Irrigation Sciences and Engineering
Vol.40, No. 2, Summer 2017, p. 15-25

علوم و مهندسی آبیاری
جلد ٤٠، شماره‌ی۲، تابستان ۹٦، ص. ۲۵-۱۵

مشخصات پرش هیدرولیکی روی بستر با المان‌های شش‌پایه نفوذپذیر

مریم خواجه گودری[۱] و محمود شفاعی بجستان[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز
۲*- نویسنده مسئول، استاد گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز m_shafai@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۳/۱۰ تاریخ پذیرش: ۹۴/۸/۱۱

چکیده

حوضچه‌ی آرامش یکی از انواع سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی در سیستم‌های انتقال آب است که ابعاد آن به مشخصات پرش بستگی دارد. در تحقیق حاضر از المان‌های شش‌پایه در نفوذپذیری‌های مختلف در بستر حوضچه استفاده و تغییرات تنش برشی بستر، عمق مزدوج و طول پرش بررسی شده است. آزمایش‌ها در فلومی به طول ۷/۵ متر و عرض ۰/۳ متر انجام گردید و المان‌های شش‌پایه روی کف فلوم با سه درصد تراکم ۳٦، ٦۳ و ۱۰۰ درصد به نحوی چیده شدند که سطح فوقانی آن‌ها در زیر جت ورودی آب قرار بگیرد و مشخصات پرش هیدرولیکی نوع A و پروفیل سطح آب در محدوده‌ی اعداد فرود ۵/۳ تا ۸/۱ برداشت شود. نتایج نشان داد که بیشترین کاهش عمق مزدوج و طول پرش در شرایطی می‌باشدکه تراکم المان‌ها ۳٦ درصد است. در این مطالعه روابطی برای تعیین اعماق مزدوج و ضریب نیروی برشی بستر بر اساس عدد فرود برای المان‌های شش‌پایه ارائه گردید.

کلیدواژه‌ها: استهلاک انرژی، حوضچه آرامش، پرش هیدرولیکی.

Characteristics of Hydraulic Jump on The Bed with Permeable Six Legs Elements

M. Khajeh Goodari[1] and M. Shafai Bajestan[2*]

1- M.Sc Student In Hydraulic Structures, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
2*- Corresponding Author, Professor in Hydraulic Structures, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

Received: 31 May 2015 Accepted: 2 November 2015

Abstract

Stilling basin is one of the dissipated energy structures in water transfer systems that its dimensions depend on the characteristics of hydraulic jump. In present study, six legs elements have been used in different permeability on basin bed and the changes of shear stress, sequent depth and the length of jump have been investigated. Experiments were conducted in a rectangular flume of 7.5 m long and 0.3 m wide and six legs elements were arranged on the bed of flume with density percent 36, 63 and 100 in such a way that the incoming water jet was just above the elements surface. The incoming Froude number was in the range of 5.3 to 8.1 and during each test the water surface profile and characteristics of hydraulic jump type A were measured. The results indicate that the most reduction of sequent depth ratio and dimensionless length of jump occur when the density of elements is 36%. In this study, relations have been presented for the sequent depth of hydraulic jump and shear force coefficient of bed as a function of the Froude Number for six legs elements.

Keywords: Dissipated energy, Stilling basin, Hydraulic jump.

مقدمه

در اثر وقوع پرش هیدرولیکی میزان قابل توجهی از انرژی جنبشی آب کاسته می‌شود از همین روی از این پدیده هیدرولیکی برای استهلاک انرژی جنبشی پائین دست تندآبها یا دریچه‌ها در کانال‌های انتقال آب استفاده می‌شود که به سازه‌های مستهلک کننده انرژی از نوع پرش هیدرولیکی معروف هستند.

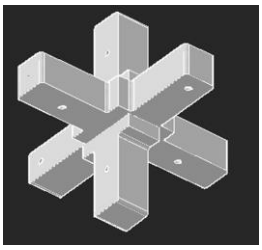
تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در مورد انواع حوضچه‌های آرامش به عمل آمده و چندین نوع از این حوضچه‌ها توسط محققین معرفی شده‌اند که مشهورترین آنها چهار نوع حوضچه‌های آرامش سازمان احیای اراضی ایالات متحده[1] می‌باشد که مشخصات این سازه‌ها بر اساس نتایج آزمایشگاهی ارائه شده است (پیترکا[2]، ۱۹۵۸). در تحقیقات پیترکا (۱۹۵۸)، طول هر سازه و عمق پایاب مورد نیاز برای تشکیل پرش کامل درون حوضچه که تعیین کننده رقوم تراز کف آن سازه خواهد بود توسط کارگذاری بلوک‌هایی در ابتدا و درون سازه کاهش داده شده است. آزمایش‌های اولیه نشان داد که بلوک‌های ناپیوسته باعث می‌گردند تا جت ورودی با برخورد به بلوک‌ها و یا عبور از بین بلوک‌ها به جت‌های کوچکتری تقسیم و میزان آشفتگی جریان درون حوضچه افزایش یابد که منجر به کاهش طول پرش و عمق مزدوج می‌گردد. از آنجا که بلوک‌ها در مقابل جت ورودی قرارمی‌گیرند، پتانسیل پدیده کاویتاسیون در سرعت‌های جریان بالا افزایش می‌یابد و از این رو محدودیت‌هایی نیز منظور گردیده است (پیترکا، ۱۹۵۸). بعدها مطالعات نشان داد که در صورتی که برآمدگی‌های بستر حوضچه زیر جت ورودی باشند و نه در مقابل آن، نیز قادر هستند تا میزان تنش برشی بستر را افزایش و در نتیجه طول و عمق مزدوج را به طور مؤثری کاهش دهند (راجاراتنام[3]، ۱۹۶۸). این نتایج توسط محققین دیگری چون خاپاوف، میاخالوف و کیسلوف (به نقل از هاگر[4]، ۱۹۹۲)، محمدعلی[5] (۱۹۹۱) و الحمید[6] (۱۹۹۴) نیز مورد تایید قرار گرفت. در مطالعه‌ی آزمایشگاهی روی بستر موج‌دار سینوسی نیم دایره‌ای شکل، اید و راجاراتنام[7] (۲۰۰۲) نشان دادند که طول و عمق ثانویه‌ی پرش هیدرولیکی در مقایسه با پرش روی بستر صاف به ترتیب ۵۰ و ۲۵ درصد کاهش یافته‌اند. مطالعات تکمیلی توسط توکیای[8] (۲۰۰۵) نیز روی بستر موجدار سینوسی نتایج فوق را تایید کرد. ایزدجو و شفاعی بجستان[9] (۲۰۰۷) از بسترهای موجی شکل ذوزنقه‌ای، که اجرای آن از نظر قالب‌بندی راحت‌تر است، در مطالعات آزمایشگاهی خود استفاده کردند و نشان دادند که این نوع برآمدگی‌ها توانسته است میزان تنش را به اندازه ۱۰ برابر افزایش دهد و در نتیجه‌ی آن طول پرش هیدرولیکی تا ۵۰ درصد و عمق مزدوج تا ۲۰ درصد کاهش یابد. با توجه به حصول نتایج امیدبخش از تأثیر برآمدگی‌های ممتد در بستر بر کاهش ابعاد حوضچه مطالعات گسترده‌ای با شکل‌های مختلف برآمدگی تا کنون انجام گردیده است که می‌توان به مطالعات عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)، گوهری و فرهودی (۲۰۰۹)، راور و همکاران (۱۳۹۱)، اید[10] (۲۰۰۷)، السبایه و شبایک[11] (۲۰۱۰)، و علی احمد و همکاران[12] (۲۰۱۴) اشاره کرد.

