

ابعاد حفره آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش از نوع پرش هیدرولیکی با بستر پوشیده از المان‌های شش پایه

پروین چهارده چریکی قلی زاده* و محمود شفاعی بجزستان**

* نگارنده مسئول: دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. تلفن:

۰۲۱۹۰۳۴۴۳۱۹۰۲ (۰۶۱)، پیام‌نگار: parvin_chahardahcherik@yahoo.com

** به ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد؛ و استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۹۵/۱/۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۳/۲۰

چکیده

در این مقاله، توپوگرافی بستر آبرفتی پایین دست حوضچه جدید (بستر پوشیده با المان‌های شش پایه) و نیز تغییرات حداکثر عمق حفره برای شرایط هیدرولیکی متفاوت (اعداد فرود اولیه ۵/۷۶ تا ۹/۱۳) و سه اندازه رسوب مختلف بررسی شده است. طول حوضچه در تمام آزمایش‌ها ثابت و متناسب با حداکثر دبی محاسبه شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که حداکثر عمق آبشستگی، در مقایسه با تحقیقات دیگر محققان که در شرایط با بستر صاف بوده است، به‌طور متوسط ۶۱ درصد کاهش داشته است. افزایش اندازه ذرات رسوبی از ۹۵/۰+ به ۲/۲۳ میلی‌متر باعث کاهش حداکثر عمق آبشستگی به میزان ۵۶ درصد شده است. در آزمایش‌هایی که طول پرش کمتر از طول حوضچه بود عمق حفره نیز کاهش چشمگیری داشته به طوری که در نسبت طول پرش به طول حوضچه برابر ۴+۵/۰+ حداکثر عمق آبشستگی به‌طور متوسط ۶۴ درصد کاهش یافته است. شیب شیروانی‌های بالادست و پایین دست حفره نیز در تمام آزمایش‌ها اندازه‌گیری شد که برای دیواره بالادست بین ۶ و ۲۴ درجه و برای دیواره پایین دست بین ۲ و ۷ درجه است. همچنین، معادله پروفیل طولی بدون بعد آبشستگی در پایین دست حوضچه آرامش با بستر زبر استخراج گردید.

واژه‌های کلیدی

آبشستگی، المان شش پایه، حوضچه، هیدرولیک

مقدمه

گردابی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی. عمق آبشستگی برای هر یک از سازه‌ها بستگی به شرایط هیدرولیکی جریان، مشخصات رسوب و شرایط هندسی سازه دارد. با توجه به اهمیت مسئله، تاکنون محققان به بررسی موضوع آبشستگی در پایین دست حوضچه‌های آرامش پرداخته‌اند که تماماً با بستر صاف بوده‌اند. از جمله می‌توان به نتایج کار نوک (Novak, 1955, 1961) اشاره کرد که با بررسی آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش اعلام کرد که عمق آبشستگی نسبت به حالت بدون

در شبکه‌های آبیاری و زهکشی از حوضچه‌های آرامش در پایین دست سدهای انحرافی و یا در زهکش‌ها استفاده می‌شود. در پایین دست حوضچه‌های آرامش آبشستگی به وجود می‌آید که ممکن است باعث تخریب این سازه شود. محققان دلایل متعددی برای تشکیل حفره بیان کرده‌اند مانند: ناکافی بودن مقدار استهلاک انرژی در سازه، تشکیل پرش هیدرولیکی ناپایدار یا انتقال پرش خارج از بستر صلب حوضچه آرامش و به وجود آمدن جریان‌های

d_s = حداکثر عمق آبشستگی (متر)؛ h_0 = عمق آب روی سرریز (متر)؛ و D_{50} = اندازه متوسط مصالح بستر (میلی‌متر).

دی و سرکار (Day & Sarkar, 2006) با بررسی آبشستگی رسوب‌های یکنواخت و غیریکنواخت در پایین‌دست یک کفبند، رابطه‌ای برای تعیین عمق آبشستگی ارائه دادند. شفافی بجزستان و امید (Shafai-Bajestan & Omid, 2016) میزان آبشستگی پایین‌دست حوضچه آرامش صلب را در اعداد فرود متفاوت و موقعیت‌های مختلف تشکیل پرش بررسی کردند. نتایج بررسی‌ها نشان داده که افزایش دبی عمق و طول آبشستگی را بیشتر می‌کند؛ این محققان همچنین برای محاسبه ابعاد حفرة آبشستگی روابطی نیز ارائه دادند.

در سال‌های اخیر محققان به منظور کاهش ابعاد حوضچه، مطالعات متعددی با زبر کردن بستر حوضچه به انجام رسانده و گزارش‌هایی نیز ارائه داده‌اند. نتایج کلی این مطالعات نشان می‌دهد که اصولاً زبری باعث افزایش تنش برشی بستر و در نتیجه کاهش طول حوضچه به میزان قابل توجه و نیز کاهش عمق ثانویه می‌شود که این عمق ثانویه بستگی دارد به نوع، اندازه و چیدمان زبری. از جمله در این خصوص می‌توان به مطالعات اید و راجاراتنام (Ead & Rajaratnam, 2002)، ایزدجو و شفافی بجزستان (Izadjoo & Shafai-Bajestan, 2007)، شفافی بجزستان و نیسی (Shafai-Bajestan & Neisi, 2009) و قربانی و همکاران (Ghorbani *et al.*, 2015) اشاره کرد. در مطالعاتی که تاکنون شده است زبری روی بستر صلب حوضچه قرار می‌گیرد.

اخیراً چهارده چریکی و شفافی بجزستان (Chahardah-Cheriki & Shafai-Bajestan, 2015) اثر المان‌های شش پایه قرار گرفته روی بستر آبرفتی حوضچه آرامش را بر طول پرش هیدرولیکی و میزان فشار پیژومتریکی بررسی کرده و نتیجه گرفتند که این المان‌ها

استفاده از حوضچه آرامش حدود ۴۵ تا ۶۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین رابطه ۱ را برای محاسبه عمق آبشستگی در پایین‌دست حوضچه ارائه داد:

$$d_s = 0.55 [6 H^{0.25} q^{0.5} \left(\frac{y_t}{d_{90}}\right)^{0.33} - y_t] \quad (1)$$

که در آن،

d_s = حداکثر عمق فرسایشی (متر)؛ H = اختلاف تراز آب در بالادست و پایین‌دست (متر)؛ q = دبی واحد عرض (متر مربع بر ثانیه)؛ d_{90} = اندازه ذرات رسوب (میلی‌متر)؛ و y_t = عمق پایاب (متر).

فروودی و اسمیت (Farhoodi & Smith, 1985)، آدوس و سیروتینو (Adduce & Sciortino, 2006)، علی‌حسینی و همکاران (Alihosseini *et al.*, 2008)، حمیدی‌فر و امید (Hamidifar & Omid, 2010)، حمیدی‌فر و همکاران (Hamidifar *et al.*, 2010)، امین‌پور و همکاران (Aminpour *et al.*, 2014) و خلیلی‌شایان و فروودی (Khalili-Shayan & Farhoodi, 2015) نیز مکانیزم آبشستگی را مطالعه کردند و وجود تشابه بین پروفیل‌های آبشستگی را گزارش دادند.

