



A Comparative Study of Air-Water Flow in Hydraulic Jump using OpenFoam and ANSYS Fluent Softwares

Nahid Mirizadeh¹ | Mohammad Manafpour²

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: st_n.mirizadeh@urmia.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: m.manafpour@urmia.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 18 January 2025

Received in revised form

20 April 2025

Accepted 8 June 2025

Published online 11 October 2025

Keywords:

Air-water two-phase flow
Computational fluid dynamics
Numerical modeling
Turbulence
Volume of fluid method

ABSTRACT

A hydraulic jump is a type of rapidly varied flow that occurs when supercritical flow transitions to subcritical flow over a short distance. This phenomenon has gathered significant attention from researchers due to its numerous advantages. In this study, the air-water two-phase flow field of the hydraulic jump is simulated in two dimensions using two software packages: OpenFoam and ANSYS Fluent. The Froude number for the hydraulic jump is 7.5, and the Reynolds number is 1.4×10^6 . In order to simulate the flow field, the volume of fluid (VOF) method, along with Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations, were employed. The results from the two software packages were compared with one another, as well as with existing laboratory results and findings from the literature. The results include various hydraulic characteristics of the jump, such as roller length, secondary conjugate depth, free surface profile, maximum forward and backward velocity along the channel and the air concentration of the flow. These findings indicate an appropriate agreement between numerical simulations and experimental data. The calculated length of the hydraulic jump roller was 1.51 meters using OpenFoam and 1.55 meters using ANSYS Fluent, resulting in errors of approximately four and seven percent, respectively, compared to laboratory values. The coefficient of determination for the free surface profile was 99% for OpenFoam and 95% for ANSYS Fluent, while the Kling-Gupta Efficiency (KGE) index for the free surface profile was 0.94 and 0.8, respectively. The maximum air concentration in the shear region of the roller was observed at a depth of 1.42 times the initial depth of jump, with a concentration value of 0.41.

Cite this article: Mirizadeh, N., & Manafpour, M. (2025). A Comparative Study of Air-Water Flow in Hydraulic Jump using OpenFoam and ANSYS Fluent Softwares. *Journal of Water and Irrigation Management*, 15 (2), 337-354. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.388864.1206>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.388864.1206>

Publisher: University of Tehran Press.



مطالعه مقایسه‌ای جریان آب-هوا در پرش هیدرولیکی به کمک نرم‌افزارهای اوپن‌فوم و انسیس فلوئنت

ناهید میری‌زاده^۱ | محمد مناف‌پور^۲

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: st_n.mirizadeh@urmia.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: m.manafpour@urmia.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	پرش هیدرولیکی نوعی جریان متغیر سریع بوده که در اثر آن جریان فوق بحرانی در فاصله کوتاهی به جریان زیربحرانی تبدیل می‌شود. این پدیده به دلیل کاربردها و مزیت‌های فراوانی که دارد همواره موردتوجه پژوهش‌گران بوده است. در پژوهش حاضر، میدان جریان دوفازی آب-هوا در پرش هیدرولیکی در حالت دوبعدی به کمک نرم‌افزارهای متن‌باز اوپن‌فوم و تجاری انسیس فلوئنت شبیه‌سازی شده که پرش هیدرولیکی از نوع کلاسیک برای جریان ورودی با عدد فرود $7/5$ و عدد رینولدز $1/4 \times 10^6$ می‌باشد. در شبیه‌سازی عددی فصل مشترک بین دو فاز آب‌هوا از روش حجم سیال و برای مدل کردن آشفتگی از روش RANS استفاده شده نتایج حاصل از مدل‌سازی با استفاده از این دو نرم‌افزار با یکدیگر و نتایج آزمایشگاهی موجود در پیشینه پژوهش مقایسه شده است. نتایج پژوهش که شامل مشخصه‌های هیدرولیکی پرش از قبیل طول غلتک، عمق ثانویه، پروفیل سطح آزاد، حداکثر و حداقل سرعت در مقاطع قائم در طول پرش و غلظت هوای جریان می‌باشد حکایت از تطابق مناسب نتایج عددی و آزمایشگاهی دارد. طول غلتک پرش هیدرولیکی حاصله با استفاده از نرم‌افزارهای اوپن‌فوم و انسیس فلوئنت به ترتیب $1/51$ و $1/55$ متر محاسبه شد که خطا نسبت به مقادیر آزمایشگاهی به ترتیب حدود چهار و هفت درصد است. ضریب تعیین پروفیل سطح آزاد در اوپن‌فوم و انسیس فلوئنت به ترتیب 99 و 95 درصد بوده و شاخص KGE برای پروفیل سطح آزاد $0/94$ و $0/8$ است. حداکثر غلظت هوا در ناحیه برشی پرش در عمقی معادل $1/42$ برابر عمق اولیه پرش، برابر با $0/41$ مشاهده شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۳۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۸	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹	
کلیدواژه‌ها: آشفتگی جریان دوفازی آب-هوا دینامیک سیالات محاسباتی روش حجم سیال مدل‌سازی عددی	