مطالعات در خصوص برآمدگی‌های غیرممتد نیز توسط محققین مختلف انجام شده است؛ از جمله می‌توان به مطالعات شفاعی بجستان و نیسی (۱۳۸۸) اشاره کرد. این مطالعات نیز نشان داد که برآمدگی‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش طول و عمق مزدوج پرش دارند، زیرا در این حالت بخشی از جت ورودی از بازشدگی بین برآمدگی‌ها عبور کرده و باعث ایجاد تلاطم بیشتر نیز می‌شود. همچنین مطالعات ابوالعطا و همکاران[13] (۲۰۱۱) در خصوص تأثیر برآمدگی‌های غیر ممتد T شکل با تراکم‌های مختلف بر مشخصات پرش نیز نشان داد که کاهش مشخصات پرش هیدرولیکی در تراکم‌های کمتر که نفوذپذیری بیشتری هم دارند بسیار بیشتر است. مطالعات نصراصفهانی و شفاعی بجستان (۱۳۹۳) نیز نشان داد که برآمدگی‌های غیر ممتد نمی‌توانند مشکلی از نظر کاویتاسیون ایجاد کنند ضمن اینکه ابعاد دال کف حوضچه نیز در مقایسه با حالت بدون برآمدگی تغییر نمی‌کند.

مرور منابع نشان می‌دهد که اصولاً برآمدگی‌های بستر باعث کاهش ابعاد سازه می‌شود و این برآمدگی‌ها در صورت غیر ممتد و نفوذپذیر بودن تأثیر بیشتری بر کاهش ابعاد حوضچه دارند. لذا در مطالعه‌ی حاضر از نوعی برآمدگی استفاده شده است که علاوه بر نفوذپذیر بودن از نظر اجرا نیز سهولت کافی را داشته باشد. برای این منظور در این تحقیق از المان‌های بتنی شش‌پایه با نام تجاری ای جک[14] استفاده گردید. این المان‌ها از اتصال دو قسمت Tشکل به هم ساخته می‌شوند و هندسه‌ای شش‌پایه را ایجاد می‌کند. این سازه تاکنون بیشتر به عنوان موج شکن در بنادر و یا بازدارنده از فرسایش در سواحل رودخانه مورد استفاده قرار گرفته‌است (تورنتن و همکاران[15]، ۱۹۹۹). شکل (۱)، شکل شماتیک یک المان شش‌پایه را نشان می‌دهد.

1-USBR
2-Peterka
3-Rajaratnam
4-Hager
5-Mohammad Ali
6-Alhamid
7-Ead and Rajaratnam
8-Tokyay
9 - Izadjoo and Shafai-Bajestan

10-Ead
11-Elsebaie and Shabayek
12-Ali Ahmed *et al.*
13-Aboulatta *et al.*
14-A-Jack
15-Thornton *et al.*



شکل ۱- شکل شماتیک المان شش‌پایه

لازم به ذکر است که در برآمدگی‌های غیر ممتد جریان آب تنها می‌تواند از بین برآمدگی‌ها عبور کند اما در المان‌های شش‌پایه این امکان وجود دارد که جریان آب از بخشی از هندسه‌ی داخلی آنها به خصوص در تراکم‌های کمتر نیز عبور کند و بستری با برآمدگی و ویژگی نفوذپذیری ایجاد کنند. وجود هر دو خاصیت برآمدگی و نفودپذیری برای کف حوضچه، علاوه بر کاهش مشخصات پرش هیدرولیکی موجب کاهش فشار بالابرنده نیز می‌گردد و می‌تواند از هزینه‌های اضافی برای ایجاد دال کف بتنی ضخیم جلوگیری و به طرح اقتصادی و بهینه‌تر حوضچه کمک کند .

مواد و روش‌ها

تئوری تحقیق

عمق مزدوج

شکل (۲) نمایی از پرش هیدرولیکی روی بستر صاف و بستر با حضور المان شش‌پایه را نشان می‌دهد. در صورتی که برای بستر صاف رابطه مومنتم بین مقاطع یک و دو در این شکل نوشته شود خواهیم داشت:

$$F_1 - F_2 - F_f + F_w = \rho Q\,(V_2 - V_1) \qquad (۱)$$

که F_1 و F_2: نیروهای هیدرواستاتیک در مقاطع یک و دو، F_f: نیروی اصطکاک، F_w: نیروی وزن، ρ: جرم واحد حجم آب، Q: دبی جریان و V_1 و V_2: نیز به ترتیب سرعت جریان در مقاطع یک و دو می‌باشد. در صورتی که کانال مستطیلی با شیب کف ناچیز فرض گردد در آن صورت برای پرش با بستر صاف نیروی اصطکاک صفر است که پس از ساده سازی رابطه‌ی (۱)، رابطه‌ی زیر استخراج می‌گردد:

$$(\frac{y_2}{y_1})^2 + \left(\frac{y_2}{y_1}\right) - 2Fr_1^2 = 0 \qquad (۲)$$

که y_1: عمق اولیه‌ی پرش، y_2: عمق ثانویه‌ی پرش و Fr_1: عدد فرود جریان ورودی است و از حل آن می‌توان رابطه‌ی زیر را که به رابطه‌ی بلانگر معروف است استخراج کرد:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}\left[\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1\right] \qquad (۳)$$

برای پرش روی بستر با اجزای زبر، مقدا ر نیروی اصطکاکی را می‌توان از رابطه‌ای که راجاراتنام (۱۹۶۸) به شرح زیر پیشنهاد داده است، استفاده کرد:

$$F_f = \varepsilon\gamma\frac{y_1^2}{2} \qquad (۴)$$

که پس از قرار دادن در رابطه‌ی (۱) با همان فرضیه‌های اشاره شده می‌توان نوشت:

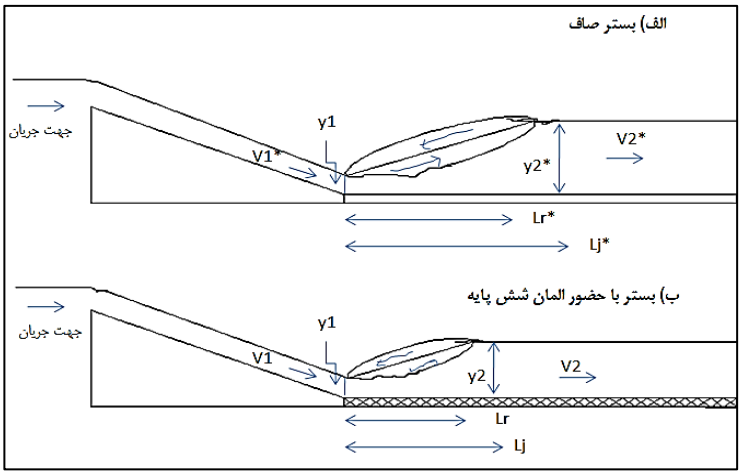
$$(\frac{y_2}{y_1})^3 - [1 - \varepsilon + 2Fr_1^2]\frac{y_2}{y_1} + 2Fr_1^2 = 0 \qquad (۵)$$

با استفاده از رابطه‌ی فوق و در صورتی که ضریب تنش برشی بستر (ε) و شرایط جریان ورودی (Fr_1 و y_1) معلوم باشد، می‌توان مقدار عمق مزدوج روی بستر با برآمدگی‌های شش‌پایه با تراکم‌های مختلف را به دست آورد.

