

بررسی تأثیر تراکم زبری‌های مصنوعی مکعبی بر آبراهه شیبدار روی عمق آبستنگی پایین دست 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

پذیرش: ۹۶/۲/۱۳

بازنگری: ۹۶/۲/۱۲

دریافت: ۹۵/۹/۲۲

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 و نرخ فرسایش سطحی بالا می‌باشد. لذا توسعه حفره آبستنگی 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 و طول ۱۸۰ سانتی‌متر ساخته شد. سطح بستر سرریز پوشیده از زبری‌های مصنوعی مکعبی در سه تراکم ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد و آبستنگی داخل حوضچه در ۴ عدد آبشار مختلف از ۰/۰۰۸ 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 تأثیرگذاری زبری بر کاهش قدرت گردابه‌های بوجود آمده در جریان پرش هیدرولیکی پایین دست آبراهه شیبدار از میزان عمق آبستنگی کاسته می‌شود. در صورت افزایش تراکم به میزان ۱۵ درصد عمق آبستنگی 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، آبستنگی، استهلاک انرژی، آبراهه شیبدار.

مقدمه

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. Shafai Bajestan و Rahmanshahi (2012) تأثیر اندازه زبری بستر تندآب بر میزان استهلاک انرژی جنبشی آب، مورد بررسی قرار دادند. سپس آزمایش‌هایی روی مدل‌های فیزیکی در ۳ شیب مختلف (۱۵، ۲۲/۵ و ۳۰ درجه) با قرار دادن ۳ نوع زبری با اندازه‌های متفاوت (۱/۱، ۱/۴۳ و 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. Zulfueqar Ahmad et al. (2009) با انجام آزمایش‌هایی به بررسی اثر نیم‌کره‌های برآمده بر استهلاک انرژی روی شیب‌های سنگی با آرایش و تراکم‌های

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 آبستنگی پایین دست سازه در مسیر رودخانه گردد. جریان با سرعت 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. از جمله 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 در نتیجه خطر کاویتاسیون را کاهش دهد. همچنین زبری می‌تواند قدرت جریان عبوری از

روی عمق و طول و شیب بالادست و پایین دست و ارتفاع حفره آبخستگی تأثیر می‌گذارد و همچنین با افزایش عدد فرود درمقطع اولیه پرش، عمق و طول بدون بعد آبخستگی نیز افزایش می‌یابد.

همان‌طور که اشاره شد ایجاد زبری روی بستر آبراهه شیبدار از جمله روش‌های استهلاک انرژی و کاهش آبخستگی 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 آبخستگی 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 تأثیر تراکم زبری‌ها روی سطح بستر آبراهه شیبدار بر روی عمق آبخستگی پایین دست آن انجام شده است.

آنالیز ابعادی

آبخستگی 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 و جرم حجمی ذرات رسوب این متغیرها عبارتند از:

$$f(q, H_{dam}, \gamma_2, \mu, d_s, \rho, \sigma, g, d\%, \zeta) = 0 \quad (1)$$

که در آن d_s عمق آبخستگی، g شتاب ثقل زمین، H_{dam} ارتفاع سرریز ρ چگالی ویژه سیال، μ لزجت دینامیکی سیال، γ_2 عمق ثانویه پرش، q دبی واحد عرض جریان، $d\%$ درصد تراکم زبری‌ها و ζ آرایش زبری‌ها می‌باشد. از آنجا که در تمام آزمایش‌های این تحقیق عمق پایاب برابر عمق مزدوج بوده، بنابراین فقط عمق مزدوج به عنوان متغیر اختیار شده است. با در نظر گرفتن q ، H و ρ بعنوان سه متغیر تکراری و استفاده از قضیه پای باکینگهام کمیت‌های بدون بعد مؤثر در پدیده به صورت رابطه (۲) استخراج گردید.

$$f\left(\frac{q^2}{gH_{dam}}, Re, We, \frac{d_s}{\gamma_2}, d\%, \zeta\right) = 0 \quad (2)$$

در این رابطه $\frac{q^2}{gH_{dam}}$ عدد آشپار، Re عدد رینولدز، We عدد وبر می‌باشد. 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 می‌توان به صورت رابطه (۳) نوشت:

