

Research Paper

Laboratory Investigation of Hydraulic Jump in Straight Compound Sections

Mehrzad Barzegar Kaliji¹, Mehdy Meftah Halaghi^{2*}, Esmail Kordi³, Abdolreza Zahiri⁴

¹ PhD Student, Water Science Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, 09106732815, Mehrzadbk70@gmail.com.

² Associate Professor, Water Science Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, 09113759614, Meftahhalaghi@gmail.com.

³ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Mirdamad Institute of Higher Education, Gorgan, Iran, 09117304828, Esmailkordi@gmail.com.

⁴ Associate Professor, Water Science Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, 09166512751, Zahiri.areza@gmail.com.



[10.22125/IWE.2022.343462.1631](https://doi.org/10.22125/IWE.2022.343462.1631)

Received:
July 3, 2022
Accepted:
October 24, 2022
Available online:
May 5, 2024

Keywords:
Compound Channel,
Hydraulic Jump, Initial
Froude Number,
Laboratory Model, Rapidly
Varied Flow, Relative
Width

Abstract

A hydraulic jump is a rapidly varied flow. It represents a transition from a supercritical flow into a subcritical one. Hydraulic jumps are an important water flow phenomenon in open channels with numerous applications. The physical and hydraulic properties of hydraulic jumps in open compound cross-sections cannot be found by classical equations. Due to the limited resources in the field of hydraulic jump in compound sections and also due to the fact that the classical theory of hydraulic jump cannot be generalized to composite sections and its use can cause errors in calculating the jump length, depth of the conjugate and the amount of energy loss. Therefore, the study was implemented on an experimental channel with a length of 10 m, a width of 1 m, and a height of 0.8 m in the Hydraulics Lab at the Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. 6 meters of the total length of the channel has been transformed into a composite channel. The flow depth on both the super- and sub-critical depths of the jump and the along the hydraulic jump were measured using a digital depth meter. Also, a flow meter was used to measure the flow rate, while the flow velocity along the jump was obtained using a pitot tube in the form of a grid with meshes of different sizes (2-5 cm). It was found that hydraulic jumps in the compound channel had different physical characteristics from the classical classifications, and that the classical equations would lead to significant errors. The present study formulated the conjugate depths and hydraulic jump lengths in compound open channels based on the front pattern. Also, the ranges of simple hydraulic cross-sections, hydraulic jump transition area, and hydraulic compound cross-sections were determined by plotting and comparing vertical and horizontal velocity profiles at different longitudinal distances, identifying the length of the hydraulic jump transition area in a compound cross-section. It was found that hydraulic jumps in the compound channel had different physical characteristics from the classical classifications, and that the classical equations would lead to significant errors. Also, the length of the hydraulic jump transition zone in the

* **Corresponding Author:** Name

Address: Department, University, Country,

Email: Academic Email

Tel: Number

composite cross section was extracted, which was found to be 23.2% on average higher than classical estimations. The average conjugate depth ratio in this hydraulic jump was obtained to be 9.6% higher than the classical estimation. In addition to the Froude number, the changes in energy loss also depend on the relative width and depth, which with increasing the relative width of the energy loss approaches the amount of the energy loss in the classical state and increases with increasing relative depth.

1. Introduction

A hydraulic jump is a rapidly varied flow. It represents a transition from a supercritical flow into a subcritical one. Hydraulic jumps are an important water flow phenomenon in open channels with numerous applications. The physical and hydraulic properties of hydraulic jumps in open compound cross-sections cannot be found by classical equations. In theory, an open composite section consists of a main channel that passes the base flow and one or two plain floods that pass part of the flow rate under overflow conditions. Due to the limited resources in the field of hydraulic jump in compound sections and also due to the fact that the classical theory of hydraulic jump cannot be generalized to composite sections and its use can cause errors in calculating the jump length, depth of the conjugate and the amount of energy loss. The study of hydraulic jump in an open rectangular compound channel is research that helps to increase the theoretical knowledge in the field of understanding the characteristics of different types of hydraulic jumps. In addition, the production of experimental data in this study can be used by other researchers to evaluate and determine the accuracy of numerical and analytical models. The present study experimentally induces a steady-state, symmetric hydraulic jump in a compound open channel in order to quantify its physical properties, including the jump length, conjugate depths, and velocity distribution.

2. Materials and Methods

The study was implemented on an experimental channel with a length of 10 m, a width of 1 m, and a height of 0.8 m in the Hydraulics Lab at the Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. 6 meters of the total length of the channel has been transformed into a composite channel. Also, the main cross-section and floodplains had adjustable depths and widths. Glass was used to convert the rectangular section of the laboratory channel into a rectangular composite section with two symmetrical floodplains. The flow depth on both the super- and sub-critical depths of the jump and the along the hydraulic jump were measured using a digital depth meter. Also, a flow meter was used to measure the flow rate, while the flow velocity along the jump was obtained using a pitot tube in the form of a grid with meshes of different sizes (2-5 cm). Furthermore, the hydraulic jump length was calculated through the vertical velocity profile and shear layer development. The present study examined the effects of the relative width (ratio of the width of the main channel to the total width of the channel) $B_r = \frac{b}{B}$ and initial Froude number. Three relative widths (i.e., 0.2, 0.3, and 0.4) and three initial Froude numbers ($Fr > 2$ and $4 < Fr < 7$) were studied in a total of nine tests. In each test, the initial Froude number was set to induce a hydraulic jump by changing the opening of the upstream opening height at a given flow rate.

3. Results

It was found that hydraulic jumps in the compound channel had different physical characteristics from the classical classifications, and that the classical equations would lead to significant errors. The present study formulated the conjugate depths and hydraulic jump lengths in compound open channels based on the front pattern. Also, the ranges of simple hydraulic cross-sections, hydraulic jump transition area, and hydraulic compound cross-sections were determined by plotting and comparing vertical and horizontal velocity profiles at different longitudinal distances, identifying the length of the hydraulic jump transition area in a compound cross-section.

4. Discussion and Conclusion

The present work experimentally induced hydraulic jumps in compound open channels and quantified the physical properties of hydraulic jumps (e.g., conjugate depths and hydraulic jump length) by point

velocity, flow rate, and flow velocity measurements. Longitudinal and transverse profiles of velocity in the longitudinal direction determined the hydraulic jump transition areas and the composite cross section, and finally the length of the hydraulic jump transition zone in the composite cross section was extracted, which was found to be 23.2% on average higher than classical estimations. The average conjugate depth ratio in this hydraulic jump was obtained to be 9.6% higher than the classical estimation. In addition to the Froude number, the changes in energy loss also depend on the relative width and depth, which with increasing the relative width of the energy loss approaches the amount of the energy loss in the classical state and increases with increasing relative depth.

5. Six important references

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to



بررسی آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی در مقاطع مرکب مستقیم

مهرداد برزگر کلیجی^۱، مهدی مفتاح هلقی^۲، اسماعیل کردی^۳، عبدالرضا ظهیری^۴

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۲

مقاله پژوهشی

چکیده

پرش هیدرولیکی از نوع جریانهای متغیر سریع است که به تغییر رژیم جریان از فوقبحرانی به زیربحرانی اطلاق میشود. مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی پرشهای هیدرولیکی در یک مقطع مرکب روباز را که هم شامل مقطع اصلی و هم شامل دو سیلابدشت است را نمیتوان با استفاده از روابط کلاسیک تعیین نمود. این تحقیق آزمایشگاهی با بوجود آوردن یک پرش پایدار و متقارن با هدف به کمیت درآوردن مشخصات فیزیکی پرش هیدرولیکی رخ داده در یک مقطع مرکب، مورد بررسی قرار گرفت. آزمایشها در یک کانال آزمایشگاهی به طول ۱۰ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۰/۸ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان صورت گرفت که ۶ متر از طول کل کانال بصورت کانال مرکب تغییر شکل داده شده است. در این پژوهش دو عامل از عوامل مهم تاثیرگذار یعنی عرض نسبی (نسبت عرض مقطع اصلی به عرض کل کانال) $(B_r = \frac{b}{B})$ و عدد فرود اولیه جریان مورد مطالعه قرار گرفت. جهت بررسی تاثیرگذاری عرض نسبی از ۳ عرض نسبی متفاوت (۰/۲، ۰/۳، ۰/۴) و جهت بررسی تاثیرگذاری عدد فرود اولیه جریان از ۳ عدد فرود اولیه متفاوت (اعداد فرود بیش از ۲ و بین ۴ تا ۷) بصورت همزمان استفاده شد. نیمرخهای طولی و عرضی سرعت در جهت طولی، نواحی گذار پرش هیدرولیکی و مقطع مرکب را مشخص نموده و نهایتاً طول ناحیه گذار پرش هیدرولیکی در مقطع مرکب استخراج شد که بطور متوسط ۲۳/۲ درصد بیشتر از پیشبینی روش کلاسیک بوده است. نسبت اعماق مزدوج نیز در این پرش هیدرولیکی بطور متوسط ۹/۶ درصد بیشتر از پیشبینی کلاسیک بوده است. تغییرات افت انرژی علاوه بر عدد فرود به عرض و عمق نسبی نیز وابسته است که با افزایش عرض نسبی افت انرژی به مقدار افت در حالت کلاسیک نزدیک می شود و با افزایش عمق نسبی مقدار افت افزایش می یابد.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، جریان متغیر سریع، عدد فرود اولیه، عرض نسبی، کانال مرکب، مدل آزمایشگاهی.

^۱ دانشجوی دکتری سازه های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، Mehrzadbk70@gmail.com.

^۲ * دانشجویان گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، Meftahhalaghi@gmail.com (نویسنده مسئول).

^۳ استادیار گروه عمران، موسسه آموزش عالی میرداماد گرگان، گرگان، ایران، Esmailkordi@gmail.com.

^۴ دانشجویان گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، Zahiri.areza@gmail.com.



