

بررسی آزمایشگاهی اثر آبپایه بر خصوصیات پرش هیدرولیکی روی شیب معکوس

پرستو پارسامهر^{۱*}، علی حسینزاده دلیر^۲، داود فرسادیزاده^۳ و اکرم عباسپور^۴

چکیده

در پژوهش حاضر، خصوصیات پرش هیدرولیکی در یک کانال مستطیلی در دو حالت با کف افقی و با شیب معکوس به همراه آبپایه بررسی شده است. در مجموع ۸۴ آزمایش با سه ارتفاع آبپایه (s) و دو شیب معکوس ۱ و ۱/۵٪ برای بستر در محدوده اعداد فرود ۴/۶ تا ۷/۴ و محدوده نسبت عمق ثانویه $4/5 < y_2/y_1 < 9/6$ انجام شد. نتایج نشان داد نصب آبپایه طول پرش هیدرولیکی را در بستر با شیب افقی به طور متوسط ۶/۳ درصد و در بستر با شیب معکوس ۱/۵ درصد، ۴۶/۶ درصد کاهش می‌دهد. در مجموع به کارگیری آبپایه در حوضچه آرامش باعث تثبیت پرش روی شیب معکوس و بهبود خصوصیات پرش هیدرولیکی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع آبپایه، پرش هیدرولیکی، تثبیت پرش، حوضچه آرامش، شیب معکوس.

ارجاع: پارسامهر پ. حسینزاده دلیر ع. فرسادیزاده د. و عباسپور ا. ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی اثر آبپایه بر خصوصیات پرش هیدرولیکی روی شیب معکوس. مجله پژوهش آب ایران. ۷(۱۳): ۸۹-۹۶.

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۳- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۴- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

* نویسنده مسئول: parastoo.parsamehr@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۴/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۸/۱۸

مقدمه

خصوصیات بارز پرش هیدرولیکی باعث شده است که کاربردهای فراوانی در پایین دست سرریز سدها به عنوان مستهلک کننده انرژی، افزایش عمق جریان در کانال‌های آبیاری، استفاده از تلاطم ایجاد شده در این پدیده برای اختلاط هوا یا مواد شیمیایی با آب در تصفیه‌خانه‌ها داشته باشد. حوضچه‌های آرامش بستر مناسبی برای کنترل و تثبیت پرش در یک موقعیت مکانی خاص هستند. ابعاد حوضچه آرامش به مشخصات پرش هیدرولیکی به خصوص طول و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی بستگی دارد. کاربرد آبپایه، بلوک‌های ابتدایی یا میانی، بستر موج‌دار و به کارگیری پله مثبت و منفی انتهایی در حوضچه‌های آرامش باعث افزایش کارایی، کاهش عمق ثانویه و طول پرش می‌شود.

اولین مطالعه در زمینه کنترل پرش هیدرولیکی با یک آبپایه ممتد توسط شکری (۱۹۵۷) انجام شد. رند (۱۹۶۵) با قرار دادن یک آبپایه در مسیر جریان نشان داد که با افزایش ارتفاع آبپایه و کاهش فاصله قرارگیری آبپایه از ابتدای پرش، عمق آب در پایاب کاهش می‌یابد. همچنین وی در سال ۱۹۶۷ میزان افت انرژی روی آبپایه‌های ممتد و دنداندار را بررسی کرد و نتیجه گرفت که آبپایه ممتد نسبت به آبپایه دنداندار افت انرژی بیشتری را ایجاد می‌کند (بیرامی و ایلاقی حسینی، ۱۳۸۴).

ناریان و شوپزاس (۱۹۸۰) با قرار دادن یک دیواره در مسیر پرش، جریان را بر اساس تشکیل یا عدم تشکیل پرش در بالادست یا پایین دست دیواره و یا مستغرق شدن پرش، در محدوده اعداد فرود $3/99$ تا $9/09$ بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند ضریب نیروی رانش در صورت عدم تشکیل پرش مقدار حداکثر را داشته و تابعی از ارتفاع نسبی آبپایه و عدد فرود و مستقل از L_0/y_1 است. اوتسو (۱۹۸۱) شرایط جریان عبوری از آبپایه عمودی را به سه دسته تقسیم کرد: پرش نوع ۱ که در آن وضعیت بالادست آبپایه تحت تأثیر عمق پایاب است، پرش نوع ۲ که وضعیت بالادست آبپایه تحت تأثیر شرایط پایین دست نیست و حالت سوم این که جریان آزاد به آبپایه برخورد کرده و پرش تشکیل نمی‌شود.