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 آبخستگی 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 آبخستگی و وجود تشابه بین پروفیل‌های آبخستگی را گزارش دادند. Pagliara در سال (2007) اثر بستر غیر یکنواخت پایین دست شیب سنگی روی هندسه حفره آبخستگی در شرایط آب زلال بررسی کرد که منجر به معادلاتی برای بیشترین عمق و میانگین مقدار عمق آبخستگی، طول و ارتفاع برآمدگی آن گردید. Pagliara و Palermo (2008) عمق آبخستگی پایین دست شیب سنگی را تابعی از ارتفاع سنگریزه‌های موجود در پاشنه آن عنوان نمودند. Palermo و Pagliara (2012) مکانیزم آبخستگی در پایین دست یک رمپ بلوکی در یک حوضچه آرامش نامتقارن را مورد تحلیل قرار دادند. آزمایش‌ها در سه آرایش مختلف کانال ($B/b=1$ ، $B/b=1.67$ ، $B/b=2.33$) 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 آبخستگی نیز بیشتر است. از طرفی دیگر، افزایش پایاب موجب کاهش عمق آبخستگی می‌شود. Sayahi (1993) به بررسی مکانیزم آبخستگی در پایین 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 آبخستگی پایین‌دست سرریز پلکانی گابیونی با استفاده از نیروهای عمل کننده به ذره معادلاتی به صورت خطی و نمایی برای سرریزهای مختلف ارائه دادند. Mousavi (2004) میزان عمق آبخستگی پایین دست سرریز پلکانی بر روی ۴ مدل سرریز با دو شیب ۲۰ درجه و ۳۰ 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 آبخستگی افزایش خواهد یافت و پس از استخراج نتایج حاصل از آزمایش‌ها و آنالیز ابعادی و کاربرد رگرسیون چند متغیره روابطی برای تعیین عمق آبخستگی ارائه داد. Shafaie و Omidi Bajestan (2014) آبخستگی 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 آبخستگی پایین دست پرش نوع A و B می‌شود و بر

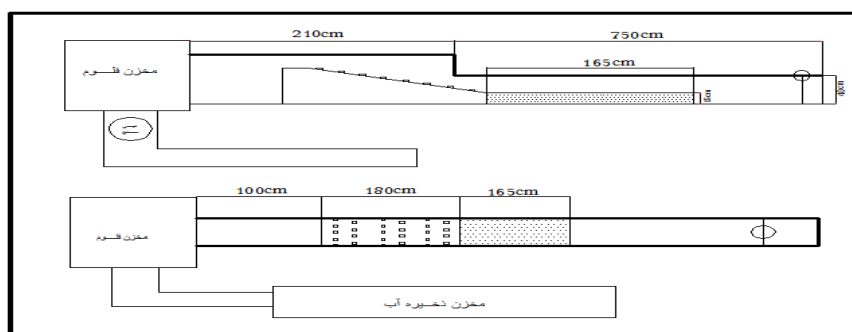
ورود آب به مخزن آرام کننده، دبی توسط دبی سنج الکترومغناطیس با دقت ۰/۰۰۱ متر معکب بر ثانیه اندازه گیری می‌شد. در فلوم در پایین دست آبراهه شیبدار مصالح رسوبی با قطر متوسط ۷ میلی‌متر، به‌عنوان مصالح بستر رودخانه در طول ۱۶۵ سانتی متر قرار داده شد و از درپچه کشویی در انتهای فلوم برای تنظیم عمق پایاب استفاده شد با توجه به سرعت جریان خروجی از تندآب و عمق پایاب پرش هیدرولیکی در پای آبراهه شیبدار تشکیل می‌گردید. شکل (۴) یک نمونه تشکیل پرش هیدرولیکی در حضور زبری هارانشان می‌دهد 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 می‌دهد.

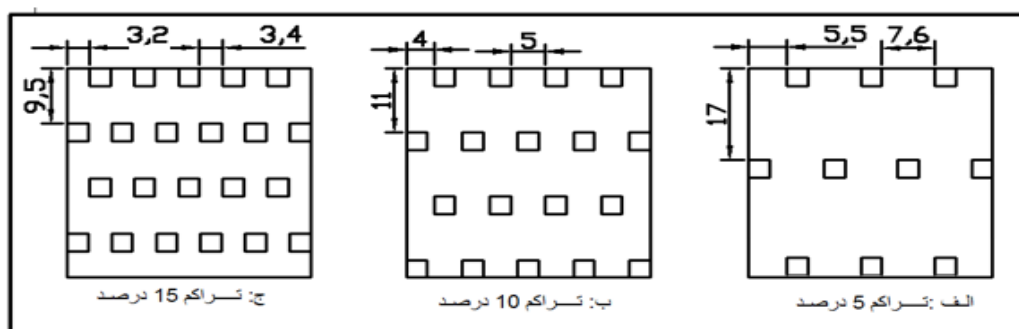
$$\frac{d_s}{y_2} = f \left(\frac{q^2}{gH_{dam}^3} \text{ و } d\% \right) \quad (3)$$