مقدمه

تغییر رژیم فرودی جریان به عنوان یک پدیده مرسوم در مجاری روباز قابل مشاهده است. پرش یا جهش هیدرولیکی، از نوع جریانهای متغیر سریع است که به تغییر حالت جریان از فوقبحرانی به زیربحرانی اطلاق میشود. این پدیده که یکی از پدیدههای مهم جریان آب در کانالهای باز بوده و از ابتدا تا انتهای آن تلاطم و پیچش سطحی آب وجود دارد، به پرش هیدرولیکی یا پرش آبی مرسوم است (۲۱). نتیجه فرآیند پرش یا جهش هیدرولیکی، ایجاد افت انرژی و کاهش قابل ملاحظه در سرعت جریان است (۱۱). از جمله کاربردهای پرش هیدرولیکی در کانالهای باز میتوان به محافظت از قسمتهای پاییندست به وسیله کاهش انرژی مخرب آب در جریان از روی سازههای هیدرولیکی، اقتصادیتر کردن سازهها با کنترل موقعیت پرش و مشخصات آن، بالا آوردن تراز سطح آب به منظور آبیگری از کانال، کاهش فشار بالابرنده زیر سازهها با استفاده از افزایش عمق آب پیشانی سازه اشاره کرد. همچنین مشخص کردن یک رژیم خاص برای اندازهگیری جریان، افزایش غلظت هوای موجود در آب به منظور افزایش اکسیژن در تصفیه آب و در حوضچههای ماهی و کلرزدائی فاضلاب، مخلوط نمودن مواد شیمیایی جهت تصفیه آب با فاضلاب و نیز جهت مصارف کشاورزی و افزایش دبی خروجی از زیر دریچهها با دور نگه داشتن سطح پایاب نیز از جمله کاربردهای دیگر پرش هیدرولیکی در کانالهای باز میباشد (۱۰، ۱۹، ۲۱ و ۲۴). مطالعات زیادی در زمینه خصوصیات پرش هیدرولیکی در کانالهای ساده توسط محققین مختلف انجام شده و روابط متعددی برای تعیین مشخصات هیدرولیکی این پدیده ارائه شده است. این در حالی است که در مقاطع مرکب، مطالعات چندانی در این خصوص وجود ندارد.

مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی پرشهای هیدرولیکی در یک مقطع مرکب را نمیتوان با استفاده از روابط کلاسیک تعیین نمود. بنابراین جهت تعیین این مشخصات، ابتدا باید خصوصیات یک مقطع مرکب را ذکر نمود. مقطع مرکب ترکیبی از یک مقطع اصلی و دشتهای سیلابی است که

شرایط هندسی و هیدرولیکی آنها میتواند تفاوت قابل ملاحظه‌ای با هم داشته باشند. سرعت جریان در مقطع اصلی نسبت به دشتهای سیلابی غالباً بیشتر بوده و باعث ایجاد تنش برشی در مرز اتصال این مقاطع و نیز انتقال مومنتوم میشود (۱۴). در روشهای متداول، از این تنش برشی صرفنظر میشود اما تحقیقات نشان میدهد که نادیده گرفتن این تنش منجر به خطای قابل توجهی در تحلیل هیدرولیکی چنین مقطعی میشود (۷).

کلاسهبندی پرش هیدرولیکی که بر مبنای محدوددهای عدد فرود صورت میگیرد و روابط موجود برای هر یک از کلاسهها (عمدتاً بر اساس عدد فرود بیان شدهاند) برای یک مقطع مرکب روباز قابل تعمیم نیستند (۱۴ و ۱۷). مشخصات فیزیکی پرش هیدرولیکی در مقطع مرکب در مقایسه با حالت کلاسیک متفاوت خواهد بود چراکه جریانهای ثانویه بر آن تاثیرگذار خواهند بود. در این تحقیق نویسندگان تلاش دارند پس از بوجود آوردن یک پرش پایدار و متقارن، مشخصات فیزیکی آن نظیر اعماق و طول پرش را به کمیت درآورند.

در مقاطع مرکب ضریب زبری دشت سیلابی با ضریب زبری مقطع اصلی متفاوت بوده و این امر باعث ایجاد اختلاف شدید سرعت در صفحه مشترک بین مقطع اصلی و دشت سیلابی و در نتیجه آن ایجاد تنش برشی و انتقال مومنتوم میشود. پدیده انتقال مومنتوم بین دو بخش عمیق و کمعمق جریان در مقاطع مرکب باعث بروز پیچیدگیهای بسیاری در مطالعه این مقاطع میشود و مشخصه‌های جریان از جمله توزیع سرعت و دبی عبوری را تحت تاثیر خود قرار میدهد. در اثر این انتقال مومنتوم، در انرژی جریان و به خصوص در مقطع اصلی افت قابل ملاحظه‌ای صورت گرفته و شرایط هیدرولیکی جریان تغییر خواهد نمود. این پدیده را اثر متقابل گویند. اثر متقابل در حالتی که عمق آب در دشت سیلابی کم و ضریب زبری آن زیاد باشد، حداکثر میزان خود را دارا است (۱۴).

از جمله کاربردهای عمده مقاطع مرکب میتوان به کاربرد وسیع در بهبود عملکرد زهکشی و اکولوژیکی کانالهای زهکشی، افزایش پایداری کانال در دبیهای بالا با

جدول (۱) مقاطع مرکب را به لحاظ هندسی میتوان به ۴ دسته تقسیم نمود.

کاهش پتانسیل فرسایشی، توانایی انتقال رسوب به طور موثرتر (۱۰)، حفاظت در برابر سیلگیری (۲۵) و کاهش (جریان) سیلاب بعنوان یک راهکار زیست محیطی (۱۵). این نوع طراحی کانال، از طریق افزایش سرعت در دبیهای پایین (اعماق کمتر از تراز لبریز) رسوبگذاری را کاهش داده و به جهت کاهش سرعت متوسط در دبیهای بالا (اعماق بیشتر از تراز لبریز) فرسایش را کاهش میدهد. مطابق

جدول (۱): مشخصات انواع مقاطع مرکب (۱۴)

کانال آزمایشگاهی Laboratory channel	شبه رودخانه Pseudo-river	رودخانه طبیعی Natural river	ساحلی Coastal	نوع مقطع Type of section	مشخصه Characteristic
۰/۰۲-۰/۱۵	۱-۵	۱-۱۰	۱-۲۰		H(m)
۲-۱۰	۵-۲۰	۵-۲۰	۵-۵۰		b/2H
۱-۱۰	۱/۵-۵	۵-۲۰	۲-۱۰		B/b

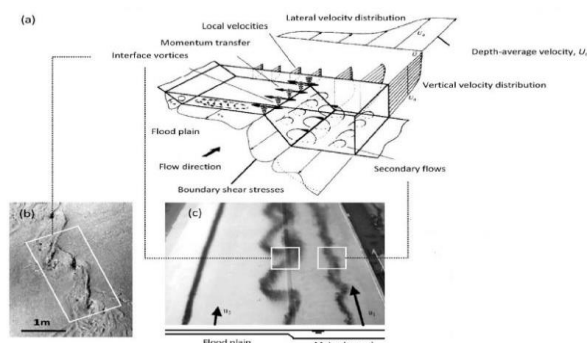
* در جدول فوق H، B و b به ترتیب عمق مقطع اصلی، عرض دشت سیلابی و عرض مقطع اصلی است (شکل ۲).

(*) .

عامل اصلی در بروز پدیده انتقال مومنتوم از مقطع اصلی به دشت سیلابی میباشند. در حالیکه مکانیسم جریانهای ثانویه حلزونی در مقطع اصلی و بر دیوارهای جانبی آن شکل میگیرد (شکل (۱)). این دورانه‌های طولی در تمامی جریانهای آشفته دیده میشود که میتواند باعث اختلال در توزیع تنش برشی بستر و نیز الگوی نقاط همسرعت شود (۱۳ و ۲۰).

جریانهای ثانویه حلزونی در کف مقطع اصلی و بر جدارها در جهت عقربه‌های ساعت است. این در حالی است که جهت حرکت این جریانها در گوشه‌های مقطع اصلی دارای شدت بیشتر و در خلاف جهت عقربه‌های ساعت میباشد. جریانهای چرخشی منفردی نیز در گوشه‌های دشت سیلابی وجود دارد. این جریانها و جریان ثانویه حلزونی در کف مقطع اصلی به دلیل انرژی کم قادر به توسعه تا سطح آزاد آب نیستند.

به دلیل انتقال مومنتوم بین مقاطع جزئی، بررسی هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب در مقایسه با مقاطع ساده پیچیدهتر است زیرا مشخصه‌های جریان از جمله توزیع سرعت و دبی عبوری را تحت تاثیر خود قرار میدهد. به لحاظ فیزیکی انتقال مومنتوم بین بخشهای مختلف جریان به شکل گردابه و جریانهای چرخشی ظاهر میگردد (شکل (۱)). مطابق شکل (۱) اختلاف زیاد سرعت و تنش برشی بستر بین مقاطع جزئی باعث ایجاد دو مکانیسم متفاوت چرخشهای میانی و جریانهای ثانویه حلزونی میگردد که شدت و ضعف آنها وابسته به شکل هندسی مقطع و عمق نسبی جریان عبوری است. مکانیسم چرخشهای میانی بصورت منفرد، متحدالمرکز و عمود بر کف بستر تشکیل شده و تا سطح آزاد آب توسعه مییابند. این چرخشها به فاصله تقریباً برابر در طول فصل مشترک مقطع اصلی و دشت سیلابی تشکیل شدهاند. این چرخشها



شکل (۱): (a) وضعیت گردابه‌های فوق‌الذکر در یک مقطع مرکب (۲۳، b) جریانهای چرخشی در حد فاصل مقطع اصلی و دشت سیلابی (۱۵، c)، اختلاط جریان در فصل مشترک بین مقطع اصلی و دشت سیلابی ناشی از انتقال مومنوم و جریانهای ثانویه حلزونی (۱۵)

بررسی تغییرات محتمل مشخصه‌های جریان گذار از فوق به زیر بحرانی در این نوع از کانالها احساس میشود. پژوهش بنعبدالسلام و همکاران (۲۰۱۷) از محدود مطالعات آزمایشگاهی است که در کانالی با مقطع مرکب مستطیلی مستقیم به طول ۴ متر با مقطع اصلی به عمق ۰/۱۵ متر و عرض ۰/۱ متر با دو دشت سیلابی به عمق ۰/۵ متر انجام شد. تغییرات دبی بین ۹/۹ و ۱۹ لیتر بر ثانیه و آزمایشها در نسبت عرض مقطع اصلی به عرض کلکانال (عرض نسبی) به ترتیب ۰/۲۵، ۰/۳۳، ۰/۵ انجام شد. برای هر عرض نسبی، ۵ عمق جریان اولیه (۲/۵، ۳، ۳/۸، ۴/۳ و ۵ سانتیمتر) در نظر گرفته شده است. ایشان روابطی برای تخمین افت انرژی نسبی ارائه دادند (۳). این پژوهش دارای محدودیتهایی از جمله عدم دخالت جریان ثانویه، تعداد بسیار محدود آزمایشها و عدم اندازه‌گیری سرعت جریان در طول پرش هیدرولیکی بود.