برتر (۱۹۸۷) بر اساس نتایج آزمایشگاهی خود، جریان عبوری از آبپایه را به پنج دسته A، B، B_{min} ، C و پرش از نوع جریان موجی تقسیم‌بندی کرد. هاگر و لی (۱۹۹۲) اثر

آبپایه لبه تیز را بر روی پرش هیدرولیکی در یک کانال مستطیلی تا حداکثر عدد فرود ۷ بررسی کردند. در این پژوهش از آبپایه‌های با ارتفاع $1/25$ ، $2/5$ ، $3/8$ ، 5 و $7/5$ و ۱۰ سانتی‌متر استفاده شد. این دو پژوهشگر بر اساس فرضیات برتر (۱۹۸۷) و بر اساس شرایط هیدرولیکی و فرسایشی، پرش روی آبپایه لبه تیز را به پنج نوع A، B، B_m ، C و جریان موجی طبقه‌بندی کردند. آشور و دیباچه (۲۰۰۳) کنترل پرش هیدرولیکی با آبپایه لبه تیز و لبه پهن در داخل کانال U شکل را در محدوده اعداد فرود $2/5$ تا ۹ بررسی کردند و با مقایسه روابط تئوری و تجربیات آزمایشگاهی حداقل ارتفاع آبپایه‌های لبه پهن را به صورت تابعی از قطر کانال (D) و $h_1=y_1/D$ (نسبت عمق اولیه پرش بر قطر کانال) ارایه کردند. کنترل پرش هیدرولیکی با استفاده از یک و دو آبپایه در حوضچه آرامش افقی توسط بیرامی و ایلاقی حسینی (۱۳۸۴) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که چنانچه دو آبپایه در مسیر پرش قرار گیرد، در صورتی که ارتفاع آبپایه دوم نسبتاً بلندتر از ارتفاع آبپایه اول باشد، در مقایسه با حالت قرارگیری آبپایه اول به تنهایی، عمق ثانویه کاهش یافته و افت انرژی افزایش می‌یابد، اما طول گرداب پرش افزایش می‌یابد. دیباچه و آشور (۲۰۰۷) به بررسی خصوصیات پرش کنترل شده با آبپایه در محدوده اعداد فرود $1/6$ تا ۱۱ پرداختند. در این پژوهش اثر آبپایه‌های لبه تیز و لبه پهن روی عمق مزدوج نسبی مشاهده و روابطی ارایه شد.

پرش در حوضچه‌های با شیب معکوس در ابتدا توسط رز (۱۹۳۸) و استیونس (۱۹۴۴) مطالعه شد (بیرامی و چمنی، ۲۰۰۶). خدر و راجاگوپال (۱۹۷۲) برای بررسی تحلیل استیونس آزمایش‌هایی بر روی شیب منفی انجام دادند و بر اساس نتایج آن‌ها پرش هیدرولیکی روی شیب‌های تندتر از شیب معکوس $0/25$ تثبیت نمی‌شود. ابریشمی و صانعی (۱۹۹۴) آزمایش‌هایی روی شیب‌های معکوس تا $2/5$ در محدوده اعداد فرود ۲ تا ۱۰ انجام دادند. نتایج تجربی و تحلیل‌های مربوطه نشان دادند که امکان ایجاد پرش پایدار روی شیب‌های منفی وجود دارد. این پایداری تابعی است حداقل از عدد فرود اولیه، عمق پایاب و طول حوضچه می‌باشد. همچنین با افزایش شیب معکوس طول عمق مزدوج نسبی پرش هیدرولیکی معکوس در مقایسه با پرش کلاسیک کاهش می‌یابد. پژوهش‌های آزمایشگاهی اسماعیلی و ابریشمی (۱۳۸۰) روی پرش هیدرولیکی روی

متر، در فاصله ۲/۲۱ متری از دریچه کشویی که دیواره کانال شیشه‌ای بوده و امکان اندازه‌گیری پروفیل‌های عمق و سرعت وجود داشت، قرار گرفت. موقعیت پرش به کمک دریچه کشویی در انتهای فلوم به گونه‌ای تنظیم شد که ابتدای پرش در فاصله ۳۴ سانتی‌متری از محل قرارگیری آبپایه، که در فاصله نیم‌متری از ابتدای حوضچه آرامش نصب شده بود، باشد. در هر آزمایش ابتدا شیب بستر تنظیم و آبپایه در محل مورد نظر نصب شده و سپس برای مقادیر دبی مشخص، پارامترهای هیدرولیکی پرش نظیر عمق اولیه، عمق ثانویه و طول پرش و سرعت جریان اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری دبی با استفاده از سرریز مثلی لبه تیز واسنجی شده که در انتهای فلوم تعبیه شده بود، انجام گرفت. محدوده دبی جریان از ۱۴/۶ تا ۱۸/۹ لیتر بر ثانیه بوده و عدد فرود اولیه در محدوده ۴/۶ تا ۷/۴ قرار داشت. عمق آب با استفاده از عمق‌سنج با دقت $\pm 0/1$ میلی‌متر و عکس‌برداری دیجیتالی از پرش هیدرولیکی و رقومی کردن آن با نرم‌افزار Grafer5 اندازه‌گیری و میانگین دو مقدار به دست آمده به عنوان عمق آب در محل مورد نظر ثبت شد. طول پرش هیدرولیکی از طریق اشل نواری نصب شده روی بدنه فلوم و پروفیل سرعت با استفاده از سرعت‌سنج پره‌ای میکرو با دقت $0/1$ سانتی‌متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. نمایی از فلوم و تجهیزات آن در شکل ۱ دیده می‌شود.

