



دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و سوم، شماره سوم، ۱۳۹۵

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

بررسی اثر زاویه برخورد جت مستطیلی به پرش هیدرولیکی

مهدی دستورانی^۱، کاظم اسماعیلی^۲ و سعیدرضا خدائیناس^۳

^۱دانش‌آموخته دکتری گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد و استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بیرجند،

^۲دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، ^۳آستاد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۹۴/۶/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۸

چکیده

سابقه و هدف: یکی از روش‌های معمول استهلاک انرژی در جریان‌های فوق بحرانی، بهره جستن از پدیده پرش هیدرولیکی می‌باشد. پرش هیدرولیکی از نوع جریان‌های متغیرسریع است که در صورت مناسب بودن شرایط کانال در پایین‌دست جریان از حالت فوق بحرانی به زیربحرانی تغییر می‌یابد و با استهلاک 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 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 راستا 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 و جهت تثبیت موقعیت پرش، از یک دریچه قابل کنترل در پایین‌دست کانال استفاده گردید. 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 و زاویه جت بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی از سه دبی ۲، 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 جابجایی ابتدای پرش و زاویه بدون تغییر ابتدای پرش استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج آزمایشگاهی نشان داد، پرش هیدرولیکی برای یک زاویه مشخص جت هیچ‌گونه جابجایی ندارد که این زاویه به‌عنوان 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 به‌عنوان حداکثر زاویه جابجایی پرش نامگذاری گردید. تغییر زاویه و دبی جت موجب کاهش یا افزایش عمق ثانویه، طول پرش، افت انرژی نسبی و نیروی برشی بستر شد. استفاده از جتی با حداکثر زاویه و دبی ۳/۲ لیتر بر ثانیه در کم‌ترین عدد فرود جریان، موجب کاهش تا حدود ۲۵/۴ درصد در نسبت عمق ثانویه گردید. به‌کارگیری جتی با زاویه ۶۰ درجه و دبی ۳/۲ لیتر بر ثانیه در بیش‌ترین عدد فرود جریان موجب افزایش ۸/۷ درصدی نسبت عمق ثانویه شد. حداکثر میزان کاهش طول پرش

* مسئول مکاتبه: esmaili@um.ac.ir

(۴۸/۳ درصد) زمانی رخ داد که از جتی با حداکثر زاویه و دبی $3/2$ لیتر بر ثانیه در شرایط کم‌ترین عدد فرود جریان استفاده گردید. حداکثر میزان افزایش طول پرش (۲۹ درصد) نیز مربوط به استفاده از جتی با زاویه 60 درجه و دبی $3/2$ لیتر بر ثانیه در بیش‌ترین عدد فرود بود. زمانی که از جتی با حداکثر زاویه و دبی $3/2$ لیتر بر ثانیه در شرایط کم‌ترین عدد فرود استفاده گردید، حداکثر افت انرژی نسبی به میزان $0/76$ می‌باشد و نهایتاً به‌کارگیری جتی با زاویه 60 و 90 درجه به‌ترتیب موجب کاهش و افزایش نیروی‌های برشی کف شد.

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: استهلاک انرژی، پرش هیدرولیکی، جت آزاد مستطیلی، جریان فوق بحرانی

مقدمه

پرش هیدرولیکی از انواع جریان‌های متغیر سریع است که با تبدیل جریان از حالت فوق بحرانی به زیربحرانی 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. چون او مشاهده کرد که در کانال‌های با شیب تند، پرش هیدرولیکی مکرراً به‌وسیله مانعی که در برابر جریان یکنواخت قرار می‌گیرد، ایجاد می‌شود (۳). راجاراتنام (۱۹۶۸)، اولین مطالعات سیستماتیک را در خصوص پرش‌های بر روی بستر زبر انجام داد. او پارامتری به نام عامل زبری ($k = \frac{K_e}{y_1}$) 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 غلظانی (L_r) و طول پرش (L_j) بر روی بسترهای زبر (در مقایسه با همبسط طول‌ها در پرش با بستر صاف) به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. نتایج به‌دست آمده توسط راجاراتنام توسط پژوهشگران دیگری چون خاپوف، میخالوف و کیسلوف نیز مورد تأیید قرار گرفته است (۱۱). محمدعلی (۱۹۹۱)، اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)، گوهری و فرهودی (۲۰۰۹)، عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)، شفاعی‌بجستان و نیسی (۲۰۰۹) و نژدعلی و همکاران (۲۰۱۲) در خصوص پرش هیدرولیکی تشکیل شده 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 (۷، ۴، ۵، ۱، ۱۲، ۸). 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). آیچا وارول و همکاران

