

بررسی آزمایشگاهی اثر زبری بستر جریان بر مشخصات پرش هیدرولیکی

فرشته اسدی^۱، رامین فضل‌اولی^{۲*} و علیرضا عمادی^۳

چکیده

پرش هیدرولیکی، یکی از پدیده‌های مهم جریان آب در کانال‌هاست که به تناسب شدت پرش، با استهلاك انرژی محسوسی روبه‌رو خواهد شد. استفاده از بسترهای زبر، عامل مؤثری در کاهش هزینه‌های حوضچه‌های استهلاك انرژی است. بنابراین، هدف محققان، به‌کارگیری بسترهای زبر در کف حوضچه‌های آرامش و بررسی تأثیر آن بر مشخصات پرش هیدرولیکی بوده است. در این پژوهش، به بررسی آزمایشگاهی اثر زبری بستر بر مشخصات پرش هیدرولیکی در فلومی به طول ۱۲، عرض ۰/۵ و ارتفاع ۰/۷ متر در محدوده اعداد فرود ۵/۵ تا ۹ پرداخته شد و از ۲۴ بستر زبر مکعبی با آرایش زیگزاگی و ردیفی، ردیف‌ها و زاویه‌های مختلف استفاده شد. نتایج نشان داد که عمق و طول نسبی (نسبت عمق ثانویه به اولیه و نسبت طول به عمق اولیه پرش) در آرایش زیگزاگی در مقایسه با ردیفی نسبت به بستر صاف کاهش بیشتری داشت. ضریب نیروی برشی که عامل اصلی کاهش عمق و طول نسبی پرش است، در هر دو آرایش ۶ درصد بیشتر از بستر صاف محاسبه شد. در نهایت، روابطی برای برآورد عمق نسبی و طول نسبی به ازای اعداد فرود، استخراج شد. همچنین، اثر آرایش‌ها در سطح معنی‌داری ۵ درصد برای همه بسترها بر عمق و طول نسبی به اثبات رسید.

واژه‌های کلیدی: استهلاك انرژی، اعداد فرود، بسترهای زبر، طول نسبی.

ارجاع: اسدی ف. فضل‌اولی ر. و عمادی ع. ۱۳۹۸. بررسی آزمایشگاهی اثر زبری بستر جریان بر مشخصات پرش هیدرولیکی. مجله پژوهش آب ایران. ۳۵: ۳۹-۴۹.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

* نویسنده مسئول: raminfazl@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۰۶

مقدمه

بررسی اثر استفاده از ورق فایبرگلاس به عنوان زبری با آرایش زیگزاگی، به این نتایج رسید که که بستر زبر در مقایسه با بستر صاف، باعث کاهش ۲۲ درصدی نسبت اعماق مزدوج $(\frac{y_2}{y_1})$ و کاهش ۸/۱ درصدی طول نسبی پرش $(\frac{L_j}{y_1})$ می‌شود. اولین تحقیقات انجام شده در زمینه پرش هیدرولیکی کلاسیک^۲ توسط بایدون در سال ۱۸۱۸ انجام شد. چاو در سال ۱۹۵۹ به نقل از بلانگر (۱۸۲۸) معادله (۱) را برای نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی در کانالی با مقطع مستطیلی و افقی ارائه کرد. در معادله (۱)، y_1 و y_2 به ترتیب عمق ثانویه و اولیه پرش هیدرولیکی و Fr_1 عدد فرود در مقطع بالادست پرش است.

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

آزمایش‌های انجام‌گرفته نشان می‌دهد که تعیین مقدار دقیق طول چرخش^۳ بسیار مشکل و عمدتاً نتایج متفاوتی به‌دست می‌دهد؛ در حالی که اندازه‌گیری مقدار طول پرش عموماً به نتایج مشابهی منتج می‌شود (برادلی و پترکا، ۱۹۵۷). طول پرش برابر است با فاصله شروع پرش تا نقطه‌ای در روی سطح آب بلافاصله پس از آخرین موج غلطان، که در این صورت ارتفاع این نقطه تقریباً با ارتفاع پایاب برابر است (حسینی و ابریشمی، ۱۳۹۰). سیلوستر (۱۹۶۴) نسبت $\frac{L_j}{y_1}$ را برای کانال مستطیلی به‌صورت تابعی از Fr_1 و به‌صورت معادله (۲) معرفی کرد:

$$\frac{L_j}{y_1} = 9.75 (Fr_1 - 1)^{1.01} \quad (2)$$

که در آن: L_j و y_1 به ترتیب طول پرش و عمق اولیه پرش هیدرولیکی و Fr_1 عدد فرود در مقطع بالادست پرش است. هگر و همکاران، (۱۹۹۰) از نظر ظاهری بین دو نوع پرش تفاوت‌هایی را مشاهده کردند. راجاراتنام، در سال ۱۹۶۵ ضریب نیروی برشی را به‌صورت معادله (۳) تعریف کرد. در معادله (۳)، \mathcal{E} ضریب نیروی برشی؛ F_T نیروی برشی؛ و γ وزن مخصوص است. دلیل اصلی کاهش عمق پایین‌دست و کاهش طول پرش، افزایش تنش برشی بر روی بسترهای زبر است. تنش برشی بر روی بستر زبر می‌تواند با استفاده از رابطه مومنومنت مشخص شود (راجاراتنام، ۱۹۶۵).

