

Effect of jet and triangular roughness on hydraulic jump characteristics

Sh. Joyan¹, M. Dastourani^{2*} and Y. Ramezani³

Extended Abstract

Introduction:

Hydraulic jump is an important phenomenon in free-surface flows that occurs when a supercritical flow transitions to subcritical conditions. This process involves a sudden change in flow velocity, which results in significant energy dissipation through variations in flow intensity, turbulence, and wave formation. The hydraulic jump plays a crucial role in the design and operation of hydraulic structures and channels, as it influences velocity distribution, water depth, and energy levels along the flow, ultimately affecting system stability and performance. The primary objective of this research is to introduce an innovative method for determining conjugate depths and hydraulic jump length. This method employs a rectangular water jet with rapid free characteristics to excite the flow and alter jump properties. By simulating real flow conditions through the application of this jet, the study aims to improve the accuracy of hydraulic jump modeling and provide insights for practical hydraulic design.

Methods:

This experimental study was performed in a rectangular glass-walled channel with dimensions of 10 m length, 0.3 m width, and 0.5 m height. To investigate the effects of jet angle, flow rate, and bed roughness on hydraulic jump characteristics, a total of 63 tests were conducted under varying conditions. Three different fall heights and three jet discharges (2, 2.5, and 3 L/s) were applied in combination with three Froude numbers (6.5, 8.3, and 9.5). Bed roughness was introduced at two different heights (0.03 m and 0.04 m) and at two distances (d and $2d$) to simulate variable surface conditions. The independent variables included jet flow rate, angle, and bed roughness, which were specifically chosen to evaluate their influence on jump features. Two complementary measurement methods were used to capture jump parameters. First, a direct method employed a fabric tape measure fixed along the channel wall to continuously record depth and length of the jump. This provided accurate data on the variation of water depth during the hydraulic jump. Second, an indirect method used high-resolution photography to capture detailed images of flow patterns, which were later processed with Grafar software to extract jump dimensions and analyze flow behavior. These combined approaches enhanced the precision of parameter measurement and ensured reliable evaluation of the effects of experimental variables.

Results:

The experiments revealed that the effect of jet angle on the hydraulic jump varied with flow conditions. At a specific threshold, termed the “ineffective angle,” changes in jet angle had no effect on jump position.

1- Master's student in water structures Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

2,3- Associate professor, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.

* Corresponding Author: mdastourani@birjand.ac.ir

Received: 2024/12/13

Accepted: 2025/02/21

Increasing the angle beyond this point caused upstream movement of the jump, until a maximum displacement angle was reached beyond which no further change occurred. Variations in jet angle and discharge significantly influenced jump length, secondary depth, energy dissipation, and shear stress on the channel bed. For example, at a Froude number of 6.5, a jet angle of 129° , and discharge of 3 L/s over triangular bed roughness, secondary depth increased by 21% compared with the smooth bed case. Similarly, at an angle of 63° with 3 L/s and Froude number 6.5, the secondary depth ratio rose by 20.96%. Conversely, under maximum Froude number and jet angle greater than the ineffective angle (145°), jump length decreased by 30.16%. Energy dissipation was also reduced under certain conditions; at a 60° angle with maximum Froude number and 3 L/s discharge, dissipation decreased by 22.4%. The largest reduction, 25.76%, occurred at 145° with maximum discharge and minimum Froude number on a rough bed. Furthermore, bed shear stress increased under maximum angle conditions, while at angles smaller than the ineffective angle, negative D values indicated higher secondary depths compared to a classic jump. The lowest D value (-21) was observed at 63° , 3 L/s discharge, and minimum Froude number in the smooth bed case. Positive D values at higher angles showed reduced secondary depths compared to classic jumps, with the maximum value (20.9) occurring at 129° and maximum discharge with minimum Froude number on triangular roughness.

Conclusion:

This study demonstrated that the use of a rectangular water jet significantly affects hydraulic jump behavior. When applied at angles greater than the ineffective angle, the jet reduced jump length, energy dissipation, and conjugate depths. Under maximum discharge and high Froude numbers, bed shear stress increased, altering flow velocity distribution and turbulence. These results highlight the importance of controlling jet parameters for effective energy management in hydraulic structures. The findings can be directly applied in the design and optimization of channels, spillways, and flood control systems to improve energy dissipation efficiency and enhance structural safety under intense flow conditions.

Keywords: Hydraulic Jump, Jump Length, Maximum Angle, Triangular Roughness, Water Jet

Citation: Joyan, Sh., Dastourani, M., Ramezani, Y., 2025. Effect of jet and triangular roughness on hydraulic jump characteristics. *Iranian Water Research Journal*. 58(3). pp.1-12. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2025.15048.2651>.



تأثیر جت و زبری مثلثی بر مشخصات پرش هیدرولیکی

شرین ملاجویان^۱، مهدی دستورانی^{۲*} و یوسف رمضانی^۳

چکیده

پرش هیدرولیکی پدیده‌ای است که در جریان‌های سطح آزاد و زمانی که در بالادست جریان فوق‌بحرانی و در پایین‌دست جریان زیربحرانی وجود داشته باشد، رخ می‌دهد. در پژوهش حاضر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی با ترکیب جت مستطیلی و زبری مثلثی شکل بررسی شد. زبری مورد استفاده دارای دو ارتفاع مختلف بود و آزمایش‌ها با سه عدد فرود و سه دبی جت متفاوت انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از جت در زاویه حداکثر و زاویه بی‌اثر منجر به کاهش پارامترهای هیدرولیکی نسبت به حالت بدون جت و زبری گردید در زاویه‌های حداکثر، نیروی برشی بستر افزایش یافت. در یک زاویه مشخص، برخورد جت به پرش هیدرولیکی هیچ‌گونه جابه‌جایی ایجاد نکرد که این زاویه به‌عنوان زاویه بی‌اثر تعریف شد، اما از یک زاویه مشخص به بعد، دیگر تغییری در موقعیت آن مشاهده نشد. این زاویه به‌عنوان زاویه حداکثر جابه‌جایی تعیین گردید. عمق ثانویه، طول پرش، افت نسبی انرژی و اعماق مزدوج، به ترتیب به میزان ۲۱، ۳۰/۱۶، ۲۵/۷۶ درصد نسبت به بستر صاف بدون زبری کاهش و تنش برشی ۱۳/۴ برابر در مقایسه با حالت بدون جت و زبری افزایش یافت. این پژوهش می‌تواند در طراحی سازه‌های هیدرولیکی و بهینه‌سازی کنترل انرژی در کانال‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، جت آبی، زبری مثلثی، زاویه حداقل و حداکثر، طول پرش.

ارجاع: جویان، ش.، دستورانی، م.، و رمضانی، ی.، ۱۴۰۴. تأثیر جت و زبری مثلثی بر مشخصات پرش هیدرولیکی. مجله پژوهش آب ایران، ۵۸ (۳)، صص. ۱-۱۲

<https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15048.2651>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه بیرجند.

۲ و ۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند.

