



دانشگاه گوارز و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و سوم، شماره پنجم، ۱۳۹۵

<http://jwsc.gau.ac.ir>

بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی در شرایط بستر زبر با استفاده از مدل فیزیکی

فرشته اسدی^۱، رامین فضل‌اولی^۲ و علیرضا عمادی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری،

^۲ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

تاریخ دریافت: ۹۴/۹/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۳/۳۰

چکیده

سابقه و هدف: پرش هیدرولیکی یا پرش آبی، یکی از انواع جریان‌های متغیر سریع است و چنانچه آب در قسمتی از مسیر دارای شرایط فوق بحرانی باشد و بنا به موقعیت خاص کانال بخواهد به شرایط زیر بحرانی تغییر رژیم دهد، لازم است عمق جریان در مسیر نسبتاً کوتاهی به میزان قابل توجهی افزایش یافته و در نتیجه با استهلاك انرژی محسوسی روبرو خواهد شد. تاکنون مطالعات زیادی به منظور بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی روی بسترهایی با زبری‌هایی با اشکال مختلف انجام شده است. نتایج پژوهش پژوهشگران بیانگر آن است که استفاده از بسترهای زبر موجب کاهش طول و عمق پرش هیدرولیکی و افزایش ضریب تنش برشی می‌گردد. بنابراین یکی از راه‌کارهایی که می‌تواند جایگزین بلوک‌های کف شود ایجاد زبری در بستر جریان است. در پژوهش حاضر مشخصات پرش هیدرولیکی در شرایط بستر زبر با استفاده از مدل فیزیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. اهداف انجام این پژوهش شامل: بررسی تأثیر قطر متوسط ذرات در شرایط زبری طبیعی بستر بر نسبت عمق ثانویه به اولیه، استهلاك انرژی نسبی پرش هیدرولیکی، ضریب نیروی برشی، مقایسه نتایج آزمایشگاهی حاضر با نتایج سایر پژوهش‌های مشابه بر روی انواع بسترهای زبر و نهایتاً آرایه روابطی برای هر یک از موارد فوق بوده است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش مشخصات پرش هیدرولیکی روی بستر زبر طبیعی با ذرات دانه‌بندی شده و قطر متوسط ۴/۷۵، ۳/۵۵، ۲/۱۸، ۱/۵۹ و ۰/۷۴ میلی‌متر و محدوده عدد فرود ۳/۵ تا ۴/۵ در فلوام افقی مستطیلی به طول ۵ متر، عرض ۰/۷۵ متر و ارتفاع ۰/۱۷۵ متر انجام شد. جهت ایجاد پرش هیدرولیکی از سرریز اوجی به ارتفاع ۰/۱۲ متر استفاده شد طوری که بسترهای زبر در پایین دست این سرریز قرار گیرند. برای آنالیز ابعادی بعد از شناسایی پارامترهای مؤثر بر مشخصات پرش هیدرولیکی اعداد بدون بعد با استفاده از تئوری پی باکینگهام استخراج گردید. **یافته‌ها:** عمق نسبی، استهلاك انرژی نسبی پرش و ضریب نیروی برشی به صورت تابعی از عدد فرود به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که تفاوت معنی‌داری میان همه زبری‌های مورد مطالعه با مقادیر متفاوت ارتفاع نسبی زبری، از لحاظ تأثیری که بر کاهش میزان عمق نسبی، افزایش میزان استهلاك انرژی نسبی و افزایش نیروی برشی دارند وجود نداشته است اما اثر این مقادیر زبری در مقایسه با بستر صاف قابل ملاحظه می‌باشد.

* مسئول مکاتبه: raminfazl@yahoo.com

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که بستر زبر نسبت به بستر صاف به‌طور میانگین عمق نسبی پرش را ۵۶/۷ درصد کاهش می‌دهد و استهلاک انرژی نسبی ۶۹ و نیروی برشی ۲/۶ درصد افزایش می‌یابد. از طرفی مقایسه نتایج آزمایشگاهی حاضر با نتایج سایر پژوهش‌های مشابه بر روی انواع بسترهای زبر نشان می‌دهد که نمودار به‌دست آمده از نقاط برازش داده شده منحنی $\frac{\Delta E}{E_1}$ نسبت به عدد فرود، بر منحنی برازش مطالعه صمدی‌بروجنی (۲۰۱۳) بر بستر مثلثی منطبق می‌باشد و تغییرات میزان ضریب نیروی برشی و عمق نسبی پرش در محدوده عدد فرود مذکور روند افزایشی خواهد داشت که بیانگر مطابقت نتایج می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: استهلاک انرژی، پرش هیدرولیکی، سرریز اوجی، عمق نسبی پرش

مقدمه

پرش هیدرولیکی یا پرش آبی، از نوع جریان‌های متغیر سریع است و عبارت است از تغییر حالت جریان از فوق بحرانی به زیربحرانی. این پدیده که یکی از پدیده‌های مهم جریان آب در کانال‌های باز بوده و از ابتدا تا انتهای آن یک تلاطم و پیچش سطحی آب وجود دارد، به پرش هیدرولیکی یا پرش آبی موسوم است. از کاربردهای پرش آبی در کانال باز می‌توان به کاهش انرژی آب در جریان از روی سدها، سرریزها و دیگر سازه‌های هیدرولیکی، مخلوط نمودن مواد شیمیایی جهت تصفیه آب یا فاضلاب و نیز مصارف کشاورزی و افزایش دبی خروجی از زیر دریچه‌ها با دور نگه داشتن پایاب^۱ اشاره نمود (۸).

