

## ارزیابی تأثیر آبیاری انتهایی با اشکال متفاوت بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی

آلاله احمدی و تورج هنر<sup>\*۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۳/۲۷)

### چکیده

یکی از مهم‌ترین مسائل در طراحی حوضچه‌های آرامش، تعیین محل دقیق تشکیل پرش هیدرولیکی و یا تثبیت پرش هیدرولیکی می‌باشد. در مطالعه حاضر اثر آبیاری انتهایی با اشکال متفاوت بر ویژگی‌های هیدرولیکی پرش در یک حوضچه آرامش مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها برای سه شکل مختلف آبیاری انتهایی به صورت مستطیل، مربعی و پلکانی در دو فاصله از پنجه پرش و عدد فرود اولیه در محدوده ۴/۷ تا ۸/۲۳ انجام شده است. نتایج حاصله نشان داد که آبیاری انتهایی با مقطع عریض‌تر (مربعی و سپس پلکانی) اثر بیشتری در کاهش اعماق مزدوج پرش و افزایش افت انرژی نسبت به آبیاری انتهایی کم‌عرض خواهد داشت. اگرچه در این نوع آبیاری‌ها، فرو ریزش آب شدیدتر و خطر فرسایش در پایین دست بیشتر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری انتهایی، پرش هیدرولیکی، افت انرژی در پرش هیدرولیکی

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی : toorajhonar@yahoo.com

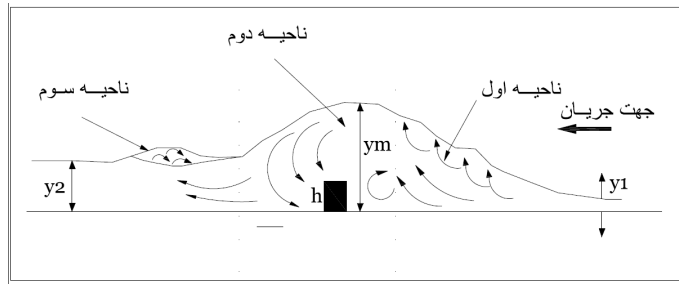
## مقدمه

پرش هیدرولیکی از انواع جریان‌های متغیر سریع است که در آن عمق جریان در مسیر نسبتاً کوتاهی به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و جریان از حالت فوق بحرانی به زیربحرانی تغییر می‌نماید. در طراحی حوضچه‌های آرامش تعیین دقیق موقعیت تشکیل پرش هیدرولیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. رسیدن به این مهم، در رودخانه‌هایی که در آنها عمق پایاب کم و یا به دلیل شیب زیاد رودخانه پرش تمایل دارد به سمت پایین دست حرکت کند، تثبیت پرش در حوضچه آرامش بعضاً مستلزم حفاری و گود برداری‌های عمیق می‌باشد. لذا محققین را به سمت یافتن روش‌های آسان و در عین حال کم‌هزینه جهت تثبیت پرش سوق می‌دهد. یکی از راه‌های کم‌هزینه در راستای تثبیت پرش هیدرولیکی، احداث یک دیواره کوتاه (دندانه) در انتهای حوضچه آرامش به صورت یک آبپایه پیوسته می‌باشد. مطالعات در زمینه کنترل پرش هیدرولیکی با یک دیواره ممتد، ابتدا توسط شکری (۱۲) انجام گرفت، وی با انجام یک سری آزمایش نشان داد که عدد فرود در مقطع اولیه پرش  $Fr_1$ ، فاصله قرارگیری دیواره از پنجه پرش  $L_s$  و ارتفاع نسبی دیواره  $h/y_1$  (ارتفاع دیواره و عمق اولیه پرش است) و هم‌چنین عمق آب در پایاب در چگونگی شکل‌گیری جریان عبوری از روی دیواره مؤثر می‌باشد. رند (۱۰) به بررسی افت انرژی در اثر عبور جریان از روی تک‌دیواره ممتد پرداخت و نواحی گردابی ایجادشده را به سه ناحیه مطابق شکل (۱) طبقه‌بندی کرد: (۱) گرداب‌های سطحی تشکیل‌شده قبل از دیواره (۲) گرداب‌های تشکیل‌شده در پشت دیواره (۳) گرداب‌های سطحی کوچک تشکیل‌شده در ابتدای شروع جریان یکنواخت. وی معتقد بود به دلیل گرداب‌های شدید در ناحیه اول و انحنای شدید خطوط جریان در ناحیه دوم، قسمت اعظم افت انرژی حاصل از وجود دیواره در مسیر پرش در اثر تشکیل گرداب‌های نوع اول و دوم می‌باشد.

رند (۱۱) هم‌چنین به مقایسه میزان افت انرژی روی تک‌دیواره‌های ممتد و دندانه‌دار به‌کار رفته در طول پرش هیدرولیکی پرداخت و نتیجه گرفت دیواره‌های ممتد نسبت