مواد و روش‌ها

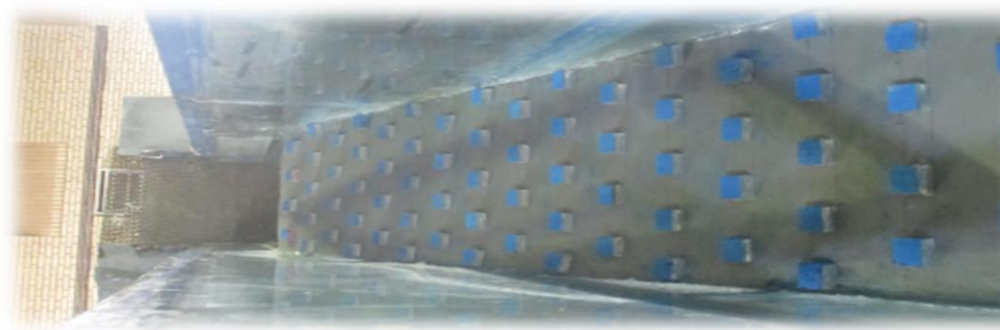
در این تحقیق هدف بررسی تاثیر تراکم زبری‌های مصنوعی چیده شده بر روی آبراهه شیبدار بر میزان آبشستگی پایین دست آن می‌باشد. مدل آبراهه شیبدار به ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر، طول ۱۸۰ سانتی‌متر و زاویه ۱۵ درجه در آزمایشگاه مدل فیزیکی دانشگاه شهید چمران درفلومی به طول ۹ متر و عرض ۰/۳۵ متر ساخته شد. شکل (۱) پلان و مقطع فلوم را نشان می‌دهد. به منظور قرار دادن زبری‌ها روی بستر آبراهه شیبدار ابتدا با استفاده از نرم افزار اتوکد به ابعاد ۳*۳*۱/۵ 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) نحوه 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



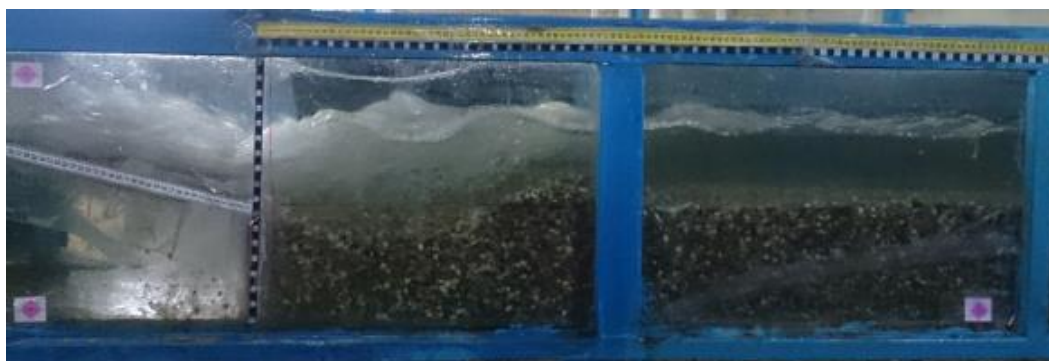
شکل ۱- مقطع طولی و پلان فلوم آزمایشگاه



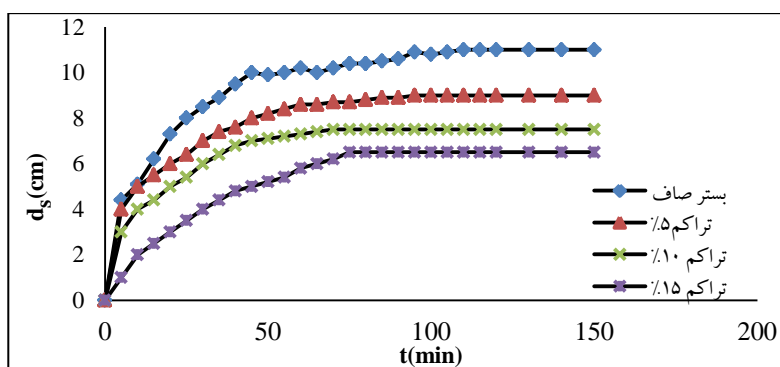
شکل ۲- نحوه چیدمان زبری‌های مکعب مصنوعی در بستر سطح شیبدار



شکل ۳- مدل با بستر زبر تراکم ۱۰ درصد



شکل ۴- یک نمونه تشکیل پرش هیدرولیکی در حضور زبری‌ها در عدد آبخار ۰/۰۰۰۸



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

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

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

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

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

پس از اتمام هر آزمایش 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.

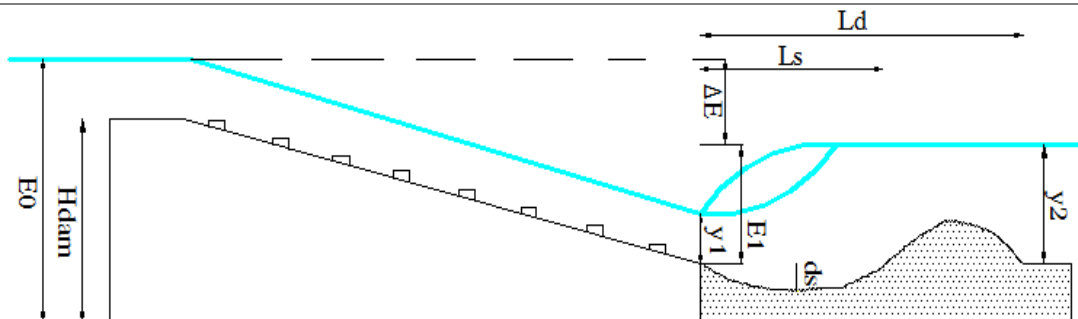
$$E_0 = H_{dam} + y + \frac{q^2}{2gy} \quad (۴)$$

در رابطه بالا H_{dam} ارتفاع سرریز، y عمق آب نسبت به تاج سرریز در فاصله‌ای حدود ۶۰ سانتی‌متر در 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.