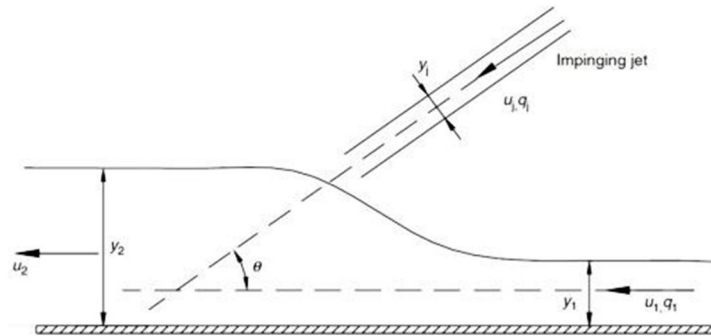
معکوس ۱/۵ درصد بر روی آبپایه به طور متوسط ۴۶ درصد و در حالت پرش بر روی بستر زبر به طور متوسط ۴۹ درصد کاهش می‌یابد (۱۰). جم و همکاران (۲۰۱۵)، مطالعات خود را در حوضچه زبر شده به وسیله اجزای زبری (بلوک‌های دنداندار) با شکل هندسی و آرایش چیدمان جدید و نهایتاً بررسی تأثیر پارامترهای مختلف پرش هیدرولیکی در 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، به طوری که طول پرش و عمق ثانویه پرش به ترتیب 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 را 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 فوق و همچنین با توجه به این‌که جت و زاویه جت هر دو به طراحی اقتصادی حوضچه‌ها کمک می‌کنند، هدف از پژوهش حاضر بررسی زاویه جت روی مشخصات پرش هیدرولیکی شامل نسبت عمق ثانویه، طول پرش و افت انرژی به طور آزمایشگاهی می‌باشد.

(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 بطور متوسط به میزان ۳۱/۶ درصد کاهش و راندمان پرش را نسبت به پرش کلاسیک به طور متوسط به میزان ۱۹ درصد افزایش می‌دهد (۹). پارسامهر و همکاران (۲۰۱۳)، پژوهش خود را بر خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با زبری‌های نیم‌استوانه‌ای 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

مواد و روش‌ها

الف- 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 deal the quick release jet with hydraulic jump(14).

این اتلاف انرژی در پرش برابر است با تفاوت انرژی قبل و بعد از پرش که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_1 - E_2}{E_1}$$

$$E_1 = \left(y_1 + \frac{u_1^2}{2g} \right) \quad (3)$$

$$E_2 = \left(y_2 + \frac{u_2^2}{2g} \right)$$

ب- تحلیل ابعادی: به طور کلی خصوصیات پرش هیدرولیکی پس از اعمال جت به پارامترهای زیر بستگی دارد:

$$y_2 = f_1(y_1, v_1, g, \rho, \nu, \theta, y_j, u_j, x_j) \quad (4)$$

که در آن، ν لزجت سینماتیک سیال، ρ جرم مخصوص سیال، g شتاب ثقل، x_j محل اثر جت و بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند. با استفاده از اصول آنالیز ابعادی نسبت عمق ثانویه به صورت زیر ساده می‌شود:

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

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 پایین دست پرش می‌باشد. u_j و y_j به ترتیب سرعت و ضخامت جت، θ زاویه جت نسبت به افق و ρ جرم مخصوص آب. بنابراین $q_1 = y_1 u_1$ ، $q_j = y_j u_j$ و $q_2 = y_2 u_2$ می‌باشد. از تقسیم معادله مقدار حرکت به رابطه ۲ حاصل می‌کند:

$$\begin{aligned} & 2Fr_1^2 \left[\left(1 + \frac{q_j}{q_1}\right)^2 \frac{y_1}{y_2} - 1 - \frac{q_j^2}{q_1^2} \frac{y_1}{y_j} \cos \theta \right] \\ & = 1 - \frac{y_2^2}{y_1^2} \end{aligned} \quad (2)$$

برابر است با عدد فرود $Fr_1 = u_1 / \sqrt{gy_1}$ بالادست پرش جریان. برای q_j مساوی صفر رابطه ۲ به معادله کلاسیک برای یک پرش آزاد تغییر می‌کند. پرش هیدرولیکی باعث اتلاف انرژی (ΔE) می‌گردد.

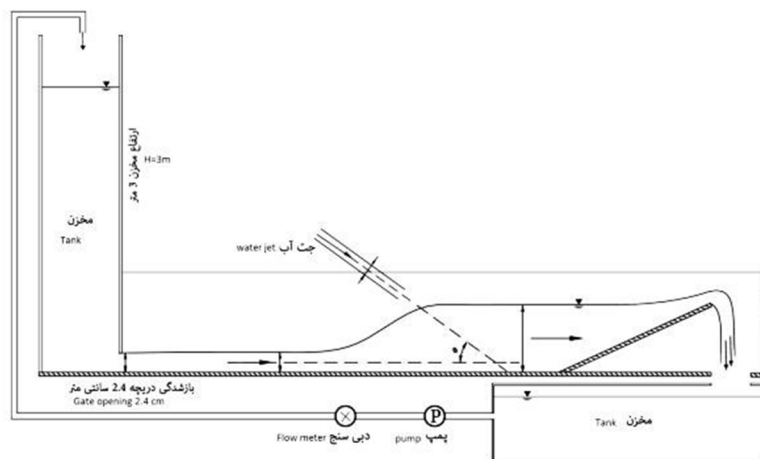
به منظور بررسی اثر زاویه برخورد جت بر مشخصات پرش هیدرولیکی، از یک مدل آزمایشگاهی شامل کانال با جداره‌های تمام شیشه‌ای به عرض ۳۰ سانتی‌متر و به طول ۱۲ متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر استفاده شد. برای ایجاد جریان فوق بحرانی با عدد فرود بالا، مخزنی به عرض ۳۰ سانتی‌متر و به طول ۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳ متر از ورق 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.

$$\frac{y_2}{y_1} = f_2 \left(Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gy_1}}, R_1 = \frac{v_1 y_1}{\nu}, \theta, \frac{y_j}{y_1}, \frac{x_j}{y_1}, \frac{u_j}{v_1} \right) \quad (5)$$