* نویسنده مسئول: mdastourani@birjand.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۳

مقدمه

پرش هیدرولیکی یا پرش آبی، از نوع جریان‌های متغیر سریع است که جریان فوق‌بحرانی را به زیربحرانی تبدیل می‌کند. این پدیده یکی از مهم‌ترین پدیده‌های جریان آب در کانال‌های باز محسوب می‌شود و از ابتدا تا انتهای آن، تلاطم و پیچش شدید سطح آب مشاهده می‌شود. به همین دلیل، پرش هیدرولیکی یا پرش آبی همواره مورد توجه محققان بوده و هدف اصلی مطالعات گذشته و حال، پیش‌بینی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی از جمله طول غلتاب، طول پرش هیدرولیکی، عمق ثانویه مورد نیاز، میزان استهلاک انرژی، توزیع سرعت جریان، نوسانات فشار و پروفیل سطح آب در طول پرش هیدرولیکی است.

Salam-asl et al. (2018) در پژوهشی اثر زبری با اشکال مختلف مثلثی، مکعبی و ترکیبی از مثلثی و مکعبی را در حوضچه آرامش مستطیلی به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که مشخصات پرش هیدرولیکی از جمله عمق مزدوج و طول پرش به دلیل وجود زبری‌های مختلف کاهش می‌یابد. میزان کاهش این پارامتر به طور متوسط ۳۶ الی ۲۳ درصد بود و به عدد فرود و زبری بستگی داشت. Dastourani et al. (2017) در پژوهشی به بررسی تأثیر زاویه برخورد جت بر پرش هیدرولیکی روی بستر زبر پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که برای یک زاویه مشخص جت، در دبی‌های مختلف، پرش هیدرولیکی هیچ‌گونه جابه‌جایی ندارد که این زاویه به عنوان زاویه بی اثر نام‌گذاری شد. با افزایش زاویه جت، پرش هیدرولیکی 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 شد. تغییر زاویه و دبی جت موجب کم‌شدن یا افزایش عمق ثانویه، طول جهش، افت انرژی نسبی و نیروی برشی بستر شد؛ درحالی‌که تغییر زبری کف کانال باعث کاستن مشخصات جهش هیدرولیکی گردید.

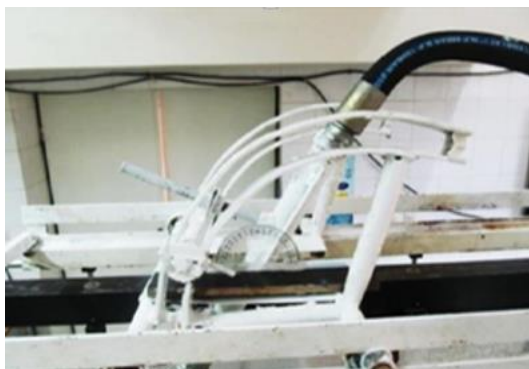
Ghanbari and Sajjad et al. (2017) در پژوهشی به بررسی تأثیر دبی جت مستغرق بر مشخصه‌های پرش هیدرولیکی پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که بیشترین میزان استهلاک انرژی به میزان ۲۰/۴۵ درصد کاهش و به میزان ۱۲ درصد استهلاک انرژی افزایش پیدا کرد. بیشترین کاهش عمق ثانویه پرش مربوط به دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه در شیب فلوم صفر درصد و با نسبت دبی جت به دبی کل ۲۰/۴۵ درصد به میزان ۲۳ درصد بود. بیشترین کاهش طول پرش هیدرولیکی مربوط به دبی ۴ لیتر بر ثانیه و با نسبت دبی جت به دبی کل ۲۰/۴۵

درصد در شیب صفر درصد بوده که طول پرش هیدرولیکی به میزان ۲۸ درصد کاهش یافت. Dastourani et al. (2016) در یک پژوهش آزمایشگاهی به مطالعه اثر زاویه برخورد جت مستطیلی به پرش هیدرولیکی پرداختند. نتایج به دست آمده آزمایش نشان داد که وارد کردن جت به پرش با زاویه‌ای بزرگ‌تر از زاویه بی اثر باعث کاهش نسبت اعماق مزدوج، طول پرش و افزایش افت انرژی و نیروهای برشی کف می‌شود. Ghazali et al. (2012) در یک پژوهش مشخصات پرش هیدرولیکی را روی پنج نوع بستر موج‌دار مثلثی با مقطع مستطیلی در آزمایشگاه بررسی کردند. در تمام آزمایش‌ها تأثیر زبری‌های بستر بر پرش هیدرولیکی در اعداد فرود مختلف با تحلیل پروفیل سرعت و کاهش انرژی بررسی شد. پروفیل سرعت اندازه‌گیری شده در مقاطع مختلف پرش هیدرولیکی نشان داد که این پروفیل‌ها با پروفیل جت آب بر روی بستر صاف متفاوت هستند و ضخامت لایه مرزی بی‌بعد روی بستر موج‌دار برابر ۰/۳۹ به دست آمد که این مقدار در بستر صاف معادل ۰/۱۶ بود.

Tozandehjani and Kashfi Pour et al. (2011) در این پژوهشی با بررسی زاویه برخورد جت‌های آبی و محل تشکیل پرش هیدرولیکی، طول پرش، عمق پایاب مورد نیاز برای تشکیل پرش پایدار و اثرات متقابل جریان ریزشی از روی سرریز و خروجی از شکاف سد، به این نتیجه رسیدند که زاویه ۴۵ درجه بیشترین اتلاف انرژی را ایجاد کرده و در این حالت اعماق مزدوج بیشتر به یکدیگر نزدیک شده و طول پرش هیدرولیکی را بیشتر کاهش داده است. Dastourani et al. (2011) اثر توأم زبری بستر و شیب معکوس کانال‌های مستطیلی را بر مشخصات پرش هیدرولیکی بررسی کردند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش شیب معکوس، نسبت عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد. همچنین، افزایش زبری کف کانال به دلیل ایجاد تنش برشی بیشتر، باعث تشدید تأثیر شیب معکوس بر کاهش طول پرش هیدرولیکی می‌شود. در این تغییرات می‌توان تأثیر مؤلفه رو به پایین نیروی وزن روی شیب معکوس و افزایش تنش برشی روی بستر زبر را عامل اصلی تغییرات دانست. همچنین افت انرژی پرش هیدرولیکی با افزایش شیب معکوس و ارتفاع زبری افزایش می‌یابد.

Dastourani et al. (2021) در پژوهشی اثر جت زبری نیم استوانه و شیب معکوس را بر پرش هیدرولیکی بررسی کردند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد وارد کردن جت به پرش با زاویه‌ای بزرگ‌تر از زاویه بی اثر موجب کاهش حدود ۳۶/۷۲ درصدی نسبت اعماق مزدوج نسبت به حالت بدون جت و بستر صاف گردید. همچنین استفاده از جت با زاویه حداقل و دبی جت

به صورت غیرمستقیم نیز برای استخراج مشخصات پرش هیدرولیکی استفاده شد. داده‌های به دست آمده از این روش با داده‌های اندازه‌گیری شده به صورت مستقیم، مقایسه شدند. در نهایت، از میانگین داده‌های مستقیم و غیرمستقیم برای تحلیل نتایج استفاده شد. این پژوهش به عنوان یک مطالعه نوآورانه در این زمینه محسوب می‌شود. استفاده از ترکیب جت مستطیلی سریع و زبری مثلثی یک روش نوین برای کنترل و بهینه‌سازی پرش هیدرولیکی محسوب می‌شود که می‌تواند به بهبود بهره‌وری سازه‌های هیدرولیکی و کاهش اثرات فرسایشی در کانال‌ها کمک کند.