استناد: میری‌زاده، ناهید و مناف‌پور، محمد (۱۴۰۴). مطالعه مقایسه‌ای جریان آب-هوا در پرش هیدرولیکی به کمک نرم‌افزارهای اوپن‌فوم و انسیس فلوئنت.

نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۵ (۲)، ۳۳۷-۳۵۴. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.388864.1206>



۱. مقدمه

پدیده پرش هیدرولیکی که از مهم‌ترین مکانیسم‌های استهلاك انرژی در سازه‌های پایانه تخلیه‌کننده‌های جریان سدها محسوب می‌شود یک انتقال ناگهانی از جریان فوق بحرانی به زیربحرانی همراه با ناپیوستگی در عمق جریان می‌باشد (Gualtieri and Chanson, 2007). در این پدیده، افزایش عمق و کاهش سرعت جریان در فاصله کوتاهی اتفاق می‌افتد. محلی که در آن جریان بالادست به جریان پایین‌دست برخورد می‌کند پنجه پرش نامیده می‌شود (Wang, 2014). بخش عمده‌ای از پرش هیدرولیکی شامل ناحیه جریان در حال غلتیدن شدید می‌باشد که در آن انرژی جنبشی زیادی از دست می‌رود، این ناحیه غلتک^۱ پرشی نامیده می‌شود (Estrella et al., 2022). علاوه بر ورود هوا به صورت سطحی از بالای غلتک پرش، ورود هوا از محل پنجه پرش و به صورت نقطه‌ای به دلیل نوسان طولی پنجه پرش صورت می‌گیرد. ورود هوا در فرم حباب‌های هوا و بسته‌های هوا در پنجه پرش، با ایجاد گردابه‌های بزرگ همراه می‌شود و سبب حجیم‌شدن جریان در سطح بالایی غلتابه می‌گردد (Wang, 2014). پدیده پرش هیدرولیکی که دارای مشخصه‌هایی از جمله افزایش ناگهانی در ارتفاع سطح آزاد، آشفتگی شدید، پاشش و ورود هوا می‌باشد (Chanson and Brattberg, 2000)، در رودخانه‌ها و کانال‌های روباز، هنگام عبور جریان از زیر یک دریچه، تغییر ناگهانی شیب آبراهه از شیب تند به شیب مایل در طول نسبتاً کوتاه اتفاق می‌افتد و دارای کاربردهای فراوانی است که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از محافظت پایین‌دست سرریز و آبگیرها از فرسایش جریان، اختلاط سریع مواد شیمیایی با آب یا فاضلاب در روند تصفیه، هوادهی جریان و کلرزدایی (Hosseini and Abrishami, 2010). پدیده پرش هیدرولیکی از دیدگاه‌های مختلف به صورت تجربی و همچنین عددی مورد مطالعه وسیعی قرار گرفته است از آن جمله می‌توان به مطالعات (Abbaszadeh et al. 2023 & 2024)، (Daneshfaraz et al. 2022)، (Felder et al. 2016) و (Gou et al. 2024) اشاره کرد که شامل بررسی کیفی و کمی اتلاف انرژی جریان، تأثیر هندسه حوضچه آرامش مانند عرض، شیب طولی بستر، زبری بستر و وجود آستانه در دریچه‌های کشویی بالادست حوضچه بر روی ویژگی‌های پرش می‌باشد.