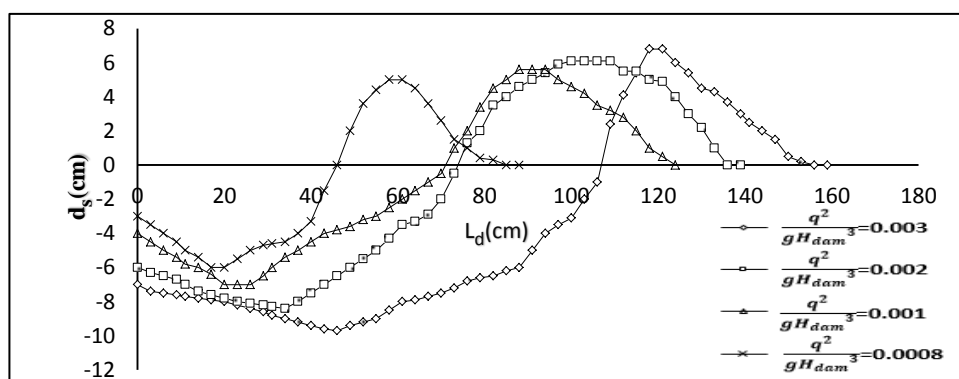
$$E_1 = y_1 + \frac{q^2}{2gy_1} \quad (۵)$$

جدول ۱- دامنه و متغیرهای این تحقیق

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



شکل ۶- شماتیک پارامترهای اندازه گیری شده در آزمایشگاه



شکل ۷- تغییرات پروفیل بستر بدون حضور زبری در اعداد آبشار مختلف

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 تراکم‌های ۱۰ درصد، ۱۵ درصد بیشترین افزایش افت انرژی و تقریباً 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 می‌باشد. با توجه به اینکه هدف این مطالعه تاثیر تراکم زبری‌ها بر روی عمق آبستگی در پایین دست آبراهه شیبدار می‌باشد به منظور بررسی تاثیر تراکم در این قسمت تغییرات پروفیل طولی آبستگی با درصد تراکم‌های مختلف ارائه می‌گردد. شکل (۹) این تغییرات را در اعداد آبشار (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

نتایج و بحث

الف) نتایج آزمایش‌ها بدون حضور زبری در بستر آبراهه شیبدار

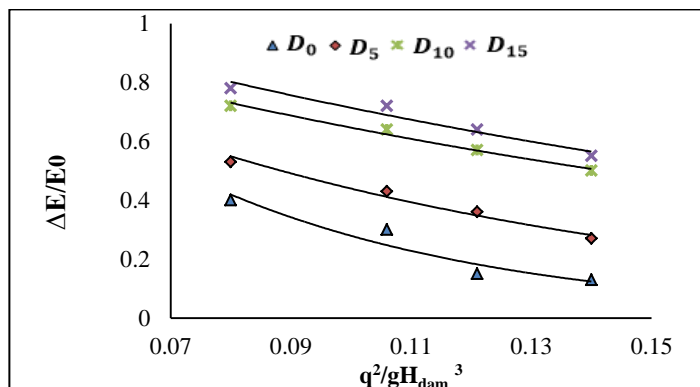
در این مرحله ابتدا چهار آزمایش، با مدت زمان ۱۵۰ دقیقه در چهار عدد آبشار مختلف ۰/۰۰۰۸، ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۳ تحت پرش آزاد (نوع A) بر روی سطح صاف انجام شد. در حین آزمایش شاهد مشاهده شد که جریان با سرعت زیادی به سمت پنجه حرکت می‌کند که باعث تشکیل پرش هیدرولیکی در پنجه سرریز و ایجاد جریان‌های گردابه‌ای بر روی بستر شنی می‌شود که با افزایش عدد آبشار حداکثر عمق و وسعت چاله آبستگی افزایش می‌یابد. به طور مثال با افزایش عدد آبشار از ۰/۰۰۲ به ۰/۰۰۳ عمق آبستگی به میزان ۳۰ درصد افزایش یافت. شکل (۷) پروفیل طولی آبستگی بستر صاف برای اعداد آبشار مختلف را نشان می‌دهد