بنعبدالسلام و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از شبکه عصبی رگرسیونی مشخصه‌های اساسی اعماق مزدوج، افت انرژی و طول نسبی پرش هیدرولیکی در مقطع مستطیلی مرکب روباز را مدل کردند. محدوده آزمایشات آنها عبارتند از: عرض نسبی (۰/۲۵، ۰/۳۳ و ۰/۵)، عمق اولیه (۰/۱۶۷، ۰/۲، ۰/۲۵۳، ۰/۲۸۷، ۰/۳۳۳) و اعداد فرود $4.28 \leq Fr \leq 10.02$. ایشان نشان دادند که مدل شبکه عصبی میتواند اعماق نسبی و افت انرژی را با دقت بالا پیش بینی کند چرا که این پارامترها از قوانین مرتبط با رابطه مومنوم و انرژی پیروی میکنند. ایشان نتیجه گرفتند که فرود اولیه

همان طور که ذکر گردید عامل اصلی در انتقال مومنوم وجود چرخشهای میانی در مقطع مرکب است. بنابراین وارد کردن پدیده انتقال مومنوم در محاسبات مربوط به شدت جریان عبوری از مقطع باعث برآورد دقیقتر مشخصه‌های جریان در مقایسه با حالتی میشود که این مکانیسم در محاسبات وارد نشده باشد. لیکن به کمیت درآوردن این پدیده مهم و ناشناخته و ارائه آن به صورت یک رابطه کار آسانی نخواهد بود. از جمله پارامترهای مهمی که بر میزان تداخل جریان موثرند میتوان به عمق نسبی (نسبت عمق آب در دشت سیلابی به عمق آب در مقطع اصلی) $(\frac{H-h}{H})$ ، نسبت زبری دشت سیلابی به زبری مقطع اصلی $(\frac{n_f}{n_c})$ ، عرض نسبی (نسبت عرض مقطع اصلی به عرض کلکانال) $(\frac{b}{B})$ ، تعداد دشت های سیلابی در مقطع مرکب (N_f) ، شیب جانبی مقطع اصلی (S_c) ، نسبت شکل (نسبت عرض به ارتفاع مقطع اصلی) $(\frac{b}{h})$ اشاره نمود (۱).

مرور منابع موجود در زمینه پرش هیدرولیکی در مقاطع مرکب نشان میدهد که مطالعات کمی در این زمینه به شکل آزمایشگاهی انجام شده است. بنابراین با توجه به منابع بسیار کم و محدود در این زمینه و از طرف دیگر با توجه به کاربرد زیاد پرش هیدرولیکی و کاربردهای مقطع مرکب نظیر بهبود عملکرد هیدرولیکی مجاری زهکشی (۷)، افزایش پایداری با کاهش پتانسیل فرسایش بستر (۱۰) و افزایش ظرفیت کانالها همراه با کنترل جریان سرریزی،

هیدرولیکی)، طراحی آزمایشها بر مبنای توابع بدون بعد تولید شده از آنالیز ابعادی، انجام آزمایشهای اولیه و آزمایشهای اصلی و در انتها استخراج روابط همبستگی تجربی و مقایسه آن با رابطه کلاسیک میباشد. تحلیل ابعادی

با توجه به پارامترهای محتمل تاثیرگذار بر پرش هیدرولیکی، رابطه (۱) را میتوان نوشت:

$$1) f \left(B_r, D_r, n_r, z, Fr_1, \frac{d_2}{d_1}, \frac{L_r}{d_1}, \frac{L_j}{d_1} \right) = 0$$

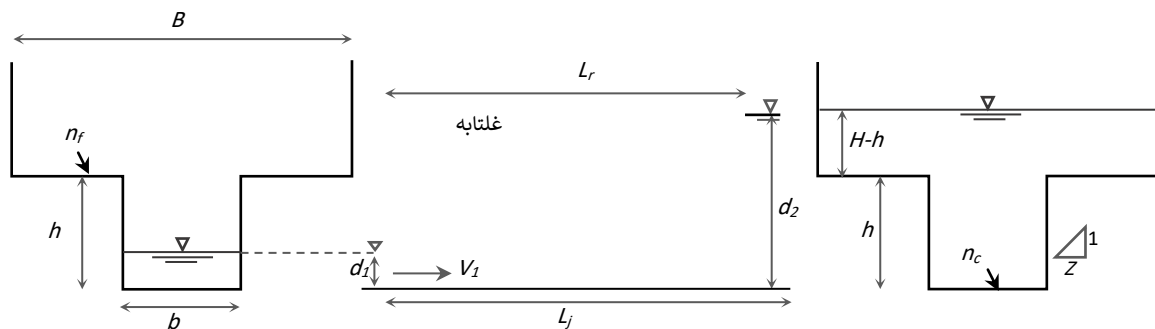
که در آن d_1 عمق اولیه پرش هیدرولیکی (d_2)، m عمق ثانویه پرش هیدرولیکی ($H - h$)، m عمق جریان در دشت سیلابی (b)، m عرض مقطع اصلی (B)، m عرض کل کانال (n_c)، m ضریب زبری مقطع اصلی (n_f)، $s/m^{1/3}$ ضریب زبری دشت سیلابی (Z)، $s/m^{1/3}$ شیب جانبی کانال (S)، m/m شیب طولی کانال (V_1)، m/m سرعت اولیه پرش هیدرولیکی (g)، m/s شتاب ثقل (ρ)، m/s^2 جرم حجمی آب (L_r)، kg/m^3 طول غلتابه (m) و L_j طول پرش هیدرولیکی (m) میباشد.

موثرترین فاکتور و عرض نسبی کمترین اهمیت را داشته است. بنعبدسلام و همکاران (۲۰۲۱) مقایسه‌های مابین معادلات موجود کلاسیک و داده‌های آزمایشگاهی انجام نداده و پارامتر سرعت را در طول و عرض مقطع اندازه‌گیری نکردند (۴).

بنابراین با توجه به کمبود مطالعات در زمینه پرش هیدرولیکی در مقاطع مرکب در این مقاله در نظر است که با استفاده از یک کانال آزمایشگاهی با عرض ۱ متر و عمق ۰/۸ متر و طول ۱۰ متر، پرشهای هیدرولیکی محتمل در مقطع مرکب مستطیلی مستقیم در عرضهای نسبی (۰/۲، ۰/۳، ۰/۴) و اعداد فرود اولیه جریان بین ۲ تا ۷ تولید شده و سپس نوع پایدار و متقارن آن مورد تحلیل قرار گیرد. باید توجه داشت که فیزیک این نوع پرشها با نوع کلاسیک متفاوت بوده و ممکن است محدودهای از پرشهای مستغرق و آشفته‌گیهای سطحی کوچک مقیاس تا نوع نوسانی، نامتعادل و پایدار متقارن مشاهده گردد.

مواد و روشها

به طور کلی این پژوهش شامل تحلیل ابعادی، جهت تعیین پارامترهای محتمل موثر بر سیستم مورد مطالعه (پرش



شکل (۲): نمای مقطع عرضی عمق اولیه پرش، پرش هیدرولیکی و نمای مقطع عرضی عمق ثانویه پرش در مقطع مرکب

عرض جانبی کانال صفر و شیب طولی کانال ثابت معادلات (۲) را خواهیم داشت:

$$2) \left\{ \begin{aligned} \frac{d_2}{d_1} &= f(B_r, D_r, Fr_1) \frac{L_r}{d_1} = \\ f(B_r, D_r, Fr_1) \frac{L_j}{d_1} &= f(B_r, D_r, Fr_1) \end{aligned} \right.$$

در رابطه (۱) با انتخاب متغیرهای $V_1 \rho$ و d_1 به عنوان متغیرهای تکراری و بر اساس قضیه پی باکینگهام و با انجام ساده‌سازیها و همچنین در نظر گرفتن زبری نسبی ثابت،



بود) استفاده شود. در مقطع طولی کانال در یک مش مربع ۵ سانتیمتری، عمق نسبت به بستر و سرعت در گرہها اندازهگیری شدند. برای دقت بیشتر در نقاط حساس گاهی ارتفاع اندازهگیری سرعت به ۲ الی ۳ سانتیمتر نیز تقلیل پیدا کرده است. ضمن اینکه در مقطع عرضی کانال نیز با مش ۵ سانتیمتری، سرعت اندازهگیری شد. در این پژوهش دو عامل از عوامل مهم تاثیرگذار یعنی عرض نسبی ($B_r = \frac{b}{B}$) و عدد فرود اولیه جریان ($Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gd_1}}$) مورد مطالعه قرار گرفت. جهت بررسی تاثیرگذاری عرض نسبی از ۳ عرض نسبی متفاوت (۰/۲، ۰/۳، ۰/۴) و جهت بررسی تاثیرگذاری عدد فرود اولیه جریان از ۳ عدد فرود اولیه جریان متفاوت (اعداد فرود بین ۲ تا ۷) استفاده شد. در هر سری آزمایش در یک دبی جریان ثابت با تغییر اندازه بازشدگی دریچه بالادست و تنظیم سرریز پایین دست پرش هیدرولیکی پایدار و متقارن تولید شده است. پرش هیدرولیکی تولید شده از نوع مستغرق نبوده و جریان کلی آشفته، غیریکنواخت و دائمی فرض شده است. نواحی سکون (با سرعت صفر) و محدوده تخمینی غلطاب و نقاط ایستایی در انتهای ناحیه غلطاب با استفاده از تزریق ماده رنگی در آزمایشات اولیه شناسایی شدهاند. در بدنه غلطاب و محدودههایی که غلظت هوای محبوس شده زیاد میباشد سرعت اندازهگیری نشده است چرا که هوا میتواند خطایی بالا تولید کند. تعداد تکرار اندازهگیریهای عمق و طول پرش و غلطاب ۳ بار بوده است. جدول (۲) محدوده تغییرات دادههای آزمایشگاهی را در این پژوهش نشان میدهد.

که در آن D_r عمق نسبی (نسبت عمق جریان در دشت سیلابی به عمق جریان در مقطع اصلی)، B_r عرض نسبی (نسبت عرض مقطع اصلی به عرض کل کانال) و Fr_1 عدد فرود اولیه جریان میباشد.

تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایشها در یک کانال آزمایشگاهی به طول ۱۰ متر، عرض ۱ متر و ارتفاع ۰/۸ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان صورت گرفت که ۶ متر از طول کل کانال بصورت کانال مرکب تغییر شکل داده شده است. عمق جریان در هر دو مقطع اولیه و ثانویه پرش و عمق جریان در طول پرش با استفاده از عمقسنج دیجیتالی با خطای نسبی ± 1 mm، دبی جریان با استفاده از فلومتر با خطای 1% و نیز سرعت جریان در طول پرش با استفاده از لوله پیتو در یک شبکههای با مشهای متفاوت (۵-۲ سانتیمتر) اندازهگیری شد. همچنین طول پرش هیدرولیکی نیز بر اساس تغییرات نیمرخ قائم سرعت و توسعه لایه مرزی بدست آمده است. لایه مرزی بر اساس تغییرات پروفیل قائم سرعت با استفاده از فاکتورهای نرمال شده $v \left(\frac{v}{v_{max}} \right)$ سرعت محلی و v_{max} سرعت حداکثر در پروفیل قائم سرعت و $z \left(\frac{z}{b} \right)$ ارتفاع اندازه گیری سرعت نقطه‌های نسبت به کف کانال، b ارتفاع معادل سرعت حداکثر می تواند به کمیت درآید. رفتار $\left(\frac{z}{b} \right) - \left(\frac{v}{v_{max}} \right)$ در محدوده پرش هیدرولیکی و محدوده‌های که هیدرولیک جریان مقطع مرکب حاکم است متفاوت بوده و از این جهت طول ناحیه گذار میتواند بعنوان حد فاصل بین رژیم کاملاً زیربحرانی (جریان عبوری از زیر دریچه) تا جایی که هیدرولیک جریان بصورت مقطع مرکب کلاسیک است، تعریف شود. توزیع سرعت در عرض نیز میتواند به یافتن انتهای ناحیه گذار (در اینجا طول پرش هیدرولیکی خواهد

جدول (۲): محدوده تغییرات داده‌های آزمایشگاهی

محدوده تغییرات Range	نماد علمی Scientific Symbol	پارامتر Parameter
۰/۰۳۴-۰/۰۴۷	d_1	عمق اولیه (متر) Initial depth (m)
۰/۱۶۸-۰/۱۷۷	d_2	عمق ثانویه (متر) Secondary depth (m)
۱/۲۰-۱/۳۵	L_j	طول پرش (متر) Jump length (m)
۵/۱۱-۶/۱۶	Fr_1	عدد فرود اولیه (بدون بعد) Initial Froude number (no dimension)
۰/۲-۰/۴	B_r	عرض نسبی (بدون بعد) Relative width (no dimension)

مقطع اصلی به سیلاب دشت، فرم بخش غلطاب تغییر کرده و به صورت شعاعی در سیلاب دشت گسترده میشود. گسترش آشفته‌گیهای سطحی به سیلابدشتهای یافتن نقطه سکون یا طول ناحیه غلطاب را کمی دشوار میکند. به جهت وجود توزیع سرعت در عمق و عرض در بدنه پرش هیدرولیکی، رفتار این نوع خاص از پرش با استفاده از تعاریف موجود و روابط کلاسیک به درستی قابل پیشبینی نیست و نیاز به بازبینی دارد.

نتایج و بحث

اولین چالش در این تحقیق ایجاد پرش هیدرولیکی در یک مقطع مرکب در محیط آزمایشگاه بوده است. با توجه به عمق پایاب و سرعت جریان در پاشنه پرش (یا عدد فرود اولیه) فرمهایی از پرش قابل مشاهده است که البته همه این فرمها پایدار نیستند. آزمایشها بر روی فرم پایدار پرش انجام شده است (شکل (3)). به دلیل انتقال مومنتوم از



شکل (۳): الگوی پرش هیدرولیکی مرکب در کانال مرکب (عرض نسبی کانال ۰/۲ با عدد فرود اولیه ۶/۱۶ که دارای عمق اولیه ۰/۰۳۴ متر و عمق ثانویه ۰/۱۷ متر میباشد)

رابطه (۱) رابطه عمومی عدد فرود برای مجاری روباز (رابطه (۲) حاصل میشود که در آن T عرض کانال، Q دبی، A سطح جریان و α ضریب تصحیح انرژی جنبشی است. در کارهای اولیه که بر محاسبه عدد فرود اولیه در

اعماق مزدوج:

معادله بلانگر (۱۸۲۸) به دلیل در نظر نگرفتن نحوه توزیع سرعت در مقاطع مرکب قابل استفاده نیست (۲). با حداقل کردن معادله انرژی مخصوص بختمتف (۱۹۳۲)



در مقطع جریان) میتواند مشاهده شود (شکل ۴)). لذا مدل‌های متداول که توزیع سرعت را در نظر نمیگیرند توانایی شناسایی و پیشبینی آنها را ندارند. با داشتن داده‌های آزمایشگاهی توزیع سرعت در عرض مقطع حتی بصورت متوسط در عمق نیز میتوان مقدار ضریب تصحیح انرژی جنبشی یا ممنتوم را استخراج نمود و عدد فرود برای کل مقطع یا بصورت جزئی و نسبت اعماق مزدوج را تصحیح کرد. به هر حال در این مقاله با استفاده از رابطه بدون بعد مستخرج شده برای تابع اعماق مزدوج اثر پارامترهای عرض نسبی، عمق نسبی و عدد فرود اولیه بررسی شده و سپس یک رابطه رگرسیونی در محدوده عدد فرود اولیه مورد مطالعه تولید شده است که در آن میانگین خطای نسبی ۱/۷۴ درصد میباشد (رابطه ۳)). همچنین رابطه کلاسیک نیز با یافته‌ها مقایسه شده است.

$$Fr = \left(\frac{\alpha Q^2 T}{g A^3} - \frac{Q^2}{2g A^2} \cdot \frac{d\alpha}{dy} \right)^{\frac{1}{2}}$$
$$Fr = \left(\frac{Q^2 T}{g A^3} \right)^{\frac{1}{2}}$$
$$Fr = \left(\frac{\alpha Q^2 T}{g A^3} \right)^{\frac{1}{2}}$$
$$\left(\frac{d_2}{d_1} \right) = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + Fr_1^2} - 1 \right)$$

3)

کانالهای مرکب مقدار $\alpha = 1$ در نظر گرفته شده است (رابطه ۳)) (دیدگاه مقطع واحد، SCM^5) استفاده شده است که منجر به خطاهای بالایی میشود. بلاوک و استورم (۱۹۸۱) رابطه ۳) را بهبود داده و رابطه ۴) را با در نظر گرفتن یک ضریب تصحیح انرژی جنبشی برای مقاطع مرکب ارائه نمودند (۶). این رابطه به $CSCM^6$ یا مقطع واحد اصلاح شده موسوم است. همچنین تلاشهایی که بر اساس نگاه ذون بندی مقطع مرکب ($VDCM^7$) برای محاسبه ضریب تصحیح انرژی جنبشی (۶، ۲۵ و ۲۷) و اصلاح ممنتوم β (۹) نیز دقت بالایی نداشته‌اند چرا که در ذونبندیها اثر متقابل کانال اصلی و سیلابدشته‌ها یا در نظر گرفته نشده است (۱۸ و ۱۴). لی و همکاران (۲۰۰۲) و کردی و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که در مقطع مرکب جریان کاملاً بحرانی رخ نمیدهد و یک رژیم جریان مختلط

$$E = \left(\alpha \frac{V^2}{2g} + y \right)$$

$$\frac{d_2}{d_1} = C \cdot e^{D \cdot Fr_1} \Rightarrow \frac{d_2}{d_1} = 0.6276 e^{0.345 Fr_1}$$

⁷ Vertical Divided Channel Method

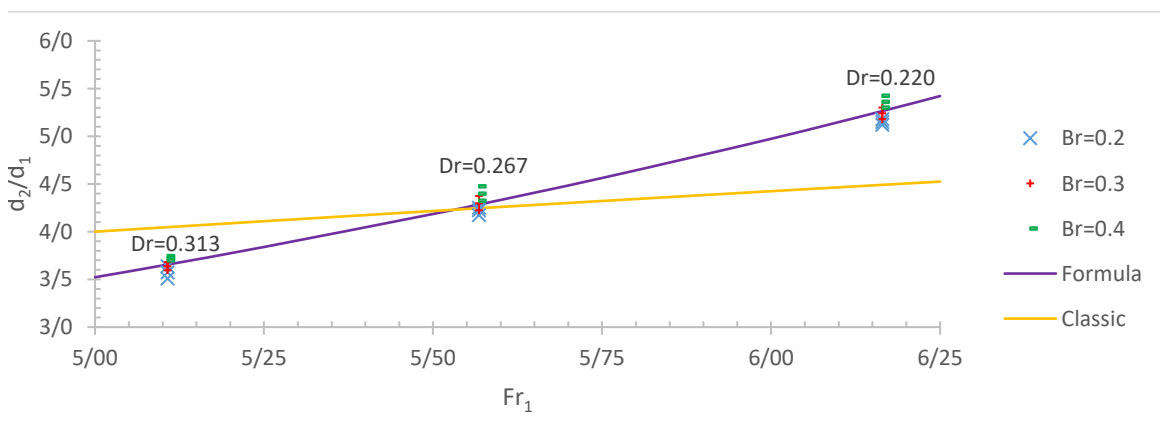
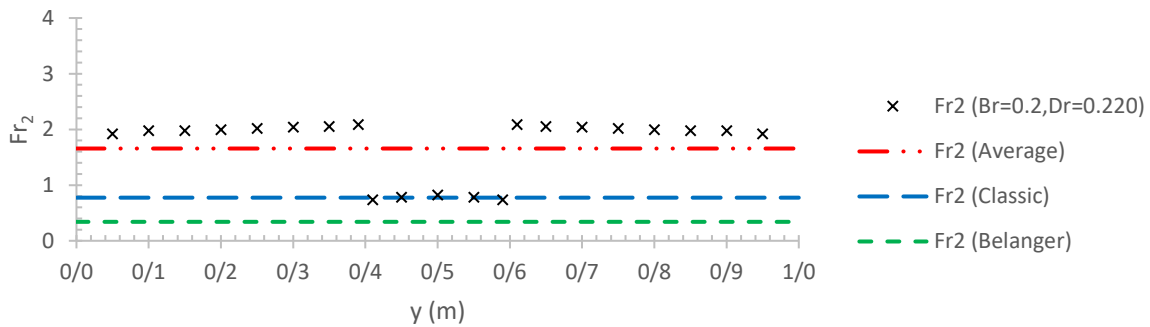
⁵ Single Channel Method

