

Investigation of the effect of Jet, semi-cylindrical roughness and reverse slope on hydraulic

Mehdi Dastourani^{*1} | Ziba Rousta² | Zohreh Abdollahi Salmabad³

1. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Birjand University. E-mail: mdastourani@birjand.ac.ir

2. Graduate, Dept. of Water Science and Engineering, Birjand University.

3. Graduate, Dept. of Water Science and Engineering, Birjand University.

Article Info

Article type:

Research Full Paper

Article history:

Received: 05.10.2021

Revised: 08.09.2021

Accepted: 12.06.2021

Keywords:

Half cylindrical roughness,
Hydraulic jump parameters,
Jump length,
Rectangular free jet,
Reverse slope

ABSTRACT

Background and Objectives: The formation of jumps in relaxation ponds plays an effective role in the depletion of flow energy at the bottom of aquatic structures. Hydraulic jump is a type of fast variable currents that changes from supercritical to subcritical mode if the channel conditions in downstream are suitable. In this research, a new method has been proposed to reduce the conjugate depths and jump lengths, in which the characteristics of a fast free rectangular jet and floor roughness have been used to influence the jump characteristics. The fast jet hits the jump and the amount of motion transferred to it affects the jump characteristics and position.

Materials and Methods: In this study, a laboratory study was performed with a set of experiments in a channel with glass walls 10 meters long, 0.3 meters wide and 0.5 meters high. In order to investigate the effect of flow rate, jet angle, inverted slope and floor roughness at 2, 2.5 and 3.2 liters per second on the hydraulic jump profile of three flow rates, the angle with a maximum displacement of 90 degrees, 60 degrees per second for Jet and four angles were used for the horizontal direction of the jet, including the displacement of the beginning of the jump and the angle without changing the beginning of the jump and three types of roughness.

Results: The experimental results showed that for a given jet angle, at different discharges, the hydraulic jump has no displacement, which was named as the inert angle. With the increase of the jet angle, the jump moved upwards and from one angle onwards, the jump did not move upwards, which was also named as the maximum displacement angle of the jump. Changing the angle and flow rate of the jet reduced or increased the secondary depth, jump length, relative energy loss and shear force of the bed. The reverse slope and roughness reduced the hydraulic jump characteristics. At a slope of 2.25 and a distance of d and a jet angle of 3.2, the most changes were observed in the hydraulic jump characteristics.

Conclusion: Laboratory results showed that increasing the shear stress intensifies the effect of reverse slope and increases the roughness of the

channel floor due to increasing shear stress, intensifies the effect of reverse slope on the hydraulic jump length. In justifying these changes, the effect of the downward component of the weight force on the reverse slope and the increase in shear stress on the rough bed can be considered as the main cause of the changes. Inserting the jet into the jump at an angle greater than the ineffective angle reduced the conjugate depth ratio by about 36.72% compared to the non-jet webster smooth state. The use of jets with minimum angle and maximum jet flow and maximum landing number (9.62) increased the ratio of conjugate depths by 10.4 percent compared to the starting position of the jet and the smooth bed.

Cite this article: Dastourani, Mehdi, Rousta, Ziba, Abdollahi Salmabad, Zohreh. 2022. Investigation of the effect of Jet, semi-cylindrical roughness and reverse slope on hydraulic. *Journal of Water and Soil Conservation*, 28 (3), 153-171.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2022.19147.3458

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

بررسی اثر جت، زبری نیم استوانه‌ای و شیب معکوس بر پرش هیدرولیکی

مهدی دستورانی^{۱*} | زیبا روستا^۲ | زهره عبدالهی سلم‌آباد^۳

۱. نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند. رایانامه: mdatourani@birjand.ac.ir

۲. دانش‌آموخته گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند.

۳. دانش‌آموخته گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: تشکیل پرش در حوضچه‌های آرامش نقش مؤثری در استهلاک انرژی جریان در پایاب سازه‌های آبی ایفا می‌کند. پرش هیدرولیکی از نوع جریان‌های متغیر سریع است که در صورت مناسب بودن شرایط کانال در پایین‌دست جریان از حالت فوق بحرانی به زیربحرانی تغییر می‌یابد. 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.
تاریخ دریافت: ۰۰/۰۲/۲۰	مواد و روش‌ها: در این پژوهش یک مطالعه آزمایشگاهی با مجموعه‌ای از آزمایش‌ها در یک کانال با جداره‌های شیشه‌ای به طول ۱۰ متر و عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۵ متر انجام گرفت. به منظور بررسی تأثیر دبی، زاویه جت، شیب معکوس و زبری کف در ۲، ۵/۲ و ۳/۲ لیتر بر ثانیه بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی از سه دبی و با زاویه حداکثر جابه‌جایی 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.
تاریخ ویرایش: ۰۰/۰۵/۱۸	یافته‌ها: نتایج آزمایشگاهی نشان داد، برای یک زاویه مشخص جت، در دبی‌های مختلف، پرش هیدرولیکی هیچ‌گونه جابه‌جایی 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. شیب معکوس و زبری باعث کاهش مشخصات پرش هیدرولیکی گردید. در شیب ۲/۲۵ و فاصله d (فاصله بین زبری‌ها) و زاویه جت ۳/۲ بیش‌ترین تغییرات در مشخصات پرش هیدرولیکی مشاهده گردید.
تاریخ پذیرش: ۰۰/۰۹/۱۵	نتیجه‌گیری: نتایج آزمایشگاهی نشان داد که افزایش تنش برشی، باعث تشدید تأثیر شیب معکوس و افزایش زبری کف کانال به دلیل افزایش تنش برشی، باعث تشدید تأثیر شیب
واژه‌های کلیدی: پارامترهای پرش هیدرولیکی، جت آزاد مستطیلی، زبری نیم استوانه‌ای، شیب معکوس، طول پرش	

معکوس روی طول پرش هیدرولیکی می‌شود. در توجیه این تغییرات می‌توان تأثیر مؤلفه رو به پایین نیروی وزن در روی شیب معکوس و افزایش تنش برشی در روی بستر زیر را عامل اصلی تغییرات دانست. وارد کردن جت به پرش با زاویه‌ای بزرگ‌تر از زاویه بی‌اثر، موجب کاهش تا حدود ۳۶/۷۲ درصد نسبت اعماق مزدوج نسبت به حالت بدون جت و بستر صاف گردید. به‌کارگیری جت با زاویه حداقل و دبی جت حداکثر و بیش‌ترین عدد فرود (۹/۶۲) موجب افزایش ۱۰/۴ درصد نسبت اعماق مزدوج نسبت به حالت بدون جت و بستر صاف شد.

استناد: دستورانی، مهدی، روستا، زیبا، عبدالهی سلم‌آباد، زهره (۱۴۰۰). بررسی اثر جت، زبری نیم استوانه‌ای و شیب معکوس بر پرش هیدرولیکی.

پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۸ (۳)، ۱۷۱-۱۵۳.