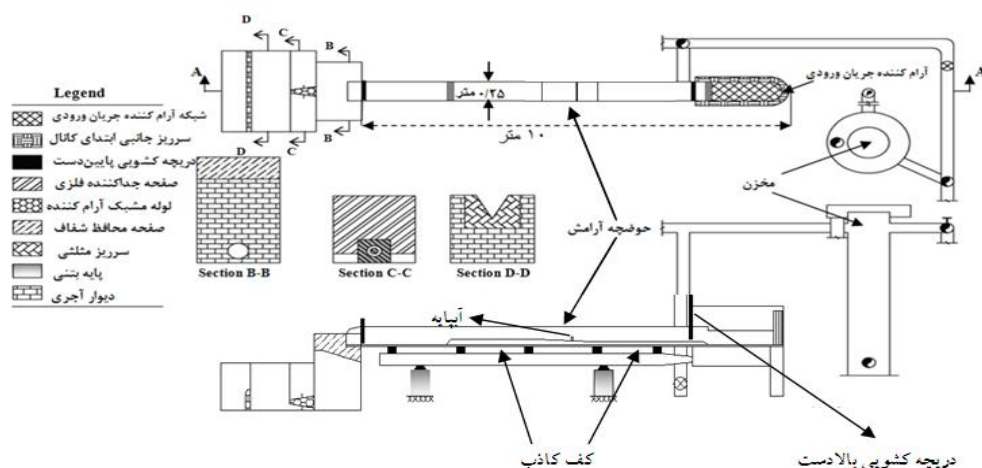
آبپایه‌های به کار رفته در این پژوهش از جنس چوب با مقطع مستطیلی با ۳ ارتفاع ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ سانتی‌متر و ضخامت ۲ سانتی‌متر هستند (شکل ۲).

شیب معکوس با پله مثبت و منفی که در آن پله‌ها شامل دو ارتفاع ۲/۵ و ۵ سانتی‌متر در مسیر پرش روی شیب‌های منفی ۰/۵، ۱، ۱/۳ و ۲ درصد قرار گرفته‌اند، نشان دادند که وجود پله مثبت و منفی در شیب معکوس نقش مهمی در ایجاد پرش پایدار در شیب‌های معکوس داشته و باعث کاهش بیشتر طول پرش هیدرولیکی و عمق ثانویه می‌شود و پله منفی در جهت پایداری و ایجاد پرش تثبیت شده به طور قابل ملاحظه‌ای مؤثر است. پرش هیدرولیکی از دیدگاه تئوری و آزمایشگاهی در کانال‌های مستطیلی روی شیب معکوس کنترل شده به وسیله آبپایه، توسط پاگلیرا و پراگینلی (۲۰۰۰) مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها روی چهار شیب معکوس ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد و آبپایه‌های با ارتفاع ۱، ۲ و ۳ سانتی‌متر برای هر شیب انجام شد. تثبیت پرش هیدرولیکی توسط آبپایه‌ها انجام شد.

با توجه به این‌که در زمینه نقش آبپایه در پرش هیدرولیکی روی بسترهای با شیب معکوس اطلاعات موجود اندک بوده لذا در این پژوهش تأثیر آبپایه روی خصوصیات پرش در حوضچه‌های آرامش با شیب کف معکوس بررسی شد.

مواد و روش‌ها

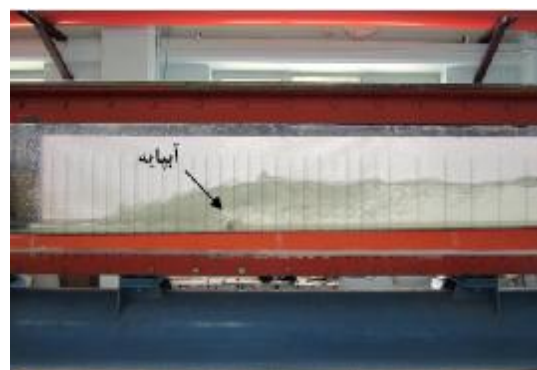
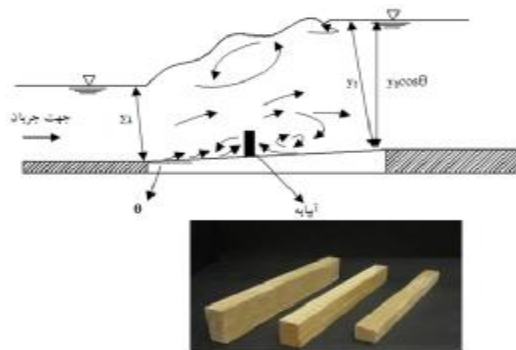
آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز در فلومی به طول ۱۰ متر، عرض ۲۵ سانتی‌متر، ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر و شیب کف ۰/۰۰۲ انجام گرفت. در همه آزمایش‌ها بازدهی دریچه ثابت و برابر ۳ سانتی‌متر بود. با تغییر دبی، پرش هیدرولیکی در اعداد فرود مختلف ایجاد شد. حوضچه آرامش به طول ۱/۴۹