طول پرش

ویژگی‌های پرش هیدرولیکی با حضور المان‌های شش‌پایه در بستر حوضچه متاثر از خصوصیات سیال، مشخصات فیزیکی بستر و شرایط هیدرولیکی جریان می‌باشد؛ ρ: جرم مخصوص جریان عبوری، μ: لزجت مطلق جریان عبوری، g: شتاب ثقل زمین، y_1: عمق اولیه‌ی پرش، V_1: سرعت جریان در عمق y_1، y_2^*: عمق ثانویه‌ی پرش روی بستر صاف ، y_2: عمق ثانویه‌ی پرش روی بستر دارای المان شش‌پایه، L_j: طول پرش هیدرولیکی، L_r: طول غلتابی و n: تراکم المان‌ها را می‌توان مهمترین پارامترها در مطالعه‌ی حاضر دانست. با استفاده از تئوری باکینگهام برای دستیابی به گروه‌های بی بعد خواهیم داشت:

$$f\left(R_e و Fr_1 و n و \frac{y_2}{y_1} و \frac{L_j}{y_1} و \frac{L_j}{y_2^*} و \frac{L_r}{y_1}\right) = 0 \qquad (۶)$$



شکل ۲- مشخصات پرش هیدرولیکی، الف)بستر صاف، ب) بستربا برآمدگی‌های شش‌پایه

در این رابطه به دلیل ماهیت پرش هیدرولیکی و تلاطم زیاد آن، از اثر لزجت و در نتیجه عدد رینولدز صرف نظر می‌شود. بنابراین رابطه‌ی فوق با توجه به پارامترهای بی‌بعد ارائه شده برای طول پرش هیدرولیکی توسط سازمان احیای اراضی ایالات متحده، به صورت زیر در خواهد آمد:

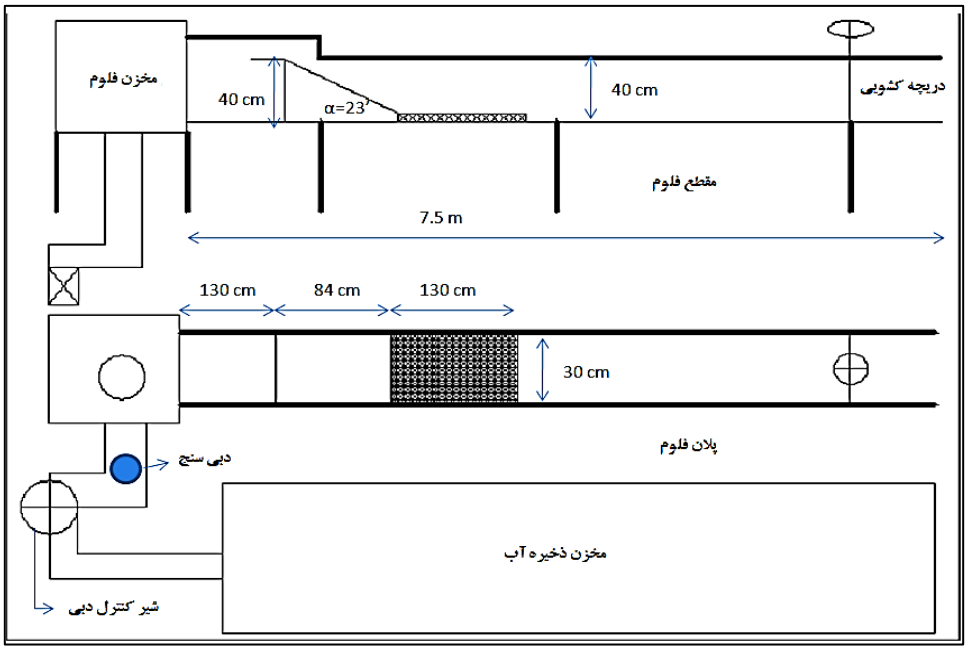
$$\frac{L_j}{y_1}.\frac{L_j}{y_2^*} = f(Fr_1, n) \qquad (۷)$$

روش کار آزمایشگاهی

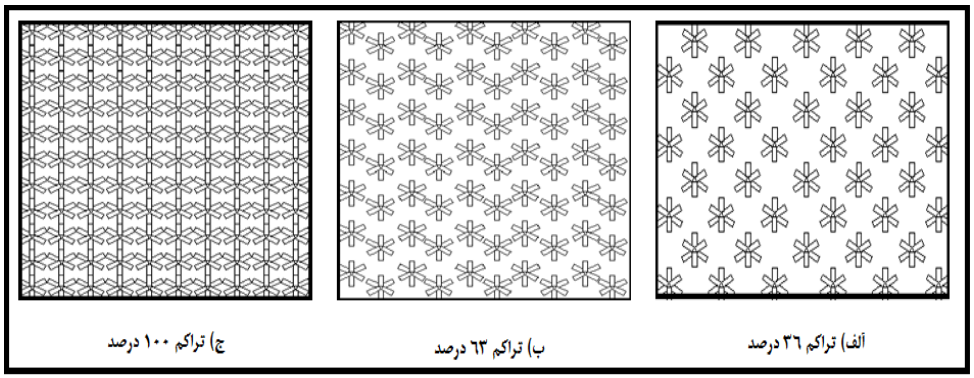
به منظور انجام این تحقیق، آزمایش‌ها در فلومی به طول ۷/۵ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴ متر با کف و دیواره‌ای از جنس پلکسی گلاس و شیشه در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی دانشکده‌ی مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام گردید. آب توسط پمپ از مخزن ذخیره به مخزن آرام کننده ابتدای فلوم وارد می‌گشت. به منظور تأمین بار آبی لازم برای ایجاد جریان فوق بحرانی یک سطح شیبدار با زاویه‌ی ۲۳ درجه در فاصله‌ی۱۳۰ سانتی متری از ابتدای فلوم تعبیه شد. شکل (۳) نمایی از فلوم مورد استفاده را نشان می‌دهد.