آب زمانی که از مجراهای تحتانی خارج می‌شود، دارای سرعت زیادی است و انرژی جنبشی مخربی دارد. برای اینکه این انرژی مخرب از آب گرفته شود، سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی به‌کار گرفته می‌شود (بیرامی، ۱۳۹۰). شدت پرش هیدرولیکی به عدد فرود در محل شروع پرش هیدرولیکی بستگی دارد. طبق طبقه‌بندی ایالات متحده آمریکا، زمانی که عدد فرود بین ۴/۵ تا ۹ باشد، پرش به‌دست آمده که پرش ساکن^۱ نیز نامیده می‌شود، شدید و پایدار است (پترکا، ۱۹۷۸). یکی از روش‌هایی که می‌تواند جایگزین بلوک‌ها در حوضچه آرامش شود، ایجاد زبری مصنوعی در بستر جریان است (غزالی و همکاران، ۱۳۸۹). اولین کسی که مطالعات سینماتیک خود را درباره پرش هیدرولیکی روی بسترهای زبر انجام داد، راجاراتنام در سال ۱۹۶۸ بود. غزالی و همکاران (۱۳۸۹) به بررسی تأثیر زبری‌های مثلی بر مشخصات پرش هیدرولیکی پرداختند. نتایج نشان داد که عمق پایاب و طول پرش روی بسترهای زبر نسبت به بستر صاف به ترتیب ۲۵ و ۵۴/۷ درصد کوچک‌تر است و تنش برشی در بستر زبر به‌طور متوسط ۸/۵ برابر بستر صاف است. طبق تحقیقات بدیع‌زادگان و همکاران (۱۳۹۳)، میزان کاهش طول نسبی نسبت به پرش کلاسیک حدوداً ۳۵ تا ۵۰ درصد است و با افزایش عدد فرود میزان ضریب نیروی برشی (\mathcal{E})، حدوداً ۶/۵ تا ۱۰ برابر بستر صاف است. نتایج مطالعات توکیای و همکاران (۲۰۱۱)، نشان داد که طول پرش برای زبری موج‌دار، آرایش نواری ۴۰ و زیگزاگی بین ۳۵ تا ۵۵ درصد کاهش می‌یابد و عمق پایاب در مقایسه با پرش کلاسیک برای زبری موج‌دار، آرایش نواری ۵ تا ۱۳ و زیگزاگی ۷ تا ۱۵ درصد کاهش می‌یابد. نتایج پژوهش نصرافهانی و شفاعی بجستان (۲۰۱۲) روی بستر زبر نشان داد که طول نسبی پرش $(\frac{L_j}{y_1})$ ، در مقایسه با پرش کلاسیک ۴۱ درصد و نسبت به پرش با پایین‌افتادگی ناگهانی در بستر صاف به اندازه ۵۸ درصد کاهش می‌یابد. ایمران و اکیب (۲۰۱۳) در مطالعه مروری به این نتایج رسیدند که از میان بسترهای موج‌دار مختلف، بستر مثلی اثر بیشتری بر کاهش طول پرش و افزایش تنش برشی بستر خواهد داشت. النخیلی (۲۰۱۴) با

2- Classical Hydraulic Jump

3- Roller Length

1- Steady Jump

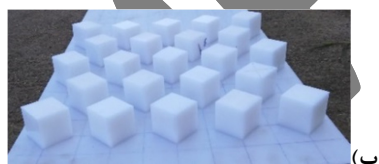
یک سرریز مثلثی با زاویه رأس ۹۰ درجه اندازه‌گیری شد. قرائت‌ها در محدوده دبی حداکثر ۴۴/۲۰ لیتر بر ثانیه و دبی حداقل ۲۶/۴۱ لیتر بر ثانیه انجام شد. در این پژوهش، از ۲۴ مدل بستر زبر از جنس تفلون و در هر بستر، از تعدادی بلوک‌های مکعبی به ابعاد ۰/۰۵ متر استفاده شد. نحوه چیدمان این بلوک‌ها با دو آرایش زیگزاگی و ردیفی است و بلوک‌های مکعبی به صورت دو، سه، چهار و پنج ردیفه با سه زاویه قرارگیری ۹۰، ۴۵ و ترکیبی ۹۰ و ۴۵ درجه (چیدمان حالت ترکیبی به گونه‌ای است که ردیف اول با زاویه ۹۰ درجه و ردیف دوم با زاویه ۴۵ درجه و به همین ترتیب به صورت متوالی پشت سر هم قرار گرفته‌اند) در مقابل جریان، روی بسترها و در پایین دست دریچه کشویی لبه‌تیز نصب شد. دریچه کشویی با بازشدگی ثابت ۴ سانتی‌متر در ۵/۵ متری از ورودی کانال نصب و ارتفاع آب بالادست دریچه در محدوده بین ۰/۱۹ تا ۰/۵۴ متر خوانده شد. نمای واقعی تعدادی از بسترهای زبر مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری عمق آب روی سرریز مثلثی، عمق آب قبل و بعد از پرش هیدرولیکی از یک عمق سنج نقطه‌ای با دقت ± 0.1 میلی‌متر، استفاده شد. جدول ۱، تمام مشخصات بسترهای زبر به کار برده شده و تعداد آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. شکل ۲، نیز نمای واقعی فلوم حین انجام آزمایش را نشان می‌دهد.

$$\varepsilon = \frac{2F_z}{\gamma y_1^2} \quad (3)$$

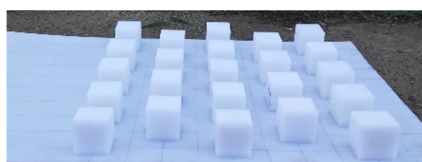
با توجه به تحقیقات انجام شده، زبری بستر عامل مؤثری در کاهش هزینه‌های حوضچه‌های استهلاک انرژی است (راور و همکاران، ۱۳۹۱). از این رو، هدف تحقیقات بعدی محققان، به‌کارگیری بسترهای موج‌دار در کف حوضچه‌های آرامش و بررسی تأثیر این نوع از زبری‌ها بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی بوده است. در این پژوهش، پس از ارائه تئوری مربوط به پرش هیدرولیکی، به بررسی تأثیر آرایش‌های مختلف بستر زبر (زیگزاگی و ردیفی) با بلوک‌های مکعبی با سه زاویه قرارگیری متفاوت در مقابل جریان (۹۰، ۴۵ و ترکیبی ۹۰ و ۴۵ درجه) در ردیف‌های متفاوت (دو، سه، چهار و پنج ردیفه) بر نسبت اعماق مزدوج، طول نسبی پرش، ضریب نیروی برشی و مقایسه آن با برخی از پژوهش‌های انجام شده، پرداخته شده است و تأثیر این پارامترها در بسترهای زبر و صاف مورد مقایسه قرار گرفت. در نهایت، روابط تجربی مناسب برای تعیین عمق نسبی و طول نسبی پرش به ازای عدد فرود در بستر زبر ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

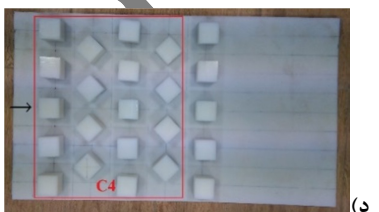
آزمایش‌ها در فلوم مستطیلی با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۱۲، ۰/۵ و ۰/۷ متر در محدوده اعداد فرود (در مقطع اولیه پرش) ۵/۵ تا ۹ در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری انجام شد. دبی جریان با استفاده از



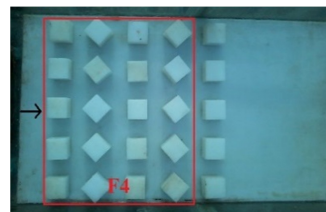
(ب)



