



Asymmetric hydraulic jump control in sudden expansion channels using a Jet system

Afshin Mahjoubi¹ | Javad Ahadiyan² | Seyed Mohsen Sajjadi³ | Seyed Mahmood Kashefipour⁴

1. Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Center of Excellence of the Network Improvement and Maintenance, Ahvaz, Iran. E-mail: Afshinmahjoubi@yahoo.com.
2. Corresponding Author, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Center of Excellence of the Network Improvement and Maintenance, Ahvaz, Iran. E-mail: j.ahadiyan@scu.ac.ir.
3. Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Center of Excellence of the Network Improvement and Maintenance, Ahvaz, Iran. E-mail: m.sajjadi@scu.ac.ir.
4. Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Center of Excellence of the Network Improvement and Maintenance, Ahvaz, Iran. E-mail: Kashefipour@scu.ac.ir.

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: June. 8, 2024

Revised: July. 15, 2024

Accepted: Aug. 31, 2024

Published online: Dec. 2024

Keywords:

Cross And Counterflow Jets, Asymmetric Hydraulic Jumps, S and T-Jumps, Dissipating Energy Structures, Sudden Expansion.

ABSTRACT

The implementation of a jet system at the intersection of the downstream flow from the ogee weir, following the sudden expansion section, effectively controls the asymmetric jump and promotes uniform flow distribution along the channel. This study employed three jet system configurations, each utilizing a minimum number of jets with varying diameters, to investigate the downstream flow conditions under different S and T jumps and tailwater depths. With the introduction of the jet system, the dispersion and magnitude of the parameter (βL) introduced for the S jump exhibited reduced values compared to the T jump. In essence, the jet system functioned admirably as an energy-dissipating and flow-uniforming structure under more critical conditions. The findings revealed a decreasing trend in the momentum parameter ($\beta L \cdot v m^2$) from the location of sudden expansion (high turbulence) towards the channel end, indicating a reduction in the momentum force acting on the bed. The configuration with the minimum number of jets achieved the most uniform flow distribution, while the jet diameter was found to be dependent on the type of jump (tailwater depth variation). The jump length was significantly reduced compared to the control model with the implementation of the jet system, albeit at the cost of a slight energy loss. The results demonstrate that the utilization of side-facing and opposing jet systems effectively controls the hydraulic jump and promotes uniform velocity distribution in the downstream channel for all tested configurations.

Cite this article: 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), 1903-1920. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.377718.669725>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.377718.669725>





EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The presence of a sudden expansion in open channels often leads to the formation of asymmetric hydraulic jumps. These jumps, while associated with turbulence, energy dissipation, and air entrainment, can be problematic due to their extended domain range. This can cause significant bed erosion, damage to structures, and endanger aquatic life. The cross-flow and counterflow jet system implemented in this research, positioned downstream of the sudden expansion section, aims to reduce pressure fluctuations and turbulence along the channel, promoting flow uniformity.

Material and Methods

The investigation focused on the influence of jet configurations (including the optimal case), jet diameter variations, different tailwater depths, and various Froude numbers on the downstream flow hydrodynamics. Interestingly, even with the active jet injection system, the β_L parameter exhibited lower dispersion and values for S-jumps compared to T-jumps. This suggests that the cross-flow and counterflow jet system performed particularly well as a dissipation structure, achieving more uniform flow under these critical conditions. The findings also revealed a significant decrease in the momentum parameter $\beta_L \cdot v_m^2$ as flow progressed from the sudden expansion towards the canal end. This translates to a reduction in the momentum force acting on the channel bed. However, during the initial stages of wave formation (first or second cycles) observed in the witness model (without any flow control structure), the $\beta_L \cdot v_m^2$ parameter reached its peak alongside the maximum β_L value. Overall, the results demonstrate that the cross-flow and counterflow jet system effectively controls asymmetric hydraulic jumps and promotes uniform velocity distribution throughout the downstream canal section in all tested configurations.

Results and Discussion

A comprehensive review of existing literature revealed a gap in research regarding the application of combined lateral cross-flow and counterflow jets for controlling asymmetric hydraulic jumps. This is particularly true for T-jumps, where existing studies are scarce, and the use of jet systems for their control has not been documented. Motivated by this gap, the present research aims to investigate the effectiveness of the cross-flow and counterflow jet system in controlling both S-type and T-type asymmetric hydraulic jumps. The underlying assumption is that this system will effectively dissipate the jump's energy and promote uniform flow conditions downstream. By extending the investigation to T-jumps, this study contributes valuable insights to a less explored area within the field of hydraulic jump control.

Asymmetric jumps inherently induce flow turbulence and generate long-wavelength waves with high localized velocities. S-type jumps exhibit longer wavelengths, while T-jumps may experience shorter wavelengths but significantly higher non-uniformity. Regardless of type, controlling asymmetric jumps is crucial in real-world scenarios to prevent severe damage to the downstream channel, whether prismatic or non-prismatic.

The configuration with the minimum number of jets achieved the most uniform flow distribution, while the jet diameter was found to be dependent on the type of jump (tailwater depth variation). The jump length was significantly reduced compared to the control model with the implementation of the jet system, albeit at the cost of a slight energy loss.

Conclusion

The cross-flow and counterflow jet injection system employed in this research acts as a barrier to the main flow, promoting the dispersion and uniformity of the velocity distribution downstream. This effectively eliminates waves and return flows. In the witness model (without jet injection), the return flow velocity for the S-jump was approximately twice that of the forward flow, while the T-jump experienced a return flow velocity four times stronger than the forward flow.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

کنترل پرش هیدرولیکی نامتقارن در کانال‌های با مقطع واگرایی ناگهانی توسط سیستم جت

افشین محجوبی^۱ | جواد احدیان^۲ | سید محسن سجادی^۳ | سید محمود کاشفی پور^۴۱. دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: Afshinmahjoubi@yahoo.com۲. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: j.ahadiyan@scu.ac.ir۳. دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: m.sadjadi@scu.ac.ir۴. دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: Kashefipour@scu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

قرارگیری سیستم جت در تقابل و تقاطع با جریان آب پایین آمده از سرریز اوجی پس از مقطع واگرایی ناگهانی، پرش نامتقارن را کنترل کرده و موجب یکنواختی جریان آب در طول کانال می‌شود. در این تحقیق از ۳ ترکیب بندی سیستم جت با هدف بکارگیری حداقلی و ۳ قطر جت استفاده شد و شرایط جریان پایین دست کانال در دو پرش S و T و فرودهای مختلف بررسی گردید. با وجود سیستم جت، پارامتر β_L معرفی شده برای پرش S، پراکندگی و مقدار کمتری نسبت به پرش T دارد. به عبارت دیگر، سیستم جت به عنوان یک سازه کاهنده انرژی و جریان یکنواخت در شرایط بحرانی تر بسیار خوب عمل کرده است. یافته‌ها نشان داد که پارامتر مومنت $\beta_{L.v.m}^2$ از محل انبساط ناگهانی (تلاطم زیاد) به سمت انتهای کانال کم شده است که در واقع، نیروی مومنت بر روی بستر کاهش می‌یابد. ترکیب بندی با تعداد جت حداقل، بیشترین یکنواختی جریان را به همراه داشته و قطر جت وابسته به نوع پرش (تغییر عمق پایاب) می‌باشد. طول پرش با استفاده از سیستم جت به طور قابل توجهی نسبت به مدل شاهد کاهش یافته ولی به افت نسبی انرژی افزوده شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سیستم جت‌های جانبی و متقابل در همه مدل‌های آزمایش شده، می‌تواند به طور قابل توجهی پرش هیدرولیکی را کنترل کرده و موجب توزیع یکنواخت سرعت در پایین دست کانال گردد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۳/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۴/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۱۰

تاریخ انتشار: دیماه ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

انبساط ناگهانی،
پرش هیدرولیکی نامتقارن،
پرش S و T،
سازه‌های استهلاک انرژی،
سیستم جت متقابل و متقاطع.

استناد: محجوبی، افشین؛ احدیان، جواد؛ سجادی، سید محسن؛ و کاشفی پور، سید محمود. (۱۴۰۳). کنترل پرش هیدرولیکی نامتقارن در کانال‌های با مقطع واگرایی ناگهانی توسط سیستم جت، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۵ (۱۰)، ۱۹۲۰-۱۹۰۳. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.377718.669725>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.377718.669725>

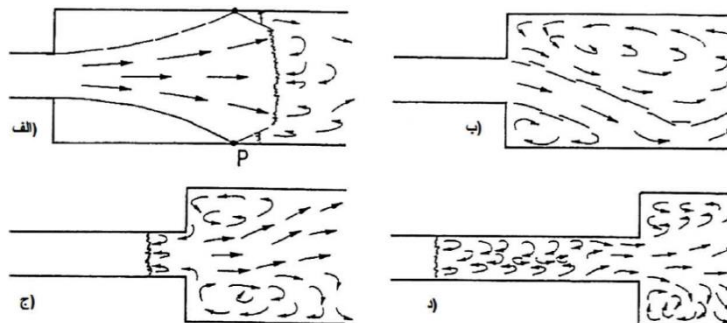
مقدمه

مهمترین کاربرد پرش هیدرولیکی، اتلاف انرژی در پایین سرریزها، دریچه‌ها و غیره است تا از فرسایش ناخواسته در کانال پایین دست جلوگیری شود (Matin et al., 2008a). یکی از چالش‌های اصلی در مهندسی هیدرولیک، حفظ یکنواختی جریان آب در سازه‌های هیدرولیکی، به ویژه در سازه‌هایی با هندسه‌های پیچیده یا جریان‌های با تغییرات مکانی است (HAGER, 1992).

پدیده پرش هیدرولیکی توأم با تلاطم بزرگ مقیاس، پخشیدگی، استهلاک انرژی و ورود هواست. بدین ترتیب از پدیده مزبور جهت کاهش انرژی و سرعت در پایین دست سد یا تندآب با هدف کاهش و کنترل آبشستگی بستر کانال استفاده می‌شود. جهت بهره‌گیری از پرش هیدرولیکی در استهلاک انرژی زیاد جریان در پایین دست سرریز، از سازه‌ای موسوم به حوضچه آرامش استفاده می‌شود (Blevins, 1984)، (Rajaratnam, 1967) و (Chow, 1959). برخی از مکانیزم‌های کنترل پرش در حوضچه آرامش عبارتند از استفاده از بلوک‌های تندآب، آب پایه، جام‌های مستغرق، زبری در کف، واگرایی ناگهانی و جت افقی مستغرق.

