. جریان روی این سرریزها اغلب پرسرعت است که ممکن است منجر به تولید کاویتاسیون روی سطح سرریز و آبشستگی پایین دست سازه در مسیر رودخانه گردد. جریان باسرعت زیاد و فوق بحرانی در طول سرریز باعث خوردگی بتن و زمانی که به پایین دست می‌رسد تبدیل به یک جریان زیربحرانی و تشکیل پرش هیدرولیکی می‌شود. ازجمله روش‌هایی برای کاهش ابعاد و یا حذف سازه‌های مستهلک کننده انرژی به کار بردن روش‌هایی برای کاهش انرژی جنبشی جریان روی سرریز می‌باشد. از جمله این روش‌ها استفاده از پله یا بلوک روی سرریز است. استفاده از پله یا بلوک با ابعاد بزرگ باعث جداشدگی جت عبوری جریان و در نتیجه تلاطم می‌گردد که می‌تواند به طور مؤثری انرژی جنبشی جریان را مستهلک نماید. مشکلی که در استفاده از پله یا بلوک وجود دارد هزینه بسیار زیاد ساخت و ریسک بالای کاویتاسیون است. از دیگر روش‌های استهلاک انرژی به کار بردن زبری در بستر سرریز می‌باشد که ممکن است بتواند روشی کارآمد برای افت انرژی باشد. زبری می‌تواند تلاطم جریان را به طور چشمگیری کاهش داده و درنتیجه خطر کاویتاسیون را کاهش دهد. همچنین زبری می‌تواند قدرت جریان عبوری از روی سرریز را تقلیل داده و با حذف یا تقلیل ابعاد حوضچه‌ی آرامش عمق چاله فرسایشی پایین دست را کاهش دهد. در گذشته مطالعات متعددی با هدف کاهش افت انرژی با زبری پیوسته انجام شده است. Pagliara و Chiavaccini (2006) با ساخت مدل‌هایی در شیب‌های مختلف با استفاده از مصالح سنگی به بررسی افت انرژی روی شیب‌های سنگی (Blouck ramp) با شیب نسبتاً کم پرداختند. آزمایش‌ها با سه دانه‌بندی متفاوت مصالح انجام گرفت. نتایج حاکی از آن است که با افزایش اندازه زبری، مقاومت جریان زیاد شده و متعاقباً افت انرژی از ۳۸ تا ۷۴ درصد نسبت به مدل با بستر صاف افزایش می‌یابد. Rahmanshahi وShafai Bajestan (2012) تأثیر اندازه زبری بستر تندآب بر میزان استهلاک انرژی جنبشی آب، مورد بررسی قرار دادند. سپس آزمایش‌هایی روی مدل‌های فیزیکی در۳ شیب مختلف (۱۵، ۲۲/۵و۳۰ درجه) با قرار دادن ۳ نوع زبری با اندازه‌های متفاوت (۱/۱، ۱/۴۳و ۲/۱ سانتی‌متر) و دانه‌بندی تقریباً یکنواخت روی بستر آن‌ها انجام دادند. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد که با وجود زبری بستر تندآب، میزان استهلاک انرژی از ۱۲ تا ۴۸ درصد نسبت به مدل با بستر صاف افزایش می‌یابد. همچنین نتایج حاوی این مطلب است، که به‌طور کلی شیب ۲۲/۵ درجه حداکثر و شیب ۳۰ درجه حداقل میزان افت را در محدوده‌ی آزمایش‌های تحقیق آنان دارا بوده‌اند. Zulfequar Ahmad et al. (2009) با انجام آزمایش‌هایی به بررسی اثر نیم‌کره‌های برآمده بر استهلاک انرژی روی شیب‌های سنگی با آرایش و تراکم‌های

مختلف پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که مقدار استهلاک انرژی از ۴۰ تا ۸۲ درصد نسبت به مدل با بستر صاف افزایش می‌یابد. هم‌چنین مقدار افت انرژی با افزایش تراکم اندازه‌ی آن‌ها افزایش یافته و با افزایش دبی کاهش می‌یابد. یکی از جنبه‌های کاربردی تخمین میزان استهلاک انرژی بررسی میزان آبشستگی پایین دست است. از این جهت برخی مطالعات در این زمینه انجام شده است. Novak (1961)، Farhoudi و (Smith (1985)، Adduce and Sciortino (2006)، Khalili و Farhoudi (2013) و Hamidi Far و Omid (2010) مکانیزم آبشستگی و وجود تشابه بین پروفیل‌های آبشستگی را گزارش دادند. Pagliara در سال (2007) اثر بستر غیر یکنواخت پایین دست شیب سنگی روی هندسه حفره آبشستگی در شرایط آب زلال بررسی کرد که منجر به معادلاتی برای بیشترین عمق و میانگین مقدار عمق آبشستگی، طول وارتفاع برآمدگی آن گردید. Pagliara و Palermo (2008) عمق آبشستگی پایین دست شیب سنگی را تابعی از ارتفاع سنگریزه‌های موجود در پاشنه آن عنوان نمودند. Pagliara و Palermo (2012) مکانیسم آبشستگی در پایین دست یک رمپ بلوکی در یک حوضچه آرامش نامتقارن را مورد تحلیل قرار دادند. آزمایش‌ها در سه آرایش مختلف کانال (B/b=2.33، B/b=1.67 و B/b=1) و با سطح مختلف پایاب انجام گرفت. مشاهده شد که در شرایط هیدرولیکی یکسان، هیدرودینامیک این پدیده کاملاً در یک حوضچه آرامش بسط یافته تغییر می‌کند و هرچه عرض کانال بیشتر باشد، عمق آبشستگی نیز بیشتر است. از طرفی دیگر، افزایش پایاب موجب کاهش عمق آبشستگی می‌شود. Sayahi (1993) به بررسی مکانیزم آبشستگی درپایین دست حوضچه آرامش SAF پرداخت و معادلاتی را برای پیش‌بینی حداکثر عمق فرسایش حفره ایجاد شده ارائه نمود. Kazemi Nasaban (1996) به بررسی حداکثر عمق آبشستگی پایین‌دست سرریز پلکانی گابیونی با استفاده از نیروهای عمل کننده به ذره معادلاتی به‌صورت خطی و نمایی برای سرریزهای مختلف ارائه دادند. Mousavi (2004) میزان عمق آبشستگی پایین دست سرریز پلکانی بر روی ۴ مدل سرریز با دو شیب ۲۰ درجه و۳۰ درجه و به کار بردن ۳ نوع مصالح بستر با دانه‌بندی‌های مختلف مورد بررسی قرار داد. مشخص شد با افزایش پله در صورتی که ارتفاع سرریز ثابت باشد میزان عمق آبشستگی افزایش خواهد یافت و پس از استخراج نتایج حاصل از آزمایش‌ها و آنالیز ابعادی وکاربرد رگرسیون چند متغیره روابطی برای تعیین عمق آبشستگی ارائه داد. Omidi و Shafaie Bajestan (2014) آبشستگی پایین‌دست حوضچه آرامش نوع یک در شرایط تشکیل پرش هیدرولیکی نوع B مورد بررسی قرار دادند. به این نتیجه رسیدند که افزایش دبی باعث افزایش در میزان آبشستگی پایین دست پرش نوع A و B می‌شود و بر روی عمق و طول و شیب بالادست و پایین دست و ارتفاع حفره آبشستگی تأثیر می‌گذارد و هم‌چنین با افزایش عدد فرود درمقطع اولیه پرش، عمق و طول بدون بعد آبشستگی نیز افزایش می‌یابد.

همان‌طور که اشاره شد ایجاد زبری روی بستر آب‌راهه شیبدار از جمله روش‌های استهلاک انرژی و کاهش آبشستگی پایین دست می‌باشد. بیشتر مطالعات انجام شده در این زمینه به بررسی اثر این زبری‌ها بر میزان استهلاک انرژی پرداخته‌اند که علاوه بر استهلاک انرژی بررسی فرسایش پایین دست سازه نیز دارای اهمیت می‌باشد. این درحالی است که برای طراحی اقتصادی سازه‌های هیدرولیکی لازم است طراحان اطلاعات کاملی از مکانیک ذرات و موقعیت و ابعاد حفره آبشستگی در دسترس داشته باشند تا بتوانند تهمیدات لازم را به منظور پایداری سازه در نظر بگیرند که تاکنون بررسی کمی در این زمینه انجام شده است. از این رو مطالعه حاضر با هدف بررسی تاثیر تراکم زبری‌ها روی سطح بستر آبراهه شیبدار بر روی عمق آبشستگی پایین دست آن انجام شده است.