(الف)

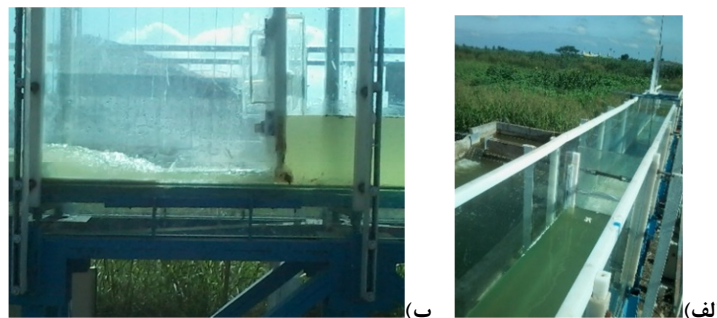


(د)



(ج)

شکل ۱- تعدادی از بسترهای زبر مورد آزمایش. (الف) آرایش زیگزاگی، ۵ ردیفه و زاویه ۹۰ در مقابل جریان؛ (ب) آرایش زیگزاگی، ۵ ردیفه و زاویه ۴۵ در مقابل جریان؛ (ج) آرایش ردیفی، ۵ ردیفه و زاویه ترکیبی ۹۰ و ۴۵ در مقابل جریان (F4 ۴ردیفه)؛ و (د) آرایش زیگزاگی، ۵ ردیفه و زاویه ترکیبی ۹۰ و ۴۵ در مقابل جریان (C4 ۴ردیفه)



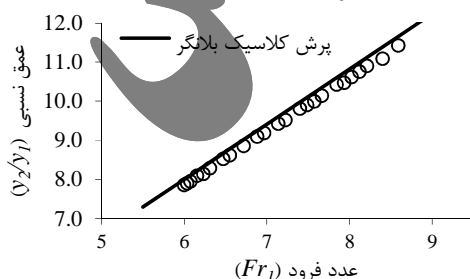
شکل ۲- الف) تصویری از فلوم حین انجام آزمایش؛ و ب) نیمرخ پرش هیدرولیکی ایجادشده در فلوم روی بستر زبر نصب شده بعد از درپچه کشویی حین انجام آزمایش

جدول ۱- حالت‌های مختلف آزمایش‌ها

شماره آزمایش	بستر	آرایش	تعداد ردیف	زاویه قرارگیری بلوکها در مقابل جریان (درجه)	شماره آزمایش	بستر	آرایش	تعداد ردیف	زاویه قرارگیری بلوکها در مقابل جریان (درجه)
۱	A5		۵	۹۰	۱۳	D5		۵	۹۰
۲	B5		۵	۴۵	۱۴	E5		۵	۴۵
۳	C5		۵	ترکیبی ۴۵ و ۹۰	۱۵	E5		۵	ترکیبی ۴۵ و ۹۰
۴	A4		۴	۹۰	۱۶	D4		۴	۹۰
۵	B4		۴	۴۵	۱۷	E4		۴	۴۵
۶	C4		۴	ترکیبی ۴۵ و ۹۰	۱۸	F4		۴	ترکیبی ۴۵ و ۹۰
۷	A3	زیگزاگی	۳	۹۰	۱۹	D3	ردیفی	۳	۹۰
۸	B3		۳	۴۵	۲۰	E3		۳	۴۵
۹	C3		۳	ترکیبی ۴۵ و ۹۰	۲۱	F3		۳	ترکیبی ۴۵ و ۹۰
۱۰	A2		۲	۹۰	۲۲	D2		۲	۹۰
۱۱	B2		۲	۴۵	۲۳	E2		۲	۴۵
۱۲	C2		۲	ترکیبی ۴۵ و ۹۰	۲۴	F2		۲	ترکیبی ۴۵ و ۹۰

$$\frac{y_2}{y_1} = 1.3676 Fr_1 - 0.3384, r^2 = 0.99$$

(۴)



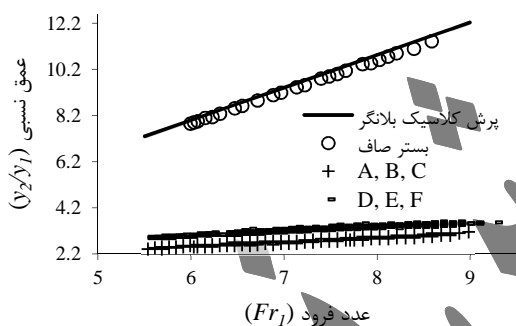
شکل ۳- مقایسه عمق نسبی پرش حاصل از آزمایش‌های حاضر روی بستر صاف با پرش کلاسیک بلانگر

نتایج و بحث

درستی آزمایش‌های انجام شده

برای اطمینان از درستی آزمایش‌های انجام شده و برآورد اختلاف نتایج آزمایش‌های حاضر با پرش کلاسیک بلانگر که روی بستر صاف ایجاد می‌شود، تعدادی آزمایش شاهد روی بستر صاف انجام شد. در این پژوهش عمق نسبی پرش هیدرولیکی حاصل از آزمایش‌های حاضر با پرش کلاسیک ارائه شده توسط بلانگر مورد مقایسه قرار گرفت. شکل ۳، روند مناسب بین عمق نسبی پرش ($\frac{y_2}{y_1}$) در این پژوهش و پرش کلاسیک بلانگر در سال ۱۸۲۸ را نشان می‌دهد. معادله (۴)، حاصل برازش این خط روی بستر صاف مورد آزمایش، است.

اثر آرایش زیگزاگی و ردیفی بر عمق نسبی پرش، مقایسه آن با بستر صاف و استخراج روابط حاکم شکل ۵، تغییرات عمق نسبی جریان روی بسترهایی با آرایش زیگزاگی، ردیفی و بستر صاف را نشان می‌دهد. مطابق شکل، مقادیر عمق نسبی بسترهای زبر با آرایش ردیفی در مقایسه با زیگزاگی بیشتر است. به طوری که عمق نسبی در آرایش زیگزاگی در مقایسه با ردیفی نسبت به بستر صاف کاهش بیشتری دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش اعداد فرود اولیه، نقاط حاصل از برزش بسترهای زبر نسبت به خط بلانگر فاصله بیشتری گرفته و از آن دور می‌شود. همچنین، در جدول ۲ برای هر آرایش، در پژوهش حاضر روابط معنی‌داری با توجه به مقادیر بحرانی ضریب همبستگی در سطح یک درصد، ارائه شده است.