هنگامی که رسیدن به عمق مورد نیاز جهت تشکیل پرش هیدرولیکی کلاسیک امکان پذیر نباشد؛ به واسطه‌ی ایجاد یک واگرایی ساده می‌توان پرش را در حوضچه تشکیل داد. در این حالت تشکیل گردابه‌های جانبی سبب اتلاف انرژی جنبشی جریان خواهد شد ((Bremen & Hager, 1993; Herbrand, 1973a; Omid et al., 2007)). هنگامی که جریان فوق بحرانی از یک مقطع منشوری وارد یک مقطع عرضی تر با جریان زیر بحرانی شود پرش هیدرولیکی نامتقارن تشکیل می‌گردد. از مهمترین ویژگی‌های این پرش نیاز به عمق پایاب کمتر می‌باشد. همچنین در این نوع پرش بخشی از انرژی جنبشی توسط گرداب‌های جانبی تشکیل شده مستهلک می‌گردد (Bremen, 1990). هنگامی که کانال ورودی توسط یک سری دریچه کنترل می‌شود اگر فقط تعداد کمی از دریچه‌ها باز شوند به نحوی که عرض کانال ورودی کمتر از عرض کانال پایین دست شود، پرش هیدرولیکی به صورت غیرمنشوری رخ می‌دهد. همچنین خروجی زیرین سد و چندین برابر بودن عرض رودخانه نمونه ای دیگر از تشکیل پرش نامتقارن است.

پرش‌ها در کانال‌های دارای انبساط ناگهانی با توجه به موقعیت پنجه پرش و عمق پایاب تقسیم بندی می‌شوند. پرش هیدرولیکی پس زده موسوم به پرش R بطور کامل در مقطع عرضی رخ داده و بسیار شبیه به پرش کلاسیک است (شکل ۱-الف). با افزایش عمق پایاب پنجه پرش دقیقاً در محل تغییر عرض مقطع کانال قرار گرفته و پرش هیدرولیکی مکانی موسوم به پرش نامتقارن S به صورت یک جت نامتقارن ایجاد و به صورت کاملاً تصادفی به طرف راست یا چپ کانال متمایل می‌شود (شکل ۱-ب). با افزایش بیشتر عمق پایاب، پنجه پرش در بالادست محل تغییر عرض مقطع، پرش هیدرولیکی انتقالی موسوم به پرش نامتقارن T را تشکیل داده که قسمتی از پرش در مقطع کم‌عرض بالادست و قسمت دیگر در مقطع عرضی پایین دست رخ می‌دهد (شکل ۱-ج). پرش نوع T می‌تواند به صورت متقارن و یا نامتقارن بوده و میزان تقارن آن بسته به فاصله پنجه از مقطع واگرا دارد؛ به نحوی که هر چه فاصله مزبور بیشتر شود پرش متقارن تر خواهد شد ((Bremen & Hager, 1993)).



شکل ۱. پرش هیدرولیکی نوع الف (R، ب) S، ج) T و د) کلاسیک

پیشینه پژوهش

تا کنون مطالعات متعددی در خصوص پرش هیدرولیکی در کانال با مقطع واگرا توسط محققین مختلف با انواع مختلف این نوع پرش صورت گرفته است ((Herbrand, 1973b)، (Bremen & Hager, 1994)، (Ohtsu et al., 1999)، (Ferreri & Nasello, 2002)، (Alhamid,



(2004)، (Mossa et al., 2005)، (Graber, 2006)، (Matin et al., 2008b)، (Kordi & Abustan, 2012) و (Arabi et al., 2021). محققین دیگری به بررسی اثر ترکیب واگرایی ناگهانی و بستر زیر پرداختند (Neisi & Bejestan, 2013)، (Daneshfaraz et al., 2019)، (Ead & Rajaratnam, 2002) و (Torkamanzad et al., 2019). (Scorzini et al., 2016)، (Hajjaligol et al., 2021) و (Hajjaligol et al., 2024) از مکانیزم واگرایی ناگهانی و تیرهای عرضی برای استهلاك انرژی بهره بردند که نتایج حاکی از عملکرد قابل قبول مکانیزم مورد نظر و ارتقاء شرایط جریان در بازه پایین دست بود.

یکی از جدیدترین روش‌های استهلاك انرژی به کمک پرش هیدرولیکی، بهره‌گیری از مکانیزم جت‌های افقی مستغرق در حوضچه‌ی آرامش می‌باشد (Sharoonizadeh et al., 2021). در این مکانیزم، جت مستغرق به صورت افقی وارد آب پایین دست شده و سبب ایجاد پرش هیدرولیکی مستغرق می‌گردد. از مزایای این روش، حذف فشار منفی در کف حوضچه می‌باشد. همچنین، تلاطم سطحی جریان کم‌تر و کنترل آن در محدوده‌ی پایین دست بهتر صورت می‌پذیرد (Chen et al., 2014). تحقیقات مختلفی در این زمینه تا کنون صورت پذیرفته است ((Jobson, 1965)، (Tharp, 1966)، (France, 1981)، (Ohtsu et al., 1999)، (Yüksel et al., 2004)، (Graber, 2006)، (Varol, 2009)، (Alghwail et al., 2018)، (Ibrahim et al., 2022)، (Sharoonizadeh et al., 2022) و (Sajjadi et al., 2023). برخی از محققین نیز از مکانیزم جت در مقطع واگرا استفاده کرده اند.

Tharp 1966 از جت مستغرق با استفاده از ردیفی از لوله‌های مسی در کف کانال و با سه زاویه ۹۰، ۶۰ و ۳۰ درجه نسبت به افق استفاده کرد. با اعداد فرود اولیه ۶/۸ تا ۹/۲۵، بهترین عملکرد مربوط به جت ۳۰ درجه بوده و مکانیزم مزبور در کاهش طول پرش تقریباً مانند بلوک‌های آرام کننده عمل کرده است. France 1981 با بهره‌گیری از صفحات روزنه دار در کف کانال با چیدمان، تعداد و قطر و زوایای مختلف برای روزنه‌ها و اعداد فرود اولیه ۴/۲۱ تا ۸/۱۱، مهم ترین عامل در تثبیت پرش توسط سیستم جت را زاویه آن تشخیص داد. (Yüksel et al., 2004) و (Varol, 2009) سیستم جت از بالا را روی کانال با مقطع مستطیلی و با سه زاویه قرارگیری نسبت به افق مورد بررسی قرار دادند. مکانیزم مزبور میزان استهلاك انرژی را تا ۴۵ درصد افزایش داد. Ibrahim et al. 2021 با بهره‌گیری از مکانیزم جت آب در بستر با سه چیدمان مختلف، میزان افت انرژی، خصوصیات پرش، توزیع سرعت طولی و عمق آب در پایین دست یک سرریز پلکانی را مورد بررسی قرار دادند. مؤثرترین حالت وقتی رخ داد که سه ردیف میانی از روزنه‌ها فعال بودند؛ به نحوی که در این حالت میزان افت انرژی به ۷۰/۸ درصد و میزان کاهش طول متوسط پرش به ۴۸ درصد رسید.

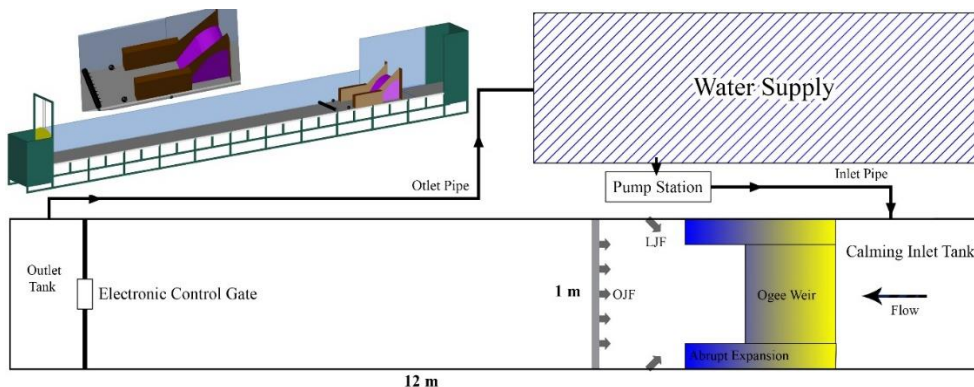
(Sharoonizadeh et al., 2021) به بررسی عملکرد سیستم جت معکوس بر روی پرش نوع S در پایین دست یک سرریز اوجی و در یک کانال با مقطع واگرایی پرداختند. محدوده عدد فرود اولیه ۷/۴ تا ۹/۵ بوده و نسبت بازشدگی ثابت در نظر گرفته شد. تعداد نازل‌ها و فاصله سیستم متغیر و برابر با سه مقدار مختلف لحاظ گردید. نتایج حاکی از اهمیت دو عامل فاصله و شدت سیستم جت در عملکرد آن بود؛ به نحوی که کمترین فاصله و بیشترین تعداد نازل فعال بهترین نتیجه را در پی داشت. همچنین مشاهده شد که سیستم جت معکوس در شرایط مرزی متنوعی که ممکن است در عمل و واقعیت رخ دهد، از عملکرد قابل قبولی برخوردار است. (Haghdoost et al., 2022) در این مقاله تجربی، اثرات استفاده از جریان جت لاترال (LJF) در یک حوضچه آرامش با کانال‌های ناگهان گسترده برای بهبود ویژگی‌های پرش هیدرولیکی فضایی بررسی شده 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 پیاپی و طول پرش فضایی می‌شود و تلفات نسبی انرژی را افزایش می‌دهد.

با بررسی بخش منابع، دریافت شد که هیچ یک از محققین بصورت همزمان از جت جانبی و متقابل جهت کنترل پرش نامتقارن بهره نگرفته و از سیستم جت برای کنترل پرش T استفاده نکرده اند. تحقیق پیشرو بر آن است تا از سیستم جت آبی همزمان به صورت جانبی و متقابل بهره گرفته و عملکرد این سیستم را مورد مطالعه قرار دهد. فرض بر این است که تقاطع و تقابل جریان جت و پرش، منجر به کنترل پرش و ایجاد جریانی یکنواخت در پایین دست به نحوی مؤثر گردد. همچنین با توجه به محدود بودن کارهای مطالعاتی انجام شده بر روی پرش هیدرولیکی از نوع بینابین (T)، اثر توأمان سیستم جت جانبی و متقابل علاوه بر پرش نوع مکانی (S) بر پرش مزبور نیز بررسی خواهد شد.