آنالیز ابعادی

آبشستگی پایین‌دست آب‌راهه شیبدار، به تعداد زیادی از متغیرهای مربوط به هیدرولیک جریان عبوری از روی آبراهه شیبدار با حضور زبری‌ها و همچنین مشخصات پرش هیدرولیکی و رسوبات بستگی دارد. با توجه به ثابت بودن اندازه ذرات رسوب وجرم حجمی ذرات رسوب این متغیرها عبارتند از:

$$f(q, H_{dam}, y_2, \mu, d_s, \rho, \sigma, g, d\%, \zeta)=0 \qquad (۱)$$

که درآن d_s عمق آبشستگی،g شتاب ثقل زمین، H_{dam} ارتفاع سرریز ρ چگالی ویژه سیال، μ لزجت دینامیکی سیال، y_2 عمق ثانویه پرش،q دبی واحد عرض جریان،d% درصد تراکم زبری‌ها وζ آرایش زبری‌ها می‌باشد. از آنجا که در تمام آزمایش‌های این تحقیق عمق پایاب برابر عمق مزدوج بوده، بنابراین فقط عمق مزدوج به عنوان متغییر اختیار شده است. با در نظر گرفتن q، H و ρ بعنوان سه متغیر تکراری واستفاده از قضیه پای باکینگهام کمیت‌های بدون بعد مؤثردر پدیده به صورت رابطه (۲) استخراج گردید.

$$f(\frac{q^2}{gH_{dam}}, Re, We, \frac{d_s}{y_2}, d\%, \zeta)=0 \qquad (۲)$$

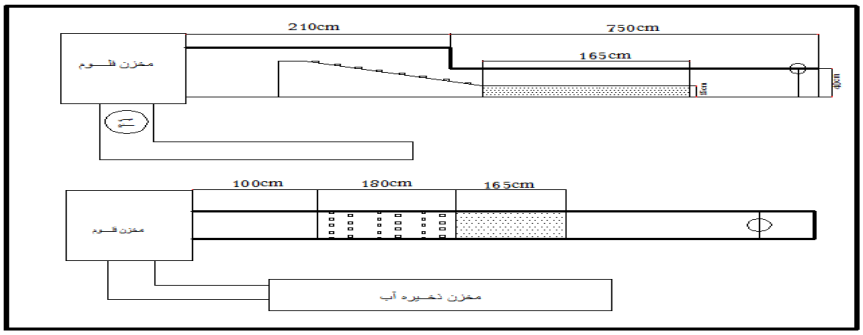
در این رابطه $\frac{q^2}{gH_{dam}^3}$ عددآبشار، Re عدد رینولدز، We عدد وبر می باشد. به دلیل ماهیت پرش هیدرولیکی و تلاطم زیاد آن از اثرات لزجت و در نتیجه عدد رینولدز حذف می‌شود و چون ارتفاع آب روی لبه سرریز بالاتر از ۵ سانتی‌متر می‌باشد از اثرات عدد وبر نیز صرف نظر می‌شود. معادله‌ی اخیر را می توان به صورت رابطه (۳) نوشت:

$$\frac{d_s}{y_2} = f\left(\frac{q^2}{gH_{dam}{}^3}, d\%\right) \quad (۳)$$

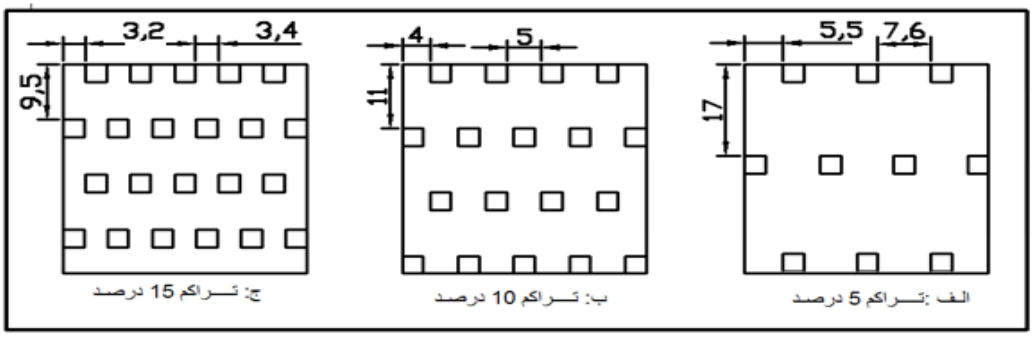
مواد وروش ها

در این تحقیق هدف بررسی تاثیر تراکم زبری‌های مصنوعی چیده شده بر روی آبراهه شیبدار بر میزان آبشستگی پایین‌دست آن می‌باشد. مدل آبراهه شیبدار به ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر، طول ۱۸۰سانتی‌متر و زاویه‌ی ۱۵ درجه در آزمایشگاه مدل فیزیکی دانشگاه شهید چمران درفلومی به طول ۹ متر و عرض۰/۳۵ متر ساخته شد. شکل (۱) پلان و مقطع فلوم را نشان می‌دهد. به منظورقرار دادن زبری‌ها روی بستر آبراهه شیبدار ابتدا با استفاده از نرم افزار اتوکد به ابعاد ۱/۵*۳*۳ رسم شدند. سپس از جنس پلکسی گلاس توسط برش لیزری برش داده شدند. (چون زبری‌ها می‌بایست مستغرق باشند ارتفاع زبری‌ها بر مبنای حداقل عمق آب در مینیمم دبی جریان برآورد شد که همواره مستغرق باشند). آرایش این زبری‌ها به صورت ردیف‌های زیگزاگی (یک ردیف منظم-یک ردیف نامنظم) در نظر گرفته شد. تراکم زبری‌ها بر روی سطح شیبدار به صورت خارج قسمت مساحت وجه موازی با جهت جریان به مساحت سطح بستر آبراهه تعریف شده است. آزمایش‌های این مطالعه برای سه تراکم ۵، ۱۰، ۱۵ درصد با چهار دبی ۱۴، ۱۸ ،۲۲، ۲۶ لیتر برثانیه انجام شد. شکل (۲) نحوه‌ی آرایش و تراکم‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. شکل (۳) تصویری از مدل با بستر زبر را نشان می‌دهد. آب توسط پمپاژ از استخر به مخزن آرام کننده ابتدای فلوم وارد می‌گشت. قبل از ورود آب به مخزن آرام کننده، دبی توسط دبی سنج الکترومغناطیس با دقت ۰/۰۰۱ متر معکب بر ثانیه اندازه گیری می‌شد. در فلوم در پایین دست آب‌راهه شیبدار مصالح رسوبی با قطر متوسط ۷ میلی‌متر، به‌عنوان مصالح بستررودخانه در طول ۱۶۵ سانتی متر قرار داده شد و از دریچه کشویی در انتهای فلوم برای تنظیم عمق پایاب استفاده شد با توجه به سرعت جریان خروجی ازتندآب و عمق پایاب پرش هیدرولیکی در پای آبراهه شیبدار تشکیل می‌گردید. شکل(۴)یک نمونه تشکیل پرش هیدرولیکی در حضور زبری هارانشان می دهد عمق در پنجه با استفاده از یک دستگاه عمق سنج به دقت یک میلی‌متر اندازه گیری شد. مراحل آزمایش به این صورت می‌باشد که ابتدا رسوبات به‌صورت دستی مسطح می‌گردید و رقوم سطح بستر توسط متر لیزری با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه گیری شد. به منظور جلوگیری از شسته شدن ناخواسته مصالح، ابتدا سطح آب پایاب به آرامی افزایش داده می‌شد و پس از برقراری شرایط تعادل شیر ورودی به فلوم باز شده و مقدار دبی مورد نظر تنظیم می‌شد. پس از تثبیت محل پرش آزمایش‌ها به مدت زمان ۱۵۰ دقیقه ادامه می‌یافت. با توجه به آزمایش زمان تعادل بیش از ۹۰ درصد عمق آبشستگی در همین زمان اتفاق می‌افتاد،(شکل ۵).

