

# بررسی آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با آستانه پلکانی

افشار مینایی گیگلو<sup>۱</sup>، مسعود قدسیان<sup>۲\*</sup>، مجتبی مهرآیین<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد هیدرولیک، دانشکده عمران و محیط زیست و پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی

ghods@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [توسط مجله تکمیل میشود]

تاریخ دریافت: [توسط مجله تکمیل میشود]

**چکیده** - پرش هیدرولیکی جریان متغیر سریعی است که در آن جریان فوق بحرانی به جریان زیر بحرانی تبدیل می‌شود. از حوضچه‌های آرامش معمولاً در پایین دست سازه‌هایی مانند، تنداب‌ها، دریچه‌ها، و... برای کنترل پرش هیدرولیکی استفاده می‌شود. بلوک‌های میانی، پله‌های مثبت و منفی و آستانه انتهایی ضمایمی است که معمولاً برای استقرار پرش هیدرولیکی درون حوضچه آرامش استفاده می‌شوند. در این پژوهش تشکیل پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با آستانه پلکانی بررسی شده است. آزمایشات درون کانالی با عرض ۶۰ سانتی متر، ارتفاع ۱ متر و طول ۱۲ متر انجام شده است. در این آزمایش‌ها تاثیر آستانه بر خصوصیات پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفته است. اثر پارامترهای مهمی چون عمق پایاب، هندسه آستانه و موقعیت قرارگیری آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. پرش‌های شکل گرفته در حوضچه با آستانه پلکانی به پنج نوع A، B، C، D و E تقسیم بندی شده اند. پرش در تبدیل از نوع A به B و نهایتاً C کمینه، بتدریج از حوضچه خارج می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد در شرایط یکسان جریان ورودی آستانه پلکانی در مقایسه با آستانه شیبدار در تثبیت پرش هیدرولیکی درون حوضچه‌ی آرامش تاثیر بیشتری داشته و با افزایش تعداد پله‌های آستانه از ۲ به ۳ طول بیشتری از پرش هیدرولیکی بیرون از حوضچه‌ی آرامش خواهد بود. در انتها با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده، روابطی برای محاسبه میزان خروج پرش از حوضچه ارائه شده است.

**واژگان کلیدی:** پرش هیدرولیکی، مطالعه آزمایشگاهی، آستانه پلکانی، حوضچه آرامش

## ۱- مقدمه

گسترده به وسیله‌ی پژوهشگران مختلف بررسی شده است. با تعریف  $U_1$  و  $y_1$  به عنوان عمق و سرعت جریان فوق بحرانی بالادست پرش و  $Fr_1 = U_1 / \sqrt{gy_1}$  عدد فرود، که در آن  $g$  شتاب ثقل است، عمق زیر بحرانی یا عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کلاسیک ( $y_2^*$ ) از رابطه معروف بلانگر به دست می‌آید.

$$y_2^* = \frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1) \quad (1)$$

پترکا مطالعات گسترده‌ای روی پرش هیدرولیکی و چگونگی کنترل آن بر مبنای عدد فرود جریان فوق بحرانی انجام داد [۱].

پرش هیدرولیکی به صورت گسترده به عنوان مستهلک‌کننده انرژی در سازه‌های هیدرولیکی استفاده می‌شود. در سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی برای جلوگیری از خروج پرش و استقرار آن در درون حوضچه آرامش، حتی در صورتی که عمق پایاب از عمق ثانویه پرش آزاد کمتر باشد، از بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی استفاده می‌شود [۱]. ساده‌ترین و معروف‌ترین نوع پرش هیدرولیکی، پرش روی کف افقی صاف درون کانال مستطیلی است (پرش هیدرولیکی کلاسیک)، که به صورت

استفاده شده است. حوضچه در پایین دست سریز اوجی قرار دارد که دبی عبوری از روی آن به وسیله ۷ دریچه کشویی کنترل می‌شود. عملکرد این حوضچه آرامش چه از لحاظ استهلاک انرژی و چه از لحاظ فرسایش پایین دست بسیار رضایت بخش بوده است [۷].

در سد گتوند علیا و سیاه بیشه نیز از حوضچه‌های آرامش با آستانه انتهایی پلکانی استفاده شده است. آزمایش‌های انجام شده روی طرح اصلاح شده حوضچه، عملکرد بسیار مطلوب آستانه پلکانی در حفظ پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه را نشان داد؛ به طوری که در تمامی دبی‌های آزمایش شده، خروج پرش به بیرون از حوضچه آرامش مشاهده نشد [۸].

عبدالعظیم و یاسر [۹] تاثیر شکل حوضچه آرامش روی پرش هیدرولیکی مستغرق را بررسی کردند. نتایج پژوهش‌های ایشان نشان داد که حوضچه با آستانه پله‌ای مثبت در انتها، کمترین طول پرش مستغرق را ایجاد می‌کند.

در داخل کشور نیز پژوهش‌هایی در مورد تاثیر پله‌های مثبت و منفی بر عملکرد پرش هیدرولیکی انجام شده است که از جمله می‌توان به پژوهش‌های اسماعیلی و ابریشمی (۱۳۷۹ و ۱۳۸۰) اشاره کرد [10, 11]. این پژوهشگران با مطالعات آزمایشگاهی تاثیر پله‌های مثبت و منفی در حوضچه آرامش با شیب معکوس را بررسی کردند و نمودارهایی برای دستیابی به الگوهای برای بهترین ارتفاع مناسب پله ارائه دادند.

با توجه به عملکرد مناسب آستانه انتهایی پلکانی در سد نیمرود و گتوند علیا و با وجود مطالعات زیادی که روی پرش هیدرولیکی انجام شده است تنها در پژوهش عبدالعظیم و یاسر [۹]، اثر کارگذاری آستانه پله‌ای در انتهای حوضچه آرامش برای پرش‌های مستغرق بررسی شده است. بنابراین نیاز است که پژوهش جامع‌تر روی این نوع حوضچه آرامش با هندسه‌های مختلف آستانه انجام شود تا تاثیر تغییرات هندسه آستانه بر پرش هیدرولیکی مشخص، و انواع پرش‌های تشکیل شده درون این نوع حوضچه بررسی شود.

اوهتسو و یاسودا پرش هیدرولیکی روی پله معکوس (منفی) را مورد بررسی قرار دادند [۲]. ایشان با بررسی اثر عمق پایاب، عدد فرود اولیه و ارتفاع پله بر نوع پرش، پرش هیدرولیکی را به ۶ دسته پرش نوع A، پرش حد واسط، پرش با حداکثر موج، پرش با امواج قطاری<sup>۱</sup>، پرش نوع B و پرش حدی تقسیم‌بندی کردند. موسی و همکاران نیز در همین راستا، با دامنه وسیعتری از پارامترهای موثر، انواع پرش هیدرولیکی روی پله معکوس را مورد بررسی قرار داد [۳]. آنان، ۱۱ نمودار بر حسب عدد فرود و عمق پایاب ارائه کردند و پرش هیدرولیکی را به ۵ دسته پرش نوع A، پرش موج، پرش با موج قطاری، پرش نوع B و پرش نوع B کمینه تقسیم‌بندی کردند. هگر و برتز پرش هیدرولیکی بر روی پله مثبت را به چهار نوع A، B، جریان موج هواده‌ی شده و هواده‌ی نشده تقسیم‌بندی کردند [۴].