DOI: 10.22069/jwsc.2022.19147.3458



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

پرش یا پرش هیدرولیکی، از نوع جریان‌های متغیر سریع است که در بسیاری از کارهای عملی با آن روبرو بوده و عبارت است از تغییر حالت جریان از فوق بحرانی به زیربحرانی. از زمان‌های گذشته، ایجاد پرش هیدرولیکی آبی در مجاری شیب‌دار، فکر پژوهشگران را به خود مشغول داشته ولی به علت عدم وجود اطلاعات موردنیاز، اطمینان کافی به طرح این گونه مسائل نبوده است. وقتی جریان عبوری از روی سرریز به انتهای تنداب می‌رسد، به دلیل سرعت زیاد دارای انرژی جنبشی فراوان و بسیار مخربی است. چنانچه این جریان به رودخانه وارد شود، بستر رودخانه را شسته و فرسایش شدید ایجاد می‌کند. به همین دلیل لازم است تا قبل از ورود جریان به رودخانه، توسط تأسیساتی خاص، انرژی جریان مستهلک‌شده و جریان آرام به پایین‌دست منتقل شود. تغییر طول نسبتاً محسوس پرش هیدرولیکی آبی در اثر تأثیر مؤلفه وزن در مجاری شیب‌دار باعث پیچیدگی بیش‌تر این‌گونه پرش‌ها گشته است. مدل‌سازی فیزیکی یک ابزار مهم برای مهندسی هیدرولیک و به‌ویژه برای ارزیابی عملکرد سازه‌های اتلاف انرژی است. این سازه‌های هیدرولیکی که معمولاً در سدها استفاده می‌شوند، به دلیل نیازهای جدید امنیتی و تغییرات آب و هوایی، باید فرایند امنیتی را طی کنند (۵). پرش هیدرولیکی اولین بار به‌صورت آزمایشی موردپژوهش 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 (۴). چون او مشاهده کرد که در کانال‌های با شیب تند، پرش هیدرولیکی مکرراً به‌وسیله مانعی که در برابر جریان یکنواخت قرار می‌گیرد، ایجاد می‌شود. استفاده از داده‌های تجربی بسیار مهم است و بنابراین مدل‌سازی فیزیکی برای مطالعه دقیق جریان‌های پیچیده مانند پرش هیدرولیکی ضروری است (۱۵، ۱۱). دستورانی و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی به بررسی اثر زاویه

برخورد جت به پرش هیدرولیکی روی بستر زبر پرداختند. 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 پیژومترهای در کف کانال و قرائت ارتفاع پیژومترها به کمک دوربینی با قدرت وضوح بالا و سپس استفاده از نرم‌افزار گرافر عمق جریان اندازه‌گیری شد. به‌منظور بررسی تأثیر دبی، زاویه جت و زبری کف 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 جابه‌جایی ابتدای پرش و زاویه بدون تغییر ابتدای پرش و سه نوع زبری استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد نتایج آزمایشگاهی، 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 به‌سمت بالادست حرکت کرد و از یک زاویه به بعد پرش هیچ‌گونه حرکتی به سمت بالادست نداشت که این زاویه نیز به عنوان حداکثر زاویه جابجای 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 (۶). اولین مطالعه در مورد پرش هیدرولیکی در بسترهای با شیب معکوس توسط راوس (۱۹۳۸) انجام شد و به این نتیجه رسید که پرش هیدرولیکی در این‌گونه حوضچه‌ها، فقط در روی شیب‌های نزدیک به صفر پایدار خواهد بود (۱۳). استیوس (۱۹۴۴) با تحلیل تئوری نظریه راوس را رد کرده و نشان داد که تشکیل پرش هیدرولیکی بر روی تمامی شیب‌های معکوس بدون هیچ‌گونه محدودیتی پایدار است و عمق ثانویه

ابریشمی و صانعی (۱۹۹۴) نیز با انجام آزمایش‌هایی نتایج خدر و راجاگویال (۱۹۷۲) را تأیید کردند. آن‌ها همچنین هیچ تغییر محسوسی بین افت انرژی کل پرش هیدرولیکی روی شیب افقی و معکوس مشاهده نکردند (۲، ۱۰). بیرامی و چمنی (۲۰۱۰) به مطالعه طول غلطاب و افت انرژی پرش هیدرولیکی در بسترهای شیبدار پرداختند و به این نتیجه رسیدند که طول پرش هیدرولیکی تابعی از عدد فرود جریان ورودی، عدد فرود جریان خروجی، نسبت عمق ثانویه و شیب بستر کانال است (۳). عبدالمهدی سلم‌آباد و همکاران (۲۰۲۱) حداکثر میزان کاهش طول پرش (۶۶/۷ درصد) زمانی رخ می‌دهد که از جت با زاویه حداکثر و دبی ۳/۲ لیتر بر ثانیه و در شرایط کم‌ترین عدد فرود (۶/۶۴) جریان و بیش‌ترین شیب (۲/۲۵۶) استفاده گردید حداکثر میزان افزایش طول پرش (۲۶/۲ درصد) نیز مربوط به استفاده از جت با زاویه ۷۸ و دبی ۳/۲ لیتر بر ثانیه محل برخورد جت انتهایی پرش و بستر صاف و عدد فرود ۹/۶۲ و شیب (۰/۷۵) بود زمانی که از جت با حداکثر زاویه (۱۳۸ درجه) و دبی جت ۳/۲ لیتر بر ثانیه محل برخورد جت قبل از پرش در بستر شیب معکوس در شرایط کم‌ترین عدد فرود (۶/۶۴) جریان استفاده گردید افت انرژی نسبی تا حدود ۳۹/۸ درصد افزایش یافت و در نهایت به‌کارگیری جت با زاویه کم‌تر از زاویه بی‌اثر و بیش‌تر از زاویه بی‌اثر به‌ترتیب موجب کاهش و افزایش نیروی برشی می‌شود (۱). اسلام‌منش و همکاران (۲۰۲۱) به این نتیجه رسیدند که به‌کارگیری جت با زاویه ۱۲۷ (زاویه بی‌اثر) درجه، حداکثر عدد فرود (۹/۶۴) جریان و زبری نیم استوانه‌ای موجب کاهش تا ۰/۱۲ درصد نسبت به حالت بدون جت و بستر صاف می‌باشد. بیش‌تری میزان کاهش طول پرش ۳۴/۷ درصد زمانی رخ می‌دهد که از جت با زاویه حداکثر و دبی ۳/۲ لیتر بر ثانیه و در شرایط کم‌تری عدد فرود جریان و بیش‌تری افزایش در حالت زاویه ۷۰ درجه، حداکثر دبی جت و حداکثر عدد فرود در بستر صاف

این‌گونه پرش هیدرولیکی‌ها را تخمین زد (۱۴). خدر و راجاگویال (۱۹۷۲) با انجام آزمایش‌هایی روی پرش هیدرولیکی روی شیب معکوس ۰/۲۵ به این نتیجه رسیدند که کنترل پرش هیدرولیکی در شیب‌های تندتر از این مقدار غیرممکن است (۱۰). نظری علی‌آبادی و اختری (۲۰۱۷) در پژوهشی به بررسی تأثیر بلوک‌های قائم و منحنی بر مشخصات پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا پرداختند. در نرم‌افزار FLOW-3D حداکثر مقیاس طول آشفته یک پارامتر تعریف‌شده توسط پژوهشگر است که برآوردی در مقیاس طول واقعی برای تلاطم جریان را نشان می‌دهد (۱۲). علاوه بر این موارد، پارامتر B (عرض کانال) را می‌توان برابر ۰/۰۷ قرارداد (گوالتیری، ۲۰۱۰). در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D و مدل‌های آشفتگی k-e استاندارد و RNG k-e شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا انجام گردید و در نهایت با نتایج به‌دست‌آمده از بررسی آزمایشگاهی مقایسه گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل آشفتگی k-e استاندارد برای پیش‌بینی پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا مناسب بوده و هماهنگی قابل‌قبولی دارد (۹). دستورانی و همکاران (۲۰۱۶) شیوه جدیدی به‌منظور کاهش اعماق مزدوج و طول پرش پیشنهاد دادند که در آن از ویژگی‌های یک جت مستطیلی آزاد سریع برای تأثیرگذاری بر خصوصیات پرش استفاده نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد برخورد جت سریع به پرش و انتقال اندازه حرکت به آن خصوصیات و موقعیت پرش را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (۷). دستورانی و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی اثر زاویه برخورد جت به پرش هیدرولیکی روی بستر زبر پرداختند و نتایج آزمایشگاهی نشان داد 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 (۷).