⁶ Corrected Single Channel Method

جدول (۳): اعماق مزدوج پرش و عدد فرود اولیه پرش در مقطع مرکب

عرض نسبی (بدون بعد)	عمق آب زیر دریچه (متر)	عمق اولیه پرش (متر)	عمق ثانویه پرش (متر)	عدد فرود اولیه (بدون بعد)
B_r	h_1	d_1	d_2	Fr_1
۰/۲	۰/۰۳۴	۰/۰۳۴	۰/۱۷۰	۶/۱۶
۰/۲	۰/۰۴۰	۰/۰۴۰	۰/۱۶۹	۵/۵۷
۰/۲	۰/۰۴۷	۰/۰۴۷	۰/۱۶۸	۵/۱۱
۰/۳	۰/۰۳۴	۰/۰۳۴	۰/۱۷۳	۶/۱۶
۰/۳	۰/۰۴۰	۰/۰۴۰	۰/۱۷۲	۵/۵۷
۰/۳	۰/۰۴۷	۰/۰۴۷	۰/۱۷۱	۵/۱۱
۰/۴	۰/۰۳۴	۰/۰۳۴	۰/۱۷۷	۶/۱۶
۰/۴	۰/۰۴۰	۰/۰۴۰	۰/۱۷۶	۵/۵۷
۰/۴	۰/۰۴۷	۰/۰۴۷	۰/۱۷۵	۵/۱۱

Br=0.2 , Dr=0.220



شکل (۴): نمودار تغییرات داده‌های آزمایشگاهی نسبت (d_2/d_1) در مقابل عدد فرود اولیه در عرض‌های متفاوت



در ساختار رابطه است. میانگین مربع خطاها و خطای نسبی در جدول (۴) ارائه شده است. نمودار (۴) نیز نشان می‌دهد که عمق نسبی نیز فاکتوری اثرگذار بر تغییرات نسبت اعماق مزدوج در مقابل عدد فرود اولیه است. در شکل (۴) می‌توان دید که اثر عرض نسبی در اعداد فرود پایینتر، کمتر است و یک اختلاط در داده‌ها وجود دارد. عرض نسبی و عمق نسبی بر توزیع سرعت اثرگذار بوده و میتوان فرض نمود که اثر این فاکتورها در ضریب توزیع سرعت قابل دیدن است و میتواند در ساختار رابطه کلاسیک گنجانده شود (رابطه (۳)).

همانطور که در شکل (۴) دیده شده است در عدد فرود اولیه بیشتر از $5/5$ ، به دلیل مرکب بودن مقطع و جریان ثانویه در این نوع مقاطع نسبت اعماق مزدوج در پرش هیدرولیکی در مقطع مرکب بیشتر از نوع کلاسیک آن است. نتایج حاصل از رابطه کلاسیک $(= \frac{d_2}{d_1})$ و $\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right)$ و نتایج حاصل از رابطه تحلیلی (رابطه (۳)) با داده‌های آزمایشگاهی دارای اختلافاتی قابل مشاهده‌های هستند که این اختلافات در رابطه تحلیلی نسبت به رابطه کلاسیک کمتر میباشد که آن هم ناشی از عدم شامل شدن اثر توزیع سرعت عرضی در مقطع مرکب

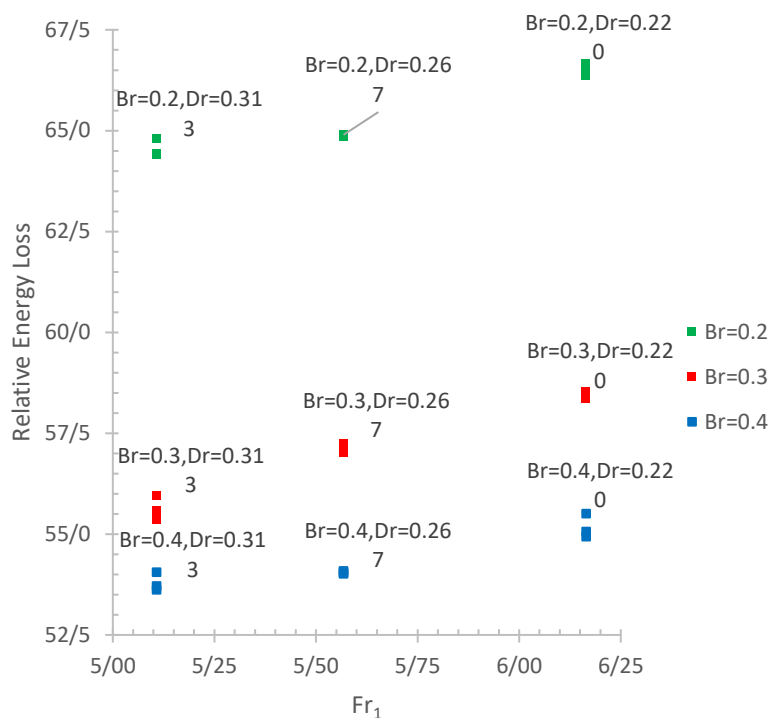
جدول (۴): میانگین مربع خطاها و خطای نسبی روابط بلانگر و معادله تحلیلی

خطای نسبی معادله تحلیلی (درصد)	خطای نسبی بلانگر (درصد)	میانگین مربع خطاها معادله تحلیلی (درصد)	میانگین مربع خطاها بلانگر (درصد)	عرض نسبی (بدون بعد)
e	e	RMSE	RMSE	B_r
۳۰/۳۸	۴۲/۴۴	۱/۸۵	۳/۱۴	۰/۲
۳۲/۸۲	۴۱/۳۸	۲/۱۱	۳/۰۶	۰/۳
۳۳/۷۳	۴۰/۰۲	۲/۲۵	۲/۹۶	۰/۴
۳۲/۳۱	۴۱/۲۸	۲/۰۸	۳/۰۵	Total

عمق نسبی کمتر از $0/2$ این اثر بشدت افزایش یافته و در $0/2$ به حداکثر خود میرسد سپس در انتهای ناحیه دوم جایی که $0.2 < Dr < 0.4$ اثر متقابل بطور نسبتا قابل توجه کاهش مییابد. در این سری از آزمایشات اعماق نسبی طوری انتخاب شده بودند که اثر متقابل مقطع اصلی بر سیلابدشت قابل توجه باشد. البته و بطور کلی با افزایش عرض نسبی کمی راندمان افت انرژی کاهش مییابد و به حالت کلاسیک نزدیک میشود.

راندمان افت انرژی:

در شکل (۵) نمودار تغییرات راندمان افت انرژی (٪) در پرش هیدرولیکی در کانال مرکب در مقابل عدد فرود رسم شده است. نتایج نشان میدهد که راندمان افت انرژی در این نوع پرش در یک عرض نسبی ثابت بخصوص در اعماق نسبی بالاتر ($0/3$) بیشتر بوده است. آکرز (۱۹۹۲) نشان داد که در اعماق نسبی متفاوت مقدار اثر متقابل مقطع اصلی و سیلابدشت متفاوت بوده و در ناحیه اول جایی که



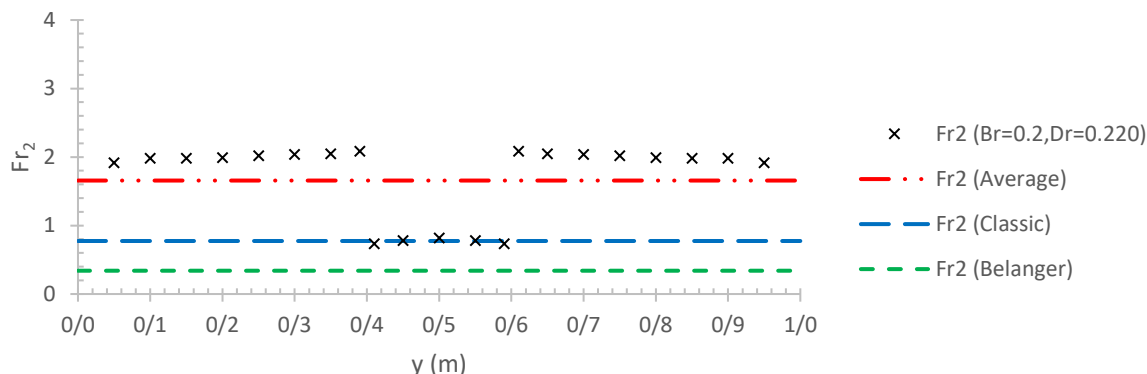
شکل (۵): نمودار تغییرات راندمان افت انرژی پرش در برابر عدد فرود اولیه پرش در مقطع مرکب

رژیم جریان مختلط است که در مقاطع مرکب ممکن است بوجود بیاید. رابطه کلاسیک که برای کل سطح مقطع اعمال میشود نمیتواند این رژیم را پیشبینی کند. این نمودارها برای یافتن انتهای ناحیه گذار (پرش هیدرولیکی) از رژیم کاملاً فوق بحرانی (ابتدای پرش) تا رژیم هیدرولیکی مقطع مرکب میتواند مورد استفاده قرار گیرد.