المان‌های شش‌پایه‌ی مورد استفاده پس از طراحی توسط نرم افزار اتوکد، از جنس بتن ساخته شدند. ابعاد هر یک از المان‌های شش‌پایه ۵×۴×۵ سانتی‌متر و جرم مخصوص آنها $۲/۱\times۱۰^{۳}$ کیلوگرم بر متر مکعب و ارتفاع مؤثر آنها زمانی که روی سه پایه قرار می‌گیرند؛ برابر ۴ سانتی‌متر می‌باشد. همان‌طور که اشاره شد هندسه‌ی خاص المان شش‌پایه این قابلیت را فراهم کرده است تا این المان‌ها بتوانند از هر شش وجه با المان کناری قفل شوند و به صورت یک ردیف یکپارچه قرار بگیرند. تعداد المان‌ها در این ردیف بستگی به تراکم کارگذاری مورد نظر دارد. هرچه میزان فشردگی المان‌ها در این ردیف بیشتر شود درصد تراکم نیز بیشتر می‌شود.

لازم به ذکر است که تعریف تراکم برای المان شش‌پایه در این مطالعه این گونه در نظر گرفته شده است که تراکم جای‌گذاری یا ضریب پوشش برای المان شش‌پایه به تعداد المان موجود در مساحت پوشش داده شده توسط آنها اطلاق می‌شود و به منظور انجام این مطالعه، در تراکم ۱۰۰ درصد تعداد ۳۴۱ المان شش‌پایه در ۳۱ ردیف ۱۱ تایی در مساحتی به میزان ۰/۳۹ متر مربع جایگذاری شد. برای حصول دو تراکم دیگر که دو مقدار دلخواه برای مقایسه با تراکم صد در صد بودند مقادیر ۷۰ درصد و ۳۰ درصد انتخاب شدند که با توجه به اینکه باید تعداد صحیحی از المان شش‌پایه کارگذاری می‌شد این درصدها به ۶۳ و ۳۶ درصد تغییر یافتند. برای ایجاد این درصدهای تراکم، تعداد ردیف‌ها ثابت ماند و تنها تعداد المان شش‌پایه در هر ردیف تغییر نمود؛ به این ترتیب که در تراکم ۶۳ درصد تعداد ۲۱۷ و در تراکم ۳۶ درصد تعداد۱۲۴ المان در ۳۱ ردیف به ترتیب ۷ و ۴ تایی در همان مساحت قرار گرفتند. بنابراین درصد تراکم در این پژوهش را با توجه به ثابت بودن مساحت تحت پوشش می‌توان نسبت تعداد المان در هر تراکم دلخواه به تعداد المان در تراکم ۱۰۰ درصد دانست و آن را به عنوان یک پارامتر بی بعد (n) تلقی کرد. برای تثبیت و جایگذاری المان‌ها در حوضچه، المان‌ها با چسب آکواریوم طوری چسبانده شدند که تراز بالایی آنها معادل لبه‌ی پایین جت ورودی باشد؛ همچنین لازم به ذکر است که رقوم تراز پایین دست کانال پایین تر از رقوم تراز بالای المان‌ها بود. طول چیدمان المان‌ها در این مطالعه برابر با حداکثر طول پرش در آزمایش شاهد که روی بستر صاف صورت گرفت و برابر با ۱/۳ متر بود قرار داده شد. این انتخاب به جهت داشتن فرضیه‌ی کاهش مشخصات پرش هیدرولیکی در حضور المان‌های شش‌پایه در کف صورت گرفت و پیش بینی شد که طول پرش در تمامی آزمایشات بعدی که با استفاده از المان انجام می‌شوند، از حداکثر مقدار آن در آزمایش‌های شاهد کمتر خواهد بود.



شکل ۳ – پلان و مقطع طولی فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده



شکل ٤ – پلان نحوه‌ی چیدمان المان‌های شش‌پایه در بستر حوضچه‌ی آرامش

شکل (۴) نحوه‌ی چیدمان المان‌ها را نشان می‌دهد.

روش انجام آزمایش به این صورت بود که پس از نصب المان‌ها به نحوی که اشاره شد، با روشن کردن پمپ جریان آب به آرامی درون آبراهه برقرار می‌گشت و در این زمان دریچه بسته می‌ماند. سپس به تدریج دبی ورودی به وسیله‌ی یک دبی سنج الکترومغناطیس با دقت ۰/۰۱ لیتر تا مقدار مورد نظر افزایش می‌یافت و همزمان دریچه‌ی انتهایی به آهستگی باز می‌گشت تا محل وقوع پرش دقیقا در انتهای سطح شیبدار قرار بگیرد و پرش تثبیت شود. پس از آن عمق اولیه و ثانویه‌ی پرش توسط عمق‌سنجی با دقت ۰/۱ میلی متر با متوسط گیری از پنج مقدار قرائت شده در مقطع عرضی جریان برداشت می‌گشت و طول پرش توسط متری با دقت اندازه گیری یک میلی متر به صورت چشمی با رؤیت حباب‌های هوا اندازه گرفته می‌شد. برای اندازه گیری طول غلتابی نیز از یک شئ شناور استفاده شد که از یونولیت تعبیه شده بود و به طور واضح تحت اثر ناحیه‌ی جریان چرخشی رفت و برگشت داشت و فاصله‌ی نقطه‌ی آستانه‌ی رفت و برگشت‌ها از ابتدای سطح افقی به عنوان طول غلتابی برداشت شد. لازم به ذکر است که منظور از طول پرش نیز فاصله‌ی ابتدای پرش تا مکانی که عمق مزدوج پرش برابر با عمق پایاب و جریان نسبتا آرام است می‌باشد.

برای برداشت پروفیل طولی سطح آب از عکس برداری و نرم افزار پردازش تصاویر Engauge Digitizer 4.1 استفاده گردید. علاوه بر این آزمایش‌هایی روی بستر صاف در محدوده‌ی اعداد فرود مشابه نیز برای مقایسه با داده‌های بستر با المان‌های شش‌پایه انجام پذیرفت. برای انجام مقایسه‌ای یکسان، برای ایجاد بستر صاف، تراز کف فلوم به اندازه‌ی ارتفاع موثر المانها توسط ورقه‌ای از جنس پلکسی گلاس و فقط به اندازه‌ی طول حوضچه و نه به اندازه‌ی طول کانال بالا آورده شد. در مجموع برای این مطالعه ۲۰ آزمایش در محدوده اعداد فرود ۵/۳ تا ۸/۱ انجام شد.