شکل ۱- نحوه برخورد جت آزاد سریع به پرش هیدرولیکی

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

که در این معادله u_1 و y_1 به ترتیب سرعت و عمق بالادست پرش هیدرولیکی، u_2 و y_2 به ترتیب سرعت و عمق پایین‌دست پرش u_j و y_j به ترتیب سرعت و ضخامت جت، زاویه جت نسبت به افق، q_j مقدار جریان جت و ρ جرم مخصوص آب 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 $q_j = y_j u_j$ است با تقسیم معادله مقدار حرکت به $\rho g y_1^2$ معادله (۲) به دست می‌آید:

$$\frac{y_2^3}{y_1^3} - \frac{y_2}{y_1} \left[2Fr_1^2 \left(1 + \frac{q_j^2 y_1}{q_1^2 y_j} \cos \theta \right) 1 \right]_1 - 2Fr_1^2 \left(1 + \frac{q_j}{q_1} \right)^2 + \frac{2F}{gy_2^2 \rho} + \frac{2F_f}{gy_1^2 \rho} = 0 \quad (2)$$

در معادله ذیل y_1 و y_2 عمق اولیه و ثانویه، g شتاب ثقل، q_1 و q_j به ترتیب مقدار جریان در ابتدایی پرش و مقدار جریان جت، برای $q_j=0$ معادله (۲) به معادله کلاسیک برای یک پرش آزاد تغییر می‌کند. پرش هیدرولیکی باعث تضعیف کردن انرژی (ΔE) می‌گردد. این تضعیف نمودن انرژی قبل و بعد از پرش به صورت زیر بیان شده است.

حداکثر و بیش‌ترین عدد فرود $9/62$ موجب افزایش $10/4$ درصدی نسبت اعماق مزدوج نسبت به حالت بدون جت و بستر صاف شد. (Samadi-Boroujeni et al. (2013 در یک پژوهش تجربی تأثیر شش نوع تخت موجدار مثلثی را در یک فلوم با مقطع مستطیلی و در قالب ۴۲ آزمون بررسی کردند. نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان داد که تأثیر شکل تخت‌های موجدار روی پرش هیدرولیکی تقریباً ناچیز است؛ علاوه بر این، هیچ نوع ورق موجدار خاصی را نمی‌توان انتخاب کرد که به طور هم‌زمان منجر به کاهش عمق آب پایین دست و طول پرش هیدرولیکی شود. این پژوهش با انجام آزمایش‌های گسترده، تأثیر دبی و زاویه جت آبی و همچنین زبری مثلثی کف را روی مشخصات پرش هیدرولیکی بررسی و بهینه‌ترین شرایط را برای کاهش طول پرش و افزایش افت انرژی ارائه می‌دهد.

نوآوری پژوهش

محققان زیادی در مورد پرش هیدرولیکی تحقیق و آزمایش‌های بسیاری انجام داده‌اند، اما در این پژوهش علاوه بر اثر جت، اثر زبری مثلثی نیز بر مشخصات پرش هیدرولیکی به صورت آزمایشگاهی بررسی شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در یک فلوم مستطیلی با دیوارهای شیشه‌ای که امکان رویت جریان آب را فراهم می‌نمود، در یک کانال مستطیلی با طول ۱۰ متر و عرض ۳۰ سانتی‌متر در دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند انجام شد. برای تنظیم و استحکام دادن به موقعیت پرش هیدرولیکی، از یک دریچه قابل کنترل در پایین‌دست کانال استفاده شد. جریان آب از مخزن بالادست، با ثابت نگه‌داشتن دبی‌های ۲۰، ۲۵ و ۲۸ لیتر بر ثانیه جریان یافت. بعد از مشخص نمودن پرش در فاصله ۲۷۲ سانتی‌متری از مخزن، عدد فرود جریان در حالت فوق بحرانی مشخص و پارامترهای هیدرولیکی پرش بررسی شد. سپس، جت آزاد با سه دبی ۲، ۲/۵ و ۳ لیتر بر ثانیه آزمایش شد. در این آزمایش‌ها، جت در زاویه‌های بی‌اثر و حداکثر تنظیم شد؛ به طوری که در تمامی آزمایش‌ها از اولین تا آخرین آزمایش، جت در یک نقطه ثابت وارد شد (شکل ۱). میزان جابجایی پرش و طول پرش، عمق اولیه و ثانویه توسط اشل‌های شفاف مدرج که روی دیواره کانال چسبانده شده بود، اندازه‌گیری شد. برای همه حالت‌ها با تغییر دادن دریچه انتهایی و تثبیت نمودن ابتدای پرش در فاصله ۲۷۲ سانتی‌متری مخزن، پارامترهای پرش اندازه‌گیری شد. برای افزایش دقت اندازه‌گیری‌ها، علاوه بر روش‌های مستقیم، از روش تصویربرداری و نرم‌افزار گراف

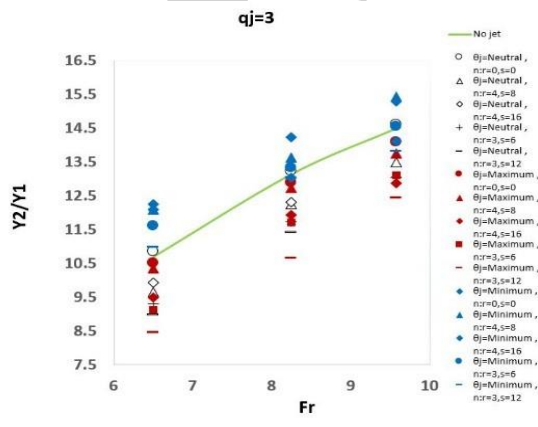
برای تعیین موقعیت سطح جریان آب در یک کانال آزمایشگاهی، که شامل پارامترهایی مانند طول پرش L_f و عمق پرش هیدرولیکی Y است، از دو روش اندازه‌گیری مستقیم و غیرمستقیم جهت تعیین عمق پرش در طول کانال استفاده شد. برای قرائت نمودن عمق آب از متر پارچه‌ای نصب شده بر روی دیواره کانال و برای اندازه‌گیری ارتفاع آب در مخزن از پی‌زومتر استفاده شد. همچنین با استفاده از نرم‌افزار گراف، عکس‌های گرفته شده از مقطع طولی کانال شیشه‌ای در هنگام عبور جریان پردازش و مختصات مرجع تعیین شدند. علاوه بر این با دیجیتالی کردن تصویر، مختصات خط پروفیل سطح آب در زاویه حداکثر و حداقل با استفاده از درون‌یابی به دست آمد. زبری‌های مورد استفاده در آزمایش از جنس چوب ساخته شد



شکل ۳- زبری‌های مثلی استفاده در تحقیق

نتایج و بحث

در شکل ۴، نسبت اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی بر روی زبری‌های مثلی نشان داده شده است. این نسبت تغییرات عمق ثانویه را که تحت تأثیر دو عامل فاصله و ارتفاع زبری و عدد فرود قرار دارد، نمایش می‌دهد. در این شکل، خط ممند نمایانگر وضعیت بدون جت (پرش کلاسیک) می‌باشد.



