



دانشگاه گواران و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و چهارم، شماره ششم، ۱۳۹۶

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

DOI: 10.22069/jwsc.2017.12528.2723

بررسی اثر زاویه برخورد جت به پرش هیدرولیکی روی بستر زبر

* مهدی دستورانی^۱، کاظم اسماعیلی^۲، مهدی بهرامی^۳ و علی دیندارلو^۴

^۱ استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، ^۲ دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد،

^۳ استادیار گروه علوم مهندسی آب، دانشگاه فسا، ^۴ استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه خلیج فارس

تاریخ دریافت: ۹۶/۱/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۹

چکیده

سابقه و هدف: تشکیل پرش در حوضچه‌های آرامش نقش مؤثری در استهلاك انرژی جریان در پایاب سازه‌های آبی ایفا می‌کند. پرش هیدرولیکی از نوع جریان‌های متغیر سریع است که در صورت مناسب بودن شرایط کانال در پایین دست جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی تغییر می‌یابد و با استهلاك انرژی قابل توجهی همراه است. در این پژوهش شیوه جدیدی به منظور کاهش اعماق مزدوج و طول پرش پیشنهاد شده است که در آن از ویژگی‌های یک جت مستطیلی آزاد سریع و زبری کف برای تأثیرگذاری بر خصوصیات پرش استفاده گردیده است. برخورد جت سریع به پرش و انتقال اندازه حرکت به آن خصوصیات و موقعیت پرش را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش یک مطالعه آزمایشگاهی با مجموعه‌ای از آزمایش‌ها در یک کانال با جداره‌های تمام شیشه‌ای به عرض ۳۰ سانتی‌متر و به طول ۱۲ متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر انجام گرفت. عمق جریان در طول کانال به دو روش مستقیم و غیرمستقیم اندازه‌گیری شد. در روش غیرمستقیم با نصب پیزومترهایی در کف کانال و قرائت ارتفاع پیزومترها به کمک دوربینی با قدرت وضوح بالا و سپس استفاده از نرم‌افزار گرافر عمق جریان اندازه‌گیری شد. به منظور بررسی تأثیر دبی، زاویه جت و زبری کف بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی از سه دبی ۲/۵ و ۳/۲ لیتر بر ثانیه برای جت و چهار زاویه برای راستای افقی جت شامل ۶۰ درجه، ۹۰ درجه، زاویه با حداکثر جابه‌جایی ابتدای پرش و زاویه بدون تغییر ابتدای پرش و سه نوع زبری استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج آزمایشگاهی نشان داد، برای یک زاویه مشخص جت، در دبی‌های مختلف، پرش هیدرولیکی هیچ‌گونه جابه‌جایی ندارد که این زاویه به عنوان زاویه بی‌اثر نامگذاری شد. با افزایش زاویه جت، پرش به سمت بالادست حرکت کرد و از یک زاویه به بعد پرش هیچ‌گونه حرکتی به سمت بالادست نداشت که این زاویه نیز به عنوان حداکثر زاویه جابه‌جایی پرش نامگذاری گردید. تغییر زاویه و دبی جت موجب کاهش یا افزایش عمق ثانویه، طول پرش، افت انرژی نسبی و نیروی برشی بستر شد. زبری کف کانال باعث کاهش مشخصات پرش هیدرولیکی گردید. استفاده از جت با حداکثر زاویه، دبی ۳/۲ لیتر بر ثانیه، کم‌ترین عدد فرود جریان و زبری سینوسی، نسبت اعماق مزدوج به میزان ۴۵/۹ درصد کاهش یافت. با به‌کارگیری جت با زاویه ۶۰ درجه، دبی ۳/۲ لیتر بر ثانیه، بیش‌ترین عدد فرود جریان و حالت

* مسئول مکاتبه: mdastourani@birjand.ac.ir

بستر صاف، اعماق مزدوج ۸/۷ درصد افزایش یافت. حداکثر میزان کاهش طول پرش (۶۱/۳ درصد) در استفاده از جت با حداکثر زاویه، دبی ۳/۲ لیتر بر ثانیه، کم‌ترین عدد فرود جریان و حالت زبری سینوسی رخ داد. حداکثر میزان افزایش طول پرش (۱۵/۷ درصد) نیز در استفاده از جت با زاویه ۶۰ درجه، دبی ۳/۲ لیتر بر ثانیه و بیش‌ترین عدد فرود بود. استفاده از جت با حداکثر زاویه، دبی ۳/۲ لیتر بر ثانیه، کم‌ترین عدد فرود و بستر صاف، نیروهای برشی تا حدود ۱۷/۸ برابر نسبت به حالت بدون جت و بدون زبری (بستر صاف)، افزایش نشان داد. استفاده از جت با زاویه ۶۰ درجه، نیروهای برشی را به میزان ۶/۷ برابر نسبت به حالت بدون جت و بدون زبری کف کاهش داد.

نتیجه‌گیری: وارد کردن جت به پرش با زاویه‌ای بزرگ‌تر از زاویه بی‌اثر، باعث کاهش نسبت اعماق مزدوج، طول پرش و افزایش افت انرژی و نیروهای برشی کف می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، جت آزاد مستطیلی، جریان فوق بحرانی، زبری

مقدمه

پرش هیدرولیکی از انواع جریان‌های متغیر سریع است که با تبدیل جریان از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی و افزایش عمق جریان موجب کاهش سرعت و استهلاک انرژی در پایین‌دست سازه‌های با جریان فوق بحرانی می‌گردد. برای کنترل پرش هیدرولیکی از حوضچه آرامش استفاده می‌شود. تاکنون مطالعات زیادی در خصوص نحوه تشکیل و خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش انجام شده و روش‌های متعدد تحلیلی و تجربی برای پیش‌بینی وضعیت و مشخصات پرش هیدرولیکی به‌منظور طراحی بهینه حوضچه‌های آرامش صورت گرفته است. پرش هیدرولیکی اولین بار به‌صورت آزمایشی توسط بایدون (۱۸۲۰)، مورد پژوهش و بررسی قرار گرفت. این پژوهش و بررسی به بلانگر (۱۸۲۸) کمک کرد تا با تمایز مابین شیب ملایم و تند، جریان را تشخیص دهد. او مشاهده کرد که در کانال‌های با شیب تند، پرش هیدرولیکی مکرراً به‌وسیله مانعی که در برابر جریان یکنواخت قرار می‌گیرد، ایجاد می‌شود (۵). راجاراتنام (۱۹۶۸)، اولین مطالعات سیستماتیک را در خصوص پرش‌های بر روی بستر زبر انجام داد. او پارامتری به نام عامل زبری ($k = \frac{ke}{y_1}$) معرفی کرد که در آن k_e ارتفاع معادل

زبری و y_1 عمق اولیه جریان ورودی بالای سطح زبری می‌باشد و نشان داد که طول غلتنانی (L_T) و طول پرش (L_z) بر روی بسترهای زبر (در مقایسه با همین طول‌ها در پرش با بستر صاف) به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. نتایج به‌دست آمده توسط راجاراتنام توسط پژوهشگران دیگری چون خاپاوف، میخالوف و کیسلوف نیز مورد تأیید قرار گرفته است (۱۱). محمدعلی (۱۹۹۱)، اید و راجاراتنام در سال (۲۰۰۲)، گوهری و فرهودی (۲۰۰۹)، عباسپور و حسین‌زاده دلیر (۲۰۰۹)، شفافی‌بجستان و نیسی (۲۰۰۹) و نژندعلی و همکاران (۲۰۱۲) در خصوص پرش هیدرولیکی تشکیل‌شده بر روی بسترهای زبر مطالعاتی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که زبری بر مشخصات پرش هیدرولیکی تأثیر دارد و باعث کاهش عمق مزدوج و طول پرش می‌گردد (۱، ۳، ۴، ۷، ۸ و ۱۲). یوکسل و همکاران (۲۰۰۴)، شباهت بین پیشانی یک موج شکسته و پرش هیدرولیکی را مورد مطالعه قرار دادند. موج مستغرق به‌وسیله یک پرش هیدرولیکی، تحت تماس جت آبی با یک زاویه مشخص به پنجه آن، شبیه‌سازی گردید. مطالعات عددی و آزمایشگاهی برای تعیین مشخصات جریان و اتلاف انرژی انجام شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که جت آبی می‌تواند باعث افزایش اتلاف انرژی در موج مستغرق شود (۱۷).