نتایج و بحث

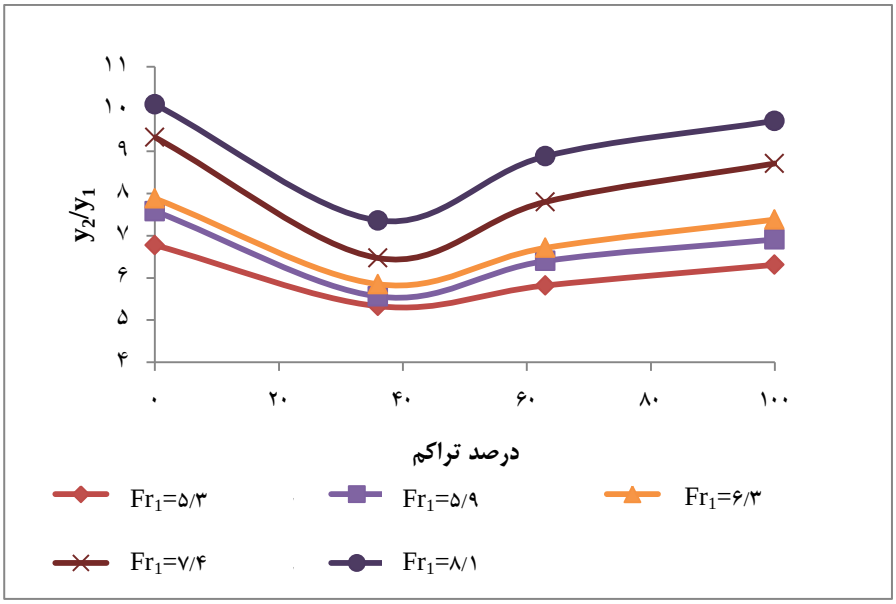
مشاهدات

با شروع هر آزمایش مشاهده گردید که بخشی از جریان جت ورودی به حوضچه به درون المان‌ها کشیده شده و در نواحی ابتدایی طول پرش از درون روزنه‌های بین المان‌ها به سمت بالا خارج می‌شود. این شرایط باعث می‌گردید تا این بخش از جریان با جت اصلی جریان روگذر برخورد کرده و تولید اغتشاش بیشتری نماید. تزریق مواد رنگی نیز این وضعیت را نشان داد. همچنین ملاحظه گردید که با افزایش نفوذپذیری، که در تراکم‌های کمتر اتفاق می‌افتد، جریان بیشتری به درون المان‌ها وارد شده و روزنه‌ها دارای باز شدگی بیشتری هستند که منجر می‌گردید تا برخورد جریان رو به بالا از روزنه‌های کف با جت افقی اصلی بیشتر و در نتیجه اغتشاش بیشتری در محدوده پرش شکل بگیرد. هرچند در این مطالعه میزان هوای جریان درون حوضچه اندازه گیری نشد ولی چنانچه میزان حباب‌های هوا به عنوان مقیاسی برای میزان آشفتگی در نظر گرفته شود مشاهده‌ها نشان می‌دهد که در مقایسه با آزمایش‌های شاهد این تحقیق، با بستر صاف، میزان حباب هوا درون حوضچه‌های با بستر المان شش‌پایه بیشتر است و با کاهش تراکم نیز میزان حباب‌ها بسیار بیشتر می‌گردد

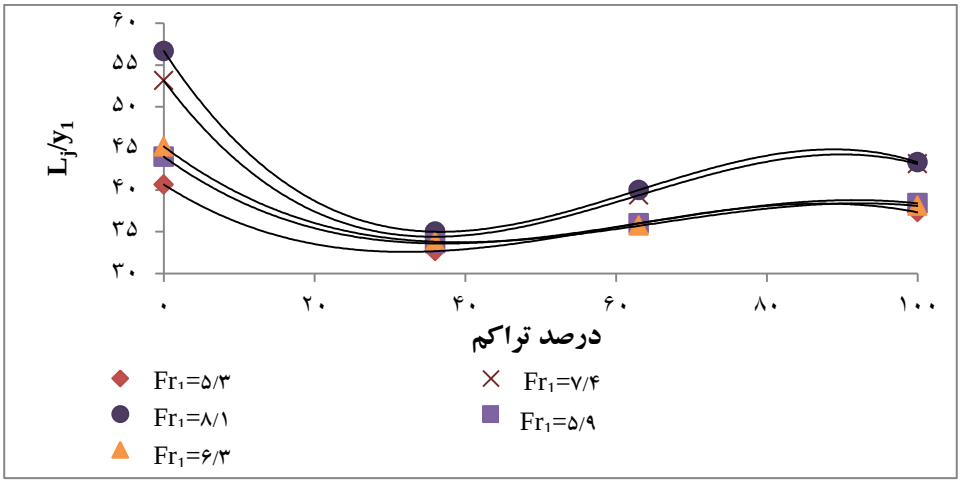
تأثیر درصد تراکم

به منظور بررسی کمی تاثیر تراکم چیدمان المان‌ها بر مشخصات پرش شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) ترسیم شده‌اند. در این شکل‌ها، که مشابه نمودارهای ابوالعطا و همکاران (۲۰۱۱) ترسیم شده اند، محور عمودی، پارامترهای بدون بعد نسبت اعماق مزدوج، نسبت طول پرش به عمق اولیه و ضریب تنش برشی می‌باشد و محور افقی درصد تراکم چیدمان المان‌ها است. بر اساس نمودارهای ابوالعطا و همکاران (۲۰۱۱) تراکمی که کمترین مقدار نسبت عمق مزدوج و طول بی بعد پرش و بیشترین ضریب تنش برشی بستر را داشته باشد بیشترین تاثیر را بر کاهش مشخصات پرش هیدرولیکی خواهد داشت. لازم به ذکر است که در این شکل‌ها مقادیر مرتبط با آزمایش‌های شاهد که روی بستر صاف انجام گشت، در تراکم صفر درصد نشان داده شده‌اند.

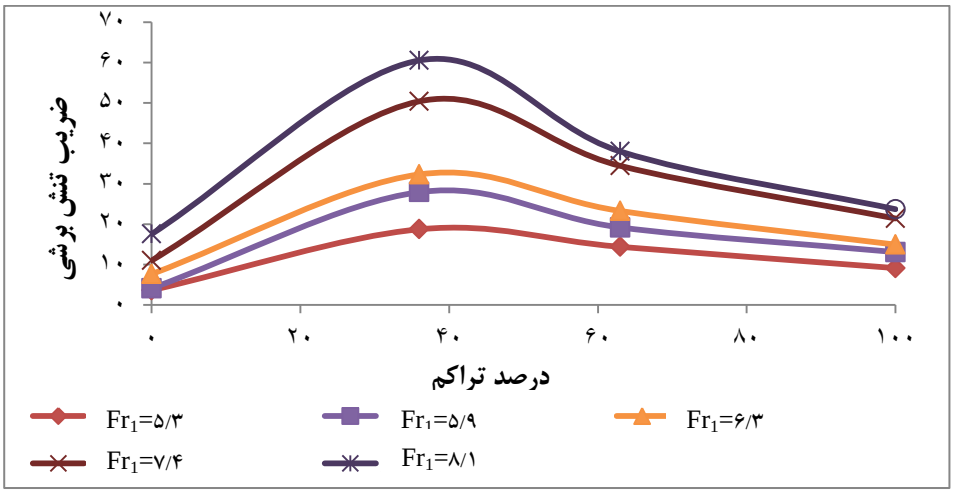
همان‌طور که در شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) مشاهده می‌شود کمترین نسبت اعماق مزدوج و طول نسبی پرش و نیز بیشترین ضریب تنش برشی در هر عدد فرود مربوط به کمترین تراکم مورد مطالعه در این آزمایش یعنی تراکم ۳۶ درصد می‌باشد که مقادیر کمی آن در ادامه ذکر شده است. این نتایج با مشاهدات عینی در حین انجام آزمایش نیز تطابق دارد چرا که همان‌طور که اشاره شد خاصیت ویژه‌ی المان‌های شش‌پایه نفوذپذیری هندسه‌ی فضایی آنهاست که در تراکم‌های بالا به دلیل قفل شدن و تنیده شدن پایه‌ها در یکدیگر این خاصیت کاهش یافته و خود را کمتر نشان می‌دهد و در نقطه‌ی مقابل در تراکم‌های میانه اثر گذاری بیشتری دارد. از همین روی در ادامه‌ی مبحث به بررسی اثر المان‌های شش‌پایه بر مشخصات پرش هیدرولیکی در بهترین تراکم استفاده شده در این مطالعه خواهیم پرداخت و روابطی برای آنها ارائه خواهیم نمود



