

## بررسی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با کف مشبک سوراخ‌دار

نیما اکبری<sup>۱</sup>، کاظم اسماعیلی<sup>۲\*</sup> و سعیدرضا خداشناس<sup>۳</sup>

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری سازه‌های آبی؛ دانشیار؛ و استاد گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
تاریخ دریافت: ۹۷/۲/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۶/۱۳

### چکیده

در این تحقیق اثر شبکه‌ای از سوراخ‌ها در کف حوضچه آرامش بر مشخصات اصلی پرش هیدرولیکی از جمله نسبت اعماق مزدوج و طول پرش مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا با تحلیل ریاضی و توسعه رابطه اندازه حرکت معادله‌ای برای محاسبه مستقیم نسبت اعماق مزدوج در حالتی که دبی جریان در امتداد حوضچه کاهش می‌یابد به دست آمد. سپس با استفاده از یک کانال آزمایشگاهی به طول ۶ متر و عرض ۰/۸ متر مجهز به شبکه‌ای از شیرها در کف، آزمایش‌هایی به منظور بررسی رفتار و مشخصات پرش در این حالت انجام شد و نتایج با مقادیر اندازه‌گیری شده برای پرش کلاسیک روی بستر صاف مقایسه گردید. بازه اعداد فرود مورد بررسی در آزمایش‌ها بین ۵/۳ تا ۷/۴ بود. نسبت دبی باقیمانده در پایین دست به دبی ورودی به کانال نیز بین ۰/۹۸ تا ۰/۹۹۵ قرار داشت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که نسبت اعماق مزدوج پرش حداکثر ۱۹ درصد نسبت به پرش روی بستر صاف و ۱۲ درصد نسبت به مقدار محاسبه شده از رابطه تحلیلی کاهش می‌یابد. همچنین طول پرش در این حالت حداکثر به میزان ۲۹ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش یافت.

### واژه‌های کلیدی

جریان فوق بحرانی، رابطه اندازه حرکت، کاهش جریان، نسبت اعماق مزدوج

### مقدمه

آب به‌طور ناگهانی افزایش پیدا کرده و سبب آشفستگی زیادی در جریان می‌شود و در نتیجه ضمن ایجاد افت انرژی محسوس از سرعت به‌میزان قابل توجهی کاسته می‌شود (Hosseini & Abrishami, 1999). ساده‌ترین نوع پرش هیدرولیکی را که در کانال‌هایی با مقطع مستطیلی و کف افقی تشکیل می‌شود، پرش هیدرولیکی کلاسیک یا نوع A می‌نامند که به‌طور وسیع توسط پترکا (Peterka, 1958)، راجاراتنام (Rajaratnam,

پرش هیدرولیکی عمدتاً به‌عنوان یک وسیله انرژی‌کاه برای کاستن انرژی اضافی جریان پایاب سازه‌های هیدرولیکی، نظیر سرریزهای سطحی و دریچه‌های خروجی عمل می‌نماید (Farhoudi, 1993). پرش هیدرولیکی، از نوع جریان‌های متغیر سریع است که در بسیاری از کارهای عملی با آن روبرو بوده و آن عبارت است از تغییر حالت جریان از فوق بحرانی به زیر بحرانی. در پرش هیدرولیکی سطح

دیگر مطالعات انجام شده در مورد پرش هیدرولیکی روی بستر زیر یا بستر موج‌دار می‌توان به مطالعات اید و راجاراتنام (Ead & Rajaratnam, 2002)، توکیای (Tokuyay, 2005)، کارلو و همکاران (Carollo *et al.*, 2007)، ایزدجو و شفافی بجستان (Izadjoor & Shafai-Bejestan, 2007)، پاگلیارا و همکاران (Pagliara *et al.*, 2008)، گوهری و فرهودی (Gohari & Farhoudi, 2009)، عباسپور و همکاران (Abbaspour *et al.*, 2009)، بدیع‌زادگان و همکاران (Badizadegan *et al.*, 2011)، نژندعلی و همکاران (Najandali *et al.*, 2012) و بزاز و همکاران (Bazzaz *et al.*, 2012) اشاره کرد. یوکسل و همکاران (Yuksel *et al.*, 2004) شباهت بین پیشانی یک موج شکسته و پرش هیدرولیکی را مورد مطالعه قرار دادند. وارول و همکاران (Varol *et al.*, 2009) در مطالعات آزمایشگاهی خود تأثیر استفاده از جت آب را بر مشخصات پرش هیدرولیکی مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که وارد نمودن جت آبی به پرش هیدرولیکی باعث می‌شود که اتلاف انرژی افزایش یابد و همچنین با افزایش دبی جت آبی، مقدار اتلاف انرژی نیز افزایش می‌یابد. دستورانی و همکاران (Dastourani *et al.*, 2016) اثر زاویه برخورد جت مستطیلی به پرش هیدرولیکی را بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که وارد کردن جت به پرش با زاویه‌ای بزرگ‌تر از زاویه بی‌اثر باعث کاهش نسبت اعماق مزدوج، طول پرش و افزایش افت انرژی و نیروهای برشی کف می‌گردد.

حوضچه‌های آرامش استاندارد USBR بر اساس عدد فرود و سرعت آب در پنجه سرریز طبقه‌بندی می‌شوند. چنانچه پرش ضعیف باشد، انرژی مخرب به اندازه‌ای نیست که خطرات قابل توجه داشته باشد، از این‌رو در چنین مواردی موانع اضافی در سر راه