از آنجائی که مقادیر اعداد رینولدز در آزمایش‌های انجام شده بزرگ است می‌توان از اثر لزجت چشم‌پوشی کرد و رابطه ۵ به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\frac{y_2}{y_1} = f_2 \left(Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gy_1}}, \frac{y_j}{y_1}, \theta, \frac{x_j}{y_1}, \frac{u_j}{v_1} \right) \quad (6)$$

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

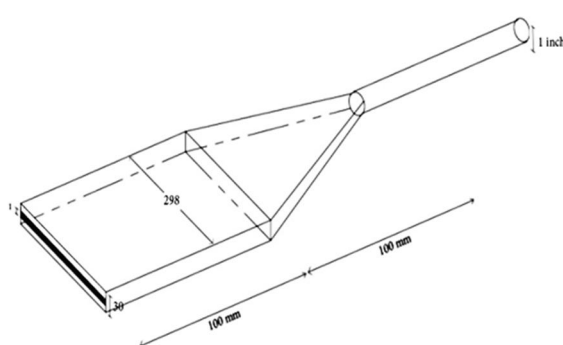


شکل ۲- نمای از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش.
Figure 2. A view of a laboratory flume used in this study.

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

جهت اندازه‌گیری جریان از سیستم دبی‌سنج الکترونیک مخزن با دقت ± 1 مترمکعب بر ساعت 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 پیژومترهای

جت آبی از طریق نازلی با مقطع مستطیلی که تصویر شماتیک آن در شکل ۳ مشاهده می‌شود تولید می‌گردد. از یک پمپ قوی که قابلیت تولید یک جت صفحه‌ای را دارد جهت این‌که ضخامت جریان در تمام 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 ۴).



شکل ۳- وسیله ساخته شده جهت ایجاد جت آبی و ابعاد آن.

Figure 3. Made to create a jet of water and its dimensions.

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

استفاده گردید و با توجه به مشخصات هندسی لبه ورودی دریاچه ضریب دریاچه با توجه به رابطه ۷ تعیین شد در تمام مراحل آزمایش شیب بستر کانال به‌صورت افقی نگه داشته شد.

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

که در این رابطه Q دبی جریان، C_d ضریب دبی دریاچه، h ارتفاع آب داخل مخزن و A سطح مقطع می‌باشد.



بازشدگی دریاچه ورودی جریان از مخزن به کانال به‌میزان ۲/۴ 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، ۲/۵ و ۳/۲ لیتر بر ثانیه با چهار زاویه انتخابی نسبت به افق ۶۰، ۹۰، زاویه حداکثر اثر جابجایی ابتدای پرش و زاویه بدون تغییر ابتدای پرش به انتهای پرش هیدرولیکی وارد می‌گردید و میزان جابجایی پرش و



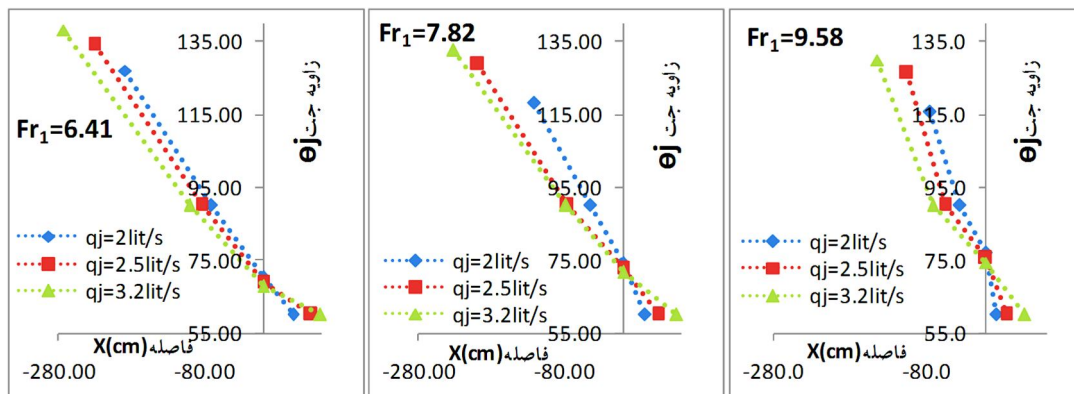
شکل ۴- نمایی از نحوه اندازه‌گیری زاویه.

Figure 4. A view of how to measure the angle.

۱- تأثیر جت بر تغییر موقعیت پرش هیدرولیکی: شکل ۵ اثر زاویه برخورد جت سریع آبی را بر جابجایی پرش هیدرولیکی در دبی‌های مختلف و در عدد فرود 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

مجموعه آزمایش‌های انجام شده در مورد تأثیر برخورد یک جت سریع با پرش هیدرولیکی نشان داد میزان جریان و زاویه برخورد جت تحت اعداد فرود متفاوت پرش اثرات متفاوتی را خواهد داشت که در ادامه به‌طور جداگانه مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۵- تغییرات ابتدایی پرش نسبت به زاویه جت.

Figure 5. Primary changes of the jump relative with the angle jet.