آب زمانی که از روی سرریز عبور می‌کند یا از مجرایای تحتانی تخلیه می‌شود دارای سرعت فوق‌العاده زیاد می‌شود. در چنین مواقعی جریان فوق بحرانی بوده و انرژی جنبشی زیاد و مخرب دارد. برای این‌که این انرژی جنبشی مخرب از آب گرفته شود، سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی^۲ به‌کار گرفته می‌شوند (۳). سازه‌های هیدرولیکی نظیر حوضچه آرامش عمدتاً به‌منظور استهلاک انرژی در پایین‌دست سرریزها استفاده می‌شود. ابعاد حوضچه‌های آرامش

مستقیماً به مشخصات پرش هیدرولیکی بستگی دارد. از این‌رو تلاش پژوهشگران بر این بوده است تا با ایجاد تمهیداتی در محل وقوع پرش هیدرولیکی بتوانند مشخصات پرش را کاهش دهند تا صرفه‌جویی اقتصادی زیادی به همراه داشته باشد. بلوک‌های موجود در حوضچه آرامش با ایجاد نیرویی در خلاف جهت جریان باعث کاهش طول پرش هیدرولیکی می‌شود. این بلوک‌ها چون پیوسته نیستند باعث جدا کردن جت ورودی شده و این مسأله خودبه‌خود باعث افزایش تنش برشی و در نتیجه تلاطم بیش‌تر می‌گردد (۱۶).

با توجه به پژوهش‌های انجام شده توسط راور و همکاران (۲۰۱۱)، زبری بستر عامل مؤثری در کاهش هزینه‌های حوضچه‌های استهلاک انرژی می‌باشد (۱۶). از این‌رو هدف پژوهش‌های بعدی پژوهشگران، به‌کارگیری بسترهای موج‌دار در کف حوضچه‌های آرامش و بررسی تأثیر این نوع از زبری‌ها بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی بوده است. از آن‌جا که مقاومت حوضچه آرامش در مقابل فرسایش و کاویتاسیون دارای اهمیت می‌باشد، بر اساس نظر اید و راجاراتنام، نوارهای زبری در داخل حوضچه باید به‌نحوی قرار گیرند که تاج آن‌ها هم سطح بستر بالادست بوده و نقش گودافتادگی را ایفا نمایند (۵). غزالی و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی تأثیر زبری‌های مثلثی کف حوضچه

1- Tailwater
2- Energy dissipators

کلاسیک ۴۱ درصد و نسبت به پرش با پایین افتادگی ناگهانی در بستر صاف به اندازه ۵/۸ درصد کاهش می‌دهد (۱۱). صمدی‌بروجنی (۲۰۱۳) پارامترهای پرش هیدرولیکی برای شش بستر موج‌دار را مثلی مورد مطالعه قرار دادند نتایج پژوهش‌های ایشان نشان داد که بستر موج‌دار در مقایسه با بستر صاف موجب کاهش ۲۵ درصدی عمق مزدوج و کاهش ۵۴/۷ درصدی طول پرش می‌گردد و با افزایش عدد فرود، ضریب نیروی برشی، روند شدیدتری خواهد داشت (۱۷). بنابر مطالعه غزالی و همکاران (۲۰۱۰) پارامترهایی چون طول حوضچه و عمق پایاب مورد نیاز از جمله پارامترهای مهمی هستند که بر اقتصادی کردن سازه حوضچه آرامش تأثیر فراوانی دارند. یکی از راه‌کارهایی که می‌تواند جایگزین بلوک‌های کف شود ایجاد زبری در بستر جریان است. زبر کردن کف باعث می‌شود که در یک حجم کنترل مقدار مومتم ورودی و خروجی برابر نبوده و مومتم خروجی به اندازه نیروی مقاومتی زبری‌ها، کم‌تر از مومتم ورودی شود. تفاوت زبری با بلوک این است که سطح فوقانی آن‌ها کاملاً در زیر عمق اولیه پرش قرار گرفته و هم تراز با کف کانال بالادست است. از این رو روشی برای کاهش طول و عمق ثانویه پرش است (۷).

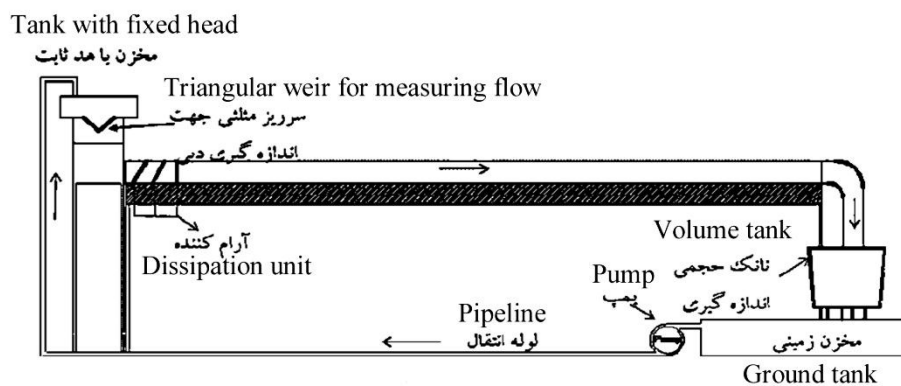
در پژوهش حاضر مشخصات پرش هیدرولیکی در شرایط بستر زبر با استفاده از مدل فیزیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. اهداف انجام این پژوهش شامل: بررسی تأثیر قطر متوسط ذرات در شرایط زبری طبیعی بستر بر نسبت عمق اولیه به ثانویه، استهلاك انرژی نسبی پرش هیدرولیکی، ضریب نیروی برشی، مقایسه نتایج آزمایشگاهی حاضر با نتایج سایر پژوهش‌های مشابه بر روی انواع بسترهای زبر و نهایتاً ارایه روابطی برای هر یک از موارد فوق بوده است.