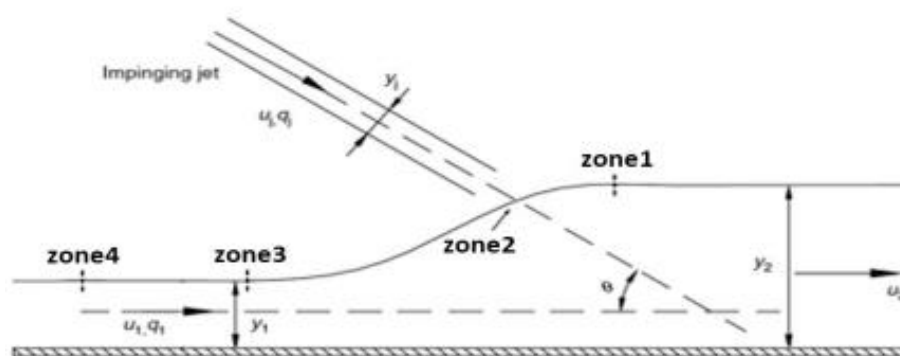
مشخصات پرش هیدرولیکی می‌باشد، که مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم بر پرش 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.

۸/۱۶ درصد می‌باشد (۸). در پژوهش‌های انجام شده اثر جت و بسترهای شیب معکوس همراه با زبری‌های نیمه استوانه‌ای بر مشخصات پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر این پارامترها در پرش هیدرولیکی مورد مقایسه قرار گرفت. که آیا اثر هم زمان جت، شیب معکوس و زبری چه تأثیری بر مشخصات پرش خواهد داشت با توجه به این که جت آبی، زبری و پرش هیدرولیکی هر سه به صورت جداگانه بر طراحی اقتصادی حوضچه‌ها کمک می‌کنند آیا اثر هم زمان سه پارامتر هم می‌تواند بر طراحی اقتصادی حوضچه‌ها اثرگذار باشد یا خیر؟ تفاوت‌های این پژوهش با سایر پژوهش‌های علمی انجام شده، اثر توامان جت، شیب معکوس و زبری نیم استوانه‌ای بر



شکل ۱- شمای ساده از نحوه برخورد جت آزاد سریع به پرش هیدرولیکی (توزنده‌جانی و همکاران، ۲۰۱۳).

Figure 1. Simple how fast free jet hits hydraulic jump (Tuzandehjani et al., 2013).

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

کانال در اثر وجود زبری و F نیروی ناشی از تلاطم اضافی ایجاد شده در اثر اعمال جت ورودی می‌باشد. بنابراین $q_1 = y_1 u_1$ و $q_2 = y_2 u_2$ و $q_j = y_j u_j$ می‌باشد. با تقسیم معادله حرکت $(1/2) \rho g y_2^2$ (رابطه ۲) تبدیل می‌گردد:

که در آن، u_1 و y_1 به ترتیب سرعت و عمق بالادست پرش u_1 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 مخصوص آب، F_f نیروی اصطکاک در کف

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

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.

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

اعمال جت به پارامترهای زیر بستگی دارد:

$$f_1 = (y_1, V_1, g, \rho, \nu, d, k_s, s, \theta, y_j, u_j, L_j) \quad (4)$$

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:

$$\frac{y_2}{y_1} = f_2 \left(\frac{L_j}{y_1} \cdot Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}} \cdot Re_1 = \frac{V_1 y_1}{\nu} \cdot \frac{s}{y_1} \cdot \theta \cdot \frac{k_s}{y_1} \right) \quad (5)$$

مقادیر بالای عدد رینولدز در پژوهش حاضر، رابطه ۲ به صورت زیر ساده می‌شود.

$$\frac{y_2}{y_1} = f_2 \left(Fr_1 \cdot \frac{s}{y_1} \cdot \frac{L_j}{y_1} \cdot \frac{k_s}{d} \cdot \frac{u_j}{v_1} \right) \quad (6)$$

علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند در یک کانال مستطیلی به طول ۱۰ متر و عرض ۰/۳ متر مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمایش جهت تنظیم و تثبیت موقعیت ثابت پرش هیدرولیکی در فاصله ۲/۷۲ متر، از یک دریچه قابل کنترل در پایین دست کانال استفاده شد. نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش در (شکل ۲) ارائه شده است.

$$Fr_1 = \frac{u_1}{\sqrt{gy_1}}$$

برای پرش جریان. برای $q_j = 0$ (رابطه ۲) به معادله کلاسیک برای یک پرش آزاد تغییر می‌کند. پرش

به طور کلی خصوصیات پرش هیدرولیکی پس از

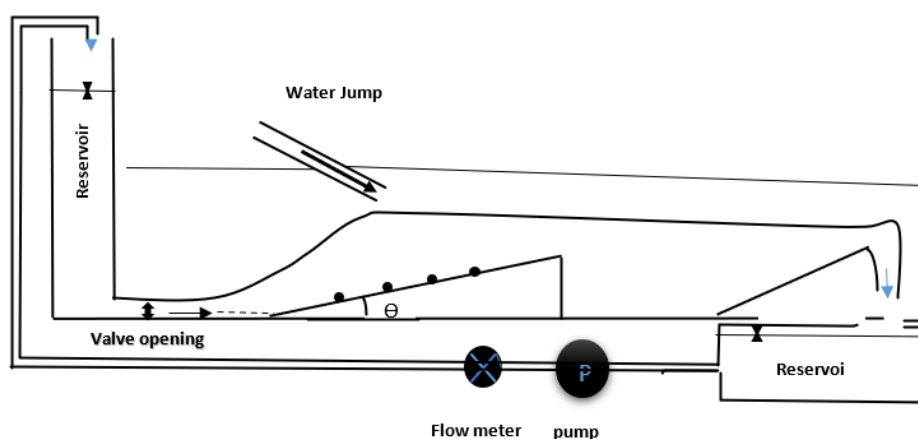
که در آن، y_1 عمق جریان فوق بحرانی ورودی و V_1 سرعت جریان، g شتاب ثقل، ρ چگالی متوسط، ν لزجت سینماتیکی، d فاصله بین زبری‌ها، k_s ارتفاع زبری‌ها، s شیب کف، θ زاویه جت y_j ، پهنای جت، u_j سرعت جت و L_j طول پرش هیدرولیکی می‌باشد.

که در آن، Re_1 به عدد رینولدز در مقطع اولیه پرش هیدرولیکی، Fr_1 عدد فرود در مقطع اولیه پرش هیدرولیکی صرف نظر کردن از اثر لزجت به دلیل

پارامتر k_s/d نسبت ارتفاع زبری به فاصله بین

آنها است و تأثیر ابعاد زبری‌ها را بر خصوصیات پرش هیدرولیکی نشان می‌دهد.

دیگر خصوصیات پرش از جمله طول پرش، افت انرژی نسبی و تنش برشی نیز تابعی از پارامترهای فوق خواهند بود. به منظور بررسی اثر جت، زبری نیم‌استوانه‌ای و شیب معکوس بر پرش هیدرولیکی، از یک مدل آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک گروه



شکل ۲- برخورد جت به پرش هیدرولیکی روی شیب معکوس.

Figure 2. Jet collision with hydraulic jump on reverse slope.

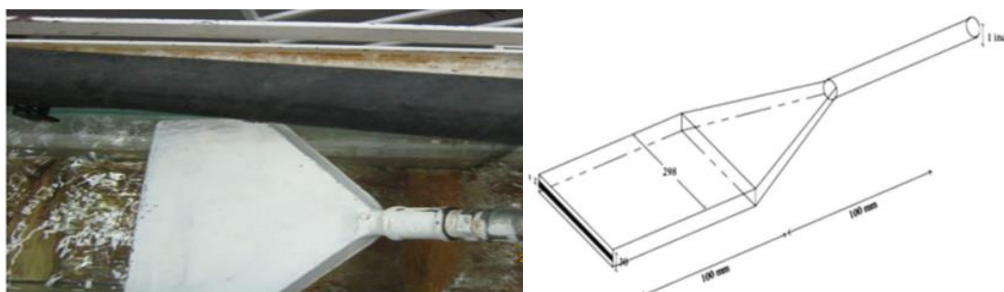
آزمایشگاهی شامل طول پرش (L_j) و عمق پرش (Y) و قرائت متر پارچه‌ای نصب شده روی دیواره کانال، علاوه بر این بهره‌گیری از نرم افزار گرافر ۱۵ که توسط این نرم‌افزار عکس‌های گرفته شده از مقطع طولی کانال شیشه‌ای هنگام عبور جریان را با دو مختصات مرجع جانمایی کرده با رقومی کردن تصویر، مختصات خط پروفیل سطح آب در زاویه حداکثر شکل ۵ و زاویه حداقل شکل ۵ از درون یابی به دست آمد.