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

پارامترهای وابسته مؤثر برای تحلیل ابعادی هر جریان کانال روباز باید شامل خصوصیات فیزیکی سیال، مشخصه‌های جریان و مؤلفه‌های هندسی بستر و شرایط مرزی جریان مانند هندسه کانال و شرایط جریان ورودی باشد. براین اساس، تحلیل ابعادی مسأله، به صورت معادله زیر نشان داده شده است:

$$F_1(g, y_1, L_f, h, q, \mu, \rho, L_r) y_2 = 0 \quad (4)$$

که در این معادله L_r طول پرش هیدرولیکی، q دبی در واحد عرض، g شتاب ثقل، μ لزجت دینامیکی، ρ جرم مخصوص و h ارتفاع دندانه زبری است. با استفاده از تحلیل ابعادی (روش باکینگهام) معادله ذیل به دست آمده است.

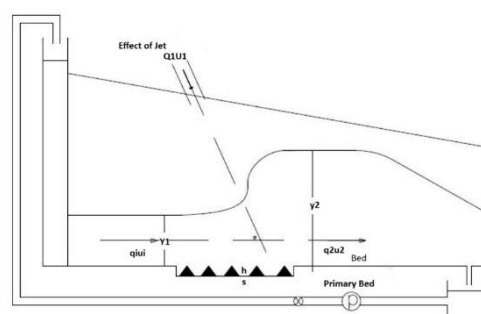
$$\frac{y_1}{y_2} f_2 \left(f r_1 \frac{v_1}{\sqrt{g y_1}}, R e \frac{v_1 y_1}{\nu}, \frac{L_r}{y_1}, \frac{h}{y_1}, \frac{L_f}{y_1} \right) = 0 \quad (5)$$

با توجه به بالا بودن عدد رینولدز Re در آزمایش‌های انجام شده می‌توان از اثر لزجت چشم‌پوشی کرد و معادله را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{y_1}{y_2} f_2 \left(f r_1 \frac{v_1}{\sqrt{g y_1}}, \frac{L_r}{y_1}, \frac{h}{y_1}, \frac{L_f}{y_1} \right) = 0 \quad (6)$$

دیگر ویژگی‌های منحصر به فرد پرش هیدرولیکی از جمله افت انرژی نسبی، طول پرش و تنش برشی نیز تابعی از پارامترهای فوق خواهند بود.

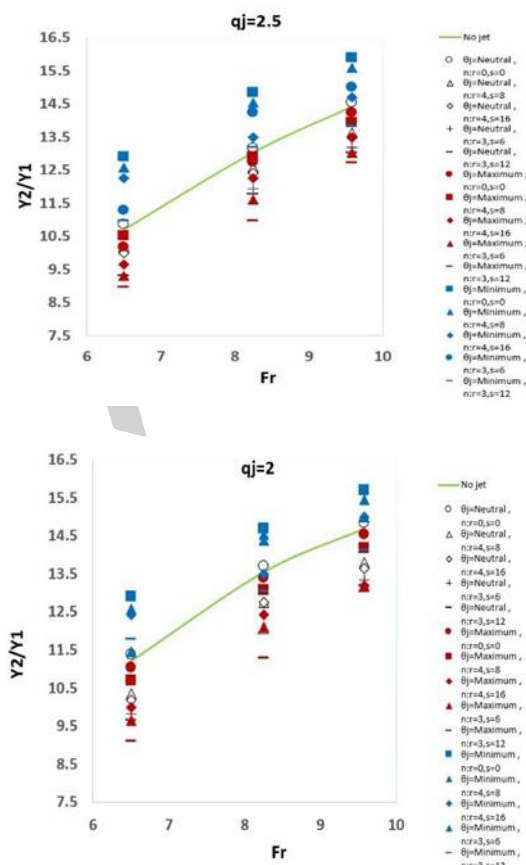
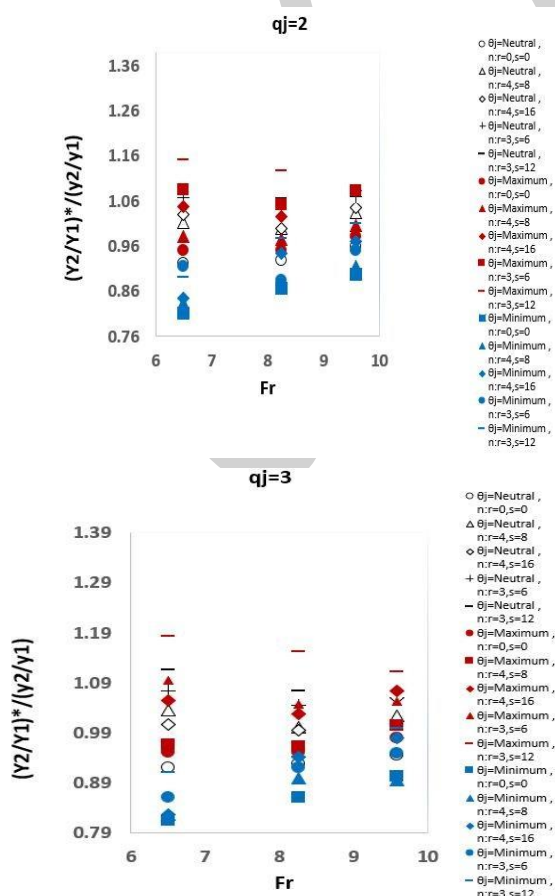
به منظور شرح خصوصیات اثر زاویه برخورد جت بر پرش هیدرولیکی، از یک مدل آزمایشگاهی در کانال با جداره‌های شیشه‌ای به عرض ۳۰ و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر و طول ۱۲ متر استفاده شد. برای تأمین ارتفاع ثابت آب برای ایجاد پرش هیدرولیکی با استفاده از اعداد فرود، از یک دریچه کشویی و یک مخزن در بالادست استفاده شد. این مخزن از جنس ورق گالوانیزه ساخته شده و دارای ابعادی به عرض ۰/۳، طول ۰/۵ و ارتفاع ۲/۸۵ متر بود که در ابتدای کانال نصب گردید. همچنین برای تنظیم عمق پایاب و تثبیت موقعیت پرش، از یک دریچه قابل کنترل در پایین دست کانال استفاده شد. نمایی از فلوم استفاده شده در این تحقیق در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲- نمایی از فلوم مورد استفاده در آزمایشگاه

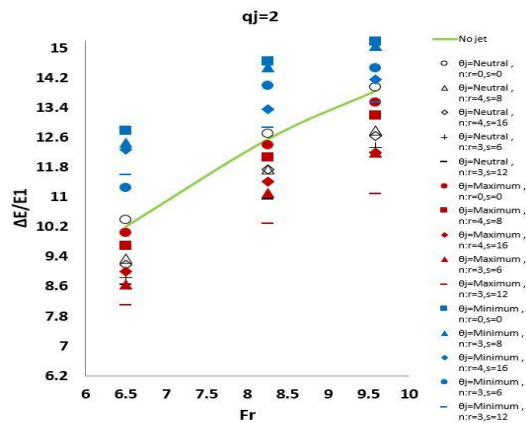
۱۴۵ درجه حداقل عدد فرود، بیشترین مقدار کاهش (۲۰/۹۷ درصد) نسبت به عمق ثانویه در حالت بدون جت و بستر صاف گردید. در صورتی که عدد فرود افزایش یابد و زاویه برخورد جت را حداقل نماییم، عمق ثانویه زیاد می‌شود. با استفاده از جت با زاویه حداکثر (۱۲۹ درجه) و بیشترین عدد فرود، در شرایطی که دبی جریان در حداکثر مقدار خود قرار داشت، عمق مزدوج در بستر صاف کمترین کاهش را به میزان ۲/۷۲ درصد نسبت به حالت بستر صاف و بدون جت نشان داد. به کارگیری جت با دبی حداقل، زاویه برخورد حداقل و کمترین عدد فرود در شرایط بستر صاف، باعث بیشترین افزایش در عمق مزدوج به میزان ۸/۲۴ درصد نسبت به حالت بستر صاف و بدون جت شده است.