آرامش بر مشخصات پرش هیدرولیکی پرداختند. نتایج نشان داد که عمق پایاب و طول پرش روی بسترهای موج‌دار مثلی نسبت به بستر صاف در شرایط هیدرولیکی یکسان به ترتیب ۲۵ و ۵۴/۷ درصد کوچک‌تر و تنش برشی در بستر زبر به‌طور متوسط ۸/۵ برابر بستر صاف است (۷). راور و همکاران (۲۰۱۰) مطالعاتی در زمینه تأثیر به‌کارگیری زبری‌هایی به شکل ذوزنقه قائم‌الزاویه به‌صورت نواری داشتند و بیان نمودند که متوسط کاهش عمق ثانویه و طول پرش روی این نوع بسترها به ترتیب حدوداً برابر ۲۲ و ۴۱ درصد می‌باشد هم‌چنین میزان ضریب تنش برشی بستر زبر بین ۳/۲ تا ۹/۶ برابر بیش‌تر از بستر صاف می‌باشد. افزایش افت انرژی نسبت به بستر صاف حداکثر ۹ درصد بیش‌تر است (۱۶). بدیع‌زادگان و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج‌دار سینوسی افقی نشان دادند که مقادیر مختلف شیب موج زبری، تأثیر متفاوتی در کاهش نسبت عمق مزدوج نداشته و انواع مختلف زبری حدوداً به یک میزان، باعث کاهش عمق ثانویه می‌شوند (۲). توکیای و همکاران (۲۰۱۱) آزمایش‌هایی برای تعیین اثرات زبری موج‌دار و زبری منشوری با آرایش نواری و زیکزاکای بر مشخصات پرش انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که طول پرش برای زبری موج‌دار ۳۵ درصد، آرایش نواری ۴۰ درصد و زیکزاکای بین ۳۵ تا ۵۵ درصد کاهش می‌یابد و عمق پایاب در مقایسه با پرش کلاسیک برای زبری موج‌دار ۲۰ درصد، آرایش نواری ۵ تا ۱۳ درصد و زیکزاکای ۷ تا ۱۵ درصد کاهش می‌یابد. بستر زبر میزان افت انرژی را نسبت به پرش کلاسیک ۳ تا ۱۰ درصد افزایش می‌دهد (۱۸). نصر اصفهانی و شفاعی‌بجستان (۲۰۱۲) به بررسی اثر بستر زبر بر مشخصات پرش هیدرولیکی با پایین‌افتادگی ناگهانی می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که زبری، طول نسبی پرش $(\frac{L}{y_1})$ را در مقایسه با پرش

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در کانال مستطیلی و افقی به طول ۵ متر، عرض ۰/۰۷۵ متر و ارتفاع ۰/۱۷۵ متر انجام شد. شکل ۱ نمای شماتیکی از فلوم آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. دیواره‌های کانال از جنس پلکسی‌گلاس

شفاف می‌باشد. دبی ورودی توسط یک سرریز مثلثی ۹۰ درجه که قبلاً واسنجی شده و سایر اندازه‌گیری‌ها با استفاده از عمق‌سنج با دقت $\pm 0/1$ میلی‌متر انجام گردید.

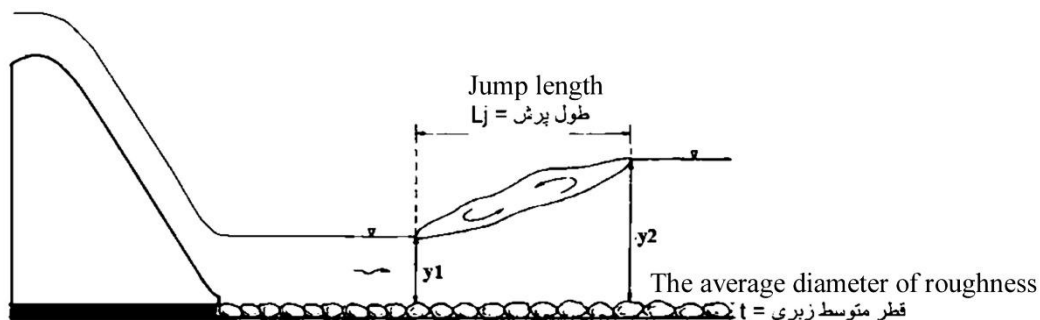


شکل ۱- نمایی از فلوم آزمایشگاهی.

Figure 1. Schematic representation of the experimental setup.

در پایین‌دست این سرریز قرار گیرند و برای جلوگیری از اثر کاونتاسیون سطح بالایی زبری‌ها هم تراز با کف بستر قرار می‌گیرد. بر اساس نظر اید و راجاراتنام، نوارهای زبری در داخل حوضچه باید به نحوی قرار گیرند که تاج آن‌ها هم سطح بستر بالادست بوده و نقش گودافتادگی را ایفا نمایند (۵).

آزمایش‌ها با پنج بستر زبر طبیعی دانه‌بندی شده با قطرهای متوسط ۰/۷۵، ۳/۵۵، ۲/۱۸، ۱/۵۹ و ۰/۷۴ میلی‌متر و با دانه‌بندی یکنواخت در محدوده عدد فرود ۳/۵ تا ۴/۵ انجام شد. برای ایجاد پرش هیدرولیکی از سرریز اوجی به ارتفاع ۰/۱۲ متر استفاده گردید طوری که بسترهای زبر مطابق شکل ۲



شکل ۲- پرش هیدرولیکی روی بستر زبر.

Figure 2. Sketches of hydraulic jump in rough bed condition.

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_2y_1} \quad (4)$$

که در آن، E_1 و E_2 به ترتیب انرژی مخصوص در مقاطع اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی و y_1 و y_2 به ترتیب عمق‌های اولیه و ثانویه پرش می‌باشند. دلیل اصلی کاهش عمق پایین دست y_2 افزایش تنش برشی بر روی بسترهای زبر می‌باشد. تنش برشی بر روی بستر زبر می‌تواند با استفاده از رابطه مومنتوم مشخص گردد.