در ادامه آزمایش‌ها، ابتدا یک صفحه از جنس آهن گالوانیزه به طول ۲۲۸ سانتی‌متری به عرض ۳۰ سانتی‌متر که با شیب معکوس در دو زاویه ۰/۷۵ و ۲/۲۵ نسبت به کف نصب شد و ابتدا زبری‌های نیم‌استوانه‌ای شکل ۴ از جنس چوب با عرض ۰/۳ متر (هم‌عرض کانال) و دو ارتفاع زبری ($D=2d$ و d) ($K_s=3/5$ و $2/5$) سانتی متر با فواصل در این زبری‌ها در کانال طوری قرار داده شد که قسمت مسطح هم تراز با کف بستر و قسمت نیم دایره روبه بالا و جهت تنظیم و تثبیت موقعیت پرش هیدرولیکی در فاصله ۲۷۲ سانتی‌متری (بیش‌ترین فاصله پرش در این نقطه) از یک دریچه قابل کنترل در پایین دست کانال استفاده شد. سپس جت آزاد با

جریان آب توسط یک الکتروپمپ گریز از مرکز به قدرت ۵/۵ kw و حداکثر پمپاژ ۱۸۶ مترمکعب بر ساعت از مخزن اصلی وارد فلوم می‌گردد جریان از مخزن بالادست به طور ثابت تنظیم و با سه دبی ۲۸، ۲۵، ۲۰ لیتر بر ثانیه جاری گشت. پس از تثبیت پرش در فاصله ۲۷۲ سانتی‌متری مخزن، عدد فرود جریان فوق بحرانی مشخص و پارامترهای هیدرولیکی پرش برداشت می‌شود. سپس جت آزاد با دبی‌های ۲، ۲/۵ و ۳/۲ لیتر بر ثانیه با زاویه حداکثر اثر جابه‌جایی ابتدای پرش و زاویه بدون تغییر ابتدای پرش به انتهای پرش هیدرولیکی وارد می‌شود که قابلیت تولید یک جت صفحه‌ای را دارد. تنظیم زاویه برخورد توسط سیستم مکانیکی ساخته شده که موقعیت قرارگیری نازل را بر روی یک اشل (نقاله) نشان می‌دهد انجام می‌گردد و میزان جابجایی پرش، طول پرش و طول غلطاب توسط یک متر پارچه‌ای نصب شده بر روی دیواره کانال چسبانده شده بود، مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. سپس برای همه حالت‌ها با تغییر دریچه انتهایی و تثبیت ابتدایی پرش در فاصله ۲۷۲ سانتی‌متری مخزن، مشخصات پرش اندازه‌گیری شد برای تعیین مختصات سطح جریان در کانال

شیب معکوس و بدون جت آزاد مورد مقایسه قرار گرفت. شکل ۴ نمایی از زبری‌هایی مورد استفاده در مقطع آزمایشی می‌باشد.

مشخصاتی که در بالا ذکر شده، با دو عدد فرود متفاوت اندازه‌گیری شد. در پایان نتایج حاصل از این آزمایش‌ها را با داده‌های پارامترهای هیدرولیکی بدون



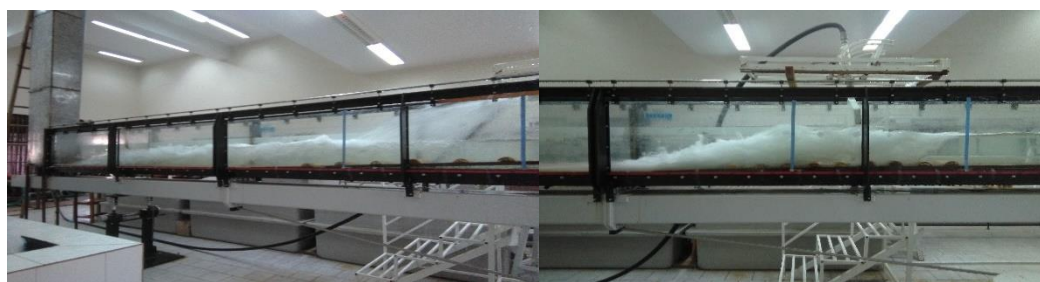
شکل ۳- نمای استفاده شده از جت شکل.

Figure 3. View of the jet used.



شکل ۴- نمای استفاده شده از زبری و شیب معکوس.

Figure 4. View used roughness and inverted slope.



شکل ۵- نمای از زاویه حداقل و حداکثر.

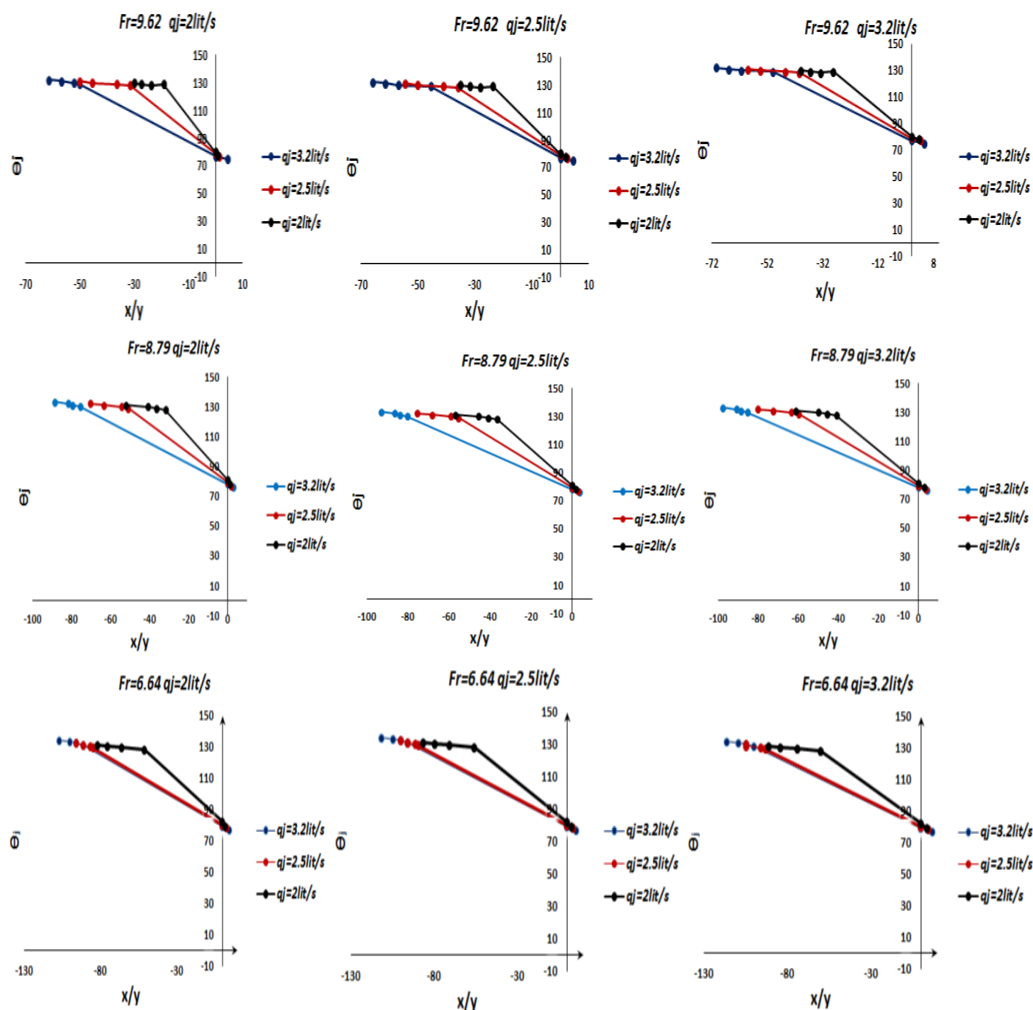
Figure 5. View from the minimum and maximum angle.