شکل ۵- رابطه عمق نسبی پرش در مقابل عدد فرود برای بسترهای زبر با آرایش زیگزاگی (A, B و C) و آرایش ردیفی (D, E و F) و بستر صاف

جدول ۲- روابط به دست آمده از عمق نسبی پرش برای دو آرایش مورد مطالعه

نوع آرایش	تعداد داده‌ها	معادلات ارائه شده	ضریب همبستگی محاسبه شده (۲)	مقادیر بحرانی ضریب همبستگی در سطح معنی‌داری ۱ درصد
زیگزاگی	۳۰۸	$\frac{y_2}{y_1} = 0.1789 Fr_1 + 1.4702$	۰/۹۷۴۳	۰/۱۴۶
ردیفی	۳۲۵	$\frac{y_2}{y_1} = 0.1822 Fr_1 + 1.9391$	۰/۹۵۴۸	۰/۱۴۳

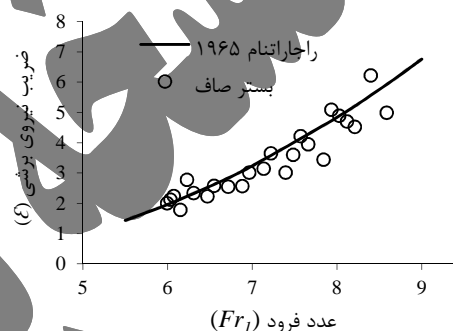
روی بستر زبر میزان $\frac{L_j}{y_1}$ در آرایش زیگزاگی نسبت به ردیفی در مقایسه با بستر صاف، کاهش بیشتری داشت؛ به طوری که در یک عدد فرود اولیه یکسان میزان $\frac{L_j}{y_1}$ در آرایش زیگزاگی کمتر از ردیفی نشان داده شده است. مطابق شکل ۶، با افزایش عدد فرود، $\frac{L_j}{y_1}$ افزایش داشت.

راجاراتنام در سال ۱۹۶۵ معادله (۵) را برای محاسبه ضریب نیروی برشی برای بستر صاف ارائه کرد.

$$\varepsilon = 0.16Fr_1^2 - 0.8Fr_1 + 1 \quad (5)$$

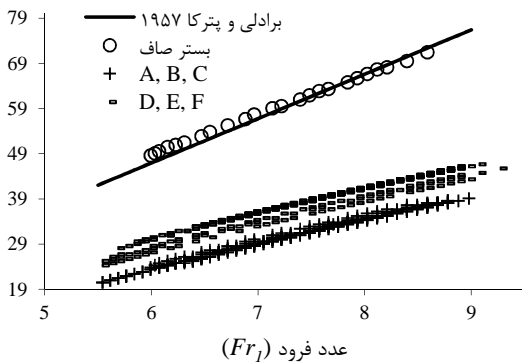
در شکل ۴، نیز ضریب نیروی برشی در مقابل عدد فرود اولیه پرش (Fr_1) برای بستر صاف با معادله حاصل از آن روی بستر صاف که توسط راجاراتنام (۱۹۶۷) ارائه شده، مقایسه شده است. شکل مذکور، بیانگر تطابق مناسب داده‌های حاصل از آزمایش‌های حاضر با نتایج پژوهش راجاراتنام (۱۹۶۵) است. رابطه مربوط به بستر صاف، به صورت معادله (۶) ارائه شده است.

$$\varepsilon = 0.288Fr_1^2 - 2.8007Fr_1 + 8.5014, r^2 = 0.8 \quad (6)$$



شکل ۴- مقایسه ضریب نیروی برشی حاصل از آزمایش‌های حاضر روی بستر صاف با پژوهش راجاراتنام (۱۹۶۵)

اثر آرایش زیگزاگی و ردیفی بر طول نسبی پرش، مقایسه آن با بستر صاف و استخراج روابط حاکم شکل ۶، تغییرات طول پرش نسبت به عمق اولیه را در مقابل عدد فرود روی بسترهای زبر و صاف نشان می‌دهد. داده‌های حاصل از پژوهش حاضر روی بستر صاف با داده‌های پترکا (۱۹۸۴) روی بستر صاف تطابق خوبی دارد.



شکل ۶- مقادیر $\frac{L_j}{y_1}$ در مقابل Fr_1 در آرایش زیگزگی، ردیفی و بستر صاف

برای آرایش زیگزگی و ردیفی، به ترتیب میانگین نسبت طول پرش به عمق اولیه پرش $(\frac{L_j}{y_1})$ ۱/۹۴ و ۱/۶۲ برابر کمتر از بستر صاف به دست آمد. محدوده تغییرات $\frac{L_j}{y_1}$ به ازای کلیه اعداد فرود مورد آزمایش در بستری با آرایش زیگزگی ۲۰/۴۷ تا ۳۹/۰۴ محاسبه شد و در آرایش ردیفی این محدوده بین ۲۴/۲۸ تا ۴۶/۶۶ قرار گرفت. بنابراین، مشخص می‌شود که آرایش زیگزگی نسبت به آرایش ردیفی در کاهش $\frac{L_j}{y_1}$ مؤثرتر است. روابط خطی حاصل از نقاط برازش داده شده شکل ۶ مطابق جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- روابط به دست آمده از طول نسبی پرش برای دو آرایش مورد مطالعه

نوع آرایش	تعداد داده‌ها	معادلات ارائه شده	ضریب همبستگی محاسبه شده (r)	مقادیر بحرانی ضریب همبستگی در سطح معنی داری ۱ درصد
زیگزگی	۳۰۸	$\frac{L_j}{y_1} = 5.4505 Fr_1 - 9.0567$	۰/۹۹۶۲	۰/۱۴۶
ردیفی	۳۲۵	$\frac{L_j}{y_1} = 5.6362 Fr_1 - 1.9497$	۰/۹۷۵۴	۰/۱۴۳

۸۵ درصد داده‌ها به دست آمد. در نهایت، رابطه‌ای که دارای خطای کمتری است، انتخاب و ضرایب ثابت توسط این نرم‌افزار تعیین شد. در روابط برازش داده شده $\frac{y_2}{y_1}$ مقادیر نسبت عمق ثانویه به اولیه؛ Fr_1 ، عدد فرود اولیه؛ $\frac{y_0}{a}$ ، نسبت ارتفاع آب بالادست به بازشدگی دریچه؛ n تعداد ردیف و مقادیر a_0 ، b_0 ، c_0 و d_0 ، ضرایب ثابت معادله است. فرم عمومی این رابطه برای داده‌های عمق نسبی به شکل معادله (۷) است:

$$\frac{y_2}{y_1} = a_0 + Fr_1 b_0 + \frac{y_0 c_0}{a} + n d_0 \quad (7)$$

شکل ۸، مربوط به ۱۵ درصد از داده‌هاست که به صورت تصادفی برای درستی‌سنجی معادله‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند و محور افقی، عمق نسبی آزمایشگاهی و محور عمودی، عمق نسبی به دست آمده از معادله بالا را نشان می‌دهند. شکل‌ها، بیانگر تطابق مناسب بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر حاصل از معادله، نسبت به خط ۴۵ درجه است.