علت کاهش و افزایش نسبت اعماق مزدوج را می‌توان به کاهش و افزایش نیروی برشی در اثر جت آبی نسبت داد. برای بهتر نشان دادن تغییرات نسبت اعماق مزدوج در شکل ۵ نسبت به $(y_2/y_1) * (y_2/y_1)$ در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه پرش با دبی‌های متفاوت جت ترسیم شده است، که نسبت اعماق ثانویه $(y_2/y_1) *$ اندازه‌گذاری شده با استفاده از جت آبی و اعماق ثانویه و (y_2/y_1) در بستر صاف بدون جت آبی است. به هر اندازه که دبی جت افزایش یابد، اثر آن در کاهش و افزایش عمق ثانویه بیشتر خواهد بود.

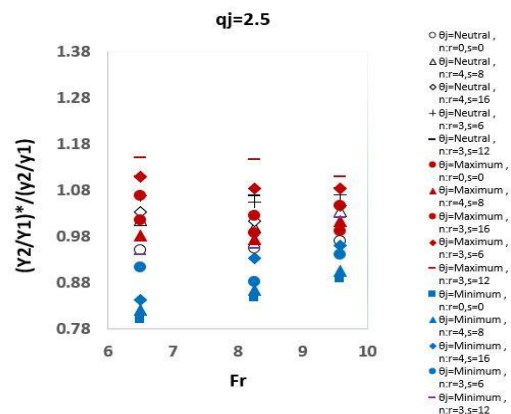


شکل ۴- تغییرات نسبت عمق ثانویه با تغییر زبری کف در حالت برخورد جت به ابتدایی پرش

همان گونه که در نمودارهای شکل ۴ مشاهده می‌شود، با افزایش میزان دبی جت، نسبت عمق ثانویه در پایین دست و بالادست در زاویه‌های بیشتر از زاویه‌های بی‌اثر، کاهش می‌یابد. با افزایش دبی جت، امواج شدیدتری ایجاد می‌شود که می‌تواند به سطح آب برخورد کند. در زاویه‌های کمتر از زاویه بی‌اثر (که زاویه‌ای است که اثر زبری مثلثی بیشترین تأثیر را دارد)، با افزایش دبی جت، عمق ثانویه (عمقی که جت در آب پرتاب شده در آن غوطه می‌زند) نیز افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش دبی جت، جت به عمق‌های بیشتری در آب فشرده می‌شود. اما، در زاویه‌های بیشتر از زاویه بی‌اثر، افزایش دبی جت باعث کاهش عمق ثانویه می‌شود. به عبارت دیگر، جت با افزایش دبی به سمت سطح آب نزدیک‌تر می‌شود. این پدیده نشان می‌دهد که افزایش دبی جت می‌تواند اثرات متفاوتی در زوایا و عمق‌های مختلف داشته باشد، که این امر بر اثر زبری مثلثی و امواج شوک تأثیر می‌گذارد. با افزایش عدد فرود عمق ثانویه افزایش می‌یابد و با اضافه نمودن زبری در کف فلوام در زاویه حداکثر، عمق ثانویه کاهش می‌یابد. استفاده از جت با دبی حداکثر، حداکثر زاویه



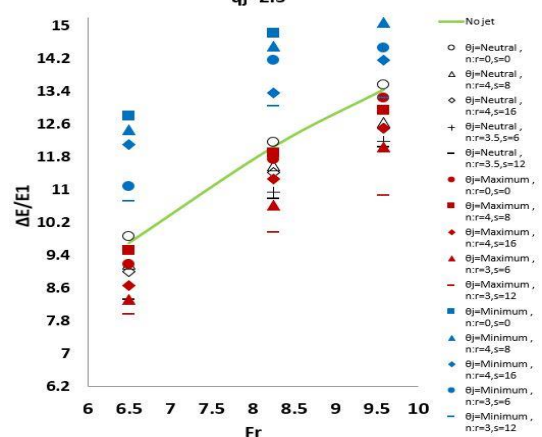
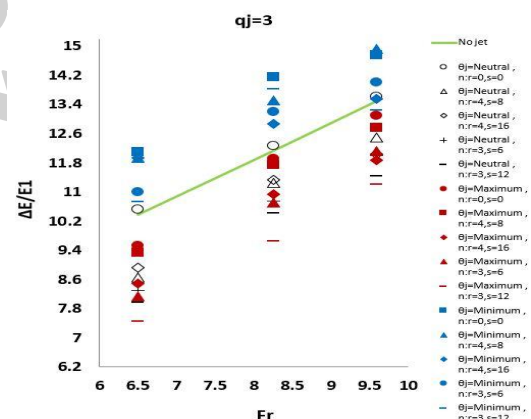
شکل ۶- تغییرات افت انرژی نسبی پرش با تغییر زبری کف در حالت برخورد جت به ابتدای پرش



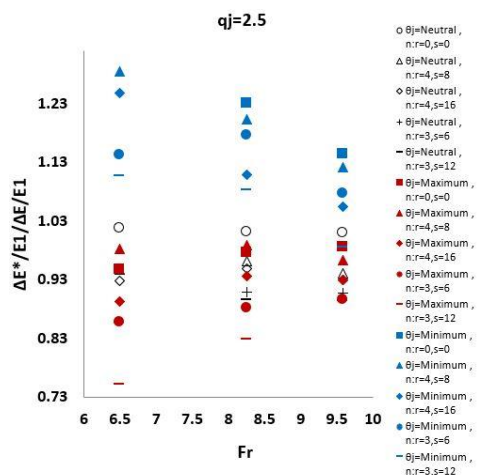
شکل ۵- تغییرات نسبت عمق ثانویه $(Y_2/Y_1) \cdot (Y_2/Y_1)$ با افزایش زاویه جت

افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی

شکل ۶ انرژی پرش هیدرولیکی که عبارت است از $\Delta E/E_1$ که Δ اختلاف انرژی مخصوص، در ابتدای پرش (E_1) و انتهای پرش (E_2) است را در مقابل عدد فرود در مقطع اولیه پرش با زبری و محل اثر جت در ابتدای پرش نشان می‌دهد. در این شکل خط مماس نشان دهنده حالت بدون جت و بدون زبری است.