کلز و همکاران (Kells *et al.*, 2001) با بررسی اندازه دانه‌ها بر آبشستگی پایین‌دست یک دریچه کشویی به این نتیجه رسیدند که عمق حفرة آبشستگی به اندازه ذرات بستگی دارد. درگاهی (Dargahi, 2003) با بررسی آبشستگی پایین‌دست سرریز اوجی همراه با کفبند افقی به این نتیجه رسید که تشابهی بین پروفیل‌های آبشستگی وجود ندارد. او همچنین رابطه ۲ را برای تعیین حداکثر عمق آبشستگی ارائه داد:

$$\frac{d_s}{h_0} = 1.7 \left(\frac{h_0}{d_{50}}\right)^{\frac{1}{4.5}} \quad (2)$$

که در آن،

عرض ۰/۳ و ارتفاع ۰/۴ متر اجرا شد. آب با پمپ از مخزن ذخیره به مخزن آرام کننده ابتدای فلوم وارد و دبی قبل از ورود به مخزن آرام کننده با دبی سنج الکترومغناطیس با دقت ۰/۰۱ لیتر بر ثانیه اندازه گیری شد. برای آرام کردن جریان ورودی به فلوم، در مخزن آرام کننده از پوشال استفاده شد و برای تأمین بار آبی لازم برای ایجاد جریان فوق بحرانی و تشکیل پرش هیدرولیکی، یک سطح شیب دار با زاویه ۳۰ درجه و ارتفاع ۰/۴ متر در فاصله ۱۴۱ سانتی متری از ابتدای فلوم و در ارتفاع ۱۰ سانتی متری از کف فلوم تعبیه شد.

زبری های مورد مطالعه در این تحقیق المان های شش پایه نام دارند. هریک از این المان ها از دو قطعه بتن T شکل، که در وسط به هم متصل هستند، تشکیل شده است که در نتیجه شش پایه هستند. المان ها دارای جرم مخصوص ۲/۰۷ گرم بر سانتی متر مکعب، جرم خشک ۱۹/۵ گرم، حجم ۹/۴ سانتی متر مکعب و ارتفاع مؤثر ۴ سانتی متر هستند. با نرم افزار اتوکد، المان ها با مقیاس ۱ به ۱۲ سازه واقعی طراحی و پس از تهیه قالب، با بتن ساخته شدند. در شکل ۱ نمایی از المان های شش پایه به کار گرفته شده در این تحقیق نشان شده است. در پایین دست سطح شیب دار، ابتدا با توجه به معادلات تجربی USBR که حداکثر طول حوضچه با بستر صاف را شش برابر عمق ثانویه پرش محاسبه می کند، حوضچه ای به طول ۱۴۳ سانتی متر طراحی شد. با جایگذاری المان های شش پایه و آزمایش روی بستر دارای این نوع المان، حداکثر طول پرش هیدرولیکی معادل ۱۲۶ سانتی متر اندازه گیری شد. در نتیجه، با حذف المان های پایین دست، طول حوضچه آن قدر کاهش داده شد که به ۱۲۶ سانتی متر برسد و این طول در تمام آزمایش ها ثابت بود.

در پایین دست سطح شیب دار، به طول حدود ۳ متر ماسه یکنواخت قرار داده شد. المان های شش پایه با تراکم ۱۰۰ درصد به طول ۱۲۶ سانتی متر که معادل حداکثر

علاوه بر کاهش ابعاد پرش و در نتیجه طول حوضچه، می توانند مستقیماً روی بستر آبرفتی قرار گیرند و نیازی به ایجاد بستر صلب برای حوضچه نیست ضمن اینکه به دلیل نفوذپذیر بودن این المان ها منجر به کاهش زیر فشار، که معمولاً باعث افزایش ضخامت کف بند حوضچه ها می گردد، نیز خواهد شد. در مطالعه حاضر، آبخستگی پایین دست حوضچه آرامش با بستر پوشیده از المان های شش پایه بررسی شده است.

استخراج روابط

به منظور تحلیل نتایج و استخراج پارامتر بدون بعد، آنالیز ابعادی صورت گرفت. بدین ترتیب که عمق آبخستگی (d_s) به عنوان پارامتر وابسته در نظر گرفته شد، سایر پارامترهای مستقل عبارتند از: $\rho =$ جرم حجمی جریان عبوری (کیلوگرم بر متر مکعب)؛ $\mu =$ لزوجت مطلق جریان عبوری (کیلوگرم بر متر در ثانیه)؛ $g =$ شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)؛ $y_1 =$ عمق اولیه پرش (متر)؛ $y_2 =$ عمق ثانویه پرش (متر)؛ $V_1 =$ سرعت جریان در محل عمق y_1 (متر بر ثانیه)؛ $L_B =$ طول حوضچه آرامش (متر)؛ و $D_{50} =$ اندازه متوسط ذرات (متر)؛ و $L_p =$ طول پرش هیدرولیکی (متر) (روابط ۳ و ۴). با ترکیب پارامترهای بدون بعد، رابطه ای به صورت رابطه ۵ تعیین شد.

$$d_s = (\rho, \mu, g, y_1, y_2, V_1, L_B, D_{50}) \quad (3)$$

$$\frac{d_s}{y_1} = f\left(\frac{L_j}{y_1}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L_B}{y_1}, \frac{D_{50}}{y_1}\right) \quad (4)$$

$$\frac{d_s}{y_2} = f\left(\frac{L_j}{L_B}, \frac{D_{50}}{y_2}\right) \quad (5)$$

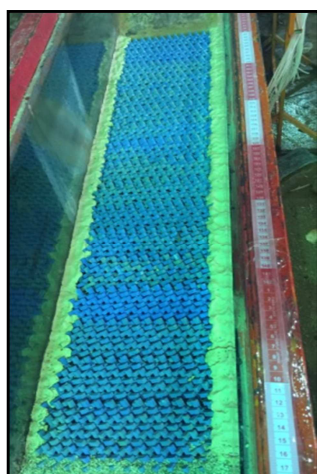
مواد و روش ها

آزمایش ها در آزمایشگاه مدل های فیزیکی دانشگاه شهید چمران اهواز در فلومی (با اسکلت فلزی و دیواره هایی از جنس پلکسی گلاس و شیشه) به طول ۷/۵

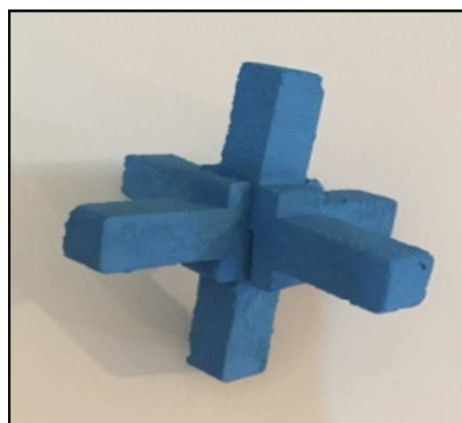
شد. از آن جا که بین المان‌های کناری و دیواره فلوم حفره‌های درشت به وجود می‌آید که باعث می‌شد ذرات ماسه‌ای از این حفره‌ها خارج شوند، تصمیم گرفته شد که این فضا با بتونه پر شود.