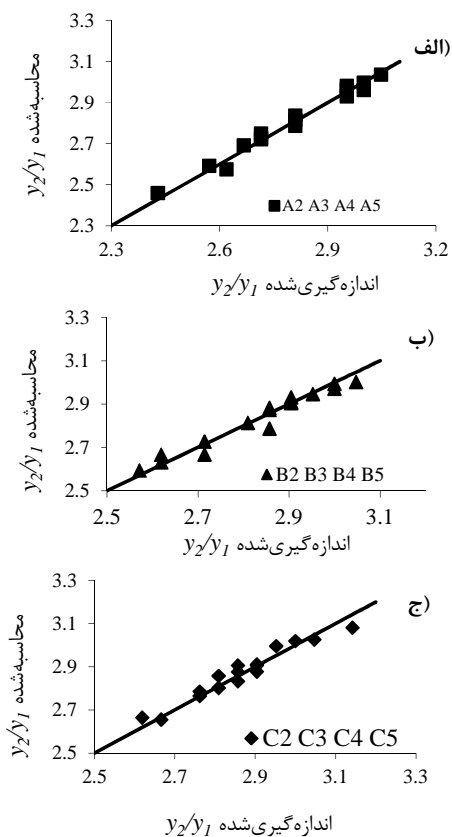
مقادیر ضریب همبستگی (r)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای داده‌های درستی‌سنجی و مقادیر ضرایب معادله ۷ برای حالت‌های مختلف، طبق جدول ۴ برای

اثر آرایش زیگزگی و ردیفی بر ضریب نیروی برشی، مقایسه آن با بستر صاف و استخراج روابط حاکم

از دلایل اصلی کاهش عمق و طول نسبی پرش هیدرولیکی در بستری زبر، افزایش تنش برشی در بستر پرش است (راجاراتنام، ۱۹۶۵). همان‌طور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، با افزایش عدد فرود، تنش برشی در بستری زبر نسبت به بستر صاف افزایش می‌یابد که می‌توان عامل آن را به تشکیل گردابه‌ها در بستر زبر نسبت داد که با افزایش عدد فرود، سرعت این گردابه‌ها هم افزایش می‌یابد. ضریب نیروی برشی در آرایش زیگزگی و ردیفی روی بستری زبر در پژوهش حاضر به طور میانگین ۶ درصد بیشتر از بستر صاف به دست آمد.

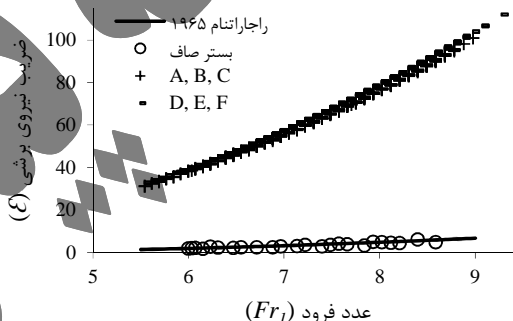
استخراج رابطه غیرخطی عمق نسبی پرش و بررسی درستی داده‌ها

برای استخراج روابط غیرخطی بین نسبت عمق ثانویه به اولیه و سه پارامتر بدون بعد عدد فرود اولیه، نسبت ارتفاع آب در بالادست به بازشدگی دریچه و تعداد ردیف بلوک از نرم‌افزار SPSS 23 استفاده شد و معادلات مختلفی برای



شکل ۸- مقایسه عمق نسبی به دست آمده از رابطه و عمق نسبی اندازه گیری شده برای بسترهای زیر مختلف. (الف) بستر A2 A3 A4 A5؛ (ب) بستر B2 B3 B4 B5؛ (ج) بستر C2 C3 C4 C5

بسترهای زیر محاسبه شد. با توجه به اینکه مقادیر ضریب همبستگی محاسبه شده بیشتر از مقادیر بحرانی ضریب همبستگی در سطوح ۱ و ۵ درصد است، می توان نتیجه گرفت همبستگی به دست آمده در سطوح ۱ و ۵ درصد معنی دار است (منصوففر، ۱۳۸۲). هرچه ریشه میانگین مربعات خطا به صفر نزدیک تر باشد، نشان دهنده این است که عمق نسبی به دست آمده از معادله بالا و مقادیر عمق نسبی مشاهده ای به هم نزدیک تر بوده و رابطه از دقت بالاتری برخوردار است. طبق جدول ۴، کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا و بیشترین مقدار ضریب همبستگی متعلق به بسترهای زیر با زاویه ۹۰ درجه در مقابل جریان (A2، A3، A4 و A5) است. با توجه به ضریب d_0 مشخص شد که تعداد ردیفها اثر قابل ملاحظه ای بر عمق نسبی ندارد و با توجه به مقادیر b_0 ، اثر عدد بدون بعد فرود بیشتر است.



شکل ۷- ضریب نیروی برشی در مقابل عدد فرود روی بسترهای زیر با آرایش زیگزاگی (A، B و C) و ردیفی (D، E و F) و بستر صاف

جدول ۴- ضرایب ثابت معادله عمق نسبی پرش به همراه پارامترهای ارزیابی آن

مقادیر بحرانی ضریب همبستگی در سطوح معنی داری	RMSE	r	d_0	c_0	b_0	a_0	تعداد داده درستی سنجی	تعداد داده قرائت شده	بستر	زاویه
										٪ ۱
۰/۱۶۶۱	۰/۰۲۴	۰/۹۹۰	۰/۰۴۱	-۱/۱۹۹	۰/۵۲۹	-۱/۱۹۸	۱۶	۹۲	A2 A3 A4 A5	۹۰
۰/۱۶۶۱	۰/۰۳۰	۰/۹۷۸	-۰/۰۲۳	۰/۰۷۶	۰/۴۴۶	-۱/۸۱۸	۱۶	۸۲	B2 B3 B4 B5	۴۵
۰/۱۶۶۱	۰/۰۳۱	۰/۹۷۳	۰/۰۱۴	۰/۰۹۲	۰/۴۴۸	-۱/۸۸۶	۱۶	۸۶	C2 C3 C4 C5	ترکیبی

نرمال بودن متغیرها از آزمون شاپیرو-ویلک استفاده شد. برای مقایسه میانگین دو جامعه برای متغیرهای نرمال از آزمون t استفاده شد. آزمون U (من-ویتنی) می تواند

تحلیل آماری

آنالیز آماری داده ها به وسیله نرم افزار SPSS نسخه ۲۳ برای سطح معنی داری ۵ درصد انجام شد.