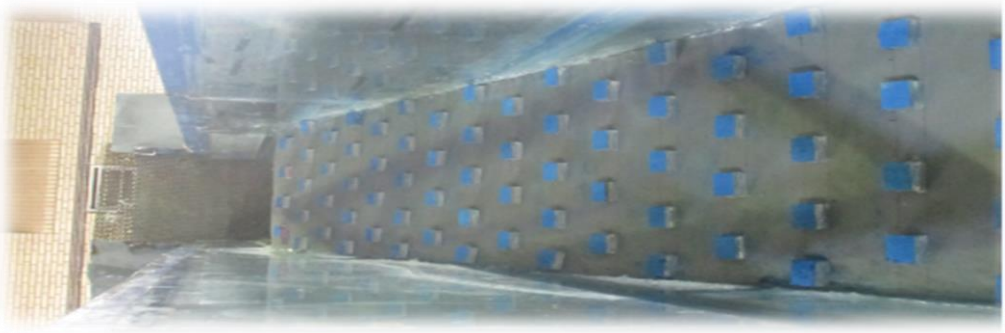
شکل(۶) شماتیک پارامترهای اندازه گیری شده در آزمایش رانشان می دهد.



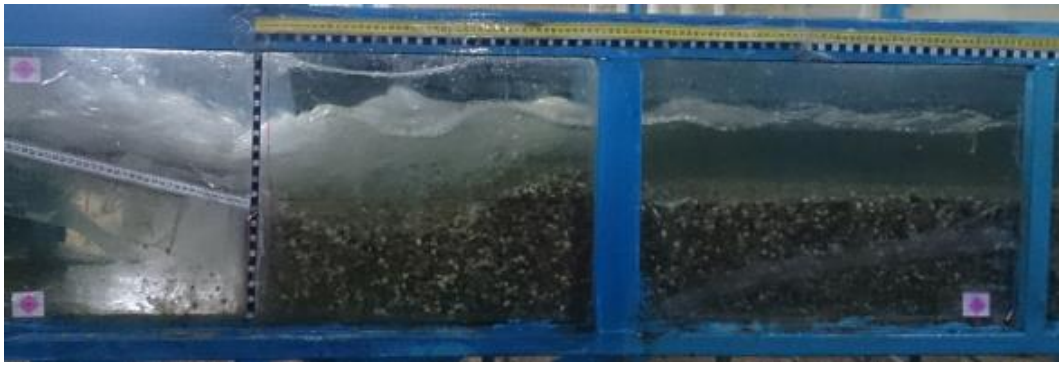
شکل۱- مقطع طولی و پلان فلوم آزمایشگاه



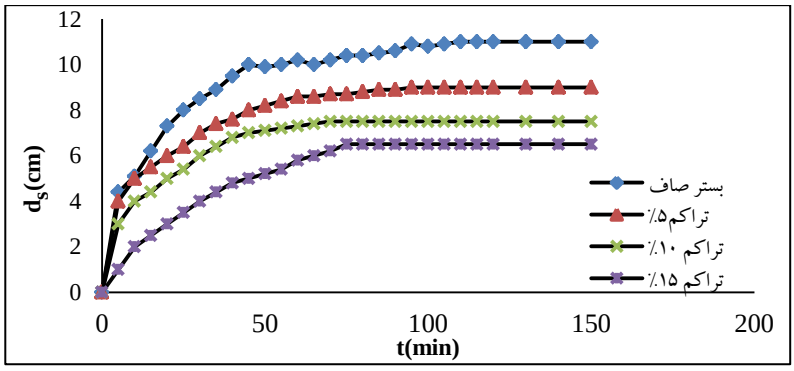
شکل۲- نحوه‌ی چیدمان زبری‌های مکعب مصنوعی در بستر سطح شیبدار



شکل۳-مدل با بستر زبر تراکم ۱۰ درصد



شکل٤-یک نمونه تشکیل پرش هیدرولیکی در حضور زبری‌ها در عدد آبشار ۰/۰۰۰۸



شکل ۵- تغییرات عمق آبشستگی نسبت به زمان در تراکم‌های مختلف

انرژی کل در بالادست سرریز با توجه رابطه (۴) محاسبه شد.

$$E_0 = H_{dam} + y + \frac{q^2}{2gy} \qquad (۴)$$

در رابطه ۷ H_{dam} ارتفاع سرریز، y عمق آب نسبت به تاج سرریز در فاصله‌ای حدود ۶۰ سانتی‌متردر بالادست سرریز و q دبی واحد عرض است. جریان در پنجه سرریز دارای تلاطم زیاد است لذا برای کاهش خطای اندازه‌گیری عمق آب قبل از پرش هیدرولیکی، عمق آب بعد از پرش هیدرولیکی اندازه‌گیری شد و برای محاسبه استهلاک انرژی ، عمق قبل از پرش توسط رابط اعماق مزدوج به صورت زیر محاسبه گردید.

$$E_1 = y_1 + \frac{q^2}{2gy_1} \qquad (۵)$$

$$y_1 = \frac{y_2}{2}\left(\sqrt{1 + 8 * (\frac{y_c}{y_2})^3} - 1\right) \qquad (۶)$$

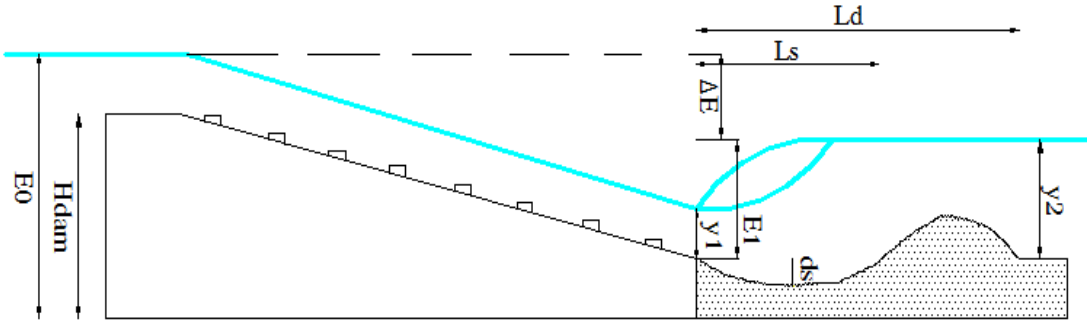
در روابط فوق y_1 عمق اولیه پرش ، y_2 عمق ثانویه پرش و y_c عمق بحرانی است که به صورت $y_c = (\frac{q^2}{g})^{1/3}$ محاسبه گردیده است. مقدار استهلاک انرژی به صورت رابطه (۷) محاسبه شد.

$$\Delta E = \frac{E_0 - E_1}{E_0} \qquad (۷)$$

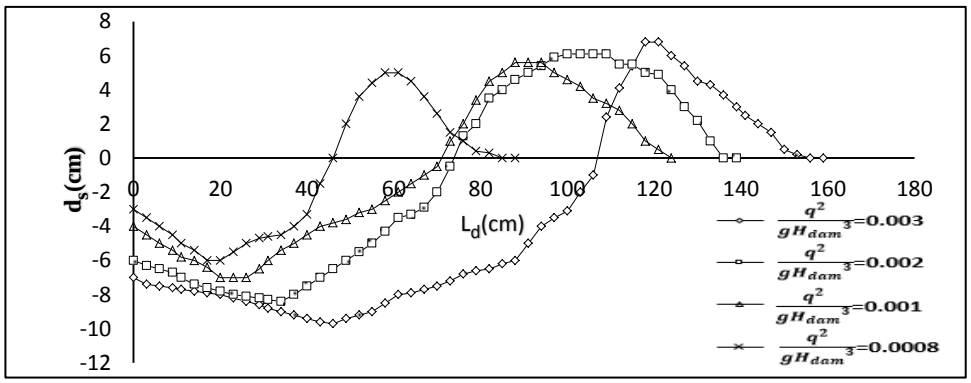
پس از اتمام هرآزمایش ابتدا آب داخل فلوم بطور کامل تخلیه و سپس رقوم سطح مصالح با متر لیزری مستقر بروی یک چارچوب فلزی، به صورت شبکه‌ای با ابعاد ۳*۳ سانتی‌متر برداشت می‌شد. جدول(۱) دامنه و محدوده متغیرهای این تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول ۱-دامنه ومتغیرهای این تحقیق