در شکل ۲ نمایی از نحوه چیدمان المان‌های شش‌پایه روی بستر آبرفتی حوضچه آرامش و در شکل ۳ نیز نمایی از مقطع مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است. در تحقیق حاضر، ۱۸ آزمایش در محدوده اعداد فرود ۵/۷۶ تا ۹/۱۳ و با استفاده از ۳ نوع ماسه با دانه‌بندی متفاوت اجرا شد. مشخصات مصالح مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ و منحنی دانه‌بندی مصالح نیز در شکل ۴ آورده شده است.

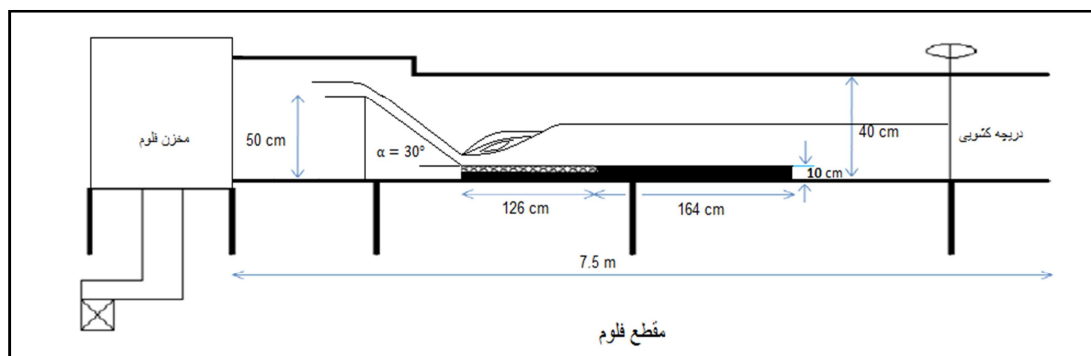
طول پرش هیدرولیکی روی بستر با این نوع المان بود طوری قرار داده شدند که تراز بالایی المان‌های شش‌پایه با سطح رسوب پایین دست حوضچه آرامش یکسان باشد. بدین ترتیب که ضخامت رسوب زیر المان‌ها ۶ سانتی‌متر و پس از آن ۱۰ سانتی‌متر است. یادآوری می‌شود که تراکم برای المان‌های شش‌پایه این‌گونه تعریف می‌شود: جایگذاری یا ضریب پوشش برای المان شش‌پایه به تعداد المان موجود در مساحت پوشش داده شده توسط آنها. در حوضچه آرامش به منظور جلوگیری از آبستکی ذرات، پارچه‌ای با بافت بسیار ریز به عنوان فیلتر قرار داده شد. با اندازه‌گیری حجم المان‌ها میزان تخلخل حوضچه آرامش پوشیده با المان‌های شش‌پایه برابر ۵۶/۱ درصد محاسبه



شکل ۲- چیدمان المان‌های شش‌پایه



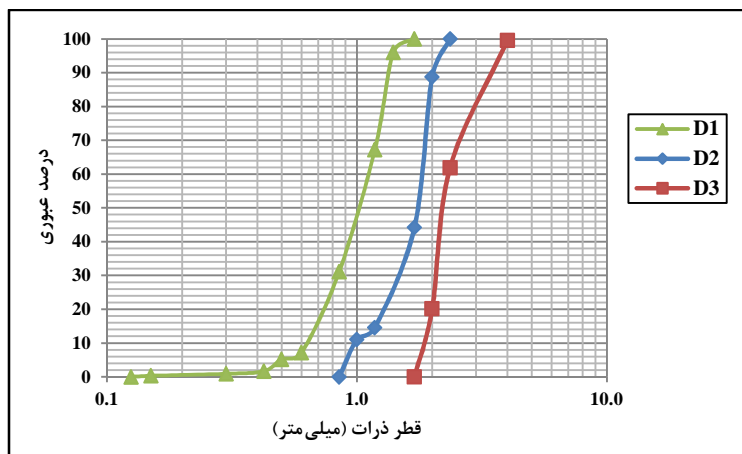
شکل ۱- نمایی از المان شش‌پایه روی بستر آبرفتی حوضچه آرامش



شکل ۳- مقطع مدل آزمایشگاهی مورد استفاده

جدول ۱- مشخصات مصالح مورد استفاده در تحقیق حاضر

انحراف معیار هندسی ذرات	متوسط ذرات (D_{50}) (میلی متر)	
۱/۳	۰/۹۵	D_1
۱/۱۸	۱/۸۵	D_2
۱/۲۴	۲/۲۳	D_3



شکل ۴- منحنی دانه بندی مصالح مورد استفاده

جمله طول پرش، طول غلتاب و اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی برداشت می شد. طول پرش هیدرولیکی با متر و با دقت ۱ میلی متر به صورت چشمی با مشاهده حباب های هوا اندازه گرفته شد. برای اندازه گیری طول غلتابی از یک جسم شناور استفاده شد که تحت اثر ناحیه جریان چرخشی، رفت و برگشت داشت و فاصله این ناحیه از محل تشکیل پرش به عنوان طول غلتابی اندازه گیری شد. اعماق مزدوج پرش نیز با عمق سنج با دقت ۰/۱ میلی متر اندازه گیری شد. در شکل ۵ نمونه ای از تشکیل پرش هیدرولیکی روی بستر آبرفتی حوضچه آرامش پوشیده با المان های شش پایه در عدد فرود ۵/۷۶ نشان داده شده است. پس از ۳ ساعت، پمپ خاموش و اجازه داده شد تا بستر رسوبی کاملاً زهکشی شود. پس از آن، پروفیل بستر رسوبی پایین دست حوضچه آرامش با متر لیزری برداشت شد. خلاصه نتایج آزمایش های این تحقیق در جدول ۲ ارائه شده است.