اولیه و نسبت طول پرش به عمق اولیه در جدول ۹ مشاهده می‌شود. در مقایسه دوتایی و چندتایی بسترها، اثر آرایش بر نسبت عمق ثانویه به اولیه و نسبت طول پرش به عمق اولیه معنی‌دار شد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که اثر آرایش‌های زیگزاگی و ردیفی بر نسبت‌های $\frac{y_2}{y_1}$ و $\frac{L_z}{y_1}$ روی بسترهای زبر قابل توجه است. نسبت عمق ثانویه به اولیه و نسبت طول پرش به عمق اولیه در همه بسترهای زبر با آرایش ردیفی بیشتر از آرایش زیگزاگی بوده و این مقادیر روی بستر صاف بیشتر از بسترهای زبر با آرایش‌های مختلف به دست آمد.

مقایسه عمق نسبی و ضریب نیروی برشی در آزمایش حاضر و سایر تحقیقات

شکل ۹، تغییرات عمق نسبی پرش در مقابل عدد فرود را برای تحقیقات بدیع‌زادگان و همکاران (۱۳۹۳)، غزالی و همکاران (۱۳۸۹)، راور و همکاران (۱۳۹۱)، پارسامهر و همکاران (۱۳۹۱)، قربانی و همکاران (۱۳۹۴)، نیسی و شفاعی بجنستان (۱۳۸۸)، اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)، توکیای (۲۰۰۵)، عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)، السبایه و شبلیک (۲۰۱۰)، ایزدجو و شفاعی بجنستان (۲۰۰۷) روی انواع بسترهای زبر مختلف و آزمایش‌های حاضر نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در اعداد فرود بالاتر، میزان کاهش عمق نسبی در بسترهای زبر نسبت به پرش کلاسیک بالاتر بیشتر می‌شود. با توجه به شکل، استفاده از بسترهای زبر مکعبی در پژوهش حاضر، عملکرد بهتری در کاهش عمق نسبی پرش نسبت به سایر محققان داشته است.

با مقایسه مطالعات سایر محققان با پژوهش حاضر در شکل ۱۰ می‌توان افزایش ضریب نیروی برشی روی بسترهای زبر با افزایش عدد فرود را مشاهده کرد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، روند منحنی‌های حاصل از نقاط برازش داده شده در این بررسی با سایر تحقیقات هم‌خوانی دارد. اما تغییرات ضریب نیروی برشی در پژوهش حاضر از شیب تندتری نسبت به سایر تحقیقات برخوردار است که دلیل آن می‌تواند ناشی از شدت گردابه‌های تشکیل شده بین بلوک‌ها باشد.

جانشین ناپارامتری آزمون t برای مقایسه میانگین دو جامعه بر اساس دو نمونه مستقل از آنها باشد. برای مقایسه میانگین چند جامعه از آزمون H (کروسکال-والیس) (به دلیل نرمال نبودن داده‌های مورد مقایسه) بر اساس نمونه‌های مستقل از آنها استفاده شد (مؤمنی و فعال قیومی، ۱۳۸۶). به همین ترتیب، بنا به توضیحات بالا، برای بررسی معنی‌داری از آزمون‌های مذکور استفاده شد که به‌عنوان نمونه برای تعدادی از بسترهای مورد آزمایش، آزمون t برای داده‌های عمق نسبی پرش به تفصیل بیان شده است و برای بقیه بسترها به ازای سایر داده‌های عمق نسبی و نیز برای همگی داده‌های طول نسبی، نتایج به‌صورت جمع‌بندی ارائه شده است.

بررسی اثر آرایش زیگزاگی (C4) و ردیفی (F4) بر نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه پرش (آزمون t)

قسمت اول جدول ۵ مربوط به آزمون لون^۱ (همگنی یا برابری واریانس) است که برابری واریانس‌ها را بررسی می‌کند با توجه به اینکه $\text{sig.} > 0.05$ است فرض صفر مبنی بر برابر بودن واریانس دو جامعه تأیید شد. برای قسمت دوم جدول تحت عنوان آزمون t ، برای بررسی برابری میانگین‌ها از نتایج سطر اول (واریانس‌های برابر) استفاده شد. نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین میانگین دو جامعه وجود دارد ($\text{sig. (2-tailed)} < 0.05$). به عبارت دیگر، فرض صفر رد شد و وجود تفاوت معنی‌داری بین داده‌های عمق نسبی پرش در بستر زبر با آرایش زیگزاگی C4 و بستر زبر با آرایش ردیفی F4 تأیید شد. برای بررسی اینکه میانگین کدام دو گروه C4 و F4 بیشتر است، از حد بالا و حد پایین مربوط به فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای تفاضل میانگین دو گروه استفاده شد. با توجه به اینکه حد بالا و پایین منفی است، بنابراین میانگین عمق نسبی بستر زبر C4 کمتر از F4 است؛ به عبارت دیگر، ثابت شد که مقادیر عمق نسبی در بستر با آرایش زیگزاگی کمتر از آرایش ردیفی است.