هگر و لی پرش هیدرولیکی روی آستانه قائم را به پنج نوع پرش نوع A، پرش B، پرش B کمینه<sup>۲</sup>، پرش C و پرش موج تقسیم کرد [۵]. ایشان رابطه ذیر را برای محاسبه میزان خروج پرش از حوضچه معرفی نمودند.

$$1 - \Lambda = 1.43 \sqrt{\frac{\Delta Y_s - 0.048 S^{2.86}}{1.52 S}} \quad (2)$$

که در این رابطه S ارتفاع نسبی آستانه قائم  $(S = s/y_1)$ ،  $\Delta Y_s$  کاهش عمق پایاب در قیاس با پرش کلاسیک،  $(\Delta Y_s = Y^* - Y)$  که Y\* نسبت اعماق متناظر پرش کلاسیک است که از رابطه (۱) به دست می‌آید و Y برابر با نسبت اعماق متناظر پرش روی آستانه قائم است،  $\Lambda$  میزان خروج پرش از حوضچه آرامش و  $L_r^*$  نیز طول سطح غلطابی پرش کلاسیک است که از رابطه پیشنهادی شده هگر و همکاران [۶] به صورت زیر محاسبه می‌شود، که در آن x فاصله پاشنه پرش از آستانه است.

$$\lambda_r = L_r^* / y_1 = -12 + 160 \tanh(Fr_1 / 20) \quad (3)$$

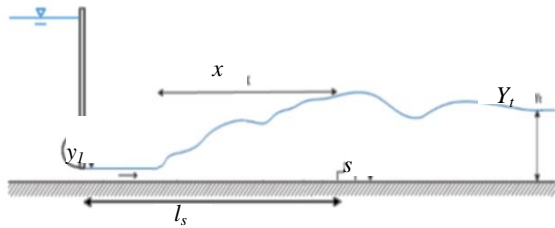
به نقل از مرجع ۷ برای اولین بار در سال ۱۹۵۷ در سد نیمرود (آرکانزاس)<sup>۳</sup> از حوضچه‌های آرامش با آستانه انتهایی پلکانی

1 Wave train

2 Min B

3 Nimrod dam (Arkansas)

4 Positive multi step



شکل (۱) نمای شماتیک از مدل آزمایشگاهی

### ۳- تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس در کانالی به طول ۱۲ متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱ متر انجام شد. دیواره‌های کانال از جنس شیشه و بستر آن از سنگ صاف ساخته شده است. دبی مورد نیاز به وسیله پمپ با دبی بیشینه ۱۲۰ لیتر بر ثانیه تامین می‌شود. در ابتدای این فلوم مخزنی به ارتفاع ۱/۸ متر برای تامین هد مورد نیاز پشت دریچه کشویی ساخته شد. جریان فوق بحرانی با استفاده از دریچه کشویی قابل تنظیم ایجاد شده است. جریان فوق بحرانی از زیر دریچه کشویی به صورت افقی وارد حوضچه آرامش شده است. در انتهای حوضچه آرامش، آستانه پله‌ای نصب شده است، همچنین در انتهای فلوم دریچه پروانه‌ای برای تنظیم عمق پایاب تعبیه شده است.

برای ایجاد جریان فوق بحرانی یکنواخت بدون فرورفتگی در سطح آب، یک نیم استوانه به قطر ۲۰ سانتی متر به لبه بالادست دریچه نصب گردید (شکل ۱) تا لبه‌های دریچه منطبق بر خطوط جریان باشد (مانند گزارش برخی پژوهشگران از قبیل اید و راجاراتنام [15]، حبیب‌زاده و همکاران [14]، لیو و همکاران [16]). اندازه‌گیری‌های عمق جریان بعد از بازشدگی نشان داد که با استفاده از این نیم استوانه بدین طریق مقطع تنگ‌شدگی روی سطح جریان بعد از دریچه حذف شد و عمق اولیه پرش (عمق جریان فوق بحرانی) با بازشدگی دریچه برابر است و عمق جریان بعد از دریچه تا شروع پرش تقریباً ثابت می‌ماند.

برای اندازه‌گیری دبی از دبی سنج اولتراسونیک Fluxus ADM 6725 استفاده شده است. عمق جریان با استفاده از عمق سنج<sup>۲</sup>

### ۲- آنالیز ابعادی

پرش هیدرولیکی تشکیل شده روی آستانه پلکانی تابع پارامترهای ذیل است.

$$\Phi = f(u_1, y_1, y_t, y_2^*, s, L_E, \mu, g, \rho, SN) \quad (4)$$

در این رابطه SN تعداد پله آستانه،  $y_2^*$  عمق ثانویه پرش کلاسیک (به دست آمده از رابطه (۱))،  $\mu$  گرانیوی دینامیک سیال،  $g$  شتاب ثقل،  $\rho$  چگالی جرمی سیال و  $\Phi$  خصوصیات پرش هیدرولیکی است بقیه پارامترهای موجود در رابطه (۴) در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. آنالیز ابعادی به روش  $\pi$  باکینگهام<sup>۱</sup> نشان می‌دهد خصوصیات پرش هیدرولیکی می‌تواند بر حسب پارامترهای بی‌بعد زیر بیان شود.

$$\Phi = f\left(Fr_1, Re, \frac{s}{y_1}, \frac{y_t}{y_2^*}, \frac{L_E}{y_1}, SN\right) \quad (5)$$

که در این رابطه:

$Fr_1$  عدد فرود پرش هیدرولیکی در مقطع فوق بحرانی

$Re$  عدد رینولدز پرش هیدرولیکی در مقطع فوق بحرانی

$\frac{s}{y_1}$  ارتفاع نسبی آستانه ( $s$  ارتفاع آستانه و  $y_1$  عمق اولیه)

$\frac{y_t}{y_2^*}$  عمق نسبی پایاب

$\frac{L_E}{y_1}$  فاصله نسبی آستانه از دریچه بالادست

با توجه به اینکه مقدار عدد رینولدز در این تحقیق در محدوده  $98000 < Re < 128000$  قرار داشته است، می‌توان از اثر گرانیوی صرفنظر کرد (هگر و برمن [۱۰]، هلر [۱۳] و راجاراتنام و همکاران [۱۴]). همچنین با انجام آزمایشات اولیه برای هر عدد فرود و تعیین موقعیت مناسب (طول سطح غلطابی پرش کلاسیک)، فاصله نسبی در تمامی آزمایش‌ها ۴ برابر عمق اولیه ( $L_E = 48y_1$ ) در نظر گرفته شد. با چشم پوشی از اثر رینولدز و ثابت بودن موقعیت نسبی پله‌ها، تعداد پارامترهای بی‌بعد به ۴ عدد کاهش خواهد یافت.

$$\Phi = f\left(Fr_1, \frac{s}{y_1}, \frac{y_t}{y_1}, SN\right) \quad (6)$$

اعداد بدون بعد در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱) مقادیر پارامترهای بی بعد