ζ (آرایش)	$d0-d3$ (درصدتراکم)	$d_s(cm)$ (عمق ماکزیمم آبشستگی)	y_1(cm) (عمق اولیه پرش)	y_2 (cm) (عمق ثانویه پرش)	l_s(cm) (طول حفره آبشستگی)	l_d(cm) (طول کل آبشستگی)	$\frac{q^2}{gH^3}$	$Q(^{lit}/_{s})$
۱	۰-٪۱۵	۶-۱۱	۱/۵-۳/۶	۱۴-۲۰/۵	۳۷-۱۰۶	۵۵-۱۶۰	۰/۰۰۰۸-۰/۰۰۳	۱۴-۲۶



شکل٦-شماتیک پارامترهای اندازه گیری شده در آزمایشگاه



شکل۷-تغییرات پروفیل بستر بدون حضور زبری در اعداد آبشار مختلف

نتایج و بحث

الف) نتایج آزمایش ها بدون حضور زبری در بستر آبراهه شیبدار

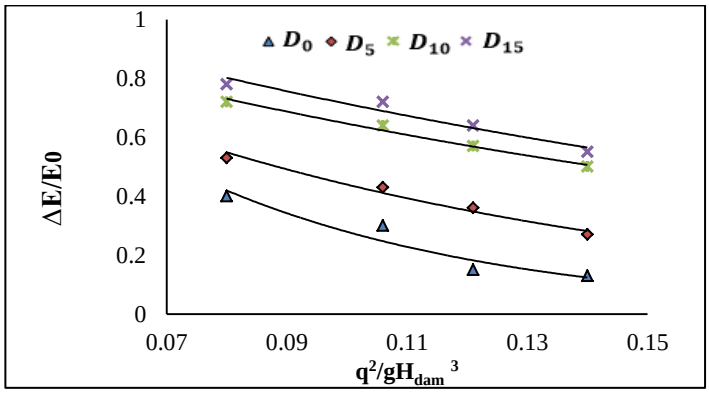
در این مرحله ابتدا چهار آزمایش ، با مدت زمان۱۵۰دقیقه در چهار عدد آبشار مختلف ۰/۰۰۰۸، ۰/۰۰۱ ، ۰/۰۰۲ ، ۰/۰۰۳ تحت پرش آزاد (نوع A) بر روی سطح صاف انجام شد. در حین آزمایش شاهد مشاهده شد که جریان با سرعت زیادی به سمت پنجه حرکت می‌کند که باعث تشکیل پرش هیدرولیکی در پنجه سرریز و ایجاد جریان‌های گردابه‌ای بر روی بستر شنی می‌شود که با افزایش عدد آبشار حداکثر عمق و وسعت چاله آبشستگی افزایش می‌یابد. به طور مثال با افزایش عدد آبشار از ۰/۰۰۲ به ۰/۰۰۳ عمق آبشستگی به میزان۳۰ درصد افزایش یافت. شکل(۷) پروفیل طولی آبشستگی بستر صاف برای اعداد آبشار مختلف را نشان می‌دهد

ب) نتایج آزمایش‌ها با حضور زبری و درصد تراکم‌های مختلف در بستر آبراهه شیبدار

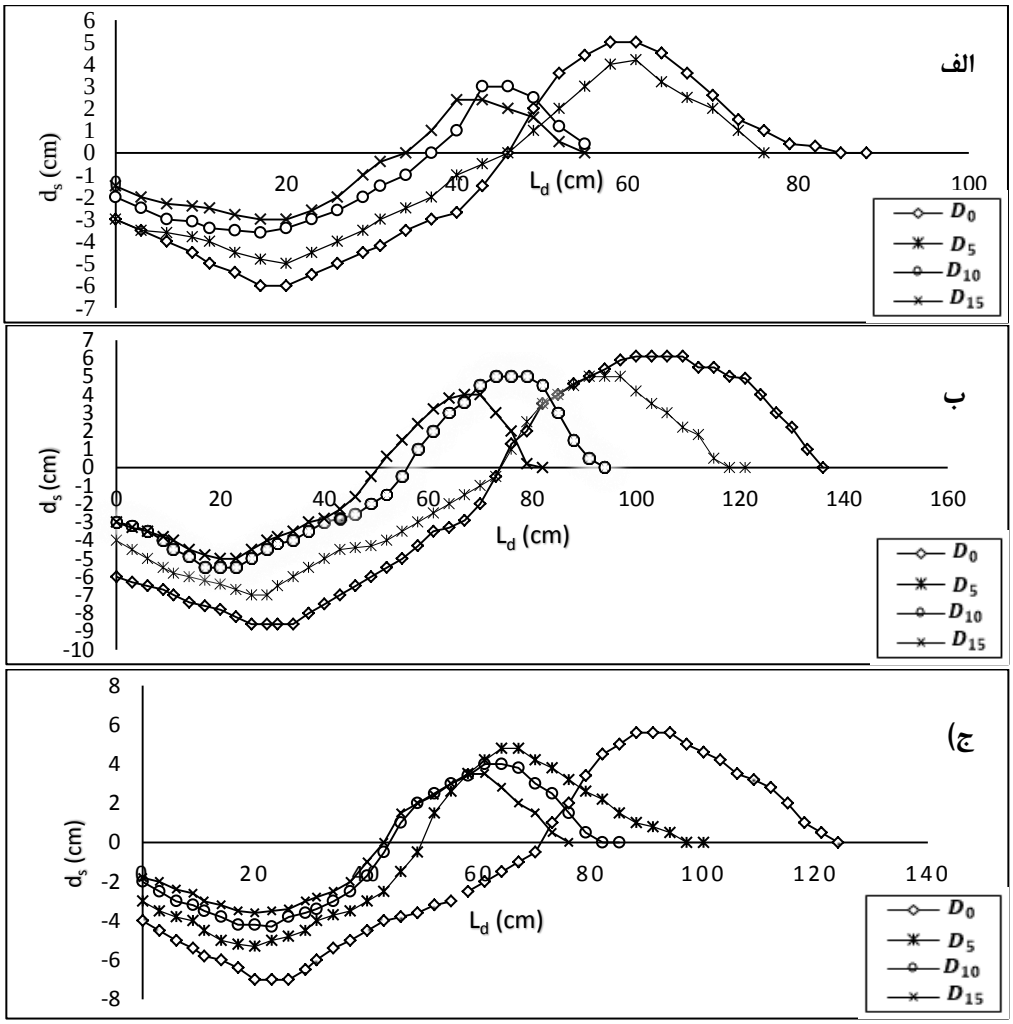
پس از قرار دادن زبری‌ها با تراکم های مختلف بر روی بستر صاف، با عبور آب از روی آن‌ها، جریان‌های گردابه‌ای در فواصل زبری‌ها ایجاد شده و انرژی در زمان رسیدن به پنجه مستهلک شده و از قدرت پرش می‌کاهد. شکل (۸) تغییرات افت انرژی نسبی در مقابل عدد آبشار را نشان می‌دهد. در شکل (۸) مشاهده می‌شود که با وجود زبری بستر آبراهه شیبدار ، میزان استهلاک انرژی از ۲۵ تا ۶۵ درصد نسبت به مدل با بستر صاف افزایش می‌یابد.