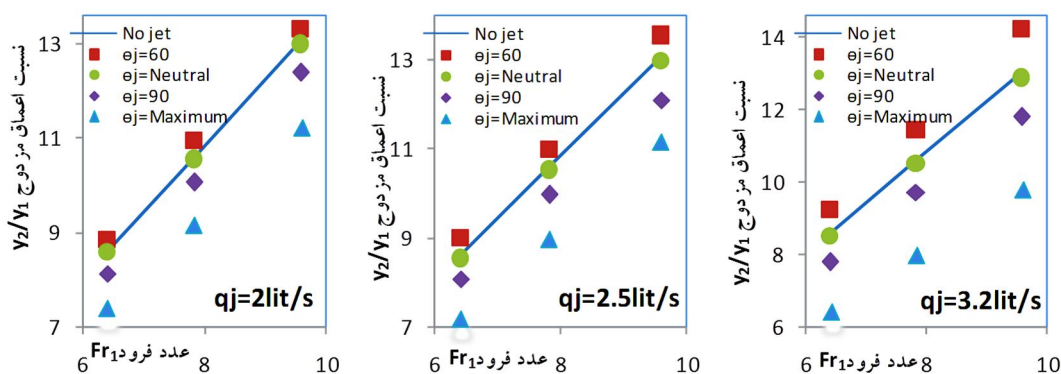
هیچ‌گونه حرکتی به سمت بالادست انجام نگرفت که این زاویه نیز به‌عنوان زاویه حداکثر جابجایی پرش نامگذاری شد. با توجه به شکل ۵ با افزایش دبی جت زاویه بی‌اثر کاهش می‌یابد و زاویه حداکثر با افزایش دبی جت افزایش می‌یابد. حداکثر جابجایی پرش

همان‌طور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، پرش هیدرولیکی در یکی از زاویه‌های انتخابی برای جت سریع هیچ‌گونه جابجایی ندارد که به‌عنوان زاویه بی‌اثر نامگذاری شد. با افزایش زاویه جت، پرش به سمت بالادست تغییر مکان می‌دهد و از یک زاویه به بعد

انتهای 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 جابجایی نیز بیش‌تر خواهد بود.

۲- نسبت اعماق ثانویه: با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده بدون جت، نمودار تغییرات نسبت عمق ثانویه با افزایش زاویه جت در مقابل عدد فرود در شکل ۶ ترسیم گردید. در این شکل خط ممتد نشان‌دهنده حالت بدون جت می‌باشد.

به سمت بالادست جریان مربوط به حداقل عدد فرود، حداکثر دبی جت و در زاویه ۱۳۸ درجه به‌میزان ۲۷۲ سانتی‌متر و حداکثر جابجایی پرش به سمت پایین‌دست جریان مربوط به حداقل عدد فرود و حداکثر دبی جت و در زاویه ۶۰ درجه به‌میزان ۷۸ سانتی‌متر می‌باشد. هرچه عدد فرود افزایش یابد میزان جابجایی پرش به سمت بالادست کاهش می‌یابد. اعمال جت به انتهای پرش هیدرولیکی در هر زاویه بیش‌تر از زاویه خشی، پرش هیدرولیکی به سمت بالادست جابجا می‌شود و برعکس اعمال جت به

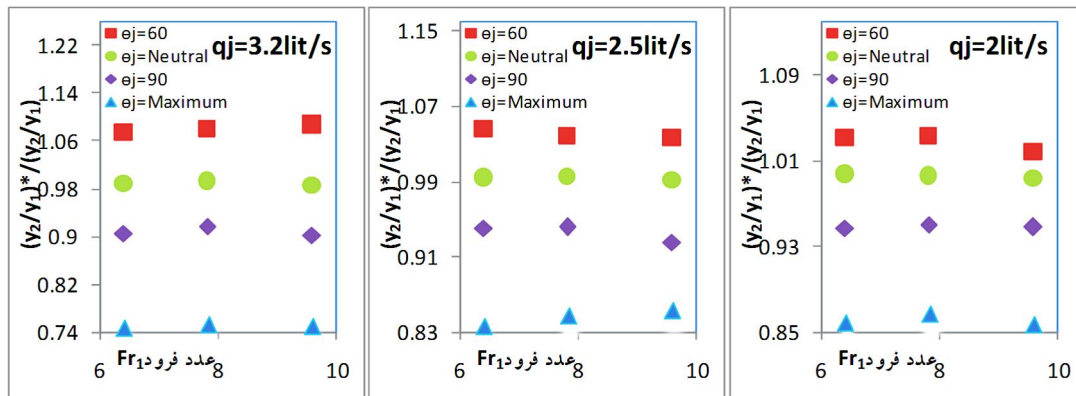


شکل ۶- تغییرات نسبت عمق ثانویه با افزایش زاویه جت.

Figure 6. Secondary depth changes by increasing of jet angle.

آیچا وارول و همکاران (۲۰۰۹) به اثبات رسیده بود (۱۶). برای بهتر نشان دادن تغییرات، در شکل ۷ نسبت $(y_2/y_1) / (y_2/y_1)^*$ در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه پرش رسم شده است، که $(y_2/y_1)^*$ نسبت عمق ثانویه اندازه‌گیری شده با استفاده از جت و (y_2/y_1) نسبت عمق ثانویه در بستر صاف بدون جت می‌باشد. هرچه دبی جت افزایش یابد به طبع، اثر آن در افزایش و کاهش عمق ثانویه نیز بیش‌تر خواهد بود.

