

Experimental Study on the Influence of Transverse Jet Angle Variation with a Counter Jet on the Control of Asymmetric S and T Hydraulic Jumps

Mostafa Rahnamaei¹, Javad Ahadiyan^{1*} , Mahmoud Shafai Bejestan¹ , Seyed Mohsen Sajjadi¹ 

¹ Hydraulic Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
Center of Excellence of the Network Improvement and Maintenance, Ahvaz, Iran.

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Objective: Using a water injection system with counter and transverse jets against the flow passing over an ogee spillway after a sudden expansion reduces pressure fluctuations and turbulence along the channel, resulting in flow uniformity and consequently controlling asymmetric jumps.
Article history: Received 05 January 2024 Revised 15 March 2025 Accepted 09 April 2025 Published online 29 March 2026	Material and Methods: In this research, the hydrodynamic flow parameters in a channel were investigated using a combination of a transverse jet at angles of 30, 45, and 90 degrees at two heights of 35 and 45 cm from the channel bed, and the simultaneous use of a counter jet with 5 fixed jets and a total discharge of 4 liters per second, with three Froude numbers of 4.7, 7.8, and 9.5.
Keywords: Counter & Transverse jets S & T-type hydraulic jump Energy dissipater Sudden expansion	Results and Discussion: The jet injection time, the βL parameter (a parameter similar to the Boussinesq coefficient in the momentum equation) in the S jump exhibits less turbulence and dispersion compared to the T jump, indicating that the use of a transverse jet injection system can act as a flow dissipater, leading to flow uniformity. It also causes a significant reduction in the flow momentum ($\beta L \cdot Vm^2$) at the sudden expansion section from the beginning to the end of the channel.
	Conclusions: The use of a transverse and counter jet system with varying angles can significantly reduce turbulence and channel erosion, control asymmetric hydraulic jumps, and uniformize the flow velocity distribution along the channel.

*corresponding author, Email: j.ahadiyan@scu.ac.ir

Cite this article: Rahnamayi, M., Ahadiyan, J., Shafaei, M., & Sajadi, S M. (2026). Experimental Study on the Influence of Transverse Jet Angle Variation with a Counter Jet on the Control of Asymmetric S and T Hydraulic Jumps. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*. <http://doi.org/10.22034/nawee.2025.498882.1130>.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/nawee.2025.498882.1130>

Publisher: Gonbad Kavous University.



بررسی آزمایشگاهی تأثیر تغییر زاویه جت متقاطع همراه با جت متقابل در کنترل پرش هیدرولیکی نامتقارن S و T

مصطفی رهنمائی^۱، جواد احدیان^{۱*}، محمود شفاعی بجستان^۱، سید محسن سجادی^۱

^۱ سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: استفاده از سیستم تزریق آب از طریق جت‌های متقابل و متقاطع در مقابل جریان آب عبوری از سرریز اوجی پس از مقطع واگرای ناگهانی باعث کاهش نوسانات فشار و تلاطم در طول کانال شده و جریان را یکنواخت کرده و در نتیجه پرش نامتقارن را کنترل می‌نماید.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۰	مواد و روش‌ها: در این تحقیق پارامترهای جریان هیدرودینامیک در کانال با استفاده از ترکیب جت متقاطع با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۹۰ درجه در دو ارتفاع ۳۵ و ۴۵ سانتیمتری از کف کانال و استفاده همزمان از جت متقابل با ۵ جت به صورت ثابت و با دبی ۴ لیتر بر ثانیه به صورت مجموع، با ۳ عدد فرود ۷/۴، ۸/۷ و ۹/۵ بررسی شده است.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۵	نتایج و بحث: زمان تزریق جت، پارامتر β_L (پارامتری شبیه به ضریب بوسینسک در معادله مومنوم) در پرش S تلاطم و پراکندگی کمتری نسبت به پرش T داشته و نشان می‌دهد که استفاده از سیستم تزریق جت متقاطع می‌تواند به‌عنوان یک ائتلاف‌کننده جریان باعث یکنواختی جریان گردد. همچنین باعث می‌گردد مومنتم جریان ($\beta_L \cdot Vm^2$) در مقطع واگرای ناگهانی در ابتدای کانال کاهش بسیار زیادی به سمت انتهای کانال داشته باشد.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰	نتیجه‌گیری: استفاده از سیستم جت متقاطع و جت متقابل با استفاده از زوایای مختلف می‌تواند به‌طور قابل ملاحظه‌ای باعث کاهش تلاطم و فرسایش کانال شده و باعث کنترل پرش هیدرولیکی نامتقارن گردد و توزیع سرعت جریان را در طول کانال یکنواخت نماید.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۹	
کلیدواژه‌ها: جت‌های متقابل و متقاطع پرش‌های S و T مستهلك کننده انرژی واگرایی ناگهانی	

* نویسنده مسئول، Email: j.ahadiyan@scu.ac.ir

استناد: رهنمائی، مصطفی؛ احدیان، جواد؛ شفاعی بجستان، محمود؛ و سجادی، سید محسن (۱۴۰۵). بررسی آزمایشگاهی تأثیر تغییر زاویه جت متقاطع همراه با جت متقابل در کنترل پرش هیدرولیکی نامتقارن S و T. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*.

<http://doi.org/10.22034/nawee.2025.498882.1130>

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه گنبد کاووس.



مقدمه

جلوگیری از هدررفت انرژی جریان در علم هیدرولیک یک عامل بسیار مهم است. همچنین کاهش و یا افزایش آن نیز می‌تواند آسیب‌های جدی به سازه‌های هیدرولیکی وارد نماید. به همین دلیل باید با ایجاد سازه‌هایی مشخص باعث یکنواختی خطوط جریان در طول کانال می‌شود (Chow, 1959). انرژی لازم برای بهره‌گیری از پرش هیدرولیکی در پایین دست سدها از حوضچه‌های آرامش و مستهلک‌کننده‌ها به دست می‌آید (Hajjaligol, et al., 2023; 2024). همچنین برای کنترل پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش می‌توان از بلوک‌های پای تند آب، آرام‌کننده و آب، ایجاد زبری در کف، شیب‌شکن‌ها و جت‌های افقی مستغرق استفاده کرد (Sajjadi et al., 2024)، (Ahadiyan, et al. 2024). پرش‌های هیدرولیکی، همراه با ایجاد گردابه‌های بزرگ مقیاس، اتلاف انرژی، ایجاد جاباب هوا در ارتباط با جریان‌های فوق بحرانی در سرریز سدها است (Blevins, 1984) و (Chow, 1959).

شبیه‌سازی عددی جت‌های آب متلاطم با سرعت بالا در هوا و اعتبارسنجی آن با داده‌های تجربی در پژوهش‌های پیشین گزارش نشده است. بنابراین هدف شبیه‌سازی فیزیکی این جت‌های آبی پرسرعت و مقایسه نتایج با کارهای تجربی موجود است. جت‌های آب با سرعت بالا در جو اطراف توسط فرایندهای انتقال جرم و حرکت پخش می‌شوند. هوا به جریان جت وارد می‌شود و کل فرآیند به پخش شدن جت و کاهش فشار بعدی کمک می‌کند. از این‌رو مسئله فیزیکی در دسته جریان‌های چند فازی است که برای شبیه‌سازی مسئله، انتقال جرم و تکان تعیین می‌شود. با استفاده از مدل‌های تلاطم چندفازی اوپلری و $k-\epsilon$ ، به‌علاوه یک مدل عددی جدید برای انتقال جرم و حرکت، شبیه‌سازی به دست آمد. نتایج به‌طور منطقی فیزیک جریان جت‌های آب پرسرعت در هوا را پیش‌بینی می‌کند (Guha et al., 2010).

بررسی اندازه‌گیری سرعت در جت‌های هوا-آب با سرعت بالا را انجام داد. جت‌های متلاطم با سرعت بالا اغلب در سازه‌های هیدرولیکی برای اتلاف انرژی و القاء یا تقویت هواکش استفاده می‌شوند. به‌عنوان مثال می‌توان به پرش‌های اسکی و دستگاه‌های هوادهی پایین اشاره کرد. این تحقیق اندازه‌گیری‌های جدید غلظت هوا و سرعت انجام شده در منطقه توسعه جریان جت‌های آبی با سرعت بالا را ارائه می‌کند. اندازه‌گیری‌ها با استفاده از یک کاوشگر رسانایی دو سر به دست آمد. داده‌ها با پروفایل‌های غلظت هوای تحلیلی مشتق شده از معادله انتشار، و پروفیل‌های سرعت نظری لایه‌های برشی آشفتگی مقایسه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که رابط جت پایین‌تر که به صورت $C = 7.90\%$ تعریف می‌شود، با خط ساده گرادیان حداکثر سرعت مطابقت دارد. (Chason, 1993). پرش هیدرولیکی نوع T در این نوع پرش پنجه جت آب در بالادست مقطع و در پایین دست مقطع در قسمت عریض رخ می‌دهد. و بعضی وقتها در قسمت کم عرض کانال به وجود می‌آید. پرش نوع T بستگی به محل تشکیل پرش و فاصله آن تا محل تغییر مقطع ممکن می‌تواند به صورت متقارن یا نامتقارن باشد. هرچه فاصله پنجه جت پرش تا محل تغییر مقطع بیشتر باشد، جریان بیشتر متقارن خواهد شد (Hager, 1992). تحقیقات بسیاری توسط محققان مختلف تاکنون در کانال با مقطع تنگ‌شدگی ناگهانی (واگرا) برای کنترل اثر انواع پرش هیدرولیکی صورت گرفته است، نتایج به دست آمده از استفاده زبری بستر کانال پس از مقطع واگرای ناگهانی می‌تواند باعث یکنواختی جریان در پایین دست کانال گردد (Bremen, 1990).

حوضچه آرامش سازه‌ای برای کنترل پرش هیدرولیکی در پایین دست دریاچه‌ها، سرریزها و ... است. در محل‌هایی که عمق پایاب کم است، به منظور محدود کردن پرش در حوضچه، واگرا نمودن مقطع حوضچه روش مناسبی برای این منظور است. مطالعات پیشین نشان داده است که واگرایی ناگهانی مقطع افزایش طول پرش نسبت به پرش کلاسیک خواهد شد؛ از سویی وجود زبری بستر با ایجاد تنش برشی طول پرش را کاهش می‌دهد؛ لذا در این تحقیق نتیجه بررسی وجود زبری در کف حوضچه با واگرایی ناگهانی متقارن با نسبت بازشدگی 0.67 و 0.33 و مقایسه با تاثیر نسبت بازشدگی مقطع است (نیسی و همکاران، ۱۳۹۳).