مقادیر	علامت	پارامتر
$1/11-7/9-5/7-2/6$	$Fr_1$	عدد فرود اولیه
$-94/0-9/0-85/0$ $98/0$	$\frac{y_t}{y_2^*}$	عمق نسبی پایاب
$3-4/2-2$	$S = \frac{s}{y_1}$	ارتفاع نسبی آستانه
$3-2$	SN	تعداد پله

#### ۴- تحلیل نتایج

##### ۴-۱- انواع پرش هیدرولیکی

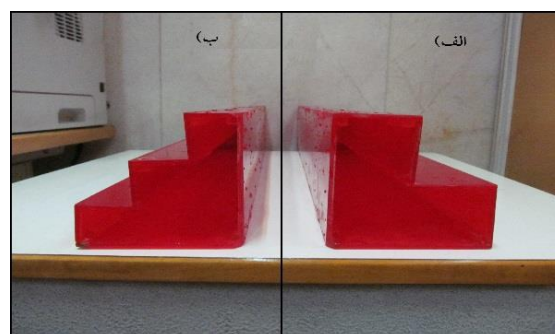
با توجه به اینکه در طول انجام آزمایش‌ها پرش‌های ایجاد شده، شکل‌های مختلفی داشتند در ابتدا پرش‌های شکل گرفته دسته‌بندی شده‌اند. نظر به اینکه انواع پرش‌های تشکیل شده متأثر از پارامترهای مختلف (عمق پایاب، عدد فرود اولیه، ارتفاع و تعداد پله آستانه) است. در ادامه ابتدا انواع پرش بر حسب تغییر عمق پایاب معرفی و سپس اثر دیگر پارامترها بر نوع پرش بررسی خواهد شد.

##### ۴-۱-۱- انواع پرش بر حسب عمق پایاب

در این قسمت، پرش‌های تشکیل شده با تغییر عمق پایاب نشان داده شده است. پرش‌های تشکیل شده درون حوضچه آرامش به ۵ دسته اصلی تقسیم بندی شده اند (شکل ۳) که جزئیات مربوط به انواع پرش در ادامه آمده است. در این شکل پرش-های نشان داده شده در شرایط جریان ورودی ثابت، ارتفاع و شکل ثابت آستانه، با تغییر عمق پایاب ایجاد شده‌اند. در شکل (۳) عدد فرود برابر با  $1/1$ ، عمق اولیه  $2$  سانتی‌متر، ارتفاع پله  $5$  سانتی‌متر و فاصله آن از دریچه  $1/35$  متر ( $48y_1$ ) است. عمق پایاب بین انواع پرش متفاوت است. برای نشان دادن سازوکار جریان از بردارهای تقریبی سرعت استفاده شده است که این بردارها از مسیریابی حرکت حباب‌های هوا درون پرش هیدرولیکی و تزریق رنگ به دست آمده است.

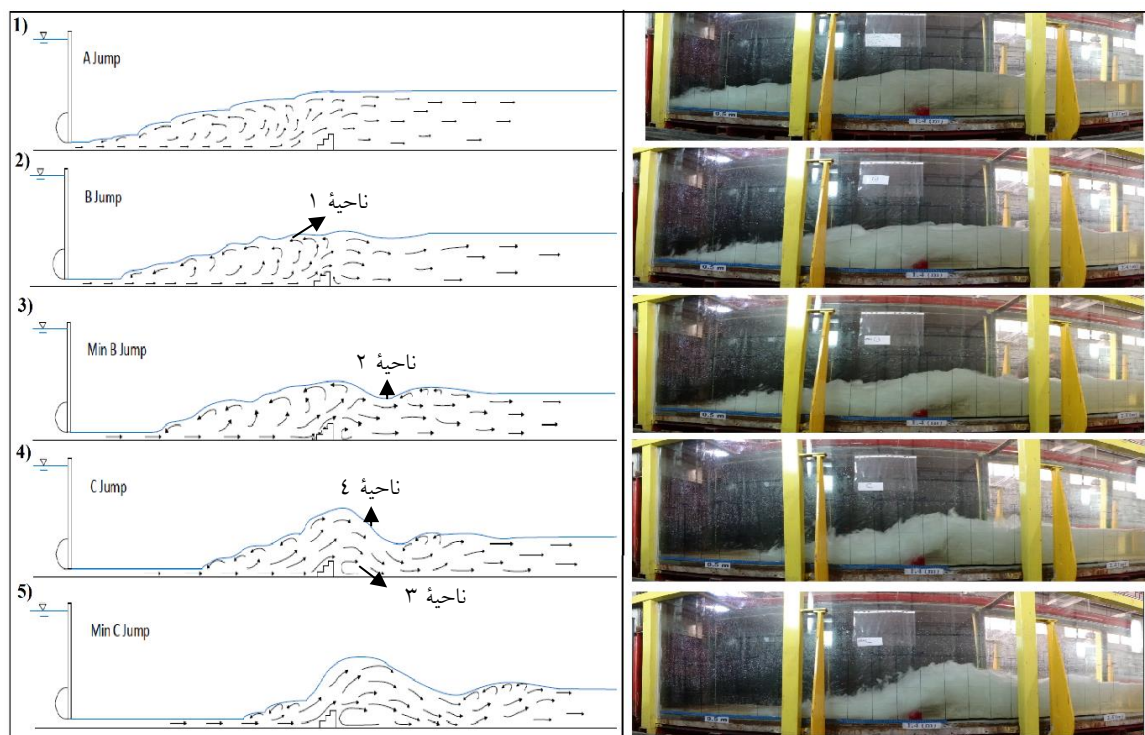
SD-12<sup>2</sup>A ساخت شرکت Mitutoyo اندازه گیری شد، دقت این دستگاه  $\pm 0/01$  میلی‌متر است. مشاهده‌ی آزمایشگاهی با استفاده از دوربینی با کیفیت عکس برداری  $14/1$  مگاپیکسل و کیفیت HD ثبت شد. این مشاهده شامل نوع و خصوصیات پرش (محل تشکیل گردابه‌ها و انحنای موجود در سطح جریان) و میزان نوسان پاشنه پرش است.

روش انجام آزمایش‌ها بدین ترتیب صورت گرفت که با تغییر بازشدگی دریچه ورودی، اعداد فرود مورد نظر ایجاد شد. بعد از تنظیم میزان بازشدگی (عمق اولیه پرش) و دبی لازم برای عدد فرود مورد نظر، حوضچه آرامش (طول حوضچه و ارتفاع آستانه) با توجه به عمق اولیه هر عدد فرود ساخته شد. بعد از روشن کردن پمپ برای شروع آزمایش‌ها، به منظور ایجاد ثبات در شرایط آزمایشگاهی حدود  $30$  دقیقه زمان اختصاص داده شد. بعد از تثبیت جریان، اولین عمق پایاب تنظیم و بعد از حدود نیم ساعت خصوصیات کیفی و کمی پرش هیدرولیکی شامل عمق اولیه پرش، عمق پایاب، فاصله پاشنه پرش از دریچه ( $x$ ) اندازه‌گیری و همچنین خصوصیات کیفی پرش تشکیل شده توسط دوربین ضبط شد.