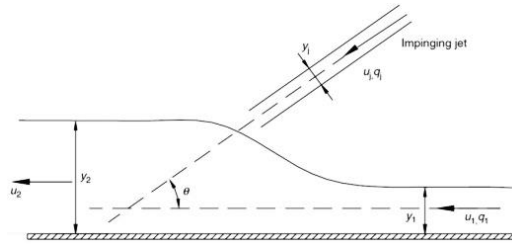
آب‌پایه به‌طور متوسط ۴۶ درصد و در حالت پرش بر روی بستر زبر به‌طور متوسط ۴۹ درصد کاهش می‌یابد (۱۰). جم و همکاران (۲۰۱۵)، مطالعات خود را در حوضچه زبر شده به‌وسیله اجزای زبری (بلوک‌های دنداندار) با شکل هندسی و آرایش چیدمان جدید و در نهایت بررسی تأثیر پارامترهای مختلف پرش هیدرولیکی در محدوده اعداد فرود ۱۱-۱۴، روی آن انجام دادند. نتایج آزمایشگاهی کاهش پارامترهای پرش هیدرولیکی را روی حوضچه دنداندار بلوکی نسبت به بستر صاف نشان دادند، به‌طوری‌که طول پرش و عمق ثانویه پرش به‌ترتیب ۵۰-۶۰ درصد و ۱۰-۱۲ درصد کاهش داشته است (۶). ولی‌نیا و همکاران (۲۰۱۴)، بررسی اثر فاصله بلوک‌های کف از دریچه بر طول پرش هیدرولیکی و استهلاك انرژی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که طول پرش هیدرولیکی با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد طول پرش هیدرولیکی با فاصله بلوک از دریچه رابطه مستقیم دارد و با افزایش فاصله بلوک از دریچه افزایش می‌یابد و با افزایش عمق پایاب نسبی استهلاك انرژی نسبی نیز افزایش می‌یابد (۱۵). احمدی و هنر (۲۰۱۵)، در مطالعه خود اثر آب‌پایه انتهایی با اشکال متفاوت بر ویژگی‌های هیدرولیکی پرش در یک حوضچه آرامش مورد بررسی قرار دادند. 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 (۲). با توجه به مطالعات فوق‌الذکر و همچنین با توجه به این‌که جت، زاویه جت و زبری کف هر سه به طراحی اقتصادی حوضچه‌ها کمک می‌کنند، هدف از پژوهش حاضر بررسی زاویه جت روی مشخصات پرش هیدرولیکی در بستر زبر شامل نسبت عمق ثانویه، طول پرش و افت انرژی به‌طور آزمایشگاهی می‌باشد.

آیچا وارول و همکاران (۲۰۰۹)، در مطالعات آزمایشگاهی خود، تأثیر استفاده از جت آب را بر مشخصات پرش هیدرولیکی مورد ارزیابی قرار دادند. آزمایش‌های آن‌ها بر روی یک فلوم با مقطع مستطیلی و طول پنج متر انجام شد و در آن، پنج دبی برای جت آبی فرض گردید که با زاویه ثابت ۶۰ درجه، به پرش هیدرولیکی اعمال می‌شد. آن‌ها نیز مشاهده نمودند که وارد نمودن جت آبی به پرش هیدرولیکی باعث می‌شود که اتلاف انرژی افزایش یابد. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که با افزایش دبی جت آبی، مقدار اتلاف انرژی نیز افزایش می‌یابد (۱۶). توزنده‌جانی و کاشفی‌پور (۲۰۱۳) بررسی آزمایشگاهی اثر تخلیه تحتانی سد انحرافی روی مشخصات پرش هیدرولیکی را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که تلاقی جت‌های آب با زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق بیش‌ترین تأثیر را در کاهش طول و عمق مزدوج پرش دارد و هنگامی که ۲۶ درصد دبی از شکاف عبور می‌کند، طول پرش نسبت به حالت کلاسیک در حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد (۱۴). نیسی و همکاران (۲۰۱۴)، مطالعات خود را بر تأثیر زبری‌های بستر بر مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با واگرایی ناگهانی با نسبت بازشدگی ۵۰ درصد مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که حوضچه آرامش واگرایی ناگهانی زبر، باعث ایجاد پرش نامتقارن قوی‌تر نسبت به پرش واگرایی صاف شده، عمق مزدوج را به‌طور متوسط به‌میزان ۳۱/۶ درصد کاهش و راندمان پرش را نسبت به پرش کلاسیک به‌طور متوسط به‌میزان ۱۹ درصد افزایش می‌دهد (۹). پارسامهر و همکاران (۲۰۱۳)، پژوهش خود را بر خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با زبری‌های نیمه‌استوانه‌ای شکل و آب‌پایه مستطیلی بر روی دو بستر با شیب معکوس ۱ و ۱/۵ درصد و بستر افقی انجام دادند. نتایج‌شان نشان داد طول پرش هیدرولیکی در شیب معکوس ۱/۵ درصد بر روی

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم برپرش هیدرولیکی در حالت برخورد جت آبی روابط حاکم در برخورد جریان جت آزاد سریع به پرش هیدرولیکی: شکل ۱ شمای ساده از چگونگی

برخورد یک جت سریع مستطیلی را به یک پرش هیدرولیکی نشان می‌دهد. معادله یک‌بعدی مقدار اندازه حرکت برای چنین شرایطی در واحد عرض به صورت رابطه ۱ خواهد بود.



شکل ۱- شکل ساده از نحوه برخورد جت آزاد سریع به پرش هیدرولیکی (۱۴).

Figure 1. A simple figure of how to collision of rapidly free jet to hydraulic jump.

$$\rho (q_1 + q_j) u_2 - \rho q_1 u_1 - \rho q_j u_j \cos \theta + F = \frac{1}{2} \rho g y_1^2 - \frac{1}{2} \rho g y_2^2 \quad (1)$$

مخصوص آب و F نیروی ناشی از تلاطم ایجادشده در اثر اعمال جت می‌باشد. بنابراین $q_1 = y_1 u_1$ و $q_2 = y_2 u_2$ و $q_j = y_j v_j$ می‌باشد. از تقسیم معادله مقدار حرکت به $\rho g y_1^2$ (۱/۲) رابطه ۲ را حاصل می‌کند:

که در آن، u_1 و y_1 به ترتیب سرعت و عمق بالادست پرش می‌باشد و u_2 و y_2 نیز به ترتیب سرعت و عمق پایین‌دست پرش می‌باشد. u_j و y_j به ترتیب سرعت و ضخامت جت است. θ زاویه جت نسبت به افق، ρ جرم

$$\frac{y_2^3}{y_1^3} - \frac{y_2}{y_1} \left[2Fr_1^2 \left(1 + \frac{q_j^2 y_1}{q_1^2 y_j} \cos \theta \right) - 1 \right] + 2Fr_1^2 \left(1 + \frac{q_j}{q_1} \right)^2 + \frac{2F}{gy_1^2} = 0 \quad (2)$$

$$f_1(y_1, v_1, g, \rho, u, s, t, \theta, y_j, u_j, x_j) = y_2 \quad (3)$$

که در آن، S فاصله بین زبری‌ها، t ارتفاع زبری‌ها، v لزجت سینماتیک سیال، ρ چگالی متوسط، g شتاب ثقل و v_1 و y_1 به ترتیب سرعت جریان و عمق جریان فوق‌بحرانی ورودی، u و y سرعت و پهنای جت، x_j محل اثر جت و θ زاویه جت می‌باشد. با استفاده از آنالیز ابعادی (روش باکینگهام) اگر ρ ، v_1 و y_1 را پارامترهای تکراری در روش باکینگهام انتخاب نماییم رابطه ۵ به دست می‌آید:

$Fr_1 = u_1 / \sqrt{gy_1}$ برابر است با عدد فرود بالادست پرش جریان. برای $q_j = 0$ رابطه ۲ به معادله کلاسیک برای یک پرش آزاد تغییر می‌کند. پرش هیدرولیکی باعث اتلاف انرژی (ΔE) می‌گردد. این اتلاف انرژی در پرش برابر است با تفاوت انرژی قبل و بعد از پرش. که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \quad (3)$$

تحلیل ابعادی: به‌طورکلی خصوصیات پرش هیدرولیکی پس از اعمال جت به پارامترهای زیر بستگی دارد:

$$\frac{y_2}{y_1} = f_2 \left(Fr_1, \frac{v_1}{\sqrt{g y_1}}, R_1, \frac{v_1 y_1}{\nu}, \frac{t}{y_1}, \frac{s}{y_1}, \theta, \frac{y_j}{y_1}, \frac{x_j}{y_1}, \frac{u_j}{v_1} \right) \quad (5)$$

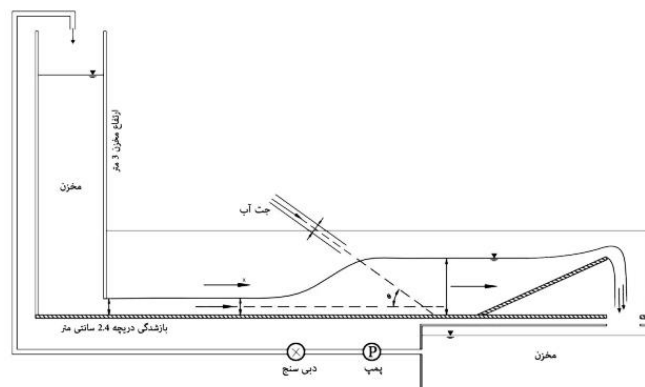
جدارهای تمام شیشه‌ای به عرض ۳۰ سانتی‌متر و به طول ۱۲ متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر استفاده شد. برای ایجاد جریان فوق بحرانی با عدد فرود بالا، مخزنی به عرض ۳۰ سانتی‌متر و به طول ۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳ متر از ورق آهن گالوانیزه ساخته و در قسمت ابتدایی کانال نصب گردید. جهت تنظیم عمق پایاب و همچنین تثبیت موقعیت پرش، از یک دریچه قابل کنترل در پایین دست کانال استفاده گردید. نمای از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۲ ارائه شده است.