کمترین افزایش افت انرژی در تراکم ۵ درصد اتفاق می‌افتد به طوری که در تراکم های ۱۰درصد، ۱۵ درصد بیشترین افزایش افت انرژی و تقریبا نزدیک بهم می‌باشند. استهلاک انرژی در شرایط وجود زبری بر پایه ایجاد تلاطم بیشتر و تولید گردابه‌ها در جهت تضعیف انرژی جریان بر روی سرریز استوار می باشد. با توجه به اینکه هدف این مطالعه تاثیر تراکم زبری‌ها برروی عمق آبشستگی در پایین دست آبراهه شیبدار می‌باشد به منظور بررسی تاثیر تراکم دراین قسمت تغییرات پروفیل طولی آبشستگی با درصد تراکم‌های مختلف ارائه می‌گردد. شکل (۹) این تغییرات را در اعدادآبشار (۰/۰۰۰۸، ۰/۰۰۱ ، ۰/۰۰۲) نشان می‌دهد. D_0 بستر صاف بدون زبری D_5، D_{10} و D_{15} با زبری به ترتیب تراکم ۵ ،۱۰ و ۱۵ درصد را نشان می‌دهد. در شکل (۸) مشاهده می‌شود

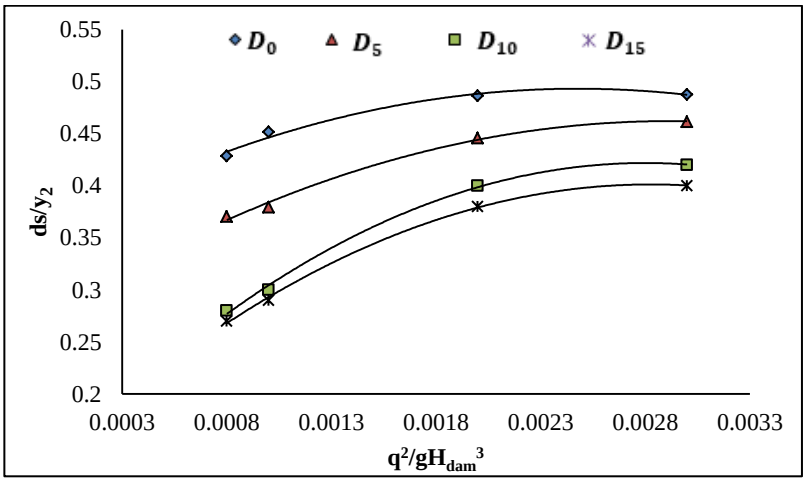
با افزایش تراکم عمق آبشستگی و طول کل آبشستگی نسبت به بستر صاف در تراکم ۱۵ درصد به ترتیب ۴۳ و ۲۳ درصد کاهش می یابد. دلیل عمده آن این است که در هنگام عبور جریان از روی زبری‌ها بخشی از انرژی جریان مستهلک می‌شود. همچنین با افزایش تراکم به علت افزایش مقاومت جریان و ایجاد نیروهای گردابه‌ای در فواصل زبری‌ها از قدرت جریان کاسته و باعث افزایش افت انرژی در پایین دست می‌شود که متعاقبا روی عمق‌آبشستگی پایین دست تأثیر می‌گذارد.



شکل۸- تغییرات افت انرژی نسبی در مقابل عدد آبشار



شکل ۹-تغییرات پروفیل طولی بستردر تغییر تراکم های مختلف زبری الف)$\frac{q^2}{gH_{dam}{}^3}=0.0008$ ب)$\frac{q^2}{gH_{dam}{}^3}=0.001$ ج)$\frac{q^2}{gH_{dam}{}^3}=0.002$



شکل۱۰-تغییرات عمق بی بعد آبشستگی دردرصد تراکم های مختلف

جدول۲-تغییرات پارامتر کاهش عمق آبشستگی برای تراکم‌های مختلف (R%)

عددآبشار	تراکم ۱۵ درصد	تراکم ۱۰ درصد	تراکم ۵ درصد
۰/۰۰۳	۳۰	۲۵	۱۰
۰/۰۰۲	۳۸	۳۳	۱۶
۰/۰۰۱	۵۷	۴۵	۲۸
۰/۰۰۰۸	۵۰	۴۰	۲۰

جدول۳-میزان متوسط تغییرات ابعاد آبشستگی برای تراکم‌های مختلف

تراکم	عمق آبشستگی (٪)	طول حفره (٪)	طول کل آبشستگی (٪)
تراکم ۵ درصد	۱۸/۵	۱۵/۱	۱۶
تراکم ۱۰ درصد	۳۵/۷۵	۲۷	۳۰
تراکم ۱۵ درصد	۴۳/۷۵	۳۲	۳۳

به نظر می‌رسد با افزایش درصد تراکم و جریان‌های گردابه‌ای در فواصل زبری‌ها منجر به تضعیف بیشتر قدرت جریان ناشی از حضور زبری در اعداد آبشار مختلف می‌گردد. درطول یک بستر زبر هم نیروی اصطکاکی و هم نیروی درگ فشاری از سیال بر بستر اثر می‌کند. با شرایط هیدرولیکی یکسان هر چقدر فاصله بین زبری ها کم می‌شود نیروی درگ فشاری بیشتر می‌شود و نیروی کل وارد بر جریان بیشتر می‌شود و افت انرژی متقابلا افزایش می‌یابد. در شکل (۱۰) که تغییرات عمق بی بعد آبشستگی در مقابل عدد آبشار برای بستر صاف و تراکم ۵٪ ، تراکم ۱۰٪ و تراکم ۱۵٪ آورده شده است نشان می دهد با افزایش عدد آبشار عمق بی بعد آبشستگی در تراکم ۱۵٪، ۳۸٪ افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه H و g در این تحقیق مقدار ثابتی می‌باشد، افزایش عدد آبشار در واقع همان افزایش دبی می‌باشد بنابراین در یک تراکم خاص با افزیش دبی عمق بی بعد آبشستگی افزایش می‌یابد. همچنین در شکل (۱۰) عمق بی بعد آبشستگی در درصد تراکم‌های نشان می‌دهد بین افزایش درصد تراکم و عمق بی‌بعد آبشستگی رابطه عکس برقرار است به این صورت که با افزایش میزان درصد تراکم ،عمق بی بعد آبشستگی کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود میزان تغییرات عمق بی بعد آبشستگی در برابر تغییرات درصد تراکم برای هر ۴عدد آبشار بهم نزدیک می‌باشند که در تراکم ۱۵ درصد، این تغییرات عمق بی بعد آبشستگی بسیار بهم نزدیک می شود. به طوری که این تغییرات حدود ۶ درصد باهم اختلاف دارند پس هرچه تراکم بستر را افزایش دهیم، تغییرات عمق بی‌بعد آبشستگی بهم نزدیک‌تر می‌شود. به منظور بررسی کمی نتایج می‌توان میزان تغییرات کاهش عمق آبشستگی(R%) را از رابطه (۸) بر آورد کرد:

$$R = \frac{d_{smax5,10,15} - d0s}{d0s} \times 100 \qquad (۸)$$

در رابطه بالا $d_{smax5,10,15}$ ، به ترتیب عمق آبشستگی در تراکم های ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد سطح آبراهه شیبدار را نشان می‌دهد. d_{0s} آبشستگی در بستر صاف را نشان می‌دهد. در جدول (۲) درصد کاهش عمق آبشستگی نسبت به بستر صاف برای تراکم‌های مختلف در محدوده عدد آبشار ۰/۰۰۰۸ تا ۰/۰۰۳ آورده شده است. با توجه به جدول (۲) مشاهده می‌شود برای یک عدد آبشار خاص،

با افزایش درصد تراکم درصد کاهش عمق آبشستگی افزایش پیدا کرده است. در جدول (۳) به عنوان مثال با افزایش تراکم ۱۵ درصد نسبت به بستر صاف میانگین کاهش عمق آبشستگی ،طول حفره، طول کل آبشستگی، به ترتیب حدوداً ۴۳ ، ۲۷ و ۳۳ درصد تغییر یافته است. همانطور که در جدول (۲) مشاهده می کنیم کاهش عمق آبشستگی ($R\%$) در تراکم ۱۵ درصد نسبت به تراکم ۵ درصد،۱۰ درصد بیشتر است. با مقایسه درصد کاهش آبشستگی ($R\%$) می‌توان گفت در تراکم ۱۵ درصد بیشترین کاهش عمق آبشستگی مشاهده می‌شود. تغییرات پارامتر کاهش عمق آبشستگی ($R\%$) برای تراکم‌های مختلف درمقابل اعداد آبشار مختلف در شکل (۱۱) آورده شده است. برای اعداد آبشار مختلف دریک تراکم خاص با افزایش عدد آبشار درصد کاهش عمق آبشستگی ابتدا افزایشی و سپس کاهشی می‌باشد. علت این امر این است که درواقع عدد آبشار همان افزایش دبی می‌باشد در دبی‌های کمتر اثر زبری کف بر مقاومت جریان بیشتر بوده در نتیجه اتلاف انرژی آن بیشتر است. از این رو درصد کاهش عمق آبشستگی در دبی‌های بالا کمتر از دبی‌های پایین می‌باشد. به منظور درک بهتر نتایج آزمایش‌ها، با استفاده از متر لیزری داده‌های توپوگرافی بستر برداشت گردید و با استفاده از نرم افزار surfer12 توپوگرافی بستر رسم شد. در شکل(۱۲) توپوگرافی بستر برای عدد آبشار۰/۰۰۰۸ برای سطح آبراهه شیبدار بدون زبری و در حضور زبری در سه تراکم نشان داده شده است.