جهش هیدرولیکی یک پدیده جالب در علم مهندسی آب است. در اینجا جریان سیال از حالت فوق بحرانی به حالت زیر بحرانی تبدیل می‌شود. در این پدیده افت انرژی در بسیاری حالات بالا است و بخاطر این موضوع جهش هیدرولیکی در بسیاری

از سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی به کار گرفته می‌شود. امروزه جهش هیدرولیکی در کانال‌های شیب دار بسته کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است و دلیل آن مسایل ناشناخته علمی است که در این موضوع نهفته است. تحقیقاتی در گذشته محدود به یافته‌های آزمایشگاهی در کانال‌های بسته مستطیلی و با شیب‌های کم را دربرمی‌گیرد. این یافته‌ها محدود می‌شوند به به‌دست آوردن عمق آب بعد از مجرای بسته بر اساس عمق اولیه جهش هیدرولیکی. تحقیق، بر طبق نتایج آزمایشگاهی سایر محققان، جهش هیدرولیکی در یک کانال بسته مستطیلی با شیب‌های مثبت مختلف بررسی شده است. در روش تحلیلی از ۳۳۷۷ سری داده‌ها برای پیش‌بینی پارامترها استفاده گردید. در روش تحلیلی عمق ثانویه جهش هیدرولیکی، طول پرش، عمق جریان بلافاصله پس از مجرا و عمق جریان فراتر از خروجی مجرا لحاظ و پیش‌بینی گردید. به دلیل اعتبار بخشی روش تحلیلی از داده‌های آزمایشگاهی دیگران مربوط به عمق آب فراتر از خروجی کانال مستطیلی استفاده شد و نتایج این دو روش با هم مقایسه گردید، نتایج این مقایسه نشان داد که جواب‌های به‌دست آمده از طریق این روش با نتایج آزمایشگاهی دیگران با هم مطابقت دارند و نتایج خوبی قابل مشاهده است (مریمی و همکاران، ۱۳۹۷).

حوضچه‌های آرامش با جت‌های افقی مستغرق نوع جدیدی از سازه‌های استهلاک انرژی هستند که با هدایت جریان فوق بحرانی خروجی از جت‌ها به پایاب و ایجاد پرش هیدرولیکی مستغرق سبب اتلاف انرژی می‌شوند. مزیت این سازه از بین بردن اثر سرعت زیاد جریان نزدیک بستر و فشار منفی در کف است. در این مطالعه خصوصیات پرش هیدرولیکی برای جت‌های افقی مستغرق با پرش هیدرولیکی کلاسیک مقایسه شد و همچنین روابطی برای خصوصیات پرش هیدرولیکی و میزان استهلاک انرژی در جت‌های افقی مستغرق ارائه شد. آزمایش‌ها در فلومی به طول ۱۵ متر و عرض ۸۰ سانتی متر با مدل جت پنج تایی در دولایه و از جنس پلی وینیل کلراید فشرده و در محدوده اعداد فرود ۱/۵ تا ۵ صورت گرفت. نتایج نشان داد که میزان استهلاک انرژی برای جت‌های افقی مستغرق حدوداً به میزان ۲۵ درصد بیشتر از مقدار نظیر آن در پرش کلاسیک است. طول پرش هیدرولیکی و طول غلتاب برای جت‌های افقی مستغرق بیشتر از پرش کلاسیک است؛ ولی در اعداد فرود بیشتر از چهار، طول غلتاب تشکیل شده بعد از جت‌های افقی مستغرق کمتر از مقدار آن در حالت پرش هیدرولیکی کلاسیک است و با افزایش عدد فرود این مقدار اختلاف نیز افزایش می‌یابد (مرادی و همکاران، ۱۳۹۶).

پیشینه تحقیق

تاکنون مطالعات بسیاری در مورد پرش هیدرولیکی نامتقارن در کانال با مقطع واگرایی ناگهانی توسط بسیاری از محققان انجام شده است (Ohtsu et al., 1999)، (Bremen & Hager, 1994)، (Ferreri & Nasello, 2002)، (Graber, 2006)، (Mossa et al., 2003)، (Alhamid, 2004)، (Matin et al., 2008b)، (Herbrand, 2010)، (Kordi & Abustan, 2012)، (Chen et al., 2014)، (Ahadiyan, et al., 2024)، (Mahjoubi, et al., 2024)، (Davari-) (Dehkordi, et al., 2025)، (Tahmasebipour, et al.2024).

پژوهش‌های دیگر نیز توسط محققان در خصوص اثر ترکیب واگرایی ناگهانی و بستر زیر انجام شده است (Neisi & Bejestan, 2013)، (Daneshfaraz et al., 2019)، (Torkamanzad et al., 2019)، (Ead & Rajaratnam, 2002)، (Scorzini et al., 2016)، (Ahadiyan and Varshosaz, 2018)، (Khedri-Mirghaed, et al., 2018)، (Adeli, et al., 2021)، (Hajjaligol et al., 2021) و (Hajjaligol et al., 2024).

از جدیدترین روش‌های مستهلک‌کردن انرژی پرش هیدرولیکی، استفاده از مکانیزم جت‌های افقی در کف کانال و در جهت مخالف جریان آب بعد از انبساط ناگهانی است (Sharoonizadeh et al., 2021; 2022a; 2022b). در این روش با استقرار جت در کف کانال و در جهت مخالف جریان آب باعث استهلاک انرژی در کف کانال و آرام شدن جریان آب در پایین دست می‌گردد. بسیاری از محققان دیگر نیز از این سیستم برای کنترل پرش نامتقارن استفاده کرده‌اند (Jobson, 1965)، (Tharp, 1966)، (France, 1981)، (Varol, 2009)، (Graber, 2006)، (Ibrahim et al., 2022)، (Alghwail et al., 2020)، (Sharoonizadeh et al., 2022)، (Sajjad et al., 2023).

به کارگیری سیستم تزریق جت آب یکی از روش‌های تنظیم و کنترل پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش است. استفاده از این جت‌ها باعث استهلاک انرژی می‌شود و مشخصات دیگر پرش هیدرولیکی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. این جت‌ها در مدل‌های مختلف توسط محققان مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌اند که در ادامه به توضیح آن‌ها پرداخته شده است.

بررسی تأثیر تزریق جت‌های مستغرق آب به‌عنوان متعلقاتی برای اصلاح پرش هیدرولیکی کلاسیک انجام شده است. جت‌های آب از طریق چهار لوله مسی نیم‌اینچی با فاصله مساوی با طول کل دو اینچ که در سرتاسر کف فلوم قرار داده شده بود، به پرش تزریق شد. زاویه‌های مختلف ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه جت‌های آب آزمایش شد. انرژی مخصوص پرش، طول پرش، عمق پایاب و ویژگی‌های شکل‌گیری موج برای پرش هیدرولیکی با جت‌های مستغرق با پرش هیدرولیکی طبیعی مقایسه شدند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که جت‌های مستغرق در هر زاویه مورد آزمایش، تمایل به کاهش انرژی مخصوص خروجی آب و عمق پایاب مورد نیاز پرش را دارند و نسبت به اصل تکانه حرکت، تأثیر بیشتری نشان می‌دهند. جت‌های مستغرق به اندازه بلوک‌های آرام‌کننده در کاهش طول پرش موثر هستند و در هر زاویه تمایل به کاهش عمق پایاب مورد نیاز پرش دارند (Sharp, 1996). بررسی تجربی خصوصیات جت‌های افقی مستغرق نشان داد که به‌ازای تغییرات در ارتفاع پایاب، الگوی جریان تقریباً پایدار است. این سازه باعث استهلاک بیشتر انرژی و حذف اثرات فشار منفی و سرعت زیاد در کف حوضچه می‌گردد. از طرفی مستغرق بودن جت باعث کاهش اثرات تلاطم سطحی می‌شود که کنترل جریان در پایین دست را راحت‌تر می‌کند. آن‌ها دریافتند که جریان آب خروجی از جت در جهت افقی پایدار و به صورت جریان مستغرق است، هرگاه ضخامت جریان در جهت افق باریک و در جهت عمودی پهن باشد. به علاوه کل جریان جت‌های مستغرق را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که منحنی سطح آب، سرعت در نزدیکی بستر و فشار در کف به‌خوبی با داده‌های آزمایشگاهی همخوانی دارد و بعد الگوی جریان را در این نوع حوضچه با ترکیب داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های عددی بررسی کردند (Dang et al., 2008).

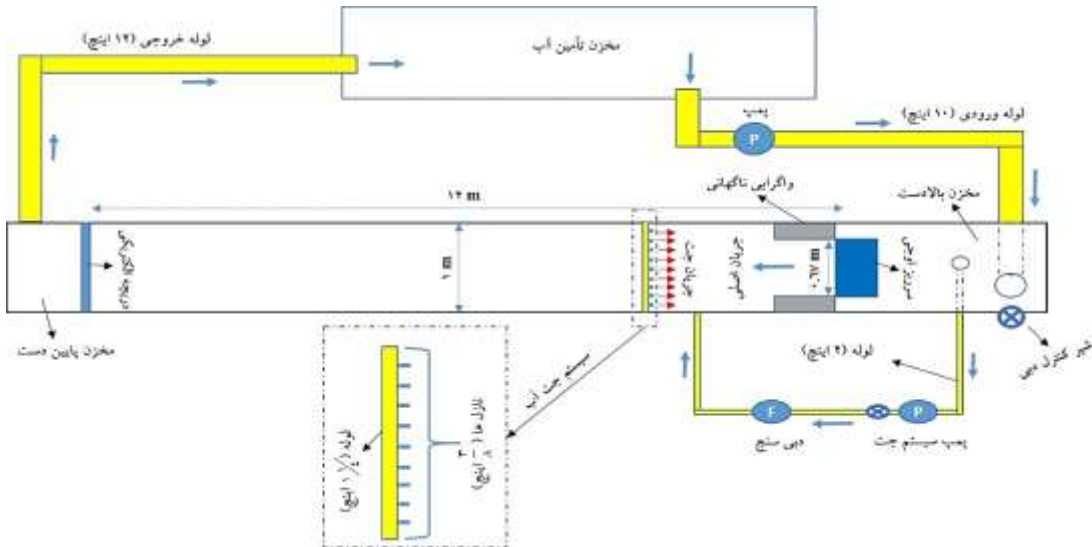
Sharoonizadeh et al (2021) نشان دادند عملکرد سیستم جت معکوس بر روی پرش نوع S در پایین دست یک سرریز اوجی و در یک کانال با مقطع واگرای ناگهانی در محدوده عدد فرود اولیه ۷/۴ تا ۹/۵ با نسبت بازشدگی ثابت دریچه انتهایی کانال در نظر گرفته شد. تعداد نازل‌ها و فاصله جت‌ها، متغیر و با سه مقدار مختلف مشخص گردید. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که اهمیت دو عامل فاصله و شدت سیستم جت در عملکرد آن بسیار زیاد است، به‌نحوی که کمترین فاصله و بیشترین تعداد نازل فعال بهترین نتیجه را در بر داشت. همچنین ملاحظه گردید سیستم جت معکوس از عملکرد قابل قبولی برخوردار است. Haghdoost et al (2022) اثرات استفاده از جریان جت لاترال (LJF) در یک حوضچه آرامش با کانال با مقطع گسترده برای بهبود ویژگی‌های پرش هیدرولیک ی فضایی را بررسی کرده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از LJF با فاصله مناسب از کانال باریک و با تعداد مناسب سوراخ‌های فعال، منجر به بهبود استحکام پرش هیدرولیکی و بهبود الگوی جریان در کانال آب پایین می‌شود. همچنین، استفاده از LJF باعث کاهش میانگین عمق و طول پرش می‌شود.