از آنجائی که مقادیر اعداد رینولدز در آزمایش‌های انجام شده بزرگ بود می‌توان از اثر لزجت چشم‌پوشی کرد و رابطه ۶ به صورت زیر ساده شد:

$$\frac{y_2}{y_1} = f_2 \left(Fr_1, \frac{t}{y_1}, \frac{s}{y_1}, \frac{y_j}{y_1}, \theta, \frac{x_j}{y_1}, \frac{u_j}{v_1} \right) \quad (6)$$

دیگر خصوصیات پرش از جمله طول پرش، افت انرژی نسبی و تنش برشی نیز تابعی از پارامترهای فوق خواهند بود.

به منظور بررسی اثر زاویه برخورد جت بر مشخصات پرش هیدرولیکی، از یک مدل آزمایشگاهی در آزمایشگاه دانشگاه فردوسی مشهد شامل کانال با



شکل ۲- نمای از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش.

Figure 2. View of a laboratory flume used in this study.

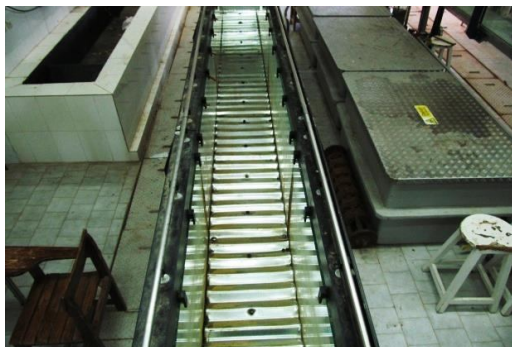
کانال و جهت قرائت ارتفاع پیزومترها از دوربین عکاسی با قدرت وضوح بالا و به وسیله نرم‌افزار گرافر برای رقومی نمودن تصاویر استفاده شد و به صورت مستقیم هم ارتفاع پیزومترها توسط اشل‌های شفاف مدرج که روی دیواره کانال چسبانده شده بود، اندازه‌گیری شد. جهت ایجاد جریان فوق بحرانی از دریچه ایجادشده در مخزن ابتدای کانال استفاده گردید

جهت اندازه‌گیری جریان از سیستم دبی‌سنج الکترونیک با دقت ۰/۰۰۰۲۷۸ لیتر بر ثانیه نصب شده بر روی لوله ورودی جریان به کانال استفاده شد. جهت تنظیم دبی نیز از یک شیر که در ابتدای لوله انتقال آب به فلوم تعبیه شده بود استفاده گردید. برای اندازه‌گیری عمق جریان در طول کانال از دو روش مستقیم و غیرمستقیم و با نصب پیزومترهایی در کف

که در آن، Q دبی جریان، C_d ضریب دبی دریاچه، h ارتفاع آب داخل مخزن و A سطح مقطع می‌باشد. زبری‌های مورد استفاده از نوع زبری طبیعی، مصنوعی و بدون زبری می‌باشد (شکل ۳).

و با توجه به مشخصات هندسی لبه ورودی دریاچه ضریب دریاچه با توجه به رابطه V تعیین شد در تمام مراحل آزمایش شیب بستر کانال به صورت افقی نگه داشته شد.

$$Q = C_d \sqrt{2gh} . A \quad (7)$$

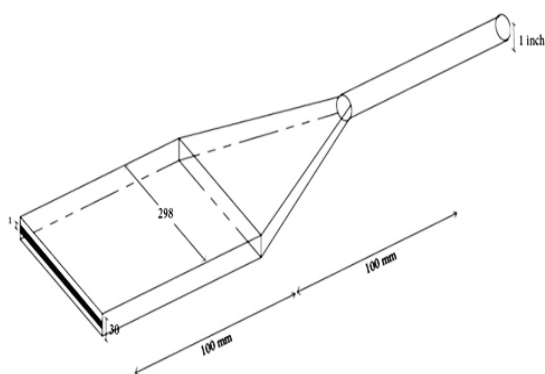


شکل ۳- زبری‌های مورد استفاده در پژوهش.

Figure 3. Used roughnesses in this study.

سطح خروجی یکسان باشد مورد استفاده قرار گرفت. تنظیم زاویه برخورد توسط سیستم مکانیکی ساخته شده که موقعیت قرارگیری نازل را بر روی یک اشل (نقاله) نشان می‌دهد انجام می‌گرفت (شکل ۵).

جت آبی از طریق نازلی با مقطع مستطیلی که تصویر شماتیک آن در شکل ۴ مشاهده می‌شود تولید می‌گردد. از یک پمپ قوی که قابلیت تولید یک جت صفحه‌ای را دارد جهت این‌که ضخامت جریان در تمام



شکل ۴- وسیله ساخته شده جهت ایجاد جت آبی و ابعاد آن.

Figure 4. Created device to water jet and its dimensions.

توسط اشل‌های شفاف مدرج که روی دیواره کانال چسبانده شده بود، اندازه‌گیری می‌شد. سپس برای همه حالت‌ها با تغییر درجه انتهایی و تثبیت ابتدایی پرش در فاصله ۲۷۲ سانتی‌متری مخزن، مشخصات پرش اندازه‌گیری می‌گردید و برای افزایش دقت پارامترهای برداشت‌شده از روش عکس‌برداری به‌وسیله نرم‌افزار گرافر به‌صورت غیرمستقیم نیز مشخصات پرش استخراج گردید و از میانگین داده اندازه‌گیری‌شده مستقیم و با داده‌های استخراج‌شده نرم‌افزار که اختلاف ناچیزی با هم داشتند استفاده گردید.

بازشدگی دریاچه ورودی جریان از مخزن به کانال به‌میزان $2/4$ سانتی‌متر به‌طور ثابت تنظیم و سه دبی ۲۰، ۲۵ و ۳۰ لیتر بر ثانیه جاری گردید. پس از تثبیت پرش در فاصله ۲۷۲ سانتی‌متری مخزن، عدد فرود جریان فوق بحرانی مشخص و پارامترهای هیدرولیکی پرش برداشت گردید. سپس جت آزاد با دبی‌های ۲، $2/5$ و $3/2$ لیتر بر ثانیه با چهار زاویه انتخابی نسبت به افق 60° ، 90° ، زاویه حداکثر اثر جابه‌جایی ابتدای پرش و زاویه بدون تغییر ابتدای پرش به انتهای پرش هیدرولیکی وارد می‌گردید و میزان جابه‌جایی پرش و طول پرش



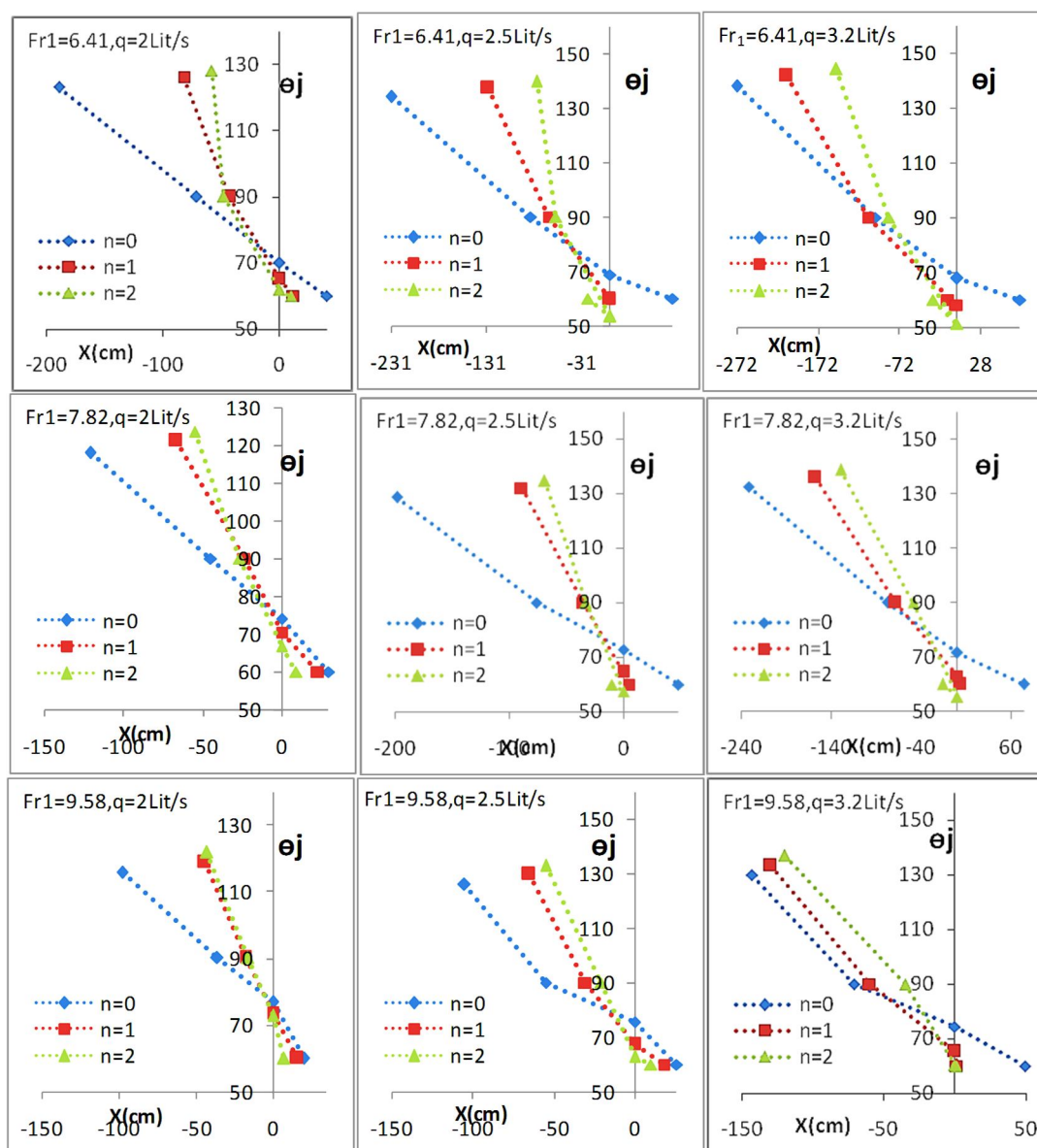
شکل ۵- نمایی از نحوه اندازه‌گیری زاویه.