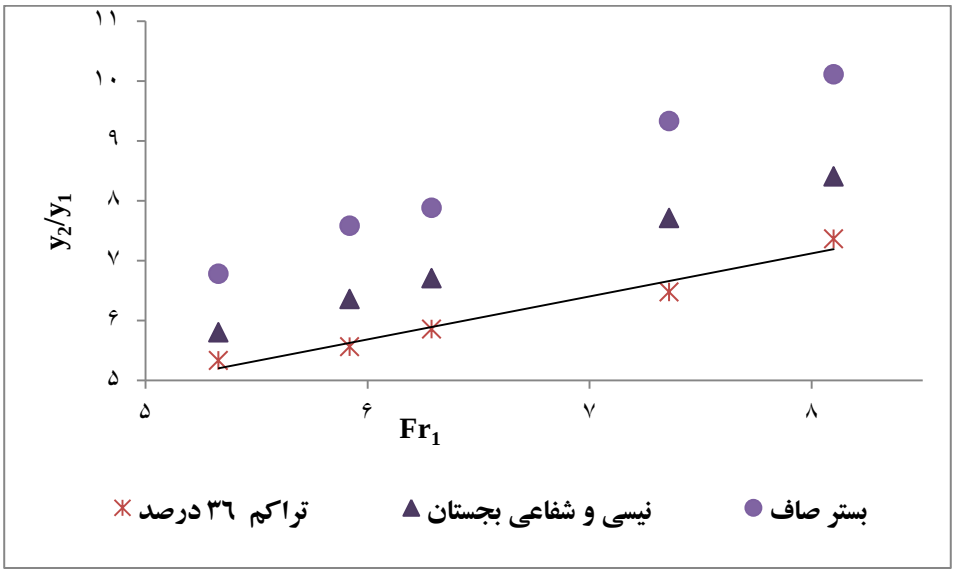
شکل ۵- y_2/y_1 در مقابل درصد تراکم برای اعداد فرود مختلف



شکل ٦- L_j/y_1 در مقابل درصد تراکم برای اعداد فرود مختلف



شکل ۷- ضریب تنش برشی در مقال درصد تراکم



شکل ۸- نسبت y_2/y_1 المان‌های شش پایه در مقابل عدد فرود اولیه

عمق مزدوج

به منظور بررسی اثر المان‌های شش‌پایه بر عمق مزدوج مقادیر نسبت اعماق مزدوج تراکم ۳۶ درصد در مقابل عدد فرود ترسیم گردید. شکل (۸) این نتایج را نشان می دهد. علاوه بر این، به منظور مقایسه‌ی نتایج، مقادیر متناظر حاصل از آزمایش بر بستر صاف و نیز رابطه‌ای که نیسی و شفاعی بجستان (۱۳۸۸) (رابطه‌ی ۸) برای برآمدگی‌های غیر ممتد مستطیلی در خصوص نسبت عمق مزدوج ارائه کردند و در برآورد نتایج تحقیق حاضر حداکثر دارای سه درصد خطا می‌باشد نیز در شکل (۸) نمایش داده شده است:

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.94Fr_1 + 0.79 \qquad (۸)$$

همچنین با توجه به شکل (۸) رابطهٔ بین نسبت عمق مزدوج و عدد فرود با ضریب تعین برابر ۰/۹۸ به صورت زیر برای خط برازش داده شده از نقاط تراکم ۳۶ درصد به دست آمده است که با استفاده از آن و مشخص بودن شرایط جریان ورودی می‌توان عمق مزدوج را به دست آورد:

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.72Fr_1 + 1.37 \qquad (۹)$$

همان‌طور که در شکل (۸) مشخص است، درکلیه‌ی منحنی‌ها، با افزایش عدد فرود اولیه‌ی جریان، نسبت اعماق مزدوج افزایش می‌یابد و کمترین مقادیر برای هر یک از آنها در عدد فرود ۵/۳ مشاهده می‌شود. همچنین منحنی مربوط به المان شش‌پایه به مقدار قابل قبولی پایین تر از بستر صاف و حتی پایین تر از نقاط مربوط به برآمدگی‌های غیر ممتد مستطیلی قرار دارد. بنابراین به طور کلی المان‌های شش‌پایه باعث کاهش عمق مزدوج نسبت به بستر صاف می‌شوند و مقادیر این کاهش عمق (D) را می‌توان توسط رابطه‌ی (۱۰) محاسبه نمود:

$$D = \frac{y_2^* - y_2}{y_2} \qquad (۱۰)$$

با استفاده از این رابطه متوسط کاهش عمق مزدوج برای المان‌های شش‌پایه در تراکم ۳۶ درصد، ۲۶ درصد و در تراکم‌های ۶۳ و ۱۰۰ درصد به ترتیب ۱۵ و ۷ درصد می‌باشد و این بدین معنی است که در تراکم ۳۶ درصد المان‌های شش‌پایه، به طور متوسط مقدار عمق مورد نیاز پایاب فقط ۷۴ درصد عمق مزدوج در بستر صاف (y_2^* ۰/۷۴) می‌باشد که در مقایسه با عمق پایاب مورد نیاز حوضچه‌های آرامش نوع II و III که به ترتیب و y_2^* ۰/۸۳ و y_2^* ۰/۹۷ می‌باشد (پیترکا، ۱۹۵۸) کمتر است.

همچنین اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) در مطالعات خود روی بستر مواج دایره ای مقدار پارامتر کاهش عمق را برابر با ۰/۲۵ و ایزدجو و شفاعی بجستان (۲۰۰۷) نیز در آزمایشهای انجام شده بر روی بستر ذوزنقه‌ای آن را برابر با ۰/۲ به دست آوردند.

طول پرش

برای بررسی و مقایسه‌ی طول پرش هدرولیکی در حالت حضور المان‌های شش‌پایه با حالت بستر صاف، مقادیر طول پرش هیدرولیکی با عمق ثانویه‌ی بستر صاف y_2^* بی بعد شدند. در شکل (۹) تغییرات طول نسبی پرش (L_j/y_2^*) در تراکم ۳۶ درصد المان شش‌پایه به ازای عدد فرود اولیه و نیز نتایج بستر صاف و نمودارهای ارائه شده توسط سازمان احیای اراضی ایالات متحده برای انواع حوضچه نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود طول نسبی پرش المان شش‌پایه در تراکم ۳۶ درصد، برای اعداد فرود ۵/۹ و ۶/۳ مشابه حوضچه‌ی نوع دو سازمان احیای اراضی ایالات متحده است. همچنین مقدار متوسط طول نسبی پرش در تراکم ۳۶ درصد حدوداً برابر ۴/۲ به دست آمد.