به دیواره‌های دندانه‌دار افت انرژی بیشتری را ایجاد می‌کنند. نارایانان و شویزاس (۷) به بررسی ضریب دراگ وارد بر دیواره در مسیر پرش پرداختند و به این نتیجه رسیدند که ضریب دراگ وارد بر دیواره در همه حالات با فاصله گرفتن از پنجه پرش کاهش می‌یابد. اوتسو (۸) جریان عبوری از روی آبپایه را به سه حالت کلی تقسیم بندی کرد: (۱) پرش تشکیل‌شده در بالادست جریان تحت تأثیر عمق پایاب قرار می‌گیرد. (۲) پرش تشکیل‌شده در بالادست جریان تحت تأثیر عمق پایاب قرار نمی‌گیرد. (۳) جریان خروجی پس از برخورد به آبپایه، به صورت جت آزاد و بدون تشکیل پرش از روی آن عبور می‌کند. او با استفاده از مقادیر آزمایشگاهی عمق پایاب و  $h/y_1$ ، مقادیر بحرانی این پارامترها را برای تبدیل از یک حالت به حالت دیگر به دست آورد. پس از آن برتر (۳) با در نظر گرفتن عمق پایاب در حالت‌های مختلف، به نحوه ریزش آب و شکل پروفیل سطح آب بر روی آبپایه پرداخت و پرش‌های ایجادشده را به انواع  $A$ ،  $B$ ،  $B_{min}$ ،  $C$  و  $D$  تقسیم کرد. براساس این طبقه‌بندی، در حالت  $A$ ، عمق پایاب به اندازه کافی برای تشکیل پرش در محل تعیین شده است و نسبت اعماق مزدوج در بیشترین مقدار خود خواهد بود. با کاهش عمق پایاب، پنجه پرش به سمت آبپایه حرکت و پرش نوع  $B$  اتفاق می‌افتد. در این حالت الگوی جریان از روی آبپایه قوس‌دار می‌شود، ارتفاع غلتاب‌های زیرین افزایش می‌یابند و یک سطح جوشش در پشت آبپایه در بالادست آن، شکل می‌گیرد ولی هنوز تغییرات اساسی در پروفیل سطح آب رخ نمی‌دهد. حالت  $B_{min}$  و سپس  $C$  زمانی رخ می‌دهد که عمق پایاب کاهش بیشتری پیدا کند. در این حالت، فاصله بین پنجه پرش و بالادست آبپایه کاهش بیشتری پیدا می‌کند و منحنی الگوی جریان روی پایه توسعه داده می‌شود و سطح آب بعد از آبپایه سقوط می‌کند، درحالی‌که هنوز به کف کانال نمی‌رسد. در حالت  $D$  نیز عمق پایاب آنقدر کم است که موج‌های غلتان پرش کاملاً از روی آبپایه گذشته و روی بستر کانال می‌ریزند. در واقع حالت  $B_{min}$  مرز سر ریز بودن امواج غلتان از روی آبپایه خواهد بود.

وی هم‌چنین در ادامه تحقیقات خود، با در نظر گرفتن عمق



شکل ۱. انواع گرداب در تشکیل پرش با وجود دیواره

اختلاف نتایج به دلیل فضای جداشدگی جریان بر روی پله مثبت می‌باشد و در کل با بکارگیری پله مثبت در طول پرش هیدرولیکی، افت بیشتری خواهیم داشت. علی‌خانی و همکاران (۱) آزمایشات خود را به‌ازای عدد فرود اولیه ( $Fr_1$ ) در محدوده  $1/2$  تا  $5/5$  با بکارگیری آبیانه‌های انتهایی با شرایط  $(2 \leq S = h / y_1 \leq 8)$  انجام دادند و نهایتاً در پرش‌های ایجادشده از نوع C و D به‌طور میانگین به یک کاهش  $30\%$  در صدی در طول حوضچه دست یافتند و رابطه  $3(y_2 - y_1) \leq L_B \leq 5(y_2 - y_1)$  را برای محل مناسب قرارگیری آبیانه ( $L_B$ ) برای اتفاق افتادن پرش نوع B ارائه دادند. فتحی‌مقدم و همکاران (۵) نیز در محدوده  $0/14 \leq h / L_B \leq 0/2$  اقدام به ایجاد همه انواع پرش کردند و در نهایت مقادیر  $0/06 \leq h / L_B \leq 0/2$  را محدوده مناسب برای ایجاد پرش نوع B اعلام کردند که در آن نسبت‌های بدون بعد عمق جریان یعنی  $(y_m - y_2^*) / y_1$  و  $(y_2 - y_2^*) / y_1$  در محدوده  $0/5 -$  تا  $0/5 +$  تغییر می‌کند.  $y_m$  (عمق آب ماکزیمم قبل از آبیانه انتهایی،  $y_2^*$  عمق ثانویه در حالت پرش کلاسیک و  $y_2$  عمق ثانویه پرش در اثر بکارگیری آبیانه انتهایی می‌باشد).

جمع‌بندی مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که اگرچه در راستای رسیدن به ارتفاع مناسب آبیانه و موقعیت قرارگیری آن نسبت به پنجه پرش، تحقیقاتی صورت گرفته‌است، اما نسبت به ابعاد و شکل مناسب آبیانه مطالعات کمتری صورت گرفته‌است. در این پژوهش آزمایشگاهی سعی بر این است که با بکارگیری آبیانه انتهایی در ابعاد و اشکال مختلف و نیز بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی، گامی جدید در راستای تکمیل

مناسب پایاب، اثر ارتفاع آبیانه را در طبقه‌بندی انواع پرش مورد بررسی قرار داد و پرش‌ها با ویژگی ظاهری یکسان با طبقه‌بندی فوق‌را، در یک دسته قرار داد. براساس نتایج وی، آبیانه‌های بسیار کوتاه اثری بر روی پرش ندارند و حالتی شبیه پرش نوع A اتفاق می‌افتد. با افزایش ارتفاع آبیانه، ارتفاع غلتاب‌های زیرین افزایش می‌یابد، الگوی جریان از روی آبیانه قوس‌دار می‌شود و حالتی شبیه پرش نوع B اتفاق می‌افتد و به‌همین ترتیب با افزایش بیشتر ارتفاع آبیانه، الگوی جریان روی پایه قوس‌دارتر می‌شود و سطح آب بعد از آبیانه سقوط می‌کند (حالتی شبیه Bmin و سپس C) و در حالت D نیز آبیانه انتهایی آنقدر بلند است که موج‌های غلتان پرش کاملاً از روی آن گذشته و روی بستر کانال می‌ریزند. وی با در نظر گرفتن ارتفاع‌های مختلف، مقدار  $h / y_1 = \left[ \frac{y}{6} (Fr^{1/6} + 5) \right]$  را برای حد سرریزی بودن آبیانه انتهایی ارائه داد. هاگر و لی (۶) برای نسبت اعماق مزدوج در پرش‌های تحت تأثیر آبیانه انتهایی رابطه‌ای را ارائه دادند که در آن اثر آبیانه انتهایی به‌صورت پارامتری که خود متأثر از محل قرارگیری آبیانه و نوع پرش بود، از نسبت اعماق مزدوج در حالت کلاسیک کاسته می‌شد. اوتسو و همکاران (۹) نیز با بکارگیری ارتفاع‌های مختلف آبیانه انتهایی و استفاده از رابطه اندازه حرکت و در نظر گرفتن نیروهای وارد بر دیواره، روابطی را برای حد سرریز شدن امواج غلتان ارائه دادند. دمتریو (۴) به بررسی مقایسه افت انرژی در مسیر پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با شیب مثبت، با بکارگیری یک دیواره نازک و یک پله مثبت پرداخت و روابطی را برای محاسبه افت در هر حالت ارائه داد. به اعتقاد ایشان

پژوهش‌های قبلی و طراحی بهینه این حوضچه‌ها برداریم.