فرود متفاوت، متغیر خواهد بود که به توضیح و تحلیل آن پرداخته می‌شود.

تأثیر جت بر تغییر موقعیت پرش هیدرولیکی: شکل ۵ اثر زاویه برخورد جت آبی را بر جابه‌جایی پرش هیدرولیکی در دبی‌های مختلف و محل اثر متفاوت در عدد فرود یکسان نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

از نتایج آزمایش‌های صورت گرفته در برخورد یک جت به پرش هیدرولیکی بر روی زبری‌های نیمه‌استوانه‌ای و شیب معکوس و تأثیر آن بر خصوصیات پرش می‌توان دریافت که میزان جریان و زاویه برخورد جت و محل اثر جت تحت تأثیر اعداد



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

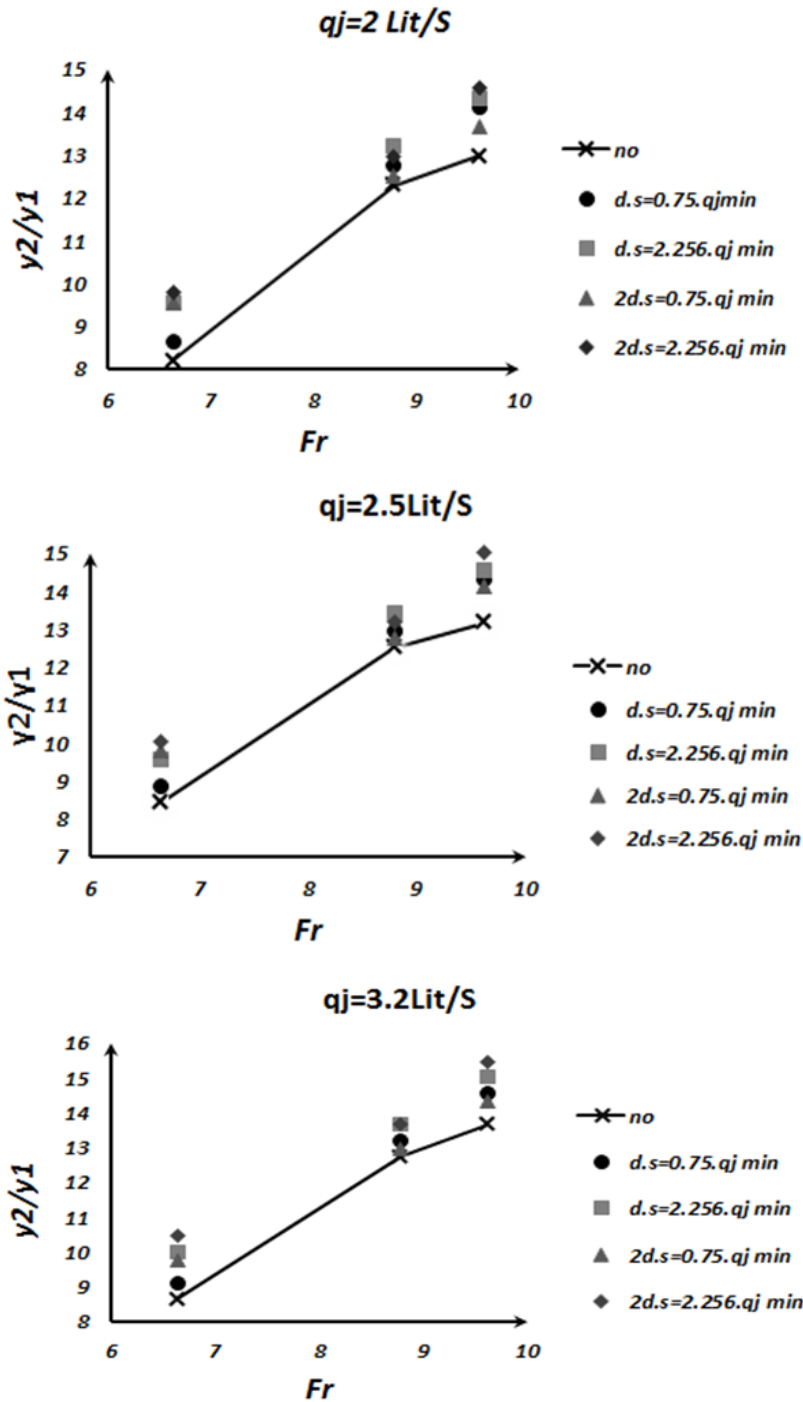
Figure 6. Initial changes of the jump relative to the angle of impact of the jet to the end of the jump.

افزایش می‌یابد و زمانی که جت به انتهای پرش برخورد می‌کند زاویه بی‌اثر کم‌ترین مقدار و زاویه حداکثر بیش‌ترین مقدار خود را خواهد داشت. در نتیجه با افزایش عدد فرود زاویه بی‌اثر افزایش و زاویه حداکثر کاهش می‌یابد. با اعمال جت به پرش هیدرولیکی در هر زاویه‌ای کم‌تر از زاویه بی‌اثر، پرش هیدرولیکی به سمت پایین‌دست و با هر زاویه‌ای بیش‌تر از زاویه بی‌اثر، پرش هیدرولیکی به سمت بالادست جابه‌جا می‌شود. و هرچه دبی جت آبی بیش‌تر باشد به طبع این جابه‌جایی بیش‌تر خواهد شد.

همان‌طور که در شکل‌های فوق مشاهده می‌شود پرش هیدرولیکی در زاویه‌ها یه انتخابی برای جت هیچ‌گونه جابه‌جایی ندارد (نقاط روی محور عمودی) همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود این زاویه به‌عنوان زاویه بی‌اثر نامگذاری شده است با افزایش زاویه جت، پرش به سمت بالادست تغییر مکان می‌دهد و از زاویه‌ای مشخص به بعد پرش هیچ‌گونه حرکتی به سمت بالادست نداشته است که این زاویه به عنوان زاویه حداکثر جابه‌جایی نام گذاری می‌شود. با توجه به شکل‌ها با افزایش دبی جت زاویه بی‌اثر کاهش می‌یابد و زاویه حداکثر با افزایش دبی جت

ثانویه با افزایش زاویه جت در مقابل عدد فرود در (شکل ۷) ترسیم گردید. در این شکل‌ها خط ممتد نشان‌دهنده حالت بدون جت می‌باشد.

نسبت اعماق مزدوج بر پرش هیدرولیکی: باتوجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده بدون جت در این پژوهش، نمودار تغییرات نسبت عمق



شکل ۷- تغییرات نسبت عمق ثانویه با افزایش زاویه برخورد در شیب معکوس با زاویه‌های متفاوت.