روش شناسی پژوهش

آزمایشات در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز و در فلو می شامل یک مخزن آرام

کننده جریان در بالادست و یک مخزن خروجی در پایین دست انجام شد. بلافاصله پس از مخزن آرام کننده و در ابتدای کانال، برای تأمین هد آب مورد نیاز، سرریز اوجی فلزی به ارتفاع ۰/۶ متر و عرض ۰/۶۷ متر نصب شده است. جهت تأمین شرایط واگرایی ناگهانی، مقطع تنگ شده با نسبت بازشدگی مقطع به میزان $0.67 (b_1/b_2)$ ، طول ۰/۶، عرض ۰/۶۷ و عمق ۰/۳ متر ساخته شد (شکل ۲). کانال اصلی دارای طول ۱۲ متر، عرض ۱ متر و عمق ۰/۸۷ متر می‌باشد. کف فلوم فلزی و جداره آن از جنس شیشه است.

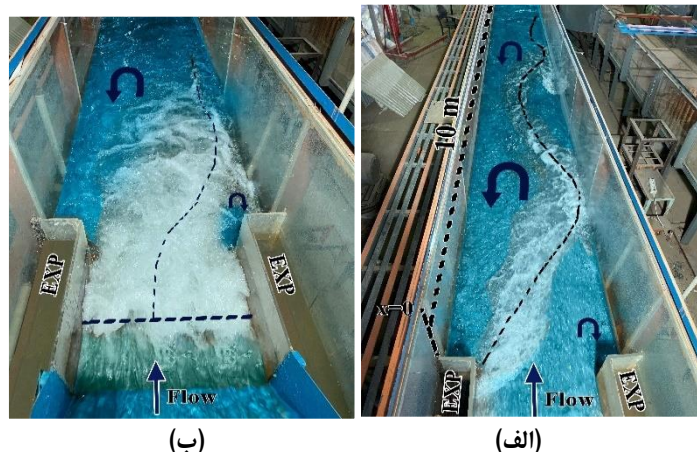


شکل ۲. تصاویر شماتیک از فلوم آزمایشگاهی

سیستم تزریق جت به صورت جانبی (LJF) و متقابل (OJF) در دو طرف کانال و روبروی سرریز اوجی اجرا شد. تعیین دبی ورودی به فلوم بر مبنای ثبت ارتفاع H_e بالادست سرریز اوجی و محاسبه اعداد فرود پایین دست سرریز بر اساس γ_1 تشکیل شده قبل از پرش هیدرولیکی بوده است. بر این اساس با استفاده از معادله انرژی بالادست و پایین دست سرریز اوجی، عمق γ_1 اندازه گیری شده (چندین بار اندازه گیری بدلیل تلاطم زیاد) با رابطه انرژی بررسی و صحت مقادیر اندازه گیری شده کنترل گردید. مقادیر دبی ورودی به فلوم ۳۶/۹، ۴۴/۵ و ۵۶/۳ لیتر بر ثانیه معادل اعداد فرود ۹/۵، ۸/۷ و ۷/۴ در نظر گرفته شده است. مقدار دبی خروجی از جت‌ها در تمامی حالات ۴ لیتر بر ثانیه که معادل به ترتیب ۱۱، ۹ و ۷ درصد دبی کل عبوری از سرریز است در نظر گرفته شد. از یک دریچه کشویی برقی برای کنترل عمق پایاب و تشکیل پرش هیدرولیکی استفاده شد.

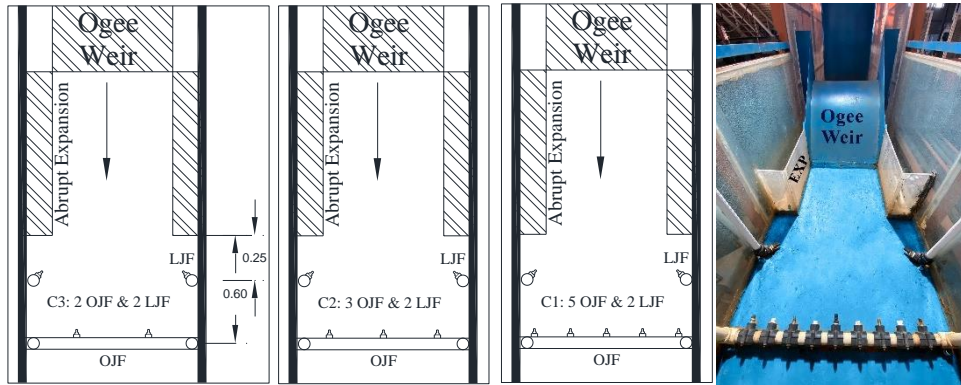
برای تحقق اهداف پروژه و کنترل پرش نامتقارن توسط جت آب، از ۳ مدل شاهد، مدل با جت غیر فعال و مدل با جت فعال استفاده شد. جهت مقایسه مدل‌ها و اثر جت آب بر یکنواختی جریان آب، اعماق پایاب dT و dS برای مدل شاهد و تشکیل پرش‌های نامتقارن T و S به ترتیب در محل انبساط ناگهانی و در محل تغییر عرض مقطع کانال در نظر گرفته شد. تنظیم اعماق پایاب توسط دریچه انتهایی فلوم و برای هر دبی بصورت جداگانه انجام گردید.

در مدل شاهد، با تشکیل عمق پایاب dT ، پرش نامتقارن T در وسط مقطع تنگ شده پدید می‌آید که با امواجی کم قدرت همراه بود. با کاهش عمق پایاب (تشکیل dS)، پرش S در محل انبساط ناگهانی به صورت امواج سینوسی در سمت راست کانال تشکیل می‌شد و جریان‌های ثانویه (برگشتی) در سمت چپ کانال مشاهده می‌شد (شکل ۳).



شکل ۳. تشکیل پرش T (الف) و S (ب) در فلوم برای مدل شاهد

مستهلك کننده انرژی آزمایش شده در این تحقیق از سیستم جت آبی متقابل و جانبی بهره گرفته و عملکرد این سیستم را مورد مطالعه قرار می دهد. این مستهلك کننده از سه ترکیب بندی با ۲، ۳ و ۵ جت بصورت متقابل و درست روبروی جریان آب و همواره ۲ جت جانبی با زاویه ۴۵ درجه نسبت به راستای جریان با قطرهای D1، D2 و D3 ساخته شده است (شکل ۴). فاصله پنجه سرریز تا جت متقابل (۶۰ سانتی متر) بر اساس تحقیق شارونی زاده و همکاران (۲۰۲۱) و فاصله جت جانبی تا محل تغییر مقطع (۲۵ سانتی متر) به انضمام زاویه بهینه آن (۴۵ درجه) از تحقیق حق دوست و همکاران (۲۰۲۱) بهره گرفته است.



شکل ۴. سه ترکیب بندی های بکار گرفته شده در آرایش جت های جانبی (LJF) و متقابل (OJF)

آنیز ابعادی

به منظور دست یابی به اهداف این تحقیق که ساخت مدل فیزیکی برای شناخت رفتار پرش هیدرولیکی و روش های کنترل آن است، ابتدا به شناخت پارامترهای متعددی که به سه دسته متغیرهای هیدرولیکی متغیرهای وابسته به سیال و متغیرهای وابسته به هندسه کانال و سیستم تزریق جت مستغرق چندگانه تقسیم بندی می شوند، اقدام شد. پارامترهای موثر در این آزمایش ها در رابطه ۱ ارائه شده است:

$$F(\rho, g, \mu, V, y_1, y_2, D_j, P, H, b_1, b_2, L_j, \theta, Q_j, Q, \Delta E, E_0, C) = 0 \quad (\text{رابطه ۱})$$

در رابطه بالا، Q دبی عبوری از سرریز، H ارتفاع کل سرریز، V سرعت در هر نقطه، y_1 عمق اولیه قبل از پرش، y_2 عمق بعد از پرش، P طول مقطع تنگنا، b_1 عرض تنگنا، b_2 عرض فلوم، C ترکیب بندی جت های مستهلك کننده، D_j قطر جت ها و Q_j دبی خروجی از سیستم جت، ΔE مجموع تلفات انرژی سرریز و پرش هیدرولیکی و E_0 انرژی اولیه بالادست سرریز است. μ ویسکوزیته دینامیکی آب، ρ جرم مخصوص آب و g شتاب ثقل می باشد. با آنالیز ابعادی به روش π باکینگهام رابطه کلی زیر بدست می آید:

$$\frac{\Delta E}{E_0}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{y_2}{y_1} = f(Fr_1, \frac{D_j}{y_1}, Q_r, C, \theta, \frac{P}{y_1}, \frac{H}{y_1}) \quad (\text{رابطه ۲})$$

عدد رینولدز (Re) به دلیل وجود آشفتگی کامل در پرش حذف شد. مقادیر H ، P و θ ثابت هستند و از آنجایی که Q_r تابعی از Fr_1 بوده و اندازه گیری y_2 دقیق تر و قابل مدیریت تر از y_1 است، معادله ۲ به صورت زیر ساده شد:

$$\frac{\Delta E}{E_0}, \frac{L_j}{y_2} = f(Fr_1, \frac{D_j}{y_2}, C) \quad (\text{رابطه ۳})$$

جمعاً ۶ مدل شاهد بدون حضور مستهلك کننده، ۶ مدل با سیستم جت خاموش جهت بررسی تأثیر زبری ایجاد شده در فلوم و ۵۴ آزمایش برای بررسی مستهلك کننده انرژی جریان با در نظر گرفتن ۳ فرود متفاوت، ۳ آرایش، ۳ قطر و دو نوع پرش نامتقارن T و S انجام شده است (جدول ۱). هدف آزمایشات انجام شده دستیابی به بهترین ساختار مدل مستهلك کننده انرژی جریان برای کنترل پرش نامتقارن و توزیع یکنواخت سرعت در طول و عرض کانال است. در جدول مذکور، Q دبی عبوری از سرریز، H_0 ارتفاع آب روی سرریز، y_1 عمق اولیه قبل از پرش، v_1 سرعت متناظر با عمق اولیه و Q_j دبی خروجی جت اندازه گیری شده اند.