(Hager & Bremen, 1989) و هاگر و برمن (1968) ... مورد بررسی قرار گرفته است (Chow, 1959). امواج سطحی، آشفته بودن جریان و سرعت بالای جریان در پرش هیدرولیکی باعث می‌شود تأسیسات آبی در محل پرش در معرض خطر تخریب و فرسایش قرار بگیرند. به همین دلیل لازم است این تأسیسات در محل پرش مقاوم‌سازی شوند که این موضوع باعث بالا رفتن هزینه‌های ساخت تأسیسات می‌شود. تاکنون تحقیقات بسیاری برای کوچک‌تر کردن ابعاد پرش هیدرولیکی و استهلاک هرچه بیشتر انرژی آن به طرق مختلف از جمله اعمال تغییرات در هندسه کف حوضچه (پله، آستانه)، هندسه پلان (انبساط تدریجی یا ناگهانی)، زبری کف و جداره‌ها (برای افزایش نیروی برشی) و تزریق موضعی جریان صورت گرفته است. فورستر و اسکریند (Forster & Skrinde, 1950) اولین کسانی بودند که مطالعاتی را در خصوص پرش هیدرولیکی در بالآمدگی ناگهانی و پایین افتادگی ناگهانی (پله مثبت و منفی) انجام و نمودارهایی ارائه دادند. اسماعیلی و ابریشمی (Esmaili & Abrishami, 2001) ضمن ارائه میزان تأثیر هم‌زمان شیب معکوس و پله منفی در پرش هیدرولیکی نشان دادند که پله‌های منفی نقش مؤثری در پایداری پرش داشته، موجب افزایش نسبی طول پرش و همچنین عمق ثانویه پرش می‌شوند. یک تحقیق مقدماتی توسط راجاراتنام (Rajaratnam, 1968) نشان داد که اگر بستر کانالی که پرش روی آن تشکیل می‌شود زیر باشد، طول پرش به‌طور قابل ملاحظه‌ای کوتاه‌تر از پرش تشکیل شده روی بسترهای صاف است. تحقیقات بیشتر توسط هاگز و فلاک (Hughes & Flack, 1984) و هاگر (Hager, 1992) کاهش طول پرش و عمق پایاب توسط زبری را تأیید کرده‌اند. از

$$\frac{Q^2}{gA_1} + A_1\bar{y}_1 = \frac{Q^2}{gA_2} + A_2\bar{y}_2 \quad (1)$$

که در مقاطع مستطیلی، رابطه فوق به شکل رابطه ۲ ساده می‌شود:

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

رابطه ۲ که به رابطه بلانگر معروف است با این فرض به‌دست آمده که دبی در امتداد طولی کانال ثابت بوده و هیچ‌گونه دبی به کانال افزوده و یا از آن خارج نمی‌شود، در حالی که در این تحقیق تأثیر کاهش دبی جریان ورودی در امتداد کانال بر مشخصات پرش هیدرولیکی مدنظر بوده است. به عبارت دیگر  $\frac{dQ}{dx} \neq 0$  است.

برای نیل به این منظور با برقرار کردن رابطه اندازه حرکت و کماکان با فرض یکسان بودن دبی ورودی و خروجی از حجم کنترل و همچنین مستطیلی، صاف و بدون شیب بودن کانال، رابطه جدیدی برای نسبت اعماق مزدوج به‌صورت رابطه ۳ به‌دست می‌آید:

$$\frac{\gamma(y_1^2 - y_2^2)}{2} - F_f = \frac{\gamma}{g} \left( \frac{\beta_2 q_2^2}{y_2} - \frac{\beta_1 q_1^2}{y_1} \right) \quad (3)$$

با فرض کوچک  $F_f$  و  $\beta_2 = \beta_1 = 1$ :

$$\frac{y_1^2}{2} + \frac{q_1^2}{gy_1} = \frac{y_2^2}{2} + \frac{q_2^2}{gy_2} \quad (4)$$

از آنجایی که عدد فرود بالادست  $Fr_1^2 = \frac{q_1^2}{gy_1^3}$  و این حقیقت که دبی جریان پایین‌دست را می‌توان

جریان به‌عنوان مستهلک‌کننده انرژی اضافی قرار داده نمی‌شود. در صورتی که عدد فرود زیاد باشد، انرژی جنبشی مخرب زیاد بوده و برای گرفتن انرژی جنبشی موانع لازم است که این موانع همواره در معرض کاویتاسیون و خرابی قرار دارند. در این تحقیق اثر شبکه‌ای از سوراخ‌ها در کف حوضچه به‌عنوان مانع در مسیر جریان بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی ناشی از آن مورد بررسی قرار گرفته است. تفاوت این تحقیق با مطالعات پیشین در این است که چون معمولاً حوضچه‌های آرامش از بتن صاف و نفوذناپذیر ساخته می‌شوند، دبی جریان در حوضچه ثابت و بدون تغییر می‌باشد در حالی که در این حالت به‌دلیل وجود سوراخ‌هایی در کف حوضچه بخشی از جریان ورودی به داخل آن‌ها نفوذ کرده و دبی در امتداد حوضچه کاهش می‌یابد، بنابراین رابطه بلانگر برای نسبت اعماق مزدوج که با فرض ثابت بودن دبی در حوضچه به‌دست آمده قابل استفاده نیست. در این تحقیق با استفاده از اصل اندازه حرکت رابطه ۱ برای محاسبه مستقیم نسبت اعماق مزدوج در این حالت به‌دست آمده و با انجام آزمایش‌هایی اثر کاهش دبی جریان در حوضچه بر مشخصات پرش هیدرولیکی از جمله نسبت اعماق مزدوج، طول پرش و افت انرژی مورد بررسی قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

### الف- تحلیل ریاضی

برای استخراج رابطه کلاسیک حاکم بر پرش هیدرولیکی در کف‌های صاف و غیر شیب‌دار و با استفاده از اصل اندازه حرکت، می‌توان رابطه ذیل را جهت دو مقطع ابتدا و انتهای پرش منظور نمود:

به‌عنوان نسبتی از دبی جریان بالادست  $(q_2 = pq_1)$  (۱۲)  $S_1 = [r + (q^3 + r^2)^{1/2}]^{1/3}$   
 در نظر بگیریم داریم (روابط ۵ و ۶):

(۱۳)  $S_2 = [r - (q^3 + r^2)^{1/2}]^{1/3}$  (۵)  $y_1^2 + 2y_1^2 Fr_1^2 = y_2^2 + 2 \frac{(pq_1)^2}{gy_2}$

بنابراین یا

(۱۴)  $S_1 = \left[ p^2 Fr_1^2 + i \sqrt{\frac{(1 + 2Fr_1^2)^3}{27} - p^4 Fr_1^4} \right]^{1/3}$  (۶)  $1 + 2Fr_1^2 = \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^2 + \frac{2p^2 Fr_1^2}{\left(\frac{y_2}{y_1}\right)}$

که این به رابطه درجه سه ۷ ختم می‌شود:

(۱۵)  $S_2 = \left[ p^2 Fr_1^2 - i \sqrt{\frac{(1 + 2Fr_1^2)^3}{27} - p^4 Fr_1^4} \right]^{1/3}$  (۷)  $\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^3 - (1 + 2Fr_1^2) \left(\frac{y_2}{y_1}\right) + 2p^2 Fr_1^2 = 0$

برای حل این رابطه درجه سه آن را با فرم کلی رابطه درجه سه ۸ مقایسه می‌کنیم:

(۱۶)  $Z_1 = (S_1 + S_2) - \frac{a_2}{3} = S_1 + S_2$  (۸)  $z^3 + a_2 z^2 + a_1 z + a_0 = 0$

ریشه سوم عبارت‌های  $S$  را می‌توان از عدد مختلط که در آن،  $(Z = x + iy)$  به‌دست آورد و به‌صورت روابط ۱۷ و ۱۸ نوشته می‌شود:

(۱۷)  $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x}\right) = \tan^{-1} A^*$  (۹)  $a_1 = -(1 + 2Fr_1^2), a_2 = 0, z = \left(\frac{y_2}{y_1}\right)$   
 $a_0 = 2p^2 Fr_1^2$

سپس:

(۱۸)  $r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{\frac{(1 + 2Fr_1^2)^3}{27}}$  (۱۰)  $q = \frac{a_1}{3} - \frac{a_2^2}{9} = -\frac{(1 - 2Fr_1^2)}{3}$

که در آن، و

(۱۱)  $r = \frac{a_1 a_2 - 3a_0}{6} - \frac{a_2^3}{27} = -p^2 Fr_1^2$

(۱۹)  $A^* = \frac{\sqrt{\frac{(1 + 2Fr_1^2)^3}{27} - p^4 Fr_1^4}}{-p^2 Fr_1^2}$

حال

و برای یک عدد مختلط  $Z^n = r^n e^{i\theta}$  بنابراین  $Z^{\frac{1}{3}} = r^{\frac{1}{3}} e^{\frac{i\theta}{3}}$  و:

$$B = \frac{\sqrt{\frac{(1 + 2Fr_1^2)^3}{27} - p^4 Fr_1^4}}{-p^2 Fr_1^2} \quad (27)$$

$$S_1 = Z^{\frac{1}{3}} = r^{\frac{1}{3}} e^{\frac{i\theta}{3}} \quad (20)$$

شکل ۱ تغییرات نظری نسبت اعماق مزدوج محاسبه شده به وسیله جاگذاری مقادیر مختلف عدد فرود و پارامتر  $p$  را نشان می‌دهد. در این شکل سه مقدار فرضی متفاوت در رابطه ۲۵ برای پارامتر  $p$  به منظور بهتر نشان دادن تغییرات به ازای افزایش عدد فرود جریان، در نظر گرفته شده است. بر اساس این شکل مشاهده می‌شود که میزان وابستگی تغییرات نسبت اعماق مزدوج به افزایش عدد فرود جریان، بیشتر از پارامتر  $p$  - که به صورت معکوس بیانگر مقدار نفوذ جریان از کف مشبک است - می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که هرچه نسبت دبی جریان باقیمانده در انتهای کانال به جریان ورودی اولیه به کانال ( $p = \frac{q_2}{q_1}$ ) به عدد یک نزدیک‌تر باشد (حالت بدون نفوذ یا بستر صاف نفوذناپذیر)، میزان تأثیر آن بر نسبت اعماق مزدوج کمتر خواهد بود. این مطلب در شکل ۲ نیز قابل مشاهده است. شکل ۲ درصد تغییر در نسبت اعماق مزدوج محاسبه شده از رابطه ۲۵ را نسبت به حالتی که نفوذ جریان از کف وجود ندارد ( $p=1$ ) نشان می‌دهد. مطابق این شکل درصد تغییرات مورد انتظار در نسبت اعماق مزدوج، با شیب تندتری با کاهش عدد فرود، در مقایسه با کاهش درصد  $p$ ، افزایش می‌یابد.

$$S_2 = r^{\frac{1}{3}} e^{-\frac{i\theta}{3}} \quad (21)$$

بنابراین ریشه رابطه عبارت است از:

$$Z_1 = S_1 + S_2 = r^{\frac{1}{3}} \left( e^{\frac{i\theta}{3}} + e^{-\frac{i\theta}{3}} \right) \quad (22)$$

اما

$$\cos \theta = \frac{1}{2} \left( e^{\frac{i\theta}{3}} + e^{-\frac{i\theta}{3}} \right) \quad (23)$$

بنابراین ریشه واقعی عبارت است از رابطه ۲۴:

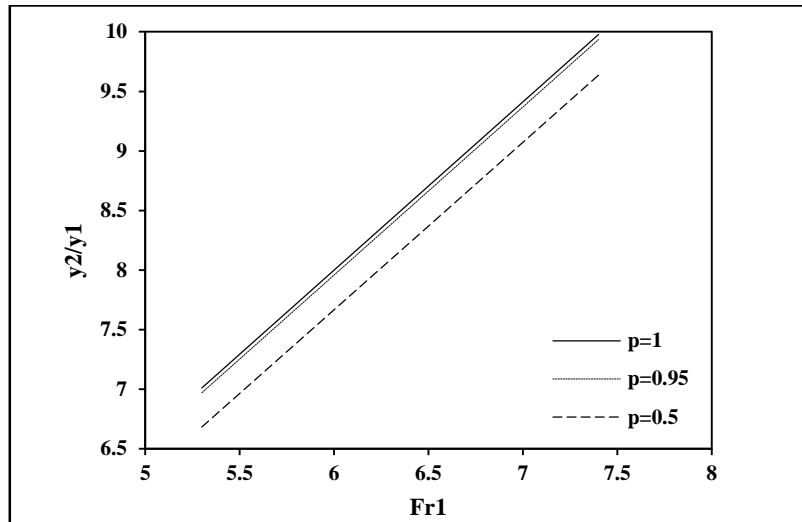
$$Z_1 = r^{\frac{1}{3}} \left[ 2 \cos \left( \frac{\theta}{3} \right) \right] \quad (24)$$