این شکل بیانگر این واقعیت است که تغییرات در زاویه جت باعث کاهش یا افزایش عمق ثانویه پرش هیدرولیکی می‌گردد، به طوری که نسبت عمق ثانویه در حداکثر زاویه جت، بیش‌ترین دبی جت و کم‌ترین عدد فرود، تا حدود ۲۵/۴ درصد کاهش می‌یابد و در زاویه ۶۰ درجه که کم‌تر از زاویه بی‌اثر می‌باشد با بیش‌ترین دبی جت و بیش‌ترین عدد فرود، نسبت عمق ثانویه تا حدود ۸/۷ درصد افزایش می‌یابد که این افزایش برای زاویه‌های ۶۰ درجه قبلاً توسط

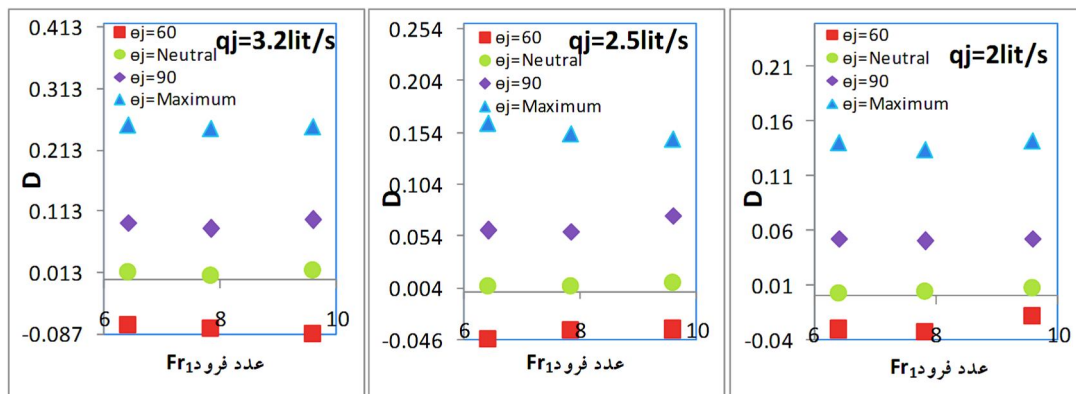


شکل ۷- تغییرات نسبت $(y_2/y_1)^* / (y_2/y_1)$ با افزایش زاویه جت.

Figure 7. Changes in the $(y_2 / y_1) * / (y_2 / y_1)$ by increasing the angle jet.

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. مقادیر حداکثر و حداقل پارامتر D به ترتیب 0.25 و 0.1 می باشد.

دلیل کاهش یا افزایش نسبت اعماق مزدوج را می توان به افزایش و کاهش نیروی های برشی در اثر جت آبی می باشد که در قسمت تنش برشی مورد بحث قرار خواهد گرفت. برای نمایش میزان اختلاف عمق ثانویه با اعمال جت آبی y_2 و پرش کلاسیک y_2^* پارامتر کاهش



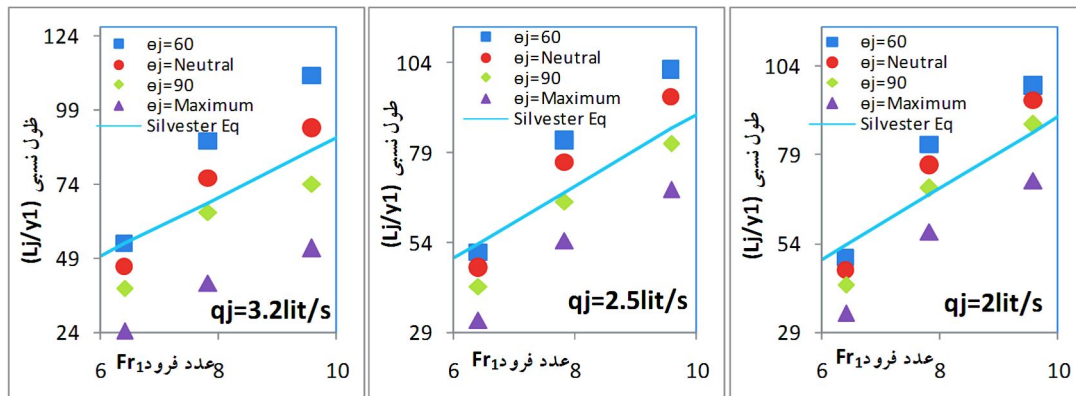
شکل ۸- تغییرات پارامتر D کاهش عمق در مقابل عدد فرود.

Figure 8. Changes in the D parameter decrease the depth in front of the Froude number.

برای طول پرش در بسترهای صاف و افقی می باشد (۱۳).

$$\frac{L_j}{y_1} = 9.75 (Fr_1 - 1)^{1.01} \quad (۸)$$

۳- طول پرش هیدرولیکی: در شکل ۹ تغییرات طول نسبی پرش با افزایش زاویه جت در روی شیب افقی نشان داده شده است. در این شکل خط ممتد نشان دهنده رابطه ۸ تجربی سیلوستر (۱۹۶۴)

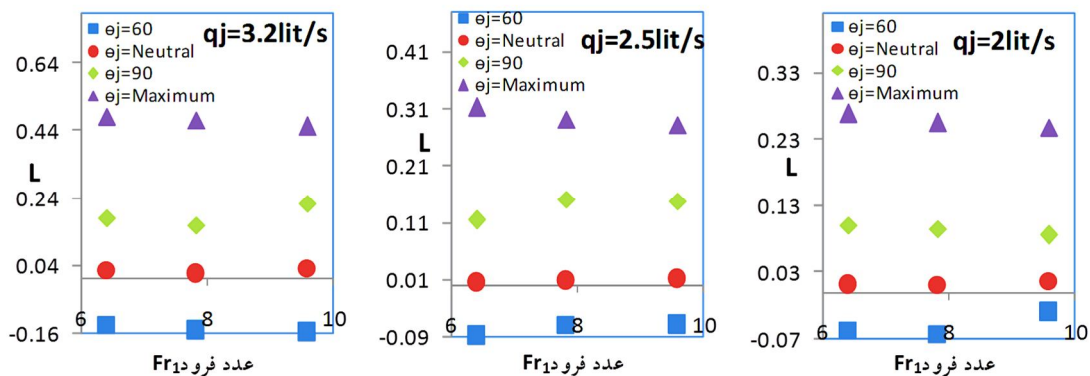


شکل ۹- تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی با افزایش زاویه جت.