جدول ۱. خلاصه ای از متغیرها و سناریوهای مختلف آزمایشی این تحقیق

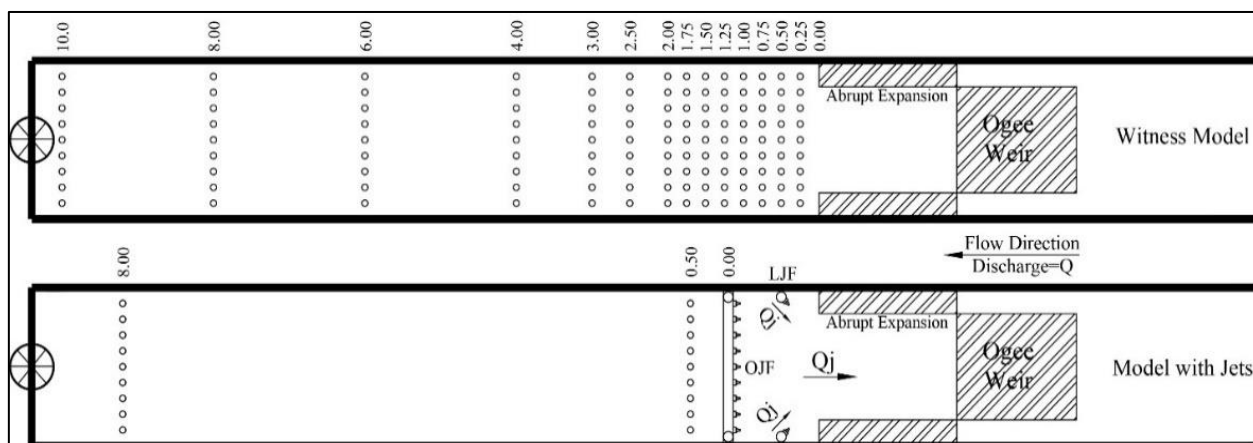
مدل	H _c (cm)	Q (L/s)	H (cm)	Y ₁ (cm)	V ₁ (m/s)	Fr ₁	Configuration	D _j (inch)	Q _j (L/s)	Type of Jump	تعداد آزمایش
شاهد							-	-	-	S T	۶
جت خاموش	۱۲	۳۶/۸۸	۷۲	۱/۵	۳/۶۷	۹/۵	-	-	-	S T	۶
جت روشن	۱۵/۵	۵۶/۳۴	۷۵/۵	۲/۳۵	۳/۵۸	۷/۴	C1: 5 OJF & 2 LJF C2: 3 OJF & 2 LJF C3: 2 OJF & 2 LJF	D1=1/2 D2=3/8 D3=1/4	۴	S T	۵۴

توزیع غیریکنواخت سرعت‌ها بر محاسبه مومنتم در جریان کانال باز تأثیر می‌گذارد. مومنتم سیال عبوری از یک کانال در واحد زمان با $M = \beta \rho Qv$ بیان می‌شود که β به ضریب مومنتم یا ضریب بوسینسک ملقب است؛ ρ جرم مخصوص آب، Q دبی و v سرعت میانگین می‌باشد (Chow, 1959). اثر بخشی مدل جت آب ساخته شده بعنوان مستهلک کننده انرژی جریان با استفاده از پارامترهای β_L و $\beta_m \cdot v_m^2$ معرفی شده توسط (Scorzini et al., 2016) بررسی شده است. β_L پارامتری شبیه به ضریب بوسینسک در معادله مومنتم است که اطلاعاتی در خصوص میزان یکنواختی جریان و سرعت طولی ثبت شده در بخش اندازه گیری شده در مجاورت کف کانال ارائه می‌دهد. $\beta_L \cdot v_m^2$ نیز اطلاعات مربوط به نیروی دینامیکی جریان (بر واحد ارتفاع در عمق اندازه گیری جریان) است و پتانسیل آبستگي را بررسی می‌کند که در ارزیابی عملکرد حوضچه‌های آرامش در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی مهم می‌باشد. پارامتر β_L معرفی شده توسط اسکورزینی و همکاران به شرح ذیل می‌باشد:

$$\beta_L = \frac{\int_0^B v(x) \cdot |v(x)| dx}{B \cdot v_m^2} \quad \text{رابطه ۴}$$

در رابطه (۱) B عرض کانال، پارامتر v_x سرعت جریان در مقطع عرضی کانال و در ارتفاع 0.5 سانتی متر از کف کانال (به علت کمترین عمق آب در کانال در حالت پرش نامتقارن و مدل شاهد) است که در ۹ نقطه عرضی با استفاده از دستگاه سرعت سنج the Valeport Model 801 Electromagnetic Flow Meter with Accuracy $\pm 0.5\%$ of reading plus 5mm/s (Mero & Mitchell, 2017). همچنین میانگین سرعت‌های جریان در مقطع عرضی می‌باشد. هر چه مقدار پارامتر β_L نزدیکتر به عدد یک باشد، شاهد یکنواختی بیشتری در جریان خواهیم بود. همچنین پایین تر بودن پارامتر $\beta_L \cdot v_m^2$ نشان دهنده قدرت کمتر جریان در برابر آبستگي می‌باشد.

تمامی اندازه گیری‌های سرعت برای مدل شاهد در ۱۴ مقطع فلوم (از محل انبساط ناگهانی تا انتهای کانال) و برای مدل با جت خاموش و مدل با جت روشن در دو مقطع 0.5 و 8 متر پس از مستهلک کننده متقابل و در ۹ نقطه عرضی اندازه گیری شده اند (شکل ۵).



شکل ۵. مکان هندسی اندازه گیری‌های سرعت در مدل شاهد و مدل با جت فعال و غیر فعال

بحث

اثر جت بر یکنواختی جریان

با قرار دادن جت‌های خاموش، جت‌ها مانند زیری عمل کرده و اگرچه همچنان تشکیل پرش S بصورت ناقص ادامه دارد اما دامنه امواج آن بشدت کاهش یافته و جریان‌های ثانویه نیز کمتر می‌شود (شکل ۶-ب). با خروج آب از جت‌ها، آنها همانند سدی در برابر جریان پایین آمده از سرریز قرار گرفته و با پدید آوردن پخشیدگی بسیار زیاد در فاصله بین محل انبساط ناگهانی و جت‌ها و بعضاً تشکیل پرش هیدرولیکی آزاد و یا مستغرق در پنجه سرریز اوجی، پرش S را بخوبی کنترل می‌کردند (شکل ۶-ج).



شکل ۶. مراحل تشکیل پرش S تا کنترل آن توسط سیستم جت در مدل شاهد (الف)، مدل با جت خاموش (ب)، جت فعال (ج)

با قرارگیری جت‌ها در مسیر آب، پرش T نیز با داشتن عمق پایاب بیشتر (dT) به نحو چشمگیری کنترل می‌شد و به فاصله کوتاهی پس از جت متقابل، جریانی یکنواخت مشاهده می‌گردید. مهمترین دلیل بررسی پرش T در این تحقیق، بررسی اثر جت در مواقعی بود که عمق پایاب بیشتر از عمق لازم برای تشکیل پرش S می‌باشد.

همانطور که بیان شد پارامترهای β_L و $\beta_L \cdot v_m^2$ جهت اثر بخشی سیستم جت بلحاظ یکنواختی جریان در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین با اندازه‌گیری سرعت‌های موضعی در مقاطع عرضی و استفاده از رابطه (۴)، پارامترهای مذکور محاسبه شدند. شکل (۷) اندازه‌گیری‌های سرعت را در ۹ نقطه عرضی و در ۱۴ مقطع از کانال برای دو مدل پرش شاهد S و T در عدد فرود ۷/۴ نشان داده و سپس مقادیر β_L و $\beta_L \cdot v_m^2$ در زیر هر مقطع آورده شده است.

با توجه به مقادیر سرعت و پارامترهای مذکور، هنگامی که پرش به دیواره‌های کانال برخورد می‌کند، طبیعتاً غیر یکنواختی در کانال بیشتر می‌شود. در پرش S موج‌ها از محدوده ۱/۵ تا ۲ متر اولیه کانال از سمت راست جریان به دیواره برخورد کرده، از مقطع ۲ تا ۳ متر بر اثر برخورد قبلی از دیواره فاصله می‌گیرند و توالی امواج تا مقطع ۸ متری کانال ادامه می‌یابد. در پرش T نیز این روند در ابتدای کانال اتفاق افتاده ولی امواج بسیار کوچکتر بوده و تا مقطع حدوداً ۲ متری پایان می‌یابند.

در خصوص پارامتر $\beta_L \cdot v_m^2$ می‌توان ملاحظه کرد که مقدار آن با فاصله گرفتن از خروجی سرریز و محل انبساط ناگهانی به سمت انتهای کانال، کمتر می‌شود. این مقدار بصورت میانگین برای اعداد فرود ۷/۴، ۸/۷ و ۹/۵ به ترتیب برای پرش T، ۱۶۴۹، ۷۳۶ و ۶۹۲ و برای پرش S اعداد ۱۲۱۱۱، ۱۰۵۲۷ و ۶۵۳۵ می‌باشد که همانطور که پیداست با افزایش عدد فرود و کاهش جریان ورودی به کانال، پتانسیل آبشستگی نیز کاهش می‌یابد.

بازه تغییرات پارامتر β_L برای پرش T از ۱/۰۱ تا ۷/۰۹ و برای پرش S از ۱/۱۵ تا ۶/۴۵ می‌باشد. همچنین تغییرات $\beta_L \cdot v_m^2$ برای پرش‌های T از ۹۳ تا ۹۸۸۲ و برای پرش S از ۷۴۵ تا ۳۲۴۹۴ می‌باشد.