در شکل (۱۰) نیز اثر المان‌های شش‌پایه بر طول بی‌بعد پرش (L_j/y_1) به همراه داده‌های بستر صاف نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود با افزایش عدد فرود طول بی بعد پرش نیز افزایش می‌یابد که رابطهٔ بین نسبت طول بی بعد پرش هیدرولیکی و عدد فرود با ضریب تعیین برابر ۰/۹۶ به صورت زیر برای تراکم ۳۶ درصد به دست آمده است که با استفاده از آن و مشخص بودن شرایط جریان ورودی می‌توان طول پرش را به دست آورد:

$$\frac{L_j}{y_1} = 0.77Fr_1 + 28.14 \qquad (۱۱)$$

همچنین با توجه به اینکه کلیه‌ی نقاط مربوط به المان شش‌پایه زیر نقاط بستر صاف قرار دارند می‌توان نتیجه گرفت که المان‌های مفروض باعث کاهش طول پرش هیدرولیکی می‌شوند. جهت محاسبه‌ی نرخ این کاهش می‌توان از رابطه‌ی توکیای (۲۰۰۵) استفاده کرد. در این رابطهT: نرخ کاهش طول پرش هیدرولیکی، L_j^*و L_j: نیز به ترتیب طول جهش روی بستر صاف و بستر دارای المان شش‌پایه می‌باشند.

$$T = \frac{L_j^* - L_j}{L_j} \qquad (۱۲)$$

بر اساس این رابطه متوسط نرخ کاهش در تراکم ۳۶ درصد به مقدار ۲۹ درصد و در تراکم‌های ۶۳ و ۱۰۰ درصد به ترتیب به میزان ۲۳ و ۱۷ درصد حاصل شد.

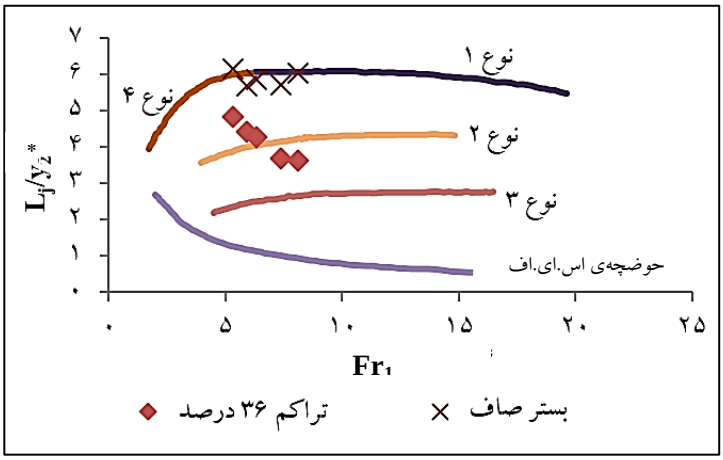
ضریب تنش برشی بستر

برای بررسی اثر المان‌های شش‌پایه بر میزان تنش برشی بستر در رابطه‌ی (۴) که توسط راجاراتنام (۱۹۶۸) ارائه شد، ضریب تنش برشی بستر (ε) با توجه به رابطه‌ی (۵) محاسبه و در شکل (۱۱) در مقابل عدد فرود جریان ورودی به همراه داده‌های مربوط به بستر

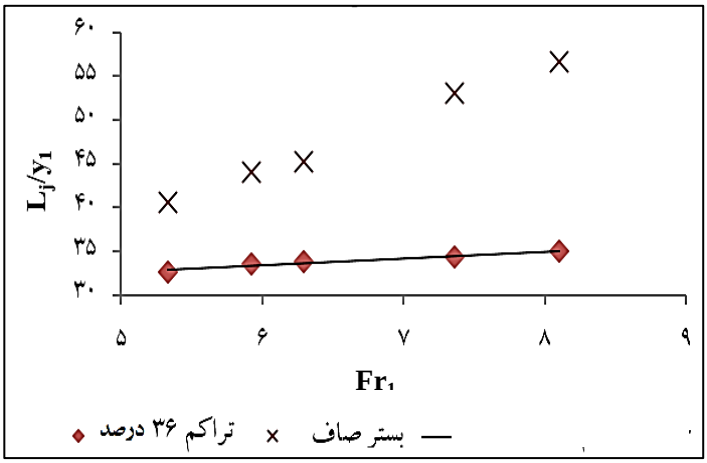
صاف برای تراکم ۳۶ درصد المان شش‌پایه رسم گردید. همچنین چنانچه نیروی اصطکاک (F_f) حاصل از رابطه‌ی (۴) با نیروی اصطکاک حاصل از رابطه‌ی مومنتم مقایسه شوند تفاوت این دو مقدار از چهار تا پانزده درصد متغیر است.

در شکل (۱۱) نیز مشاهده می‌شود که ضریب تنش برشی بستر به عدد فرود وابسته است و با افزایش آن، روندی صعودی به خود می‌گیرد. میزان این ضریب در بستر دارای المان نسبت به بستر صاف در تراکم‌های ۳۶، ۶۳ و ۱۰۰ درصد بترتیب ۵، ۴ و ۲/۵ برابر شده است. برای مقایسه‌ی نتایج منحنی مربوط به مطالعه‌ی حاضر، منحنی رابطه‌ی ۱۳ که نیسی و شفاعی‌بجستان (۱۳۸۸) برای بستر دارای برآمدگی‌های غیر ممتد مستطیلی ارائه دادند نیز در شکل (۱۱) ترسیم گشته است. میزان خطای رابطه‌ی (۱۳) در برآورد ضریب تنش برشی این تحقیق حداکثر هشت درصد می‌باشد.

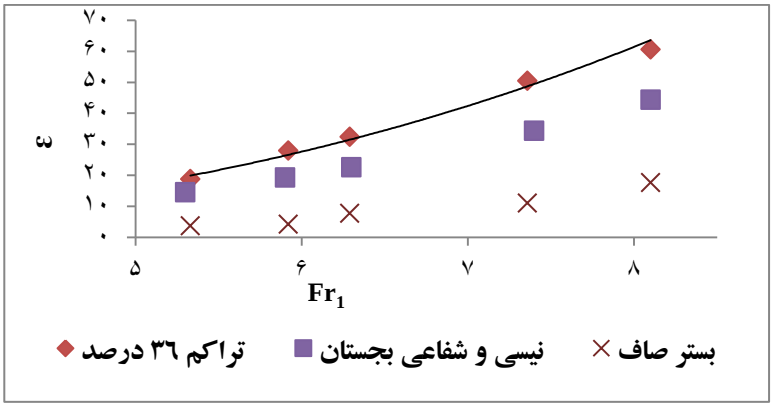
$$\varepsilon = 0.166 Fr_1^{2.671} \qquad (۱۳)$$



شکل ۹ - L_j/y_2^* در برابر عدد فرود اولیه



شکل ۱۰ - L_j/y_1 در برابر عدد فرود اولیه



شکل ۱۱- روند تغییرات ضریب تنش برشی بستر در مقابل عدد فرود اولیه

با در نظر گرفتن شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود که ضریب تنش برشی بستر در تراکم ۳۶ درصد المان شش‌پایه به میزان قابل قبولی از ضریب تنش برشی بستر صاف بیشتر می‌باشد که این روند با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد. همچنین ضریب تنش برشی المان شش‌پایه از ضریب تنش برشی برآمدگی‌های غیر ممتد مستطیلی استفاده شده در مطالعات نیسی و شفاعی بجستان (۱۳۸۸) نیز بیشتر می‌باشد که نشان دهنده‌ی همان خاصیت مضاعف نفوذپذیری این المان‌ها نسبت به برآمدگی‌های مستطیلی غیر قابل نفوذ می‌باشد.