شکل (۲) الف) آستانه دوپله‌ای (ب) آستانه سه‌پله‌ای، با ارتفاع برابر

آستانه با توجه به عمق اولیه جریان به صورت دو و سه‌پله‌ای ساخته شد ( $s=2y_1, 2.4y_1, 2.9y_1$ ). در شکل (۲) آستانه دوپله‌ای و سه‌پله‌ای با ارتفاع برابر نشان داده شده است. بنابراین برای هر عدد فرود  $6$  آستانه ساخته شد. با نصب هر آستانه در حوضچه،  $4$  آزمایش با عمق‌های پایاب مختلف روی آن (مجموعاً  $24$  آزمایش) انجام پذیرفت. با انجام این روند برای دیگر اعداد فرود،  $96$  آزمایش انجام شد که محدوده‌ی تغییرات



شکل (۳) انواع پرش هیدرولیکی، عمق پایاب از قسمت ۱ تا ۵ به ترتیب برابر با ۲۸/۶، ۲۷/۸، ۲۷/۱ و ۲۵/۱ سانتی‌متر

#### ۴-۱-۱-۱-۱-۱-۱ پرش نوع A

پرش نوع A پرشی است که تمام سطح غلطابی یا بازگشتی پرش هیدرولیکی قبل از رسیدن به آستانه شکل گرفته باشد یعنی انتهای سطح غلطابی جریان بر ابتدای آستانه منطبق شود و جریان روی آستانه (جریانی که حوضچه را ترک می‌کند) تقریباً یک جهته و بدون سطح بازگشتی باشد. این نوع پرش معمولاً به ازای اعماق پایاب نزدیک به  $1.7$  (عمق) متناظر پرش کلاسیک) اتفاق می‌افتد. جریان با سرعت بالا (جت دیواره‌ای<sup>۱</sup>) که در نزدیکی بستر حرکت می‌کند در نزدیکی آستانه از کف جدا شده و با هدایت آستانه به سمت سطح جریان منحرف می‌شود. اثر تعداد پله‌های آستانه روی جریان در این نوع پرش بسیار کم است، در واقع این نوع پرش مرز بین اندرکنش و عدم اندرکنش جت و آستانه است طوری که در اعماق پایاب بیشتر از عمق پایابی که به ازای آن جریان نوع A اتفاق می‌افتد پرش به سمت بالادست حرکت کرده و پرش تقریباً تحت تاثیر شکل آستانه قرار نمی‌گیرد.

#### ۴-۱-۱-۱-۲-۱-۱ پرش نوع B

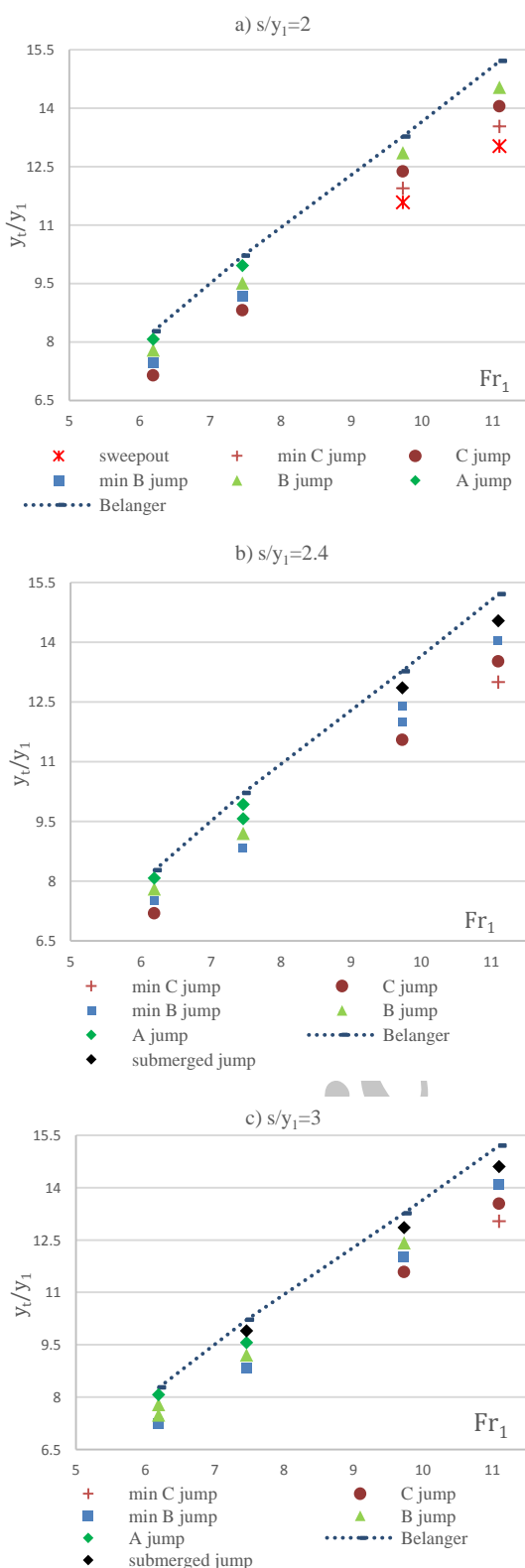
با کمی کاهش عمق پایاب از عمق پایابی که پرش نوع A در آن تشکیل شد، شکل پرش تغییر می‌کند به طوری که امواجی در سطح جریان بعد از آستانه پدیدار می‌شود همچنین پاشنه پرش به سمت آستانه حرکت می‌کند. در این شرایط جت دیواره‌ای موجود در کف با آستانه برخورد کرده و به سمت سطح جریان منحرف شده و سبب پدیدار شدن ناحیه‌ی جوشش (ناحیه‌ی ۱ در شکل ۳) در سطح جریان می‌شود. تفاوت بارز بین پرش نوع B با پرش نوع A وجود ناحیه‌ی جریان جوششی در سطح آب در پرش نوع B است.

#### ۴-۱-۱-۱-۳-۱-۱ پرش نوع B کمینه

با کاهش بیشتر عمق پایاب از عمق پایابی که پرش نوع B در آن تشکیل می‌شود پاشنه پرش به سمت آستانه حرکت می‌کند، بر تلاطم سطح جریان روی آستانه افزوده می‌شود، پرش هیدرولیکی بیشتر تحت تاثیر آستانه قرار می‌گیرد و درگیری بین جت و پله‌های آستانه بیشتر می‌شود. با توجه به برخورد شدید جت با آستانه و هدایت جت به سمت سطح

1 Wall jet

حالت برخوردی<sup>۳</sup> با کف پیدا می‌کند.



شکل (۴) انواع پرش در حوضچه‌ی آرامش با آستانه پلکانی دوپله‌ای

جریان، علاوه بر افزایش جوشش در سطح جریان، جریان بعد از آستانه حالت شیرجه‌ای<sup>۱</sup> پیدا می‌کند و همچنین سطح غلطابی دوم (ناحیه<sup>۲</sup> در شکل ۳) نیز بعد از جریان شیرجه‌ای در پشت آستانه شکل می‌گیرد. تفاوت عمده پرش نوع B کمینه و پرش نوع B تشکیل سطح غلطابی دوم و جریان شیرجه‌ای بعد از آستانه است که در پرش نوع B مشاهده نشد.