به طور کلی در مقایسه با آبشستگی پایین دست سرریز پلکانی با نتایج موسوی (۱۳۸۳) با سرریزی دارای ۱۰ پله و زاویه ۲۰ درجه و مصالح بستر ۶/۳ میلی‌متر مشخص است که ابعاد حفره آبشستگی در آزمایش‌های این تحقیق کمتر است. به این صورت که عمق آبشستگی در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه درتراکم ۱۰ و ۱۵ درصد به ترتیب حدود ۴۳درصد و ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در دبی ۲۲ لیتر بر ثانیه حدود ۲۸ و ۳۵ درصد عمق آبشستگی کم شده است. دلیل عمده آن می‌تواند ناشی از اثرات زبری در فواصل کم باشد که افزایش مقاومت جریان باعث استهلاک بیشتر انرژی می‌شود. شکل(۱۳) توسعه حفره آبشستگی در حوضچه با سطح آبراهه زبر در این تحقیق و سرریز پلکانی در آزمایش‌های موسوی در دبی ۱۵ و ۲۲ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد.

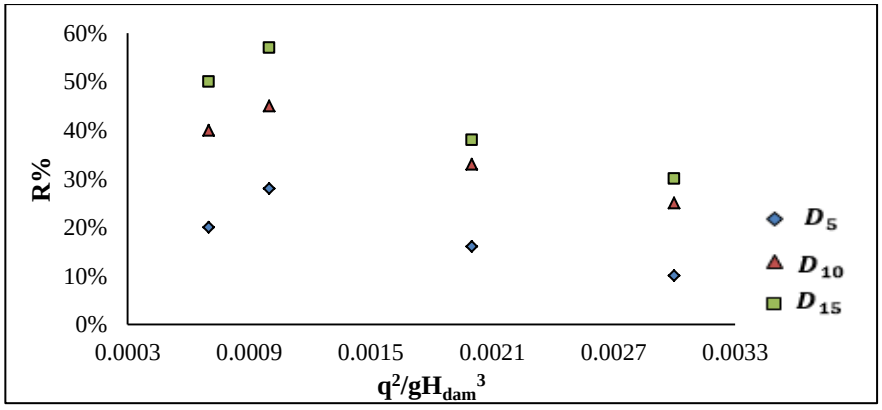
استخراج رابطه

همان‌گونه که در بخش مواد و روش‌ها عنوان شد، با استفاده از تحلیل ابعادی رابطه (۹) حاصل گردید که به منظور استخراج رابطه‌ای خاص، می‌باید با به‌کار بردن داده‌های آزمایشگاهی و نرم افزارهای آماری مناسب‌ترین معادله بین متغیرهای بدون بعد را برازش داد. در این تحقیق از نرم افزار SPSS استفاده شد و معادله زیر برای محاسبه عمق آبشستگی استخراج گردید.

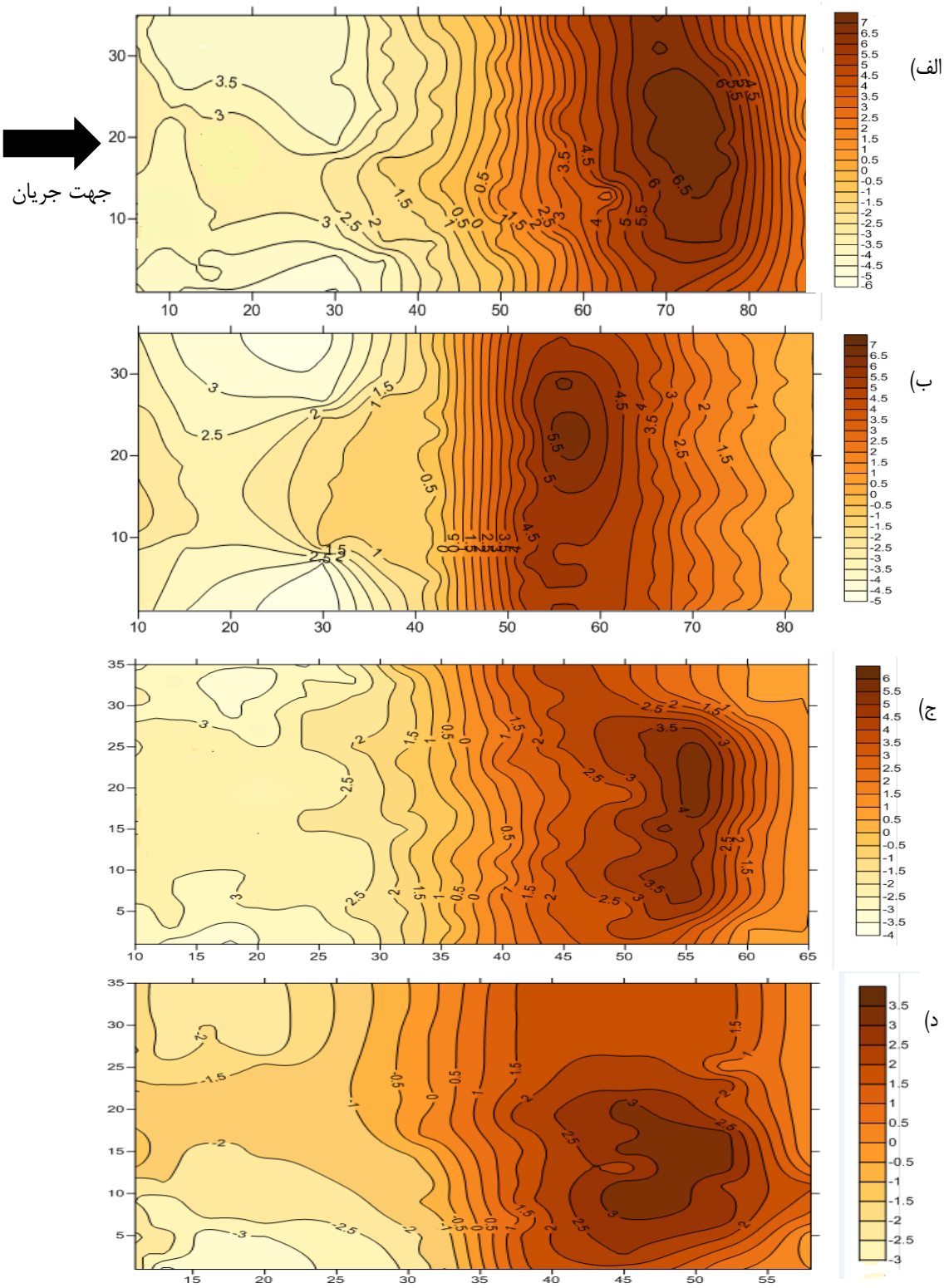
$$d_s/_{y_2} = 13.77\left(\frac{q^2}{gH^3}\right)^{0.007} - 15.3(d\%)^{0.053} + 2.5777 \qquad (۹)$$