همان‌گونه که از این نمودارها مشخص است مقدار افت انرژی، در صورتی که جت با زاویه بیشتر از زاویه بی‌اثر وارد شود، بزرگ‌تر از پرش بدون جت است. در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که افت انرژی نسبی با افزایش دبی جت در زاویه کمتر از زاویه بی‌اثر افزایش می‌یابد و در زاویه‌های حداکثر کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه جت افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش افت نسبی انرژی در شرایطی مشاهده شد که دبی جت در حداقل مقدار، عدد فرود در کمترین حالت و زاویه برخورد جت در حداقل زاویه (۶۴ درجه) قرار داشت. در این حالت، افت نسبی انرژی به میزان ۲۰ درصد نسبت به حالت بستر صاف و زبری بدون جت افزایش یافت. همچنین کمترین افزایش افت نسبی انرژی در شرایطی مشاهده شد که دبی جت در حداقل مقدار، عدد فرود در حداکثر حالت و زاویه برخورد جت در حداقل زاویه (۶۰ درجه) قرار داشت. در این حالت، افت نسبی انرژی به میزان ۴/۲ درصد نسبت به حالت بستر صاف و زبری بدون جت افزایش یافت. همچنین، بیشترین مقدار کاهش افت نسبی انرژی نسبت به حالت بدون زبری، در شرایطی مشاهده شد که دبی جت در حداکثر مقدار، عدد فرود در حداقل حالت و زاویه برخورد جت در حداکثر زاویه (۱۴۵ درجه) قرار داشت. در این حالت، کاهش افت نسبی انرژی به میزان ۲۵/۷۶ درصد نسبت به حالت بدون جت و زبری ثبت شد. از سوی دیگر، کمترین کاهش افت نسبی انرژی در شرایطی اتفاق افتاد که دبی جت به میزان ۲/۵ لیتر بر ثانیه، عدد فرود در حالت متوسط و زاویه برخورد جت در حداکثر زاویه یعنی ۱۴۰ درجه قرار داشت. در این حالت، کاهش افت نسبی انرژی تنها به میزان ۰/۹۹ درصد نسبت به حالت بدون جت و زبری مشاهده شد. می‌توان گفت که در تحقیقات انجام شده، با اعمال نمودن جت در زاویه حداکثر، جریان به سمت بالادست جابه‌جا شده و



شکل ۷- تغییرات نسبت $(\Delta E/E_1)^*/(\Delta E/E_1)$ در مقابل عدد فرود در حالت برخورد جت به ابتدای پرش

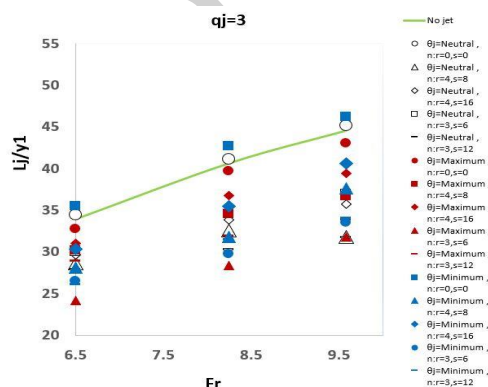
طول نسبی پرش هیدرولیکی

تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی $\frac{L_j}{y_1}$ روی شیب افقی با تغییرات ارتفاع زبری در شکل ۸ نشان داده شده است. در این شکل خط مماس نشان‌دهنده معادله (۸)، معادله تجربی Silvester et al. (1964) برای طول پرش در بسترهای صاف و افقی است. همچنین درصد کاهش طول پرش بین فواصل حداقل و حداکثر (T) را نشان می‌دهد.

$$T = \frac{L_j(s \min) - L_j(s \max)}{L_j(s \min)} 100 \quad (8)$$

در این معادله T اثر فاصله زبری‌ها بر طول پرش هیدرولیکی را نشان می‌دهد، $L_j(s \max)$ طول پرش در بیشترین فاصله و $L_j(s \min)$ طول پرش در کمترین فاصله بین زبری‌ها است از معادله (۹) می‌توان جهت دریافت نمودن طول پرش هیدرولیکی استفاده نمایم.

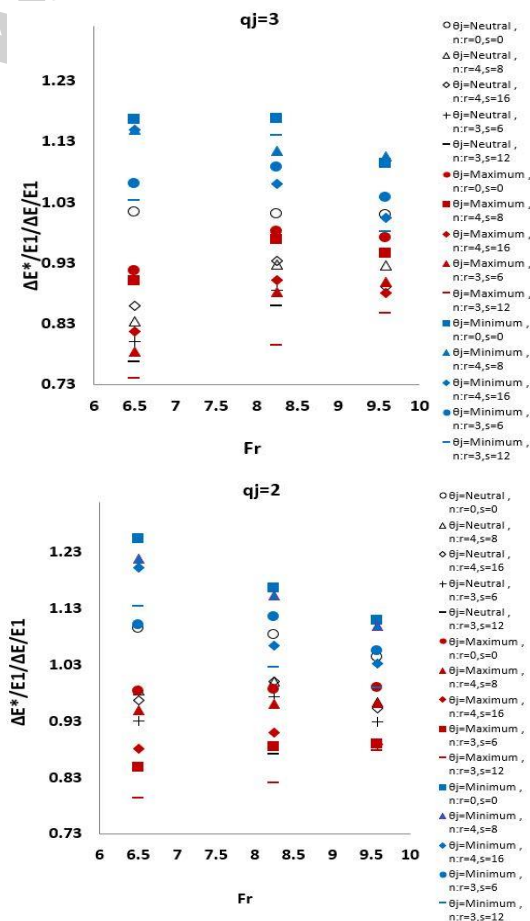
$$\frac{L_j}{y_1} 9.75 (Fr_1)^{1.01} \quad (9)$$



با افزایش دبی جت، عمق ثانویه و پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد. در جریان‌های بحرانی، تأثیر عمق جریان بر انرژی بیشتر از تأثیر سرعت جریان است. بنابراین، با کاهش عمق ثانویه، اختلاف انرژی بین مقاطع اولیه و ثانویه پرش افزایش یافته و در نتیجه افت نسبی انرژی بیشتر می‌شود.