برای اجرای هر آزمایش، پس از جایگذاری المان ها و تراز کردن مصالح ماسه ای در پایین دست حوضچه، پمپ روشن و اجازه داده می شد تا جریان آب به آرامی وارد فلوم شود. در این مدت زمان درجه پایین دست فلوم بسته بود. دبی ورودی به آرامی افزایش داده شد تا به مقدار مورد نظر برسد و هم زمان درجه پایین دست هم به آرامی باز شد تا پرش در انتهای سطح شیب دار قرار گیرد. مدت زمان اجرای آزمایش های این تحقیق ۳ ساعت بود. مطالعات قبلی با همین شرایط جریان ولی با بستر صلب و بدون زبری نشان داد که عمق حفرة آبستنگی تشکیل شده در این مدت زمان تقریباً معادل ۹۰ درصد عمق آبستنگی در زمان ۱۷ ساعت است. ضمن اینکه هدف اصلی این تحقیق ایجاد رابطه ای برای پیش بینی حداکثر عمق آبستنگی نیست و بیشتر برای مقایسه مقادیر به دست آمده در آزمایش های مختلف است. در این مدت زمان، مشخصات پرش هیدرولیکی از



شکل ۵- تشکیل پرش هیدرولیکی روی بستر آبرفتی حوضچه آرامش پوشیده با المان‌های شش‌پایه در عدد فرود ۵/۷۶

جدول ۲- خلاصه نتایج این تحقیق

شماره آزمایش	دبی (لیتر بر ثانیه)	عدد فرود اولیه	عمق اولیه پرش (سانتی‌متر)	عمق ثانویه پرش (سانتی‌متر)	طول پرش هیدرولیکی (سانتی‌متر)	اندازه متوسط ذرات (سانتی‌متر)	حداکثر عمق حفره آبشستگی (سانتی‌متر)
۱	۳۰	۵/۷۶	۳/۱	۲۱	۱۲۶	۰/۹۵	۷/۳
۲	۲۶	۶/۱	۲/۷	۱۹/۱	۱۱۰	۰/۹۵	۶/۷
۳	۲۲	۶/۵۳	۲/۳	۱۷/۶	۹۵	۰/۹۵	۵/۲
۴	۱۸	۷/۰۹	۱/۹	۱۵/۹	۷۹	۰/۹۵	۳/۹
۵	۱۴	۷/۸۹	۱/۵	۱۳/۷	۷۰	۰/۹۵	۳/۲
۶	۱۰	۹/۱۳	۱/۱	۱۱/۹	۵۱	۰/۹۵	۲/۱
۷	۳۰	۵/۷۶	۳/۱	۲۱	۱۲۶	۱/۸۵	۶/۴
۸	۲۶	۶/۱	۲/۷	۱۹/۱	۱۱۰	۱/۸۵	۵
۹	۲۲	۶/۵۳	۲/۳	۱۷/۶	۹۵	۱/۸۵	۴/۳
۱۰	۱۸	۷/۰۹	۱/۹	۱۵/۹	۷۹	۱/۸۵	۲/۹
۱۱	۱۴	۷/۸۹	۱/۵	۱۳/۷	۷۰	۱/۸۵	۲
۱۲	۱۰	۹/۱۳	۱/۱	۱۱/۹	۵۱	۱/۸۵	۱/۳
۱۳	۳۰	۵/۷۶	۳/۱	۲۱	۱۲۶	۲/۲۳	۵/۳
۱۴	۲۶	۶/۱	۲/۷	۱۹/۱	۱۱۰	۲/۲۳	۳/۹
۱۵	۲۲	۶/۵۳	۲/۳	۱۷/۶	۹۵	۲/۲۳	۲/۷
۱۶	۱۸	۷/۰۹	۱/۹	۱۵/۹	۷۹	۲/۲۳	۱/۲
۱۷	۱۴	۷/۸۹	۱/۵	۱۳/۷	۷۰	۲/۲۳	۰/۸
۱۸	۱۰	۹/۱۳	۱/۱	۱۱/۹	۵۱	۲/۲۳	۰/۵

نتایج و بحث

مشاهدات

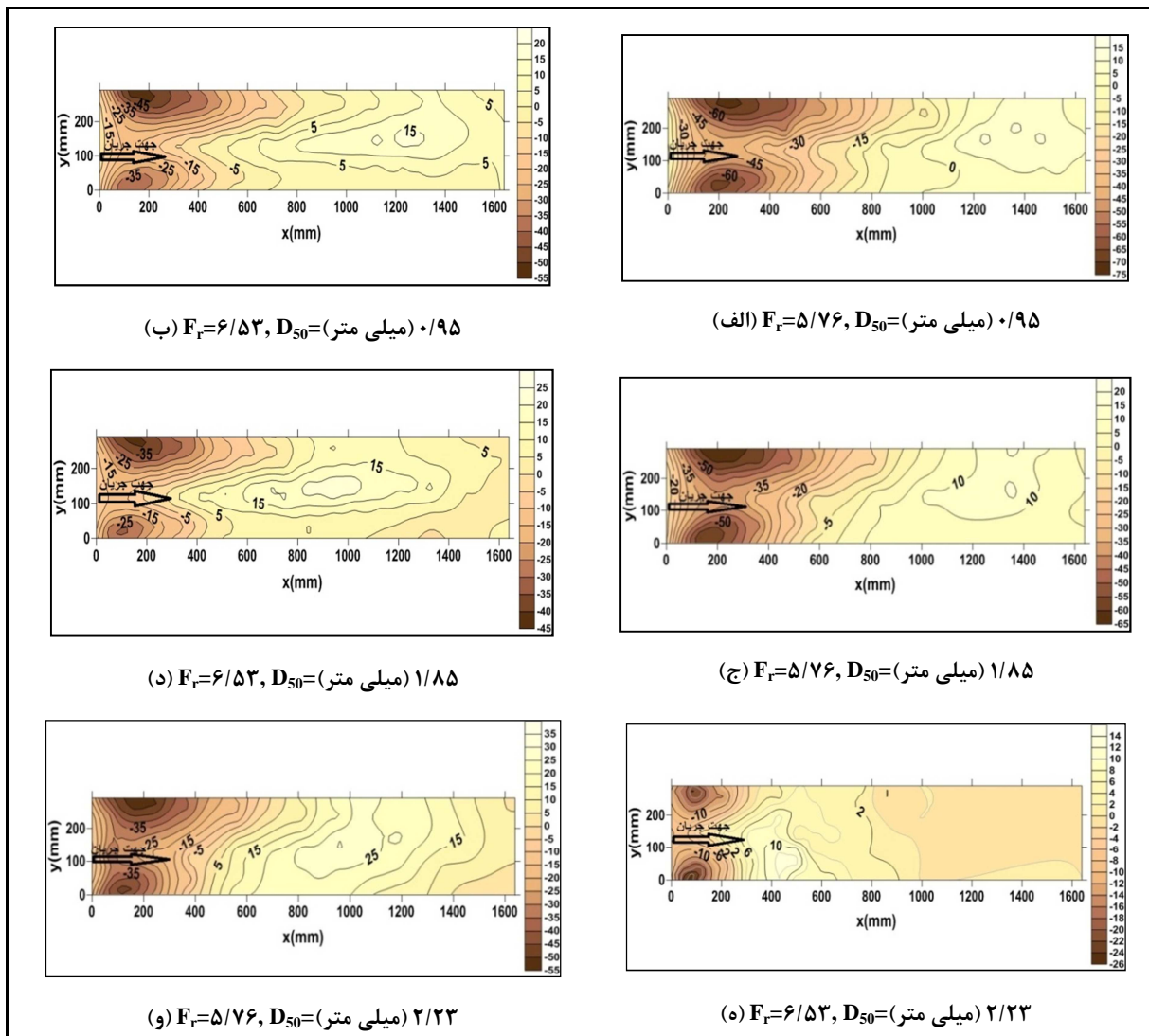
پایین‌دست حفره جمع می‌شدند و پشتت رسوبی تشکیل می‌دادند. احتمال داده شد که عمیق‌تر بودن حفره آبشستگی در دو طرف عرضی فلوم به دلیل اصطکاک کمتر بین ذرات ماسه‌ای و شیشه فلوم بوده است. امین‌پور و همکاران (Aminpour et al., 2014) این پدیده را این‌گونه توجیه کرده‌اند که جریان‌های عرضی پس از برخورد با

در تمامی آزمایش‌ها، حفره آبشستگی بلافاصله پس از حوضچه تشکیل می‌شد. عمق حفره در فاصله‌ای اندک از حوضچه به حداکثر مقدار خود می‌رسید و با دور شدن از حوضچه کاهش می‌یافت و رسوبات شسته شده در

ابعاد حفرة آبستگى پایین دست حوضچه آرامش از...