با جایگذاری متغیرهای اصلی خواهیم داشت (رابطه ۲۵):

$$\frac{y_2}{y_1} = 2e^A \cos \left[ \frac{\tan^{-1} B}{3} \right] \quad (25)$$

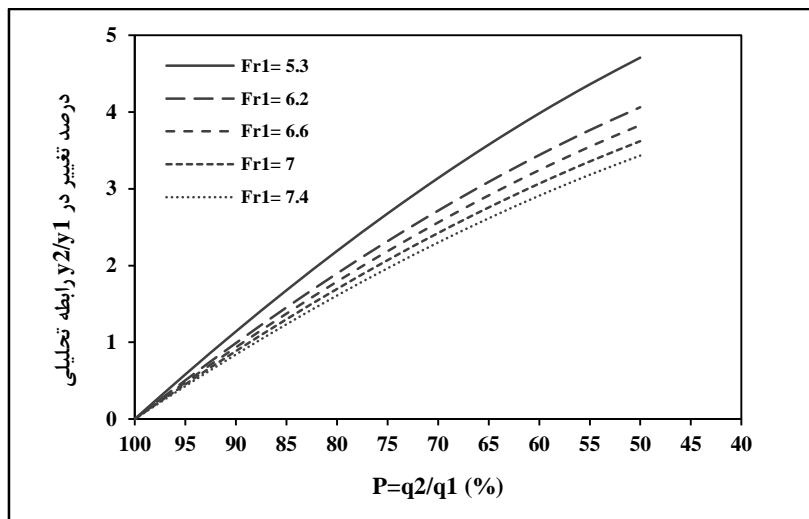
که در آن،

$$A = \frac{\ln \sqrt{\frac{(1 + Fr_1^2)^3}{27}}}{3} \quad (26)$$



شکل ۱- تغییرات نسبت اعماق مزدوج به‌زای عدد فرود در رابطه تحلیلی

Fig.1. Variation of sequent depth ratio versus Froude number in analytical equation



شکل ۲- درصد تغییر در نسبت اعماق مزدوج در مقابل کاهش درصد p

Fig. 2. Percent change in sequent depth versus reduction of p percentage

$$y_2 = f_1(y_1, V_1, g, \rho, \mu, p) \quad (28)$$

که در آن،

$y_1$  = عمق اولیه پرش هیدرولیکی؛  $V_1$  = سرعت اولیه؛  $g$  = شتاب ثقل؛  $\rho$  = چگالی آب؛  $\mu$  = لزجت دینامیکی؛ و  $p$  = نسبت جریان باقیمانده در پایین‌دست به جریان ورودی به کانال ( $p = \frac{q_2}{q_1}$ ) است.

### ب- تحلیل ابعادی

با توجه به مبانی هیدرولیک جریان در کانال مستطیلی و پدیده پرش هیدرولیکی، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در کانال مستطیلی در شرایطی که دبی در امتداد طولی کانال کاهش می‌یابد به عوامل زیر وابسته است (رابطه ۲۸):

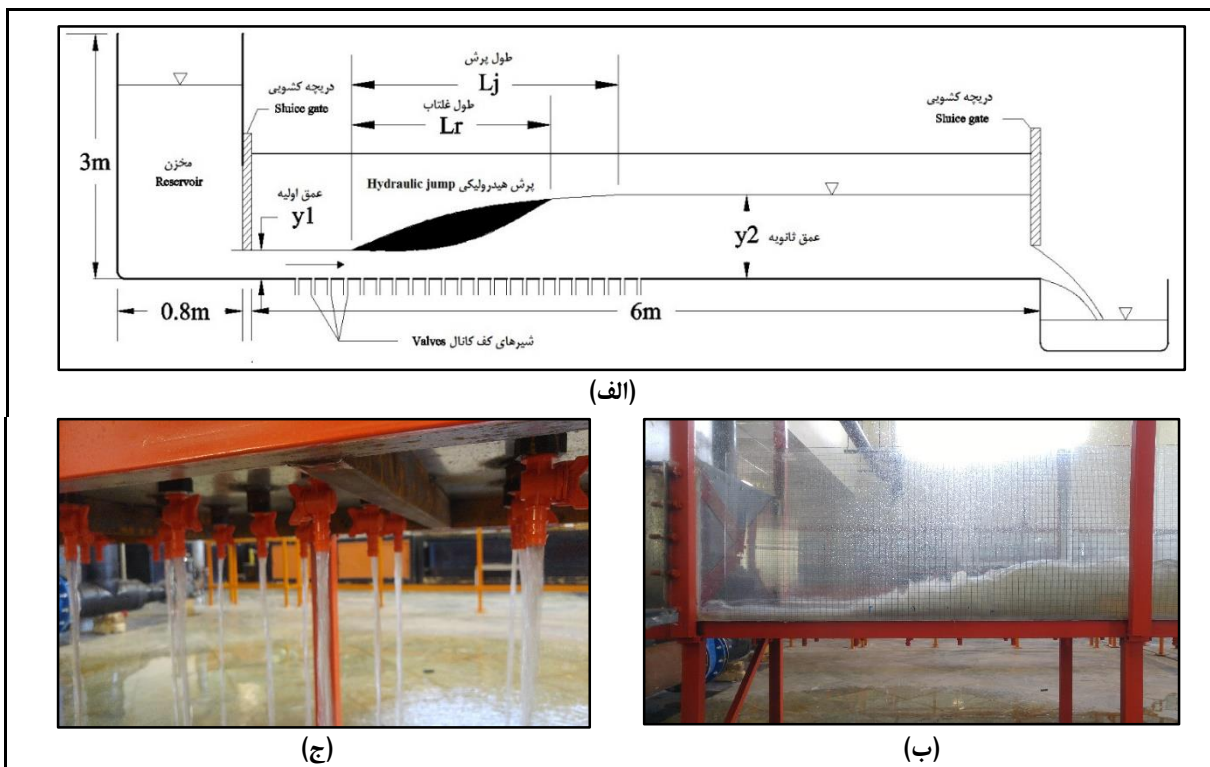
پرش از یک دریچه کشویی قابل کنترل در پایین دست کانال استفاده گردید. همچنین به منظور خروج آب از کف کانال، یک شبکه ۲۰×۲۰ سانتی‌متری از شیرهای پلاستیکی با قطر نازل ۱ سانتی‌متر، مجموعاً به تعداد سی‌وسه عدد در یازده ردیف طولی که در هر ردیف سه عدد شیر قرار داشت، در کف نیمه ابتدایی کانال تعبیه شد. دبی مورد نیاز آزمایش‌ها از طریق سیستم آبرسانی آزمایشگاه هیدرولیک که مجهز به پمپ سانتریفیوژ با توان آبدهی ۱۰۰ لیتر بر ثانیه و اینورتور برای تنظیم دور پمپ بود، تأمین می‌گردید. در شکل (۳-الف) طرح شماتیکی از کانال مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است. در شکل (۳-ب و ج) نیز به ترتیب نمایی از پرش هیدرولیکی تشکیل شده در کانال و نحوه خروج آب از شیرهای متصل به سوراخ‌های کف کانال مشاهده می‌شود.

