ارزیابی تأثیرآبپایه انتهایی با اشکال متفاوت بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی

آلاله احمدی و تورج هنر[1*]

(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 آبپایه انتهایی با اشکال متفاوت بر ویژگی‌های هیدرولیکی پرش در یک حوضچه آرامش مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها برای سه شکل مختلف آبپایه انتهایی به‌صورت 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 آبپایه انتهایی با مقطع عریض‌تر (مربعی و سپس پلکانی) اثر بیشتری در کاهش اعماق مزدوج پرش و افزایش افت انرژی نسبت به آبپایه انتهایی کم‌عرض خواهد داشت. اگرچه در این نوع آبپایه‌ها، فرو ریزش آب شدیدتر و خطر فرسایش در پایین دست بیشتر می‌باشد.

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

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-07-04]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.13.2]

مقدمه

پرش هیدرولیکی از انواع جریان‌های متغیر سریع است که در آن عمق جریان در مسیر نسبتاً کوتاهی به‌میزان 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 به‌دلیل شیب زیاد رودخانه پرش تمایل دارد به سمت پایین‌دست حرکت کند، تثبیت پرش در حوضچه آرامش بعضاً مستلزم حفاری و گود برداری‌های عمیق می‌باشد. لذا محققین را به‌سمت 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 به‌صورت 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 (h ارتفاع دیواره و y_1 عمق اولیه پرش است) و هم‌چنین عمق آب در پایاب در چگونگی شکل‌گیری جریان عبوری از روی دیواره مؤثرمی باشد. رند (۱۰) به‌بررسی 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 به‌دلیل 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 به‌مقایسه میزان افت انرژی روی تک‌دیواره‌های ممتد و دندانه‌دار به‌کار رفته در طول پرش هیدرولیکی پرداخت و نتیجه گرفت دیواره‌های ممتد نسبت به‌دیواره‌های دندانه‌دار افت انرژی بیشتری را ایجاد می‌کنند. نارایانان و شویزاس (۷) به‌بررسی ضریب دراگ وارد بر دیواره در مسیر پرش پرداختند و به‌این 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، به‌صورت 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 به‌دست آورد. پس از آن برتز(۳) با در نظر گرفتن عمق پایاب در حالت‌های مختلف، به‌نحوه ریزش آب و شکل پروفیل سطح آب بر روی آبپایه پرداخت و پرش‌های ایجادشده را به انواع A ، B، Bmin ، 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 به‌سمت 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 Bmin 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 Bmin مرز سر ریز بودن امواج غلتان از روی آبپایه خواهد بود.

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-07-04]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.13.2]

شکل ۱. انواع گرداب در تشکیل پرش با وجود دیواره

مناسب پایاب، اثر ارتفاع آبپایه را در طبقه‌بندی انواع پرش مورد بررسی قرار داد و پرش‌ها با ویژگی ظاهری یکسان با طبقه‌بندی فوق را، در یک دسته قرار داد. براساس نتایج وی، آبپایه‌های بسیار کوتاه اثری بر روی پرش ندارند و حالتی شبیه پرش نوع A اتفاق می افتد. با افزایش ارتفاع آبپایه، ارتفاع غلتاب‌های زیرین افزایش می‌یابد، الگوی جریان از روی آبپایه قوس‌دار می‌شود و حالتی شبیه پرش نوع B اتفاق می‌افتد و به‌همین ترتیب با افزایش بیشتر ارتفاع آبپایه، الگوی جریان روی پایه قوس‌دارتر می‌شود و سطح آب بعد از آبپایه سقوط می‌کند (حالتی شبیه Bmin و سپس C) و در حالت D نیز آبپایه انتهایی آنقدر بلند است که موج‌های غلتان پرش کاملاً از روی آن گذشته و روی بستر کانال می ریزند. وی با در نظر گرفتن ارتفاع‌های مختلف، مقدار $h/y_1=\left[\sqrt{6}\left(Fr^{1/645}\right)\right]$ را برای حد سرریزی بودن آبپایه انتهایی ارائه داد. هاگر و لی (٦) برای نسبت اعماق مزدوج در پرش‌های تحت تأثیر آبپایه انتهایی رابطه‌ای را ارائه دادند که در آن اثر آبپایه انتهایی به‌صورت پارامتری که خود متأثر از محل قرارگیری آبپایه و نوع پرش بود، از نسبت اعماق مزدوج درحالت کلاسیک کاسته می‌شد. اوتسو و همکاران (۹) نیز با بکارگیری ارتفاع‌های مختلف آبپایه انتهایی و استفاده از رابطه اندازه حرکت و در نظر گرفتن نیروهای وارد بر دیواره، روابطی را برای حد سرریزشدن 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 اختلاف نتایج به‌دلیل 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 ۱/۲ تا ۵/۵ با بکارگیری آبپایه‌های انتهایی با شرایط ($2 \le S = h/y_1 \le 8$)،انجام دادند و نهایتاً در پرش‌های ایجادشده از نوع C و D به‌طور میانگین به یک کاهش ۳۰ درصدی در طول حوضچه دست یافتند و رابطه $3(y_2-y_1) \le L_B \le 5(y_2-y_1)$ را برای محل مناسب قرارگیری آبپایه (L_B) برای اتفاق افتادن پرش نوع B ارائه دادند. فتحی‌مقدم و همکاران (۵) نیز در محدوده $0/02 \le h/L_B \le 0/14$ اقدام به ایجاد همه انواع پرش کردند و در نهایت مقادیر $0/02 \le h/L_B \le 0/06$ 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 ۰/۵- تا ۰/۵+ تغییر می‌کند. y_m (عمق آب ماکزیمم قبل از آبپایه انتهایی، y_2^* عمق ثانویه در حالت پرش کلاسیک و y_2 عمق ثانویه پرش در اثر بکارگیری آبپایه انتهایی می‌باشد).