اثر آرایش و مقایسه بستر زبر با صاف

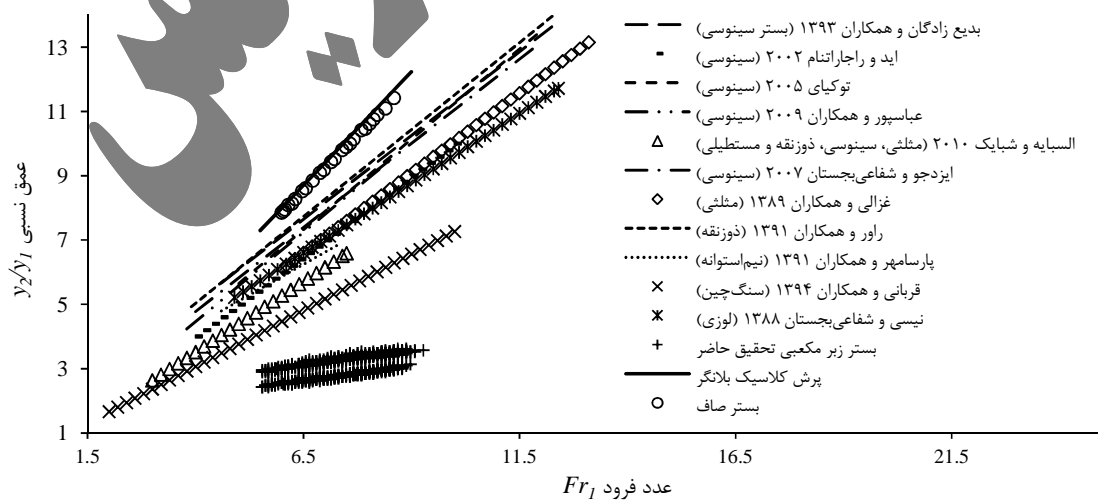
اثر آرایش‌های زیگزاگی و ردیفی و مقایسه بستر زبر با بستر صاف روی بسترهای مختلف بر نسبت عمق ثانویه به

جدول ۵- خروجی آزمون t در نرم افزار SPSS برای مقایسه میانگین دو بستر (آزمون پارامتریک)

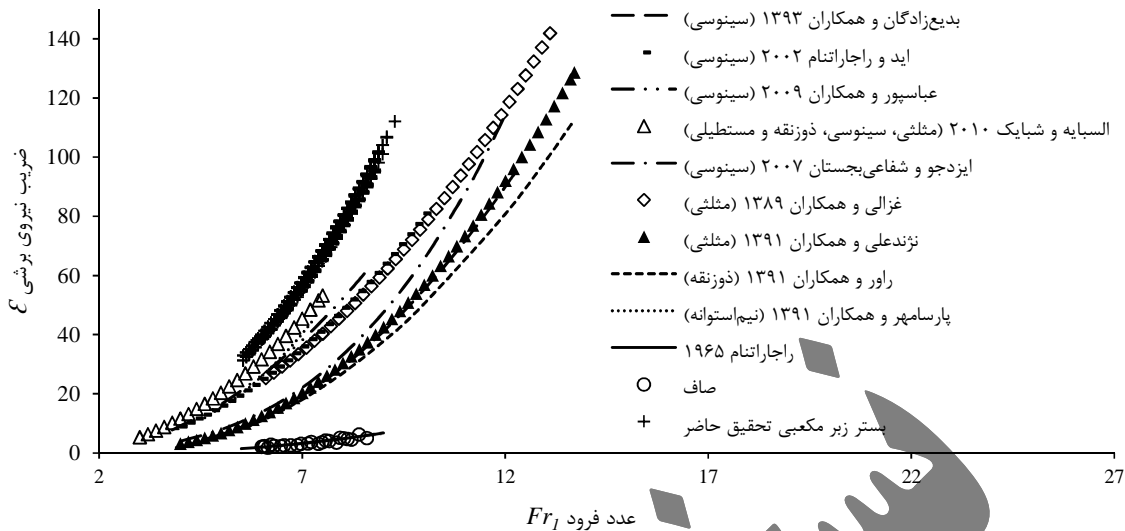
آزمون تی برای برابری میانگین‌ها		آزمون لون برای برابری واریانس							
فاصله اطمینان ۹۵٪ از اختلاف‌ها	اختلاف خطای استاندارد شده	اختلاف میانگین	مقدار پارامتر معنی داری محاسبه شده	درجه آزادی	آماره t	مقدار پارامتر معنی داری محاسبه شده	آماره F		
حد بالا	حد پایین								
-۰/۴۳۵	-۰/۶۱۱	۰/۰۴۳	-۰/۵۲۳	۰/۰۰۰	۴۶	-۱۱/۹۵	۰/۶۴۳	۰/۲۱	فرض واریانس‌های برابر
-۰/۴۳۵	-۰/۶۱۲	۰/۰۴۳	-۰/۵۲۳	۰/۰۰۰	۴۵/۴۷	-۱۱/۹۵			فرض واریانس‌های نابرابر

جدول ۹- خلاصه تحلیل آماری برای بسترهای مورد مطالعه

$\frac{y_2}{y_1}$	$\frac{y_2}{y_1}$	بستر	زاویه	ردیف
A2 < D2	A2 < D2	A2 D2	۹۰	۲
A3 < D3	A3 < D3	A3 D3		۳
A4 < D4	A4 < D4	A4 D4		۴
A5 < D5	A5 < D5	A5 D5		۵
B2 < E2	B2 < E2	B2 E2		۴۵
B3 < E3	B3 < E3	B3 E3	۳	
B4 < E4	B4 < E4	B4 E4	۴	
B5 < E5	B5 < E5	B5 E5	۵	
C2 < F2	C2 < F2	C2 F2	ترکیبی	
C3 < F3	C3 < F3	C3 F3		۳
C4 < F4	C4 < F4	C4 F4		۴
C5 < F5	C5 < F5	C5 F5		۵
ABC < DEF ABC < SMOOTH DEF < SMOOTH	ABC < DEF ABC < SMOOTH DEF < SMOOTH	ABC DEF SMOOTH		بسترهای زیر با آرایش زیرکزاکی، ردیفی و بستر صاف



شکل ۹- مقایسه عمق نسبی پرش در مقابل عدد فرود در مطالعه حاضر و سایر تحقیقات انجام شده



شکل ۱۰- مقایسه ضریب نیروی برشی در مقابل عدد فرود در مطالعه حاضر و سایر تحقیقات انجام شده

نتیجه‌گیری

نسبت عمق ثانویه به اولیه ($\frac{y_2}{y_1}$) در بسترهای زبر با آرایش ردیفی در مقایسه با زیگزگی بیشتر است؛ به طوری که عمق نسبی در آرایش زیگزگی در مقایسه با ردیفی نسبت به بستر صاف کاهش بیشتری دارد و مقادیر عمق نسبی در بستر زبر کمتر از پرش کلاسیک بلائنگر است. برای آرایش زیگزگی و ردیفی، به ترتیب میانگین نسبت طول پرش به عمق اولیه پرش ($\frac{L_j}{y_1}$)، $\frac{1}{9}$ و $\frac{1}{6}$ برابر کمتر از بستر صاف است؛ بنابراین، اثر آرایش زیگزگی نسبت به ردیفی در کاهش $\frac{L_j}{y_1}$ بیشتر است. محدوده تغییرات $\frac{L_j}{y_1}$ به ازای کلیه اعداد فرود مورد آزمایش در بستری با آرایش زیگزگی $\frac{20}{5}$ تا $\frac{39}{10}$ و در ردیفی این محدوده بین $\frac{24}{3}$ تا $\frac{46}{7}$ استخراج شد. ضریب نیروی برشی که عامل اصلی کاهش مشخصات پرش هیدرولیکی (عمق و طول پرش) است به طور متوسط در آرایش زیگزگی و ردیفی روی بسترهای زبر در پژوهش حاضر ۶ درصد بیشتر از بستر صاف به دست آمد. مقادیر نسبت عمق ثانویه به اولیه ($\frac{y_2}{y_1}$)، طول نسبی و ضرب نیروی برشی با افزایش عدد فرود افزایش نشان داد و منحنی‌های عمق نسبی و ضریب نیروی برشی در آزمایش حاضر با سایر تحقیقات تطابق خوبی از نظر روند تغییرات از خود نشان داد.