با استفاده از تئوری باکینگهام و صرف‌نظر از اثر لزجت به دلیل آشفتگی جریان، عوامل بدون بعد به صورت زیر قابل استخراج است.

$$\frac{y_2}{y_1} = f_2 \left( Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy}}, p \right) \quad (29)$$

### ج- روش انجام آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها یک کانال مستطیلی به طول ۶ متر و عرض ۸۰ سانتی‌متر که دارای ارتفاع جداره ۸۰ سانتی‌متر بود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد ساخته شد. برای ایجاد جریان فوق بحرانی یک مخزن تأمین هد به طول و عرض ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳ متر، ساخته‌شده از آهن گالوانیزه، در ابتدای کانال نصب گردید. جهت تنظیم عمق پایاب و تثبیت موقعیت



شکل ۳- الف) طرح شماتیکی از کانال (ب) کانال آزمایشگاهی (ج) شیرهای تعبیه‌شده در کف کانال

Fig. 3. A) Schematic of the flume, B) Laboratory flume, C) Valves embedded in the flume bed

### نتایج و بحث

برای بررسی میزان تأثیر کاهش جریان کانال بر مشخصات پرش هیدرولیکی، نسبت اعماق مزدوج حاصل از آزمایش‌های روی بستر سوراخ‌دار با بستر صاف و نتایج به‌دست آمده از فرمول تحلیلی مقایسه شد. همچنین طول نسبی پرش هیدرولیکی و تغییرات افت انرژی نسبی پرش نیز مورد ارزیابی قرار گرفت.

#### الف - نسبت اعماق مزدوج

با توجه به رابطه ۲۹ می‌توان تغییرات نسبت اعماق مزدوج را تابعی از عدد فرود در مقطع اولیه پرش و نسبت دبی جریان باقیمانده در انتهای کانال به جریان ورودی به کانال ( $p$ ) دانست. در شکل ۴ تغییرات نسبت اعماق مزدوج در مقابل عدد فرود نمایش داده شده است. نقاط ستاره مانند نشان‌دهنده مقادیر محاسبه شده از رابطه بلانگر می‌باشد. این رابطه تغییرات نسبت اعماق مزدوج را نسبت به عدد فرود بر روی بستر صاف نشان می‌دهد. نسبت اعماق مزدوج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق نیز روی بستر صاف (پرش کلاسیک) نشان داده شده‌اند. خطوط منقطع آبی رنگ در نمودار، نتایج محاسبه شده از رابطه ۲۵ ارائه شده در این تحقیق می‌باشد و مقادیر نسبت اعماق مزدوج را به‌صورت مستقیم با در اختیار داشتن عدد فرود در مقطع اولیه جریان و همچنین نسبت جریان باقیمانده در پایین دست به‌دست می‌دهد که به‌دلیل کوچک بودن مقدار دبی خروجی از کف کانال به‌نظر می‌رسد که بر هم منطبق شده باشند اما در واقع

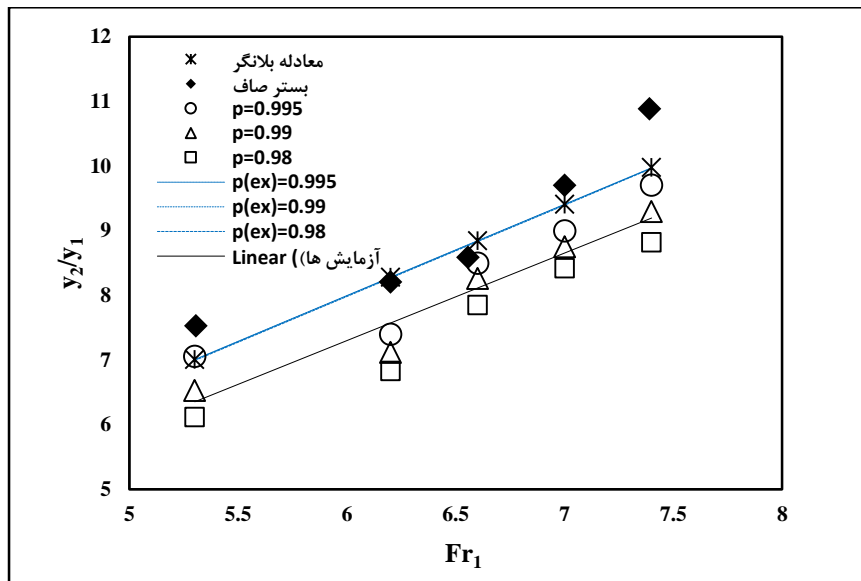
برای اندازه‌گیری عمق جریان از اشل‌های شفاف مدرج با دقت ۱ میلی‌متر (شکل ۳-ب) نصب شده روی جداره شیشه‌ای کانال استفاده شد. بازشدگی دریچه کشویی ابتدای کانال برای ایجاد جریان فوق بحرانی به مقدار  $1/5$  سانتی‌متر به‌طور ثابت تنظیم گردید. بازه اعداد فرود مورد استفاده در این تحقیق برای تشکیل پرش پایدار در کانال در محدوده  $5/3$  تا  $7/4$  با توجه به دور اینورتور نصب شده روی پمپ تعیین شد. همچنین با اندازه‌گیری میانگین مقدار دبی خروجی از سوراخ‌های کف کانال در زیر قسمت زیربحرانی پرش به روش حجمی، مشخص شد که نسبت دبی باقیمانده در انتهای کانال به دبی ورودی (پارامتر  $p$ ) برای بازه اعداد فرود مورد آزمایش بین  $0/5$  تا  $2$  درصد قرار دارد. از یک دریچه کشویی در انتهای کانال برای تنظیم موقعیت پرش استفاده شد. روش انجام آزمایش‌ها به این‌صورت بود که پس از روشن کردن پمپ و تنظیم دور اینورتور برای ایجاد عدد فرود مورد نظر در کانال، جریان فوق بحرانی با عبور از زیر دریچه ورودی برقرار شده و با استفاده از دریچه انتهایی پرش هیدرولیکی در کانال تشکیل می‌گردید. پس از تثبیت پرش در موقعیت تعیین شده به‌وسیله دریچه انتهایی، با باز کردن ردیف شیرهای قرار گرفته در زیر ناحیه زیربحرانی پرش، دبی خروجی از شیرها به روش حجمی اندازه‌گیری شده و نسبت دبی باقیمانده در پایین‌دست به دبی ورودی محاسبه می‌شد و سپس پارامترهای هیدرولیکی از جمله عمق اولیه، عمق ثانویه و طول پرش برای هر آزمایش برداشت می‌گردید.