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

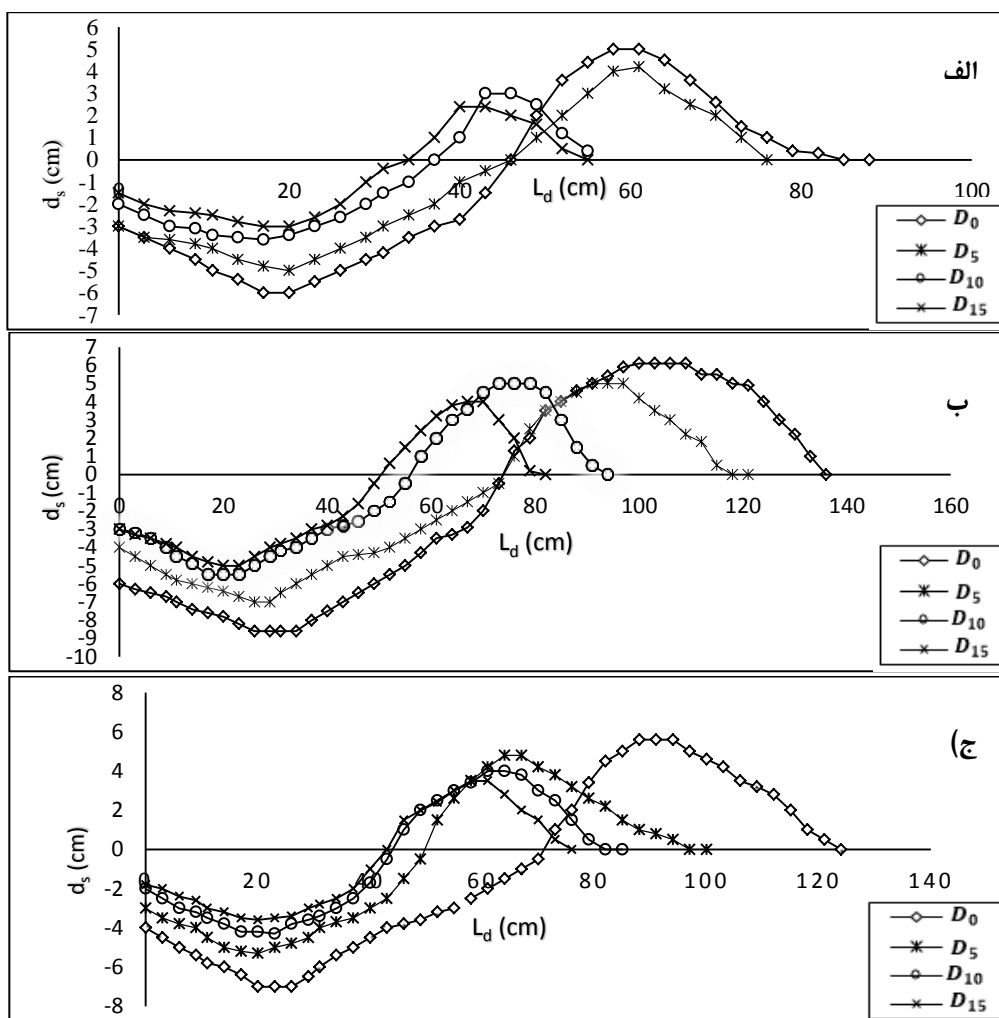
پس از قرار دادن زبری‌ها با تراکم‌های مختلف بر روی بستر صاف، با عبور آب از روی آن‌ها، جریان‌های گردابه‌ای در فواصل

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 متعاقباً روی عمق آبستگي پایین دست تأثیر می‌گذارد.

با افزایش تراکم عمق آبستگي و طول کل آبستگي نسبت به بستر صاف در تراکم ۱۵ درصد به ترتیب ۴۳ و ۲۳ درصد کاهش می‌یابد. دلیل عمده آن این است که در هنگام عبور جریان از روی زبری‌ها بخشی از انرژی جریان مستهلک می‌شود. همچنین

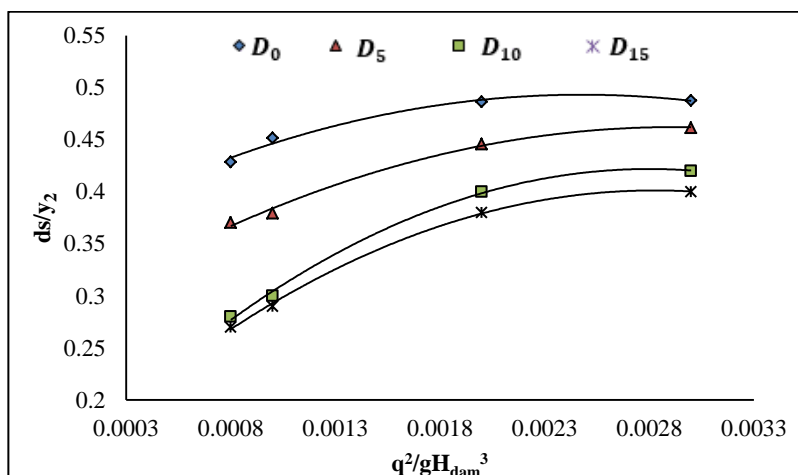


شکل ۸- تغییرات افت انرژی نسبی در مقابل عدد آبشار



شکل ۹- تغییرات پروفیل طولی بستر در تغییر تراکم های مختلف زبری الف) $\frac{q^2}{gH_{dam}^3} = 0.0008$