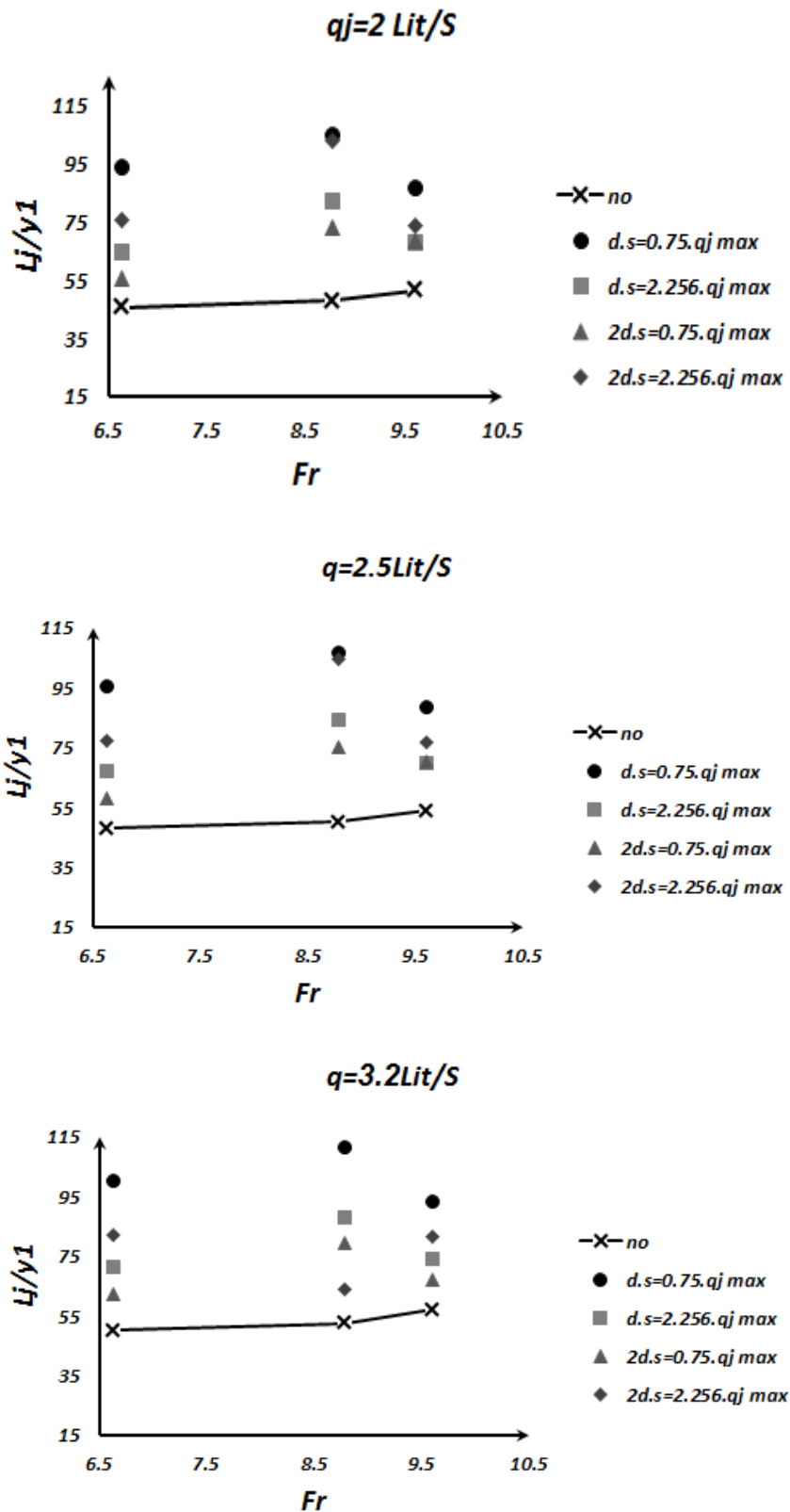
Figure 7. Changes in the ratio of secondary depth with increasing angle of impact in reverse slope with different angles.

و همکاران (۲۰۱۷) "بررسی اثر زاویه برخورد جت به پرش هیدرولیکی روی بستر زبر"، که اثر جت بر تغییر پرش هیدرولیکی در زبری‌های متفاوت (سینوسی و طبیعی) پرداختند، مقدار نسبت عمق ثانویه با افزایش دبی جت در زاویه‌های کم‌تر از زاویه بی‌اثر افزایش و زاویه‌های بیش‌تر از زاویه بی‌اثر کاهش دارد در صورتی که در این پژوهش در تمامی زاویه‌ها نسبت عمق ثانویه با افزایش دبی جت کاهش می‌یابد. با افزایش عدد فرود در هر دو پژوهش نسبت عمق ثانویه افزایش می‌یابد و همچنین در هر دو پژوهش با افزودن زبری در کف کانال میزان نسبت عمق ثانویه کاهش می‌یابد (نسبت عمق ثانویه با اندازه زبری رابطه عکس دارد) (۶).

تغییرات طول نسبی پرش با تغییرات زبری کف در روی شیب افقی در شکل‌های زیر ترسیم شده است. خط ممتد در شکل‌های زیر نشان‌دهنده رابطه تجربی سیلومتر (۱۹۶۴)، (رابطه ۷) زیر برای طول پرش در بسترهای صاف و افقی است.

$$\frac{L_j}{Y_1} = 9.75(Fr_1 - 1)^{1.01} \quad (7)$$

با توجه به شکل‌های فوق زبری کف باعث کاهش ناچیز عمق مزدوج پرش هیدرولیکی می‌شود، به طوری که در حداکثر فاصله زبری و عدد فرود، نسبت عمق مزدوج تا ۸ درصد کاهش می‌یابد. برای بررسی تأثیر شیب معکوس بر نسبت عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در بستر زبر، نسبت $\frac{y_2}{y_1}$ در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه پرش هیدرولیکی در نمودار (شکل ۸) رسم گردیده است. همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود با افزایش شیب معکوس نسبت عمق ثانویه کاهش می‌یابد. از طرفی افزایش ضریب زبری بستر باعث کاهش بیش‌تر این پارامتر می‌شود. به طوری که در حداکثر شیب معکوس و ضریب زبری کف، این نسبت تا حدود ۱۵ درصد کاهش می‌یابد جت در زاویه‌های کم‌تر از زاویه بی‌اثر باعث افزایش نسبت عمق ثانویه و زبری باعث کاهش نسبت عمق ثانویه و ترکیب این دو باعث کاهش نسبت عمق ثانویه و زبری باعث کاهش نسبت عمق ثانویه و ترکیب این دو حالت باعث کاهش نسبت عمق ثانویه گردید که نشان‌دهنده این است که اثری زبری بیش‌تر از اثر جت در حالتی که زاویه بی‌اثر می‌باشد در مقایسه با پژوهش دستورانی



شکل ۸- تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی با افزایش زاویه برخورد جت و افزایش شیب معکوس.

Figure 8. Changes in the relative length of the hydraulic jump with increasing jet strike angle and increasing reverse slope.

با دبی حداکثر، عدد فرود حداکثر و در حالت زبری ۲d و با زاویه ۱۳۸ (زاویه حداکثر) درجه وارد گردد. به میزان ۰/۸۷ است و حداقل مقدار افت نسبی انرژی زمانی است که جت با دبی حداکثر، عدد فرود حداقل و در بستر بدون زبر با زاویه ۷۵ (زاویه کم‌تر از زاویه بی‌اثر) درجه وارد می‌گردد به میزان ۰/۵۶ است.

از دلایل اصلی افزایش و کاهش عمق ثانویه در پرش آبی با اعمال جت در مقایسه با پرش بدون جت، وجود تنش برشی اضافی است که در اثر اعمال جت ایجاد می‌شود.