در زیرخط مربوط به رابطه بلانگر قرار گرفته‌اند. این امر نشان می‌دهد که کاهش دبی جریان در امتداد کانال سبب کاهش عمق ثانویه جریان و در نتیجه کاهش نسبت اعماق مزدوج می‌شود و هرچه مقدار دبی خروجی از کانال در اعداد فرود یکسان بیشتر شود ( $p$  کاهش یابد)، نسبت اعماق مزدوج کاهش بیشتری خواهد داشت.

نتایج حاصل نشان می‌دهد که حداکثر مقدار کاهش جریان کانال در این تحقیق به میزان دو درصد، سبب کاهش نسبت اعماق مزدوج به میزان ۱۹ درصد نسبت به پرش کلاسیک روی بستر صاف و حدود ۱۲ درصد نسبت به مقدار محاسبه شده از رابطه تحلیلی می‌شود.

تغییرات آنها مشابه شکل ۱ است. همچنین این خطوط در زیر نقاط مربوط به رابطه بلانگر قرار گرفته‌اند که این امر به دلیل لحاظ کردن مقدار دبی خروجی از کف در رابطه ۲۵ می‌باشد، بنابراین نسبت اعماق مزدوج را در مقایسه با رابطه بلانگر نزدیک‌تر به مقادیر واقعی به دست آمده برای نسبت اعماق مزدوج از آزمایش‌ها تخمین می‌زنند. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود نتایج به دست آمده از آزمایش‌های صورت گرفته روی بستر صاف با رابطه بلانگر تطابق خوبی داشته و با افزایش عدد فرود جریان نسبت اعماق مزدوج افزایش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود که مقادیر به دست آمده برای نسبت اعماق مزدوج در آزمایشگاه



شکل ۴- تغییرات نسبت اعماق مزدوج به‌ازای اعداد فرود اولیه  
 Fig. 4. Variation of sequent depth versus initial Froude number

نقاط خاکستری نشان داده شده در نمودار نسبت اعماق مزدوج به دست آمده از فرمول تحلیلی می‌باشند که تقریباً روی یکدیگر و با اختلاف کمی در زیرخط مربوط به رابطه بلانگر قرار گرفته‌اند که

رابطه ۱۳ تغییرات نسبت اعماق مزدوج به عدد فرود را در تحقیق حاضر با ضریب رگرسیون ۸۶/۶ نشان می‌دهد.

$$\frac{y_2}{y_1} = 1.3503Fr_1 - 0.7995, R^2 = 0.866 \quad (28)$$

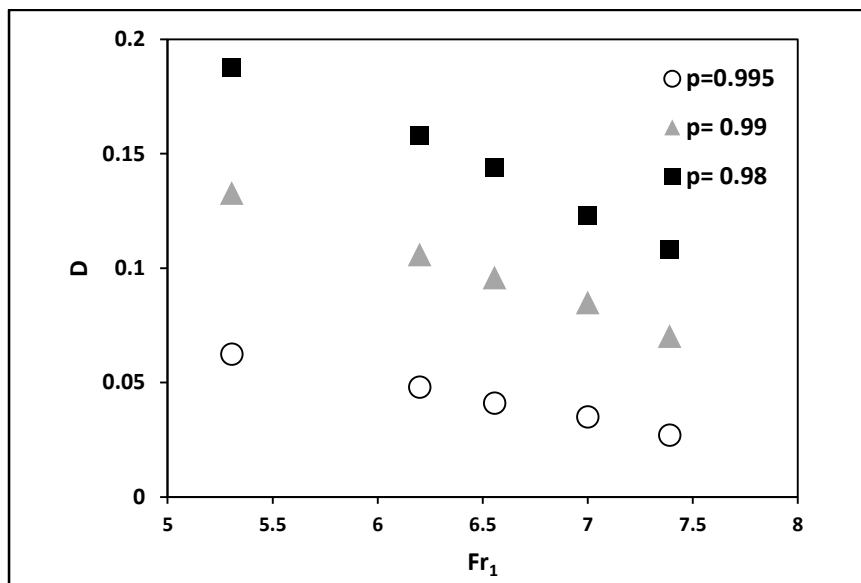
پرش هیدرولیکی در حالت کاهش دبی جریان در امتداد کانال نشان داده شده است. اندازه ضریب کاهش عمق ثانویه بین ۰/۰۳ و ۰/۱۹ است که بیشترین مقدار آن در عدد فرود ۵/۳ و در بیشترین مقدار کاهش دبی کانال اتفاق می‌افتد. ملاحظه می‌شود که با افزایش عدد فرود جریان، پارامتر کاهش عمق نسبی کاهش یافته که این امر به علت افزایش سرعت جریان در کانال و کاهش دبی خروجی از شیرها می‌باشد.

این امر به علت کم بودن نسبت جریان خروجی از کف به جریان ورودی می‌باشد.