با بررسی‌های انجام‌شده بر روی نتایج محققان، مشخص گردید که هیچ یک از آنان بررسی بر روی استفاده همزمان از جت متقابل و جت متقاطع یا جانبی با تغییر در زاویه‌های مختلف و در دو ارتفاع متفاوت از کف کانال را بر روی پرش نامتقارن T و S انجام نداده است. در این تحقیق سعی شده است که جهت کنترل پرش هیدرولیکی نامتقارن T و S از جت‌های متقابل در دو جهت کانال با زاویه‌های ۹۰، ۴۵، ۳۰ درجه و در ارتفاع‌های ۰، ۳۵ و ۴۵ سانتی متری از کف کانال و استفاده همزمان از جت متقاطع در کف کانال و در جهت مخالف جریان آب بررسی شود.

روش‌شناسی پژوهش

آزمایش‌ها در یک فلوم در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. این فلوم شامل یک مخزن ورودی جریان در بالادست، یک سرریز Ogee به ابعاد ارتفاع ۰٫۶ و ارتفاع ۰٫۶۷ متر برای تامین انرژی جریان تعبیه شده است. و پس از

سرریز یک انبساط ناگهانی با طول ۰,۶ و عرض ۰,۶۷ ساخته شده است (شکل ۱). طول کانال ۱۲ متر طول، و عرض آن ۱ متر (B) و با عمق ۰,۸۷ متر که دیواره‌های فلوم از پلگسی گلاس و کف آن فلزی است.

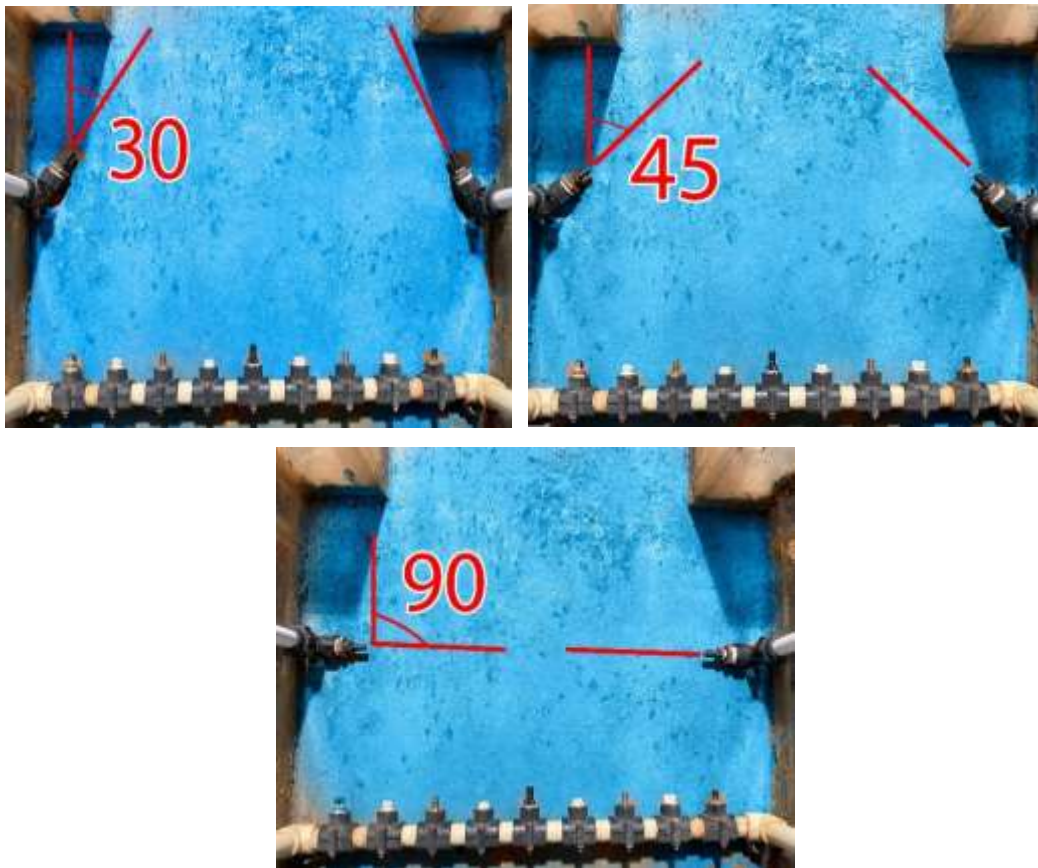


شکل ۱- طرح کلی فلوم آزمایشگاهی

در این تحقیق جت متقابل مستغرق همراه با جت متقاطع (جانبی) به عنوان مستهلک کننده انرژی به صورت همزمان مورد آزمایش قرار گرفته است. مستهلک کننده متقابل با ۵ جت با قطر ۱/۴ اینچ بر اساس تحقیق Haghdoost و همکاران (۲۰۲۱) با زاویه‌های ۳۰، ۴۵، ۹۰ درجه نسبت به جریان در دو طرف کانال با قطر جت ۱/۴ اینچ ثابت و با ارتفاع ۰،۳۵ و ۰،۴۵ سانتی متر نسبت به کف کانال آزمایش انجام شده است. فاصله قرارگیری جت متقابل مستغرق نسبت به مقطع تنگ شدگی کانال (واگرایی ناگهانی) ۶۰ سانتی متر و فاصله جت متقاطع (جانبی) از محل تنگ شدگی (واگرایی ناگهانی) کانال ۲۵ سانتی متر در نظر گرفته شده است. آرایش و نحوه قرارگیری جت‌های متقاطع مستغرق و جت جانبی در شکل‌های زیر نشان داده شده است (شکل ۲).

جت‌های متقابل و متقاطع از لوله با جنس PVC متشکل از شیر کنترل، زانویی و نازل ساخته شده است. جهت اندازه‌گیری دبی جریان ورودی به فلوم با دو روش مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. یک روش با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری فلومتر التراسونیک با دقت ۰,۰۰۱ درصد و روش دوم اندازه‌گیری دبی روی سرریز با استفاده از روش دبی اشل اندازه‌گیری شده است تا دقت انجام آزمایش بالاتر برود. ضمناً محاسبه اعداد فرود در پایین دست سرریز با توجه به عمق اولیه پرش هیدرولیکی (Y1) است.

با توجه به پرش هیدرولیکی تشکیل شده در اثر تلاطم جریان در پایین پنجه سرریز، از (Y1) به عنوان عمق اولیه پرش هیدرولیکی برای محاسبه معادله انرژی در بالادست و پایین دست سرریز مورد استفاده قرار گرفت. پس از آن مقادیر به دست آمده مقایسه شد و نشان داد که دبی ورودی ۳۶,۹، ۴۴,۵ و ۵۶,۳ لیتر بر ثانیه به ترتیب با اعداد فرود ۷,۴، ۸,۷ و ۹,۵ مطابقت دارد.



شکل ۲- نحوه قرارگیری جت‌های متقابل و متقاطع در کف کانال

آنالیز ابعادی

برای رسیدن به نتایج مطلوب در این پژوهش برای ساخت مدل فیزیکی و شناخت رفتار پرش هیدرولیکی نامتقارن و همچنین روش‌های مقابله و کنترل آن، می‌بایست پارامترهای بسیاری بررسی شوند که عبارتند از: متغیرهای مربوط به سیال، متغیرهای مربوط به کانال و متغیرهای مربوط به سیستم جت، که در رابطه ذیل ارائه شده است:

$$F(\rho, g, \mu, V, y_1, y_2, D_j, P, H, b_1, b_2, L_j, \theta, Q_j, Q, \Delta E, E_0, C) = 0 \quad (1)$$

در این رابطه Q دبی عبوری از سرریز، H ارتفاع سرریز، v سرعت آب در هر نقطه، y_1 عمق اولیه قبل از پرش، y_2 عمق ثانویه، p طول مقطع ناگهانی، b_1 عرض مقطع ناگهانی، b_2 عرض کانال، Q_1 دبی خروجی از جت‌ها θ زاویه قرارگیری جت‌ها نسبت به کف کانال، ΔE مجموع انرژی تلف‌شده در سرریز و پرش هیدرولیکی، E_0 انرژی اولیه در بالادست سرریز، μ ویسکوزیته سیال، ρ جرم مخصوص سیال، g شتاب ثقل است. با آنالیز ابعادی به روش π باکینگهام، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\Delta E}{E_0}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{y_2}{y_1} = f\left(Fr_1, \frac{D_j}{y_1}, Q_r, C, \theta, \frac{P}{y_1}, \frac{H}{y_1}\right) \quad (2)$$

عدد رینولدز (Re) به دلیل تلاطم و آشفتگی جریان از معادلات حذف شد. مقادیر H ، T و θ مقادیر ثابتی هستند و Q_r تابعی از Fr_1 است. در نهایت معادله ۲ به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\frac{\Delta E}{E_0}, \frac{L_j}{y_2} = f(Fr_1, \frac{H}{y_2}, \theta) \quad (3)$$

با توجه به پرش هیدرولیکی تشکیل شده در اثر تلاطم جریان در پایین پنجه سرریز، از (Y1) به عنوان عمق اولیه پرش هیدرولیکی برای محاسبه معادله انرژی در بالادست و پایین دست سرریز مورد استفاده قرار گرفت. پس از آن مقادیر به دست آمده مقایسه شد و نشان داد که دبی ورودی ۳۶،۹، ۴۴،۵ و ۵۶،۳ لیتر بر ثانیه به ترتیب با اعداد فرود ۹،۵، ۸،۷ و ۷،۴ مطابقت دارد. برای تامین دبی جریان جت‌ها از یک پمپ مستقل در کنار فلوم استفاده شده که جریان آب آن از کف مخزن فلوم توسط یک لوله PVC مجزا مکش می‌کند. دبی جریان مکش شده توسط پمپ ۴ لیتر بر ثانیه تنظیم شده است. دبی جریان جت‌ها توسط دستگاه فلومتر التراسونیک با دقت ۰،۰۰۲ درصد اندازه‌گیری شده است.