در صد افزایش افت انرژی پرش هیدرولیکی

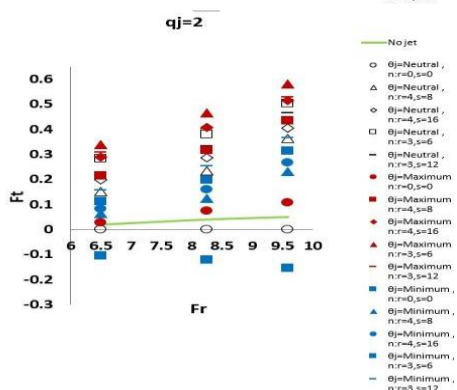
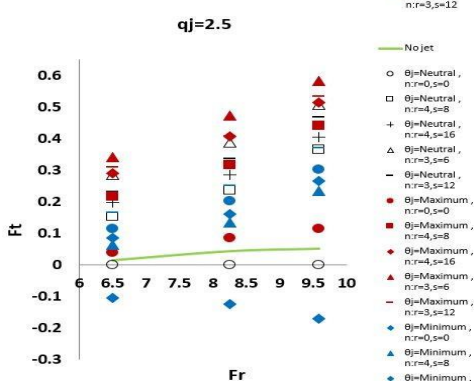
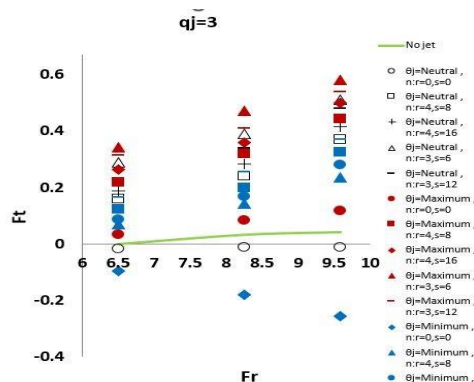
برای بهتر نشان دادن تغییرات افت نسبی پرش در حالت اعمال جت $(\Delta E/E_1)^*$ و افت نسبی پرش هیدرولیکی در حالت بدون جت $(\Delta E/E_1)$ پارامتر افزایش افت نسبی پرش $(\Delta E/E_1)^*/(\Delta E/E_1)$ در مقابل عدد فرود در شکل ۷ ترسیم شده است. مقدار $(\Delta E/E_1)^*/(\Delta E/E_1)$ با افزایش عدد فرود در شرایطی که زاویه‌ها کمتر از زاویه‌های بی‌اثر جت باشند، با افزایش افت انرژی بیشتر می‌شود. در حالی که برای زاویه‌های بزرگتر از زاویه بی‌اثر، افت انرژی نسبی بیشتر می‌شود. همچنین، در زاویه‌هایی که کمتر از زاویه بی‌اثر هستند و در حالتی که بستر کانال صاف باشد، افت انرژی به صورت قابل توجهی وارد جریان می‌شود. افت نسبی انرژی برای زاویه‌های بیشتر از زاویه بی‌اثر کوچک‌تر از یک است که نشان‌دهنده این است که افت نسبی انرژی در زمان اعمال جت کمتر از حالت بدون جت است.



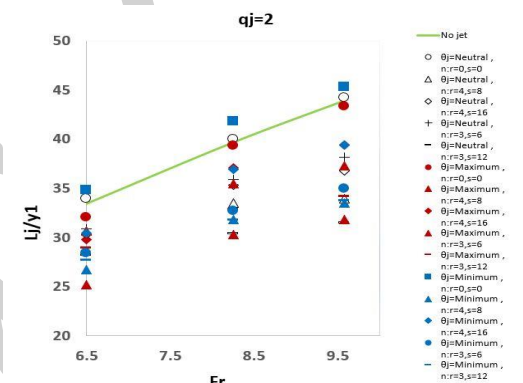
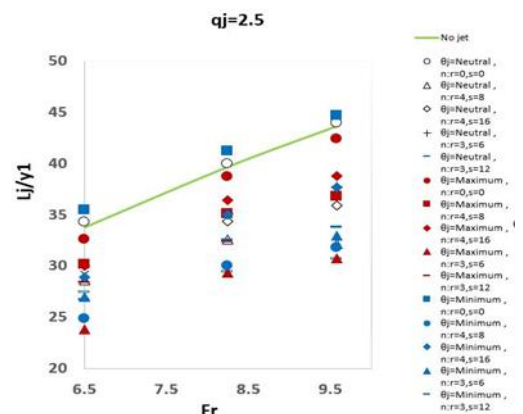
می‌شود. با استفاده از معادله مومنتوم، که ترکیبی از نیروهای برشی بستر و نیروهای تنش برشی رینولدز به همراه اثر نیروی جت در طول پرش است، معادله (۱۰) برای نیروی برشی بستر روی سطح افقی به دست می‌آید.

$$F_{\tau} = (P_1 - P_2) + (M_1 - M_2) \quad (10)$$

که در آن تنش برشی، P و M مقادیر نیروی فشار و مومنتوم و اندیس‌های ۱ و ۲ به ترتیب بیانگر مقاطع قبل و بعد از پرش است. شکل ۹ تغییرات تنش برشی با افزایش زاویه جت در مقابل عدد فرود در زبری مثلی را نشان می‌دهد، خط ممتد نیز بیانگر نیروهای برشی بستر قبل از اعمال جت است.



شکل ۹- تغییرات نیروهای تنش برشی بستر با زبری در حالت برخورد جت به ابتدای پرش



شکل ۸- تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی با تغییر زبری کف در حالت برخورد جت در ابتدای پرش

همانگونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود با افزایش زاویه جت، طول نسبی در حالت زبری کاهش می‌یابد. در زاویه‌های کمتر از زاویه بی اثر در تمام دبی‌های جت و افزایش عدد فرود در حالت زبری، طول نسبی نظر به حالت بدون زبری کاهش می‌یابد. اما در حالت بدون جت و زبری عدد فرود حداکثر، کمترین افزایش طول پرش نسبی به میزان ۶/۸ درصد و بیشترین افزایش نظر به شاهد در حدود ۱۱/۹ درصد با عدد فرود ۸/۲۵ است. در حالت زاویه‌های حداکثر در تمام عدد فرود طول نسبی کاهش می‌یابد. همچنین کمترین کاهش در زاویه بیشتر از زاویه بی اثر با عدد فرود حداکثر، دبی جت حداکثر، زاویه حداکثر (۱۴۰ درجه) به میزان ۱۱/۵۶ درصد و بیشترین کاهش با عدد فرود حداکثر، دبی جت حداکثر و زاویه بزرگتر از زاویه بی اثر (۱۴۵ درجه) در حدود ۳۰/۱۶ درصد در مقایسه با بستر صاف است.

نیروهای تنش برشی

برای دانستن علت اصلی توسعه و افت عمق ثانویه در پرش هیدرولیکی با استفاده نمودن جت در مقایسه با پرش بدون جت، وجود تنش برشی اضافی است که در اثر اعمال جت ایجاد

شکل ۱۰ تغییرات پارامتر D (کاهش عمق) در مقابل عدد فرود را برای زبری مثلثی با زاویه‌های مختلف نشان می‌دهد. مقدار D در زاویه‌های بیشتر از زاویه بی‌اثر مثبت است که نشان‌دهنده این است که عمق ثانویه پرش کمتر از عمق پرش کلاسیک است و حداقل مقدار آن (۰/۲۱) مربوط به زاویه ۱۴۲ درجه و حداقل دبی جت و حداقل عدد فرود در حالت بستر زبر در مقایسه با بستر صاف است. در زاویه‌های کمتر از زاویه‌های بی‌اثر مقدار D منفی و نشان‌دهنده این است که عمق ثانویه پرش در این زاویه‌ها بزرگتر از پرش کلاسیک است. در این حالت حداقل مقدار آن (۰/۲۵)، مربوط به زاویه ۶۰ درجه و حداقل دبی جت و حداقل عدد فرود در حالت بستر زبر در مقایسه با بستر صاف است.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که با استفاده از جت در زاویه حداکثر، جریان به سمت بالادست جابه‌جا شده و با افزایش دبی جت، عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد. در جریان زیر بحرانی سهم عمق جریان در انرژی نسبت به هد سرعت بسیار زیاد است و با کاهش عمق ثانویه تفاوت انرژی مقاطع اولیه و ثانویه پرش افزایش و در نتیجه افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد. علت کاهش و افزایش طول پرش، تغییر عمق ثانویه پرش است. اگر زاویه جت کمتر از زاویه بی‌اثر باشد به دلیل کاهش نیروهای برشی، پرش به سمت پایین‌دست و در صورتی که زاویه جت بیشتر از زاویه بی‌اثر باشد، به دلیل افزایش نیروهای برشی نسبت به حالت بدون جت، پرش به سمت بالادست حرکت می‌نماید. بیشترین مقدار افزایش نیروی تنش برشی به میزان ۰/۵۸ اندازه‌گیری شد که این مقدار ۱۳/۴ برابر بیشتر از حالت بدون زبری و بدون جت است. همچنین بیشترین افزایش طول نسبی در حالت بدون زبری و بدون جت است که طول نسبی به میزان ۳۰/۱۶ درصد افزایش یافته است. بیشترین مقدار افت نسبی انرژی نسبت به حالت بدون جت به میزان ۲۵/۷ درصد کاهش یافته است. همچنین، بیشترین مقدار کاهش (۲۰/۹۷ درصد)، نسبت عمق ثانویه در حالت بدون جت و بستر صاف مشاهده شده است. در حالت بستر زبر، مقدار کاهش عمق ثانویه (D) نسبت به بستر صاف، ۰/۲۳ درصد بوده است.