پایین دست حوضچه آرامش پوشیده با المان های شش پایه آورده شده است. در این شکل، محور x نشان دهنده فاصله از انتهای حوضچه و محور y نشان دهنده ارتفاع از سطح حوضچه است.

جداره کانال و در بازگشت به میانه عرضی بستر رسوبی، بخشی از رسوبات موجود در مجاورت جداره را به میانه عرضی بستر منتقل می کنند و این حالت برای هر دو جداره اتفاق می افتد. در شکل ۶ توپوگرافی بستر رسوبی



شکل ۶- پروفیل آبستگى در پایین دست حوضچه آرامش پوشیده با المان های شش پایه

شرایط جریان یعنی وقتی که نسبت طول پرش به طول حوضچه کمتر از یک است یا به عبارتی پرش درون حوضچه اتفاق افتاده است، عمق حفرة آبستگى کاهش می یابد. دلیل اصلی آن هم استهلاك بیشتر انرژی جنبشی آب درون حوضچه است که زبری های آن باعث می گردد

تأثیر طول پرش

در شکل ۷ پروفیل های آبستگى در اندازه های رسوبی متفاوت رسم شده است. نتایج بررسی ها نشان می دهد که برای هر اندازه رسوبی حداکثر عمق آبستگى وقتی اتفاق افتاده که طول پرش برابر طول حوضچه است. در سایر

قدرت گردابه‌های خروجی حوضچه، که عامل اصلی آبشستگی هستند، کاهش یابد. مشاهده می‌شود که وقتی نسبت طول پرش به طول حوضچه برابر $0/405$ است کمترین عمق آبشستگی و به تبع آن کوچک‌ترین حفره آبشستگی شکل می‌گیرد. از این شکل‌ها نیز مشخص است که با افزایش عمق آبشستگی، ابعاد چاله آبشستگی نیز افزایش می‌یابد.

ارتفاع پشته رسوبی پایین دست چاله که در اثر خروج رسوب‌ها به وجود می‌آید مرتفع نیست زیرا رسوب‌های شسته شده در اثر جریان اصلی مسافت بیشتری طی می‌کنند و به‌سختی دیگر در طول وسیع‌تری در پایین دست حوضچه ته‌نشین می‌شوند. با افزایش اندازه ذرات ماسه‌ای، عمق حفره کاهش می‌یابد. به‌طور مثال، عمق آبشستگی برای ذرات ماسه $0/95$ میلی‌متر، برابر 73 میلی‌متر است که برای ذرات $2/23$ میلی‌متر به 53 میلی‌متر کاهش می‌یابد (جدول ۲). با افزایش اندازه ذرات رسوبی از $0/95$ میلی‌متر به $2/23$ میلی‌متر حداکثر عمق آبشستگی به‌طور متوسط 56 درصد کاهش یافته است. هرچند با افزایش اندازه ذرات، ابعاد حفره کاهش می‌یابد و رسوب کمتری به پایین دست منتقل می‌شود ولی ارتفاع پشته افزایش یافته است. برای توجیه این امر، سرعت آستانه حرکت ذرات با استفاده از رابطه ۶ که توسط شفافی‌بجستان (Shafai-Bajestan, 2013) ارائه شده محاسبه شد.

$$V_c = 2.2 [g(Gs - 1)Ds]^{0.5} \quad (6)$$

با توجه به رابطه ۶، سرعت آستانه حرکت برای ذرات با اندازه $0/95$ ، $1/85$ و $2/23$ میلی‌متر به ترتیب $0/27$ ، $0/38$ و $0/42$ متر بر ثانیه به دست آمد و با سرعت متوسط جریان در مقطع پایین دست پرش مقایسه شد. سرعت متوسط با تقسیم دبی بر سطح مقطع جریان در