در انتهای فلوم برای تشکیل پرش هیدرولیکی و تامین عمق پایاب از یک دریچه کشویی الکتریکی با مراحل جابه‌جایی ۰،۱ میلی‌متر استفاده شده است.

برای دستیابی به نتایج مورد نظر در این تحقیق آزمایش‌ها به سه صورت تجزیه و تحلیل شده است.

- ابتدا آزمایش‌ها بر روی جریان به صورت مدل شاهد بدون استفاده از جت و قرارگیری آن در فلوم آزمایشگاه بررسی شد و نتایج به دست آمده ثبت و تجزیه و تحلیل گردید.
 - آزمایش بعدی بر روی جریان درون فلوم آزمایشگاه با قرارگیری جت‌ها در درون فلوم آزمایشگاه به صورت غیرفعال و خاموش بررسی و نتیجه ثبت گردید.
 - در مدل نهایی آزمایش‌ها بر روی جریان درون فلوم با تزریق جت‌های متقاطع و متقابل بررسی شد.
- برای انجام آزمایش‌های شاهد دو عمق پایاب تعریف گردید، dT برای پرش نامتقارن T و dS برای پرش نامتقارن S. عمق پایاب توسط دریچه انتهای فلوم تشکیل گردید و در طول فلوم عمق جریان از محل مقطع تنگ‌شدگی نهایی تا انتهای فلوم برای هر دو نوع پرش هیدرولیکی نامتقارن توسط دستگاه پوینت گیج به صورت دقیق اندازه‌گیری گردید.
- برای تشکیل پرش‌های هیدرولیکی S و T میتوان عمق پایاب dT و dS را با تنظیم دریچه انتهایی فلوم و ایجاد نمود، پس از تنظیم نمودن دریچه انتهای فلوم برای تشکیل عمق پایاب dT، پرش هیدرولیکی T در وسط مقطع واگرا تشکیل می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳ - تشکیل پرش T در کف کانال

سپس با تغییر دادن میزان بازشدگی دریچه و بیشتر بازکردن آن در انتهای فلوم و تغییر عمق پایاب از dT به dS، پرش هیدرولیکی S از انتهای مقطع واگرا تشکیل شده و به صورت موج سینوسی به راست و چپ فلوم برخورد می‌کند و تا انتهای فلوم ادامه می‌یابد (شکل ۴). دامنه این امواج در ابتدا بیشتر بوده و دارای جریان‌های برگشتی در قسمت داخلی سینوسی شکل جریان نیز است و هر چه به انتهای فلوم نزدیکتر می‌شود، دامنه جریان کاهش یافته و جریان آرام شده و جریان‌های برگشتی نیز از بین می‌رود.



شکل ۴- تشکیل پرش S در کف کانال

در این تحقیق جمعاً ۱۲ آزمایش شاهد انجام و بررسی شد که از این مجموع ۶ آزمایش بدون قرار دادن مستهلک‌کننده در کانال و ۶ آزمایش با قرار دادن مستهلک‌کننده در کانال، ولی به صورت جت خاموش انجام شد. آزمایش‌های شاهد با قرار گرفتن جت، ولی به صورت خاموش صرفاً برای بررسی تاثیر زبری به وجود آمده در کانال انجام شده است. در ادامه ۵۴ آزمایش بر روی تاثیر جت متقابل مستغرق با استفاده همزمان از جت متقاطع (جانبی) همراه با تغییر زاویه در جت، و در ارتفاع‌های ۰، ۳۵ و ۴۰ سانتی‌متر از کف کانال با در نظر گرفتن اعداد فرود ۹،۵، ۸،۷ و ۷،۴ در دو نوع پرش S و T انجام گردیده است (جدول ۱).

جدول ۱- متغیرها و تعداد آزمایش‌های انجام شده

Model	He (cm)	Q (L/s)	H (cm)	Y_1 (cm)	V_1 (cm)	Y_t (cm)	Angle (Degree)	H (cm)	F_r L/s	Type of Jump	Number of Experiment
Witness without Jets	12	36.88	72	1.5	3.67	10.9	-	-	9.5	S T	6
Deactive Jets	13.7	44.47	73.7	1.8	3.69	14.4	-	-	8.7	S T	6
Active Jets	15.5	56.34	75.5	2.35	3.58	14.4	A1=30 A2=45 A3=90	H1=0 H2=35 H3=45	7.4	S T	54

جدول ۱ نشان‌دهنده خلاصه‌ای از پارامترها شامل دبی جریان از سرریز (Q)، ارتفاع جریان روی سرریز (H)، عمق اولیه قبل از پرش هیدرولیکی (y_1)، سرعت اولیه (v_1)، عدد فرود (F_r)، عمق پایاب (y_t)، ترکیب زاویه‌ها (Angle)، ارتفاع جت جانبی (H)، به‌عنوان بخشی از این تحقیق بررسی شد.

توزیع سرعت در یک کانال باز به صورت غیریکنواخت بر ممتوم جریان تاثیرگذار است و باعث می‌شود که نیروهای خاص از پرش نامتقارن به بدنه کانال برخورد نماید. ممتوم جریال در کانال از رابطه $M=\beta\rho Qv$ به دست می‌آید که در این رابطه β ضریب ممتوم جریان است. P چگالی آب، Q دبی جریان و v سرعت متوسط جریان است (Chow, 1959). اثر سیستم تزریق جریان از طریق جت در جهت کاهش انرژی جریان توسط Scorzini و همکاران (۲۰۱۶) مورد بررسی قرار گرفت. توزیع غیریکنواخت سرعت در یک کانال باز، تکانه جریان را مختل می‌کند و نیروهای نامتقارن بر بدنه کانال اعمال می‌کند. ممتوم سیالی که در واحد زمان از یک کانال می‌گذرد، با رابطه $M=\beta\rho Qv$ بیان می‌شود که β را ضریب ممتوم می‌نامند. ρ چگالی ظاهری آب، Q سرعت جریان، و v سرعت متوسط است (Chow, 1959). اثربخشی سیستم تزریق جت در اتلاف انرژی

جریان با استفاده از دو پارامتر معرفی شده توسط Scorzini و همکاران (۲۰۱۶) ارزیابی شده است. β_L ، v_{mb}^2 و پارامتر معرفی شده β_L از رابطه انتگرالی زیر محاسبه می‌شود:

$$\beta_L = \frac{\int_0^B v(x) \cdot |v(x)| dx}{B \cdot v_m^2} \quad (4)$$

β_L : مقدار یکنواختی جریان و تغییرات سرعت طولی در نزدیکی بستر کانال است. از سوی دیگر، پارامتر $\beta_L \cdot v_m^2$ نیروی دینامیکی جریان را نشان می‌دهد و پتانسیل آبشستگی را بیان می‌کند.

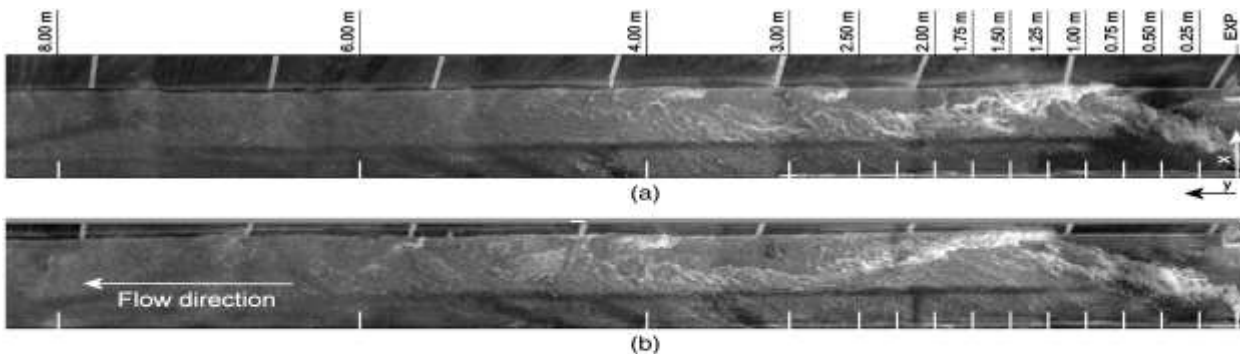
پارامتر دوم، $\beta_L \cdot v_m^2$ ، نیروی دینامیکی جریان (در واحد چگالی ظاهری و سطح) را در بر می‌گیرد و پتانسیل آبشستگی را منعکس می‌کند. این پارامتر برای تجزیه و تحلیل و ارزیابی عملکرد حوضه‌های سکون و سایر سازه‌های هیدرولیکی حیاتی پایین دست بسیار مهم است. در معادله بالا، B عرض کانال، $v(x)$ سرعت طولی جریان در هر نقطه از مقطع در ارتفاع 0.5 سانتی متری از کف کانال است. در این آزمایش، از یک سرعت سنج Micromoline (جریان سنج الکترومغناطیسی Valeport مدل ۸۰۱ با دقت خواندن $0.5\% \pm 5$ میلی‌متر بر ثانیه) برای اندازه‌گیری سرعت در ۹ نقطه با فاصله مساوی در هر مقطع استفاده کردیم. میانگین سرعت جریان نزدیک به پایین برای یک مقطع با V_m نشان داده می‌شود (شکل ۵).