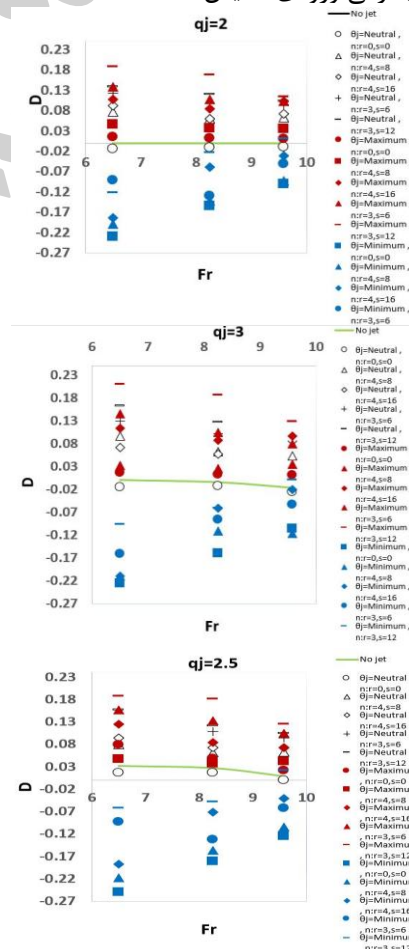
تقدیر و تشکر

نویسندگان از اساتید و همکاران دانشگاه بیرجند که با راهنمایی‌های علمی در بهبود این پژوهش یاری رساندند و از

تنش برشی با افزایش عدد فرود در بستر صاف کاهش می‌یابد، اعمال جت در زاویه‌های کمتر از زاویه بی‌اثر باعث افت نیروی تنش برشی می‌گردد؛ درحالی که بیشترین افت در زاویه ۶۴ درجه و کمترین عدد فرود و بیشترین افزایش در زاویه بزرگتر از زاویه بی‌اثر است. با افزایش دبی جت، افزایش زاویه جت و زبر نمودن بسترنیروهای برشی افزایش می‌یابند. بیشترین میزان افزایش نیروی تنش برشی در شرایطی مشاهده شد که زاویه جت در حداکثر مقدار (۱۴۵ درجه)، عدد فرود در حداکثر حالت و دبی جت در حداکثر مقدار قرار داشت. در این حالت زبری مثلثی بستر به میزان ۰/۵۸ و ۱۳/۴ برابر حالت بدون جت است. این ضریب نیروی برشی در زمانی که جت با زاویه بی‌اثر اعمال می‌شود تقریباً نزدیک به صفر و ثابت است.

کاهش نسبی عمق ثانویه پرش هیدرولیکی

با استفاده از شکل ۱۰ نمودار اختلاف عمق ثانویه با اعمال جت آبی در زبری مثلثی 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 نمایش داده شده است.



شکل ۱۰- تغییرات پارامتر D کاهش عمق در مقابل عدد فرود در حالت بر خورد جت ابتدای پرش برای زبری‌ها

- and Urban Economy Development, shiraz, Iran, pp. 22-23. [In Persian].
6. Ghazali, M., Samadi Boroujeni, H., Ghorbani, B. and Rahmati, A., 2012. Experimental study of velocity file along hydraulic jump over a bed with triangular roughness. *Scientific Research Quarterly of Irrigation and Water Engineering*, 2(8), 108-117. [In Persian].
 7. Salami-Asl, S., Fathi, A. and Ghameshi, M., 2018. The effect of artificial roughness shapes on hydraulic jump characteristics. *Irrigation Science and Engineering*, 41(2), 19-31. [In Persian].
 8. Samadi-Boroujeni, H., Ghazali, M., Gorbani, B. and Nafchi, R. F., 2013. Effect of triangular corrugated beds on the hydraulic jump characteristics. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(9), 841-847. <https://doi.org/10.1139/cjce-2012-0019>
 9. Tozandehjani, M. and Kashfi Pour, S. M., 2011. Experimental study of the effect of bottom outlet discharge of diversion dam on hydraulic jump characteristics. *Water and Soil Science (Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources)*, 16(602), 205-2015
 10. Silvester, R., 1964. Hydraulic Jump in All Shapes or Horizontal Channels. *Proceeding of the American Society of Civil Engineers. J. of Hyd. Div.*, 90, 23-55. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000977>

کارشناسان مجله پژوهشی آب ایران برای همکاری در روند انتشار مقاله قدردانی می‌کنند.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این موضوع مورد تأیید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده‌شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در دسترس خواهد بود.

مشارکت نویسندگان

شریین ملاجویان: جمع‌آوری داده‌ها، انجام آزمایش‌ها، تحلیل اولیه داده‌ها
 مهدی دستورانی: طراحی پژوهش، تحلیل داده‌ها، نگارش و بازبینی مقاله
 یوسف رضمانی: تحلیل آماری، بازبینی متن مقاله

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر رعایت کرده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

منابع

1. Dastourani, M., Roosta, Z. and Abdollahi Salmabad, Z., 2021. Investigation of the effect of jet, semi-cylindrical roughness and reverse slope on hydraulic jump. *Journal of Water and Soil Conservation*, 28(3), 153-171. [10.22069/jwsc.2022.19147.3458](https://doi.org/10.22069/jwsc.2022.19147.3458)
2. Dostourani, M. and Nasrabadi, M., 2011. Effect of bed roughness on hydraulic jump characteristics on an adverse slope. *Journal of Water Research of Iran*, 9, 91-100. [In Persian].
3. Dostourani, M., Esmaili, K. and Khodashenas, S., 2016. Investigation of the effect of rectangular jet impact angle on hydraulic jump. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 23(3), 225-239. [In Persian].
4. Dostourani, M., Esmaili, K., Bahrami, M. and Dindarloo, A., 2017. Investigation of the impact angle of the jet on hydraulic jump over a rough bed. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 24(6), 141-158. [In Persian].
5. Ghanbari, I. and Sajjad, S. M., 2017. Investigating the effect of submerged discharge at the end of the stilling basin on the characteristics of hydraulic jump on sloped surface. In: *Proceedings of the International conference on Civil Engineering, Architecture*