Figure 5. View of how to measure the angle.

فرود و دبی جت یکسان نشان می‌دهد. در این شکل، X فاصله حرکت پنجه پرش هیدرولیکی نسبت به حالت بدون جت بوده، که در جهت جریان مثبت و خلاف جهت جریان منفی می‌باشد.

نتایج و بحث

تأثیر جت بر تغییر موقعیت پرش هیدرولیکی در زبری‌های مختلف: شکل ۶ اثر زاویه برخورد جت سریع آبی را بر جابه‌جایی پرش هیدرولیکی در زبری‌های مختلف در محل اثر انتهایی پرش در عدد



شکل ۶- تغییرات ابتدای پرش نسبت به زاویه برخورد جت به انتهای پرش.

Figure 7. Changes of start point of jump to jet collision to end point of jump.

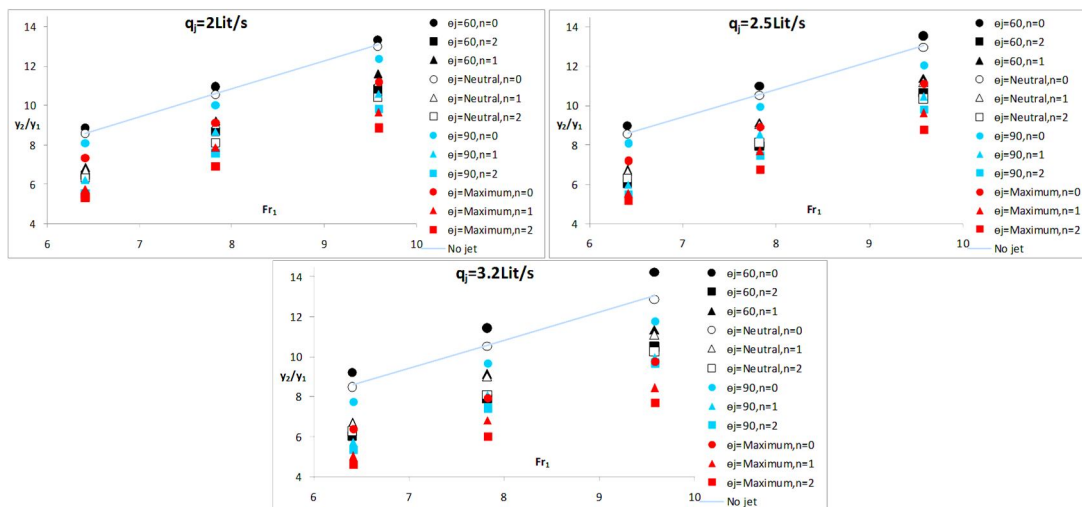
نامگذاری شد. باتوجه به شکل ۶ با افزایش دبی جت زاویه بی‌اثر در زبری‌های مختلف نیز کاهش می‌یابد و زاویه حداکثر با افزایش دبی جت در زبری‌های مختلف افزایش می‌یابد و با افزایش زبری زاویه بی‌اثر کاهش و زاویه حداکثر افزایش می‌یابد. کاهش زاویه بی‌اثر در زبری‌های مختلف به حدی کاهش می‌یابد که از زاویه ۶۰ درجه در برخی از حالت‌ها کم‌تر می‌گردد و در زمانی که جت در تمام زبری‌ها برخورد می‌کند

همان‌طور که در شکل‌های فوق مشاهده می‌شود، پرش هیدرولیکی در تمام حالت‌ها و زبری‌های مختلف در یکی از زاویه‌های انتخابی برای جت سریع هیچ‌گونه جابه‌جایی ندارد که به‌عنوان زاویه بی‌اثر نامگذاری شد. با افزایش زاویه جت، پرش به‌سمت بالادست تغییر مکان می‌دهد و از یک زاویه به بعد هیچ‌گونه حرکتی به‌سمت بالادست انجام نگیرد که این زاویه نیز به‌عنوان زاویه حداکثر جابه‌جایی پرش

کاهش می‌یابد. اعمال جت به پرش هیدرولیکی در هر زاویه بیش‌تر از زاویه خنثی، پرش هیدرولیکی به سمت بالادست جابه‌جا می‌شود و برعکس اعمال جت به پرش هیدرولیکی در هر زاویه کم‌تر از زاویه بی‌اثر، پرش هیدرولیکی به سمت پایین‌دست حرکت می‌نماید. هرچه دبی جت آبی بیش‌تر باشد، به طبع این جابه‌جایی نیز بیش‌تر خواهد بود.

نسبت اعماق مزدوج بر پرش هیدرولیکی: با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده بدون جت و بدون زبری، نمودار تغییرات نسبت عمق ثانویه با تغییرات در زبری‌ها در مقابل عدد فرود در دبی و زاویه جت مشخص در حالت متفاوت برخورد جت در شکل ۷ ترسیم گردید. در این شکل خط ممتد نشان‌دهنده حالت بدون جت (پرش کلاسیک) می‌باشد.

زاویه بی‌اثر کم‌ترین مقدار خود و زاویه حداکثر بیش‌تر مقدار خود را دارد حداکثر جابه‌جایی پرش در تمام زبری‌ها به سمت بالادست جریان مربوط به حداقل عدد فرود، حداکثر دبی جت، زاویه ۱۳۸ (زاویه حداکثر) درجه در حالت بدون زبری به‌میزان ۲۷۲ سانتی‌متر و حداقل جابه‌جایی پرش در تمام زبری‌ها به سمت بالادست جریان مربوط به حداکثر عدد فرود، حداقل دبی جت، زاویه ۹۰ درجه و در زبری حالت دوم (زبری سینوسی) به‌میزان ۱۶ سانتی‌متر و حداکثر جابه‌جایی پرش به سمت پایین‌دست جریان مربوط به حداقل عدد فرود و حداکثر دبی جت و در زاویه ۶۰ درجه و در حالت بدون زبری به‌میزان ۷۸ سانتی‌متر می‌باشد. هرچه عدد فرود افزایش یابد میزان جابه‌جایی پرش به سمت بالادست کاهش می‌یابد. با افزایش عدد فرود زاویه بی‌اثر افزایش و زاویه حداکثر



شکل ۷- تغییرات نسبت عمق ثانویه با تغییر زبری کف در حالت برخورد جت به انتهای پرش.

Figure 7. Changes of relative of secondary depth with bed roughness variation at jet collision to end point of jump.