#### ۴-۱-۱-۴- پرش نوع C

با کاهش بیشتر عمق پایاب، پاشنه پرش به آستانه نزدیک‌تر و نوسانات جریان عبوری از روی آستانه شدیدتر می‌شود طوری که جت با برخورد به آستانه با حالت شیرجه‌ای به کف حوضچه برخورد می‌کند (ناحیه<sup>۳</sup> در شکل ۳) (جریان برخوردی<sup>۴</sup>)، همچنین ابعاد سطح غلطابی دوم (ناحیه<sup>۴</sup> در شکل ۳) نیز بزرگتر می‌شود. با توجه به اینکه در این نوع پرش برخورد بین جت و آستانه شدید است، جریان منحرف شده به سطح جریان حالت پاششی دارد. شیب سطح جریان در این نوع پرش با برخورد به آستانه عوض می‌شود یعنی حالت شکستگی شیب در جلوی آستانه پدیدار می‌شود.

#### ۴-۱-۱-۵- پرش نوع C کمینه

با کاهش بیشتر عمق پایاب پرش نوع C کمینه تشکیل می‌یابد که مانند پرش نوع C، وجود جریان شیرجه‌ای، برخورد جریان شیرجه‌ای با کف حوضچه (جریان برخوردی<sup>۴</sup>)، جریان پاششی، سطح غلطابی دوم و شکستگی شیب در جلوی آستانه مشاهده می‌شود. تنها تفاوت آنها در شدت ویژگی‌های ذکر شده است.

مقایسه بین پرش‌ها نشان می‌دهد با تبدیل نوع پرش از نوع A به B، و نهایتاً C کمینه، پاشنه پرش به سمت آستانه نزدیک می‌شود. برخورد بین جریان با سرعت بالا (جت دیواری موجود در کف پرش هیدرولیکی) با آستانه افزایش می‌یابد. سطح جریان روی آستانه موج دار می‌شود و سطح غلطابی دوم پدیدار می‌شود و جریان عبوری از روی آستانه

- 1 Plunging
- 2 Impinging flow

#### ۴-۱-۲- انواع پرش بر حسب پارامترهای مختلف

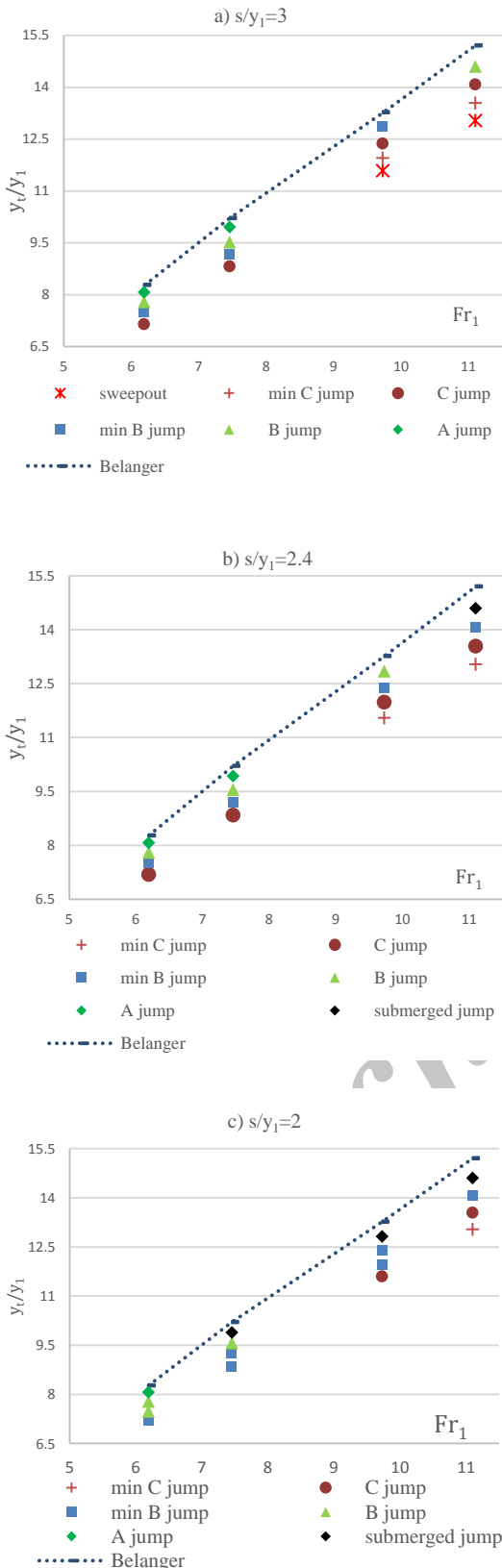
در قسمت قبل انواع پرش شکل گرفته روی آستانه پلکانی معرفی شد. در این قسمت انواع پرش با آستانه پلکانی در شرایط جریان و هندسه‌های مختلف آستانه بررسی خواهد شد. مشخصات انواع پرش بر حسب عمق پایاب نسبی و عدد فرود، ارتفاع نسبی  $(\frac{s}{y_1})$  و تعداد مختلف پله‌ها (SN) در شکل‌های (۴) و (۵) به همراه پرش کلاسیک نشان داده شده است. در این نمودارها با توجه به ویژگی‌های هندسی پله و نیز عدد فرود جریان فوق بحرانی و نسبت عمق پایاب به عمق اولیه‌ی پرش هیدرولیکی می‌توان نوع پرش تشکیل شده در حوضچه‌های آرامش با آستانه‌ی انتهایی ۲ و ۳ پله‌ای را مشخص کرد.

#### ۴-۲- اثر پارامترهای مختلف بر طول پاشنه

همان‌گونه که در قسمت قبل مشاهده شد هر کدام از پارامترهای مورد بررسی بر نوع پرش اثر گذار بودند. وجه تمایز بین انواع پرش شکل گرفته، میزان وقوع پرش در قبل از آستانه (فاصله پاشنه پرش از آستانه) و شرایط جریان بر روی آستانه می‌باشد. با جابه‌جایی پاشنه، نوع پرش‌ها عوض می‌شود طوری که با نزدیک شدن پاشنه به آستانه میزان خروج پرش افزایش می‌یابد. نتیجتاً هر چقدر فاصله پاشنه از آستانه بیشتر باشد پرش‌ها مطلوب‌تر و ماندگارشان در قبل از آستانه افزایش می‌یابد. با توجه به قابل اندازه‌گیری بودن فاصله پاشنه از آستانه، در این قسمت اثر پارامترهای مختلف روی فاصله پاشنه نشان داده می‌شود. فاصله پاشنه از آستانه در قالب پارامتر طول نسبی پاشنه  $(x/y_1)$  فاصله پاشنه از بالادست آستانه و  $y_1$  عمق اولیه می‌باشد) بررسی شد.