## ۲. مشخصات کانال و وسایل اندازه‌گیری عمق و سرعت و

### دبی

آزمایش‌ها در کانال آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شیراز در کانالی با دیواره‌های شیشه‌ای که در کف جهت استحکام ورق فلزی کار گذاشته شد با طول ۱۵ متر و عرض ۷۰/۵ سانتی‌متر انجام شد. برای ایجاد جریان فوق‌بحرانی در ابتدای کانال، از یک دریچه کشویی قائم که ارتفاع کانال قبل و بعد از آن به ترتیب ۱/۱ و ۰/۶ متر است، با دو بازشدگی ۲/۵ و ۳ سانتی‌متری، استفاده شد. با بکارگیری دبی‌های ۳۵، ۴۰ و ۴۵ لیتر بر ثانیه، پرش هیدرولیکی در ۶ عدد فرود اولیه در محدوده ۴/۷ تا ۸/۲۳ ایجاد گردید. دبی توسط یک دبی‌سنج الکترونیکی که پس از پمپ و قبل از کانال قرارداد داشت اندازه‌گیری و مقادیر مربوطه با یک سر ریز مثلثی ۹۰ درجه در انتهای کانال کنترل گردید. در هر آزمایش ابتدا آبپایه در محل‌های موردنظر (در دفاصله ۱۳۰ و ۱۵۰ سانتی‌متری از دریچه کشویی) نصب و سپس برای مقادیر دبی مشخص، مشخصات هیدرولیکی پرش نظیر عمق اولیه، عمق ثانویه و طول پرش اندازه‌گیری شد.

برای تعیین اعماق پرش، از عمق سنج نقطه‌ای با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد. هم‌چنین عمق اولیه پرش در محدوده ۲۰ سانتی‌متری پس از دریچه اندازه‌گیری گردید، لازم بذکر است در این محدوده تغییرات عمق و اختلال آب و هوا نیز بسیار ناچیز می‌باشد. نهایتاً در محاسبه طول حوضچه نیز این فاصله در نظر گرفته شد و طول حوضچه یعنی فاصله پنجه پرش تا محل نصب آبپایه، برابر ۱۱۰ و ۱۳۰ سانتی‌متر تعیین گردید. البته در این تحقیق جهت اندازه‌گیری سرعت در مقطع ثانویه از سرعت‌سنج نقطه‌ای دو بعدی الکترومگنتیت با دقت ۰/۱ سانتی‌متر برثانیه استفاده شد و در حین آزمایش‌ها نیز از هر پرش هیدرولیکی تصویرهایی تهیه شد و به کمک نرم‌افزار Grapher7 این تصاویر مورد تحلیل و از نتایج حاصله جهت محاسبه دقیق‌تر عمق ثانویه و طول پرش استفاده گردید. در این مطالعه از سه شکل مختلف آبپایه فلزی به طول ۷۰/۵ سانتی‌متر در مقطع عرضی کانال با ابعاد ذکرشده در شکل (۲)، استفاده گردید.

## مواد و روش‌ها

### ۱. تحلیل ابعادی

مشخصات پرش هیدرولیکی کنترل‌شده توسط آبپایه انتهایی، تابعی از خصوصیات سیال، مشخصات فیزیکی بستر و شرایط هیدرولیکی جریان می‌باشد. در چنین شرایطی، عمق ثانویه پرش  $(y_2)$ ، به عمق اولیه پرش  $(y_1)$ ، شتاب ثقل  $(g)$ ، عرض کانال  $(B)\pi$ ، لزجت کینماتیکی آب  $(\mu)$ ، سرعت اولیه جریان  $(v_1)$ ، جرم مخصوص آب  $(\rho)$ ، ارتفاع آبپایه انتهایی  $(h)$ ، پارامتر بدون بعد  $(Sh)$  که معرف شکل آبپایه انتهایی است و به محل قرارگیری آبپایه انتهایی  $(L_B)$  بستگی دارد که می‌توان آنرا به صورت رابطه (۱) بیان نمود که سپس با استفاده از روش باکینگهام می‌توان رابطه (۲) را ارائه نمود.

$$y_2 = f_1(y_1, v_1, g, \rho, \mu, h, B, L_B) \quad [1]$$

$$\frac{y_2}{y_1} = f_2(Re, Fr_1 = v_1 / \sqrt{gy_1}, h / L_B, Sh) \quad [2]$$

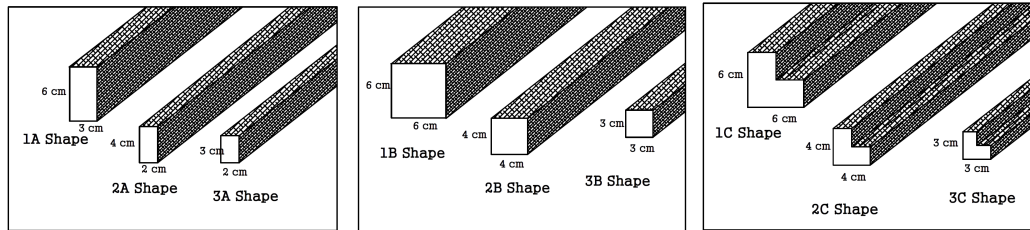
در رابطه فوق  $Fr_1$  عدد فرود اولیه و  $Re$  عدد رینولدز جریان می‌باشد. باتوجه به این‌که در فلوم‌های آزمایشگاهی شرایط طوری فراهم می‌شود که جریان آشفتنه دارای عدد رینولدز بالا است و می‌توان از اثر نیروی لزجت صرفه‌نظر کرد، رابطه (۳) ارائه می‌گردد و به‌طور مشابه برای طول پرش هیدرولیکی  $L_j$ ، با استفاده از تحلیل ابعادی رابطه (۴) نتیجه می‌گردد.