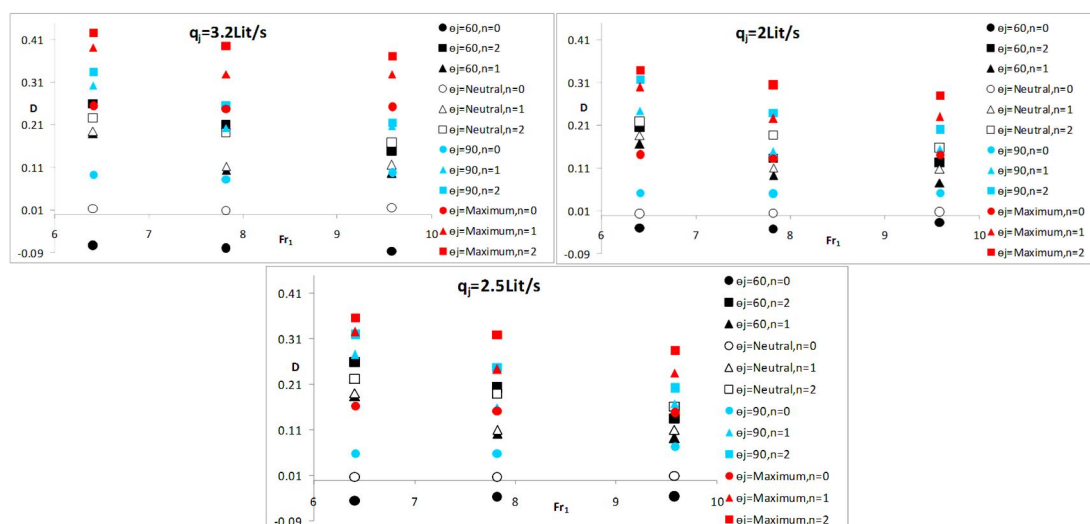
حوضچه میزان نسبت عمق ثانویه کاهش می‌یابد. بیش‌ترین مقدار افزایش نسبت به حالت بدون جت و بدون زبری در زاویه ۶۰ درجه (که کم‌تر از زاویه بی‌اثر می‌باشد)، دبی حداکثر جت، حداکثر عدد فرود و در حالت بدون زبری به‌میزان ۸/۶۹ درصد می‌باشد

با توجه به شکل ۷ با افزایش دبی جت نسبت عمق ثانویه در زاویه‌های کم‌تر از زاویه بی‌اثر افزایش و در زاویه‌های بیش‌تر از زاویه بی‌اثر کاهش می‌یابد. با افزایش عدد فرود نسبت عمق ثانویه افزایش و با افزایش دبی جت کاهش می‌یابد. با زبر شدن کف

نشان‌دهنده این است که اثر زبری بیش‌تر از اثر جت در حالتی که زاویه کم‌تر از زاویه بی‌اثر می‌باشد. دلیل کاهش یا افزایش نسبت اعماق مزدوج را می‌توان به افزایش و کاهش نیروی‌های برشی در اثر جت آبی دانست.

کاهش نسبی عمق ثانویه پرش هیدرولیکی: برای نمایش میزان اختلاف عمق ثانویه با اعمال جت آبی در زبری‌های متفاوت Y_2 و پرش کلاسیک Y_2^* پارامتر کاهش عمق $(D = \frac{Y_2^* - Y_2}{Y_2^*})$ تعریف شده است. تغییرات D با عدد فرود جریان فوق بحرانی ورودی در شکل ۸ نمایش داده شده است.

بیش‌ترین مقدار کاهش نسبت عمق ثانویه نسبت به حالت بدون جت و بدون زبری در زاویه ۱۴۳ درجه (که زاویه حداکثر می‌باشد)، دبی حداکثر جت، حداقل عدد فرود و زبری حالت دوم (زبری سینوسی) به میزان ۴۵/۹ درصد می‌باشد. کم‌ترین مقدار کاهش نسبت عمق ثانویه نسبت به حالت بدون جت و بدون زبری در زاویه ۷۰ (زاویه بی‌اثر) درجه، دبی حداقل جت، حداقل عدد فرود و حالت بدون زبری به میزان ۰/۱۵ درصد می‌باشد. جت در زاویه‌های کم‌تر از زاویه بی‌اثر باعث افزایش نسبت عمق ثانویه و زبری باعث کاهش نسبت عمق ثانویه و ترکیب این دو حالت باعث کاهش نسبت عمق ثانویه گردید که



شکل ۸- تغییرات پارامتر D کاهش عمق در مقابل عدد فرود در حالت برخورد جت انتهایی پرش برای زبری‌های متفاوت.

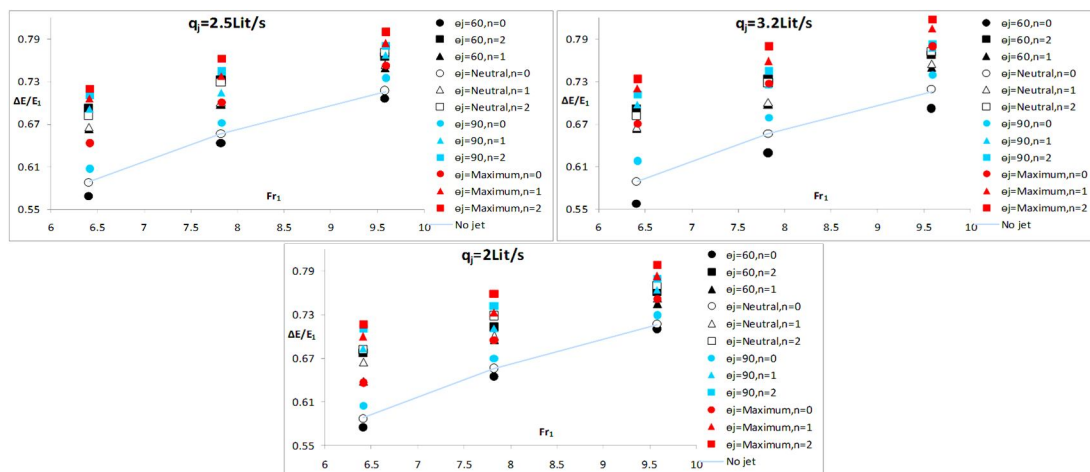
Figure 8. Changes of depth decreasing D versus of Froude number at jet collision to end point of jump for various roughness.

حداقل، حداقل عدد فرود، زاویه ۶۰ درجه و حالت بستر صاف می‌باشد. در زاویه‌های بیش‌تر از زاویه بی‌اثر مثبت است که نشان‌دهنده این است که عمق ثانویه پرش کم‌تر از عمق ثانویه پرش کلاسیک است و حداکثر آن ۰/۴۳ مربوط به دبی جت حداکثر، حداقل عدد فرود، زاویه ۱۴۴ (زاویه حداکثر) درجه در حالت زبری سینوسی و حداقل آن در دبی جت

مقدار D در اعداد فرود بالا برای هر نوع زبری تقریباً ثابت می‌باشد و در زاویه‌های کم‌تر از زاویه بی‌اثر منفی است که نشان می‌دهد عمق ثانویه پرش در این محدوده بزرگ‌تر از پرش کلاسیک است و حداقل مقدار آن ۰/۰۸۷- مربوط به بیش‌ترین دبی جت، حداکثر عدد فرود، زاویه ۶۰ درجه است و در حالت بدون زبری می‌باشد و حداکثر مربوط به دبی جت

اختلاف انرژی مخصوص در ابتدا (E_1) و انتهای پرش (E_2) می‌باشد. در شکل ۹ تغییرات افت انرژی نسبی در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه پرش با تغییرات زبری کف و محل‌های اثر متفاوت جت نشان داده شده است. در این شکل‌ها خط ممتد نشان‌دهنده حالت بدون جت و بدون زبری می‌باشد.

حداقل، حداکثر عدد فرود، زاویه 70° (زاویه بی‌اثر) درجه در بستر صاف می‌باشد. با افزایش عدد فرود در یک زاویه‌ای و دبی جت مشخص در هر زبری تقریباً مقدار D ثابت است. افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی: افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی عبارتست از $\Delta E/E_1$ که



شکل ۹- تغییرات افت انرژی نسبی پرش با تغییر زبری کف در حالت برخورد جت به انتهای پرش.

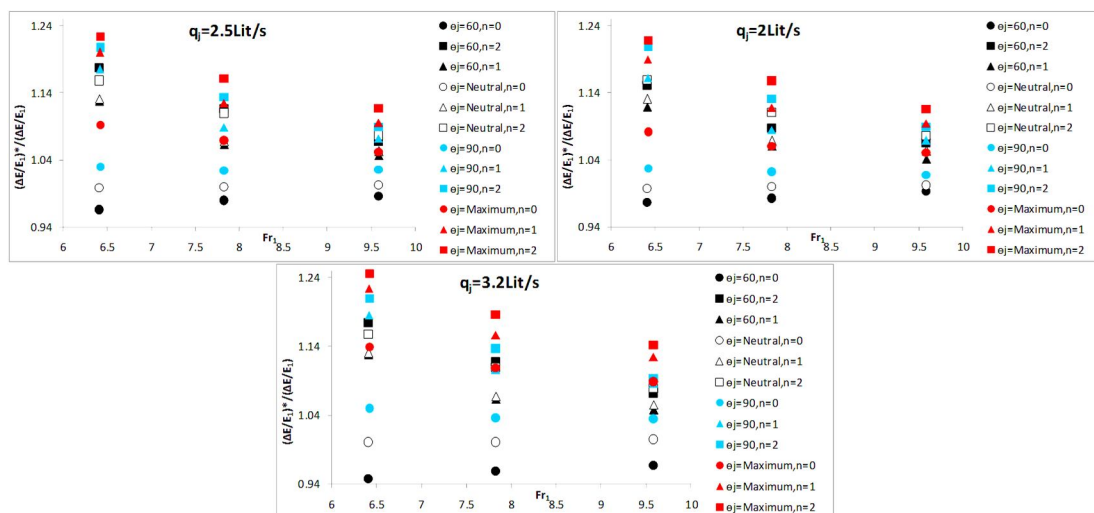
Figure 9. Changes of relative energy loss with bed roughness changes at jet collision to end point of jump.