10	8	6	4	3	2.5	2	1.75	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25	0
0.5	0.7	1.4	1.2	2.2	2.1	1.8	1.9	2.2	2.1	0.6	0.0	0.0	-0.3	
0.5	0.6	1.0	1.1	2.1	1.9	1.5	1.9	2.2	2.2	1.9	2.1	3.1	3.1	3.6
0.3	0.5	1.0	0.9	1.7	1.7	0.9	1.3	1.5	1.9	2.3	1.5	3.0	3.1	3.4
0.4	0.5	0.8	0.6	1.0	0.7	0.3	0.3	0.3	0.9	2.1	1.8	1.9	2.0	3.4
0.3	0.3	0.3	0.2	0.4	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.4	0.8	1.8	1.0	3.1
0.2	0.2	-0.1	0.0	0.5	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-0.3	0.2	1.7	1.0	3.3
0.2	-0.2	-0.2	-0.3	0.1	-0.3	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	0.1	1.4	0.7
0.1	-0.1	-0.3	-0.4	-0.3	-0.4	-0.6	-0.5	-0.4	-0.4	-0.3	-0.4	-0.3	0.0	0.3
0.1	-0.3	-0.4	-0.5	-0.5	-0.7	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	

1.3	2.4	3.1	3.8	2.3	3.6	6.1	4.9	4.4	3.3	3.3	3.2	2.1	2.0	$\beta_L (-)$
942	1438	5113	3531	15017	11946	6290	9586	12789	14344	14960	11515	31847	30231	$\beta_L \cdot v_m^2$ (cm ² /s ²)

(الف)

10	8	6	4	3	2.5	2	1.75	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25	0
0.3	0.3	0.3	0.5	0.6	0.6	0.4	0.3	0.4	0.2	0.4	0.2	-0.3	-0.4	
0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.3	0.5	0.4	0.5	0.5	0.2	1.6	1.0
0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4	0.7	1.1	1.3	1.4	1.4
0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.2	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	1.1	1.4	1.2
0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.4	0.3	1.0	1.1	1.5
0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.1	-0.1	0.0	-0.3	-0.3	0.1	0.6	1.1	0.8
0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.0	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	0.3	0.8
0.3	0.2	0.3	0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.3	-0.3	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	0.9
0.2	0.3	0.2	0.1	0.0	0.1	-0.2	-0.3	-0.4	0.7	-0.7	-0.4	-0.4	-0.3	

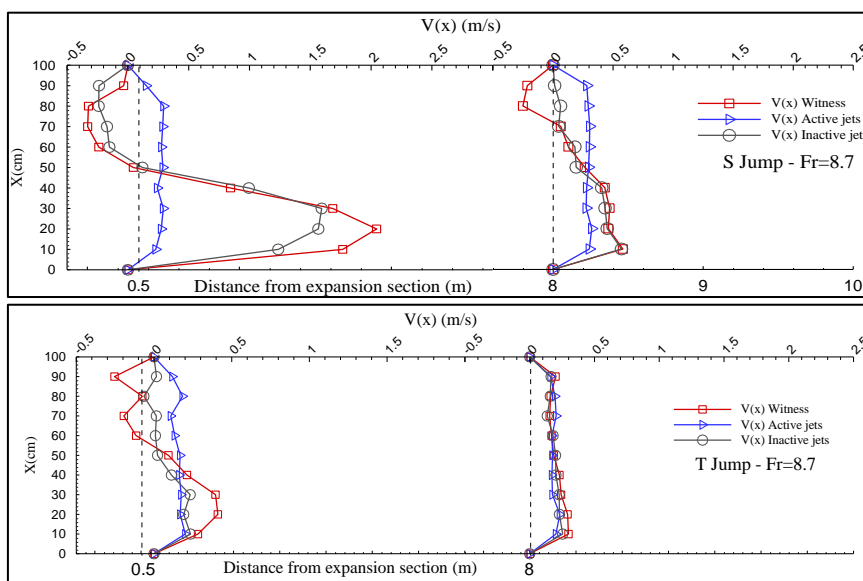
1.0	1.0	1.1	1.3	1.5	2.0	3.4	6.1	4.2	4.0	6.7	4.3	4.4	2.2	$\beta_L (-)$
682	721	726	658	1040	797	552	93	530	569	846	1942	4055	9882	$\beta_L \cdot v_m^2$ (cm ² /s ²)

(ب)

Min=0 Max, Negative Numbers

شکل ۷. اندازه گیری‌های مربوط به سرعت‌های موضعی (متر بر ثانیه) در مقاطع مختلف کانال و اعداد مربوط به پارامترهای $\beta_L \cdot v_m^2$ و β_L برای عدد فرود ۷، ۴ در دو پرش S (a) و پرش T (b). جهت جریان آب از راست به چپ است.

با قرار دادن سیستم جت در مسیر جریان، از این پس کارایی سیستم و اثر پارامترهای متغیر بررسی شده و نتایج حاصله با مدل شاهد مقایسه می‌شود. بدلیل یکنواختی نسبی جریان پس از جت، اندازه گیری‌های سرعت در این بخش فقط در مقاطع ۰/۵ و ۸ متری کانال انجام شده است. در شکل ۸ پروفیل سرعت اندازه گیری شده در مقاطع مذکور در عدد فرود ۸/۷ برای مدل شاهد و مدل مستهلک کننده C3D3 با جت غیرفعال و فعال برای دو نوع پرش S (شکل ۸-الف) و T (شکل ۸-ب) بعنوان نمونه آورده شده است (جهت جریان آب از چپ به راست می‌باشد).



(الف)

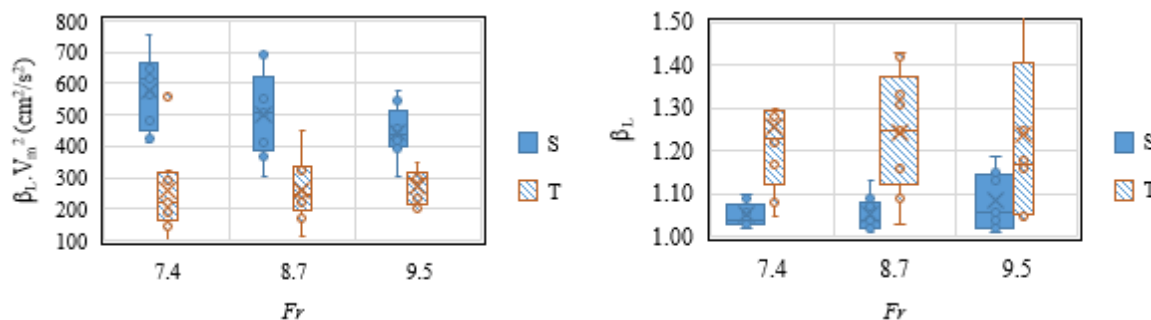
(ب)

شکل ۸. پروفیل‌های سرعت در دو مقطع ۰،۵ و ۸ متر پس از مستهلک کننده در مدل شاهد و مدل C3D3 با جت غیر فعال و فعال در دو پرش S (الف) و T (ب)

شکل ۸ به طور واضح تأثیر قابل توجه جت‌های جانبی و متقابل را بر یکنواختی جریان نشان می‌دهد. پروفیل‌های سرعت حتی زمانی که سیستم تزریق جت غیرفعال است (در واقع مانند یک آستانه عمل می‌کند)، کاهش قابل توجهی در شیب توزیع سرعت را نسبت به مدل شاهد نشان می‌دهند. علاوه بر این، سیستم جت فعال به طور موثری سرعت‌های منفی نشان‌دهنده جریان‌های برگشتی را از بین می‌برد و پراکندگی کلی داده‌های سرعت را کاهش می‌دهد. با توجه به شکل، مبدأ مختصات محل قرارگیری سیستم تزریق جت متقابل است. در مدل شاهد (بدون تزریق جت)، تقریباً نیمی از مقطع در 0.5 متری پایین‌دست، جریان اصلی رو به جلو را تجربه می‌کند، در حالی که نیم دیگر تحت سلطه جریان برگشتی در جهت مخالف است. این الگو برای هر دو پرش S و T صادق است. قابل توجه است که سرعت جریان برگشتی در پرش S تقریباً دو برابر T است که احتمالاً به دلیل افزایش تلاطم و ناپایداری است. با این حال، جریان رو به جلو در پرش S تقریباً چهار برابر قوی‌تر است. برای سیستم جت غیرفعال در پرش S، تقریباً نیمی از مقطع عرضی هر چند با شدت کمتری نسبت به مدل شاهد، تحت تأثیر جریان برگشتی قرار می‌گیرد. این بدان معناست که ۵۰ درصد از مقطع به جریان خروجی اصلی کمک نمی‌کند. در مقابل، برای پرش T با سیستم غیرفعال، کل ۵۰ درصد از مقطع عرضی، سرعت نزدیک به صفر را نشان می‌دهند و اساساً در جریان اصلی شرکت نمی‌کنند. برعکس، سیستم تزریق جت فعال به طور مؤثر جریان برگشتی را کاملاً از بین می‌برد و شرایط جریان بسیار یکنواختی را در کل بستر برای هر دو پرش S و T ایجاد می‌کند. این مشاهده تقریباً در تمام آزمایش‌ها با تغییرات جزئی ۱۰ تا ۱۵ درصدی در یکنواختی مشاهده شد.