شکل ۱- پلان سیستم تأمین آب و اجزای تجهیزات فلوم در آزمایشگاه هیدرولیک

جدول 1- محدوده پارامترهای بی بعد

پارامترهای بی بعد	دامنه تغییرات
Fr_1	۴/۶-۷/۴
Re_1	۵۷۶۷۳-۷۴۹۸۳
s/L_s	۰/۰۴ , ۰/۰۷ , ۰/۱
y_2/y_1	۴/۵ - ۹/۶
θ	۰-۰/۸۶°



شکل 2- نمای آبپایه‌های آزمایش شده

با استفاده از معادله ۳ می توان عمق مزدوج نسبی و طول نسبی پرش هیدرولیکی را به صورت معادله زیر بیان کرد:

$$\frac{y_2}{y_1} = f_4 \left(Fr_1, \frac{s}{L_s}, \theta \right) \quad (4)$$

$$\frac{L_j}{y_1} = g \left(Fr_1, \frac{s}{L_s}, \theta \right) \quad (5)$$

از معادلات بالا نتیجه می شود عمق مزدوج نسبی و طول نسبی پرش هیدرولیکی با آبپایه روی بستر شیبدار به عدد فرود اولیه و ارتفاع آبپایه و فاصله قرارگیری آن از ابتدای پرش و شیب بستر بستگی دارد.

نتایج و بحث

برای بررسی اثر آبپایه روی مشخصات پرش هیدرولیکی روی شیب معکوس، مشخصات پرش هیدرولیکی از جمله عمق مزدوج نسبی (نسبت اعماق ثانویه به اولیه)، طول نسبی پرش هیدرولیکی، پروفیل سرعت و سطح آب پرش هیدرولیکی ارزیابی شد. در این پژوهش در مجموع ۸۴ آزمایش بر روی ۳ آبپایه، در محدوده اعداد فرود ۴/۶ تا ۷/۴ و شیب کف افقی، معکوس ۱ و ۱/۵ درصد مختلف انجام شد.

عمق مزدوج نسبی پرش هیدرولیکی

برای اطمینان از نتایج به دست آمده مقادیر عمق مزدوج نسبی در حالت بستر صاف و افقی و بدون آبپایه با نتایج حاصل از معادله بلانگر مقایسه شده اند. همان طور که در شکل ۳ دیده می شود نتایج نسبتاً بر هم منطبق بوده و اختلاف موجود را می توان به شرایط آزمایشگاهی و خطای تجهیزات اندازه گیری نسبت داد.

بر اساس تحلیل ابعادی ارائه شده، عمق مزدوج نسبی پرش به عدد فرود اولیه (Fr_1) و نسبت فاصله قرارگیری آبپایه از ابتدای پرش بر ارتفاع آن (s/L_s) و شیب بستر (θ) بستگی دارد.

تحلیل ابعادی

پارامترهای مؤثر بر خصوصیات پرش هیدرولیکی با آبپایه روی بستر شیبدار را می توان به صورت تابع زیر بیان نمود:

$$f_1(\rho, \nu, y_1, y_2, V_1, L_j, g, s, L_s, \theta) = 0 \quad (1)$$

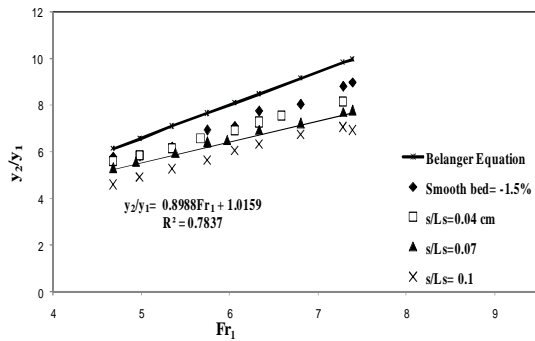
در این معادله ρ جرم مخصوص، ν لزجت سینماتیکی آب، g شتاب ثقل، s ارتفاع آبپایه و L_s فاصله آبپایه از ابتدای پرش، L_j طول پرش هیدرولیکی، θ شیب بستر، V_1 سرعت اولیه، y_1 عمق اولیه و y_2 عمق ثانویه پرش هستند. با استفاده از تئوری باکینگهام، پارامترهای بدون بعد مؤثر بر جریان به صورت معادله زیر به دست می آید:

$$f_2 \left(\frac{y_2}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g y_1}}, Re_1 = \frac{V_1 y_1}{\nu}, \frac{s}{y_1}, \frac{L_s}{y_1} \right) = 0 \quad (2)$$

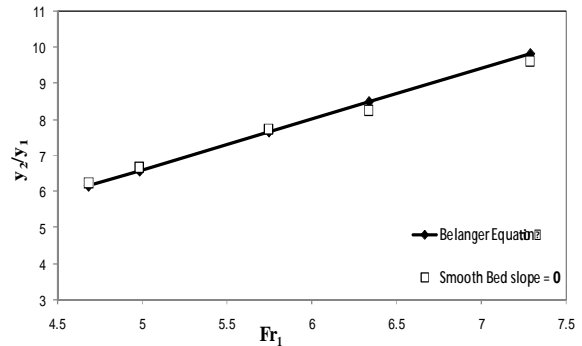
با صرف نظر کردن از اثر لزجت به دلیل مقادیر بالای عدد رینولدز ($57673 < Re_1 < 74983$) و تقسیم دو پارامتر آخر بر همدیگر، معادله ۲ به صورت زیر ساده می شود:

$$f_3 = \left(\frac{y_2}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, Fr_1, \frac{s}{L_s}, \theta \right) \quad (3)$$

پارامتر s/L_s نسبت ارتفاع آبپایه به فاصله قرارگیری آبپایه از ابتدای پرش است و تأثیر ابعاد آبپایه را بر خصوصیات پرش هیدرولیکی نشان می دهد. محدوده پارامترهای بی بعد در جدول ۱ مشاهده می شود.