انرژی زمانبست که جت با دبی حداکثر، عدد فرود حداکثر و در حالت زبری نوع دوم (زبری سینوسی) با زاویه 136° (زاویه حداکثر) درجه وارد گردد به میزان 0.82 می‌باشد و حداقل مقدار افت نسبی انرژی زمانبست که جت با دبی حداکثر، عدد فرود حداقل و در بستر بدون زبر با زاویه 60° (زاویه کم‌تر از زاویه بی‌اثر) درجه وارد گردد به میزان 0.56 می‌باشد. بیش‌ترین مقدار کاهش نسبت به حالت بدون جت و بدون زبری مربوط به حالتی که جت با دبی حداکثر، عدد فرود حداقل و در حالت زبری نوع دوم (زبری سینوسی) با زاویه 143° (زاویه حداکثر) درجه وارد گردد به میزان $24/5$ درصد می‌باشد. بیش‌ترین مقدار افزایش نسبت به حالت بدون جت و بدون زبری مربوط به حالتی که جت با دبی حداکثر، عدد فرود

از این شکل‌ها مشخص است که مقادیر در تمام حالت‌ها که جت با زاویه بیش‌تر از زاویه بی‌اثر بر پرش وارد می‌گردد بزرگ‌تر از پرش بدون جت است. در تمام حالت‌ها در بسترهای زبر بزرگ‌تر از حالت بدون جت و بدون زبری می‌باشد که نشان‌دهنده این است که اثر زبری در زاویه کم‌تر از بی‌اثر بیش‌تر از اثر جت می‌باشد. در این نمودارها مشاهده می‌شود که با افزایش عدد فرود افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد و با افزایش دبی جت در زاویه‌های کم‌تر از زاویه بی‌اثر در حالت بستر بدون زبر کاهش و در زاویه بیش‌تر از زاویه بی‌اثر در حالت بستر بدون زبری افزایش می‌یابد و در بسترهای زبر با افزایش دبی جت افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه جت افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد. بیش‌ترین مقدار افت نسبی

ثانویه اختلاف انرژی در مقاطع اولیه و ثانویه پرش افزایش و به تبع آن افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد. درصد افزایش افت انرژی پرش هیدرولیکی: برای بهتر نشان دادن تغییرات، افت نسبی پرش در حالت اعمال جت $(\Delta E/E_1)^*$ و افت نسبی پرش کلاسیک (بدون جت و بستر صاف) $(\Delta E/E_1)$ پارامتر افزایش افت نسبی $((\Delta E/E_1)^*/(\Delta E/E_1))$ تعریف شده است. نمودارهای پارامتر افزایش افت نسبی در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه پرش برای جت مشخص در شکل ۱۰ رسم شده است.

حداقل و در حالت بدون زبری با زاویه ۶۰ درجه وارد گردد به میزان ۵/۳۲ درصد می‌باشد. کمترین مقدار افزایش نسبت به حالت بدون جت و بدون زبری مربوط به حالتی که جت با دبی حداقل، عدد فرود حداکثر و در حالت بدون زبری با زاویه ۶۰ درجه وارد گردد به میزان ۰/۷۹ درصد می‌باشد. در توجیه این تغییرات می‌توان گفت که با توجه به این‌که با اعمال جت در زاویه حداکثر جابه‌جایی به سمت بالادست جریان و همچنین افزایش دبی جت عمق ثانویه پرش کاهش می‌یابد و توجه به این موضوع که در جریان زیر بحرانی سهم عمق جریان در انرژی نسبت به هد سرعت بسیار بیش‌تر است، بنابراین با کاهش عمق



شکل ۱۰- تغییرات، نسبت $(\Delta E/E_1)^*/(\Delta E/E_1)$ در مقابل عدد فرود در حالت برخورد جت به انتهای پرش.

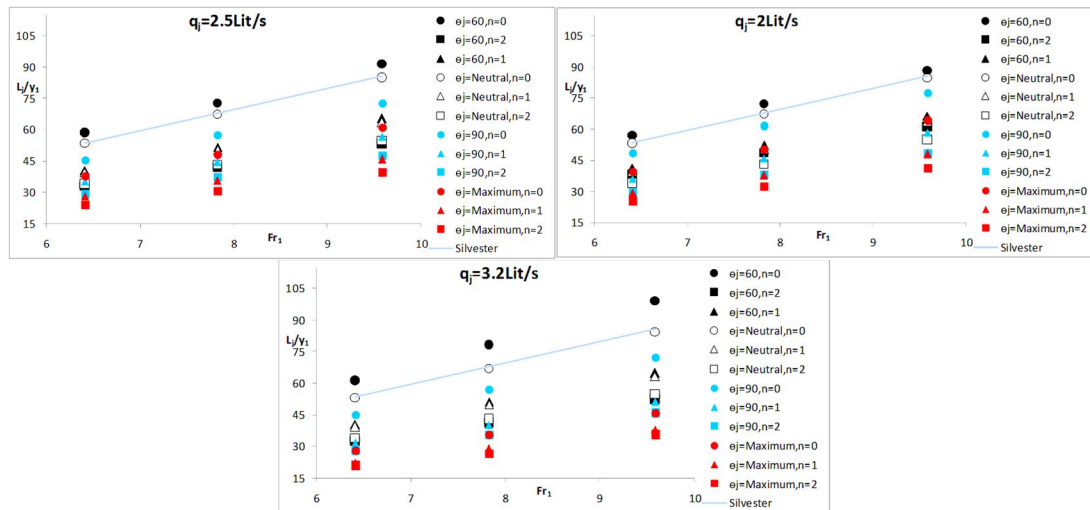
Figure 10. Changes of ratio of $(\Delta E/E_1)^*/(\Delta E/E_1)$ versus of Froude number at jet collision to end point of jump.

کم‌تر از حالت بدون جت می‌باشد. حداکثر آن ۰/۹۹ که در دبی جت حداقل، حداکثر عدد فرود، زاویه ۶۰ درجه و حالت بستر صاف می‌باشد و حداقل مقدار آن ۰/۹۵ که در دبی جت حداکثر، حداقل عدد فرود، زاویه ۶۰ درجه و حالت بستر صاف می‌باشد و در بقیه حالت‌ها بزرگ‌تر از یک می‌باشد که نشان‌دهنده این است که افت نسبی انرژی در زمان اعمال جت بیش‌تر از حالت بدون جت و بدون زبری می‌باشد. حداکثر

مقدار $(\Delta E/E_1)^*/(\Delta E/E_1)$ با افزایش عدد فرود حالت بدون زبری کف در زاویه‌های کم‌تر از زاویه بی‌اثر برخورد می‌نماید افزایش می‌یابد و در بقیه حالت‌ها کاهش نشان می‌دهد و در حالت زبری کف با افزایش عدد فرود در همه حالت‌ها کاهش دارد. در زاویه‌های کم‌تر از زاویه بی‌اثر در حالت بستر صاف وارد می‌گردد. کوچک‌تر از یک می‌باشد که نشان‌دهنده این است که افت نسبی انرژی در زمان اعمال جت

طول نسبی پرش هیدرولیکی: در شکل ۱۱ تغییرات طول نسبی پرش با تغییرات زبری در روی شیب افقی نشان داده شده است. در این شکل خط ممتد نشان‌دهنده رابطه تجربی سیلوستر (۱۹۶۴) برای طول پرش در بسترهای صاف و افقی می‌باشد.

آن ۱/۲۴ که در دبی جت حداکثر، حداقل عدد فرود، زاویه ۱۴۳ (زاویه حداکثر) درجه و در حالت بستر زبر سینوسی و حداقل آن که در حداقل دبی، حداکثر عدد فرود، زاویه ۷۷ (زاویه بی‌اثر) درجه و در حالت بستر صاف می‌باشد.



شکل ۱۱- تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی با تغییر زبری کف در حالت برخورد جت به انتهای پرش.

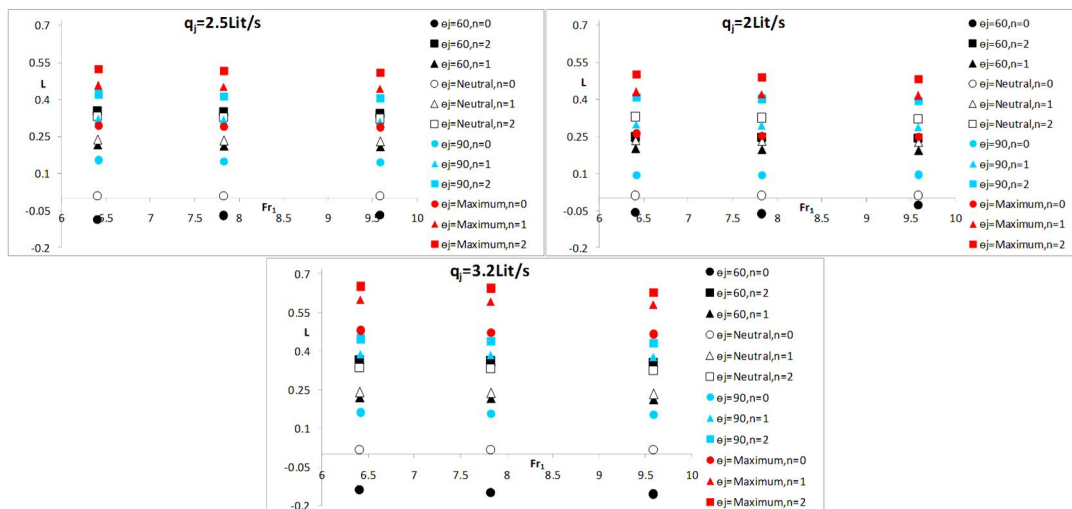
Figure 11. Changes of relative length of hydraulic jump with bed roughness changes at jet collision to end point of jump.