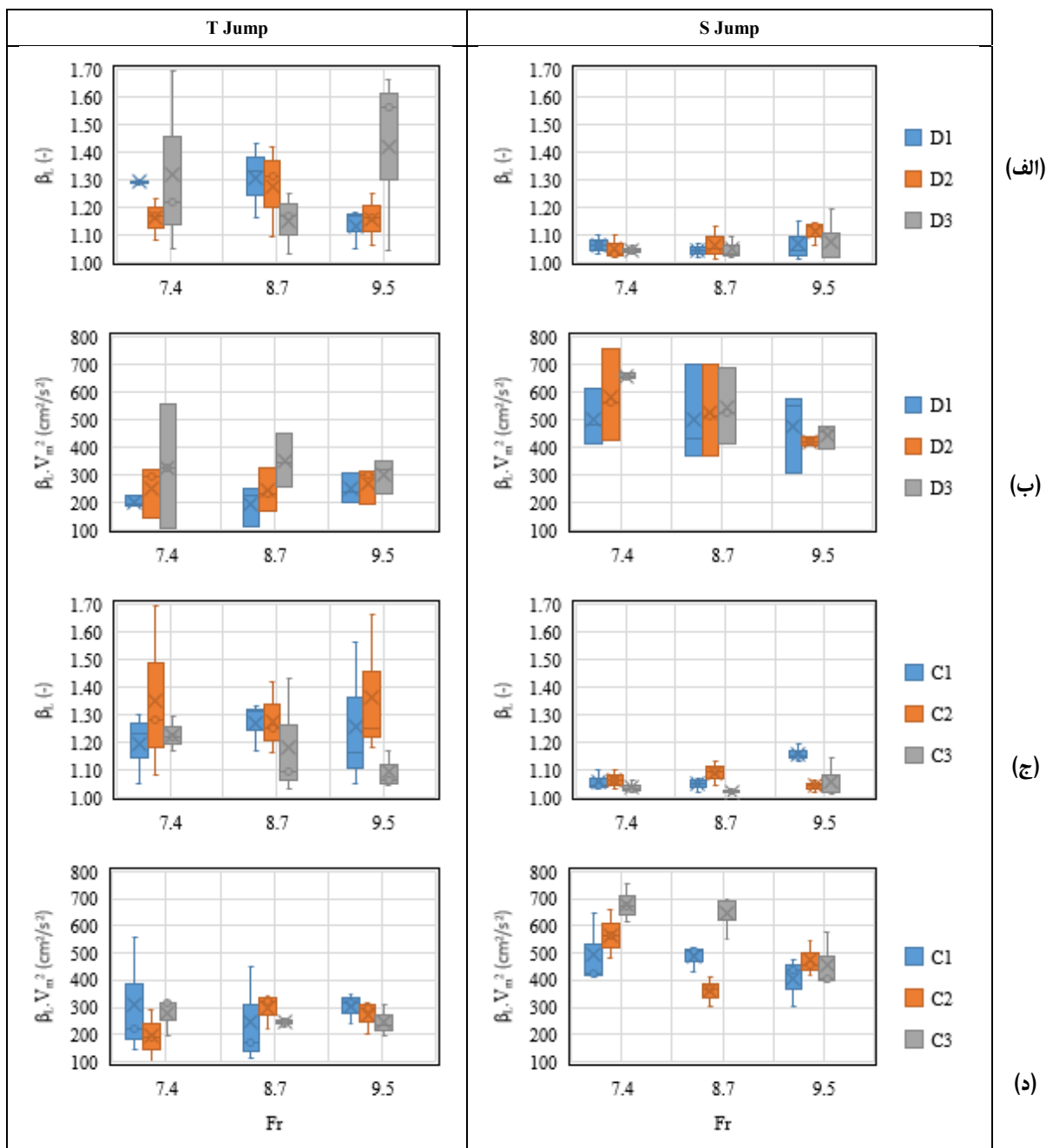
شکل ۹ پارامترهای β_L و $\beta_L \cdot v_m^2$ را برای هر دو پرش S و T در سه عدد فرود ارائه می‌کند. پراکندگی، دامنه متوسط و توزیع این پارامترها نمایش داده شده است. با وجود سیستم تزریق جت فعال، همچنان پراکندگی پارامتر β_L برای پرش S و مقادیر کلی آن در مقایسه با T پایین‌تر است. این نشان می‌دهد که سیستم جت به طور قابل توجهی به عنوان یک سازه اتلاف‌کننده عمل می‌کند و حتی در شرایط چالش برانگیزتر، یکنواختی جریان را ترویج می‌کند. تلاطم ایجاد شده توسط ترکیب جت‌ها، به طور مؤثر یکنواختی جریان را افزایش می‌دهد و پرش نامتقارن را کنترل می‌کند. علاوه بر این، تغییرات پارامتر $\beta_L \cdot v_m^2$ مقادیر پایین‌تری را برای جهش T نشان می‌دهد که نشان‌دهنده پتانسیل کمتر برای فرسایش است.

شکل ۱۰ نتایج پارامترهای β_L و $\beta_L \cdot v_m^2$ را برای سیستم تزریق جت فعال در اعداد فرود مختلف، شامل تمام آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق ارائه می‌کند. این آزمایش‌ها قطرهای جت مختلف، پیکربندی‌های آرایش جت و اعداد فرود را برای هر دو سناریوی پرش S و T بررسی کردند. لازم به ذکر است که محاسبات پارامتر بر اساس مقطعی انجام می‌شود که 0.5 متر پایین‌دست از سیستم تزریق جت اتلاف‌کننده قرار دارد.



شکل ۹. اندازه‌گیری‌های مربوط به پارامترهای β_L و $\beta_L \cdot v_m^2$ برای مدل مستهلک‌کننده با جت فعال در اعداد فرود مختلف و دو پرش S و T

تحقیقات نشان داد که برای پرش S، قطرهای کوچکتر نازل جت که منجر به سرعت‌های بالاتر جت در خروجی می‌شود، در مقایسه با قطرهای بزرگ‌تر عملکرد بهتری را دارند. این روند برای پرش T که پایاب عمیق‌تری دارد، کاملاً ثابت نیست. در پرش T، جت‌های با قطر بزرگ‌تر که در نزدیکی کف کانال قرار می‌گیرند، در اعداد فرود بالاتر کارایی بیشتری را نشان می‌دهند. این احتمالاً به دلیل افزایش سطح توزیع جریان با قطرهای بزرگ‌تر جت است. برای اثبات این مشاهده، نسبت مساحت جریان جت تزریق شده به مساحت جریان اصلی در نظر گرفته شده است. جدول ۲ این نسبت (a/A) را برای سناریوی پرش T در عدد فرود $8/7$ نشان می‌دهد. با توجه به جدول این نسبت با قطر D3 به حداقل مقدار خود می‌رسد. یافته‌ها نشان می‌دهد که برای پرش T، اثرات پراکندگی و عدم یکنواختی جریان به طور کلی با افزایش قطر نازل (از D3 به D1) کاهش می‌یابد.



شکل ۱. اندازه گیری‌های مربوط به پارامترهای β_L و $\beta_L \cdot v_m^2$ برای هر سه قطر و سه ترکیب بندی مدل مستهلک‌کننده با جت فعال در اعداد فرود مختلف و دو پرش S و T

جدول ۲. نسبت سطح مقطع جت‌های آب عبوری (a) به سطح مقطع آب ورودی به فلوم (A) در فرود ۸٫۷ و مقادیر میانگین پارامتر β_L و $\beta_L \cdot v_m^2$ در قطرهای مختلف

D	D1			D2			D3		
C	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
a (A=120.6)	۶/۳۳	۳/۸۰	۲/۵۳	۳/۵۶	۲/۱۴	۱/۴۲	۱/۵۸	۰/۹۵	۰/۶۳
a/A	% ۵/۲۵	% ۳/۱۵	% ۲/۱۰	% ۲/۹۵	% ۱/۷۷	% ۱/۱۸	% ۱/۳۱	% ۰/۷۹	% ۰/۵۲
β_L -T Jump		۱/۲۴			۱/۲۰			۱/۳۰	

در شکل ۱۰-ج ترکیب بندی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ترکیب بندی C3 با داشتن تنها ۴ جت آب (۲ جت متقابل و ۲ جت جانبی) عملکرد بهتری را در هر دو عمق پایاب لازم برای پرش‌های S و T جهت همگن شدن جریان و تثبیت پرش هیدرولیکی داشته



است. همواره سرعت جریان آب در کانال در عمق کمتر پایاب (dS) بیشتر از عمق پایاب dT بوده، بنابراین پارامتر $\beta_L \cdot v_m^2$ در پرش S تقریباً دو برابر پرش T می‌باشد. این مقدار در فرودهای کمتر (دبی بیشتر) بیشتر بوده که بیانگر بالاتر بودن پتانسیل آبشستگی است. جدول ۳ مقادیر میانگین پارامتر β_L در ترکیب بندی‌های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۳. مقادیر میانگین پارامتر β_L در ترکیب بندی‌های مختلف

C	C1			C2			C3			
	Fr	۷/۴	۸/۷	۹/۵	۷/۴	۸/۷	۹/۵	۷/۴	۸/۷	۹/۵
β_L -S Jump		۱/۰۹			۱/۰۶			۱/۰۴		
β_L -T Jump		۱/۲۴			۱/۲۳			۱/۱۷		

تمامی نتایج تحقیقات آزمایشگاهی بدست آمده از مدل جت‌های مستهلک کننده با جت جانبی و متقابل در جدول ۴ با نشان دادن مقادیر پارامترهای β_L و $\beta_L \cdot v_m^2$ در مقطع ۰/۵ متر پس از مستهلک کننده متقابل برای هر دو پرش آورده شده است. اگر مقادیر موجود در جدول با مدل‌های شاهد مقایسه گردد، اثر بخشی مدل مستهلک کننده در یکنواخت شدن جریان مشهود است. پارامتر ضریب مومنتم که در مدل شاهد برای پرش S مقادیری میان ۱/۱۵ تا ۶/۴۵ داشت، مقادیر آن به ۱/۰۱ تا ۱/۱۹ تغییر یافته، همچنین مقادیر پارامتر مذکور در پرش T به ۱/۰۱ تا ۱/۶۹ تقلیل پیدا کرده است.

در خصوص پتانسیل آبشستگی جریان، گفتنی است $\beta_L \cdot v_m^2$ در پرش‌های S و T به ترتیب به محدوده عددی ۳۰۳ تا ۷۵۷ و ۱۰۳ تا ۵۵۶ کاهش یافته که این مقادیر نسبت به مدل‌های شاهد پرش‌های مذکور تغییر قابل ملاحظه‌ای داشته است.