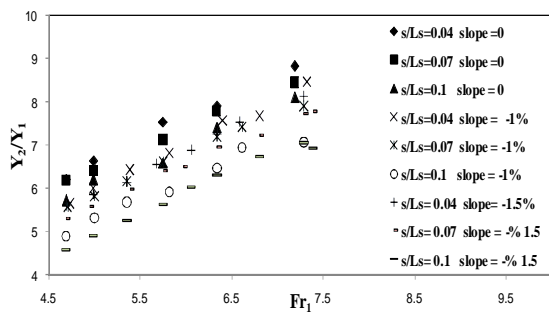


شکل 6- تغییرات عمق مزدوج نسبی پرش با آبیاهای مختلف به ازای اعداد فرود اولیه در شیب معکوس 1/5%



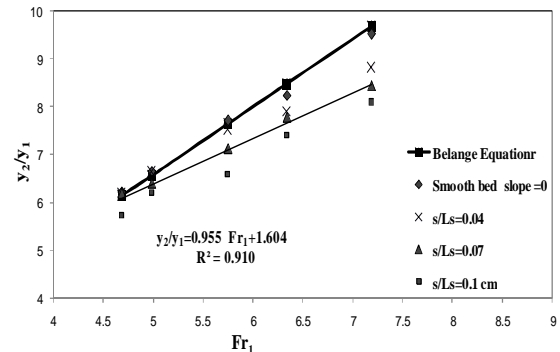
شکل 3- عمق مزدوج نسبی پرش هیدرولیکی به ازای اعداد فرود برای بستر صاف و مقایسه آن با معادله بلانگر

شکل ۷ تغییرات عمق مزدوج نسبی را برای همه آبیاهای در شیب‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، بیشترین تأثیر در $s/L_s = 0/1$ و شیب معکوس $1/5\%$ دیده می‌شود. با توجه به شکل ۸ که مقایسه پژوهش حاضر با برخی از نتایج به دست آمده توسط سایر پژوهشگران را نشان می‌دهد، ملاحظه می‌شود که پرش روی آبیاهای شیب معکوس کم دارای نتایج قابل ملاحظه‌ای است.

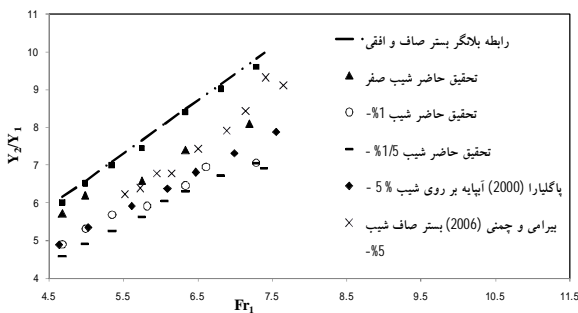


شکل 7- مقایسه تغییرات عمق مزدوج نسبی پرش به ازای اعداد فرود اولیه برای آبیاهای مختلف در شیب‌های مختلف

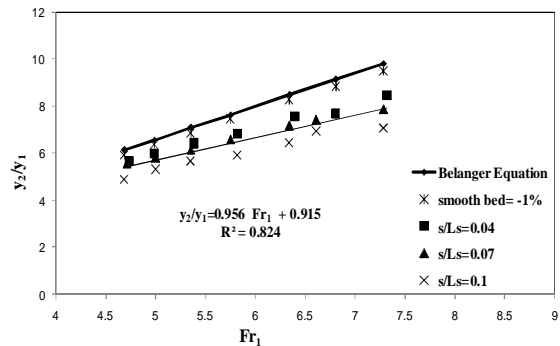
شکل‌های ۴، ۵ و ۶ تغییرات عمق مزدوج نسبی (y_2/y_1) به ازای اعداد فرود اولیه (Fr_1) با سه ارتفاع مختلف آبیاهای (s) به ترتیب روی شیب صفر، -1% و $-1/5\%$ نشان می‌دهند. با توجه به نتایج با افزایش ارتفاع آبیاهای و شیب معکوس عمق ثانویه پرش هیدرولیکی نسبت به پرش کلاسیک کاهش می‌یابد. متوسط کاهش نسبی عمق ثانویه پرش هیدرولیکی روی آبیاهای در شیب صفر برابر $6/8$ درصد، در شیب -1% برابر $15/2$ درصد و در شیب معکوس $1/5\%$ برابر $18/3$ درصد به دست آمد.