همچنین در پایان می‌توان برای تراکم ۳۶ درصد المان شش‌پایه، رابطه‌ی نمایی بین ضریب تنش برش و عدد فرود اولیه‌ی جریان را با ضریب تعیین برابر ۰/۹۹به صورت زیر برقرار کرد:

$$\varepsilon = 0.19 Fr_1^{2.78} \qquad (۱۴)$$

نتیجه گیری

در مطالعه‌ی حاضر اثر المان‌های شش‌پایه با نام تجاری ای‌جک بر مشخصات پرش هیدرولیکی در آزمایشگاه و به کمک مدل فیزیکی مورد بررسی قرار گرفت. در مجموع ۲۰ آزمایش صورت پذیرفت که اهم نتایج به شرح زیر است:

نتایج نشان داد که المان‌های شش‌پایه می‌توانند مشخصات پرش هیدرولیکی را نسبت به بستر صاف به مقدار قابل قبولی کاهش دهند. میزان این کاهش بستگی به تراکم المان‌ها و نیز عدد فرود دارد. به طور کلی با افزایش تراکم درصد کاهش نسبت اعماق مزدوج و طول پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد زیرا با افزایش تراکم خاصیت نفوذپذیری المان‌های شش‌پایه کاهش می‌یابد و عملکردی مشابه با برآمدگی‌های نواری در بسترهای موجدار پیدا می‌کنند.

تراکم ۳۶ درصد از بین سه تراکم مورد بررسی در این مطالعه بهترین نتایج را برای کاهش مشخصات پرش هیدرولیکی در بر داشت.

حداکثر کاهش نسبت اعماق مزدوج به میزان ۳۰ درصد در تراکم ۳۶ درصد مشاهده شده‌است. رابطه‌ی (۱۰) نیز برای محاسبه‌ی عمق ثانویه‌ی پرش در این تراکم مورد بررسی ارائه گشت.

طول پرش هیدرولیکی روی بستر زبر شده با المان شش‌پایه حداکثر ۴۰ درصد در تراکم ۳۶ درصد نسبت به بستر صاف کاهش می‌یابد. این روند با کاهش تراکم و افزایش عدد فرود بیشتر می‌شود. رابطه‌ی (۱۲) نیز برای محاسبه‌ی طول پرش هیدرولیکی در تراکم ۳۶ درصد به دست آمد.

رابطه‌ی ضریب نیروی برشی نیز با به کار بردن داده‌های آزمایشگاهی به صورت تابعی از عدد فرود برای بهترین تراکم موجود از المان شش‌پایه در این تحقیق به دست آمد.

قدردانی

هزینه‌های این تحقیق از محل پژوهانه نویسنده دوم تأمین شده‌است که بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر می‌شود.

منابع

۱- راور، ز.، فرهودی، ج. و ه. نژندعلی. ۱۳۹۱. تاثیر بستر ذوزنقه‌ای قائم بر خصوصیات پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی. نشریه آب و خاک علوم و صنایع کشاورزی، ۲۶(۱) : ۹۴-۸۵.

۲- شفاعی بجستان، م. و ک. نیسی. ۱۳۸۸. بررسی عمق مزدوج پرش هیدرولیکی تحت تاثیر اجزای زبر کف. مجله دانش آب و خاک، ۱(۱۹) : ۱۷۶-۱۶۵.

۳- نصر اصفهانی، م. و م. شفاعی بجستان. ۱۳۹۳. بررسی پدیده کاویتاسیون در حوضچه آرامش با بستر زبر و پله ناگهانی. نشریه علمی پژوهشی هیدرولیک، ۸(۲) : ۴۰-۲۹.

4- Abbaspour, A., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadizadeh D. and A. A. Sadraddini. 2009. Effect of sinusoidal corrugated bedon hydraulic jump characteristics. Journal of Hydro-Environmental Research, 3: 109-117.

5- AboulAtta, N., Ezizah, G., Yousif, N. and S. Fathy. 2011. Design of stilling basin artificial roughness. International Journal Civil and Environmental Engineering, 3(2): 65-71.

6- Ali Ahmed, H. M., El Gendy, M., Hasan Mirdan, A. M., Mohamed Ali, A. A. and S. F. Abdel Haleem. 2014. Effect of corrugated beds on characteristics of submerged hydraulic jump. Ain Shams Engineering Journal, 5(4): 1033–1042.

7- Alhamid, A. A. 1994. Effective roughness on horizontal rectangular stilling basins. Transaction on Ecology and The Environment, 8: 39-46.

8- Ead, S.A. 2007. Effect of bed corrugations on the characteristics of a hydraulic jump. Final Research Report 14/427, King Saud University, College of Engineering, Research Center.

9- Ead, S.A. and N. Rajaratnam. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 128 (7): 656-663.

10- Elsebaie, I.H. and Sh. Shabayek. 2010. Formation of hydraulic jumps on corrugated beds. Civil and Environmental Engineering, 10(1): 40-50.

11- Gohari, A. and J. Farhoudi. 2009. The characteristics of hydraulic jump on rough bed stilling basins. 33rd IAHR Congress, Water Engineering for A Sustainable Environment, Vancouver, British Columbia, August 9-14.

12- Hager, W. H. 1992. Energy dissipaters and hydraulic jump. Kluwer Academic, Dordrecht,Netherland.

13- Izadjoo, F. and M. Shafai-Bajestan. 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. Journal of Applied Sciences 7(8): 1164-1169.

14- Mohammad Ali, H. S. 1991. Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jumps. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 117(1): 83-93.

15- Peterka, A.J. 1958. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipaters. Engineering Monograph No. 25, USBR, Denver, Colorado, USA.

16- Rajaratnam, N. 1968. Hydraulic Jump on rough bed. Transaction of the Engineering Institute of Canada, 11 (A-2): 1-8.

17- Tokyay, N. D. 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. Global Climate Change Conference, EWRI, May 15-19, Anchorage, Alaska, USA, Doi: 1.1061/40792(173)408, pp.408-416.

18-– Thornton, C. I., Watson, C. C., Abt, S. R., Lipscomb, C. M. and C. Ullman. 1999. Laboratory testing of A-Jacks units for inland applications: Pier scour protection testing. Colorado State University Research Report for Armortec Concrete Erosion Control Systems, February, 19: 10-16.