ب) $\frac{q^2}{gH_{dam}^3} = 0.001$ ج) $\frac{q^2}{gH_{dam}^3} = 0.002$



شکل ۱۰- تغییرات عمق بی بعد آبستگي در درصد تراکم های مختلف

جدول ۲- تغییرات پارامتر کاهش عمق آبستگي برای تراکم های مختلف (%R)

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

جدول ۳- میزان متوسط تغییرات ابعاد آبستگي برای تراکم های مختلف

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

(۱۰) مشاهده می شود میزان تغییرات عمق بی بعد آبستگي در برابر تغییرات درصد تراکم برای هر ۴ عدد آبشار بهم نزدیک می باشند که در تراکم ۱۵ درصد، این تغییرات عمق بی بعد آبستگي 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 بی بعد آبستگي بهم نزدیک تر می شود. به منظور بررسی کمی نتایج می توان میزان تغییرات کاهش عمق آبستگي (%R) را از رابطه (۸) بر آورد کرد:

$$R = \frac{d_{smax5,10,15} - d_{0s}}{d_{0s}} \times 100 \quad (8)$$

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

به نظر می رسد با افزایش درصد تراکم و جریان های گردابه ای در فواصل زبری ها منجر به تضعیف بیشتر قدرت جریان ناشی از حضور زبری در اعداد آبشار مختلف می گردد. در طول یک بستر زبر هم نیروی اصطکاک و هم نیروی درگ فشاری از سیال بر بستر اثر می کند. با شرایط هیدرولیکی یکسان هر چقدر فاصله بین زبری ها کم می شود نیروی درگ فشاری بیشتر می شود و نیروی کل وارد بر جریان بیشتر می شود و افت انرژی متقابلاً افزایش می یابد. در شکل (۱۰) که تغییرات عمق بی بعد آبستگي 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 آبستگي در تراکم ۱۵٪، ۳۸٪ افزایش می یابد. با توجه به اینکه H و g در این تحقیق مقدار ثابتی می باشد، افزایش عدد آبشار در واقع همان افزایش دبی می باشد بنابراین در یک تراکم خاص با افزایش دبی عمق بی بعد آبستگي افزایش می یابد. همچنین در شکل (۱۰) عمق بی بعد آبستگي در درصد تراکم های نشان می دهد بین افزایش درصد تراکم و عمق بی بعد آبستگي رابطه عکس برقرار است به این صورت که با افزایش میزان درصد تراکم، عمق بی بعد آبستگي کاهش می یابد. همانطور که در شکل

استهلاک بیشتر انرژی می‌شود. شکل (۱۳) توسعه حفره آبستنگی 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 به کار 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 آبستنگی استخراج گردید.

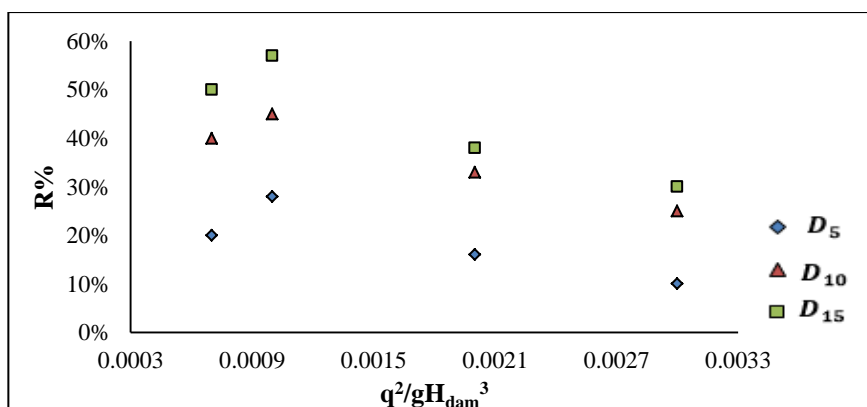
$$d_s/y_2 = 13.77 \left(\frac{q^2}{gH^3} \right)^{0.007} - 15.3(d\%)^{0.053} + 2.5777 \quad (9)$$