جدول ۴. خلاصه نتایج تحقیقات آزمایشگاهی بدست آمده از مدل جت‌های مستهلک کننده برای پارامترهای $\beta_L \cdot v_m^2$ و β_L در مقطع ۰/۵ متر پس از مستهلک کننده متقابل برای هر دو پرش

ترکیب بندی	D	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	$\beta_L \cdot v_m^2$
C ₁	D ₁	۱/۳۰	۲۲۲	۱/۳۳	۱۱۴	۱/۰۵	۳۳۷	۱/۱۰	۴۱۱	۱/۰۷	۴۳۳	۱/۱۵	۳۰۵
	D ₂	۱/۲۳	۱۴۲	۱/۳۱	۱۶۹	۱/۱۶	۳۱۴	۱/۰۳	۴۲۲	۱/۰۵	۵۰۹	۱/۱۳	۴۳۵
	D ₃	۱/۰۵	۵۵۶	۱/۱۷	۴۴۹	۱/۵۶	۳۵۱	۱/۰۴	۶۴۸	۱/۰۲	۵۲۲	۱/۱۹	۴۷۷
C ₂	D ₁	۱/۲۸	۱۸۷	۱/۱۶	۲۲۲	۱/۱۸	۲۰۱	۱/۰۶	۴۷۹	۱/۰۴	۳۰۳	۱/۰۴	۵۴۸
	D ₂	۱/۰۸	۲۹۲	۱/۴۲	۳۲۶	۱/۲۵	۲۹۹	۱/۰۹	۵۶۱	۱/۱۳	۳۶۵	۱/۰۶	۴۲۰
	D ₃	۱/۶۹	۱۰۳	۱/۲۵	۳۴۱	۱/۶۶	۳۱۶	۱/۰۳	۶۵۷	۱/۰۹	۴۱۲	۱/۰۲	۴۵۷
C ₃	D ₁	۱/۲۹	۱۹۵	۱/۴۳	۲۴۸	۱/۱۷	۳۰۷	۱/۰۳	۶۱۴	۱/۰۲	۵۵۲	۱/۰۱	۵۷۵
	D ₂	۱/۱۷	۳۱۶	۱/۰۹	۲۳۰	۱/۰۶	۱۹۶	۱/۰۲	۷۵۷	۱/۰۱	۶۹۶	۱/۱۴	۴۰۶
	D ₃	۱/۲۲	۳۲۱	۱/۰۳	۲۵۷	۱/۰۴	۲۳۲	۱/۰۶	۶۶۹	۱/۰۳	۶۹۰	۱/۰۲	۳۹۲

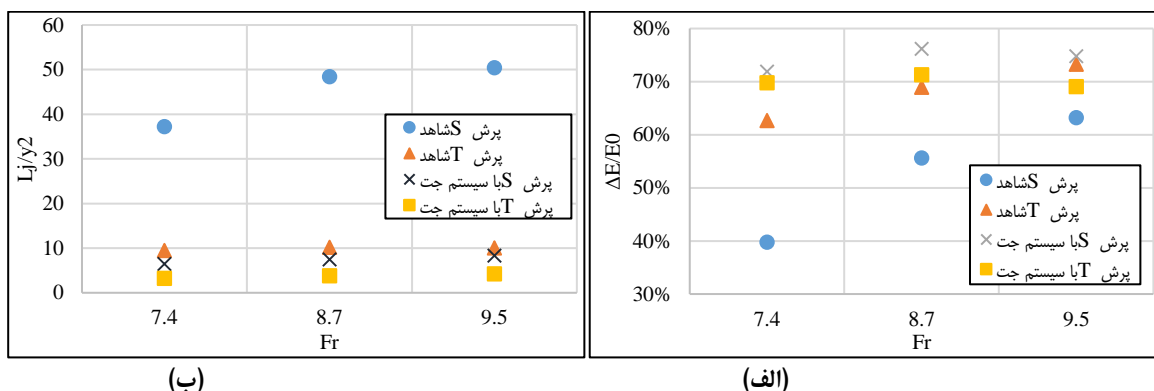
اثر جت بر مشخصات پرش

از میان ترکیب بندی‌های آزمایش شده فوق، مدل C3 به عنوان بهترین ترکیب بندی انتخاب و در سه قطر مختلف، اثر آن بر مشخصات پرش هیدرولیکی بررسی گردید. در شکل ۱۱-الف تغییرات نسبت طول پرش و افت انرژی به عمق بعد از پرش در مقابل عدد فرود در مدل شاهد و سیستم جت جهت بررسی اثر این سیستم با متوسط گیری از قطرهای مختلف در اعماق پایاب dS (برای پرش S) و dT (برای پرش T) رسم شده است.

همانطور که در شکل ۱۱-الف ملاحظه می‌گردد با استفاده از سیستم جت متقابل و جانبی به طور واضح طول پرش کاهش یافته است و این به دلیل وجود جریان آشفته چرخشی در کف و مابین مقطع واگرا و جت بوده که باعث رشد سریعتر لایه مرزی و افزایش تنش‌های رینالدزی گردیده است. تفاوت معنادار در پرش S به علت سرعت بالای جریان است که شرایط کلی نشان می‌دهد سیستم جت خصوصاً در اعماق پایاب کم (dS)، عاملی بر کاهش طول پرش هیدرولیکی می‌باشد.

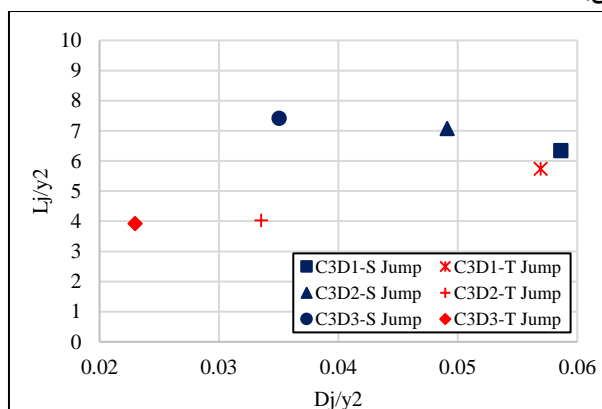
اثر جت در استهلاک نسبی انرژی جریان در مقابل عدد فرود در شکل ۱۱-ب طرح شده است. با توجه به نمودار و ثابت بودن ارتفاع

سرریز، با افزایش عدد فرود (Fr)، مقدار افت نسبی انرژی جریان افزایش می‌یابد. در واقع با کاهش عمق، اثرات زیر لایه ورقه ای بر پروفیل سرعت افزوده شده و تنش برشی وارد بر جریان زیاد می‌شود. بیشتر بودن افت انرژی پرش T شاهد در فرود ۹/۵ نسبت به سیستم جت، به علت افزایش عمق بعد از پرش هنگام استفاده از سیستم جت است. اگرچه افت انرژی مدل شاهد بیشتر است، اما نسبت L_j/y_2 در مدل شاهد تقریباً نصف فعال بودن جت می‌باشد.



شکل ۱۱. تغییرات نسبت طول به عمق پایاب (الف) و درصد کاهش طول پرش (ب) در مقابل عدد فرود در مدل شاهد و سیستم جت (مدل C3)

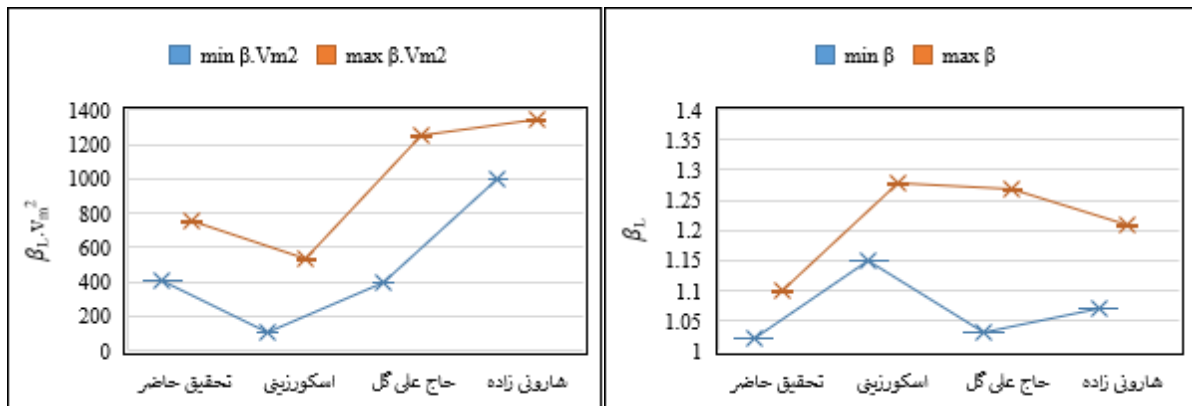
جهت بررسی اثر قطر جت در کاهش طول پرش، شکل ۱۲ نسبت طول به عمق بعد از پرش L_j/y_2 را در مقابل نسبت قطر جت به عمق بعد از پرش D_j/y_2 نشان می‌دهد. با نگاهی به نمودار، برای تغییر روند طول پرش S، با افزایش قطر جت (از D_3 به D_1) با احتساب کنترل پرش روند طول پرش کاهش می‌یابد. در صورتی که در مورد پرش T این روند افزایشی است یعنی با افزایش قطر، طول پرش افزایش می‌یابد. این روند را می‌توان در جدول ۴ و ردیف مربوط به ترکیب بندی C3، با بررسی پارامتر β_L ملاحظه کرد. در واقع افزایش قطر روش مناسبی برای کنترل طول پرش T نمی‌باشد.



شکل ۱۲. تغییرات نسبت L_j/y_2 در مقابل عدد فرود در مدل شاهد و سیستم جت (مدل C3)

مقایسه با تحقیقات دیگران

جهت مقایسه مدل، مقادیر حداکثر و حداقل پارامترهای β_L ، v_m^2 و β_L در این تحقیق با تحقیقات اسکورزینی و همکاران (۲۰۱۶)، حاج علی گل و همکاران (۲۰۲۱) و شارونی زاده و همکاران (۲۰۲۱) مقایسه شده است (شکل ۱۳). تمامی تحقیقات به بررسی کنترل پرش نامتقارن در انبساط ناگهانی کانال پرداخته و یکنواختی جریان در پایین دست کانال را مورد بررسی قرار داده‌اند. نزدیکترین مدل ارائه شده به تحقیق حاضر، مدل شارونی زاده و همکاران (۲۰۲۱) می‌باشد. در تحقیق حاضر نسبت دبی خروجی از جت‌ها به دبی ورودی به فلوم نسبت به تحقیق مذکور، تقریباً نصف شده و علاوه بر بررسی پرش نوع T، مقادیر سرعت منفی (جریان‌های برگشتی) نیز اندازه‌گیری شده است. در شکل ۱۳ به جهت مقایسه بهتر با سایر محققین، از عدد فرود ۷/۴ استفاده شده است. با علم به اینکه این آزمایشات در شرایط مختلف آزمایشگاهی و دامنه‌های مختلف پارامترها انجام شده‌اند و با توجه به روند شکل می‌توان گفت که استفاده از سیستم جت متقابل و جانبی می‌تواند روشی کارآمد به لحاظ یکنواختی جریان و کاهش پتانسیل آبشستگی در مقایسه با دیگر روش‌ها به حساب آید.