R^2 رابطه ۰/۹۴۱ می‌باشد. همانطور که از رابطه (۹) پیداست، تغییرات عمق آبشستگی نسبت به عمق مزدوج تابعی از عدد آبشار و درصد تراکم‌های مختلف می‌باشد. همچنین بین عمق بی‌بعد آبشستگی با عدد آبشار جریان رابطه مستقیم و با درصد تراکم‌های مختلف رابطه عکس وجود دارد. به منظور نشان دادن دقت رابطه مقدار عمق آبشستگی محاسبه شده با این رابطه در مقابل مقدار همین پارامتر که از آزمایش بدست آمد ترسیم گردید و شکل (۱۴)

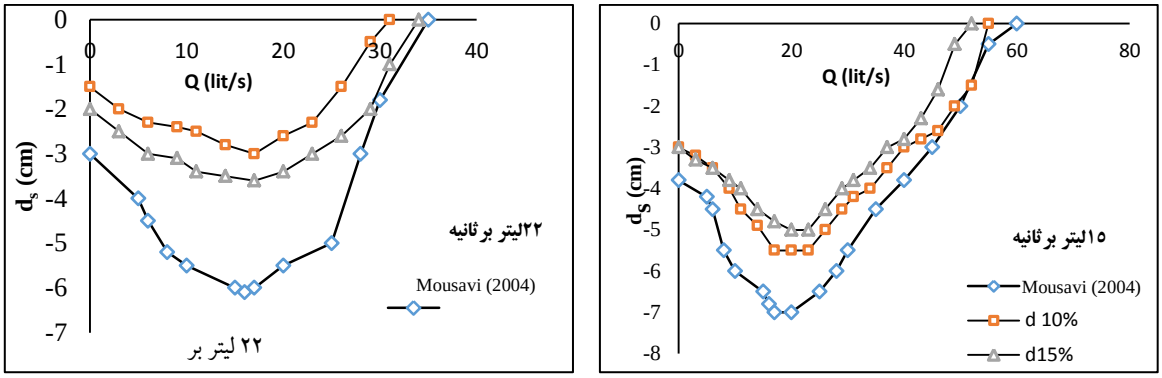
به‌دست آمد. سپس میزان انحراف مقادیر محاسبه شده از رابطه(۹) با نتایج بدست آمده در آزمایشگاه از فرمول $R=\frac{d_{sm}-d_{sc}}{d_{sm}}$ محاسبه شد و میانگین قدر مطلق این خطا به عنوان متوسط خطا در نظر گرفته شد که مقدار آن ۱۳ درصد می‌باشد. در رابطه فوق d_{sm}، عمق آبشستگی بدست آمده از آزمایشگاه و d_{sc} مقادیر محاسباتی می‌باشد.



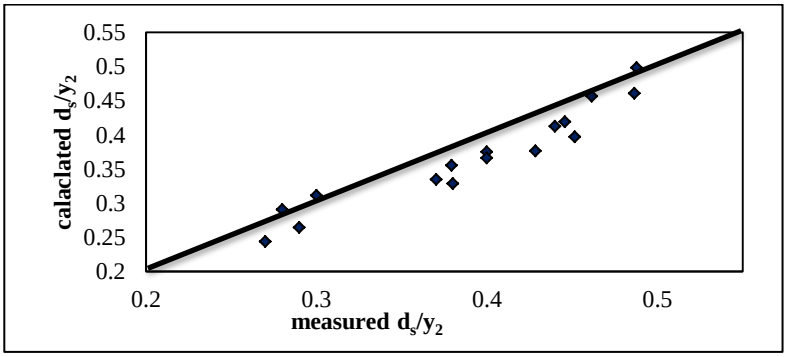
شکل ۱۱- تغییرات پارامتر کاهش عمق آبشستگی در مقابل عدد آبشارجریان برای درصد تراکم های مختلف



شکل۱۲-نمای دو بعدی پروفیل آبشستگی در بستر صاف و تراکم‌های مختلف در عدد آبشار۰/۰۰۰۸ الف) بستر صاف ب) تراکم ۵ درصد ج) تراکم ۱۰ درصد د) تراکم ۱۵ درصد



شکل ۱۳- مقایسه توسعه حفره آبشستگی در این تحقیق با نتایج موسوی در دبی (*lit/s*)۱۵ و (*lit/s*) ۲۲



شکل ١٤-نمودار مقایسه d_s/y_2 محاسبه شده از رابطه ۹ در برابر مقادیر بدست آمده از آزمایش

نتیجه گیری

در این مطالعه به بررسی میزان تاثیر تراکم زبری‌های مصنوعی بر روی عمق آبشستگی داخل حوضچه پرداخته شد. مجموعاً ۱۶ آزمایش در شرایط تشکیل پرش آزاد انجام گرفت. نتایج آزمایش نشان داد:

۱- زبری‌ها می‌توانند با ایجاد گردابه‌ها و برخورد جریان به بعد عمود بر جریان سطح زبری‌ها و افزایش مقاومت جریان باعث کاهش ابعاد آبشستگی از جمله عمق و طول آبشستگی به ترتیب به میزان ۴۳ و ۲۳ درصد شود.

۲- همچنین تغییرات میزان آبشستگی بر حسب تغییر درصد تراکم نشان داد افزایش تراکم به میزان ۱۵ درصد باعث بیشترین کاهش آبشستگی در داخل حوضچه می‌باشد. در دبی حداقل عمق آبشستگی در تراکم ۵ درصد حدود ۲۵ درصد کاهش می‌یابد که درصورت افزایش تراکم به میزان ۱۵ درصد حدود ۴۱ درصد کاهش پیدا می‌کند.

۳- عمق آبشستگی در دبی‌های حداقل بیشتر است. به دلیل اینکه اثرات زبری کف بر مقاومت جریان بیشتر بوده در نتیجه اتلاف انرژی بیشتر است.

۴- همچنین نتایج نشان می‌دهد کاهش عمق آبشستگی در در دو تراکم ۱۰ درصد و ۱۵ درصد در هر چهار عدد آبشار تقریبا به یک میزان کاهش می‌یابند. این امر باعث می‌شود که به جای افزایش ۱۵ درصدی تراکم در این محدوده از اعداد، آن را به میزان ۱۰ درصد افزایش دهند. زیرا هم هزینه و هم زمان کمتری برای ساخت زبری‌ها ونصب آنها صرف می‌شود. ۵-از مقایسه حداکثر عمق آبشستگی داخل حوضچه با سطح شیبدار زبردر این مطالعه و مطالعه‌ای که Mousavi (2004) بر روی آبشستگی پایین دست سرریز پلکانی و در شرایط هیدرولیکی یکسان انجام دادند، نتایج این تحقیق به طور متوسط حدود ۴۰ درصد کاهش را نشان می‌دهد.

۵- از مقایسه حداکثر عمق آبشستگی داخل حوضچه با سطح شیبدار زبر در این مطالعه و مطالعه ای که Mousavi (2004) روی آبشستگی پایین دست سرریز پلکانی و در شرایط هیدرولیکی یکسان انجام دادند، نتایج این تحقیق به طور متوسط حدود ۴۰ درصد کاهش را نشان می‌دهد.

منابع

1- Adduce, C. and Sciortino, G., 2006. Scour due to a horizontal turbulent jet: Numerical and experimental investigation. *Journal of hydraulic research*, *44*(5), pp.663-673.

2- Dey, S. and Sarkar, A., 2006. Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets. *Journal of hydraulic engineering*, *132*(3), pp.246-257.

3- Farhoudi, J. and Smith, K.V., 1985. Local scour profiles downstream of hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research*, *23*(4), pp.343-358.

4- Hamidi Far, H., Omid, H.A., 2010, No cohesive Sediment Scour Downstream of an Apron", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 11(2):17-28, (In Persian).

5- Hosseini, M., Abrishami, J., 2015, *Open Channel Hydraulics*, Astan Ghods Razavi, pp 613, (In Persian).

6- Kazemi Nasaban, G., 1996, Study of the Depth of Scour Downstream of Gabion's Stepping Smash, *4th Conference of River Engineering*, Shahid Chamran Ahvaz University, (In Persian).

7- Khalili, S., Farhoudi, J., 2013, Scour Profiles and Variation of Shear Stresses in Scour Holes Downstream of Adverse Stilling Basins, *Journal of Hydraulics*, 7(4), pp. 85-99, (In Persian).