$$F_T = (P_1 - P_2) + (M_1 - M_2) \quad (5)$$

که در آن، P_1 و P_2 به ترتیب نیروی فشاری در مقطع قبل و بعد پرش هیدرولیکی می‌باشد و M_1 و M_2 نیروهای مومنتوم در مقاطع قبل و بعد تشکیل پرش هیدرولیکی است. رابطه نیروی برشی روی بستر صاف بر اساس مطالعات راجاراتنام (۱۹۶۵) به صورت زیر است (۱۵):

$$\varepsilon = 0.16 Fr_1^2 - 0.8Fr_1 + 1 \quad (6)$$

آنالیز ابعادی: برای انجام آنالیز ابعادی، بعد از شناسایی پارامترهای مؤثر بر مشخصات پرش هیدرولیکی شامل y_2 عمق ثانویه پرش، y_1 عمق اولیه پرش، v_1 سرعت اولیه در ابتدای پرش، g شتاب ثقل، t ارتفاع زبری، μ لزجت و ρ چگالی، اعداد بدون بعد با استفاده از روش پی باکینگهام استخراج گردید. محدوده عدد رینولدز برای همه آزمایش‌ها و بسترهای زبر ۵۰۰۰ تا ۱۷۰۰۰ می‌باشد که میزان آن بیش‌تر از ۲۰۰۰ است بنابراین می‌توان از اثر لزجت صرف نظر نمود.

$$y_2 = f(y_1, v_1, g, t, \mu, \rho) \quad (7)$$

$$\frac{y_2}{y_1} = g(Re, Fr_1, \frac{t}{y_1}) \quad (8)$$

$$\frac{y_2}{y_1} = h(Fr_1, \frac{t}{y_1}) \quad (9)$$

تنوری و مبانی حاکم: رابطه زیر برای محاسبه عمق ثانویه پرش کلاسیک ارائه شده است (۸):

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

که در آن، y_2^* عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کلاسیک و Fr_1^2 عدد فرود در مقطع بالادست پرش می‌باشد. قدرت و شدت پرش هیدرولیکی به عدد فرود در محل شروع پرش هیدرولیکی بستگی دارد که با افزایش آن نسبت $\frac{y_2^*}{y_1}$ و به عبارتی $y_2^* - y_1$ افزایش می‌یابد. برای محاسبه عمق ثانویه پرش بر روی بستر زبر کارلو و همکاران (۲۰۰۷) با انجام آزمایش‌هایی تأثیر زیری‌های طبیعی شن و قلوه‌سنگ با پنج قطر متوسط در محدوده ۴/۶ تا ۳۲ میلی‌متر را مطالعه نمودند و نشان دادند که زیری‌ها می‌توانند ضریب عدد فرود اولیه در رابطه بلانگر^۱ (۱) را کاهش دهد و رابطه (۲) را برای نسبت اعماق مزدوج ارائه نمودند (۴):

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

آن‌ها مقدار ضریب β را پس از انجام آزمایش‌هایی به شرح زیر استخراج نمودند:

$$\beta = \frac{2}{\pi} \text{Arctan} \left[0.8 \left[\frac{k_s}{y_1} \right]^{0.75} \right], R^2 = 0.71 \quad (3)$$

طول غلطاب (طول چرخش)، عبارت است از فاصله بین مقطع اولیه پرش تا آخرین موج غلطان. هاگر و همکاران (۱۹۹۰) از نظر ظاهری بین دو نوع پرش تفاوت‌هایی را مشاهده نمودند و آن‌ها را با عنوان جریان‌های غلطابی توسعه‌یافته و توسعه‌نیافته دسته‌بندی کردند (۱۲). میزان افت در پرش هیدرولیکی برای مقاطع مستطیلی و شیب صفر کف حوضچه به صورت زیر محاسبه می‌شود (۳):

رژیم جریان، اگر حاصل عبارت $\frac{V_* K_S}{g}$ کوچک‌تر از ۴ باشد جریان از نظر هیدرولیکی صاف است، اگر $100 < \frac{V_* K_S}{g} < 4$ باشد جریان انتقالی است و اگر $100 > \frac{V_* K_S}{g}$ جریان کاملاً در هم می‌باشد (۱۳). در مطالعه حاضر حداقل میزان $\frac{V_* K_S}{g}$ در همه مقادیر دبی و عمق جریان، ۵۵۰ می‌باشد که در محدوده مجاز قرار دارد بنابراین تأثیر عرض فلوم بر لایه مرزی قابل اغماض خواهد بود.

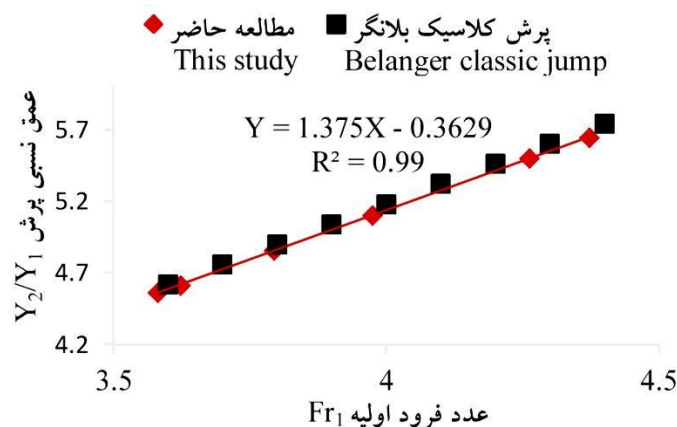
صحت آزمایش‌های انجام‌شده: مطابق شکل ۳ برای اطمینان از صحت آزمایش‌های انجام شده عمق نسبی پرش به دست آمده از بستر صاف با پرش کلاسیک بلانگر مقایسه گردید. هم‌چنین راجاراتنام (۱۹۶۵) رابطه‌ای را برای محاسبه ضریب نیروی برشی برای بستر صاف ارائه نمود (۱۵). در شکل ۴ نیروی برشی به دست آمده از نتایج حاضر با مطالعات انجام شده توسط راجاراتنام مقایسه شد و شکل‌های زیر بیانگر تطابق مناسب بین این نتایج می‌باشد.