#### ۴-۲-۱- اثر ارتفاع آستانه

در شکل (۶) اثر ارتفاع نسبی آستانه بر طول نسبی پاشنه پرش در عمق پایاب ثابت و اعداد فرود مختلف، برای آستانه دو و سه پله‌ای نشان داده شده است.



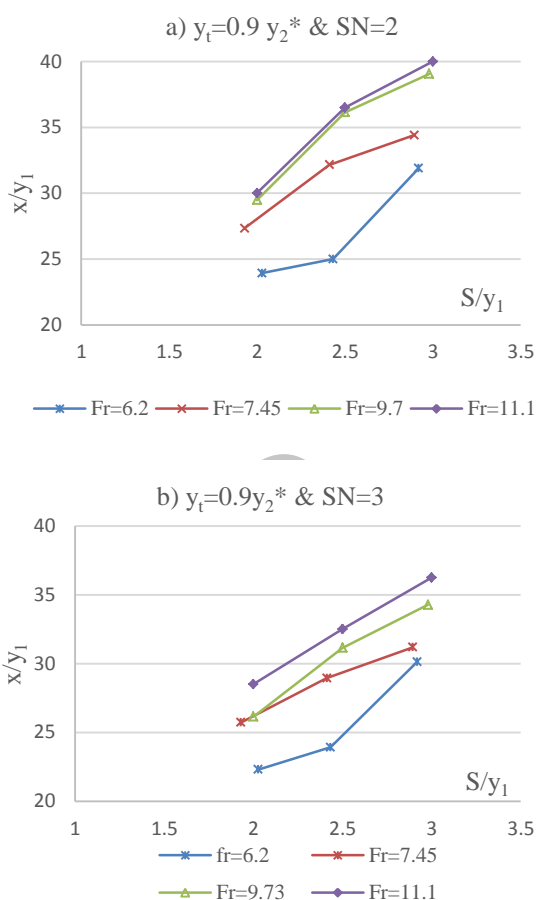
شکل (۵) انواع پرش در حوضچه‌ی آرامش با آستانه پلکانی سه-پله‌ای

افزایش می‌یابد. این روند به ازای تمامی اعداد فرود مشاهده می‌شود.

#### ۴-۲-۲- اثر عمق پایاب، عدد فرود و تعداد پله

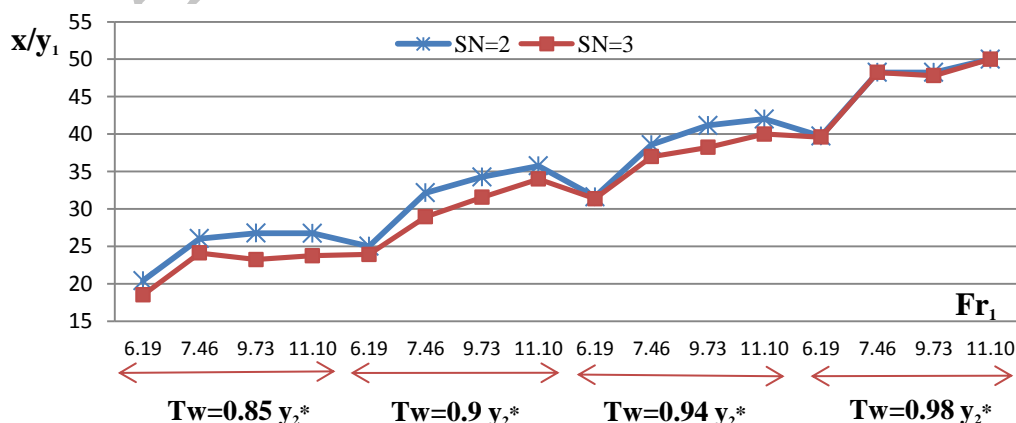
در شکل (۷) طول نسبی پاشنه در مقابل عدد فرود و عمق نسبی پایاب برای آستانه دو و سه‌پله‌ای با ارتفاع نسبی آستانه ثابت ( $s/y_1=2.4$ ) ترسیم شده است. همان‌گونه که در شکل (۷) نشان داده شده است با افزایش عمق پایاب، طول نسبی پاشنه افزایش می‌یابد و همچنین طول نسبی پاشنه آستانه دوپله‌ای بالاتر از آستانه سه‌پله‌ای قرار گرفته است. این روند برای ارتفاع نسبی آستانه 2, 3 نیز مشاهده شد که برای اختصار تنها نتایج مربوط به ارتفاع نسبی 4/2 نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۷) می‌توان دریافت با افزایش عدد فرود منحنی‌های مربوط به آستانه دو و سه‌پله‌ای بهم نزدیک می‌شوند که نشان دهنده عملکرد نزدیک آنها در عمق پایاب بالا است، که دلیل آنرا می‌توان به افزایش استغراق آستانه نسبت داد. با افزایش عمق پایاب (افزایش استغراق آستانه)، پرش کمتر تحت تاثیر شکل آستانه قرار می‌گیرد. همچنین با افزایش عدد فرود شیب افزایشی طول نسبی پاشنه با افزایش عدد فرود کاهش می‌یابد که دلیل آن تشکیل پرش از نوع C و C کمینه در اعداد فرود بالا است که طول کمتری در قیاس با پرش نوع A و B در اعداد فرود پایین، دارند.



شکل (۶) طول نسبی پاشنه در مقابل ارتفاع نسبی آستانه، (A) آستانه دوپله‌ای (B) آستانه سه‌پله‌ای

همانطور که مشاهده می‌شود در هر دو نوع آستانه پلکانی (دو و سه‌پله‌ای) با افزایش ارتفاع نسبی آستانه طول نسبی پاشنه



شکل (۷) طول نسبی پاشنه در مقابل عدد فرود و عمق نسبی پایاب برای آستانه دو و سه‌پله‌ای



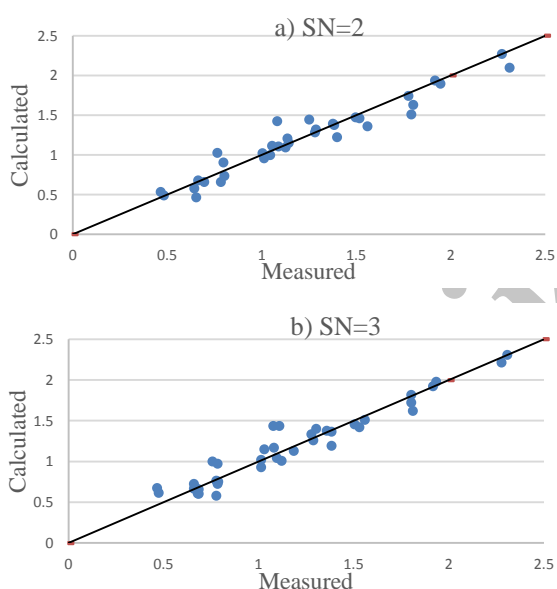
آستانه دوپله‌ای:

$$1 - \Lambda = \sqrt[1.28]{\frac{\Delta Y_s - 0.077 S^{1.56}}{1.33 S}} \quad (V)$$