8- Mousavi, S. 2004, Study of Depth of Scour Downstream of Stepping Smash, *Master Thesis*, Shahid Chamran Ahvaz University, (In Persian).

9- Novak P, 1961. Influence of Bed Load Passage on Scour and Turbulence Downstream of Stilling Basin. *Proceeding of 19th IAHR Conf. Dubrovnik*: 66-75.

10- Omidi, S., Shafaie Bajestan, M., 2014, "Investigation of Scour Depth Downstream of Stilling Basin for the Case of B-Jump" *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 38(4), pp 125-136, (In Persian).

11- Pagliara, S, and Chiavaccini, P. (2006). Energy Dissipation on Block Ramps. *Journal of Hydraulic Engineering. ASCE*. 132(1): 41-48.

12- Pagliara, 2007. Influence of Sediment Gradation on Scour Downstream of Block Ramps. *Journal of Hydraulic Engineering. ASCE*. 133(11): 1241-1248.

13- Pagliara, M.Palermo, (2008) .Score Control Downstream of Block Ramps in Basins With Continuous and Denated Sill. *16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS*.

14- PAGLIARA, S. and PALERMO, M., 2008. Scour downstream of a block ramp in asymmetric stilling basins. In *Fourth International Conference on Scour and Erosion ICSE-4* (pp. 240-245).

15- Rahmanshahi, M., Shafai Bajestan, M., 2012, Experimental Investigation of the Effect of Chute Bed Roughness Height on Energy Dissipation, *Water and Soil Science*, 22(2), pp. 95-106, (In Persian).

16- Sayahi, A., 1993, Review and Forecast of Maximum Depth of Local Scour Downstream of Saint Anthony Falls Stilling Basin, *Master Thesis*, Shahid Chamran University, (In Persian).

17- Ahmad, Z., Petappa, N.M. and Westrich, B., 2009. Energy dissipation on block ramps with staggered boulders. *Journal of Hydraulic Engineering*, *135*(6), pp.522-526.

Shahid Chamran University of Ahvaz
Irrigation Sciences and Engineering (JISE) **Vol. 41, No. 4, Winter 2019, p. 147-159**

EXTENDED ABSTRACT

Examination of the Effect of Cubic Artificial Roughness Density inInclined Channel on Downstream Scour Depth

F. Farajzadeh[1] and A. Fathi[2*]

1- Master Student, Department of Hydraulic Structures, Shahid Chamran University of Ahvaz.
2*- Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Hydraulic Structures, Shahid Chamran University of Ahvaz. *(a.fathi@scu.ac.ir).*

Received:12 December 2016 Revised:3 March 2018 Accepted:4 March 2018

Keywords: Artificial Roughness, Scour, Energy Depreciation, Inclined Channel.

Introduction

Water passage from steep slopes in river engineering issues and the design of water transfer structures is inevitable. Because of the steep slope of the surface, the surface velocity and surface erosion rates are high. Energy control in high-speed flows is one of the challenges of designing hydraulic structures. These flows, for example, occur in places such as dam overhead structures, drainage systems of urban areas and Mountain Rivers with a steep slope. One of the ways to reduce dimensions or eliminate energy depreciating structures is to use methods to reduce the kinetic energy of flow over the weir, including using of stairs or blocks on the overflow. The use of large-sized stairs or blocks will cause the passing jets of flow to be separated and as a result turbulent, which can effectively deplete the kinetic energy of the current. The problem with using a staircase or block is a huge cost of built and a high risk of cavitation. Another method of energy depreciation is to apply roughness at the overflow bed, which may be an efficient way to reduce energy. Roughness can dramatically reduce the flow turbulence, and thus reduces the risk of cavitation. Also, roughness can reduce the flow power over the overflow and reduce the depth of the lower erosion pit by removing or reducing the dimensions of the relaxation basin. Most studies in this field have investigated the effect of these roughs on the amount of energy depletion, which in addition to energy depletion is also important for lowering the erosion of the structure. However, for the economic design of hydraulic structures, designers need to have full knowledge of the particle mechanics and the dimensions of the scour hole, so that they can consider the requirements for the stability of the structure, which has so far been investigated insufficiently. Therefore, the present study aimed to investigate the effect of roughness density on sloped bed surface on its downstream scour depth.

Methodology

In this research, the effect of artificial roughness density on the scour depth of the sandy bottom was investigated. Lower scouring of the slope is dependent on a large number of variables related to hydraulic flow over the slope along the presence of roughness, as well as the characteristics of hydraulic jump and sediments. Then, a general non-dimensional relationship was developed as follows (equation 1).

$$\frac{d_s}{y_2} = f\left(\frac{q^2}{gH_{dam}{}^3}, d\%\right) \quad (1)$$

A laboratory model including an overflow weir with a height of 60 cm and a length of 180 cm was built. The surface of the overflow covered with cubic artificial roughness, in three

concentrations of 5%, 10%, and 15% and scouring inside the basin in four different cascades ranging from 0.800 to 0.003 was investigated. To put roughs on a sloping bed, they were first drawn using AutoCAD software with dimensions of 1.5 * 3 * 3. Then they were cut from Plexiglas by laser cutting. The steps of the experiment are such that the sediments were first manually flattened and the surface of the bed was measured by a laser meter with 0.1 mm accuracy. In order to prevent the unwanted washing of the materials, the water level was slowly increased at first, and after the balanced condition, the Flume inlet valve was opened, the flume was opened and the amount of discharge was adjusted. After the fixation of the jump site, the experiments continued for 150 minutes.

Results and discussion

At this stage, four experiments were carried out with 150 minutes' period in four different cascades of 0.0008, 0.001, 0.002, and 0.003 under free jump (type A) on a flat surface. As the number of cascades increased from 0.002 to 0.003, the scour depth increased by 30%. In order to investigate the effect of compression, various scour length profiles with different density percentages presented, and It was observed that by increasing of the scour depth density and the total scour length the total scour depth decreased by 43% and 23% respectively, then the flat bed at a density of 15%. As well as changes in the depth of the dimensionless scour depth versus the cascade number for flat bed and density of 5%, 10% , and 15% were drawn. With increasing the cascade number, the dimensionless depth of the scour at the density of 15% and 38% increases. The variation of scour in terms of density change showed that increasing density by 15% caused the greatest reduction in scouring inside the basin. Roughness can reduce the scour depth, including depth and scour length, by generating vortices and flowing collisions perpendicular to the surface of the roughness and increasing the current resistance. The dimensionless depth of scouring in different percentage densities shows that there is an inverse relationship between increase in percentage of density and dimensionless depth of scouring. In this way, with increasing density percentage, the dimensionless depth of scouring decreases. In order to evaluate the quantitative results, we can estimate the variation of the scour depth reduction ((% R) from equation (2):

$$R = \frac{d_{smax5,10,15-d0s}}{d0s} \times 100 \qquad (2)$$

In the above equation, $d_{smax5,10,15}$ shows the scour depth at the channel's surface slopes of 5%, 10%, and 15% , respectively. d_{0s} Shows flatbed scour. In table (2), the percentage of scour depth reduction compared to the flat surface for different densities in the range of the cascade number from 0.2008 to 0.003 is presented. According to table (2), for a specific cascade number, by increasing percentage of density, the percentage of scour depth reduction has increased. By increasing the density of 15%, the average reduction in scour depth, cavity length, total scour length were changed approximately by 43%, 27%, 33%, respectively.

Conclusion

The results indicated that under a fixed cascade number, by increasing the roughness density, the flow strength through the inclined channel because of the shear resistance is weakened. Hence, with the effect of roughness on reducing the flow strength of vortices generated in the course of a low hydraulic jump in the inclined channel, the scour depth decreases. In the case of increasing the density by 15%, the scour depth in the cascade number is reduced by a maximum of 30%, this amount of decrease in the density by 5% reaches to a maximum of 10%. The results also showed that reducing the scour depth in two condensations of 10% and 15% in each of the four cascades will decrease by about the same percentage. Ultimately, a general equation was proposed to predict the amount of scour depth reduction in this type of channel, and it was found that the equations obtained have an acceptable agreement with the laboratory data.