$$\frac{y_2}{y_1} = f_3(Fr_1, h / L_B, Sh) \quad [3]$$

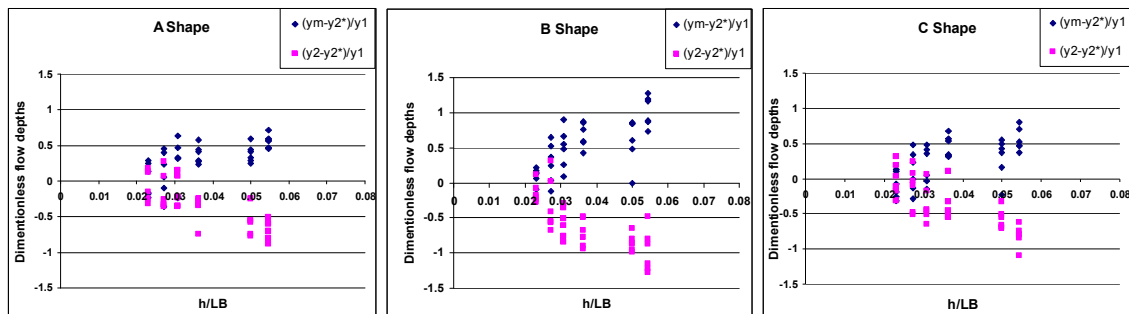
$$\frac{L_j}{y_1} = f_4(Fr_1, h / L_B, Sh) \quad [4]$$

براساس نتایج به‌دست آمده از تحلیل ابعادی، آزمایش‌ها با سه شکل آبپایه و ۳ ارتفاع مختلف آبپایه (شکل ۲)، دو محل قرارگیری نسبت به دریچه کشویی، ۳ دبی و دو بازشدگی دریچه کشویی که ایجاد شش عدد فرود مختلف می‌کند، انجام گردید.





شکل ۲. مشخصات آبیاه‌های به کار رفته



شکل ۳. تغییرات عمق آب قبل و بعد از آبیاه، به ترتیب از چپ به راست آبیاه کم عرض (مستطیلی) و آبیاه عریض (مربعی و پلکانی)

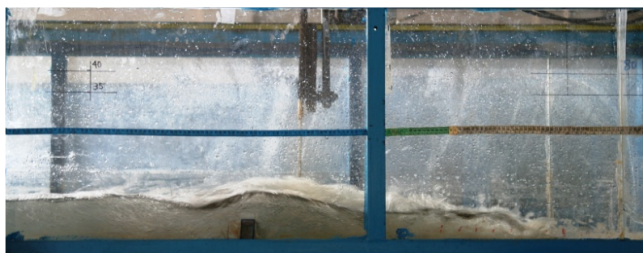
انتقال می‌یابد و این تفاوت در ارتفاع‌های بیشتر آبیاه و فاصله قرارگیری کمتر نسبت به پنجه پرش بیشتر نمایان است و ممکن است مسئله فرسایش پایین دست نیز مطرح شود. شاید بتوان دلیل این امر را افزایش بیشتر گرداب‌های سطحی (گرداب‌های ناحیه ۱) قبل از آبیاه عریض تر و ایجاد یک ناحیه گردابی شدید و فشرده تر پشت آبیاه (گرداب‌های ناحیه ۲) دانست (۱۰) که به یک افزایش  $m$  و در پی آن کاهش شدیدتر  $y_2$  نسبت به اشکال دیگر آبیاه می‌انجامد (اشکال ۴ و ۵ و ۶). البته این تفاوت در اعداد فرود پایین نسبت به فرود بالا بیشتر نمایان است که این امر بیشتر به علت وجود انرژی جنبشی بیشتر جریان در مقطع ثانویه می‌باشد و در این حالت آب، در برخورد با آبیاه عکس العمل بیشتری در افزایش یا کاهش عمق از خود نشان می‌دهد.

شکل ۷ در مقایسه حد سرریزی آبیاه انتهایی ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنیم اکثر داده‌های آزمایش ما زیر نمودار برتز (۳) (یعنی حد سرریزی از نظر برتز) قرار گرفته است. با این حال تفاوتی که مشاهده می‌شود، عمدتاً بر می‌گردد به این‌که برای ایجاد یک عدد فرود ثابت در کانال‌های عریض تر، دبی در واحد عرض بیشتری لازم است و باعث

## نتایج و بحث

### ۱. بررسی نوع پرش هیدرولیکی تشکیل شده

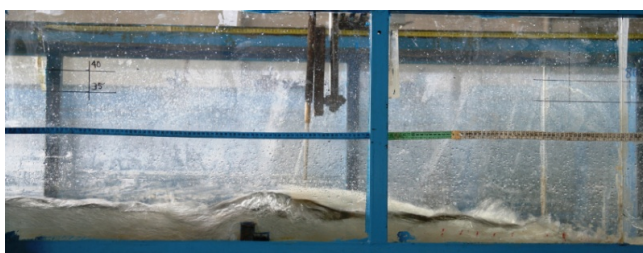
از آنجایی که در این تحقیق هدف اصلی مقایسه و بررسی پارامترهای هیدرولیکی پرش با اشکال مختلف آبیاه انتهایی می‌باشد، از ابتدا سعی بر آن شد که با در نظر گرفتن محدوده مناسب ارائه شده توسط محققین قبلی، پرش‌های نوع B یعنی پرشی که آب از روی آبیاه انتهایی با یک الگوی منظم قوس دار عبور می‌کند خطر فرسایش پایین دست آبیاه وجود ندارد، ایجاد شود. همان‌طور که قبلاً اشاره کردیم با خارج شدن پرش از حالت B و نزدیک شدن به حالت‌های C، Bmin و سپس D، افزایش عمق آب قبل از آبیاه و سپس فروریزش آب پس از آن شدیدتر خواهد بود. پس از انجام آزمایش‌ها و رسم نمودارهای بدون بعد  $h/L_B$  در مقابل نسبت بدون بعد اختلاف عمق قبل و بعد از آبیاه نسبت به حالت کلاسیک (شکل ۳)، این نتیجه حاصل شد که محدوده‌های ارائه شده توسط محققین قبلی (۵) برای ایجاد پرش نوع B فقط برای آبیاه کم عرض صادق است و برای آبیاه عریض تر (مقطع مربعی و سپس پلکانی) برخی از پرش‌ها از حالت B خارج شده و به سمت Bmin و حتی C (در موارد اندک)