طبق رابطه ۹ نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه پرش به عدد فرود و ارتفاع نسبی زبری (نسبت ارتفاع زبری به عمق اولیه پرش) وابسته است. به همین ترتیب می‌توان اثبات نمود:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = h(Fr_1, \frac{t}{y_1}) \quad (10)$$

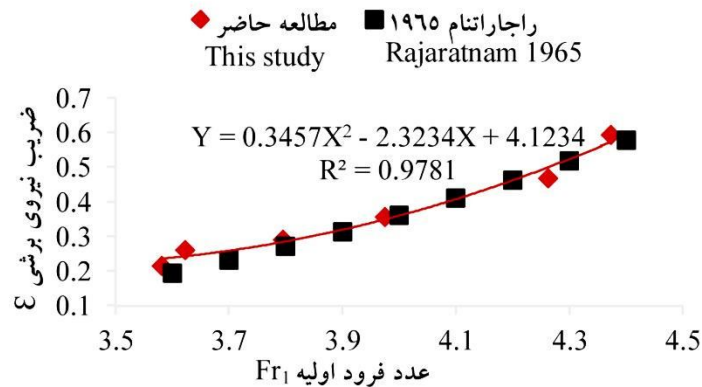
$$\varepsilon = h(Fr_1, \frac{t}{y_1}) \quad (11)$$

بررسی امکان اثرگذاری لایه مرزی بر نتایج آزمایش‌ها: هنگامی که عناصر زبری بستر کانال درون زیرلایه لزوج دهنده اند گفته می‌شود جریان از نظر هیدرولیکی صاف است. با افزایش عدد رینولدز، زیرلایه لزوج منقبض می‌شود و جریان وارد یک حالت انتقالی می‌شود به صورتی که عناصر زبری از داخل این لایه بیرون می‌زنند. در اعداد رینولدز بزرگ‌تر با منقبض شدن بیشتر زیرلایه لزوج، تأثیر عناصر زبری بر روی رفتار جریان قابل ملاحظه خواهد بود. با توجه به طبقه‌بندی انجام شده در خصوص اثر لایه مرزی بر



شکل ۳- مقایسه عمق نسبی پرش روی بستر صاف با پرش کلاسیک بلانگر.

Figure 3. Comparison of the sequence depth ratio for the jumps over smooth bed with Belanger classic jump.



شکل ۴- مقایسه ضریب نیروی برشی روی بستر صاف با مطالعه راجاراتنام (۱۹۶۵).

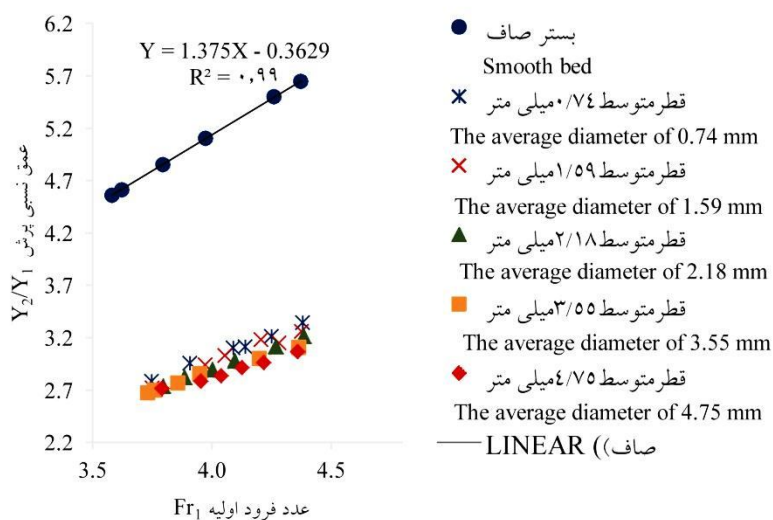
Figure 4. Comparison of the shear force coefficient for the jumps over smooth bed and Rajaratnam research (1965).

همانطور که از شکل مشخص است، با افزایش عدد فرود عمق نسبی پرش افزایش می‌یابد و در محدوده اعداد فرود مختلف خط به‌دست آمده از برازش بسترهای زیر با دانه‌بندی مختلف زیر بستر صاف قرار می‌گیرد در این صورت در یک عدد فرود یکسان، بستر زیر در مقایسه با بستر صاف باعث کاهش عمق نسبی پرش می‌شود. رابطه خطی حاصل از شکل ۵ برای بسترهای زیر به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.7986Fr_1 - 0.2796, R^2 = 0.8392 \quad (12)$$

نتایج

نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه پرش هیدرولیکی: به‌منظور بررسی تأثیر زبری‌های مختلف بستر بر عمق نسبی پرش هیدرولیکی از نتایج به‌دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی پژوهش حاضر و سایر پژوهش‌های انجام شده استفاده گردید. شکل ۵ نشان می‌دهد که بسترهای زیر با قطرهای متوسط مختلف تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر $\frac{y_2}{y_1}$ ندارند که بیانگر تأثیر کم، ارتفاع نسبی زبری $(\frac{t}{y_1})$ بر عمق نسبی پرش می‌باشد.

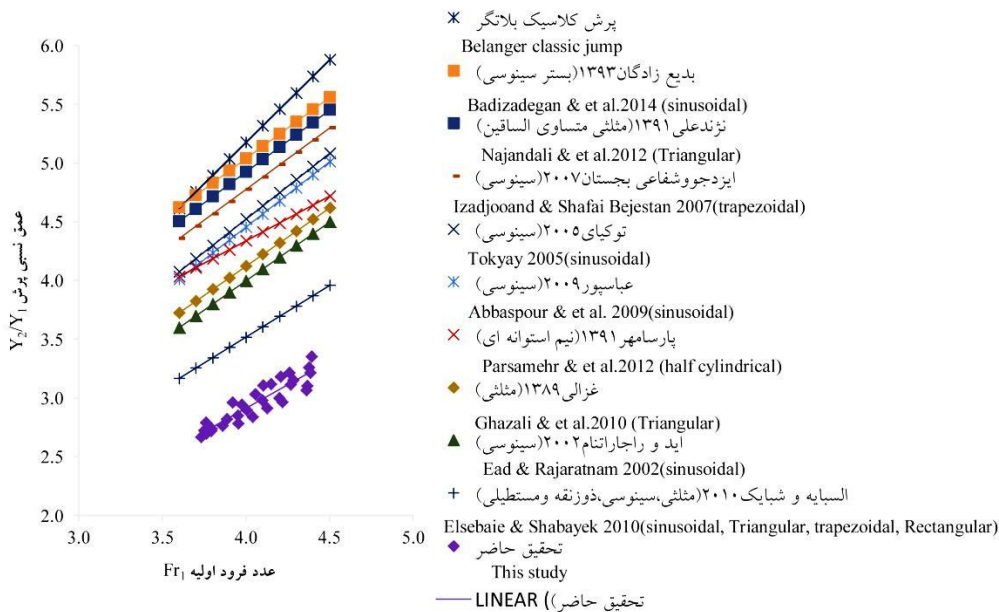


شکل ۵- رابطه بین عمق نسبی پرش در مقابل عدد فرود برای پرش کلاسیک بلانگر و بسترهای زیر مختلف.