زبر طول نسبی پرش نسبت با حالت بدون جت و بدون زبری کاهش می‌یابد. وقتی جت با زاویه بیش‌تر از زاویه بی‌اثر اعمال می‌گردد. به طوری‌که به‌ازای حداکثر میزان کاهش تا حدود ۶۱/۳ درصد مربوط به زاویه جت ۱۴۳ (حداکثر زاویه) درجه، بیش‌ترین دبی جت، حداقل عدد فرود در حالت زبری نوع دوم (زبری سینوسی) و کم‌ترین مقدار کاهش در زاویه ۷۰ (زاویه بی‌اثر) حداقل عدد فرود و حداقل دبی جت و در حالت بستر صاف می‌باشد بیش‌ترین میزان افزایش تا حدود ۱۵/۷ درصد مربوط به حالت زاویه ۶۰ درجه، حداکثر دبی جت در حداکثر عدد فرود در بستر صاف و کم‌ترین افزایش ۲/۹۵ درصد مربوط به حداقل دبی جت، حداکثر عدد فرود، زاویه ۶۰ (کم‌تر از زاویه بی‌اثر) درجه و بستر بدون زبری می‌باشد. دلیل کاهش و افزایش طول پرش در اثر تغییر در عمق ثانویه پرش

در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود با افزایش زبری کف کانال میزان طول پرش به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و با افزایش زاویه جت طول نسبی پرش در تمام زبری‌ها نیز کاهش می‌یابد. در زاویه کم‌تر از زاویه بی‌اثر طول نسبی پرش در اعداد فرود بالا در حالت بستر بدون زبری بیش‌تر از حالت بدون جت و بدون زبری می‌باشد. در بقیه حالت طول نسبی پرش کم‌تر از حالت بدون جت و بدون زبری می‌باشد و در زاویه‌های بیش‌تر از زاویه بی‌اثر در تمام اعداد فرود کم‌تر از حالت بدون جت و بدون زبری می‌باشد. با افزایش عدد فرود، طول نسبی پرش افزایش می‌یابد و با افزایش دبی جت در زاویه‌های کم‌تر از زاویه بی‌اثر در حالت بستر بدون زبر افزایش و در زاویه‌های بیش‌تر از زاویه بی‌اثر در حالت بدون زبری بستر کاهش می‌یابد. در تمام زاویه‌های جت در بسترهای

زیر L_r و طول پرش بدون جت و بدون زبری L_r^* پارامتر کاهش طول پرش ($L = \frac{L_r^* - L_r}{L_r^*}$) تعریف شده است. تغییرات L با عدد فرود جریان فوق بحرانی ورودی در زبری‌های مختلف در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

می‌باشد که بسیاری از پژوهشگران گذشته به این نتیجه دست یافتند که طول پرش با عمق ثانویه پرش رابطه مستقیم دارد و افزایش طول پرش در زاویه ۶۰ درجه در بستر صاف قبلاً توسط آیچاوارول و همکاران (۲۰۰۹) به اثبات رسیده بود. درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی: برای نمایش میزان اختلاف طول پرش با اعمال جت آبی و بستر



شکل ۱۲- تغییرات نسبت L پرش هیدرولیکی در مقابل عدد فرود در حالت برخورد جت به انتهای پرش.

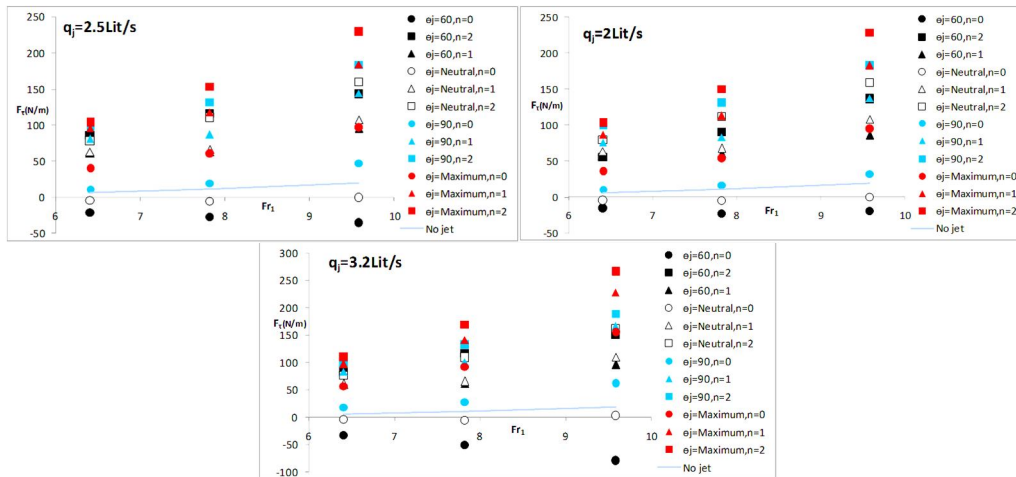
Figure 12. Changes of ratio of L versus Froude number at jet collision to end point of jump.

زاویه بی‌اثر مثبت که نشان‌دهنده این است که طول پرش کمتر از طول پرش بدون جت است و حداکثر آن ۰/۶۴ که در دبی جت حداکثر، حداقل عدد فرود، زاویه ۱۴۴ (زاویه حداکثر) درجه در حالت بستر زیر نوع دوم (زبر سینوسی) می‌باشد. با افزایش عدد فرود در یک زاویه‌ای مشخص تقریباً مقدار L ثابت می‌باشد. **نیروهای تنش برشی:** دلیل اصلی کاهش و افزایش عمق ثانویه در پرش آبی با اعمال جت آب در مقایسه با پرش بدون جت وجود تنش برشی اضافه که در اثر اعمال جت ایجاد می‌گردد. اگر F_T جمع نیروهای برشی بستر بر روی سطح افقی، نیروی‌های تنش برشی رینولدز و اثر نیروی جت در طول پرش باشد، با استفاده از معادله مومتم می‌توان محاسبه نمود. با

با توجه به شکل ۱۲ مقدار L با افزایش دبی جت، زاویه جت و زبری کف کانال باعث افزایش L می‌گردد. در زاویه‌های کمتر از زاویه بی‌اثر منفی است که نشان‌دهنده این است که طول پرش در این زاویه‌ها بزرگتر از طول پرش بدون جت است و حداقل مقدار آن ۰/۱۶- که در دبی جت حداکثر، حداکثر عدد فرود، زاویه ۶۰ درجه و در حالت بستر صاف که نشان‌دهنده این است که در این شرایط طول پرش هیدرولیکی بیشترین مقدار خود را دارا می‌باشد و حداکثر آن در دبی جت حداقل، حداکثر عدد فرود، زاویه ۶۰ درجه و در حالت بستر بدون زبری، که نشان‌دهنده این است که کمترین افزایش نسبت به حالت بدون جت می‌باشد. در زاویه‌های بیش‌تر از

رسم شده است. در این شکل خط ممتد نشان‌دهنده نیروی‌های برشی بستر قبل از اعمال جت در بستر صاف می‌باشد.

توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده بدون جت و بدون زبری، نمودار تغییرات F_T با تغییرات زبری کف در مقابل عدد فرود در شکل ۱۳



شکل ۱۳- تغییرات نیروهای برشی بستر با زبری‌های متفاوت در حالت برخورد جت به انتهای پرش.

Figure 13. Bed shear forces changes with various roughness at jet collision to end point of jump.

حدود ۱۷/۸ برابر نسبت به حالت بدون جت و بدون زبری (بستر صاف) می‌باشد. نیروهای برشی زمانی که جت با زاویه خثی اعمال می‌گردد تقریباً با حالت بدون جت برابر می‌باشد. بنابراین اگر زاویه جت کم‌تر از زاویه بی‌اثر باشد به‌دلیل کاهش نیروهای برشی، پرش به سمت پایین‌دست حرکت می‌نماید و در صورتی‌که که زاویه جت بیش‌تر از زاویه بی‌اثر باشد به‌دلیل افزایش نیروهای برشی نسبت به حالت بدون جت، پرش به سمت بالادست جابه‌جا می‌گردد. همچنین اگر زاویه جت برابر زاویه بی‌اثر باشد به‌دلیل عدم تغییر نیروهای برشی محل تشکیل پرش تغییری نمی‌کند.