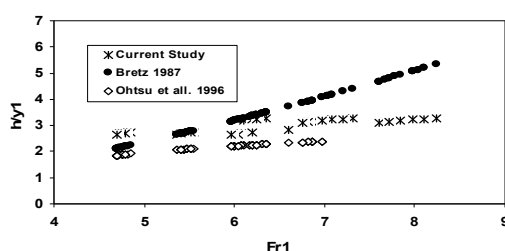
شکل ۴. پرش تثبیت شده توسط آبیایه انتهایی با مقطع کم عرض مستطیلی  
( $L_B = 110\text{cm}$  و  $h = 6\text{cm}$ ،  $Fr_1 = 4/76$ ،  $Q = 35\text{LPS}$ )



شکل ۵. پرش تثبیت شده توسط آبیایه انتهایی با مقطع عریض مربعی  
( $L_B = 110\text{cm}$  و  $h = 6\text{cm}$ ،  $Fr_1 = 4/79$ ،  $Q = 35\text{LPS}$ )



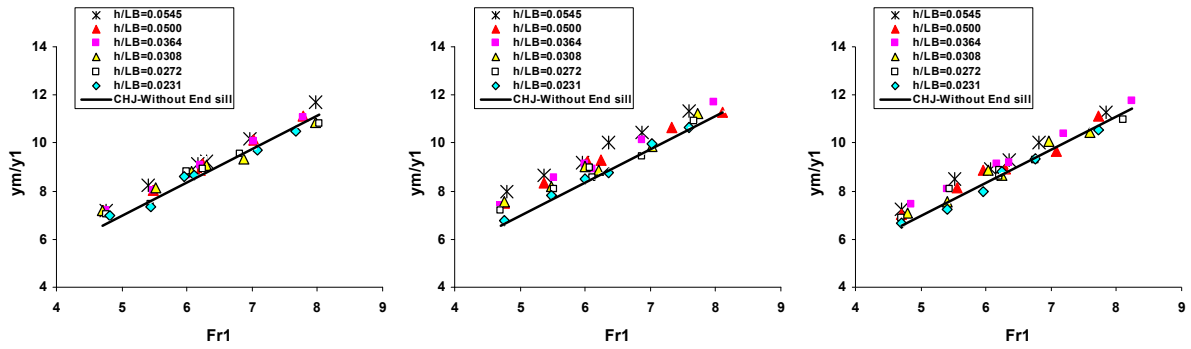
شکل ۶. پرش تثبیت شده توسط آبیایه انتهایی با مقطع عریض پلکانی  
( $L_B = 110\text{cm}$  و  $h = 6\text{cm}$ ،  $Fr_1 = 4/69$ ،  $Q = 35\text{LPS}$ )



شکل ۷. مقایسه مقادیر آزمایشگاهی ارتفاع آبیایه برای قرار نگرفتن در حالت سرریزی

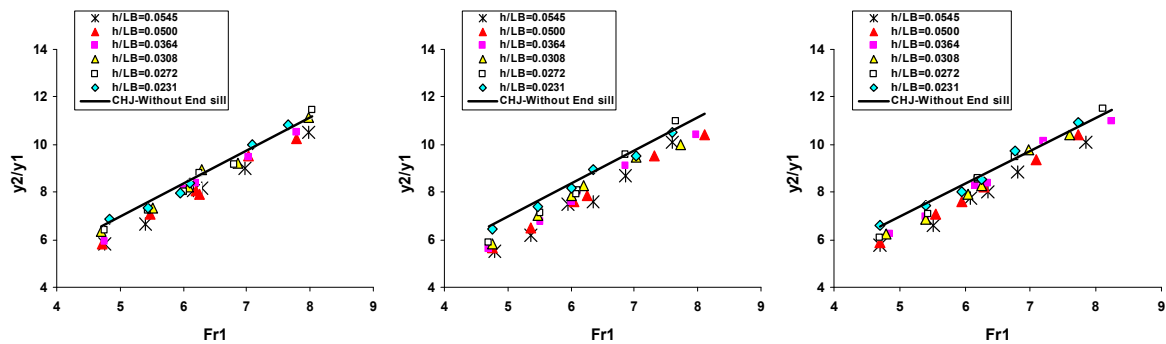
۲. بررسی عمق نسبی ماکزیمم و عمق مزدوج پرش هیدرولیکی اشکال ۸ و ۹ به ترتیب عمق نسبی ماکزیمم در مقابل عدد فرود اولیه و نسبت اعماق مزدوج پرش در مقابل عدد فرود اولیه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل‌های ذکر شده برمی‌آید، با نصب آبیایه انتهایی بلندتر و نزدیک‌تر با هر مقطع عرضی، عمق

افزایش حد سرریزی می‌گردد. این تفاوت را در داده‌های آزمایشی تحقیق حاضر با عرض کانال ۷۰/۵ سانتی‌متر و اوتسو (۹) با عرض کانال ۴۰ سانتی‌متر مشاهده می‌شود چراکه همه داده‌ها بالاتر از مقادیر اوتسو قرار گرفته‌اند.