Model 801 -
EM Flow Meter

شکل ۵- سرعت سنج Micromoline الکترومغناطیسی Valeport

در این تحقیق برای مدل شاهد اندازه‌گیری سرعت متوسط در ۱۳ قسمت از فلوم بعد از انبساط ناگهانی در طول فلوم تا انتهای کانال، مطابق شکل (۶-a) اندازه‌گیری شد، و برای مدل اصلی در زمانی که جت درون فلوم قرار داشت و سیستم تزریق جت غیرفعال و فعال بود، صرفاً در دو مقطع 0.5 و 8 متری بعد از محل قرارگیری جت‌ها مطابق شکل (۶-b) سرعت متوسط اندازه‌گیری گردید. ضمناً در هر ۱۳ قسمت از فلوم اندازه‌گیری سرعت در ۹ قسمت در عرض فلوم آزمایش و اندازه‌گیری شد.



شکل ۶- محل اندازه‌گیری سرعت نمونه شاهد

بحث

اثر جت بر جریان

در این مرحله از آزمایش نتایج حاصل از جریان متقابل و متقاطع جت‌ها با جریان در فلوم نشان داده می‌شود. بدین معنی که وقتی جت در فلوم قرار داده نشده است و پرش S و پرش T تشکیل می‌شود، می‌توان با اندازه‌گیری سرعت جریان نتایج را به‌عنوان آزمایش شاهد مشاهده نمود. و پس از آن با قراردادن جت‌ها درون کانال، ولی به‌صورت خاموش، مشاهده می‌شود که وجود جت‌ها مانند یک بستر زیر عمل کرده و می‌تواند تا حدودی پرش را کنترل نماید و این موضوع با مقایسه نتایج اندازه‌گیری سرعت با نتایج قبل کاملاً مشهود است. سپس با قرارگیری جت‌های متقابل و متقاطع در فلوم و فعال نمودن جت‌ها، جریان خارج شده از جت‌ها با جریانی که از سریز در فلوم جریان دارد، باعث افزایش تلاطم و آشفتگی و در نهایت کنترل پرش هیدرولیکی S و T می‌شود. شکل a-۷ نحوه قرارگیری جت‌ها در فلوم و شیوه کار آن را نشان می‌دهد.



شکل a-۷- اندازه‌گیری سرعت با حضور جت خاموش در کانال



شکل b-۷- اندازه‌گیری سرعت جریان با حضور جت روشن در کانال

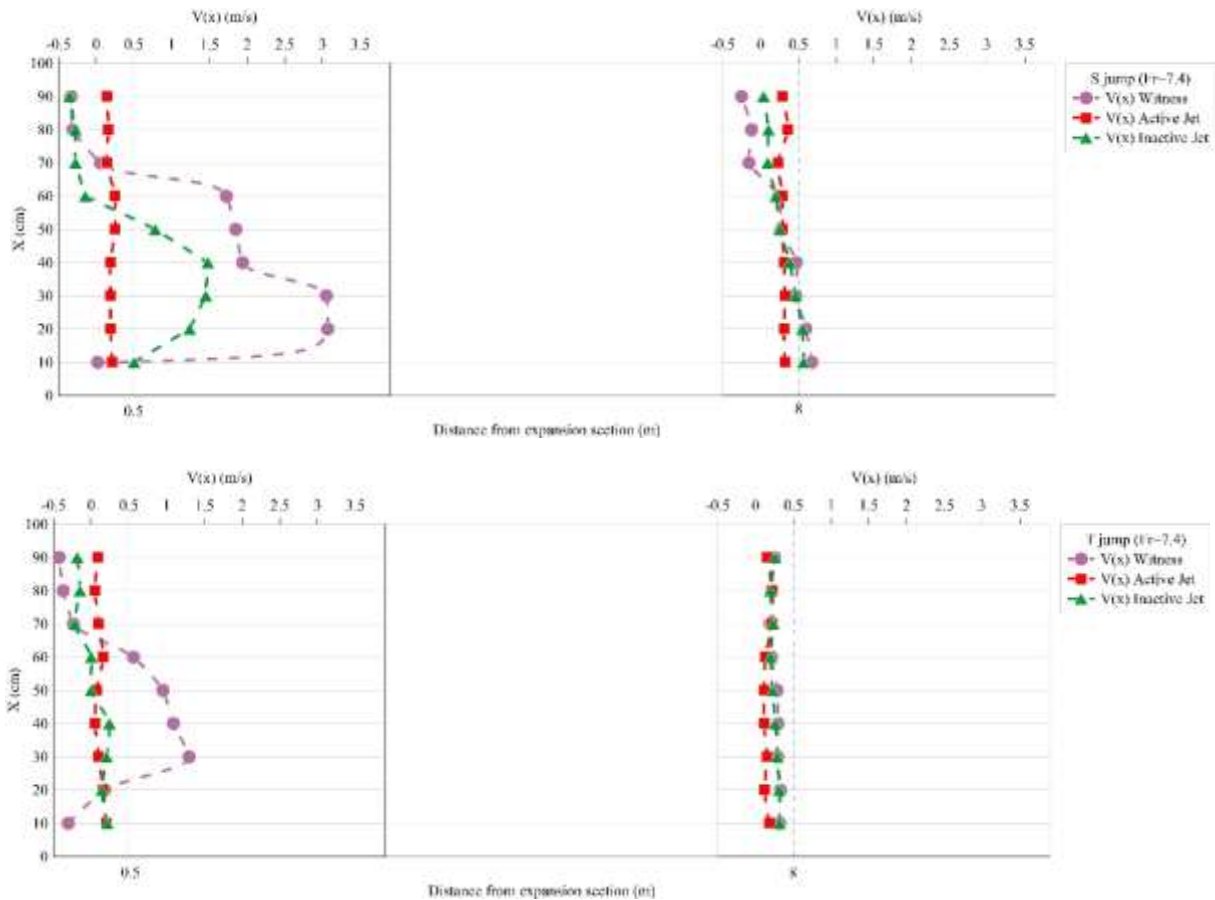
فرآیند انجام آزمایش در شکل a-۷ با حضور جت خاموش و در شکل b-۷ با حضور جت روشن در فلوم (جت‌های متقابل به‌صورت مستغرق و زاویه ۴۵ درجه با ارتفاع ۳۵ سانتی متر از کف فلوم و زاویه ۳۰ درجه با ارتفاع ۳۵ سانتی متر از کف فلوم و زاویه ۴۵ درجه) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها مشخص گردید، پرش نامتقارن T با فعال شدن جت‌های متقابل به شکل قابل توجی کنترل گردید و پس از گذشتن از محل جت‌ها جریان آرام گردید و سرعت جریان نیز کاهش داشت. به همین دلیل بیشترین تمرکز این تحقیق بر روی پرش نامتقارن S است. همان‌طور که گفته شد پارامتر $\beta_L \cdot v_m^2$ نیز نیروی دینامیکی جریان را نشان می‌دهد و پتانسیل آبشستگی را بیان می‌کند. در جدول و نمودار نشان داده شده مربوط به آزمایش‌های شاهد با عدد فرود ۷,۴ با حضور جت ولی غیر فعال، همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقادیر مختلف $\beta_L \cdot v_m^2$ نشان می‌دهد که هرچه از محل مقطع انبساط ناگهانی فاصله گرفته می‌شود اعداد کوچکتر شده در نتیجه باعث کاهش اثر پرش نامتقارن بر بستر کانال است. و نشان می‌دهد عدم یکنواختی جریان به‌طور قابل ملاحظه‌ای بر مقدار $\beta_L \cdot v_m^2$ تاثیر به‌سزایی دارد.

جدول ۲- اندازه‌گیری سرعت بستر موضعی در مقاطع مختلف و β_L و v_m^2 برای $Fr=7.4$ T-Jump (b) S-Jump (a)

Fr	x	10	20	30	40	50	60	70	80	90		β_L	$\beta_L \cdot v_m^2$
7.4-S	0	3.4	3.646	3.362	3.354	3.14	3.302	0.711	0.302	0.3	2.39078	1.3385	76506
	0.25	-0.292	3.119	3.056	2.036	1.024	1.035	1.431	-0.049	-0.291	1.22989	1.9986	30231
	0.5	0.017	3.069	3.049	1.94	1.849	1.723	0.056	-0.31	-0.333	1.22889	2.1089	31847
	0.75	0.03	2.113	1.469	1.849	0.799	0.177	-0.298	-0.359	-0.362	0.602	3.1774	11515
	1	0.567	1.908	2.334	2.069	0.404	-0.279	-0.266	-0.323	-0.37	0.67156	3.3171	14960
	1.25	2.097	2.151	1.876	0.885	0.089	-0.091	-0.252	-0.411	-0.429	0.65722	3.3209	14344
	1.5	2.226	2.169	1.52	0.32	0.048	-0.153	-0.327	-0.449	-0.482	0.54133	4.3644	12789
	1.75	1.938	1.921	1.333	0.269	0.051	-0.174	-0.369	-0.46	-0.541	0.44089	4.9314	9586
	2	1.808	1.543	0.859	0.284	0.107	-0.177	-0.45	-0.553	-0.528	0.32144	6.0878	6290
	2.5	2.057	1.924	1.72	0.721	0.225	-0.051	-0.335	-0.405	-0.657	0.57767	3.5799	11946
	3	2.222	2.105	1.739	1.02	0.443	0.452	0.084	-0.301	-0.484	0.80889	2.2952	15017
	4	1.171	1.057	0.891	0.583	0.2	0.034	-0.306	-0.435	-0.45	0.305	3.7959	3531
6	1.444	0.986	1.02	0.812	0.343	-0.071	-0.158	-0.332	-0.365	0.40878	3.0596	5113	
8	0.679	0.6	0.467	0.474	0.274	0.241	-0.153	-0.121	-0.254	0.24522	2.3917	1438	
10	0.48	0.475	0.265	0.364	0.308	0.164	0.21	0.144	0.05	0.27333	1.2609	942	