توزیع عدد فرود ثانویه پرش هیدرولیکی در عرض کانال مرکب:

در شکل (۶) نمونه‌های از توزیع عدد فرود ثانویه در انتهای پرش هیدرولیکی در عرض کانال مرکب در عرض نسبی ۰/۲ و عمق نسبی ۰/۲۲۰ را مشاهده مینمایید. در حالی که مقطع اصلی رژیم زیر بحرانی دارد در مقطع سیلابدشت رژیم فوق بحرانی است که نشان دهنده یک

Br=0.2 , Dr=0.220



$$Ivanchenko (1936): \frac{L_j}{d_2-d_1} = 10Fr_1^{-0.37} \quad (5)$$

یافتهها با معادلات مربوط به مقطع کلاسیک نیز مقایسه شده است که نشان داده است طول پرش مورد مطالعه بیشتر بوده است. در یک عدد فرود ثابت تغییرات طول پرش به عمق و عرض نسبی وابسته بوده است. برای استخراج رابطهای بین طول پرش هیدرولیکی با عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در مقطع مرکب از یافتهها آزمایشگاهی کمک گرفته شده است که با توجه به جدول (۵) میتوان رابطه (۶) را برای مقاطع مرکب مستطیلی مستقیم حاصل نمود:

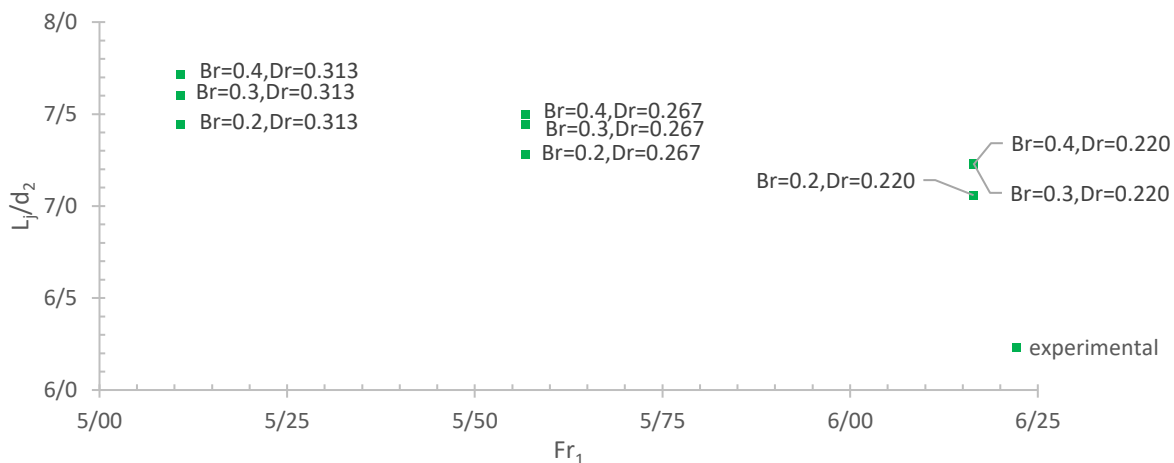
$$\frac{L_j}{d_1} = B \left(\frac{d_2}{d_1} \right) \Rightarrow B \cong 7.39 \Rightarrow L_j = 7.39d_2 \quad (6)$$

در معادله فوق B نسبت طول پرش به عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در مقطع مرکب میباشد که بطور میانگین عدد ۷/۳۹ با توجه به مقادیر عمق اولیه پرش، عمق ثانویه پرش و طول پرش هیدرولیکی حاصل گردیده است.

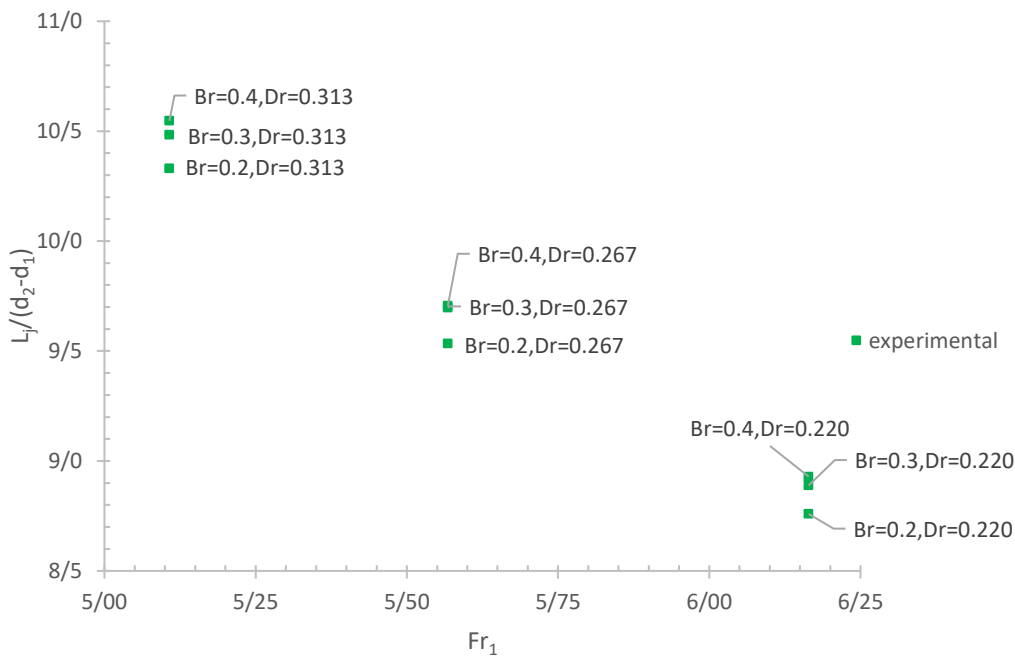
طول پرش هیدرولیکی

در شکل (۷) تغییرات طول پرش هیدرولیکی نرمال شده بوسیله عمق ثانویه در برابر عدد فرود در عمق و عرض نسبیهای متفاوت رسم شده است. در یک عدد فرود ثابت مقدار طول پرش به عمق و عرض نسبی نیز وابسته است. روند دیده شده در محدوده عدد فرود اندازگیری شده خطی است که البته آن را نمیتواند برای یک رنج وسیع از عدد فرود تعمیم داد. لیکن این یافتهها رابطه ابعادی را تایید مینماید که در این نوع پرش عدد فرود و عمق نسبی و عرض نسبی فاکتورهای تاثیرگذاری در طول پرش هستند. طول پرش در مقایسه با رابطه کلاسیک بطور متوسط ۲۳/۱۷ درصد بیشتر خواهد بود. اشکال (۸) و (۹) تغییرات طول پرش نرمال شده بوسیله (d₂-d₁) را در مقابل عدد فرود نشان دادهاند. معادله وو (۱۹۹۴) و معادله ایوانچنکو (۱۹۳۶) در زیر آورده شده است:

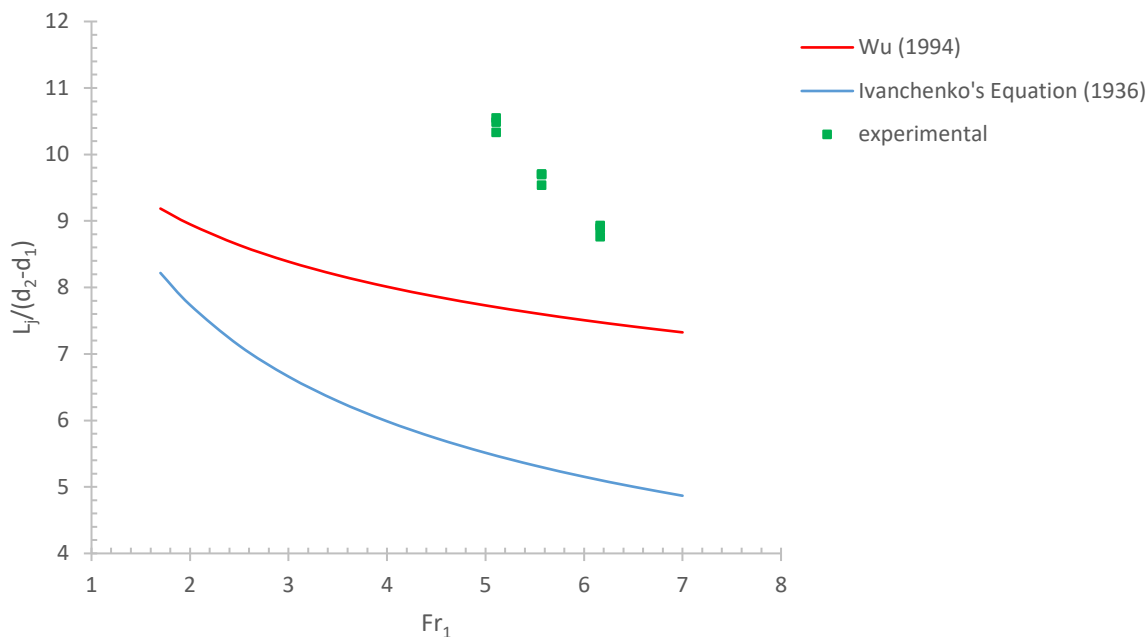
$$Wu (1994): \frac{L_j}{d_2-d_1} = \frac{1}{10Fr_1^{-0.16}} \quad (4)$$



شکل (۷): نمودار نسبت طول پرش به عمق ثانویه پرش به عدد فرود اولیه پرش در مقطع مرکب



شکل (۸): نمودار نسبت طول پرش به اختلاف اعماق مزدوج پرش به عدد فرود اولیه پرش در مقطع مرکب



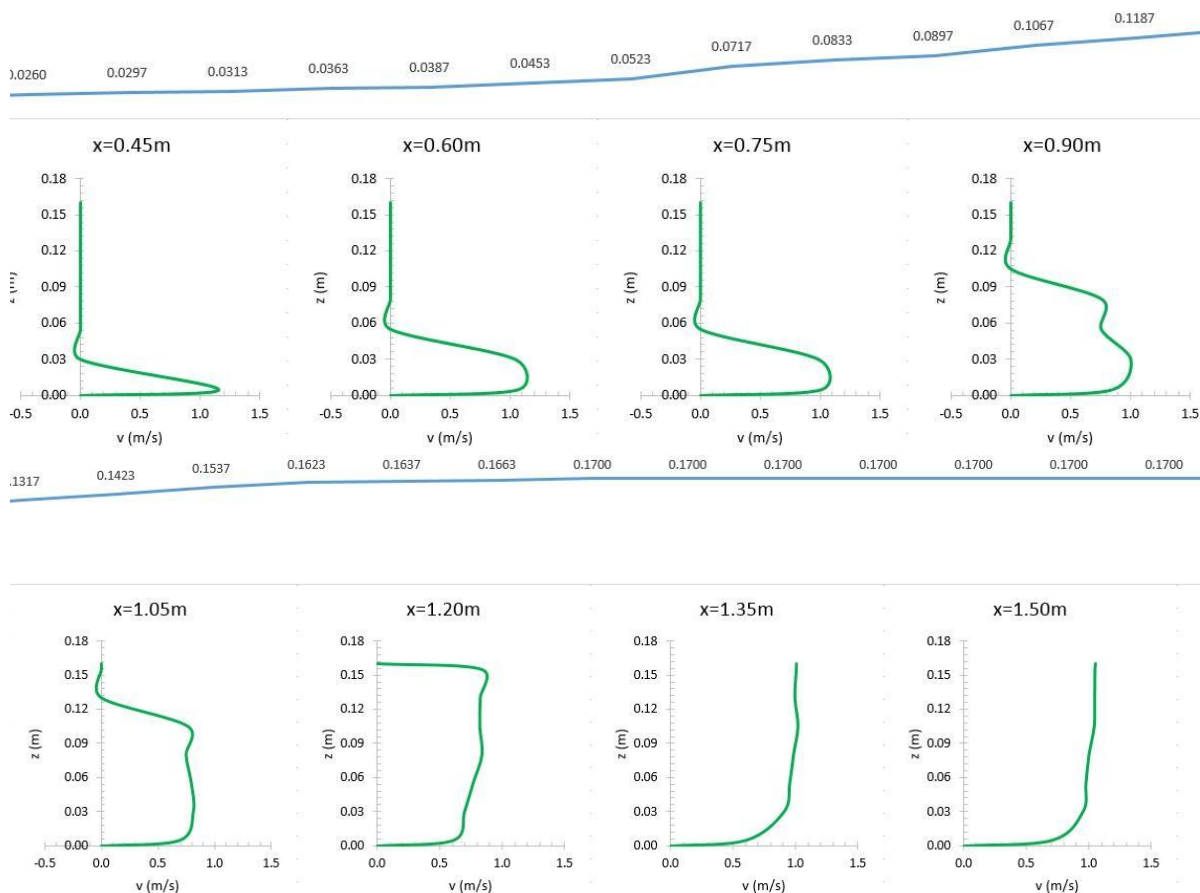
شکل (۹): نمودار نسبت طول پرش به اختلاف اعماق مزدوج پرش به عدد فرود اولیه پرش در مقطع مرکب