شکل ۸. مقایسه عمق نسبی ماکزیمم پرش هیدرولیکی،

به ترتیب از چپ به راست آبپایه کم عرض (مستطیلی) و آبپایه عریض (مربعی و پلکانی)



شکل ۹. مقایسه نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی،

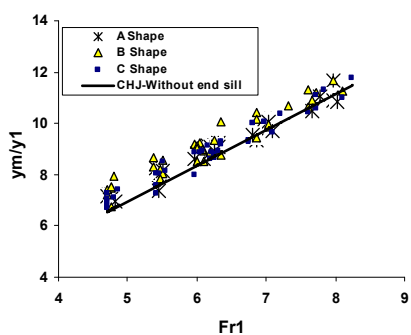
به ترتیب از چپ به راست آبپایه کم عرض (مستطیلی) و آبپایه عریض (مربعی و پلکانی)

آبپایه‌ها با مقاطع عرضی مختلف (مستطیلی، مربعی و پلکانی) ترسیم شده است. همان‌طور که می‌بینیم افزایش در ماکزیمم عمق نسبی قبل از آبپایه و کاهش در عمق مزدوج پرش، در آبپایه با مقطع عریض‌تر (مربع شکل و سپس پلکانی) بیشتر از آبپایه کم عرض است. در توضیح این مطلب به ایجاد پرش‌های  $B_{min}$  در حالت استفاده از مقطع عریض مربعی شکل می‌شود اشاره کرد که در آنها فروریزش شدیدتر آب و کاهش بیشتر عمق ثانویه را خواهیم داشت.

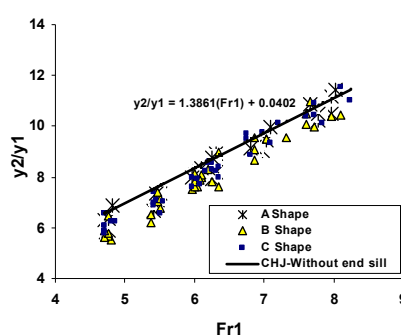
### ۳. بررسی طول نسبی پرش هیدرولیکی

در این راستا ابتدا داده‌های پرش کلاسیک با رابطه (۵) که توسط هاگر (۷) ارائه شده، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. نزدیکی این داده‌ها بیانگر این است که ملاک عمل در این تحقیق در اندازه‌گیری طول پرش صحیح بوده است.

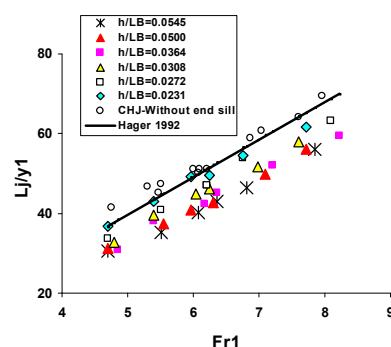
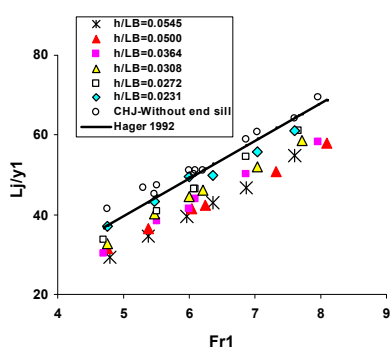
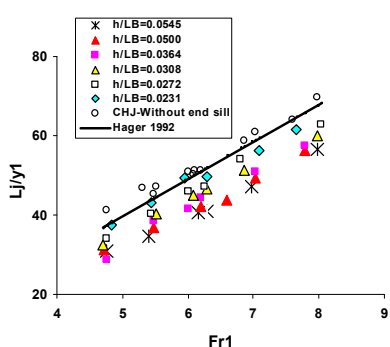
ماکزیمم قبل از آبپایه افزایش بیشتر و عمق ثانویه پرش در مقایسه با پرش کلاسیک به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد که این میزان افزایش در عمق ماکزیمم و کاهش در عمق ثانویه پرش، با افزایش عدد فرود، کاهش می‌یابد. همان‌طور که قبلاً اشاره کردیم، با توجه به این‌که انرژی جنبشی جریان در طول پرش در اعداد فرود اولیه بالاتر کاهش بیشتری پیدا می‌کند، در رویارویی جریان با آبپایه، افزایش کمتر عمق ماکزیمم قبل از آبپایه و کاهش کمتر نسبت اعماق مزدوج نسبت به حالت کلاسیک، منطقی است. در مقایسه آبپایه در دو فاصله مختلف نسبت به پنجه پرش بهتر است به اثر توأم ارتفاع آبپایه و فاصله آن از پنجه پرش اشاره کنیم چراکه با این‌که انتظار می‌رود آبپایه نزدیک‌تر در همه اشکال نقش بیشتری در کاهش نسبت اعماق مزدوج داشته باشد، اما آبپایه‌های کوتاه و نزدیک، نقشی در اعماق ثانویه پرش ندارند و مقادیری مشابه پرش کلاسیک ایجاد می‌شود. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ در مقایسه



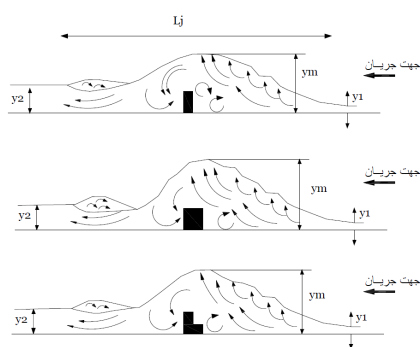
شکل ۱۱. مقایسه عمق نسبی ماکزیمم پرش هیدرولیکی با بکارگیری آبیاه انتهایی



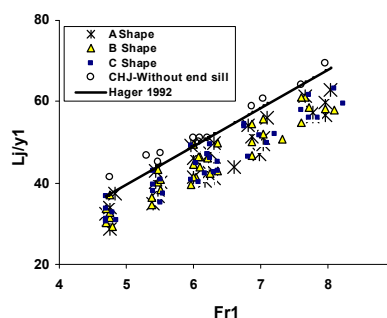
شکل ۱۰. مقایسه نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی با بکارگیری آبیاه انتهایی