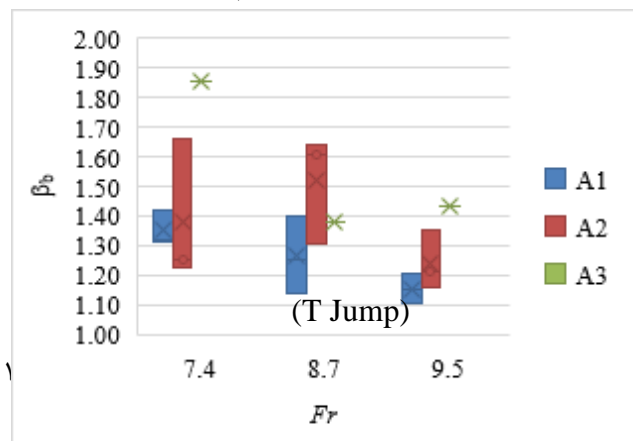
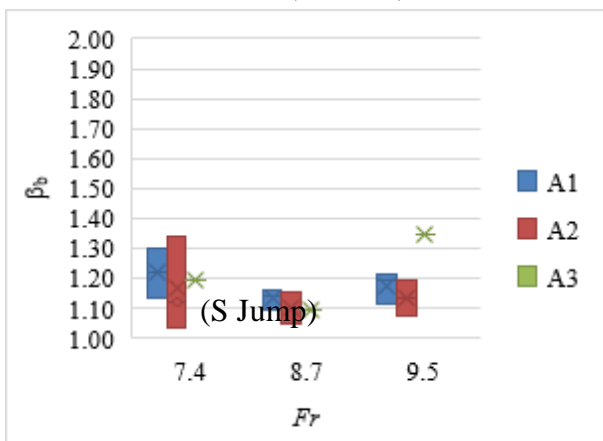
Fr	x	10	20	30	40	50	60	70	80	90		β_L	$\beta_L \cdot v_m^2$
7.4-T	0	0.9	1.039	1.447	1.209	1.546	0.823	0.834	0.868	0.8	1.05178	1.0648	11779
	0.25	-0.423	1.615	1.441	1.358	1.137	1.145	0.297	-0.259	-0.285	0.66956	2.2043	9882
	0.5	-0.305	0.178	1.295	1.091	0.951	0.559	-0.235	-0.371	-0.425	0.30422	4.3812	4055
	0.75	0.209	0.522	1.085	0.769	0.348	0.123	-0.243	-0.476	-0.433	0.21156	4.3393	1942
	1	0.385	0.493	0.741	0.707	0.352	-0.251	-0.286	-0.464	-0.665	0.11244	6.6945	846
	1.25	0.236	0.354	0.372	0.512	0.081	-0.271	-0.268	-0.605	0.66	0.119	4.0205	569
	1.5	0.431	0.525	0.447	0.275	0.223	0.03	-0.183	-0.312	-0.424	0.11244	4.1904	530
	1.75	0.277	0.305	0.297	0.205	0.188	-0.076	-0.21	-0.302	-0.333	0.039	6.0898	93
	2	0.424	0.423	0.379	0.244	0.122	0.053	-0.17	-0.149	-0.178	0.12756	3.3926	552
	2.5	0.594	0.439	0.342	0.144	0.165	0.03	0.011	0.019	0.073	0.20189	1.9551	797
	3	0.553	0.481	0.356	0.341	0.331	0.199	0.056	0.039	0.043	0.26656	1.4635	1040
	4	0.455	0.36	0.281	0.278	0.16	0.154	0.196	0.083	0.069	0.22622	1.2859	658
6	0.304	0.363	0.354	0.282	0.226	0.211	0.149	0.263	0.194	0.26067	1.0689	726	
8	0.318	0.328	0.291	0.296	0.284	0.209	0.189	0.211	0.251	0.26411	1.0331	721	
10	0.264	0.272	0.291	0.281	0.297	0.244	0.221	0.254	0.212	0.25956	1.0116	682	

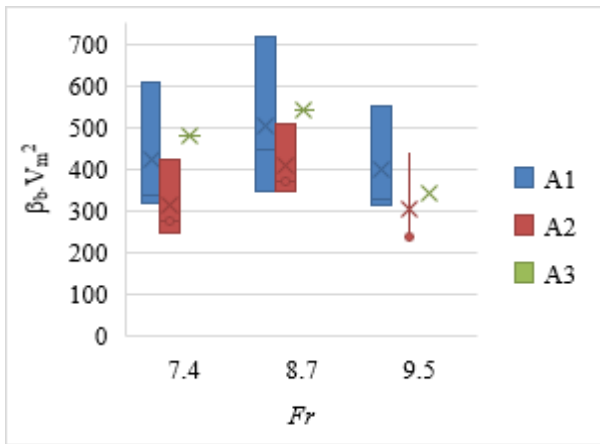
همانگونه که ملاحظه می‌شود یکنواخت نبودن جریان در امتداد فلوم در پرش نامتقارن قابل مشاهده است؛ به طوری که در پرش نامتقارن S برخورد امواج با دیواره‌های فلوم در فاصله ۱٫۵ تا ۲ متری ابتدای فلوم است و پس از آن در فاصله ۲ تا ۳ متری در جهت مخالف برخوردهای قبلی با دیواره‌های فلوم منحرف می‌شود و تا انتهای فلوم با موج‌های مختلف تکرار می‌شود و تا انتهای فلوم که بخش ۸ متری فلوم است ادامه دارد. ولی در پرش نامتقارن T این مسئله برعکس است و پرش در ابتدای فلوم اتفاق می‌افتد و ادامه امواج تا مقطع ۲ متری فلوم از بین می‌رود. و این موضوع نشان می‌دهد که با وجود اینکه پرش نامتقارن T نسبت به پرش نامتقارن S در فاصله کوتاه تری اتفاق می‌افتد، ولی عدم یکنواختی آن به صورت قابل توجهی بیشتر است و دارای پتانسیل بالاتری برای فرسایش و تخریب در شرايط یکسان است. در این تحقیق اثر بخشی تزریق سیستم جت در مدل‌های مختلف بررسی گردید و سپس با نتایج آزمایش‌های شاهد مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت و مقایسه گردید. در زمانی که سیستم جت در فلوم به عنوان یک مستهلک کننده جریان فعال است، اندازه‌گیری سرعت جریان در نقاط ۰٫۵ متر و ۸ متر بعد از محل قرارگیری سیستم جت در طول فلوم مورد بررسی قرار گرفت. در نمودار شکل ۸ پروفیل سرعت اندازه‌گیری شده با عدد فرود ۷٫۴ برای دو مدل شاهد بدون حضور جت، با جت غیرفعال و با جت فعال و بهینه‌ترین حالت جت متقاطع یا جانبی با زاویه ۴۵ درجه آزمایش شده که A2H2 است برای پرش‌های نامتقارن S و T نشان داده شده است.



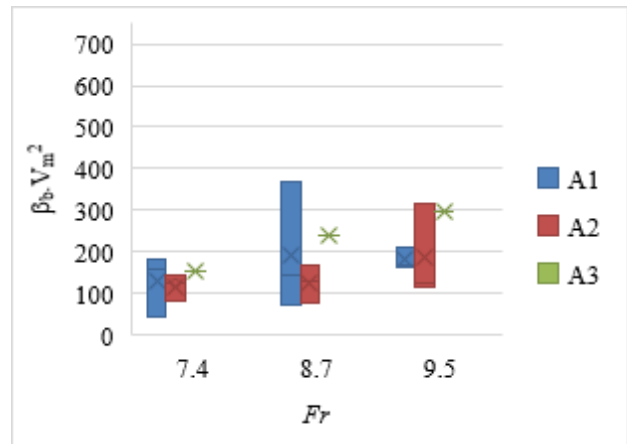
شکل ۸- توزیع سرعت در بستر فلوم برای مدل‌های شاهد و A2H2 در پرش (S) و (T) Jumps

همان‌گونه که در شکل ۸ کاملاً مشهود است تاثیر قابل توجه جت‌های متقاطع (جانبی) را در یکنواخت کردن جریان درون فلوم نشان می‌دهد. پروفیل سرعت جریان در مقایسه با نتایج شاهد کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است، با توجه به وجود جت درون فلوم به صورت غیرفعال که شبیه یک زبری عمل کرده و باعث یکنواخت کردن جریان تا حدودی شده است، ولی با فعال شدن جت‌های متقاطع، جریان‌های برگشتی و منفی نیز به شکل به‌سزایی اصلاح گشته و یکنواخت می‌گردد. در نمودارهای شکل ۹ نتایج مربوط به پارامترهای βL ، v_m^2 و βL در حالت‌های مختلف سیستم تزریق جت بصورت فعال را نشان می‌دهد که همگی مربوط به نتایج آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق است. در این آزمایش‌ها ترتیب قرارگیری جت متقاطع با حالت‌های مختلف شامل ارتفاع جت متقاطع نسبت به کف فلوم ($H_2=35\text{cm}, H_3=40\text{cm}, H_1=0\text{cm}$) با زاویه‌های قرارگیری جت متقاطع نسبت به کف فلوم شامل ($A_3=90^\circ, A_2=45^\circ, A_1=30^\circ$) با اعداد فرود مختلف برای پرش‌های نامتقارن S و T مورد بررسی قرار گرفت. شایان ذکر است که اندازه‌گیری‌های انجام شده در این آزمایش‌ها از ۰.۵ متر بعد از سیستم جت انجام شده است.

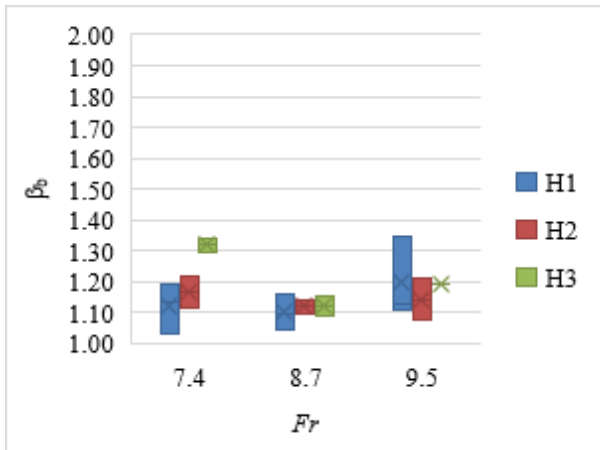




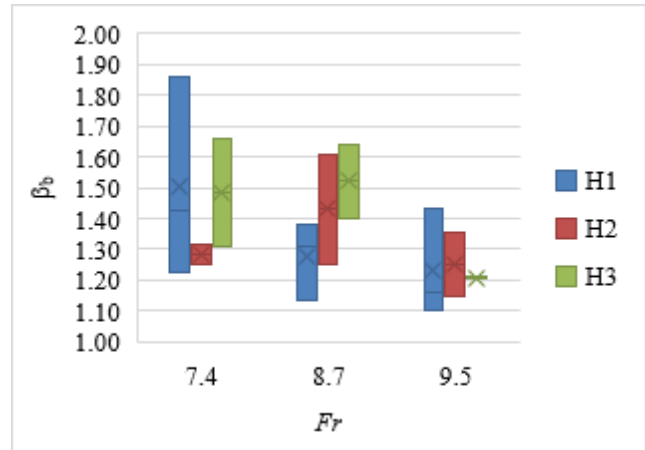
(S Jump)