جدول (۵): نسبت طول پرش به عمق اولیه پرش و اعماق مزدوج پرش هیدرولیکی در مقطع مرکب

عرض نسبی (بدون بعد)	عمق آب زیر دریچه (متر)	طول پرش (متر)	عمق اولیه پرش (متر)	عمق ثانویه پرش (متر)	نسبت طول پرش به عمق اولیه پرش (بدون بعد)	نسبت اعماق مزدوج پرش (بدون بعد)	نسبت طول پرش به عمق ثانویه پرش (بدون بعد)
Relative width (no dimension)	Water depth under the upstream gate (m)	Jump length (m)	Initial jump depth (m)	Secondary jump depth (m)	Ratio of jump length to initial jump depth (no dimension)	Ratio of the conjugate jump depth (no dimension)	Ratio of jump length to secondary jump depth (no dimension)
B_r	h_1	L_j	d_1	d_2	$\frac{L_j}{d_1}$	$\frac{d_2}{d_1}$	$B = \frac{L_j}{d_2}$
۰/۲	۰/۰۳۴	۱/۲۰	۰/۰۳۴	۰/۱۷۰	۳۵/۶۱	۵/۰۴	۷/۰۶
۰/۲	۰/۰۴۰	۱/۲۳	۰/۰۴۰	۰/۱۶۹	۳۰/۷۵	۴/۲۳	۷/۲۸
۰/۲	۰/۰۴۷	۱/۲۵	۰/۰۴۷	۰/۱۶۸	۲۶/۶۰	۳/۵۷	۷/۴۴
۰/۳	۰/۰۳۴	۱/۲۵	۰/۰۳۴	۰/۱۷۳	۳۷/۰۹	۵/۱۳	۷/۲۳
۰/۳	۰/۰۴۰	۱/۲۸	۰/۰۴۰	۰/۱۷۲	۳۲/۰۰	۴/۳۰	۷/۴۴
۰/۳	۰/۰۴۷	۱/۳۰	۰/۰۴۷	۰/۱۷۱	۲۷/۶۶	۳/۶۴	۷/۶۰
۰/۴	۰/۰۳۴	۱/۲۸	۰/۰۳۴	۰/۱۷۷	۳۷/۹۸	۵/۲۵	۷/۲۳
۰/۴	۰/۰۴۰	۱/۳۲	۰/۰۴۰	۰/۱۷۶	۳۳/۰۰	۴/۴۰	۷/۵۰
۰/۴	۰/۰۴۷	۱/۳۵	۰/۰۴۷	۰/۱۷۵	۲۸/۷۲	۳/۷۲	۷/۷۱

هیدرولیکی $0.34/0$ متر در شکل (10) آورده شده است. در این شکل نیمرخهای سرعت قائم را در فواصل طولی مختلف در ۸ ایستگاه مشاهده مینمایید که عمق جریان در این ایستگاهها نیز در شکل قابل مشاهده میباشد. همان طور که در این شکل مشخص است سرعت قائم در ابتدای پرش هیدرولیکی در نزدیکی کف کانال حداکثر میباشد که در طول پرش هیدرولیکی حداکثر سرعت قائم به اعماق بالاتر انتقال پیدا میکند. به طوریکه، در انتهای پرش هیدرولیکی سرعت قائم در نزدیکی سطح آب حداکثر میباشد. همچنین در انتهای پرش هیدرولیکی در مقطع اصلی نمودار سرعت قائم به صورت سهمی است که نشانه انتهای پرش هیدرولیکی میباشد که البته عمق جریان نیز در انتهای پرش ثابت میگردد.

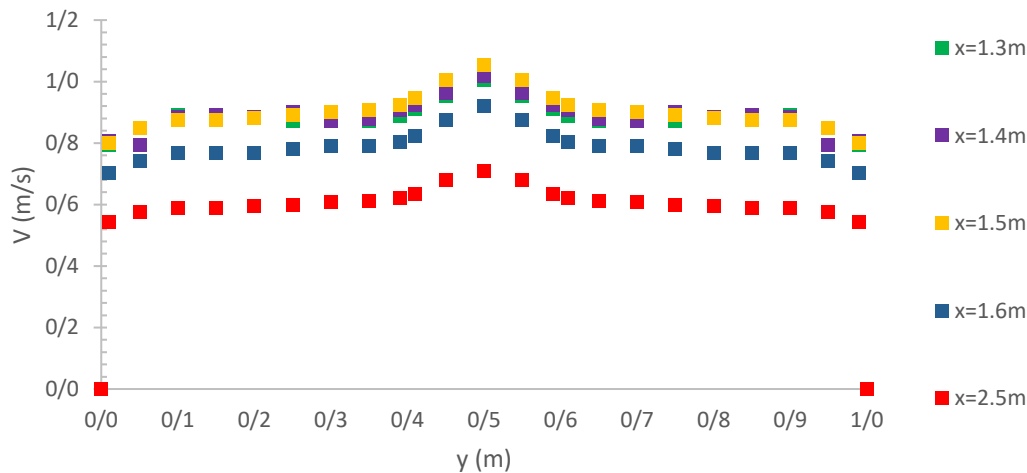
توزیع سرعت در پرش هیدرولیکی در مقطع مرکب با تعیین نیمرخهای توزیع سرعت در عرضی و جهت قائم در طول پرش هیدرولیکی، میتوان محدوده ناحیه گذار یا ناحیه پرش هیدرولیکی مرکب را بدست آورد. این نیمرخهای عرضی و قائم سرعت هنگامی که رفتار هیدرولیکی یک مقطع مرکب را نشان دهد نشان دهنده انتهای ناحیه گذار است که البته طول این ناحیه با طول بدست آمده از روشهای بصری که در آن نقطه سکون یا تراز شدن تراز سطح آب با تراز پایاب شناسایی میشوند، مطابق نخواهد بود. برای نمونه نیمرخ سرعت عرضی و قائم سرعت در کانال مرکب با عرض نسبی $0.2/0$ و عمق اولیه پرش



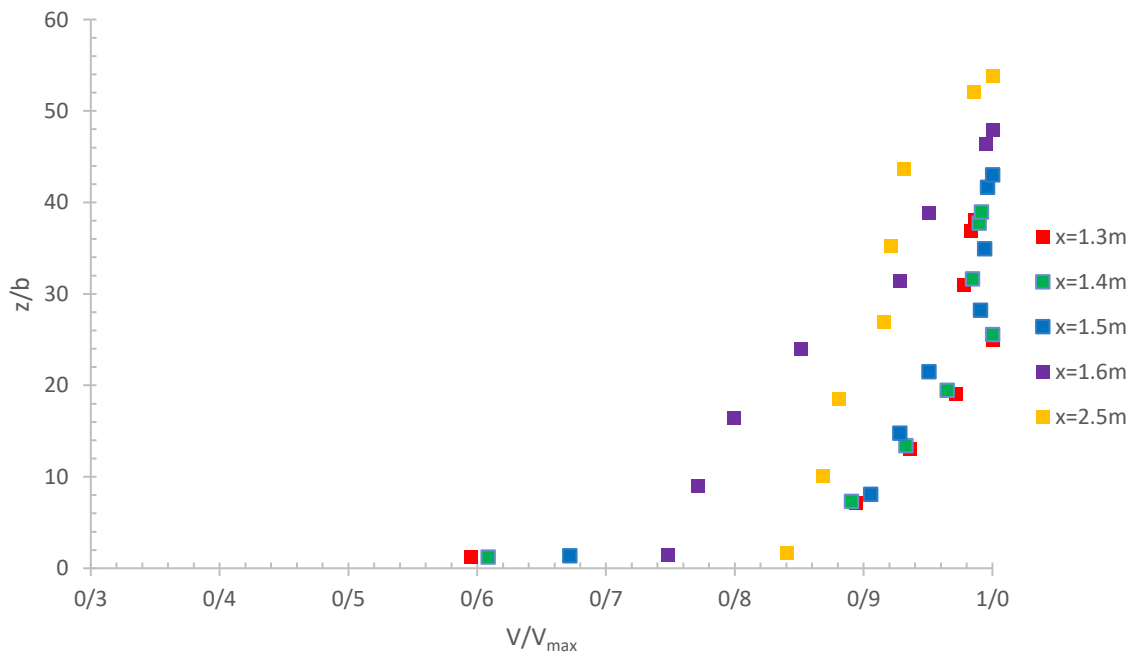
شکل (۱۰): نیمرخ سرعت قائم در طول پرش هیدرولیکی در ۸ ایستگاه طولی مختلف در طی پرش هیدرولیکی با عرض نسبی $0.2/0$ و عمق اولیه پرش هیدرولیکی $0.34/0$ متر

هیدرولیکی و از ۱/۵۰ متری دریاچه تا انتهای کانال مقطع مرکب هیدرولیکی میباشد. یافته‌های کامل تعیین نواحی کانال در جدول (۶) آمده است که در آن x فاصله از دریاچه بر حسب متر میباشد. با تعیین نواحی کانال، طول واقعی پرش هیدرولیکی که طول ناحیه گذار پرش هیدرولیکی میباشد بدست می‌آید.