Figure 5. Relationship between sequent depth ratio versus Froude number in Belanger classic jump and jumps over different rough beds.

و نژندعلی و همکاران (۲۰۱۲) روی انواع بسترهای زبر را نشان می‌دهد (۶، ۵، ۹، ۲، ۱۴، ۱۹، ۱، ۷، ۱۰). همان‌طور که مشخص است شکل ۶ بیانگر تطابق مناسب این مطالعه با سایر مطالعات می‌باشد.

شکل ۶ مقایسه نتایج پژوهش حاضر با السبایه و شبایک (۲۰۱۰)، اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)، ایزدجو و شفاعی بجهستان (۲۰۰۷)، بدیع‌زادگان و همکاران (۲۰۱۴)، پارسامهر و همکاران (۲۰۱۲)، توکیای (۲۰۰۵)، عباسپور (۲۰۰۹)، غزالی و همکاران (۲۰۱۰)



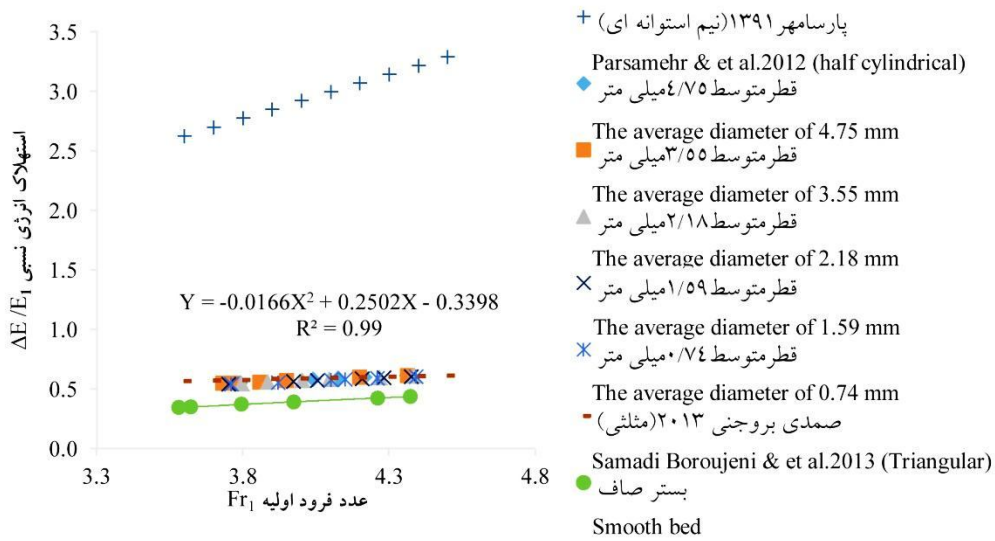
شکل ۶- مقایسه عمق نسبی پرش در مقابل عدد فرود در مطالعه حاضر و سایر پژوهش‌های انجام‌شده.

Figure 6. Comparison of the sequent depth ratio with the Froude number between present and experimental studies by other researchers.

شکل ۷ میزان استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی نسبت به عدد فرود برای مطالعات پارسامهر و همکاران (۲۰۱۲)، صمدی بروجنی و همکاران (۲۰۱۳) و پژوهش حاضر با بسترهای زبر مختلف را نشان می‌دهد (۱۴، ۱۷). این شکل بیانگر تطابق این نتایج می‌باشد و منحنی به‌دست آمده از نقاط برازش داده شده در این بررسی منطبق بر منحنی برازش مطالعه صمدی بروجنی (۲۰۱۳) بر بستر مثلثی است.

استهلاک انرژی: میزان افزایش استهلاک انرژی نسبی پرش هیدرولیکی روی قطرهای مختلف زبری بستر تقریباً به یک میزان است و نسبت به بستر صاف به‌طور میانگین حدوداً ۶۹ درصد بیش‌تر می‌باشد. روند تغییرات استهلاک انرژی نسبی بسترهای زبر نسبت به عدد فرود به‌صورت رابطه زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = -0.0212Fr_1^2 + 0.2744Fr_1 - 0.1864, \quad R^2 = 0.9665 \quad (13)$$

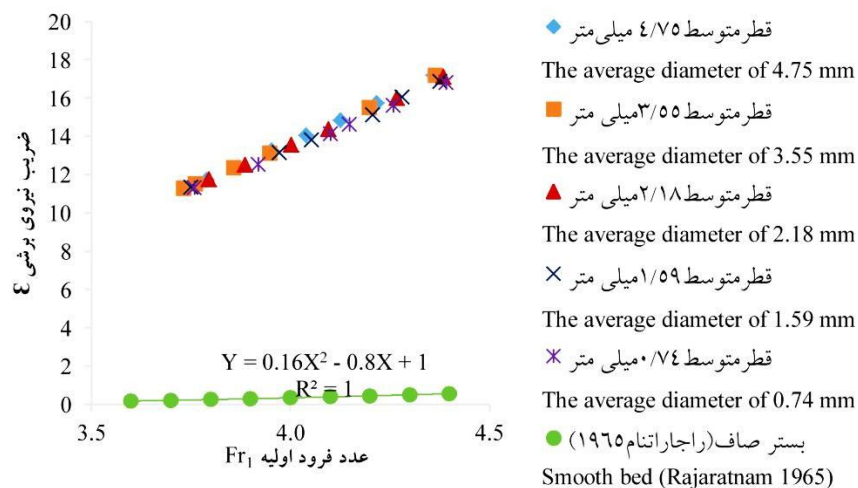


شکل ۷- مقایسه استهلاک انرژی نسبی پرش در مقابل عدد فرود در مطالعه حاضر با بسترهای زیر مختلف و سایر پژوهش‌های انجام شده.
Figure 7. Comparison of the energy dissipation ratio with the Froude number between present with different rough beds and experimental studies by other researchers.