آستانه سه‌پله‌ای:

$$1 - \Lambda = \sqrt[1.186]{\frac{\Delta Y_s - 0.154 S^{0.35}}{1.2 S}} \quad (\Lambda)$$

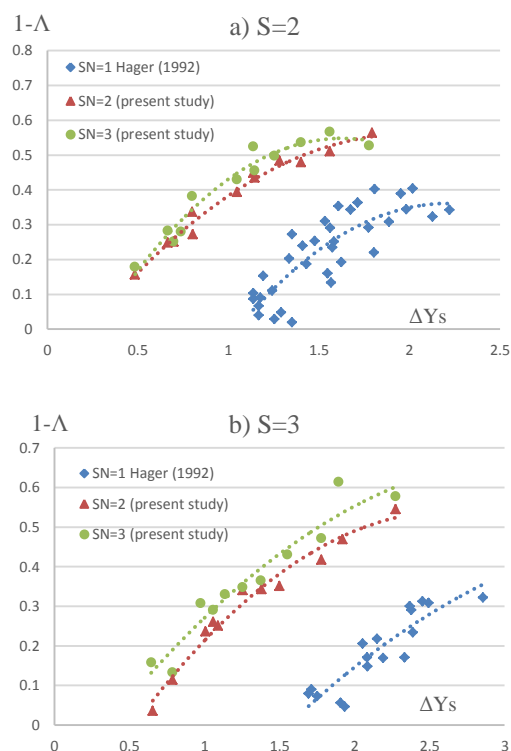
ضریب همبستگی روابط (V) و (Λ) به ترتیب ۰/۹۴ و ۰/۹ است. شکل (۹) مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده  $1 - \Lambda$  را با استفاده از رابطه (V) و (Λ) نشان می‌دهد. با توجه به دو رابطه فوق، با دانستن هندسه آستانه و شرایط جریان (عدد فرود اولیه و عمق پایاب)، می‌توان فاصله پاشنه تا آستانه یا میزان خروج پرش را محاسبه نمود.



شکل (۹) مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده میزان خروج پرش برای آستانه دوپله‌ای و سه‌پله‌ای

با توجه به نتایج این پژوهش، هگر و لی [۵] و مدل هیدرولیکی سد گتوند علیا [۸] می‌توان گفت عملکرد آستانه قایم نسبت به آستانه دوپله‌ای، آستانه دوپله‌ای نسبت به آستانه سه‌پله‌ای، آستانه سه‌پله‌ای نسبت به آستانه چهارپله‌ای و آستانه چهارپله‌ای نسبت به آستانه شیبدار، در حفظ پرش درون حوضچه آرامش بهتر است. مقایسه بین مقادیر استخراج شده از رابطه ۷ و ۸ برای داده‌های سد گتوند علیا نشان می‌دهد که مقداری از پرش

در شکل (۸) مقایسه نتایج این پژوهش (آستانه دو و سه‌پله‌ای) با نتایج هگر و لی [۵] روی آستانه قایم برای ارتفاع نسبی ۲ و ۳ نشان داده شده است.



شکل (۸) میزان خروج پرش در مقابل کاهش عمق پایاب

همان‌گونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود در هر دو ارتفاع نسبی آستانه، میزان خروج پرش از حوضچه با آستانه پلکانی بیشتر از آستانه قائم است. عملکرد آستانه دوپله‌ای نسبت به آستانه سه‌پله‌ای (با ارتفاع یکسان) بهتر است. با توجه به شکل (۸) می‌توان گفت با افزایش ارتفاع نسبی آستانه میزان خروج پرش در هر سه نوع آستانه کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها روی آستانه پلکانی، روابطی برای محاسبه میزان خروج پرش از حوضچه با آستانه پلکانی بر حسب پارامترهای اثرگذار به دست آمد. با توجه به رابطه هگر و لی [۵] و داده‌های آزمایشگاهی حاضر روابط ۷ و ۸ برای محاسبه میزان خروج پرش ارائه شد. این روابط بر حسب ارتفاع نسبی آستانه، اعماق متناظر پرش کلاسیک و پرش بر روی آستانه پلکانی به دست آمده است.

ارتفاع آستانه اثر مثبت بر ماندگاری پرش (افزایش طول نسبی پرش) دارد.

- افزایش تعداد پله‌ها در ارتفاع ثابت آستانه (کاهش زبری ایجاد شده روی آستانه) اثر منفی بر ماندگاری پرش قبل از آستانه (درون حوضچه آرامش) به همراه دارد.

- با افزایش عمق پایاب میزان ماندگاری پرش افزایش یافته و پرش از نوع C کمینه به C و ... A تبدیل می‌شوند. با افزایش عمق پایاب و میزان استغراق آستانه، پرش کمتر تحت تاثیر شکل (تعداد پله) و ارتفاع آستانه قرار می‌گیرد.

- با توجه به روابط ارائه شده در این پژوهش، با دانستن شرایط جریان و هندسه آستانه، می‌توان فاصله پاشنه پرش از آستانه را با دقت بالایی (ضریب همبستگی ۹۰ و ۹۴ درصد) پیش بینی کرد.

## ۶- واژگان لاتین

$y_2^*$	عمق ثانویه پرش کلاسیک
$y_1$	عمق اولیه پرش
$Fr_1$	عدد فرود اولیه
$u_1$	سرعت اولیه پرش
$g$	شتاب ثقل
$x$	فاصله پاشنه پرش از آستانه
$L_r$	طول سطح غلطابی پرش بر روی آستانه
$L_r^*$	طول سطح غلطابی پرش کلاسیک
$\lambda_r$	طول نسبی سطح غلطابی پرش کلاسیک
$S$	ارتفاع آستانه
$S$	ارتفاع نسبی آستانه
$1 - \Lambda$	میزان خروج پرش
$\Delta Y_s$	کاهش عمق پایاب نسبت به پرش کلاسیک
$Y$	نسبت اعماق متناظر پرش بر روی آستانه
$Y^*$	نسبت اعماق متناظر پرش کلاسیک
$Re$	عدد رینولدز
$\epsilon$	زبری
$L_E$	فاصله محل قرار گیری آستانه از دریچه بالادست
$SN$	تعداد پله آستانه

با توجه به طول حوضچه آرامش که در این روابط ۴۸ برابر عمق ابتدایی پرش در نظر گرفته شده است باید از حوضچه خارج شود که نتایج مدل آزمایشگاهی در موسسه تحقیقات آب نشان دهنده این است که پرش به خوبی در حوضچه قرار گرفته است که دلیل آن را می‌توان سازوکار تشکیل پرش هیدرولیکی در مدل سد گتوند علیا دانست که با عبور جریان از روی شوت تشکیل خواهد شد که طول پرش کوتاهتر خواهد بود. پله‌ای کردن آستانه شیب‌دار به منزله ایجاد زبری مصنوعی بر روی آستانه شیب‌دار است که با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش و گزارش مدل هیدرولیکی سد گتوند، با ایجاد گردابه روی آستانه، اثر مثبت بر استهلاک انرژی دارد. وجه تمایز پرش بر روی آستانه پلکانی با پرش روی آستانه شیب‌دار و آستانه قائم، در گردابه‌هایی هست که روی پله‌های آستانه شکل می‌گیرد. در پرش تشکیل شده بر روی آستانه پلکانی، علاوه بر گردابه‌های بزرگی که تحت تاثیر آستانه در حوضچه (قبل از آستانه) شکل می‌گیرد، گردابه‌های کوچکی نیز روی پله‌های آستانه شکل می‌گیرد. ابعاد این گردابه‌ها در آستانه دوپله‌ای بزرگتر از آستانه سه‌پله‌ای است.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله پارامترهای مؤثر بر پرش هیدرولیکی تشکیل شده روی آستانه پلکانی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله به شرح ذیل است:

- پرش‌های تشکیل شده در این نوع حوضچه به ۵ نوع اصلی پرش نوع A، B، C، B کمینه، C و C کمینه تقسیم بندی شده است.