ایند و راجاراتنام (Ead & Rajaratnam, 2001) پارامتر کاهش عمق نسبی را به صورت رابطه ۲۹ معرفی نمودند:

$$D = \frac{y_2^* - y_2}{y_2^*} \quad (29)$$

در این رابطه  $y_2^*$  عمق ثانویه پرش روی بستر صاف می‌باشد. در شکل ۵ مقدار کاهش عمق نسبی

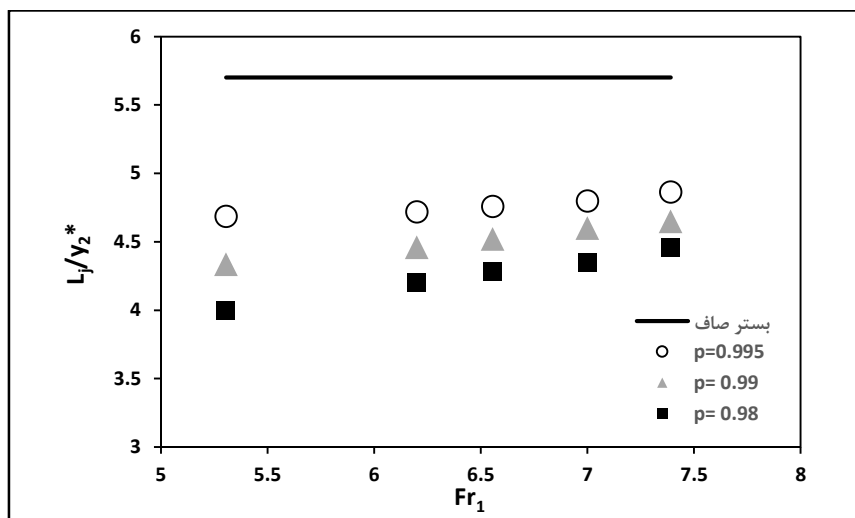


شکل ۵- تغییرات عمق نسبی پرش هیدرولیکی به ازای اعداد فرود اولیه  
 Fig. 5. Variation of relative depth of hydraulic jump versus initial Froude number

افزایش عدد فرود نشان داده شده است که در آن  $y_2^*$  عمق ثانویه پرش در بستر صاف و  $Lr$  طول پرش است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود مقدار  $\frac{Lr}{y_2^*}$  در بستر صاف برابر ۵/۷ است ولی مقادیر آن برای حالت کاهش دبی جریان از کانال کمتر از ۵/۷ می‌باشد که نشان‌دهنده تأثیر کاهش دبی جریان در کوتاه‌تر شدن طول پرش است.

### ب- طول نسبی پرش هیدرولیکی

طول پرش از جمله پارامترهای مهم در طراحی حوضچه‌های آرامش می‌باشد. فاصله افقی بین پنجه پرش تا محلی که سطح آب بلافاصله پس از آخرین موج غلطابی تقریباً برابر با ارتفاع پایاب بوده و افقی می‌شود را طول پرش هیدرولیکی می‌نامند. در شکل ۶ تغییرات طول بی‌بعد شده پرش  $\frac{Lr}{y_2^*}$  نسبت به



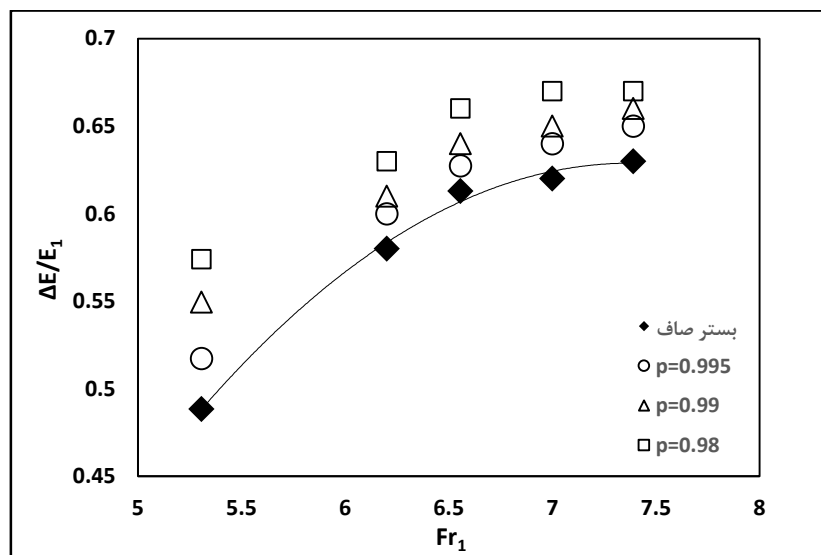
شکل ۶- تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی به‌ازای اعداد فرود اولیه

Fig. 6. Variation of relative length of hydraulic jump versus initial Froude number

و انتهای پرش ( $E_2$ ) می‌باشد. در شکل ۷ تغییرات افت انرژی نسبی در مقابل عدد فرود نشان داده شده است.

### ج- افت انرژی نسبی

افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی عبارت است از  $\frac{\Delta E}{E_1}$  که اختلاف انرژی مخصوص در ابتدا ( $E_1$ )



شکل ۷- تغییرات افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی به‌ازای اعداد فرود اولیه

Fig. 7. Variation of relative energy loss of hydraulic jump versus initial Froude number

نمودار بیشترین مقدار اتلاف انرژی نسبت به بستر صاف در عدد فرود ۵/۳ رخ می‌دهد که حدوداً برابر ۱۵ درصد می‌باشد.

مشاهده می‌شود که با افزایش عدد فرود افت انرژی نسب افزایش یافته است. به‌طوری‌که بیشترین مقدار آن در عدد فرود ۷/۵ می‌باشد. همچنین مطابق

### نتیجه‌گیری

به‌طوری‌که کاهش دو درصد از جریان کانال منجر به کاهش نسبت اعماق مزدوج به‌میزان ۱۹ درصد نسبت به پرش کلاسیک روی بستر صاف و ۱۲ درصد نسبت به مقادیر محاسبه شده از رابطه تحلیلی شده که نشان از تأثیر قابل توجه کاهش دبی بر نسبت اعماق مزدوج می‌باشد. طول پرش نیز در این حالت به‌میزان ۲۹ درصد نسبت به بستر صاف کاهش نشان داد.

همچنین نتایج نشان داد که افزایش دبی جریان خروجی از کانال میزان سبب افزایش افت انرژی شده و افزایش عدد فرود جریان نیز سبب تشدید این روند می‌شود به‌طوری‌که افت انرژی نسبی در بیشترین مقدار خود در این تحقیق با کاهش دو درصد از دبی جریان کانال، به‌میزان ۱۵ درصد نسبت به بستر صاف افزایش یافت.