شکل ۱۲. مقایسه طول پرش هیدرولیکی، به ترتیب از چپ به راست آبیاه کم عرض (مستطیلی) و آبیاه عرض (مربعی و پلکانی)



شکل ۱۴. نمایشی از تغییرات حجم پرش با سه شکل مختلف آبیاه

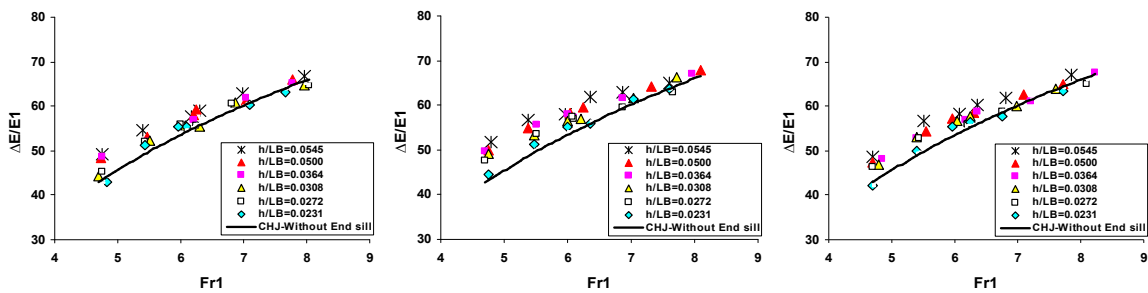


شکل ۱۳. مقایسه طول پرش هیدرولیکی با بکارگیری آبیاه انتهایی

هیدرولیکی خواهیم داشت و این درحالی است که تفاوت قابل توجهی در طول پرش با به کار بردن سه شکل مختلف آبیاه مشاهده نمی شود (شکل ۱۳) و اختلاف مقادیر  $y_m$  و  $y_2$  بر روی حجم پرش اثر می گذارد. بنابراین در آبیاه عرض تر (مقطع مستطیلی و سپس پلکانی) افزایش بیشتری در حجم پرش خواهیم داشت (شکل ۱۴).

$$\frac{L_j}{y_1} = 22 \cdot \tanh\left(\frac{Fr_1 - 1}{22}\right) \quad 4 \leq Fr_1 \leq 12 \quad [5]$$

همان گونه که از شکل ۱۲ برمی آید در آبیاه های کوتاه تر و دورتر طول پرش نسبت به حالت کلاسیک تفاوت چندانی ندارد و با افزایش ارتفاع آبیاه و کاهش فاصله قرارگیری آن نسبت به پنجه پرش، کاهش قابل توجهی در طول پرش



شکل ۱۵. مقایسه افت انرژی پرش هیدرولیکی، به ترتیب از چپ به راست آبپایه کم عرض (مستطیلی) و آبپایه عرضی (مربعی و پلکانی)

مقایسه مقادیر افت نسبی انرژی با بکارگیری اشکال مختلف آبپایه می‌توان گفت که آبپایه انتهایی با مقطع عرضی تر (مربعی و سپس پلکانی) افت انرژی بیشتری نسبت به مقطع کم عرض ایجاد می‌گردد و این مطلب نیز، در اعداد فرود پایین‌تر نمایان‌تر است.

باتوجه به کاهش بیشتر عمق ثانویه پرش در این شکل آبپایه و این‌که در محاسبه انرژی، عمق آب نقش بیشتری را در معادله انرژی بازی می‌کند تا ارتفاع معادل سرعت یعنی  $v^2/2g$ ، با این‌که کاهش بیشتر عمق ثانویه افزایش بیشتر سرعت در مقطع ثانویه را در پی دارد، اما این افزایش در مقابل کاهش عمق بسیار ناچیز است و به‌طور کلی با کاهش عمق ثانویه، کاهش انرژی ثانویه و افزایش افت نسبی را خواهیم داشت.

### نتیجه‌گیری

۱. در تحقیق حاضر بیشترین افزایش در ماکزیمم عمق نسبی قبل از آبپایه انتهایی و بیشترین کاهش در نسبت اعماق مزدوج پرش و بیشترین افت انرژی نسبت به حالت کلاسیک، در آبپایه انتهایی با مقطع عرضی مربعی شکل با نسبت  $h/L_B = 0.054$  به ترتیب در حدود  $23/5$  و  $16/7$  و  $10/5$  درصد حاصل گردید که در این مورد می‌توان به ایجاد پرش‌های  $B_{min}$  و در بعضی از موارد، پرش نوع C اشاره کرد که در آنها به علت افزایش گرداب‌های سطحی، انحای خطوط جریان از روی آبپایه بیشتر شده و فروریزش آب شدیدتر خواهد بود. هم‌چنین استفاده از آبپایه با هر مقطع عرضی، در حالت  $h/L_B = 0.023$

### ۴. بررسی افت نسبی انرژی در اثر بکارگیری آبپایه

برای محاسبه افت انرژی در حالت پرش کلاسیک، از رابطه (۶) که توسط بلانگر (۲) ارائه شده بود، با نوشتن معادله انرژی بین مقطع اولیه و ثانویه پرش استفاده کردیم که در آن ضریب تصحیح انرژی جنبشی که از رابطه (۷) قابل محاسبه می‌باشد.