Figure 9. Changes in the relative length of hydraulic jump with an increase in jet angle.

در شکل ۹ مشاهده می‌شود که با تغییرات زاویه جت طول پرش نسبت به پرش بدون جت کاهش و افزایش می‌یابد. افزایش دبی جت این تغییرات را تشدید می‌کند به طوری که به‌ازای حداکثر میزان کاهش تا حدود ۴۸/۳ درصد مربوط به حداکثر زاویه جت، بیش‌ترین دبی جت و حداقل عدد فرود و حداکثر میزان افزایش تا حدود ۲۹ درصد مربوط به حالت زاویه ۶۰ درجه، حداکثر دبی جت و در حداکثر عدد فرود می‌باشد. برای بهتر نشان دادن تغییرات، L و همکاران (۲۰۰۹) به اثبات رسیده بود.

در شکل ۹ مشاهده می‌شود که با تغییرات زاویه جت طول پرش نسبت به پرش بدون جت کاهش و افزایش می‌یابد. افزایش دبی جت این تغییرات را تشدید می‌کند به طوری که به‌ازای حداکثر میزان کاهش تا حدود ۴۸/۳ درصد مربوط به حداکثر زاویه جت، بیش‌ترین دبی جت و حداقل عدد فرود و حداکثر میزان افزایش تا حدود ۲۹ درصد مربوط به حالت زاویه ۶۰ درجه، حداکثر دبی جت و در حداکثر عدد فرود می‌باشد. برای بهتر نشان دادن تغییرات، L

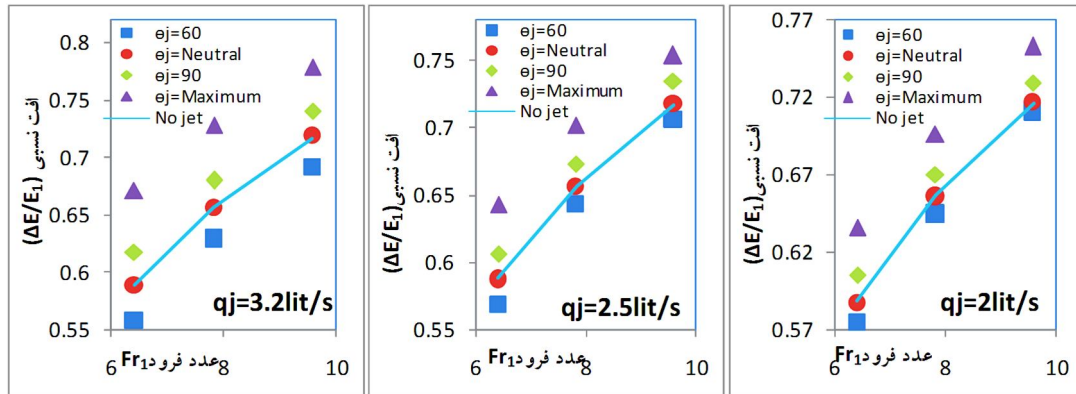


شکل ۱۰- تغییرات نسبت $(L = \frac{L_j^* - L_j}{L_j^*})$ پرش هیدرولیکی در مقابل عدد فرود.

Figure 10. Change ratio $(L = \frac{L_j^* - L_j}{L_j^*})$ hydraulic jump in front of the Froude number.

در شکل ۱۱ تغییرات افت انرژی نسبی در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه پرش با افزایش زاویه جت نشان داده شده است.

۴- افت انرژی نسبی: افت انرژی نسبی پرش هیدرولیکی عبارتست از $\Delta E/E_1$ که اختلاف انرژی مخصوص در ابتدا (E_1) و انتهای پرش (E_2) می باشد.

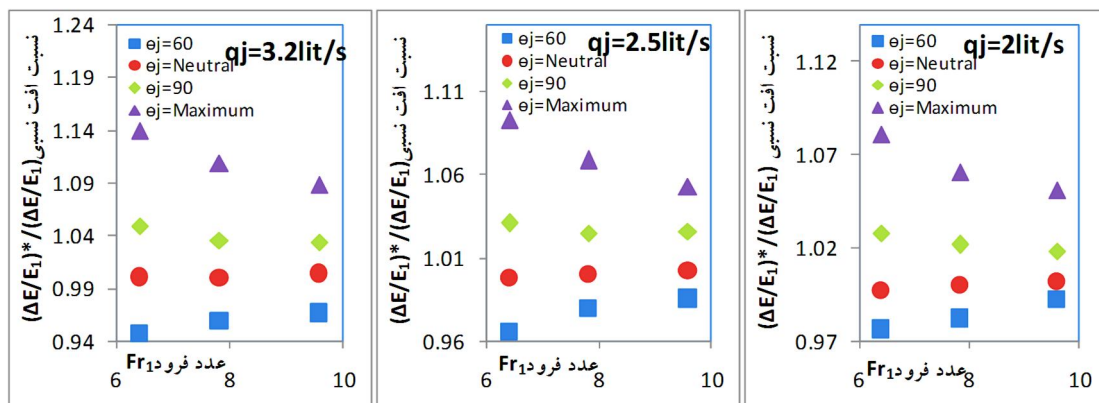


شکل ۱۱- تغییرات افت انرژی نسبی پرش با افزایش زاویه جت.