با استفاده از نیمرخهای سرعت عرضی و قائم مقطع ساده هیدرولیکی، ناحیه گذار پرش هیدرولیکی و مقطع مرکب هیدرولیکی در طول کانال قابل شناسایی هستند. به طور مثال با توجه به شکل (۱۱) و شکل (۱۲)، از دریاچه تا فاصله ۰/۳۰ متری از دریاچه مقطع ساده هیدرولیکی، از ۰/۳۰ متری دریاچه تا ۱/۵۰ متری دریاچه ناحیه گذار پرش



شکل (۱۱): نیمرخ سرعت طولی جریان در عرض مقطع مرکب در طی پرش هیدرولیکی با عرض نسبی ۰/۲ و عمق اولیه پرش هیدرولیکی ۰/۰۳۴ (متر)



شکل (۱۲): نیمرخ سرعت قائم در طول پرش هیدرولیکی کانال مرکب در عرض نسبی ۰/۲ با عمق اولیه پرش هیدرولیکی ۰/۰۳۴ متر

جدول (۶): تعیین نواحی کانال با استفاده از نیمرخهای سرعت عرضی و قائم

عرض نسبی (بدون بعد)	عمق آب زیر دریاچه بالادست (متر)	مقطع ساده هیدرولیکی (متر)	ناحیه گذار پرش هیدرولیکی (متر)	مقطع مرکب هیدرولیکی (متر)	طول ناحیه گذار یا طول پرش هیدرولیکی (متر)
Relative width (no dimension)	Water depth under the upstream gate (m)	Simple hydraulic cross section (m)	Hydraulic jump transition zone (m)	Hydraulic compound channel (m)	Length of transition zone or length hydraulic jump (m)
0.2	0.0337	$0 < x < 0.30$	$0.30 < x < 1.50$	$x > 1.50$	1.20
0.2	0.0400	$0 < x < 1.40$	$1.40 < x < 2.63$	$x > 2.63$	1.23
0.2	0.0470	$0 < x < 2.00$	$2.00 < x < 3.25$	$x > 3.25$	1.25
0.3	0.0337	$0 < x < 0.45$	$0.45 < x < 1.70$	$x > 1.70$	1.25
0.3	0.0400	$0 < x < 1.50$	$1.50 < x < 2.78$	$x > 2.78$	1.28
0.3	0.0470	$0 < x < 2.05$	$2.05 < x < 3.35$	$x > 3.35$	1.30
0.4	0.0337	$0 < x < 0.50$	$0.50 < x < 1.78$	$x > 1.78$	1.28
0.4	0.0400	$0 < x < 1.58$	$1.58 < x < 2.90$	$x > 2.90$	1.32
0.4	0.0470	$0 < x < 2.15$	$2.15 < x < 3.50$	$x > 3.50$	1.35

نتیجه گیری

مختلف و مقایسه آنها با هیدرولیک مقطع مرکب (توزیع عرضی و قائم)، محدودههای مقطع ساده هیدرولیکی با رژیم فوق بحرانی، ناحیه گذار پرش هیدرولیکی و مقطع مرکب هیدرولیکی در طول کانال مشخص گردیدند و نتیجتاً، طول ناحیه گذار که در اینجا بعنوان طول پرش هیدرولیکی در مقطع مرکب در نظر گرفته شده است، استخراج گردید. به طور متوسط ۲۳/۱۷ درصد بیشتر از پیشبینی روش کلاسیک بوده است. نسبت اعماق مزدوج نیز در این پرش هیدرولیکی بطور متوسط ۹/۶۳ درصد کمتر از پیشبینی کلاسیک بوده است. تغییرات افت انرژی علاوه بر عدد فرود به عرض و عمق نسبی نیز وابسته است که با افزایش عرض نسبی افت انرژی به مقدار افت در حالت کلاسیک نزدیک میشود و با افزایش عمق نسبی مقدار افت افزایش مییابد. طول این نوع پرش به عدد فرود و عمق نسبی و عرض نسبی نیز وابسته است و بطور متوسط طول پرش ۲۳/۱۷ درصد بیشتر از نوع کلاسیک آن است. تغییرات عدد فرود هم نشان داده است که در بدنه و انتهای پرش هیدرولیکی یک رژیم جریان مختلط زیربحرانی در مقطع اصلی و فوقبحرانی در سیلابدشتهای وجود دارد. در انتها نویسندگان پیشنهاد میدهند که در آینده مطالعاتی در محدوده اعداد فرود پایین

در این تحقیق تلاش شد که پرش هیدرولیکی پایداری را در یک مقطع مرکب را در محیط آزمایشگاهی مدل نموده و مشخصات فیزیکی و توزیع سرعت در آن را بررسی نمود. در این نوع از پرش مرکب رژیم کاملاً آشفته و فوق بحرانی در مقطع اصلی با استفاده از یک دریچه قابل تنظیم تولید شده و پرش هیدرولیکی سپس در یک مقطع مرکب که دارای ۲ سیلابدشت متقارن است جریان مییابد. بعبارت دیگر بخشی از بدنه پرش در یک مقطع مرکب رخ میدهد. خصوصیات هیدرولیکی نسبتاً پیچیده و منحصر به فرد مقطع مرکب بر مشخصات پرش هیدرولیکی تاثیرگذار بوده لذا استفاده از معادلات کلاسیک پرش میتواند توأم با خطا باشد. همچنین در این تحقیق با استفاده از اندازهگیری سرعت نقطه‌های (در جهت طولی جریان X)، عمق جریان و دبی جریان، مشخصات فیزیکی پرش هیدرولیکی در قالب پارامترهایی نظیر اعماق مزدوج و طول پرش هیدرولیکی و پروفیل سرعت قائم و عرضی به کمیت در آورده شده است. مشاهدات حاکی است که مشخصات فیزیکی پرشهای دیده شده متفاوت از تقسیم بندی کلاسیک است. در اینجا، با ترسیم نیمرخهای سرعت قائم و عرضی در فواصل طولی



محققین مطالعاتی روی یک مقطع مرکب نامتقارن و همچنین با زبری نسبی متفاوت انجام پذیرد.

در حالت پرشهای نوسانی جهت بررسی پرشهای نوسانی و همچنین در محدوده اعداد فرود بسیار بالا انجام پذیرد. همچنین نویسندگان پیشنهاد میدهند که در آینده

منابع

Ackers, P. 1991. Hydraulic design of straight compound channels. Hydraulics Research, Wallingford.

Bélangier, 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).

Benabdesselam, A., Achour, B., Houichi, I. 2017. Hydraulic jumps in a straight rectangular compound channel theoretical approach and experimental study. Larhyss Journal. 29:323-340.

Benabdesselam, A., Houichi, L., Achour, B. 2021. GRNN-based models for hydraulic jumps in a straight rectangular compound channel. Modeling Earth Systems and Environment, 1-12.

Bernard, J., Fripp, J. F., Robinson, K. R. 2007. Part 654 Stream Restoration Design National Engineering Handbook (210-VH-NEH). USDA Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

Blalock M. E., Sturm T. W. 1983. Closure of minimum specific energy in compound channel. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1983, 109, 483-486.

Bousmar, D., Zech, Y. 1999. Momentum transfer for practical flow computation in compound channels. Journal of Hydraulic Engineering. 125:696-706.

Chanson, H. 2004. The hydraulics of open channel flow: An introduction, 2nd Ed., Butterworth-Heinemann, Oxford.

Chaudhry, M. H., Bhallamudi, S. M. 1988. Computation of critical depth in symmetrical compound channels. Journal of Hydraulic Research, 1988, 26, No.4, 377-396.

Chow, V.T. 1959. Open channel hydraulics. McGraw-Hill, New York.

French, R.H. 1985. Open-channel hydraulics. McGraw-Hill, New York.

Hey, R. D. 1996. Environmentally sensitive river engineering. River restoration, 80-105.

Knight, D.W., Patel. H.S. 1985. Boundary shear in smooth rectangular ducts. Journal of Hydraulic Engineering. 111:29-47.

Kordi, E. 2005. Calculation of critical depth in open compound. Master Thesis in Water Structures, Mazandaran University. (in Persian)

Kordi, E., Abustan, I. 2011. Estimating the overbank flow discharge using slope-area method. Journal of Hydrologic Engineering. 16:907-913.

Kordi, E., Abustan, I. 2012. Transitional Expanding Hydraulic Jump. Journal of Hydraulic Engineering. 138:105-110.

Kordi, E., Ayyoubzadeh, S.A., Ahmadi, M.Z., Zahiri, A. 2009. Prediction of the lateral flow regime and critical depth in compound open channels. Canadian Journal of Civil Engineering. 36:1-13.

Lee, P. J., Lambert, M. F., Simpson, A. R. 2002. Critical depth prediction in straight compound channels. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water and Maritime Engineering* (Vol. 154, No. 4, pp. 317-332). Thomas Telford Ltd.

Parsamehr, P., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadzadeh, D., Abbaspour, A. 2012. Hydraulic jump on a bed with half cylindrical shape bars. Journal of Water and Soil. 26:3.775-785. (In Persian)

Perkins, H.J. 1979. The formation of streamwise vorticity in turbulent Flow. Journal of Fluid Mechanics. 44:4.721-740.



- Peterka, A.J. 1983. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. Engineering Monograph NO. 25. United States Department of the Interior. Bureau of Reclamation, Denver.
- Samuels, P.G. 1989. The hydraulics of two stage channels - review of current knowledge. Hydraulics Research, Wallingford.
- Shiono, K., Knight, D.W. 1991. Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. Journal of Fluid Mechanics. 222:617-646.
- Shojaeyan, Z., Kashefipour, S, M. 2012. Application of artificial neural network model in predicting hydraulic jump conjugate depths in reverse gradient output conversions and end threshold. 9th International congress on civil engineering. (in Persian)
- Sturm, T, W., Sadiq, A. 1996. Water surface profiles in compound channel with multiple critical depths. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1996, 122, No. 12, 703- 709.
- Wormleaton, P, R., Sellin, R, H, J., Bryant, T., Loveless, J, H., Hey, R, D., Catmur, S, E. 2004. Flow structures in a two-stage channel with a mobile bed. Journal of Hydraulic Research, 42(2), 145-162.
- Yuen, K, W, H., Knight, D, W. 1990. Critical flow in two stage channels. Proceedings of an International Conference on River Flood Hydraulics, 17-20 September 1990.
- Zahiri, A. 1999. Study of hydraulics and sediment transport hydraulics in compound channels and evaluation of 1 and 2d flow models in these sections. Master Thesis in Irrigation Facilities Engineering, Tarbiat Modares University. (in Persian)