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \left( \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + d_1 + Z_1 \right) - \left( \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + d_2 + Z_2 \right) \quad [6]$$

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n v_i^3 \Delta A_i}{v^3 A} \quad [7]$$

از آنجایی که در آزمایشات این تحقیق عمق اولیه پرش بسیار کم (کمتر از  $2/5$  سانتی‌متر) بود و امکان اندازه‌گیری سرعت در اعماق مختلف آن وجود نداشت، با اندازه‌گیری عمق اولیه توسط عمق‌سنج، سرعت میانگین در مقطع اولیه پرش از رابطه پیوستگی محاسبه گردید و با در نظر گرفتن مقدار  $\alpha_1$  برابر با یک، سرعت میانگین به عنوان سرعت در مقطع اولیه در نظر گرفته شد. سپس با داشتن مقادیر سرعت در اعماق مختلف در مقطع ثانویه، مقدار  $\alpha_2$  را در اعداد فرود مختلف محاسبه و در رابطه (۶) جایگزین که پس از رسم مقادیر افت نسبی انرژی در مقابل اعداد فرود در حالت کلاسیک، رابطه (۸) حاصل گردید.

$$R^2 = 0.994 \frac{\Delta E}{E_1} = 44/282 \ln(Fr_1) - 25/599 \quad [8]$$

همانگونه که از شکل ۱۵ نتیجه می‌گردد در مقایسه افت انرژی می‌توان گفت با هر شکل آبپایه انتهایی، با افزایش ارتفاع و کاهش فاصله نسبت به پنجه پرش افت انرژی بیشتری حاصل می‌گردد و این موضوع در اعداد فرود پایین‌تر نمایان‌تر است. در

و افت انرژی بیشتری نیز ایجاد می‌گردد، زیرا همان‌طور که قبلاً نیز اشاره کردیم، در این نوع آبپایه برخی پرش‌ها از حالت نوع B خارج شده و به سمت Bmin و یا حتی C می‌رود که به نظر می‌رسد این نوع آبپایه رنج عددی جدیدی از نسبت  $h/L_B$  برای تعیین نوع پرش برای خود داشته است. لازم به ذکر است که هرچه پرش‌ها از حالت نوع B خارج‌شده و به سمت حالت‌های Bmin و C رود، خطر فرسایش پایین دست آبپایه افزایش می‌یابد. باین‌حال ارائه نتیجه قطعی‌تر، مستلزم انجام آزمایش‌های بیشتر با آبپایه‌های انتهایی عریض‌تر، در محدوده پرش نوع C و یا حتی D و در صورت امکان اندازه‌گیری عمق فرسایش در پایین‌دست آبپایه و نسبت‌دادن اعداد آن به نوع پرش می‌باشد. حال آن‌که انتخاب نهایی نوع آبپایه انتهایی باتوجه به حجم عملیات بتن‌ریزی و مسائل مربوط به پایداری و فرسایش پایین‌دست آن، به عهده طراح خواهد بود.

کارایی لازم را نداشته و مواردی شبیه پرش کلاسیک ایجاد می‌گردد.

۲. در تعیین بهترین و کاراترین محدوده  $h/L_B$  آبپایه انتهایی جهت ایجاد پرش‌های نوع B، در نظر گرفتن عدد فرود اولیه جریان هم ضروری است چرا که در فرودهای بالا ( $Fr_1 \geq 6$ ) به‌علت کاهش بیشتر انرژی در طول پرش و نیز کم‌تر بودن انرژی جنبشی جریان در مقطع ثانویه پرش، اثر آبپایه انتهایی در همه موارد بر روی پارامترهای پرش کاهش یافته است.

۳. بیشترین کاهش در طول پرش هیدرولیکی مربوط به آبپایه‌های انتهایی ۶ سانتی در فاصله ۱۱۰ سانتی‌متری (حدود ۱۴ درصد) می‌باشد و در این مورد تفاوت قابل توجهی در طول پرش، با بکاربردن سه شکل مختلف آبپایه انتهایی مشاهده نمی‌گردد.

۴. در یک دیدگاه کلی آبپایه‌های انتهایی عریض‌تر (مربعی و سپس پلکانی) نسبت به آبپایه انتهایی کم‌عرض (مقطع مستطیلی) اثر بیشتری در پارامترهای پرش از خود نشان داده‌اند

## منابع مورد استفاده

1. Alikhani A., Behrozi-Rad R. and M. fathi moghadam. 2010 . Hydraulic Jump in Stilling Basin with Vertical End Sill. J. of Physic Sci. 5:25-29.
2. Belanger, J.B. 1828. Essay on numerical solution of some problems relative to steady flow of water. Carilan-Geoury, Paris, France. In: Chow, V.T. 1964. Open Channel hydraulics, New York, McGraw-Hill Book Co. Inc. PP. 37-43.
3. Bretz, N.V. 1987. Ressaut hydraulique force par seuil. These No. 699, Ecole Ploytechnique Federrale de Lausanne, Suisse. In: Hager, W. H. and Li, D. 1992. Sill-Controlled energy dissipater. J. of Hydraulic Division 30: 165-181.
4. Demetriou J.D. 2010. A Mechanical Energy Losses Comparison in Inclined Hydraulic Jump over a Thin Wall and a Step., J. of Hydro. 22: 687-691.
5. Fathi moghadam M., S. Haghightpour, B. Lashkar-Ara, p. Aghtouman. 2011. Reduction of Stilling Basin Length with Tall End Sill. J. of Hydro. 23: 498-502.
6. Hager, W. H., and D. Li. 1992. Sill-Controlled energy dissipater. J. of Hydraulic Division. 30: 165-181.
7. Narayanan, R., and L. S. Schizas, 1980. Force Fluctuations on sill of Forced Hydraulic Jump. J. of Hydraulic Division, ASCE 106: 589-599.
8. Ohtsu, I. 1981. Forced Hydraulic Jump by a vertical sill. Hydraulic and Sanitary Engineering Division, ASCE. 13: 165-168.
9. Ohtsu, I., Yasuda, Y., and H. Hashiba. 1996. Incipient Jump Condition for flows Over a Vertical Sill, Journal of Hydraulic Division, ASCE 122: 465-469.
10. Rand, W. 1965. Flow Over a Vertical Sill in an Open Channel. J. of Hydraulic Division, ASCE 91: 97-121.
11. Rand, W. 1967. Flow Over a Dentaited Sill in an Open Channel. J. of Hydraulic Division, ASCE 9: 135-153.
12. Shukry, A. 1957. The Efficiency of Floor sill Under Droened Hydraulic jump. J. of Hydraulic Engineering, ASCE 83: 1-18.