شکل 4- تغییرات عمق مزدوج نسبی پرش هیدرولیکی با آبیاهای مختلف به ازای اعداد فرود اولیه در شیب صفر



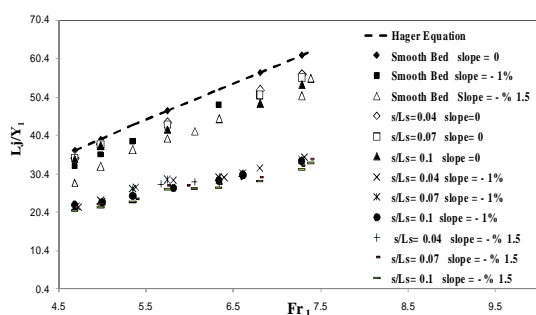
شکل 8- مقایسه تغییرات عمق مزدوج نسبی پرش به ازای اعداد فرود اولیه در پژوهش حاضر با سایر پژوهشگران



شکل 5- تغییرات عمق مزدوج نسبی پرش با آبیاهای مختلف به ازای اعداد فرود اولیه در شیب معکوس 1%

افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی

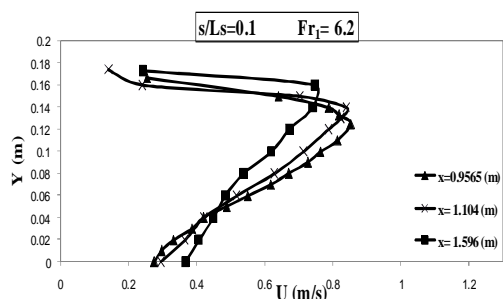
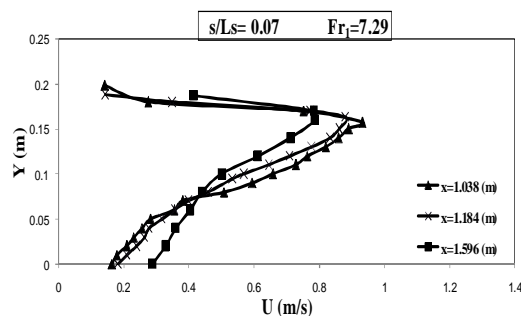
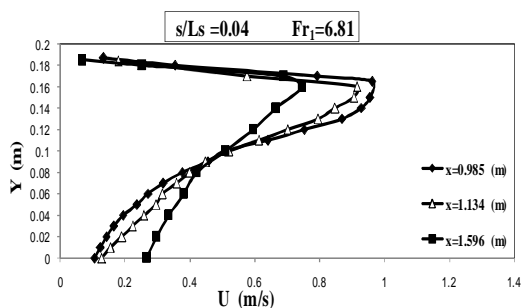
افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی از معادله ۶ محاسبه شد که در این معادله E_1 و E_2 به ترتیب انرژی مخصوص



شکل 10- تغییرات طول نسبی پرش به ازای اعداد فرود اولیه برای آبپایه‌ها در شیب‌های مختلف

پروفیل‌های سرعت

در این پژوهش پروفیل سرعت برای هر آبپایه به ازای دو عدد فرود در شیب صفر در قسمت انتهایی پرش و در شیب معکوس ۱٪ در طول پرش هیدرولیکی اندازه‌گیری شد. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ پروفیل‌های سرعت دیده می‌شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله از ابتدای پرش (x) سرعت حداکثر کاهش و لایه مرزی رشد می‌کند.

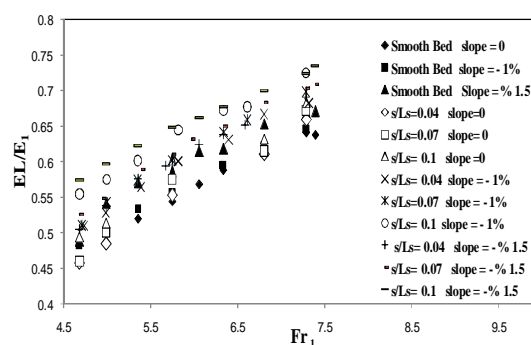


شکل 11- پروفیل‌های سرعت پرش هیدرولیکی با آبپایه در شیب صفر

قبل و بعد پرش است. در شکل ۹ مقادیر افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی با آبپایه‌ها به ازای اعداد فرود اولیه در شیب‌های مختلف نشان داده شده که با مقادیر افت انرژی نسبی در بستر صاف برای هر شیب نیز مقایسه شده است.

$$R_L = \frac{E_L}{E_1} = \frac{E_2 - E_1}{E_1} \quad (6)$$

با توجه به نتایج به دست آمده حداکثر افت انرژی نسبی در ۰/۱ s/L_s و شیب معکوس ۱/۵ درصد برابر ۷۴ درصد است و میزان افت انرژی نسبت به پرش کلاسیک به طور متوسط ۱۴ درصد افزایش یافته است.