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

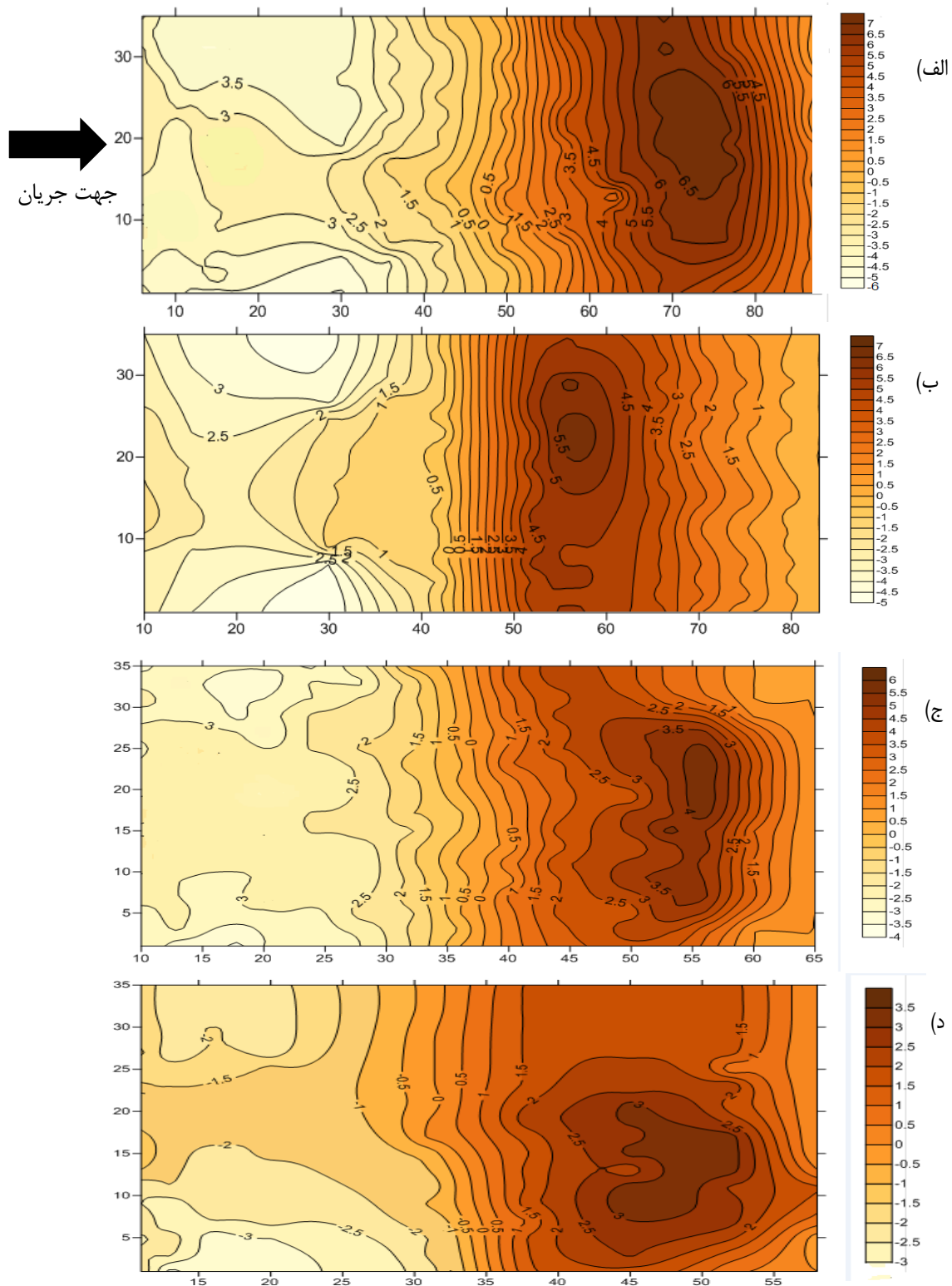
به‌دست آمد. سپس میزان انحراف مقادیر محاسبه شده از رابطه (۹) با نتایج بدست آمده در آزمایشگاه از فرمول $R = \frac{d_{sm} - d_{sc}}{d_{sm}}$ محاسبه شد و میانگین قدر مطلق این خطا به عنوان متوسط خطا در نظر گرفته شد که مقدار آن ۱۳ درصد می‌باشد. در رابطه فوق d_{sm} ، عمق آبستنگی بدست آمده از آزمایشگاه و d_{sc}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

با افزایش درصد تراکم درصد کاهش عمق آبستنگی افزایش پیدا کرده است. در جدول (۳) به عنوان مثال با افزایش تراکم ۱۵ درصد نسبت به بستر صاف میانگین کاهش عمق آبستنگی، طول حفره، طول کل آبستنگی، به ترتیب حدوداً ۴۳، ۲۷ و ۳۳ درصد تغییر یافته است. همانطور که در جدول (۲) مشاهده می‌کنیم کاهش عمق آبستنگی (R) در تراکم ۱۵ درصد نسبت به تراکم ۵ درصد، ۱۰ درصد بیشتر است. با مقایسه درصد کاهش آبستنگی (R) می‌توان گفت در تراکم ۱۵ درصد بیشترین کاهش عمق آبستنگی مشاهده می‌شود. تغییرات پارامتر کاهش عمق آبستنگی (R) برای تراکم‌های مختلف در مقابل اعداد آبشار مختلف در شکل (۱۱) آورده شده است. برای اعداد آبشار مختلف در یک تراکم خاص با افزایش عدد آبشار درصد کاهش عمق آبستنگی ابتدا افزایشی و سپس کاهشی می‌باشد. علت این امر این است که در واقع 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 آبستنگی 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 آبشار ۰/۰۰۰۸ برای سطح آبراهه شیبدار بدون زبری و در حضور زبری در سه تراکم نشان داده شده است.