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-07-04]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.13.2]

پژوهش‌های قبلی و طراحی بهینه این حوضچه‌ها برداریم.

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 (π(B)، لزجت کینماتیکی آب (μ)، سرعت اولیه جریان (v_1)، جرم مخصوص آب (ρ)، 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 به‌صورت رابطه (۱) بیان نمود که سپس با استفاده از روش باکینگهام می‌توان رابطه (۲) را ارائه نمود.

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

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

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 آشفته 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.

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

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

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.

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 وعرض 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 به‌ترتیب 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 قرارداشت 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 دوفاصله 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 پنچه 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 ۰/۱سانتی‌متر 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.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-07-04]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.13.2]

شکل ۲. مشخصات آبپایه‌های به‌کار رفته

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

نتایج و بحث

۱. بررسی نوع پرش هیدرولیکی تشکیل شده

از آنجایی‌که در این تحقیق هدف اصلی مقایسه و بررسی پارامترهای هیدرولیکی پرش با اشکال مختلف آبپایه 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 آبپایه انتهایی با یک الگوی منظم قوس‌دارعبور می‌کند خطر فرسایش پایین‌دست آبپایه وجود ندارد، ایجاد شود. همان‌طور که قبلاً اشاره کردیم با خارج‌شدن پرش از حالت B و نزدیک‌شدن به حالت‌های Bmin، C و سپس D ، افزایش عمق آب قبل از آبپایه 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 آبپایه نسبت به حالت کلاسیک (شکل۳)، این نتیجه حاصل شد که محدوده‌های ارائه‌شده توسط محققین قبلی (۵) برای ایجاد پرش نوع B فقط برای آبپایه کم‌عرض صادق است و برای آبپایه عریض‌تر (مقطع مربعی وسپس پلکانی) برخی از پرش‌ها از حالت B خارج شده و به‌سمت Bmin و حتی C (در موارد اندک) انتقال می‌یابد و این تفاوت در ارتفاع‌های بیشتر آبپایه و فاصله قرارگیری کمتر نسبت به پنجه پرش بیشتر نمایان است و ممکن است مسئله فرسایش پایین‌دست نیز مطرح شود. شاید بتوان دلیل این امر را افزایش بیشتر گرداب‌های سطحی (گرداب‌های ناحیه ۱) قبل از آبپایه عریض‌تر و ایجاد یک ناحیه گردابی شدید و فشرده‌تر پشت آبپایه (گرداب‌های ناحیه ۲) دانست(۱۰) که به یک افزایش y_m و در پی آن کاهش شدیدتر y_2 نسبت به اشکال دیگر آبپایه می‌انجامد (اشکال ۴و ۵ و ۶).البته این تفاوت در اعداد فرود پایین نسبت به فرود بالابیشترنمایان است که این امر بیشتر به‌علت وجود انرژی جنبشی بیشتر جریان در مقطع ثانویه می‌باشد و دراین حالت آب، در برخورد با آبپایه عکس‌العمل بیشتری درافزایش یا کاهش عمق از خود نشان می‌دهد.

شکل ۷ در مقایسه حد سرریزی آبپایه 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 این‌حال تفاوتی که مشاهده می‌شود، عمدتاً بر می‌گردد به این‌که برای ایجاد یک عدد فرود ثابت در کانال‌های عریض‌تر، دبی در واحد عرض بیشتری لازم است و باعث

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-07-04]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.13.2]

شکل۴. پرش تثبیت‌شده توسط آبپایه انتهایی با مقطع کم‌عرض مستطیلی

(L_B = ۱۱۰cm و h = ۶cm ، Fr_1 = ۴/۷۶ ، Q = ۳۵LPS)

شکل ۵. پرش تثبیت شده توسط آبپایه انتهایی با مقطع عریض مربعی

(L_B = ۱۱۰cm و h = ۶cm ، Fr_1 = ۴/۷۹ ، Q = ۳۵LPS)

شکل۶. پرش تثبیت‌شده توسط آبپایه انتهایی با مقطع عریض پلکانی

(L_B = ۱۱۰cm و h = ۶cm ، Fr_1 = ۴/۶۹ ، Q = ۳۵LPS)

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

افزایش حد سر ریزی 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.