Bayon et al. (2016) به بررسی عددی پرش هیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزارهای اوپن‌فوم^۲ و فلوتریدی^۳ به روش حجم سیال^۴ پرداخته و مشخصات سطح آزاد پرش هیدرولیکی را همراه با نسبت عمق مزدوج ثانویه، بازده اتلاف انرژی و طول غلتک مورد مطالعه قرار دادند. همچنین مقادیر سرعت متوسط و سرعت‌های حداکثر و حداقل در مقاطعی از پرش بررسی گردید. نتایج نشان داد که هر دو نرم‌افزار با وجود برخی مشکلات در ناحیه غلتکی، پدیده پرش را با موفقیت مدل‌سازی می‌کنند.

Wang and Chanson (2018) یک مدل نیمه‌تئوریک را برای شبیه‌سازی غلظت هوا و توزیع سرعت با استفاده از عدد فرود^۵ ورودی در پرش‌های هیدرولیکی ارائه کردند که تحت شرایط جریان ورودی کمی توسعه یافته^۶ است. با انتخاب طول پرش به عنوان مقیاس طولی مشخصه، روابطی بین عدد فرود ورودی، غلتک پرش و پارامترهای کلیدی که بیان کاملی از غلظت هوا و پروفیل‌های سرعت است، ارائه شد و مشخص شد طول بی‌بعد شده غلتک L_T/d_1 به صورت خطی با عدد فرود افزایش می‌یابد.

Wüthrich et al. (2020) با ترتیب‌دادن آزمایش‌هایی، تغییرات مشخصه‌های جریان آب-هوا را در عرض کانال برای پرش هیدرولیکی با عدد فرود پایین ۲/۴ و عدد رینولدز نسبتاً بالا $10^5 \times 1/83$ بررسی نمودند. نتایج نشان داد که مقادیر غلظت هوا و فرکانس حباب هوا نزدیک دیواره در مقایسه با مرکز کانال به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. به عبارت دیگر، اثر دیواره در کل عرض پرش، بر روی این دو پارامتر اعمال شده، درحالی که سرعت جریان صرفاً تا فاصله کوتاهی از دیواره و به مقدار اندکی تحت تأثیر دیواره قرار گرفته است.

Stojnic (2020) مطالعه آزمایشگاهی اثر جریان نزدیک‌شونده از سرریز پله‌ای را روی عملکرد حوضچه آرامش کلاسیک بررسی کرد و بدین منظور از مدل فیزیکی سرریز پله‌ای و صاف بزرگ مقیاس با شیب شوت ۳۰ درجه استفاده نمود. آزمایش‌ها تحت دبی‌های مختلف برای دو سرریز پله‌ای با ارتفاع پله‌های مختلف و هوادهی متفاوت جریان نزدیک شونده از شوت به حوضچه آرامش انجام شد. نتایج حاکی از اثر قابل‌توجه جریان‌های نزدیک‌شونده شوت پله‌ای روی فشار کف و طول پرش بوده، به‌طوری‌که طول پرش هیدرولیکی بی‌بعد شده پایین‌دست شوت پله‌ای در مقایسه با شوت صاف حدود ۱۷ درصد کم‌تر بود.

Felder *et al.* (2021) اثرات شرایط جریان بالادست پرش هیدرولیکی به لحاظ توسعه‌یافتگی را بر خصوصیات سطح آزاد پرش با استفاده از ابزار LIDAR به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج نشان داد که پرش‌های هیدرولیکی با شرایط جریان ورودی کاملاً توسعه‌یافته^۷، دارای طول پرش کوتاه‌تری در مقایسه با مقادیر نظیر جریان ورودی کمی توسعه‌یافته می‌باشد و از نوسانات بیش‌تر پنجه پرش و همچنین اتلاف انرژی شدیدتری در سراسر پرش هیدرولیکی برخوردار می‌باشد.

Tang *et al.* (2021) به‌صورت آزمایشگاهی اثرات وجود حباب‌های هوا (پیش هوادهی) در جریان ورودی با عدهای فرود بالا را بر روی مشخصه‌های هیدرولیکی جریان در پرش هیدرولیکی مطالعه کردند که در آن از دو نرخ پیش هوادهی با استفاده از شوت صاف شیب‌دار و دیگری به کمک رمپ هواده نصب‌شده بر روی شوت استفاده شد تا اثر آن‌ها بر جریان نزدیک‌شونده به پرش در انتهای شوت بررسی شود. در اثر پیش هوادهی، طول پرش هیدرولیکی کوتاه‌تر و غلظت متوسط هوا و شار ورود هوا در طول ناحیه جت برشی بیش‌ترشده، به‌طوری‌که استفاده از هواده باعث افزایش غلظت متوسط هوا به میزان ۴۳ درصد شده است، درحالی‌که پارامترهایی مانند فرکانس حباب هوا و میدان سرعت کم‌تر تحت تأثیر قرار گرفتند.