نسبت به بستر صاف به‌طور میانگین افزایش ۲/۶ درصدی دارد و رابطه زیر بین ضریب نیروی برشی و عدد فرود حاکم است:

$$\varepsilon = 1.4686Fr_1^2 - 2.9219Fr_1 + 1.7011, R^2 = 0.9917 \quad (14)$$

ضریب نیروی برشی: برای بررسی تأثیر زبری‌های طبیعی با دانه‌بندی مختلف بر ضریب نیروی برشی شکل ۸ رسم گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد فرود این مقدار افزایش می‌یابد و در قطرهای متوسط مختلف بسترهای زیر، تغییرات محسوسی مشاهده نمی‌شود اما ضریب نیروی برشی

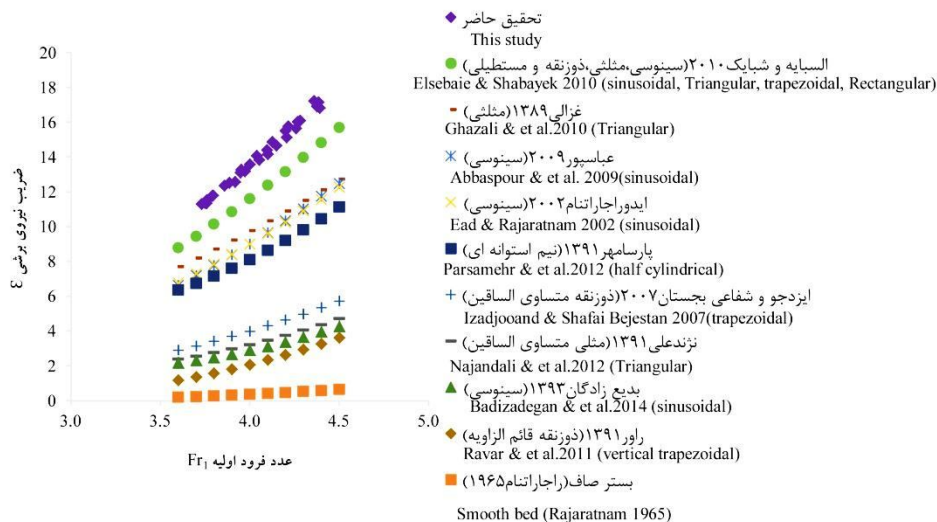


شکل ۸- رابطه بین ضریب نیروی برشی نسبت به عدد فرود روی بستر صاف و بسترهای زیر مختلف.

Figure 8. Relationship between shear force coefficient versus Froude number in smooth bed and different rough beds.

ضریب نیروی برشی با افزایش عدد فرود، روند افزایشی خواهد داشت.

همان‌طور که از شکل ۹ مشخص است در سایر پژوهش‌های انجام شده نیز مشابه پژوهش حاضر



شکل ۹- مقایسه ضریب نیروی برشی در مقابل عدد فرود در مطالعه حاضر و سایر پژوهش‌های انجام شده.

Figure 9. Comparison of the shear force coefficients with the Froude number between present and experimental studies by other researchers.

افزایش عدد فرود این نسبت روند افزایشی خواهد داشت.

میزان افزایش $\frac{\Delta E}{E_1}$ روی بسترهای زیر نسبت به بستر صاف ۶۹ درصد می‌باشد و منحنی به‌دست آمده از نقاط برازش داده شده در این بررسی منطبق بر منحنی برازش مطالعه صمدی‌بروجنی (۲۰۱۳) بر بستر مثلثی است. تغییرات میزان E با افزایش عدد فرود اولیه، روند افزایشی خواهد داشت و میزان افزایش ضریب نیروی برشی در بسترهای زیر نسبت به صاف حدوداً ۲/۶ درصد می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج پژوهش حاضر نشان داد عمق نسبی پرش به‌صورت رابطه خطی تابعی از عدد فرود می‌باشد و اندازه‌های مختلف زبری تأثیر چندانی بر کاهش نسبت عمق ثانویه به اولیه ندارد و این مقادیر در مقایسه با بستر صاف کم‌تر می‌باشد. مقدار کاهش عمق نسبی پرش بسترهای زیر در مقایسه با پرش کلاسیک روی بستر صاف در محدوده فرود ۳/۵ تا ۴/۵، به‌طور میانگین ۵۶/۷ درصد است. روند تغییرات عمق نسبی پرش نسبت به عدد فرود در پژوهش حاضر در مقایسه با مطالعات پیشین مشابه است به‌طوری‌که با

منابع

1. Abbaspour, A., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadizadeh, D., and Sadraddini, A.A. 2009. Effect of Sinusoidal Corrugated Bed on Hydraulic Jump Characteristics. J. Hydro. – Environ. Res. 3: 109-117.
2. Badizadegan, R., Saneie, M., and Esmaili, K. 2014. Comparison of Hydraulic Jump Characteristics on Different Types of Corrugated Beds. Iran. J. Irrig. Drain. 8: 2. 220-232. (In Persian)