Figure 11. Changes in the relative energy loss of jump by increasing the angle of the jet.

جت عمق ثانویه پرش کاهش می یابد و توجه به این موضوع که در جریان زیر بحرانی سهم عمق جریان در انرژی نسبت به هد سرعت بسیار بیش تر است، بنابراین با کاهش عمق ثانویه اختلاف انرژی در مقاطع اولیه و ثانویه پرش افزایش و به تبع آن افت نسبی انرژی افزایش می یابد. برای بهتر نشان دادن تغییرات نسبت $(\Delta E/E_1) / (\Delta E/E_1)$ در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه پرش در شکل ۱۲ رسم شده است.

در این نمودارها مشاهده می شود که با تغییرات زاویه جت افت انرژی نسبی افزایش و کاهش می یابد. به طوری که در حداکثر عدد فرود، بیش ترین دبی جت و در زاویه حداکثر افت انرژی نسبی به میزان $0/76$ می باشد و در حداقل عدد فرود، بیش ترین دبی جت و در زاویه 60 افت انرژی نسبی تا حدود $0/56$ می باشد. در توجیه این تغییرات می توان گفت که با توجه به این که با افزایش زاویه جت و همچنین افزایش دبی



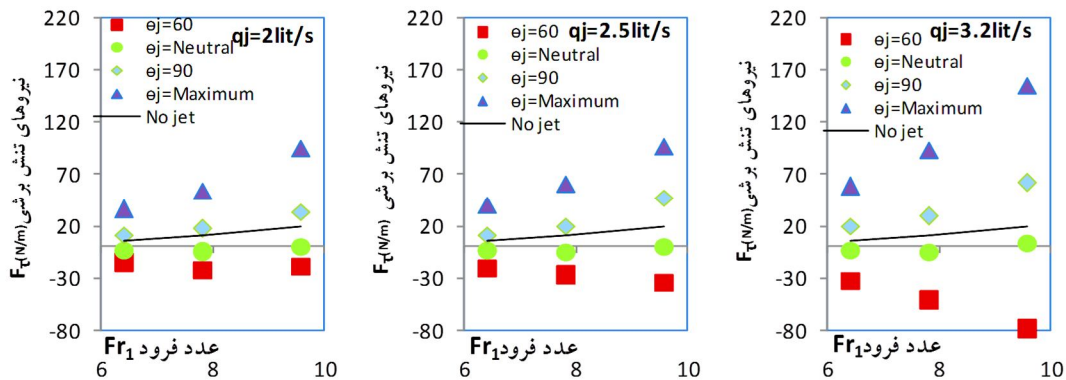
شکل ۱۲- تغییرات، نسبت $(\Delta E/E_1) / (\Delta E/E_1)$ در مقابل عدد فرود.

Figure 12. Changes in the ratio of $(\Delta E / E_1) / (\Delta E / E_1)$ in front of the Froude number.

که در آن، P و M مقادیر نیروی فشار و مومنتم و اندیس‌های ۱ و ۲ به ترتیب نشانگر مقاطع قبل و بعد از پرش می‌باشند. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده بدون جت، نمودار تغییرات F_T با افزایش زاویه جت در مقابل عدد فرود در شکل ۱۳ رسم شده است. در این شکل خط ممتد نشان‌دهنده نیروی برشی بستر قبل از اعمال جت می‌باشد.

۵- 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 و اثر نیروی جت در طول پرش باشد، با استفاده از معادله مومنتم می‌توان بیان کرد:

$$F_T = (P_1 - P_2) + (M_1 - M_2) \quad (9)$$



شکل ۱۳- تغییرات نیروهای برشی بستر با افزایش زاویه جت.

Figure 13. Changes in shear forces with increasing jet angle.

به دلیل افزایش نیروهای برشی، پرش به سمت بالادست جابجا می‌گردد. همچنین اگر زاویه جت برابر زاویه بی‌اثر باشد به دلیل عدم تغییر نیروهای برشی محل تشکیل پرش تغییری نمی‌کند.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر جت و زاویه جت بر مشخصات پرش هیدرولیکی شامل نسبت عمق ثانویه، طول پرش و افت انرژی بررسی گردید. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد:

جت باعث حرکت پرش هیدرولیکی به سمت بالادست جریان و پایین دست جریان می‌گردد به طوری که پرش هیدرولیکی با اعمال جت با زاویه