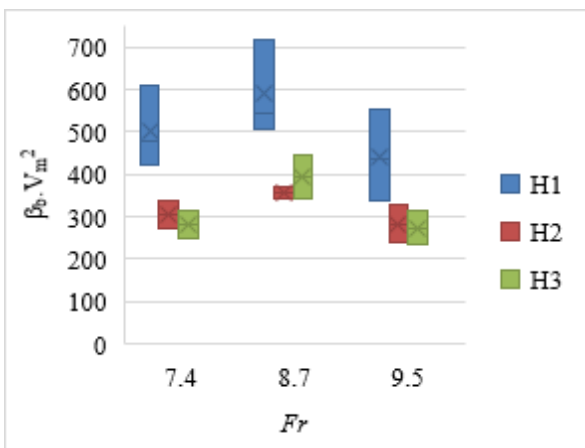
(T jump)



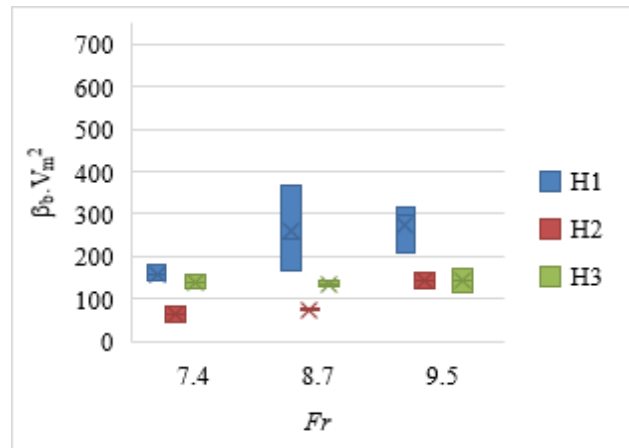
(S Jump)



(T Jump)



(S Jump)



(T Jump)

شکل ۹- β_L و β_m^2 در سیستم تزریق جت فعال در حالت‌های مختلف ارتفاعی و زاویه‌های مختلف در مقابل اعداد Fr برای هر دو نوع پرش نامتقارن هیدرولیکی S و T

نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد در پرش نامتقارن S زمانی که تزریق سیستم جت متقاطع یا جانبی با زاویه ۴۵ درجه و قرارگیری در کف فلوم، نتیجه بهتر و بهینه تری را نسبت به بقیه نتایج به دست آمده دارد. ولی در پرش نامتقارن T این موضوع در عدد فرود بالاتر بهتر نشان داده شده است. جدول ۲ نتایج به دست آمده را برای سیستم جت متقاطع را به صورت خلاصه بیان می کند. این مقادیر پارامترهای به دست آمده β_L و $\beta_L \cdot v_m^2$ را در ۰٫۵ متر بعد از سیستم جت برای پرش نامتقارن S و T را مورد ارزیابی قرار می دهد. مقایسه مقادیر به دست آمده با مقادیر شاهد نشان دهنده اثر بخشی به کارگرفتن مدل های جت متقاطع در دستیابی به جریان یکنواخت است. پارامتر ضریب (β_L) در مدل شاهد از ۱٫۱۵ الی ۶٫۴۵ برای پرش نامتقارن S دارای تغییر بود. و استفاده از سیستم جت متقاطع به صورت قابل توجهی این محدوده را ۱٫۰۳ الی ۱٫۶۶ کاهش داد. و همچنین برای پرش نامتقارن T نیز این مقادیر β_L از محدوده ۱٫۱۰ الی ۱٫۸۶ کاهش یافت. مقادیر به دست آمده از پارامتر $\beta_L \cdot v_m^2$ نیز با کاهش قابل توجه در پرش نامتقارن S و T را نشان می دهد. برای پرش S این محدوده از ۱۶۹ الی ۶۰۸ قرارداد و برای پرش T نیز این محدوده از ۴۵ الی ۷۱۹ است. این مقادیر نشان دهنده کاهش قابل توجه در مقایسه با مقادیر به دست آمده از مدل های شاهد است.

جدول ۲- خلاصه نتایج حاصل از به کارگیری سیستم جت متقابل و جت متقاطع برای مقادیر β_L و $\beta_L \cdot v_m^2$ در فاصله ۰٫۵ متر پس از محل نصب جت برای هر دو پرش S و T

Configura	Diameter	T jump						S jump					
		Fr=7.4		Fr=8.7		Fr=9.5		Fr=7.4		Fr=8.7		Fr=9.5	
		β_L	$\beta_L \cdot v_m^2$	β_L	$\beta_L \cdot v_m^2$	β_L	$\beta_L \cdot v_m^2$	β_L	$\beta_L \cdot v_m^2$	β_L	$\beta_L \cdot v_m^2$	β_L	$\beta_L \cdot v_m^2$
H ₁	A ₁	1.42	181	1.14	719	1.10	210	1.14	608	1.16	367	1.11	552
	A ₂	1.23	142	1.31	509	1.16	314	1.03	422	1.05	169	1.13	435
	A ₃	1.86	155	1.38	543	1.43	296	1.19	477	1.09	240	1.34	339
H ₂	A ₁	1.22	45	1.25	73	1.15	162	1.32	336	1.14	345	1.21	326
	A ₂	1.12	82	1.61	77	1.35	122	1.25	274	1.10	371	1.08	238
	A ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₃	A ₁	1.30	158	1.40	141	1.20	170	1.31	316	1.09	466	1.19	313
	A ₂	1.34	124	1.64	131	1.21	117	1.66	247	1.15	344	1.19	235
	A ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

نتیجه گیری

این تحقیق به بررسی اثر بخشی استفاده همزمان از جت های متقاطع و و جت متقابل در کنترل و تثبیت پرش های هیدرولیکی نامتقارن در کانال پرداخته است. پرش های نامتقارن باعث ایجاد تلاطم و در نتیجه تشکیل امواج با طول موج بلند و دارای سرعت بالا است. در زمان تشکیل پرش های نامتقارن S و T می تواند باعث آسیب جدی به بدنه و کف کانال در طول مسیر در پایین دست وارد کند. با استفاده همزمان از سیستم تزریق جت های متقابل و متقاطع در این تحقیق حتی به صورت غیرفعال مانند یک مانع و زبری عمل کرده و باعث توزیع یکنواخت سرعت جریان در پایین دست کانال شد. و در زمان فعل شدن جت ها این اثر بخشی روی توزیع یکنواخت چندین برابر شده، و با حذف امواج با طول موجهای بلند توانسته است جریان های برگشتی را نیز در کمترین فاصله از محل تشکیل کنترل نماید.

اثر بخشی سیستم تزریق جت با دو پارامتر β_L و $\beta_L \cdot v_m^2$ که مستقیماً با پارامتر سرعت مرتبط است، در این تحقیق بررسی شد. استفاده از جت های متقاطع در ارتفاع های مختلف از کف کانال و با استفاده از زوایای مختلف در این تحقیق مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج حاصل از آن نشان دهنده کاهش بسیار چشمگیر سرعت و نهایتاً توزیع یکنواخت سرعت در طول کانال است. بطوری که مقادیر پارامتر $\beta_L \cdot v_m^2$ برای پرش های S و T که در مدل شاهد ۱۲۱۱۱ و ۱۶۴۹ بود در مدل آزمایش شده سیستم تزریق جت در بدترین حالت از ۷۱۹ الی ۶۰۸ است. به عبارت دیگر، فرسایش بستر به میزان حدود ۲٫۵ برابر کاهش یافته است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

این پژوهش کد اخلاق را به شماره SCH-1403 از کمیته اخلاق دانشکده/دانشگاه مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز دریافت کرده است.

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: نویسنده اول و دوم مقاله؛ تهیه گزارش پژوهش: نویسنده اول و دوم مقاله؛ تحلیل و شرح و بسط بحث داده‌ها: نویسنده دوم، سوم و چهارم

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان‌نامه تقریباً به شکل زیر باشد:

نویسنده اول: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات اولیه، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله.

نویسنده دوم: استاد راهنمای رساله، مسئول پژوهش، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام آزمایش‌ها و طراحی مفاهیم پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، شرح و بسط در خصوص تحلیل و بحث نتایج کسب شده، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده سوم: استاد راهنمای دوم رساله، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

نویسنده چهارم: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد.

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست در قالب پژوهانه رساله دانشجویی و همچنین پژوهانه نویسنده دوم مقاله به شماره SCU-1403 انجام شده است.

سیاسگزاری

از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز و قطب علمی نگهداری و بهسازی از شبکه‌های آبیاری و زهکشی مستقر در دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست به خاطر حمایت مادی و معنوی اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

منابع

مرادی، م.، سجادی، س.م.، محمودیان شو شتری، م. ۱۳۴۸. بررسی آزمایشگاهی خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با پنج جت افقی مستغرق، *مجله علوم و مهندسی آبیاری* 2017.12967. doi: 10.22055/jise.2017.12967. pp. 201-209. (1-1), 40.

مریمی، ا.، بیرامی، م. ک.، محمدپور، ر. ۱۳۹۷. تحلیل پرش هیدرولیکی در مجراهای بسته مستطیلی شیب دار با شیب مثبت با لیلی روش تحلیلی هیدرولیکی. *چهارمین کنفرانس ملی مهندس عمران و معماری با تأکید بر فناوری‌های بومی ایران*.

نیسی، ک.، شفاعی بجزستان، م.، قمشی، م.، کاشفی پور، س.م. ۱۳۹۳. بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش واگرای ناگهانی با بسترزبر. *مجله علوم و مهندسی آبیاری* ۹۳-۸۳. (۲) ۳۷.

Adeli, A., Ahadiyan, J., Ghomeshi, M., Fathi Moghadam, M. 2021. Experimental study of two-phase Air-water Flow Parameters in Hydraulic Jumps with vegetated Rough Bed, *Journal of Ecohydrology*, 8(3), pp. 763-775. doi: 10.22059/ije.2021.327831.1528.

Ahadian, J., Varshosaz, A. 2018. Effect of the Floating Sphere Objects Flexible Bearing Length on the Characteristic of the Hydraulic Jump, *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(1), pp. 297-308. doi: 10.22069/jwsc.2018.12965.2762.