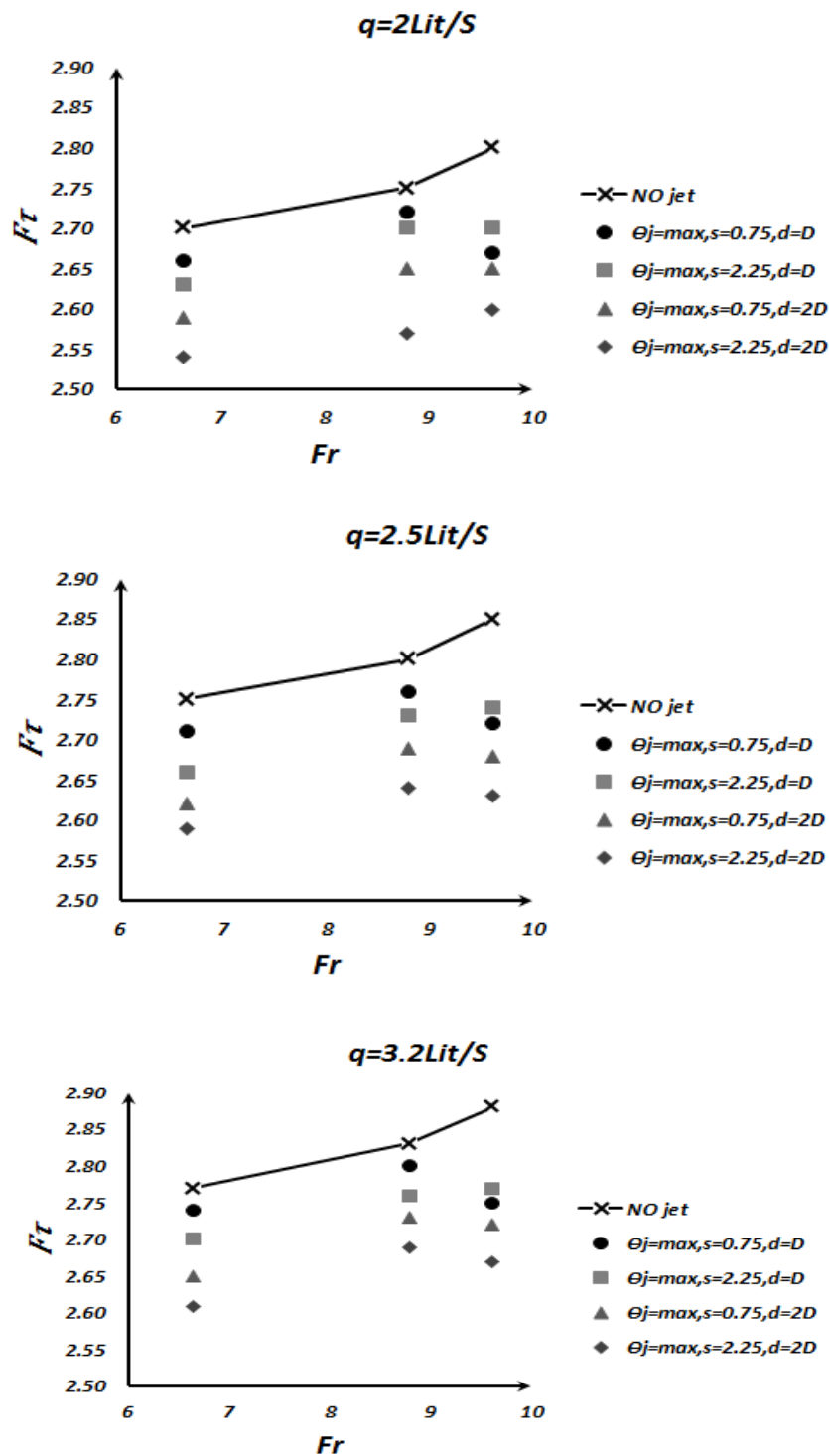
با استفاده از معادله مؤتمم در صورتی که جمع نیروهای برشی بستر بر روی سطح افقی، نیروهای تنش برشی رینولدز و اثر نیروی جت در طول پرش باشد، می‌توان بیان کرد:

$$F_T = (P_1 - P_2) + (M_1 - M_2) \quad (8)$$

در شکل‌های زیر نمودار تغییرات F_T با افزایش زاویه جت در مقابل عدد فرود ترسیم شده است. در این شکل‌ها خط ممتد نشان‌دهنده نیروهای برشی بستر قبل از اعمال جت می‌باشند.

از (شکل ۸) تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی با افزایش شیب معکوس در اثر حضور زبری نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود با افزایش شیب معکوس طول نسبی پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد و زبری بستر میزان این تغییرات را تشدید می‌کند، به طوری که به ازای حداکثر شیب معکوس و حداکثر ضریب زبری، طول نسبی پرش هیدرولیکی تا حدود ۱۸ درصد نسبت به طول پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد. در این نمودار 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. همچنین با افزایش زاویه جت افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد. بیش‌ترین مقدار افت نسبی انرژی زمانی است که جت

که در آن، P و M مقادیر نیروی فشار و مومنتوم و اندیس‌های ۱ و ۲ به ترتیب نشانگر مقاطع قبل و بعد از پرش می‌باشند.



شکل ۹- تغییرات نیروهای تنش برشی بستر با افزایش زاویه برخورد.

Figure 9. Changes in bed shear stress forces with increasing impact angle.

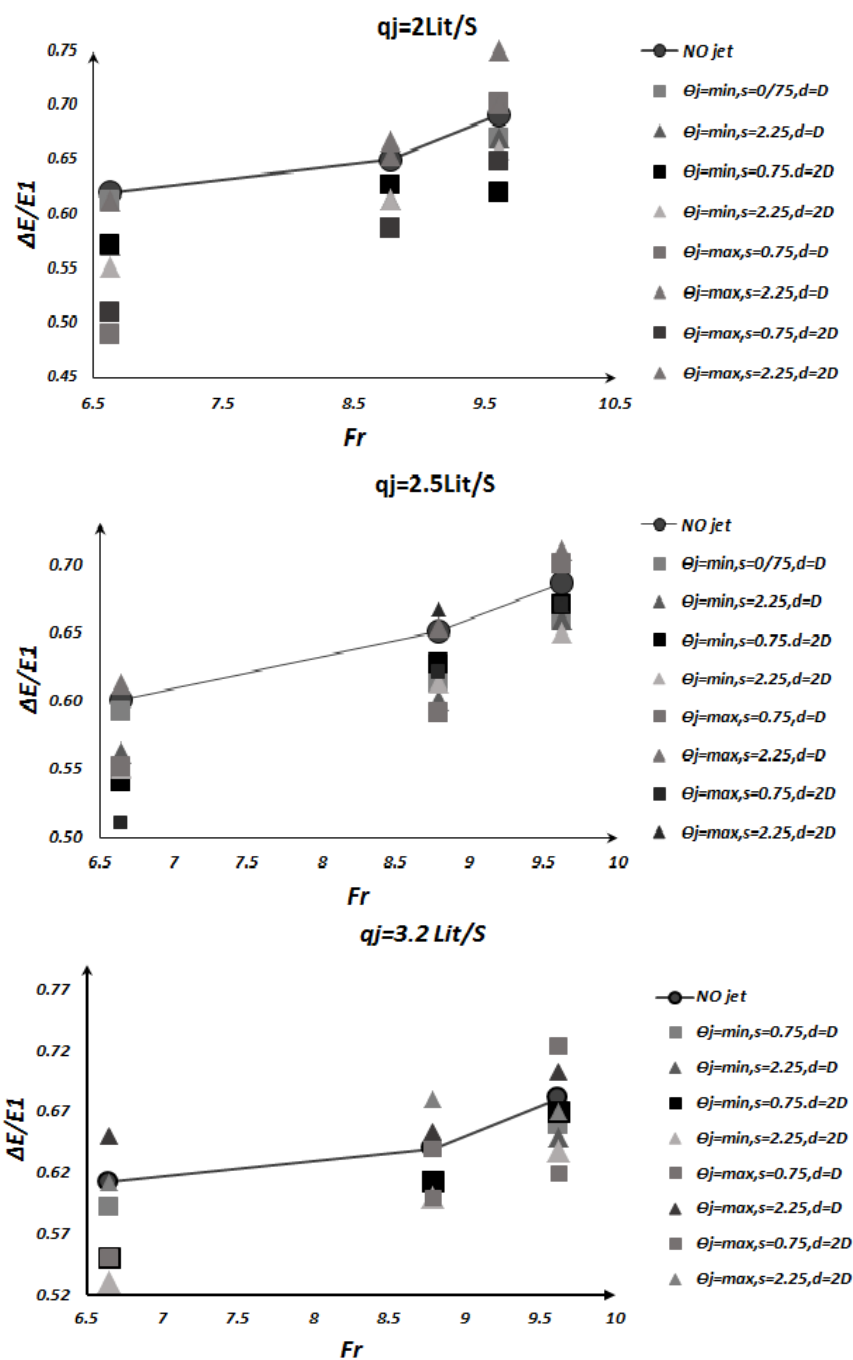
جت برابر می‌شود. بنابراین اگر زاویه جت کم‌تر از زاویه بی‌اثر باشد، به دلیل کاهش نیروهای برشی، پخش به سمت پایین‌دست و در صورتی که زاویه جت

افزایش زاویه جت و افزایش دبی جت باعث افزایش نیروهای برشی می‌شود. اما این نیروها زمانی که جت با زاویه بی‌اثر اعمال می‌شود با حالت بدون

اختلاف انرژی در ابتدا (E_1) و انتهای پرش (E_2) است. در شکل زیر تغییرات افت نسبی انرژی در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه پرش با افزایش زاویه جت و محل اثر متفاوت جت ترسیم شده است.