این شکل بیانگر این واقعیت است که تغییرات زاویه جت باعث کاهش و افزایش نیروهای برشی بستر می‌گردد، به طوری که در زاویه ۶۰ درجه، کمترین عدد فرود و حداکثر دبی جت حدود ۶/۷ برابر نسبت به حالت بدون جت کاهش می‌یابد و در زاویه حداکثر، کمترین عدد فرود و حداکثر دبی جت حدود ۱۸ برابر نسبت به حالت بدون جت باعث افزایش نیروهای برشی می‌گردد و نیروهای برشی بستر زمانی که جت با زاویه خشی اعمال می‌گردد تقریباً با حالت بدون جت برابر می‌باشد. بنابراین اگر زاویه جت کم‌تر از زاویه بی‌اثر باشد به دلیل کاهش نیروهای برشی، پرش به سمت پایین دست حرکت می‌نماید و در صورتی که زاویه جت بیش‌تر از زاویه بی‌اثر باشد

حالت زاویه ۶۰ درجه، حداکثر دبی جت و در حداکثر عدد فرود می‌باشد. تغییرات زاویه جت باعث افزایش و کاهش افت نسبی انرژی می‌شود. به طوری که در حداکثر عدد فرود، بیشترین دبی جت و در زاویه حداکثر افت انرژی نسبی به میزان ۰/۷۶ می‌باشد و در حداقل عدد فرود، بیشترین دبی جت و در زاویه ۶۰ افت انرژی نسبی تا حدود ۰/۵۶ می‌باشد تغییرات زاویه جت باعث کاهش و افزایش نیروهای برشی بستر می‌گردد، به طوری که در زاویه ۶۰ درجه، کمترین عدد فرود و حداکثر دبی جت حدود ۶/۷ برابر نسبت به حالت بدون جت کاهش می‌یابد و در زاویه حداکثر، بیشترین عدد فرود و حداکثر دبی جت حدود ۱۸ برابر نسبت به حالت بدون جت باعث افزایش نیروهای برشی می‌گردد.

کمتر از زاویه اثر به سمت پایین دست و در زاویه بیش تر از آن به سمت بالادست جابجا می‌گردد. تغییرات در زاویه جت باعث کاهش و افزایش عمق ثانویه پرش هیدرولیکی می‌گردد، به طوری که در حداکثر زاویه جت، بیشترین دبی جت و کمترین عدد فرود، نسبت عمق ثانویه تا حدود ۲۵/۴ درصد کاهش می‌یابد و در زاویه ۶۰ درجه که کمتر از زاویه بی‌اثر می‌باشد با بیشترین دبی جت و بیشترین عدد فرود تا حدود ۸/۷ درصد افزایش می‌یابد. با تغییرات زاویه جت طول پرش نسبت به پرش بدون جت کاهش و افزایش می‌یابد. افزایش دبی جت این تغییرات را تشدید می‌کند. به طوری که به ازای حداکثر میزان کاهش تا حدود ۴۸/۳ درصد مربوط به حداکثر زاویه جت، بیشترین دبی جت و حداقل عدد فرود و حداکثر میزان افزایش تا حدود ۲۹ درصد مربوط به

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. J. Sci. Echnol. Agric. Natur. Resour. Water and Soil Science. 18: 70. 135-145. (In Persian)
3. Belanger, J.B. 1828. Essai Sur la Solution Numériaue de Quelques Problèmes Relatifs au Mouvement Permanent des Eaux Courantes. Carulian-Goeury, Paris, France. (In French)
4. Ead, S.A., and Rajaratnam, N. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. J. Hydr. Engin. ASCE. 128: 656-663.
5. 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.
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 Kashefipoor, 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 13 2009, 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.



The impact of water rectangular jet angle on the characteristics of hydraulic jump

M. Dastourani¹, *K. Esmaili² and S.R. Khodashenas³

¹Ph.D. Graduate, Dept. of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad and Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, University of Birjand, ²Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, ³Professor, Dept. of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

Received: 09/09/2015; Accepted: 11/29/2015

Abstract

Background and Objectives: Hydraulic jump is one of the common methods of dissipation of energy of the super-critical flows in open channels. This phenomenon is a kind of rapid, varied flow that exists when the super - critical state of flow converts to the sub-critical state. It causes to considerable dissipation in value of the energy. In this research a new method introduced for decreasing both values of the conjugate depths and the hydraulic jump's length. This method 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. A control gate used to fixing the situation of the jump, in the downstream of the flow. 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 and jet angle on the jump's specifications, the tests performed in various conditions. These conditions include of the three different jet's discharges of 2, 2.5 and 3.2 litre 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.

Results: The hydraulic jump at a special jet angle had not any displacement that 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 resulted in changes in the secondary depth, jet length, relative energy loss and bed shear stress. At the maximum angle of the 60 degrees and the discharge equal to the 3.2 liter per second in the minimum Froude number, the secondary depth ratio increased by 25.4 percent. Using a jet with the angle of the 60 degrees and the discharge of the 3.2 liter per second in the maximum Froude number of the flow caused the increasing in the secondary depth ratio by 8.7 percent. The maximum reduction in the jet length (e.g.48.3 percent) occurred at the maximum jet angle and discharge equal to the 3.2 liter per second in the minimum Froude number. The maximum increasing in the jet length (e.g.29 percent) happened in the angle of the 60 degrees, discharge about 3.2 liter/s and the maximum Froude number. In the maximum angle of the jet, discharge about 3.2 liter/s and minimum Froude number, the maximum relative energy loss, increased about 0.76 and finally using the jet's angle equal to the 60 and 90 degrees caused decreasing and increasing of the bed shear stresses, respectively.

Conclusion: Applying the jet to the jump with an angle greater than ineffective angle caused decreases in the secondary depths ratio and jump length while increasing in the energy loss and bed shear forces.

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

* Corresponding Author; Email: esmaili@um.ac.ir