شکل ۱۰. مقایسه مقادیر حداکثر و حداقل پارامترهای β_L و $\beta_L \cdot v_m^2$ تحقیق حاضر با تحقیقات دیگر محققین در فرود ۷/۴

نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی اثربخشی جت‌های جانبی و متقابل در تثبیت پرش هیدرولیکی نامتقارن ناشی از انبساط ناگهانی در مسیر کانال می‌پردازد. هدف اصلی دستیابی به همگن‌سازی و یکنواختی جریان در پایین‌دست پرش در کوتاه‌ترین فاصله ممکن است. پرش‌های نامتقارن ذاتاً باعث ایجاد تلاطم جریان و تولید امواج با طول موج بلند و سرعت موضعی بالا می‌شوند. پرش‌های نوع S طول موج‌های بلندتری را نشان می‌دهند، در حالی که پرش‌های نوع T ممکن است طول موج‌های کوتاه‌تر اما عدم یکنواختی به طور قابل توجهی بیشتری را داشته باشند. صرف نظر از نوع، کنترل پرش‌های نامتقارن برای جلوگیری از آسیب جدی به کانال پایین‌دست، ضروری است.

سیستم تزریق جت جانبی و متقابل مورد استفاده در این تحقیق به عنوان سدی در برابر جریان اصلی عمل می‌کند و باعث پراکندگی و یکنواختی توزیع سرعت در پایین‌دست می‌شود. این سیستم به طور موثری امواج و جریان‌های برگشتی را از بین می‌برد. سیستم تزریق جت حتی در حالت غیرفعال نیز اثربخشی قابل توجهی را نشان می‌دهد. در مقایسه با مدل شاهد، سیستم در این حالت مانند یک آستانه عمل می‌کند و همچنان تغییرات سرعت را در جریان به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. علاوه بر این، سیستم تزریق جت فعال به طور کامل جریان برگشتی را از بین می‌برد و منجر به یک شرایط جریان بسیار یکنواخت در کل بستر کانال برای هر دو پرش S و T می‌شود. قابل توجه است که در مدل شاهد در فاصله کمی پایین‌دست از پرش (حدود ۰.۵ متر)، تقریباً نیمی از مقطع عرضی کانال برای هر دو نوع پرش تحت تأثیر جریان برگشتی قرار می‌گیرد.

اثربخشی سیستم تزریق جت با استفاده از دو پارامتر مرتبط مستقیم با سرعت یعنی β_L و $\beta_L \cdot v_m^2$ ارزیابی شد. قطرها و پیکربندی‌های مختلف نازل جت برای بهینه‌سازی عملکرد و مقرون به صرفه بودن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به طور قانع‌کننده‌ای توانایی سیستم را در بهبود ویژگی‌های جریان در عمق پایاب نشان می‌دهند. قابل ذکر است که حتی در کم‌بازده‌ترین پیکربندی، انتقال به جریان زیربحرانی در حوضچه آرامش با طول محدود قابل دستیابی بود. ضریب (β_L) برای هر دو پرش S و T در بدترین سناریو (بدون تزریق جت) به مقادیر ۱ نزدیک شد، که نشان‌دهنده بهبود قابل توجهی به سمت توزیع سرعت یکنواخت در پایین‌دست سازه اتلاف انرژی است. این مقادیر به ترتیب برای پرش‌های S و T تقریباً ۷۰ درصد و ۹۰ درصد به ۱ نزدیک‌تر بودند.

علاوه بر این، پارامتر $\beta_L \cdot v_m^2$ که نشان‌دهنده پتانسیل فرسایش بستر است، کاهش قابل توجهی را نشان داد. حتی در بدترین عملکرد پیکربندی سیستم تزریق جت فعال، حداکثر مقادیر $\beta_L \cdot v_m^2$ به ترتیب برای پرش‌های S و T به ۷۵۷ و ۵۵۶ در مقایسه با حداکثر مقادیر ۱۲۱۱۱ و ۱۶۴۹ در مدل شاهد (بیش از ۲/۵ برابر)، کاهش یافت. به کارگیری سیستم جت، طول پرش را در پرش S حدوداً ۸۴ درصد و در پرش T حدوداً ۶۲ درصد نسبت به مدل شاهد کاهش داده است. همچنین این سیستم افت نسبی انرژی قابل توجهی را خصوصاً در پرش S نشان داد. افزایش قطر سیستم جت به طور کلی باعث کاهش طول پرش و یکنواختی بیشتر جریان در پایین‌دست در پرش S خواهد شد.

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCE

- Alghwail, Svetlana, & Abourohiem, M. A. (2018). Dissipation of mechanical energy over spillway through counter flow. *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, 70(05), 377–391. <https://doi.org/10.14256/JCE.1691.2016>
- Alhamid, A. A. (2004). S-jump characteristics on sloping basins. *Journal of Hydraulic Research*, 42(6), 657–662. <https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9628319>
- Arabi, A., Salhi, Y., Zenati, Y., Si-Ahmed, E.-K., & Legrand, J. (2021). Experimental investigation of sudden expansion's influence on the hydrodynamic behavior of different sub-regimes of intermittent flow. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 205, 10883. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108834>
- Blevins, R. D. (1984). *Applied fluid dynamics handbook*. Van Nostrand Reinhold Co. <http://books.google.com/books?id=G-ZUAAAAMAAJ>
- Bremen, R. (1990). *Expanding stilling basin*. Laboratoire De Constructions Hydrauliques. Lausanne, 1990
- Bremen, R., & Hager, W. H. (1993). T-jump in abruptly expanding channel. *Journal of Hydraulic Research*, 31(1), 61–78. <https://doi.org/10.1080/00221689309498860>
- Bremen, R., & Hager, W. H. (1994). Expanding stilling basin. (Includes appendices). *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water, Maritime and Energy*, 106(3), 215–228. <https://doi.org/10.1680/iwtme.1994.26934>
- 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. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(2), 208–217. [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*. Mc Grow Hill Book Co, New York, NY.
- Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M., & Mirzaeereza, R. (2019). Experimental Study of Expanding Effect and Sand-Roughened Bed on Hydraulic Jump Characteristics. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(4), 885–896. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.261923.667968>
- Hydraulic Engineering-Asce - J HYDRAUL ENG-ASCE*, 128. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:7\(656\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:7(656))
- Ferreri, G. B., & Nasello, C. (2002). Hydraulic jumps at drop and abrupt enlargement in 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(2), 207–213. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:2\(207\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:2(207))
- HAGER, W. H. (1992). *Energy Dissipators and Hydraulic Jump*. Springer Science & Business Media.
- Haghdooost, M., Sajjadi, S., Fathi Moghadam, M., & Ahadiyan, J. (2022). Experimental study of spatial hydraulic jump stabilization using lateral jet flow. *Water Supply*, 22(11), 8337–8352. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.376>
- Hajjaligol, S., Ahadiyan, J., Sajjadi, M., Rita Scorzini, A., 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*, 147(11), 06021012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001622](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001622)
- Hajjaligol, S., Ahadiyan, J., Sajjadi, S. M., Hazi, M. A., Chadee, A. A., Nadian, H. A., & Kirby, J. (2024). Experimental analysis of turbulence measurements in a new dissipator structural (cross beams) in abruptly expanding channels. *Results in Engineering*, 21, 101829. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101829>
- Herbrand, K. (1973a). The Spatial Hydraulic Jump. *Journal of Hydraulic Research*, 11(3), 205–218. <https://doi.org/10.1080/00221687309499774>
- Herbrand, K. (1973b). 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(2), 101558. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.08.003>
- Jobson, H. (1965). The effect of submerged jets on the hydraulic jump. *Masters Theses*. https://scholarmine.mst.edu/masters_theses/5687
- 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)
- Matin, M. A., Hasan, M. M. R., & Islam, M. A. (2008a). Experiment on hydraulic jump in sudden expansion



- in a sloping rectangular channel. *Journal of Civil Engineering*.
- Matin, M. A., Hasan, M. M. R., & Islam, M. A. (2008b). Experiment on hydraulic jump in sudden expansion in a sloping rectangular channel. *Journal of Civil Engineering*.
- Mero, S., & Mitchell, S. (2017). Investigation of energy dissipation and flow regime over various forms of stepped spillways. *Water and Environment Journal*, 31(1), 127–137. <https://doi.org/10.1111/wej.12224>
- Mossa, M., Petrillo, A., & Chanson, H. (2005). Tailwater level effects on flow conditions at an abrupt drop.
- 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 Vol.5, No.2, Summer 2013, 25-34, JWSR.
- Ohtsu, I., Yasuda, Y., & Ishikawa, M. (1999). Submerged Hydraulic Jumps below Abrupt Expansions. *Journal Of Hydraulic Engineering*. 1999.125:492-499.
- Omid, M. H., Esmaeeli Varaki, M., & Narayanan, R. (2007). Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel. *Journal of Hydraulic Research*, 45(4), 512–518. <https://doi.org/10.1080/00221686.2007.9521786>
- Rajaratnam, N. (1967). Hydraulic Jumps. In *Advances in Hydrosience* (Vol. 4, pp. 197–280). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4831-9935-1.50011-2>
- 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. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47(2), 1153–1164. <https://doi.org/10.1007/s40996-022-00933-7>
- Scorzini, A. R., Di Bacco, M., & Leopardi, M. (2016). Experimental Investigation on a System of Crossbeams As Energy Dissipator in Abruptly Expanding Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(2), 06015018. [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(18), 2572. <https://doi.org/10.3390/w13182572>
- Sharoonizadeh, S., Ahadiyan, J., Scorzini, A. R., Di Bacco, M., Sajjadi, M., & Moghadam, M. F. (2022). Turbulence characteristics of the flow resulting from the hydrodynamic interaction of multiple counter flow jets in expanding channels. *Acta Mechanica*, 233(9), 3867–3880. <https://doi.org/10.1007/s00707-022-03250-2>
- Tharp, E. L. (1966). Modification of the hydraulic jump by submerged jets. Rolla, Missouri.
- Torkamanzad, N., Hosseinzadeh Dalir, A., Salmasi, F., & Abbaspour, A. (2019). Hydraulic Jump below Abrupt Asymmetric Expanding Stilling Basin on Rough Bed. *Water*, 11(9), 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, Hurgada, Egypt
- Yüksel, Y., Günal, M., Bostan, T., Çevik, E., & Çelikoğlu, Y. (2004). The influence of impinging jets on hydraulic jumps. *Water Management*.