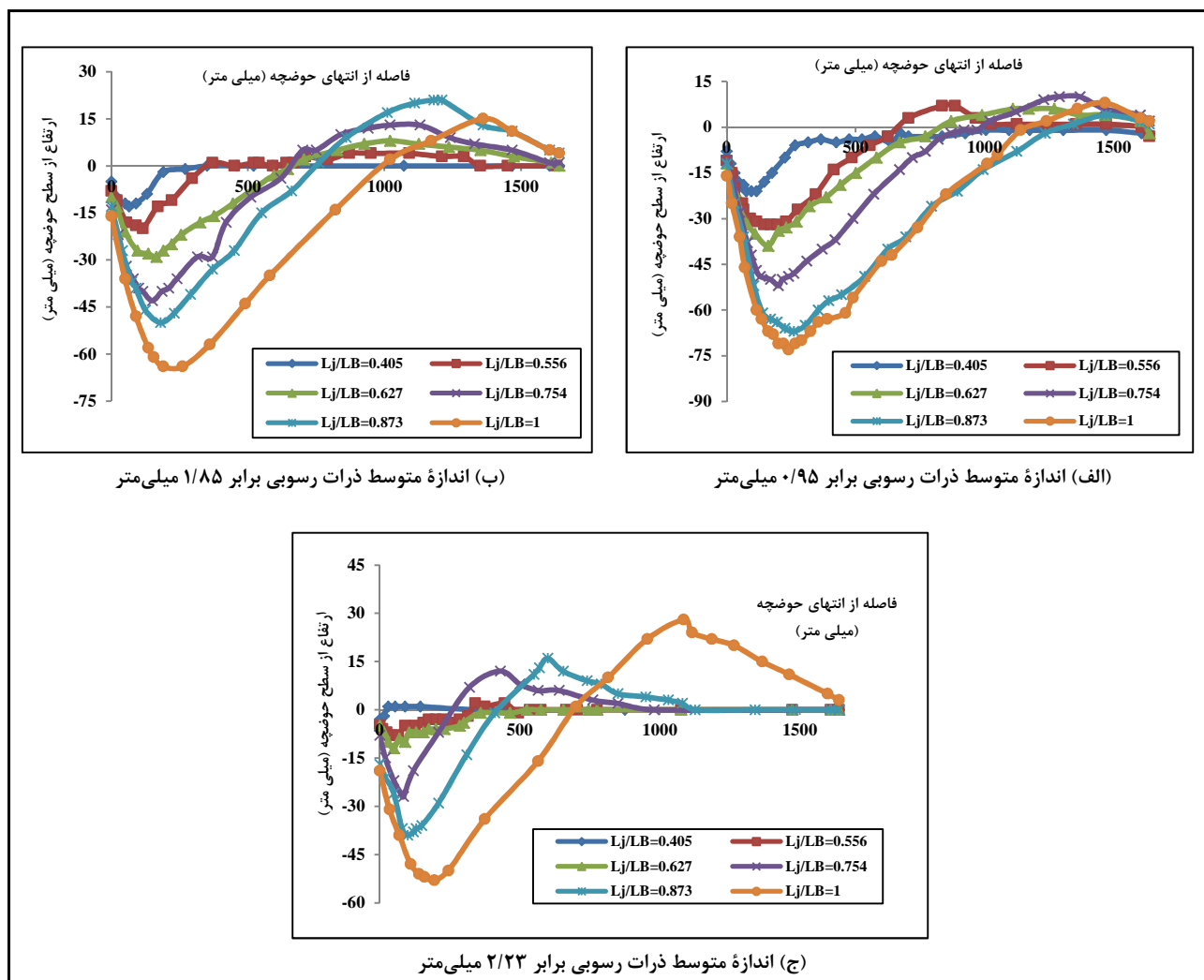
پایین دست پرش (حاصل ضرب عمق ثانویه در عرض فلوم) محاسبه گردید. با مقایسه سرعت متوسط جریان و سرعت بحرانی در آزمایش‌ها مشخص شد که وقتی سرعت متوسط جریان بیشتر از سرعت آستانه حرکت ذرات بوده قدرت جابه‌جایی و ظرفیت انتقال طولی رسوب‌ها در پایین دست پرش باعث شده است تا پشته‌ای کم‌ارتفاع شکل گیرد. به‌طور مثال، پروفیل‌های طولی نشان داده شده در شکل ۷-الف مربوط به ذرات رسوبی $0/95$ میلی‌متر با سرعت آستانه حرکت $0/27$ متر بر ثانیه است که خیلی کمتر از سرعت متوسط جریان است و در نتیجه ارتفاع پشته در تمام آزمایش‌ها ناچیز است. در حالی که در شکل‌های ۷-ب و ۷-ج پشته‌های مرتفعی در تعدادی از آزمایش‌های اجرا شده با ذرات $1/85$ و $2/23$ میلی‌متر دیده می‌شود که در آنها سرعت متوسط کمتر از سرعت آستانه حرکت رسوب این ذرات بوده است.

از شکل‌های ۷-الف، ب و ج همچنین می‌توان شیب دیواره‌های پایین دست حفره آبشستگی را تعیین کرد که برای ذرات ماسه‌ای $2/23$ میلی‌متر بین 2 تا 7 درجه اندازه‌گیری شد. به همین ترتیب، شیب بالادست دیواره حفره نیز برای اندازه ذرات ماسه‌ای گفته شده بین 6 تا 19 درجه، مقادیر شیب پایین دست دیواره حفره برای ذرات رسوبی $1/85$ میلی‌متر بین 2 تا 6 و برای شیب دیواره بالادست حفره بین 9 تا 22 درجه اندازه‌گیری شده است. همچنین، شیب دیواره پایین دست حفره برای ذرات $0/95$ میلی‌متر بین 3 تا 6 درجه و شیب دیواره بالادست حفره بین 11 تا 24 درجه اندازه‌گیری شد.

شیب دیواره بالادست و پایین دست حفره در عدد فرود $5/76$ برای ذرات $1/85$ میلی‌متر، با نتایج بررسی‌های شفافی‌بجستان و امید (Shafai-Bajestan & Omidi, 2016) مقایسه شد که شباهت بیشتری با این حالت دارد. با استفاده از نتایج بررسی‌های شفافی‌بجستان و امید (Shafai-Bajestan & Omidi, 2016)، شیب دیواره برای

انرژی در حوضچه آرامش، جریان با انرژی کمتری وارد بستر رسوبی پایین دست حوضچه شده و بر خلاف نتایج بررسی های سایر محققان، میزان فرسایش و رسوب گذاری به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است.

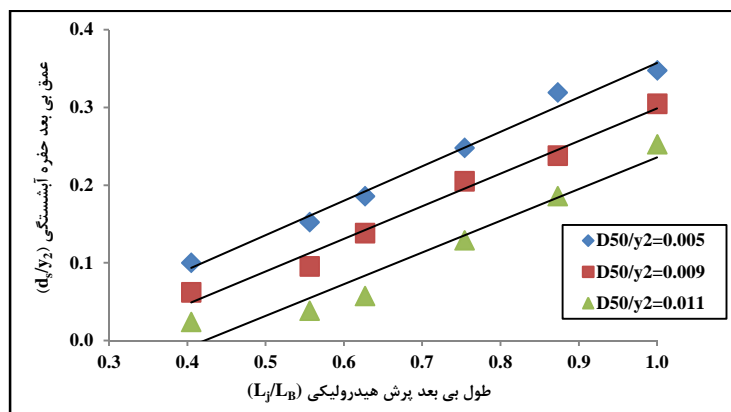
پایین دست و بالادست به ترتیب ۱۶ و ۱۵ درجه به دست آمد. مشاهده می شود که شیب دیواره های بالادست و پایین دست حفره در آزمایش های این تحقیق بسیار کم است؛ دلیل این امر آن است که در تمامی آزمایش های این تحقیق به علت استهلاک



شکل ۷- پروفیل های آبستگى پایین دست حوضچه در اندازه ذرات متفاوت

شده و مشخص است که با افزایش طول بی بعد پرش هیدرولیکی، عمق بی بعد حفرة آبستگى نیز با روندی خطی افزایش می یابد. بیشترین عمق آبستگى مربوط به زمانی است که طول پرش با طول حوضچه برابر باشد.