- پرش‌ها در تبدیل از نوع A به B و ... C کمینه، به تدریج از حوضچه خارج می‌شوند طوری که در نوع C کمینه پرش هیدرولیکی در آستانه خروج کامل از حوضچه قرار دارد. در پرش نوع A پرش به صورت کامل در حوضچه تشکیل می‌شود و به اصطلاح به پرش نوع A و پرش‌های نزدیک به آن پرش‌های ماندگار و یا پایدار گفته می‌شود.

- نوع پرش‌ها به صورت نموداری برحسب عدد فرود، عمق پایاب و شرایط هندسی حوضچه تقسیم بندی شده اند افزایش

## ۷- مراجع

۱۳۷۹. پرش هیدرولیکی ج. ابریشمی و ک. [۱۰] اسماعیلی روی کانالهای با شیب معکوس و پله منفی. استقلال، شماره ۲، ۹۷-۱۱۰.

[۱۱] اسماعیلی ک. و ابریشمی ج. ۱۳۸۰. تعیین ارتباط بین عمقهای قبل و بعد از پرش و ارتفاع پله به منظور کنترل پرش هیدرولیکی روی حوضچه های با شیب معکوس و با پله مثبت یا منفی. کنفرانس بین المللی سازه های هیدرولیکی مهندسی عمران، ۱۲ و ۱۳ اردیبهشت، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

[12] Hager, W.H. and Bremen, R. "Classical hydraulic jump: sequent depths." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 27, No.5, pp. 565-585, 1989.

[13] Heller, V. "Scale effects in physical hydraulic engineering models." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 49, No.3, pp. 293-306, 2011.

[14] Habibzadeh, A., Loewen, M and Rajaratnam, N "Performance of Baffle Blocks in Submerged Hydraulic Jumps." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 138, No.10, pp. 902-908, 2012.

[15] Ead, S and Rajaratnam, N. "Hydraulic jumps on corrugated beds." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No.7, pp. 656-663, 2002.

[16] Liu, M., Rajaratnam, N and Zhu, D.Z. "Turbulence structure of hydraulic jumps of low Froude numbers." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 130, No. 6, pp. 511-520, 2004.

[1] Peterka, A.J "Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators." 19۸۴.

[2] Ohtsu, I. and Yasuda, Y. "Transition from supercritical to subcritical flow at an abrupt drop." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 29, No.1, pp. 309-328, 1991.

[3] Mossa, M., Petrillo, M. and Chanson, H. "Tailwater level effects on flow conditions at an abrupt drop." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 41, No.1, pp. 39-51, 2003.

[4] Hager, W. H. and Bretz, N.V. "Hydraulic jumps at positive and negative steps." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 24, No.4, pp. 237-253, 1986.

[5] Hager, W.H. and Li, D "Sill-controlled energy dissipator." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 30, No. 2, pp. 165-181, 1992.

[6] Hager, W.H. Bremen, R. and Kawagoshi, N. "Classical hydraulic jump: length of roller." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 28, No.5, pp. 591-608, 1990.

[7] Hager, W.H. *Energy dissipators and hydraulic jump* vol. 8: Springer, 1992.

[۸] موسسه تحقیقات آب، "مدل هیدرولیکی تخلیه کننده تختانی سد گتوند علیا" موسسه تحقیقات آب، ۱۳۸۷.

[9] Abdelazim, M.A and Yaser, A.M. "Effect of stilling basin shape on the hydraulic characteristics of the flow downstream radial gates," *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 49, pp. 393-400, 2010.

# Experimental Investigation of Hydraulic Jump in stilling basin with Stepped Sill

A. Minaei Gigloo<sup>1</sup>, M. Ghodsian<sup>2\*</sup>, M. Mehraein<sup>3</sup>

1- M.Sc. of Hydraulic Engineering, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

2- Professor of Hydraulic Engineering, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

3- Assistant Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University

ghods@modares.ac.ir

## Abstract:

Hydraulic jump is a rapid and sudden transition from a high-velocity supercritical flow to a subcritical flow in an open channel flow. Stilling basins are used to control the hydraulic jump at the downstream of chutes, sluice gates, ... End Sills, baffle blocks and negative steps are often used to control hydraulic jumps in stilling basins. The present study focuses on the formation of hydraulic jump in the new type of stilling basins with stepped sills. Extensive experiments were conducted in a rectangular flume 0.6 m wide, 12.0 m long and 1.0 m deep, with various discharges from 30 to 120 l/s. Water was pumped from an underground sump into a head tank and the discharge was measured with a ultrasonic flowmeter. At the downstream end of the head tank there was a sluice gate into the flume. The edge of the sluice gate has a streamlined lip in the shape of a half-cylinder of diameter 20 cm to minimize flow contraction and provide a uniform supercritical flow. A point gauge with an accuracy of 0.1 mm was used to measure water depths. In order to visualize the flow field, the dye-injection method and a high speed camera were employed. A tailgate located at the downstream end of the flume was used to control the tailwater depth. The effects of stepped end sills on hydraulic jumps were investigated experimentally. Firstly, dimensionless parameters affecting the hydraulic jump on stepped sill introduced using Buckingham  $\pi$  theorem. The effect of important parameters such as approach Froude number ( $Fr_1$ ), relative tailwater depth ( $y_t/y_2^*$ ) and the end sill geometry (shape and relative height of sill ( $s/y_1$ )) on hydraulic jump were investigated. The hydraulic jumps over stepped end sills were classified into A-jump, B-jump, minimum B-jump, C-jump and minimum C-jump. By changing the type of flow from A-jump to minimum C-jump, the jump is going to sweepout from basin. A-jump is entirely formed in the basin and at the upstream of sill. In the case of minimum C-jump, most of the surface roller of jump formed at the downstream of sill. The flow types are presented in the form of 6 different diagrams as functions of the relative step height  $s/y_1$ . By increasing the tailwater depth, sill height, the probability of occurrence of hydraulic jump in the stilling basin increased. It was found that the sill with 2 steps have better performance in stabilizing the jump in the stilling basin as compare to sill with 3 steps. By increasing the approach Froude number, the jump began to sweep away from basin. By knowing the initial condition like upstream velocity and upstream froude number, tailwater depth, sill height and its number of steps the toe distance from sill can be found out with desirable accuracy.

**Keywords:** Hydraulic jump, experimental study, stepped sill