۲. بررسی عمق نسبی ماکزیمم و عمق مزدوج پرش هیدرولیکی

اشکال ۸ و ۹ به‌ترتیب 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 ذکرشده برمی‌آید، با نصب آبپایه انتهایی بلندتر و نزدیک‌تر با هر مقطع عرضی، عمق

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-07-04]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.13.2]

شکل ۸. مقاسیه عمق نسبی ماکزیمم پرش هیدرولیکی،

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

شکل ۹. مقاسیه نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی،

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

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، باتوجه 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 بااین‌که 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 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 Bmin 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 قرارگرفته‌اند. نزدیکی این داده‌ها بیان‌گر این است که ملاک عمل در این تحقیق در اندازه‌گیری طول پرش صحیح بوده است.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-07-04]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.13.2]

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

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

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

شکل ۱۳. مقایسه طول پرش هیدرولیکی با بکارگیری آبپایه انتهایی

شکل ۱۴. نمایی از تغییرات حجم پرش با سه شکل مختلف آبپایه

$$\frac{L_j}{y_1} = 220\tanh\left(\frac{Fr_1 - 1}{22}\right) \qquad 4 \le Fr_1 \le 12 \qquad [5]$$

همان‌گونه که از شکل ۱۲ برمی‌آید در آبپایه‌های کوتاهتر و دورتر طول پرش نسبت به حالت کلاسیک تفاوت چندانی ندارد و با افزایش ارتفاع آبپایه و کاهش فاصله قرارگیری آن نسبت به پنجه پرش، کاهش قابل توجهی در طول پرش هیدرولیکی خواهیم داشت و این درحالی‌است که تفاوت قابل توجهی در طول پرش با به‌کار بردن سه شکل مختلف آبپایه مشاهده نمی‌شود (شکل ۱۳) و اختلاف مقادیر y_m و y_2 بر روی حجم پرش اثر می‌گذارد. بنابراین در آبپایه عریض‌تر (مقطع مستطیلی و سپس پلکانی) افزایش بیشتری در حجم پرش خواهیم داشت (شکل ۱۴).

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-07-04]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.13.2]

شکل ۱۵. مقاسیه افت انرژی پرش هیدرولیکی، به‌ترتیب از چپ به راست آبپایه کم عرض(مستطیلی) و آبپایه عریض (مربعی و پلکانی)

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 α ضریب تصحیح انرژی جنبشی که از رابطه (۷) قابل محاسبه می‌باشد.

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

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

از آنجایی که در آزمایشات این تحقیق عمق اولیه پرش بسیار کم (کمتر از ۲/۵ 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 α_1 برابر با یک، سرعت میانگین به‌عنوان سرعت در مقطع اولیه در نظر گرفته شد. سپس با داشتن مقادیر سرعت در اعماق مختلف در مقطع ثانویه، مقدار α_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.

$$R^2 = 0/994 \quad \frac{\Delta E}{E_1} = 44/282 Ln(Fr_1) - 25/599 \qquad [8]$$

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 مقایسه مقادیر افت نسبی انرژی با بکارگیری اشکال مختلف آبپایه می‌توان گفت که آبپایه انتهایی با مقطع عریض‌تر (مربعی و سپس پلکانی) افت انرژی بیشتری نسبت به مقطع کم‌عرض 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 بیشترسرعت در مقطع ثانویه را در پی دارد، اما این افزایش در مقابل کاهش عمق بسیار ناچیز است و به‌طورکلی 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 $h/L_B = 0/054$ به‌ترتیب در حدود ۲۳/۵ و ۱۶/۷ و ۱۰/۵ درصد حاصل گردید که در این مورد می‌توان به ایجاد پرش‌های Bmin و در بعضی از موارد، پرش نوع C اشاره کرد که در آنها به‌علت افزایش گرداب‌های سطحی، انحنای خطوط جریان از روی آبپایه بیشترشده و فروریزش آب شدیدتر خواهد بود. هم‌چنین استفاده از آبپایه با هر مقطع عرضی، درحالت $h/L_B = 0.023$

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-07-04]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.13.2]

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 کمتربودن 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 وسپس پلکانی) نسبت به آبپایه انتهایی کم‌عرض (مقطع مستطیلی) اثر بیشتری در پارامترهای پرش از خود نشان داده‌اند 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 به‌نظر 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. بااین‌حال 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.

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. Haghighatpour, 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.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2025-07-04]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.70.13.2]