- Ahadiyan, J., Hakami, M., Shafaei Bajestan, M., Sajadi, S. M. 2024. Laboratory investigation of the Effect of a Submerged Jet in a Wavy Bed with a Gradually Diverging Cross-section on the Characteristics of Asymmetric Hydraulic Jump. *MCEJ* 2024; 24 (1) :151-160. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-70953-en.html>.
- Ahadiyan, J., Abbasi Chenari, S., Azizi Nadian, H., Katopodis, C., Valipour, M., Sajjadi, S. M., Omidvarinia, M. 2024. Sustainable systems engineering by CFD modeling of lateral intake flow with flexible gate operations to improve efficient water supply. *International Journal of Sediment Research*, 39(4), 629-642. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.05.003>.
- Alghwail, A.D.A. 2020. Experimental Study of Drowned Hydraulic Jump Characteristics Through Different Counterflow Dimensions. Third Conference for Engineering Sciences and Technology (CEST-2020) 01-03 December 2020, At: Alkhoms – Libya.
- Alhamid, A.A. 2004. S-jump characteristics on sloping basins. *Journal of Hydraulic Research*. 42, 657–662. <https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9628319>.
- Bremen, R. 1990. Expanding stilling basin. ph.D Thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Switzerland.
- Chen, J.G., Zhang, J.M., Xu, W.L., Peng, Y. 2014. Characteristics of the Velocity Distribution in a Hydraulic Jump Stilling Basin with Five Parallel Offset Jets in a Twin-Layer Configuration. *J. Hydraul. Eng.* 140, 208–217 (2014). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000817](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000817).
- Chow VT, 1959. Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill Book Co, New York, NY.
- Ead, S.A., Rajaratnam, N. 2002. Hydraulic Jumps on Corrugated Beds. *J. Hydraul. Eng.* 128, 656–663 (2002). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:7\(656\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:7(656)).
- Chanson, H. 1993. Stepped spillway flows and air entrainment. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 20(3): 422-435. <https://doi.org/10.1139/193-057>.
- Ferreri, G. B., Nasello, C. 2002. Hydraulic jumps occur at a drop and abrupt enlargement in a rectangular channel. *Journal of Hydraulic Research*, 40(4), 491–505. <https://doi.org/10.1080/00221680209499891>.
- France, P. W. 1981. AN INVESTIGATION OF A JET-ASSISTED HYDRAULIC JUMP. *Journal of Hydraulic Research*, 19(4), 325–337. <https://doi.org/10.1080/00221688109499507>.
- Graber, S.D. 2006. Asymmetric Flow in Symmetric Supercritical Expansions. *Journal of Hydraulic Engineering*. 132, 207–213 (2006). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:2\(207\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:2(207)).
- Guha, A., Barron, R. M., Balachandar, R. 2010. Numerical simulation of high-speed turbulent water jets in air. *Journal of Hydraulic Research*, 48(1), 119–124. <https://doi.org/10.1080/00221680903568667>.
- Hager, W.H. 1992. Energy Dissipators and Hydraulic Jump. *Springer Science & Business Media* (1992).
- Haghdoust, M., Sajjadi, S., Fathi Moghadam, M., Ahadiyan, J. 2022. Experimental study of spatial hydraulic jump stabilization using lateral jet flow. *Water Supply*. 22, 8337–8352 (2022). <https://doi.org/10.2166/ws.2022.376>.
- Hajjaligol, S., Ahadiyan, J., Sajjadi, M., Scorzini, A., R., Di Bacco, M.; Shafai Bejestan, M., 2021. Cross-beam dissipators in abruptly expanding channels: experimental analysis of flow patterns. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 147 (11), p.06021012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001622](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001622).
- Hajjaligol, S., Ahadian, J., Sajadi, S. M., Scorzini, A., Shafai Bejestan, M. 2023. Laboratory study of crossbeam structural design in control of asymmetric S-type jump of sudden expansion sections, *Journal of Hydraulics*, 18(1), 19-36. doi: 10.30482/jhyd.2022.333263.1595.
- Hajjaligol, S., Ahadiyan, J., Sajjadi, S. M., Hazi, M. A., Chadee, A. A., Nadian, H. A., Kirby, J. T. 2024. Experimental analysis of turbulence measurements in a new dissipator structure (cross beams) in abruptly expanding channels. *Results in Engineering*, 21, 101829. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101829>.

- Herbrand, K. 1973. The Spatial Hydraulic Jump. *Journal of Hydraulic Research*, 11(3), 205–218. <https://doi.org/10.1080/00221687309499774>.
- Ibrahim, M.M., Refaie, M.A., Ibraheem, A.M. 2022. Flow characteristics downstream stepped back weir with bed water jets. *Ain Shams Engineering Journal*. 13, 101558 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.08.003>.
- Jobson, H. 1965. The effect of submerged jets on the hydraulic jump. Master's Theses. https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/5687.
- Khedri-Mirghaed, P., Ahadiyan, J., Varshosaz, A. 2018. Effect of Suspended Anchored Spherical Energy Dissipator Blocks on Hydraulic Jump Characteristics. *MCEJ 2018*; 18 (5) :61-70. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-12907-en.html>.
- Kordi, E., & Abustan, I. 2012. Transitional Expanding Hydraulic Jump. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(1), 105–110. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000479](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000479).
- Mahjoubi, A., Ahadiyan, J., Sajjadi, S. M., Kashefipour, S. M. 2024. Asymmetric hydraulic jump control in sudden expansion channels using a Jet system, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(10), pp. 1903-1920. doi: 10.22059/ijswr.2024.377718.669725.
- Maryami, A., Bayrami, M. K., Mohammadpour, R. 2018. Hydraulic jump analysis in inclined rectangular closed ducts with positive slope using Lilly hydraulic analysis method. Fourth National Conference on Civil Engineering and Architecture with emphasis on indigenous technologies of Iran·Tehran·<https://civilica.com/doc/837378>. (in persian).
- Matin, M.A., Hasan, M.M.R., Islam, M. A. 2008. Experiment on hydraulic jump in sudden expansion in a sloping rectangular channel. *Journal of Civil Engineering*. https://www.jce-ieb.org/doc_file/3602001.pdf.
- Moradi, M., Sajjadi, S. M., Mahmoodian Shoshtari, M. 1970. Experimental Investigation on Characteristics of Hydraulic Jump in Stilling Basin With Multi-Horizontal Submerged Jets, *Irrigation Sciences and Engineering*, 40(1-1), pp. 201-209. doi: 10.22055/jise.2017.12967. (in persian).
- Mossa, M., Petrillo, A., Chanson, H. 2003. Tailwater level effects on flow conditions at an abrupt drop. *Journal of Hydraulic Research*, 41(1), 39–51. <https://doi.org/10.1080/00221680309499927>.
- Neisi, K., Bejestan, M. S. 2013. Characteristics of S-jump on Roughened Bed Stilling Basin. *Journal of Water Sciences Research*, ISSN: 2251-7405 eISSN: 2251-7413 5(2), Summer 2013, 25-34, JWSR.
- Neysi, K., Shafaebejestan, M., Ghomeshi, M., Kashefipoor, S. 2014. Investigation of Hydraulic Jump Characteristics at Roughened Bed of Sudden Expansion Stilling Basin, *Irrigation Sciences and Engineering*, 37(2), pp. 83-93.
- Sajjadi, S.M., Kazemi, M., Pari, S.A.A., Kashefipour, S.M. 2023. Effect of Submerged Counter Flow Jet on Hydraulic Jump Characteristics in Stilling Basins. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*. 47, 1153–1164 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40996-022-00933-7>.
- Sajjadi, S. M., Esmailzadeh Feridani, F., Ahadiyan, J. 2025. Numerical study of energy loss and S-type hydraulic jump length using cross beams as roughness in sudden expansion, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5(1), pp. 78-97. doi: 10.22126/atwe.2025.11522.1148.
- Sajjadi, S. M., Barihi, S., Ahadiyan, J., Nadian, H. A., Valipour, M., Bahmanpouri, F., Khedri, P., Sajjadi, S. M., Barihi, S., Ahadiyan, J., Nadian, H. A., Valipour, M., Bahmanpouri, F., Khedri, P. 2024. Redesigning the Fuse Plug, Emergency Spillway, and Flood Warning System: An Application of Flood Management. *Water*, 16(24). <https://doi.org/10.3390/w16243694>.
- Scorzini, A.R., Di Bacco, M., Leopardi, M. 2016. Experimental Investigation on a System of Crossbeams As Energy Dissipator in Abruptly Expanding Channels. *J. Hydraul. Eng.* 142, 06015018 (2016). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001088](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001088).
- Sharoonizadeh, S., Ahadiyan, J., Scorzini, A.R., Di Bacco, M., Sajjadi, M., Moghadam, M.F. 2021. Experimental Analysis on the Use of Counterflow Jets as a System for the Stabilization of the Spatial Hydraulic Jump. *Water*. 13, 2572 (2021). <https://doi.org/10.3390/w13182572>.
- Sharoonizadeh, S., Ahadiyan, J., Fathi Moghadam, M., Sajjadi, M., Di Bacco, M. 2022a. Experimental investigation on the characteristics of hydraulic jump in expanding channels with a water jet injection system. *Journal of Hydraulic Structures*. 7, 58–75. <https://doi.org/10.22055/jhs.2022.40233.1203>.

- Sharoonizadeh, S., Ahadiyan, J., Scorzini, A. R., Di Bacco, M., Sajjadi, S. M., Fathi-Moghadam, M. 2022b. Turbulence characteristics of the flow resulting from the hydrodynamic interaction of multiple counterflow jets in expanding channels. *Acta Mech* 233, 3867–3880. <https://doi.org/10.1007/s00707-022-03250-2>.
- Tahmasbipour, M., Azizi Nadian, H., Ahadiyan, J., Oliveto, G., Sajjadi, S. M., Kiyani, A. M. 2024. Experimental Investigation of T-Jump Stabilization Using Water Jets and Sinusoidal Corrugated Beds. *Water*, 16(23), 3513. <https://doi.org/10.3390/w16233513>.
- Tharp, Edward Leon. 1966. Modification of the hydraulic jump by submerged jets. Master's Theses. 5775. https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/5775.
- Torkamanzad, N., Hosseinzadeh Dalir, A., Salmasi, F., Abbaspour, A. 2019. Hydraulic Jump below Abrupt Asymmetric Expanding Stilling Basin on Rough Bed. *Water*. 11, 1756. <https://doi.org/10.3390/w11091756>.
- Varol, F. A. 2009. The Effect of Water Jet on the Hydraulic Jump. Thirteenth International Water Technology Conference, IWTC 13 2009, Hurghada, Egypt.