منابع

۱. بدیع‌زادگان ر.، صانعی م. و اسماعیلی ک. ۱۳۹۳. مقایسه مشخصات پرش هیدرولیکی روی انواع بسترهای زبر موج‌دار. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۸(۲): ۲۲۰-۲۳۲.
۲. بیرامی م. ک. ۱۳۹۰. سازه‌های انتقال آب. دانشگاه صنعتی اصفهان. چاپ نهم، ۴۶۲ ص.
۳. پارسامهر پ. حسین‌زاده‌دلیر ع. فرسادی‌زاده د. و عباسپور ا. ۱۳۹۱. پرش هیدرولیکی بر روی بستر با زبری‌های نیم‌استوانه‌ای شکل. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۶(۳): ۷۷۵-۷۸۵.
۴. حسینی م. و ابریشمی ج. ۱۳۹۰. هیدرولیک کانال‌های باز. دانشگاه امام رضا. مشهد. چاپ بیست و هفتم. ۶۱۳ ص.
۵. راور ز. فرهودی ج. و نژندعلی ع. ۱۳۹۱. تأثیر بستر زبر دوزنقه‌ای قائم بر خصوصیات پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، دانشگاه فردوسی مشهد. ۲۶(۱): ۸۵-۹۴.
۶. غزالی م. صمدی بروجنی ح. قربانی ب. و فتاحی نافچی ر. ۱۳۸۹. تأثیر بستر موج‌دار مثلثی بر مشخصات پرش هیدرولیکی. مجله پژوهش آب ایران. ۷(۴): ۹۹-۱۰۷.
۷. قربانی ب. صمدی بروجنی ح. و رحمتی ا. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی در حوضچه

19. Hager W. H. Bremen R. and Kawagowshi N. 1990. Classical Hydraulic Jump: Length of Roller. *J. Hydraul. Res.* 28(5): 591-608.
20. Imran H. M. and Akib Sh. 2013. A review of hydraulic jump properties in different channel bed conditions. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering. 126-130.
21. Izadjoo F. and Shafai Bajestan M. 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. *Journal of Applied Sciences.* 7(8): 1164-1169.
22. Naser Esfahani M. J. and Shafai Bajestan M. 2012. Effect of roughness height on the length of B jump at an abrupt drop. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences.* Science Explorer Publications. 3: S. 2757-2762.
23. Peterka A. J. 1978. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipater. United States Department of the Interior. Bureau of Reclamation. Washington. 240 p.
24. Peterka A. J. 1984. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipator. United States Department of the Interior. Bureau of Reclamation. Washington. 240 p.
25. Silvester R. 1964. Hydraulic jump in all shapes or horizontal channels. *Proceeding of the American Society of Civil Engineers.* J. of Hyd. Div. 90(Hy1): 23-55.
26. Rajaratnam N. 1965. The hydraulic jump as a wall jet. *Journal of Hydraulic.* Division American Society. *Civil Engineering.* 91(5): 107-132.
27. Rajaratnam N. 1968. Hydraulic jump on rough bed. *Transaction of the Engineering Institute of Canada.* 11(2): 4-8.
28. Tokyay N. D. 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. EWRI. Water & Environmental Resources Congress. Anchorage, Alaska, USA. 8 p.
29. Tokyay N. D. Evcimen T. U. and Şimşek C. 2011. Forced hydraulic jump on non-protruding rough beds. *Canadian Journal of Civil Engineering.* 38: 1136-1144.
- آرامش با بستر سنگ‌چین. یادداشت تحقیقاتی. نشریه علمی-پژوهشی هیدرولیک. ۱۰(۲): ۷۳-۸۲.
۸. منصورفر ک. ۱۳۸۲. روش‌های آماری. انتشارات دانشگاه تهران. چاپ ششم. ۳۹۴ ص.
۹. مؤمنی م. و فعال قیومی ع. ۱۳۸۶. تحلیل‌های آماری با استفاده از SPSS. نشر کتاب نو. چاپ اول. ۳۰۲ ص.
۱۰. نژندعلی ع. اسماعیلی ک. و فرهودی ج. ۱۳۹۱. اثر فاصله زبری‌های مثلثی بستر بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). دانشگاه فردوسی مشهد. ۲۶(۲): ۲۸۲-۲۸۹.
۱۱. نیسی ک. و شفاعی بجمستان م. ۱۳۸۸. بررسی اثر زبری‌های لوزی‌شکل بر عمق متناوب پرش هیدرولیکی. هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران. دانشگاه شیراز. ۲۱ تا ۲۳ اردیبهشت ۱۳۸۸. ۹ ص.
12. Abbaspour A. Hosseinzadeh Dalir A. Parsadizadeh D. and Sadraddini A. A. 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *Journal of Hydro-environment Research.* 3: 109-117.
13. Belanger J. B. 1828. *Essai sur la solution numerique de quelques problemes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes (Essay on the numerical solution of some problems relative to steady flow of water).* Carilian-Goeury: Paris France.
14. Bradley J. N. and Peterka A. J. 1957. The hydraulic design of stilling basin. *ASCE Journal of Hydraulics Division.* 83(HY5): 1401-1406.
15. Chow V. T. 1959. *Open channel hydraulics.* McGraw-Hill. New York. 680 p.
16. Ead S. A. and Rajaratnam N. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering.* 128(7): 656-663.
17. Elnikhely E. A. 2014. Effect of staggered roughness elements on flow characteristics in rectangular channel. *IJRE: International Journal of Research in Engineering and Technology.* Volume: 03 Issue: 08. 12 p.
18. Elsebaie I. H. and Shabayek Sh. 2010. Formation of hydraulic jumps on corrugated beds. *International Journal of Civil & Environmental Engineering.* 10(01): 37-47.