به منظور تحلیل بیشتر نتایج، شکل ۸ ارائه شده است که تغییرات عمق بی بعد حفرة آبستگى را به ازای طول بی بعد پرش هیدرولیکی برای دانه بندی های مختلف نشان می دهد. در این شکل، اندازه متوسط ذرات با حداکثر عمق ثانویه برای حداکثر دبی جریان بی بعد



شکل ۸- تغییرات عمق بی‌بعد حفره آبشستگی به‌ازای طول بی‌بعد پرش هیدرولیکی

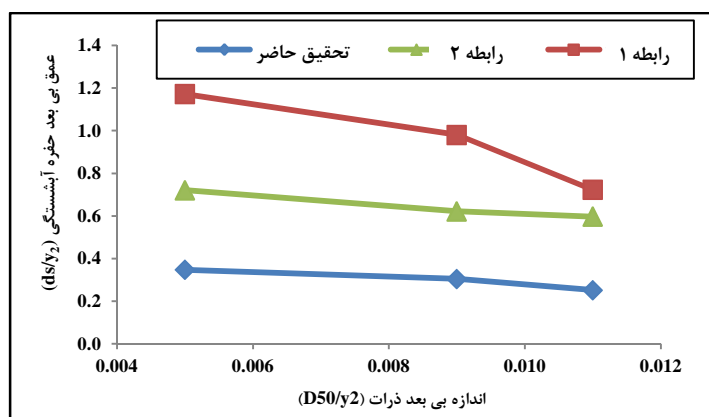
تحقیق حاضر روی حوضچه آرامشی پوشیده با زبری‌های نفوذپذیر (المان‌های شش‌پایه) اجرا شده است که این المان‌ها انرژی را مستهلک کرده‌اند و طول پرش را در حوضچه آرامش کاهش داده و در نتیجه موجب کاهش عمق آبشستگی در پایین‌دست حوضچه آرامش شده‌اند. درصد کاهش عمق آبشستگی حاصل از این تحقیق، در مقایسه با معادله‌های ارائه شده در تحقیقات سایر محققان، با استفاده از رابطه ۷ محاسبه شده و میانگین قدرمطلق مقادیر در جدول ۳ آورده شده است.

$$R = \frac{\text{dsm (آزمایشگاهی)} - \text{dsm (مطالعه مورد نظر)}}{\text{dsm (مطالعه مورد نظر)}} \quad (7)$$

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که عمق آبشستگی در تحقیق حاضر، در مقایسه با حوضچه‌های با بستر صاف، به‌طور متوسط حدود ۶۱ درصد کاهش یافته است.

مقایسه حداکثر عمق آبشستگی با سایر روابط

در مقدمه اشاره شد که مطالعات دیگر محققان درباره آبشستگی پایین‌دست حوضچه‌های آرامش، در پایین‌دست حوضچه با بستر صاف بوده است. در این بخش، نتایج این تحقیق با نتایج مطالعات درگاهی (Dargahi, 2003) و نوک (Novak, 1955, 1961) مقایسه شده است (شکل ۹). از آنجا که در مطالعات سایر محققان طول پرش و طول حوضچه یکسان بوده است، از نتایج آزمایش‌هایی استفاده شده که همین مشخصات را داشته‌اند (طول پرش و طول حوضچه یکسان بوده است). از این‌رو، حداکثر عمق حفره آبشستگی حاصل از آزمایش‌های شماره ۱، ۷ و ۱۳ (جدول ۲) استفاده شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقادیر عمق حفره آبشستگی حاصل از این تحقیق بسیار کمتر از مقادیری است که از معادله‌های سایر محققان به‌دست آمده است. علت این امر آن است که



شکل ۹- تغییرات عمق بی‌بعد حفره آبشستگی به‌ازای اندازه بی‌بعد ذرات

جدول ۳- میانگین درصد کاهش عمق آبستگى در مقایسه با نتایج به دست آمده از تحقیقات محققان دیگر

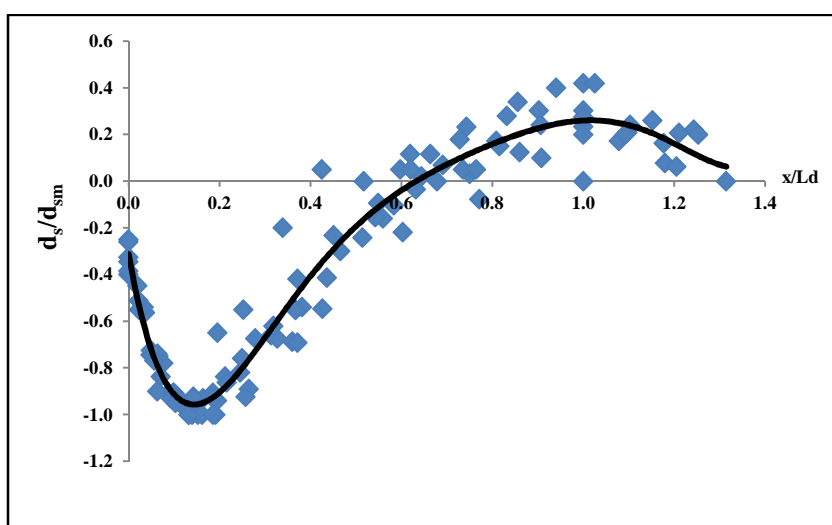
رابطه ۲	رابطه ۱	D ₅₀ (میلی متر)
۵۸	۶۵	۲/۲۳
۵۱	۶۹	۱/۸۵
۵۲	۷۰	۰/۹۵

می کند که در آن ثابت های $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ و a_7 به ترتیب برابر $-۰/۳۱۲۸, -۱۰/۹۳۵, ۶۱/۱۵۳, -۱۳۲/۴۸, ۱۴۵/۲۴, -۷۹/۶۲۸$ و $۱۷/۲۲۸$ هستند. این رابطه شبیه رابطه درجه ۶ است که موسوی (Musavi, 2000) ارائه داده با این تفاوت که ضرایب معادله متفاوت اند؛ دلیل این تفاوت ها وجود زبری در آزمون های این تحقیق است که باعث شده عمق حفرة آبستگى کاهش یابد.

$$\frac{d_s}{d_{sm}} = a_1 + a_2 \left(\frac{x}{L_d}\right) + a_3 \left(\frac{x}{L_d}\right)^2 + a_4 \left(\frac{x}{L_d}\right)^3 + a_5 \left(\frac{x}{L_d}\right)^4 + a_6 \left(\frac{x}{L_d}\right)^5 + a_7 \left(\frac{x}{L_d}\right)^6 \quad (۸)$$

پروفیل بی بعد آبستگى

نتایج به دست آمده از آزمایش های این تحقیق نشان می دهد که بین پروفیل های آبستگى تشابه هندسى وجود دارد. در شکل ۱۰ مختصات پروفیل آبستگى در آزمایش های مربوط به ذرات با اندازه متوسط ۱/۸۵ میلی متر توسط حداکثر عمق حفرة آبستگى (d_{sm}) و فاصله افقى از انتهای حوضچه آرامش تا تاج پشته آبستگى (L_d) بی بعد شده اند. همچنین نشان داده شده که پروفیل های آبستگى با کمی پراکندگی در شکل پشته رسوبی متشابه اند. پروفیل بی بعد به دست آمده از یک معادله درجه شش به صورت رابطه ۸ پیروى



شکل ۱۰- پروفیل بی بعد آبستگى حاصل از این تحقیق

نتیجه‌گیری

- نیم‌رخ‌های طولی حفره آبشستگی دارای تشابه هندسی هستند و از این‌رو معادله‌ای برای پروفیل بدون بعد آبشستگی استخراج گردید. به‌طور کلی نتایجی که تاکنون از مطالعه روی حوضچه‌های با بستر زبر پوشیده با المان‌های شش پایه به‌دست آمده است نشان می‌دهد که طول، عمق مزدوج، و آبشستگی آنها، در مقایسه با حوضچه‌های با بستر صاف، به‌ترتیب در حدود ۲۵، ۱۵ و ۶۰ درصد کمتر است. به‌دلیل نفوذپذیر بودن این المان‌ها، میزان فشار بالا برنده که نقش اساسی در تعیین ضخامت دال کف حوضچه‌های بتنی معمولی دارد نیز کاهش می‌یابد که میزان تأثیر آن در حال مطالعه است. همچنین، ابعاد بهینه المان‌های شش‌پایه که می‌تواند در هزینه ساخت حوضچه نقش زیادی داشته باشد نیز در دست بررسی است.