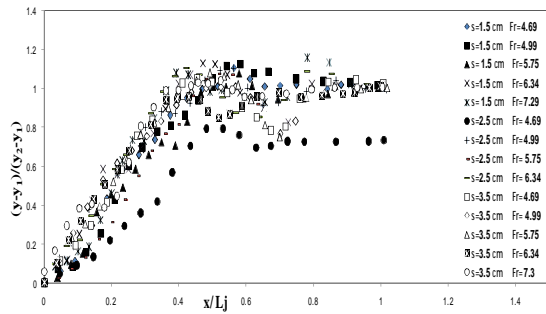
شکل 9- تغییرات افت انرژی نسبی پرش به ازای اعداد فرود اولیه برای آبپایه‌ها در شیب‌های مختلف

طول نسبی پرش هیدرولیکی

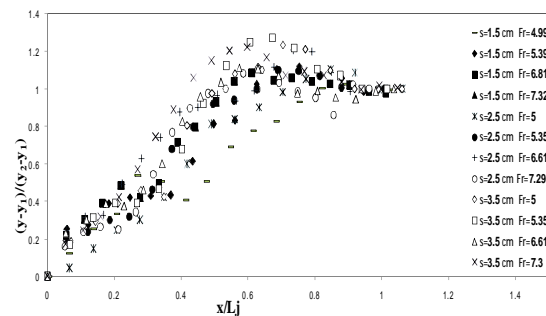
برای مقایسه طول پرش هیدرولیکی روی بستر با آبپایه و بدون آبپایه، مقادیر طول پرش توسط عمق اولیه پرش بی‌بعد شدند. نتایج به دست آمده با معادله ۷ ارایه شده توسط هاگر (هاگر و لی ۱۹۹۲) مقایسه شد.

$$\frac{L_j}{y_1} = 220 \tanh\left(\frac{Fr_1 - 1}{22}\right) \quad (7)$$

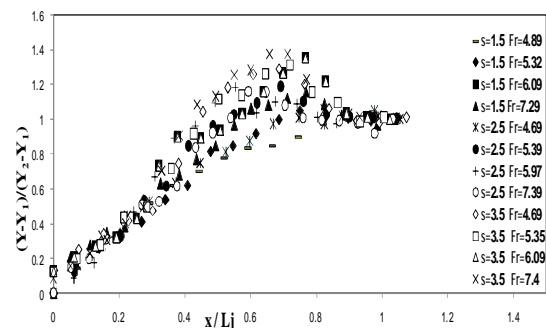
که در این معادله y_1 عمق اولیه پرش هیدرولیکی، L_j طول پرش هیدرولیکی کلاسیک و Fr_1 عدد فرود اولیه است. در شکل ۱۰ مقادیر طول نسبی پرش هیدرولیکی به ازای اعداد فرود اولیه به تفکیک شیب برای همه آبپایه‌ها در نشان داده شده است. با توجه به نتایج میزان متوسط کاهش نسبی طول پرش هیدرولیکی روی آبپایه در شیب صفر برابر ۷/۸ درصد، در شیب ۰/۱- برابر ۳۴/۴ درصد و در شیب معکوس ۱/۵ برابر ۴۵ درصد به دست آمد.



شکل 13- پروفیل بی بعد سطح آب پرش به ازای اعداد فرود اولیه برای همه آبپایه‌ها در شیب صفر



شکل 14- پروفیل بی بعد سطح آب پرش به ازای اعداد فرود اولیه برای همه آبپایه‌ها در شیب معکوس 1%

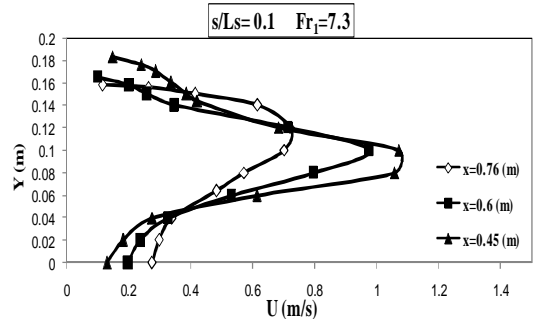
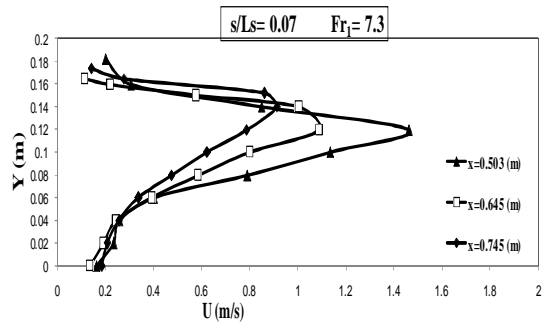
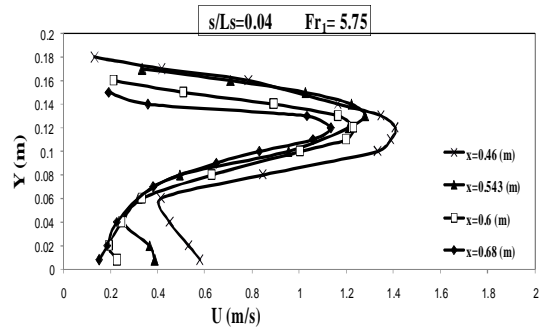


شکل 15- پروفیل بی بعد سطح آب پرش به ازای اعداد فرود اولیه برای همه آبپایه‌ها در شیب معکوس 1/5%

نتیجه‌گیری

کاهش نسبی عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در همه آزمایش‌های انجام گرفته در پرش هیدرولیکی با آبپایه بر روی شیب‌های مختلف از ۰/۱۶ تا ۲۴/۴ درصد تغییر می‌کند. با افزایش عدد فرود، شیب معکوس و ارتفاع آبپایه عمق ثانویه پرش کاهش می‌یابد. با افزایش ارتفاع آبپایه میزان کاهش عمق ثانویه به طور متوسط ۹/۵ درصد تغییر می‌کند.