3. Beirami, M.K. 2011. Water conveyance structures. Isfahan University of Technology, 462p. (In Persian)
4. Carollo, F.G., Ferro, V., and Pampalone, V. 2007. Hydraulic Jumps on Rough Beds. *J. Hydr. Engin.* 133: 9. 989-999.
5. Ead, S.A., and Rajaratnam, N. 2002. Hydraulic Jumps on Corrugated Beds. *J. Hydr. Engin.* 128: 7. 656-663.
6. Elsebaie, I.H., and Shabayek, Sh. 2010. Formation of Hydraulic Jumps on Corrugated Beds. *Inter. J. Civil Environ. Engin.* 10: 01. 37-47.
7. Ghazali, M., Samadi Boroujeni, H., Ghorbani, B., and Fattahi Nafchi, R. 2010. Effect of triangular corrugated beds on the hydraulic jump characteristics. *J. Iran Water.* 4th year. No. 7th, Pp: 99-107. (In Persian)
8. Hosseini, S.M., and Abrishami, J. 2010. Open channel hydraulics. University of Emam Reza. 2nd Edition, 613p. (In Persian)
9. Izadjoo, F., and Shafai Bajestan, M. 2007. Corrugated Bed Hydraulic Jump Stilling Basin. *J. Appl. Sci.* 7: 8. 1164-1169.
10. Najandali, A., Esmaili, K., and Farhoudi, J. 2012. The Effect of Triangular Blocks on the Characteristics of Hydraulic Jump. *University of Mashhad, J. Water Soil.* 26: 2. 282-289. (In Persian)
11. Nser Esfahani, M.J., and Shafai Bajestan, M. 2012. Effect of Roughness Height on the Length of B jump at an Abrupt Drop. *Inter. Res. J. Appl. Bas. Sci. Science Explorer Publications.* 3: 2757-2762.
12. Nser Esfahani, M.J., and Shafai Bajestan, M. 2011. Investigation the effect of bed roughness on roller length in the hydraulic jump. 10th Iran Hydraulic conference. University of Guilan, 5p. (In Persian)
13. Osman Akan, A. 2006. Elsevier/Butterworth-Heinemann, 364p.
14. Parsamehr, P., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadizadeh, D., and Abbaspour, A. 2012. Hydraulic Jump on a Bed with Half Cylindrical Shape Bars. *University of Mashhad, J. Water Soil.* 26: 3. 775-785. (In Persian)
15. Rajaratnam, N. 1965. The hydraulic jump as a wall jet. *J. Hydr. Div. Amer. Soc. Civil Engin.* 91: 5. 107-132.
16. Ravar, Z., Farhoudi, J., and Najandali, A. 2011. Effect of Vertical Trapezoidal Rough Bed on Hydraulic Jump Characteristics and Energy Loss. *University of Mashhad, J. Water Soil.* 26: 1. 85-94. (In Persian)
17. Samadi Boroujeni, H., Ghazali, M., Gorbani, B., and Fattahi Nafchi, R. 2013. Effect of triangular corrugated beds on the hydraulic jump characteristics. *Can. J. Civil Engin.* 40: 841-847.
18. Tokyay, N.D., Evcimen, T.U., and Şimşek, C. 2011. Forced Hydraulic Jump on Non-protruding Rough Beds. *Can. J. Civil Engin.* 38. 1136-1144.
19. Tokyay, N.D. 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. EWRI, Water & Environmental Resources Congress, Anchorage, Alaska, USA, 8p.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 23(5), 2017
<http://jwsc.gau.ac.ir>

Investigation the characteristics of hydraulic jump in a rough bed condition using a physical model

F. Asadi¹, *R. Fazloul² and A.R. Emadi²

¹M.Sc. Student, Dept. of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources
University, ²Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural
Resources University

Received: 12/09/2015; Accepted: 06/19/2016

Abstract

Background and Objectives: The hydraulic jump or water jump, is one of the fast variable flow types and if the water have a supercritical condition in a part of direction and in special situation the channel wants to change to the subcritical condition, it's necessary in a very short path the flow's depth increase significantly and as a result will face a significant energy depreciation. So far many studies were carried out for investigation of hydraulic jump characteristics on rough beds with different forms. The results of several researchers indicate that the use of rough beds decrease hydraulic jump depth and length and increase sheer stress coefficient. So one of the solutions which can replace with the bed blocks, is the creation of roughness in flow's bed. In this research the characteristics of hydraulic jump has been studied in rough bed condition with the use of physical model. The purposes of this research includes assessing the average diameters of particles at natural roughness condition of bed on the secondary to primary depth ratio, hydraulic jump relative energy dissipation, sheer force coefficient, Comparing the experimental results with the results of other similar research on a variety of rough beds and eventually representing relationships for each of the above terms.

Materials and Methods: In this research the characteristics of hydraulic jump on natural rough beds with aggregated particles carried out with an average diameter of 4.75, 3.55, 2.18, 1.59, 0.74 millimeters and a Froude number of 3.5 to 4.5 in a rectangular horizontal flume with the length of 5 meters and width of 0.075 meters and the heights of 0.175 meters. For creating a hydraulic jump, ogee spillway with the height of 0.12 meters has been used in a condition which places the rough beds in downstream. For dimensional analysis, after identification of effective parameters on hydraulic jump, dimensionless numbers, has been extracted using the Buckingham π -theorem.

Results: Relative depth, the dissipation of jump relative energy, sheer force coefficient, was obtained as a function of Froude number. The results show's that between all of studied roughness with different values of roughness relative depth, has no significant differences in terms of influence on decreasing relative depth, increase relative energy dissipation and increase sheer modulus, but the effect of this rough values can be seen in compare with smooth bed.

Conclusion: Results show that the rough bed in compare with smooth bed, will decrease the jump relative depth in an average of 56.7 percent and the relative energy dissipation increases 69 percent and the sheer modulus increases 2.6 percent. On the other hand, comparing of this experimental results with the other similar researches on different types of rough beds show that the graph of the fitted Curve $\frac{\Delta E}{E_1}$ to Froude number, is matches the fitted graph on triangular substrates which Samadi Broujeni 2013 was studied and changes in sheer force coefficient and jump relative depth in the range of above Froude number will be increased which expresses match results.

Keywords: Energy dissipation, Hydraulic jump, Ogee spillway, Jump relative depth

* Corresponding Author; Email: raminfazl@yahoo.com