در تحقیق حاضر اثر کاهش دبی جریان در کانال بر مشخصات پرش هیدرولیکی از دیدگاه تحلیلی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا با توسعه رابطه اندازه حرکت و با در نظر گرفتن فرضیات ساده‌کننده، رابطه ۲۵ برای به‌دست آوردن نسبت اعماق مزدوج به‌صورت مستقیم برای حالتی که دبی جریان در امتداد طولی کانال کاهش می‌یابد به‌دست آمد. سپس در آزمایشگاه و با اعمال کاهش دبی جریان در امتداد کانال، عمق اولیه، عمق ثانویه و طول پرش اندازه‌گیری شده، نسبت اعماق مزدوج محاسبه و با نتایج حاصل از پرش کلاسیک روی بستر صاف مقایسه شد.

نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که کاهش دبی جریان در کانال سبب کاهش عمق ثانویه پرش و به‌تبع آن کاهش نسبت اعماق مزدوج می‌شود.

### مراجع

- Abbaspour, A., Dalir A. M., Farsadizadeh, D. and Sadraddini, A. A. 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *J. Hydroenviron. Res.* 3, 109-117.
- Badizadegan, R., Esmaili, K., Maghrebi, M. F. and Saneie, M. 2011. Hydraulic jump properties in irrigation canals with corrugated bed. *J. Water Soil.* 25(3): 676-687. (in Persian)
- Bazzaz, M., Ghorbani, B. and Eskini, M. 2012. Studying the changes of hydraulic jump properties on rough beds relative to roughness wavelengths. *J. Hydraul.* 7(3): 33-42. (in Persian)
- Carollo, F. G., Fero, V. and Pampalone, V. 2007. Hydraulic jumps on rough beds. *J. Hydraul. Eng.* 133(9): 989-999.
- Chow, V. T. 1959. *Open-Channel Hydraulics.* McGraw-Hill.
- Dastourani, M., Esmaili, K. and Khodashenas, S. R. 2016. The impact of water rectangular jet angle on the characteristics of hydraulic jump. *J. Water Soil Conserv.* 23(3): 225-238. (in Persian)
- Ead, S. A. and Rajaratnam, N. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *J. Hydraul. Eng. ASCE.* 128(7): 656-663.
- Esmaili, K. and Abrishami, J. 2001. Hydraulic jump over negative slopes with negative steps. *Jame.* 19(2): 97-110. (in Persian)
- Farhodi, J. *Flow in Open Streams (Translation).* 1993. Orumiyeh University Pub.

- Forster, J. W. and Skrinde, R. A. 1950. Control of the hydraulic jump by sills. Transaction ASCE. 115, 973-987.
- Gohari, A. and Farhoudi J. 2009. The characteristics of hydraulic jump on rough bed stilling basins. 33<sup>rd</sup> IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment, Vancouver, Aug. 9-14. British Columbia.
- Hager, W. H. and Bremen, R. 1989. Classical Hydraulic Jump: Sequent Depths Ratio. J. Hydraul. Res. 27(5): 565-585.
- Hager, W. H. 1992. Energy Dissipaters and Hydraulic Jump. Kluwer Academic, Dordrecht, the Netherlands.
- Hosseini, S. M. and Abrishami, J. 1999. Open Channel Hydraulics. Second Ed. Astan Quds Razavi Pub. Mahhad, Iran. (in Persian)
- Hughes, W. C. and Flack, J. E. 1984. Hydraulic jump properties over a rough bed. J. Hydraul. Eng. 110(12): 1755-1771.
- Izadjoo, F. and Shafai-Bajestan, M. 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. J. Appl. Sci. 7(8):1164-1169.
- Najandali, A., Esmaili, K. and Farhoudi, J. 2012. The effect of triangular blocks on the characteristics of hydraulic jump. J. Water Soil. 26(2): 282-289. (in Persian)
- Pagliara, S., Lotti, I. and Palermo, M. 2008. Hydraulic jump on rough bed of stream rehabilitation structures. J. Hydroenviron. Res. 2, 29-38.
- Peterka, A. J. 1958. Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators. US Department Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph. (Appeared a LSO as 7<sup>th</sup> Printing in 1983).
- Rajaratnam, N. 1968. Hydraulic jumps on rough beds. Trans. Eng. Inst. Canada. 11(A-2): 1-8.
- Tokyay, N. D. 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. In Impacts of Global Climate Change Conference, EWRI. May 15-19. Anchorage, Alaska, USA.
- Varol, F. A., Cevik, E. and Yüksel, Y. 2009. The Effect of water jet on the hydraulic jump. 13<sup>th</sup> International Water Technology Conference, IWTC. March 12. Hurghada, Egypt.
- Yüksel, Y., Günal, M., Bostan, T., Cevik, E. and Celikoglu, Y. 2004. The influence of impinging jets on hydraulic jumps. Process of the Institution of Civil Engineering, Water Manage. 157, 63-76.

## **Investigating the Characteristics of the Hydraulic Jump in a Stilling Basin with Netted Perforated Bed**

**N. Akbari, K. Esmaili\* and S. Khodashenas**

\* Corresponding Author: Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: kazem.esmaili@gmail.com

Received: 1 May 2018, Accepted: 4 September 2018

### **Abstract**

In this research, the effects of a network of holes in the bottom of the stilling basin on the main properties of the hydraulic jump, such as the sequent depths ratio and the jump length, have been studied. First, by mathematical analysis and expansion of the momentum equation, an equation for the direct calculation of sequent depths ratio was obtained while flow rate in the channel decreased. Using a laboratory flume, equipped with a network of valves under the bed, a series of experiments were conducted in order to study the behavior and characteristics of hydraulic jump, the results of which were compared with the results obtained from classical hydraulic jump on a smooth bed. The Froude number range in this research was between 5.3 and 7.4 and the ratio of the remaining flow at downstream to incoming flow to the channel was between 0.98 to 0.995. Results showed that reducing the flow rate up to two percent in the channel caused decreasing sequent depths ratio by 19 and 12 percent, compared to classical jump and analytical equation, respectively; the jump length decreased by 29 percent, compared to the classical jump.

**Keywords:** Decreasing Flow, Momentum Equation, Sequent Depth Ratio, Supercritical Flow