به‌طور خلاصه نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که:
- حداکثر عمق آبشستگی در پایین‌دست پرش هیدرولیکی با المان‌های شش‌پایه، در مقایسه با حوضچه‌های با بستر صاف، بسیار کمتر است؛ متوسط کاهش حدود ۶۱ درصد است.
- میزان کاهش عمق آبشستگی تابع اندازه ذرات رسوبی است و به‌طور متوسط با افزایش اندازه ذرات رسوبی عمق آبشستگی نیز کاهش می‌یابد. نشان داده شده که با افزایش اندازه متوسط ذرات از ۰/۹۵ به ۲/۲۳ میلی‌متر، مقدار عمق آبشستگی ۵۶ درصد کاهش یافته است.
- با افزایش نسبت طول پرش به طول حوضچه، مقدار عمق بی‌بعد آبشستگی زیاد می‌شود.
- شیب دیواره‌های بالادست و پایین‌دست حفره به‌طور متوسط به‌ترتیب ۱۵ و ۴ درجه است.

قدردانی

هزینه این طرح تحقیقاتی از محل پژوهانه نویسنده دوم تامین شده است و بدین‌وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز قدردانی می‌شود.

مراجع

- Adduce, C. and Sciortino, G. 2006. Scour due to a horizontal turbulent jet: numerical and experimental investigation. *J. Hydraul. Res.* 44(5): 663-673.
- Alihosseini, P. K., Sanei, M. and Mashaal, M. 2008. Experimental investigation of temporal variation of scour profile downstream of submerged hydraulic jumps. *Proceeding of the 7th Iranian Conference of Hydraulic.* Nov. 11-13. Shahid Abbaspour University. Tehran. Iran. (in Persian)
- Aminpour, Y., Farhoodi, J. and Roshan, R. 2014. Check local scouring downstream of stilling basins in the presence of stepped spillway. *J. Hydraul.* 9(4): 25-38. (in Persian)
- Chahardah-Cheriki, P. and Shafai-Bajestan, M. 2015. Check the length of jump and pressure distribution in stilling basin with alluvial bed covered with six legs concrete elements. *Proceeding of 14th Iranian Hydraulics Conference.* Nov. 11-13. Zahedan University. Zahedan. Iran. (in Persian)
- Dargahi, B. 2003. Scour downstream of a spillway. *J. Hydraul. Res.* 41(4): 417-426.

- Day, S. and Sarkar, A. 2006. Scour downstream of an apron due to submerge horizontal jets. *J. Hydraul. Eng. ASCE*.132(3): 246-257.
- Ead, S. A. and Rajaratnam, N. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *J. Hydraul. Eng. ASCE*. 128(7): 656-663.
- Farhoodi, J. and Smith, K. 1985. Local scour profile downstream of hydraulic jump. *J. Hydraul. Res.* 23(4): 343-359.
- Ghorbani, B., Samadi-Boroujeni, H. and Rahmati, E. 2015. Experimental Investigation of hydraulic jump stilling basin with stile bed. *J. Hydraul.* 10(2): 73-82. (in Persian)
- Hamidifar, H. and Omid, M. H. 2010. Noncohesive sediment scour downstream of an apron. *J. Agric. Eng. Res.* 11(2): 17-28. (in Persian)
- Hamidifar, H., Omid, M. H. and Nasrabadi, M. 2010. Bed scour downstream of sluice gates. *J. Water Soil.* 24(4): 728-736. (in Persian)
- Izadjoo, F. and Shafai-Bajestan, M. 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. *J. Appl. Sci.* 7(8): 1164-1169.
- Kells, J. A., Balachandar, R. and Hagel, K. P. 2001. Effect of grain size on local channel scour below a sluice gate. *Can. J. Civ. Eng.* 28, 440-451.
- Khalili-Shayan, H. and Farhoodi, J. 2015. Time- dependent local scour downstream of adverse stilling basin. *J. Iran Water Res.* 9(2): 51-62. (in Persian)
- Musavi, I. 2000. Experimental investigation of scour profile downstream of hydraulic jumps. M. Sc. Thesis. Sharif University of Technology. Tehran. Iran. (in Persian)
- Novak, P. 1955. Study of stilling basin with special regard to their end sill. *Proceeding of 6th IAHR Conference.* The Hague.
- Novak, P. 1961. Influence of bed load passage on scour and turbulence downstream of stilling basin. *Proceeding of 19th IAHR Conference.* Dubrovink.
- Shafai-Bajestan, M. 2013. *Basic Theory and Practice of Hydraulics of Sediment Transport.* Shahid Chamran University Press. Ahvaz. Iran. (in Persian)
- Shafai-Bajestan, M. and Neisi, K. 2009. A new roughened bed hydraulic jump stilling basin. *J. Appl. Sci.* 2, 436-445.
- Shafai-Bajestan, M. and Omid, S. 2016. Investigation of scour depth downstream of stilling basin for the case of B-Jump. *J. Irrig. Sci. Eng.* 38(4): 125-136. (in Persian)

Scour Dimensions of the Downstream Hydraulic Jump Stilling Basin with Bed Covered with Six-Legs Elements

P. Chahardah-Cheriki Gholizadeh* and M. Shafai-Bajestan

* Corresponding Author: M. Sc. Student, Department of Hydraulic Structures, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. Email: parvin_chahardahcherik@yahoo.com

Received: 22 March 2016, Accepted: 9 June 2016

Bed topography downstream of the new hydraulic jump stilling basin (covered with six-legs elements) has been investigated in this study. Variation of maximum scour depth for different hydraulic conditions (Froude number ranged from 5.76 to 9.13) and three different sediment particle sizes was studied. The basin length, which was kept constant at all tests, was measured for maximum flow discharge. At this condition the maximum scour depth was measured which was found to be 61% less than that of maximum scour depth reported by other studies conducted for smooth bed basin. Increase of sediment particles from 0.95 mm to 2.23 can cause the scour depth to reduce by as much as 56%. In those tests which the jump length was less than the basin length, the scour depth was reduced significantly. For test with jump length to basin length ratio equal to 0.405, the scour depth shows reduction of 64% on an average. The upstream and downstream scour banks angles was measured for all tests which was to be equal to 6-24 degrees and 2-7 degrees respectively. The best fitted relation for dimensionless longitude bed profile also was obtained and presented.

Keywords: Basin, Hydraulic, Scour, Six-Legs Element