افت نسبی انرژی در پرش هیدرولیکی با آبپایه روی شیب صفر به طور متوسط ۷/۵ درصد و در شیب معکوس ۱/۵



شکل 12- پروفیل‌های سرعت پرش هیدرولیکی با آبپایه در شیب معکوس 1%

پروفیل‌های سطح آب

پروفیل‌های سطح آب در پرش هیدرولیکی برای تعیین میزان عمق اولیه، ثانویه و طول پرش هیدرولیکی و در طراحی حوضچه‌های آرامش استفاده می‌شود، با استفاده از تصاویر ثبت شده از سطح جریان پرش هیدرولیکی، پروفیل‌های سطح آب به دست آمد. با رسم مقادیر بی بعد $(y-y_1)/(y_2-y_1)$ و x/L_j در مقابل یکدیگر، پروفیل‌های بی بعد سطح پرش هیدرولیکی به دست آمد، در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ پروفیل بی بعد سطح آب نشان داده شده است.

۲. بیرامی م. ک. و ایلاقی حسینی م. ۱۳۸۳. کنترل پرش هیدرولیکی با یک و دو دیواره ممتد در حوضچه آرامش افقی. مجله استقلال. ۲۴(۱): ۹۷-۱۱۹.
3. Abrishami J. and Saneie M. 1994. Hydraulic jump in adverse basin slopes. *Int. Journal of Water Research Engineering*. 1(2):51-63.
4. Achour B. and Debabeche M. 2003. Control of Hydraulic Jump by Sill in a U-shaped Channel. *Journal of Hydraulic Research*. 45(1):97-103.
5. Beirami M. K. Chamani M. R. 2006. Hydraulic jumps in sloping channels: sequent depth ratio. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 132(10):1051-1068.
6. Bretz N. V. 1987. Ressaut hydraulique force par seuil. Thesis no. 699, Ecole Ploytechnique Federale de Lausanne, Suisse.
7. Debabeche M. and Achour B. 2007. Effect of sill in the hydraulic jump in a triangular channel. *Journal of Hydraulic Research*. 45(1):135-139.
8. Hager W. H. and Li D. 1992. Sill-controlled energy dissipator. *Journal of Hydraulic Research*. 30(2):165-181.
9. Khadar M. H. A. and Rajagopal S. 1972. Hydraulic jump in adverse channel slopes. *Journal of Irrigation. Pwr. India*. 29(1):77- 82.
10. Narayanan R. and Schizas L. S. 1980. Force fluctuations on sill of hydraulic jump. *Journal of Hydraulics Division*. 106(HY4). 589-599.
11. Ohtsu I. 1981. Forced hydraulic jump by a vertical sill. *Trans. JSCE, Hydraulic and Sanitary Engineering Division*. 13:165-168.
12. Pagliara S. and Peruginelli A. 2000. Limiting and sill-controlled adverse-slope hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 126(11):847-851.

درصد به طور متوسط ۱۸/۱ درصد نسبت به پرش کلاسیک افزایش می‌یابد.

طول پرش هیدرولیکی با آبپایه روی شیب معکوس حداکثر ۴۹/۹ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش می‌یابد. این نرخ کاهش با افزایش ارتفاع آبپایه، شیب معکوس و عدد فرود بیشتر می‌شود. با افزایش ارتفاع آبپایه میزان کاهش طول پرش حداکثر ۹ درصد افزایش یافته و با افزایش شیب معکوس نرخ کاهش طول پرش هیدرولیکی به طور متوسط از ۷/۸٪ به ۴۵٪ افزایش می‌یابد.

با قرارگیری آبپایه در داخل پرش، در اثر ایجاد گرداب‌های سطحی تشکیل شده در بالادست آبپایه و گرداب‌های کف تشکیل شده در پایین‌دست آبپایه، قسمت اعظم افت انرژی مستهلک گشته و در نتیجه موج ساکنی در پایین‌دست آبپایه ایجاد می‌شود. در شیب معکوس، مؤلفه نیروی وزن در امتداد بستر در جهت عکس با جهت جریان بوده و عاملی در کوتاه کردن طول پرش و به تبع آن کاهش نسبت y_2/y_1 می‌باشد و لذا پرش در فاصله کوتاهتر شکل می‌گیرد.

منابع

۱. اسماعیلی ک. و ابریشمی ج. ۱۳۸۰. تعیین ارتباط بین عمق‌های قبل و بعد از پرش و ارتفاع پله به منظور کنترل پرش هیدرولیکی روی حوضچه‌های با شیب معکوس و با پله (مثبت یا منفی). کنفرانس بین‌المللی سازه‌های هیدرولیکی، بخش عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان. ۱۲ و ۱۳ اردیبهشت. ۶۰۱-۶۱۲.