بیشتر از زاویه بی‌اثر باشد، به دلیل افزایش نیروهای برشی نسبت به حالت بدون جت، پرش به سمت بالادست جابه‌جا می‌شود.

افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی: افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی عبارت‌اند از $\Delta E/E_1$ که



شکل ۱۰- تغییرات افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی.

Figure 10. Changes in the relative drop in mutation energy.

داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

داده‌های این متن مرتبط با پروژه تحقیقاتی با عنوان بررسی اثر جت، زبری نیم استوانه‌ای و شیب معکوس بر پرش هیدرولیکی در دانشگاه بیرجند، دانشکده کشاورزی است. دسترسی به داده‌ها و اطلاعات صرفاً برای داوران، دبیر تخصصی و سردبیر نشریه بنا بر درخواست ایشان میسر خواهد بود.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این متن به شکل ذیل است:

نویسنده اول: مدل‌سازی و شبیه‌سازی محیط آزمایشگاهی، طرح تحقیق و روش‌شناسی، نظارت بر تحقیق، انجام محاسبات داده‌ها
نویسنده دوم: انجام آزمایش‌ها در آزمایشگاه و برداشت داده‌ها، تجزیه و تحلیل و رسم نمودارها، مشارکت در اصلاح مقاله، ویرایش متن مقاله
نویسنده سوم: انجام آزمایش‌ها در آزمایشگاه و برداشت داده‌ها، تجزیه و تحلیل و رسم نمودارها، مشارکت در اصلاح مقاله، تهیه پیش‌نویس مقاله

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها می‌باشد.

حمایت مالی

این پژوهش از حمایت مستقیم مالی برخوردار نبوده است لیکن از آزمایشگاه و امکانات دانشگاه بیرجند، دانشکده کشاورزی استفاده گردیده است. حمایت مالی این پژوهش در قالب پژوهانه پژوهشی نویسنده این مطالعه بوده است.

با توجه به (شکل ۱۰) تغییرات این پارامتر با افزایش شیب معکوس و به ازای زبری مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش شیب معکوس افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی افزایش می‌یابد. به ازای حداکثر شیب و زبری، افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی تا حدود ۲۵ درصد افزایش می‌یابد. در توجیه تغییرات می‌توان گفت که با توجه به این‌که با افزایش شیب معکوس و هم‌چنین افزایش ضریب زبری کف عمق مزدوج پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد. با کاهش عمق مزدوج اختلاف انرژی در مقاطع اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی اولیه یافته و به تبع آن افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری کلی

بیش‌ترین مقدار کاهش نسبت عمق ثانویه نسبت به حالت بدون جت، شیب معکوس و بدون زبری به میزان ۳۹/۲۴ درصد است و کاهش نسبی عمق ثانویه پرش هیدرولیکی (D) در بستر شیب معکوس و زبری نیمه استوانه‌ای حداکثر ۰/۳۷ بیش‌ترین مقدار افت نسبی انرژی در بستر شیب معکوس و زبری نیمه استوانه‌ای به میزان ۳۱/۸ درصد می‌باشد. معکوس و زبری نیمه استوانه‌ای با اعمال جت تا حداکثر مقدار کاهش نسبی طول پرش هیدرولیکی (L) در بستر شیب معکوس و زبری نیمه استوانه‌ای زبر با اعمال جت ۰/۱۹ می‌باشد. بیش‌ترین افزایش نیروهای برشی در بستر شیب معکوس و زبری نیمه استوانه‌ای و اعمال جت حدود ۳۱/۴۴ برابر حالت بدون جت و بدون زبری نیمه استوانه‌ای و شیب (بستر صاف) است. نتیجه کاربردی این پژوهش باعث استهلاک انرژی در پایین دست جریان می‌شود.

منابع

1. Abdollahi Salmabad, Z., Najafi Moud, M.H., Dastourani, D., and Khashei Siouki, A. 2021. Investigation of the Effect of both Jet and Reverse Slope on Hydraulic Jump Characteristics. 15: 2. 368-357.
2. Abrishami, J., and Saneie M. 1994. Hydraulic jump in adverse basin slopes. Iranian Journal of Water Research Engineering. 2: 1. 51-63.
3. Beirami, M.K., and Chamani, M.R. 2010. Hydraulic jumps in sloping channels: roller length and energy loss. Journal of Canadian Civil Engineering. 37: 535-543.
4. Belanger, J.B. 1828. Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes Essay on the numerical solution of some problems relative to steady flow of water Carilian-Goeury, Paris in French.
5. Carrillo, J.M., Castillo, L.G., Marco, F., and García, J.T. 2020. Experimental and numerical analysis of two-phase flows in plunge pools. Journal of Hydraul. Eng. 146, 04020044.
6. Dastorani, M., Ismaili, K., Bahrami, M., and Dindarloo, A. 2017. Investigation of the effect of jet angle on hydraulic jump on rough bed. Journal of Soil and Water Conservation Research, 24: 6. 158-141.
7. Dastorani, M., Ismaili, K., and Theologian, S. 2016. Investigation of the effect of the angle of impact of a rectangular jet on a hydraulic jump. Journal of Soil and Water Conservation Research, 23: 3. 225-239.
8. Eslammanesh, B., Dastourani, M., and Ramezani, Y. 2021. Influence of Jet and Half Cylindrical Roughness on Hydraulic Jump Characteristics. Iranian Journal of Irrigation and Drainage. 15: 4. 842-853.
9. Gualtieri, C. 2010. RANS-based simulation of transverse turbulent mixing in a 2D geometry. Environ. Fluid Mech., 10: 137-156.
10. Khadar, M.H.A., and Rajagopal, S. 1972. Hydraulic jump in adverse channel slopes. Irrig. 29: 77-82.
11. Liu, Z.P., Guo, X.L., Xia, Q.F., Fu, H., Wang, T., and Dong, X.L. 2018. Experimental and numerical investigation of flow in a newly developed vortex drop shaft spillway. Journal of Hydraul. Eng. 1445: 04018014.
12. Nazari Aliabadi, Kh., and Akhtari, A. 2017. The effect of vertical and curved blocks on hydraulic jump characteristics in divergent rectangular sections using FLOW-3D software. Journal of Civil Engineering Modares, 17: 6. 269-280.
13. Rous, H. 1938. Fluid mechanics for hydraulic engineers. McGraw Hill Book Company. New York.
14. Stevens, J.C. 1944. Discussion of the paper by Kindsvater. Hydraulic jump in sloping channel. Journal of Trans. of the American Society of Civil Engineers. 109: 1125-1135.
15. Valero, D., Viti, N., and Gualtieri, C. 2019. Numerical Simulation of Hydraulic Jumps. Part 1: Experimental Data for Modelling Performance Assessment. Journal of Water, 11: 1. 36.
16. Wang, H., and Chanson, H. 2015. Air entrainment and turbulent fluctuations in hydraulic jumps. Urban Water J. 12: 6. 502-518.