نتیجه‌گیری

بیش‌ترین مقدار کاهش نسبت عمق ثانویه نسبت به حالت بدون جت و بدون زبری به‌میزان ۴۵/۹ درصد می‌باشد و کاهش نسبی عمق ثانویه پرش

این شکل‌ها بیانگر این واقعیت است که با افزایش عدد فرود نیروهای برشی در زاویه ۶۰ درجه در بستر صاف کاهش و در بقیه حالت‌ها افزایش می‌یابد، افزایش دبی جت، افزایش زاویه جت و افزایش زبری کف باعث افزایش نیروهای برشی می‌گردد. اعمال جت در زاویه کم‌تر از زاویه بی‌اثر باعث کاهش نیروهای برشی می‌گردد. به‌طوری‌که حداکثر کاهش در زاویه ۶۰ درجه، کم‌ترین عدد فرود در بستر صاف و حداکثر دبی جت حدود ۶/۷ برابر نسبت به حالت بدون جت و بدون زبری می‌باشد. حداقل کاهش در زاویه ۶۰ (کم‌تر از زاویه بی‌اثر) درجه، حداکثر عدد فرود و حداقل دبی جت در بستر صاف ۲ برابر نسبت به حالت بدون جت و بدون زبری (بستر صاف) کاهش می‌یابد. در زاویه‌های بیش‌تر از زاویه بی‌اثر باعث افزایش نیروهای برشی می‌گردد. بیش‌ترین افزایش در زاویه ۱۴۳ (زاویه حداکثر) درجه، کم‌ترین عدد فرود، حداکثر دبی جت در بستر زبر سینوسی

هیدرولیکی (D) در بسترهای زیر حداکثر ۰/۴۳
گردید. بیش‌ترین مقدار افت نسبی انرژی در بسترهای
زیر به‌میزان ۲۴/۵ درصد می‌باشد. حداکثر میزان
کاهش طول نسبی در بسترهای زیر با اعمال جت تا
حدود ۶۱/۳ درصد می‌باشد. حداکثر مقدار کاهش
نسبی طول پرش هیدرولیکی (L) در بسترهای زیر با
اعمال جت ۰/۶۴ می‌باشد. بیش‌ترین افزایش نیروهای
برشی در بسترهای زیر و اعمال جت حدود ۱۷/۸
برابر حالت بدون جت و بدون زبری (بستر صاف)
می‌باشد.

منابع

1. Abbaspour, A., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadzadeh, D., and Sadraddini, A.A. 2009. Effect of Sinusoidal Corrugated Bed on Hydraulic Jump Characteristics. J. Water Soil Sci. 19: 1. 13-26. (In Persian)
2. Ahmadi, A., and Honar, T. 2015. Assessing Effect of End Sill with Different Forms on Hydraulic Jump Characteristics. Journal of Science and technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science. 18: 70. 135-145. (In Persian)
3. Ead, S.A., and Rajaratnam, N. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. J. Hydr. Engin. ASCE. 128: 656-663.
4. Gohari, A., and Farhoudi, J. 2009. The characteristics of hydraulic jump on rough bed stilling basins. 33rd IAHR Congress, Water Engineering for a Sustainable Environment, Vancouver, British Columbia, August 9-14.5.
5. Hager Willi, H. 1995. Energy Dissipaters and Hydraulic Jump. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, ISBN 90-5410-198-9.
6. Jam, M., Mardasht, A., and Talebbeydokhti, N. 2015. Evaluation of Hydraulic Jump on Dentate Blocks Stilling Basin. J. Hydr. 9: 1. 1-10. (In Persian)
7. Mohamad, A.H.S. 1991. Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jump. J. Hydr. Engin. ASCE. 117: 83-93.
8. Najandali, A., Esmaili, K., and Farhoudi, J. 2012. The Effect of Triangular Blocks on the Characteristics of Hydraulic Jump. J. Water Soil. 26: 2. 282-289. (In Persian)
9. Neisi, K., Shafai Bejestan, M., Ghomshi, M., and Kashefipour, S.M. 2014. Investigation of Hydraulic Jump Characteristics at Roughened Bed of Sudden Expansion Stilling Basin. J. Irrig. Sci. Engin. 37: 2. 83-93. (In Persian)
10. Parsamehr, P., Farsadzadeh, D., and Hosseinzadeh Dalir, A. 2013. Influence of Sill and Artificial Roughness over Adverse Bed Slopes on Hydraulic Jump Characteristics. J. Water Soil. 27: 3. 581-591.
11. Rajaratnam, N. 1968. Hydraulic jumps on rough beds. Trans. Eng. Inst. Canada. 11: 2. 1-8.
12. Shafai-Bajestan, M., and Neisi, K. 2009. A New Roughened Bed Hydraulic Jump Stilling Basin. J. Appl. Sci. 2: 1. 436-445.
13. Silvester, R. 1964. Hydraulic jump in all shapes or horizontal channels. Proceeding of the American Society of Civil Engineering. J. Hydr. Div. 90: 23-23.
14. Toozandehjani, M., and Kashefipour, M. 2013. Laboratory Investigation of the Effect of Diversion Dam Underflow on the Hydraulic Jump Characteristics. J. Sci. Technol. Agric. Natur. Resour. Water and Soil Science. 16: 62. 205-216. (In Persian)
15. Valinia, M., Ayyoubzadeh, A., and Yasi, M. 2014. An experimental study of the effect of baffle blocks distance from a gate on the hydraulic jump length and energy dissipation. J. Water Soil Resour. Cons. 3: 3. 1-10. (In Persian)
16. Varol, F.A., Çevik, E., and Yüksel, Y. 2009. The Effect of Water Jet on the Hydraulic Jump. Thirteenth International Water Technology Conference, IWTC, Hurgada, Egypt.
17. YüKSEL, Y., Günal, M., Bostan, T., Çevik, E., and Çelikoğlu, Y. 2004. The Influence of Impinging Jets on Hydraulic Jumps. Process of the Institution of Civil Engineering, Water Management. 157: WM2. 63-76.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 24(6), 2018

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

DOI: 10.22069/jwsc.2017.12528.2723

The effect of the jet collision angle to hydraulic jump on roughness bed

*M. Dastourani¹, K. Esmaili², M. Bahrami³ and A. Dindarlou⁴

¹Assistant Prof., Dept. of Water Science and Engineering, University of Birjand,

²Associate Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad,

³Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, University of Fasa,

⁴Assistant Prof., Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Persian Gulf

Received: 04/13/2017; Accepted: 12/30/2017

Abstract

Background and Objectives: A jump formation in stilling basins has effective roles in reduction of flow energy in downstream of hydro structures. Hydraulic jump is kind of rapidly varied flow and converts from supercritical state to subcritical state of flow in downstream by significant dissipation. In this paper, there have been suggested a new method for decreasing both values of the conjugate depths and the hydraulic jump's length that was based on using the specifications of a rectangular free-jet for affecting to the jump features. In fact, fast impact of the jet into the jump and shifting the momentum value to it, affected the jump's specifications and situation.

Material and Methods: This research was an experimental study. The experimental setup was including the flume with the walls of the glass materials in the dimensions of the 1200*30*50 cube centimeter. The depth of the flow measured by two methods of direct and indirect named. Indirect method included installing the piezometers in the flume bed and reading the height of the water column in the piezometers by a camera with a high resolution. Then it measured by a plotter of the flow's depth software. In order to the investigation of the effect of the discharge, jet angle and bed roughness on the jump's specifications, the tests performed in various conditions by three different jet's discharges of 2, 2.5 and 3.2 liter per second, the jet's angles of 60 and 90 degree versus the horizontal direction and two specific angles that their direction considered toward the maximum displacement from the beginning point of the jump direction and without any displacement and change at the beginning point of the jump direction. Also, have been used three kind of roughness.

Results: Results have been showed, at a special jet angle, in the various discharge the hydraulic jump had not any displacement and this angle was named as the neutral angle. As the jet's angle increased, the jump moved toward the upstream until the angle reached to the extent with no movement of the jet to the upstream, this angle called as the maximum angle of the jump displacement. Change in the angle and discharge of the jet has been caused changes in the secondary depth, jet length, relative energy loss and bed shear stress. Canal bed roughness was reduced hydraulic jump characteristics. Using jet with the maximum angle, the discharge equal to the 3.2 liter per second, minimum Froude number and sinusoidal roughness, the conjugate depths ratio have been decreased of 45.9 percent. Using a jet with the angle of the 60 degrees, the discharge of the 3.2 liter per second, the maximum Froude number of the flow in the flat bed, the conjugate depths ratio had increased by 8.7 percent. The maximum reduction in the jet length (61.3 percent) occurred at the maximum jet angle, 3.2 liter per second of discharge in the minimum Froude number and the sinusoidal roughness. The maximum increasing in the jet length (15.7 percent) was happened in the angle of the 60 degrees, discharge about 3.2 liter per

* Corresponding Author; Email: mdastourani@birjand.ac.ir

second with the maximum Froude number and flat bed. Using the maximum angle of the jet, discharge about 3.2 liter per second and minimum Froude number in flat bed, shear forces were increased about 17.8 times versus without jet and flat bed. Using a jet with a 60-degree angle, was reduced shear stress to 6.6 times versus without jet and bed roughness.

Conclusion: Applying the jet to the jump with an angle greater than ineffective angle causes decreasing in the conjugate depths ratio and jump length and causes increasing in the energy loss and bed shear forces.

Keywords: Hydraulic jump, Rectangular free jet, Super-critical flow, Energy dissipation