به طور کلی در مقایسه با آبستنگی 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 آبستنگی در آزمایش‌های این تحقیق کمتر است. به این صورت که عمق آبستنگی در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه در تراکم ۱۰ و ۱۵ درصد به ترتیب حدود ۴۳ درصد و ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در دبی ۲۲ لیتر بر ثانیه حدود ۲۸ و ۳۵ درصد عمق آبستنگی کم شده است. دلیل عمده آن می‌تواند ناشی از اثرات زبری در فواصل کم باشد که افزایش مقاومت جریان باعث

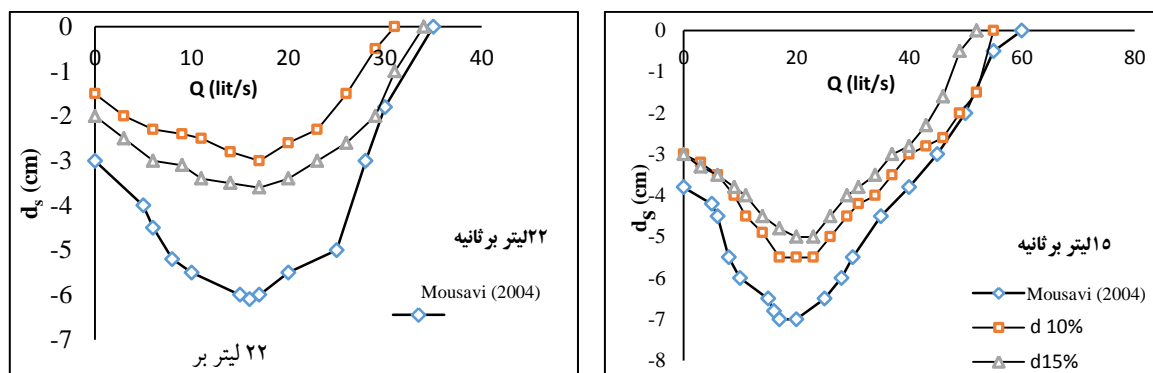


شکل ۱۱- تغییرات پارامتر کاهش عمق آبستنگی در مقابل عدد آبشار جریان برای درصد تراکم‌های مختلف

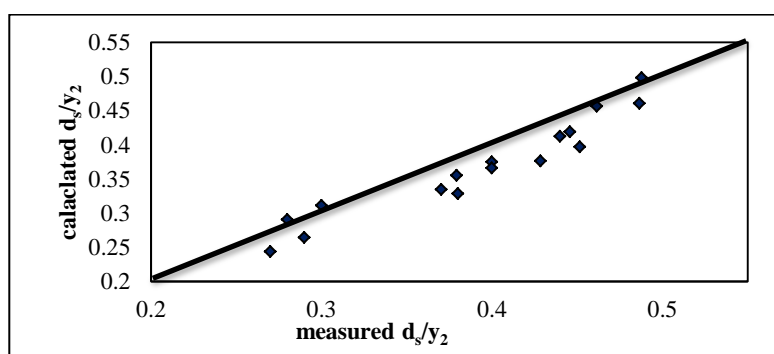


شکل ۱۲- نمای دو بعدی پروفیل آبستگي در بستر صاف و تراکم‌های مختلف در عدد آبخار ۰/۰۰۰۸ (الف) بستر صاف (ب) تراکم ۵ درصد (ج) تراکم ۱۰ درصد (د) تراکم ۱۵ درصد

فرج زاده و فتحی: بررسی تأثیر تراکم زبری‌های مصنوعی مکعبی بر ...



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



شکل ۱۴- نمودار مقایسه d_s/y_2 محاسبه شده از رابطه ۹ در برابر مقادیر بدست آمده از آزمایش

۴- همچنین نتایج نشان می‌دهد کاهش عمق آبستگی در دو تراکم ۱۰ درصد و ۱۵ درصد در هر چهار عدد آبشار تقریباً 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 و نصب آنها صرف می‌شود. ۵- از مقایسه حداکثر عمق آبستگی داخل حوضچه با سطح شیبدار زبر در این مطالعه و مطالعه‌ای که Mousavi (2004) بر روی آبستگی 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 آبستگی داخل حوضچه با سطح شیبدار زبر در این مطالعه و مطالعه‌ای که Mousavi (2004) بر روی آبستگی پایین دست سرریز پلکانی و در شرایط هیدرولیکی یکسان انجام دادند، نتایج این تحقیق به طور متوسط حدود ۴۰ درصد کاهش را نشان می‌دهد.

نتیجه گیری

در این مطالعه به بررسی میزان تأثیر تراکم زبری‌های مصنوعی بر روی عمق آبستگی 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 آبستگی از جمله عمق و طول آبستگی به ترتیب به میزان ۳۳ و ۲۳ درصد شود.

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

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

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.