Abbaszadeh *et al.* (2023) به‌طور آزمایشگاهی تأثیر کاربرد آستانه‌های زیر دریچه را در موقعیت‌های مختلف بر پارامترهای پرش هیدرولیکی، ازجمله عمق مزدوج ثانویه، طول پرش و نرخ اتلاف انرژی، بررسی کرده و نتیجه گرفتند که وجود آستانه زیر دریچه موجب افزایش عمق مزدوج ثانویه و طول پرش شده و همچنین، نرخ اتلاف انرژی را در مقایسه با حالتی که آستانه وجود ندارد، کاهش می‌دهد. افزون بر این، افزایش عمق مزدوج ثانویه و طول پرش ناشی از آستانه تحت تأثیر شیب پایین‌دست، ارتفاع نسبی آستانه و عدد فرود اولیه قرار دارد. همچنین، با مقایسه میزان اتلاف انرژی نسبی در سه موقعیت زیر دریچه، مماس با دریچه در بالادست و پایین‌دست آن، مشخص شد که موقعیت زیر دریچه دارای اتلاف انرژی بیش‌تری نسبت به سایر موقعیت‌های آستانه می‌باشد.

Perez *et al.* (2023) عملکرد حوضچه‌های آرامش دارای پله به طرف بالادست در ابتدای پرش را با پرداختن به اثر آن بر بازده اتلاف انرژی، ابعاد و خواص ساختاری پرش هیدرولیکی همچنین فشار بستر جریان بررسی کردند. در این پژوهش با در نظر گرفتن دو ارتفاع نسبی مختلف برای پله و سه عدد فرود متفاوت، مدل‌سازی عددی با کمک نرم‌افزار فلوتریدی انجام شد. نتایج نشان داد که مقادیر عمق مزدوج ثانویه به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها کم‌تر از مقادیر نظیر آزمایشگاهی گزارش‌شده در پیشینه پژوهش بوده است. همچنین نتایج به‌وضوح افزایش استهلاک انرژی و همچنین کاهش کلی فشار بستر جریان ناشی از حضور پله به طرف بالادست را در مقایسه با پرش هیدرولیکی کلاسیک تأیید نمودند.

Sayad Beyranvand *et al.* (2024) مشخصات پرش هیدرولیکی شامل پروفیل سطح آزاد آب، توزیع سرعت جریان، نرخ عمق مزدوج، طول غلتک، طول پرش هیدرولیکی و نسبت افت انرژی را در حضور پله به طرف بالادست، شیب

معکوس بستر و زبری بستر با استفاده از نرم‌افزار فلوترییدی برای جریان ورودی با عدد فرود $4/89$ شبیه‌سازی و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. برای شبیه‌سازی سطح آزاد از روش حجم سیال، برای آشفتگی مدل $k-\varepsilon$ و $k-\varepsilon$ RNG استفاده شد. نتایج نشان داد که خطای مدل عددی در محاسبه مقادیر سرعت در مقایسه با پروفیل سطح آب به دلیل تلاطم شدید جریان و تشدید اختلاط آب و هوا بیش‌تر بود. به‌طور متوسط ترکیب پله به طرف بالادست، شیب معکوس بستر و ناهمواری بستر، طول نسبی پرش را $32/5$ درصد کاهش می‌داد و باعث افزایش افت نسبی انرژی نسبت به حالت کلاسیک شده بود.

هدف از این پژوهش ارایه یک مقایسه ابتکاری از دو رویکرد مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی یعنی نرم‌افزارهای اوپن‌فوم و انسیس‌فلوئنت در زمینه شبیه‌سازی دقیق یک پدیده هیدرولیکی خاص با جریان بسیار آشفته و با تغییرات قابل‌توجه یعنی پرش هیدرولیکی می‌باشد که در مطالعات پیشین این جریان هیدرولیکی، چنین مقایسه‌ای به‌ندرت به انجام رسیده است. امید است این پژوهش علاوه بر فایده‌آمدن بر محدودیت‌های مدل‌های آزمایشگاهی در استخراج نتایج در هر لحظه و هر مکانی از میدان جریان، کمک ارزشمندی در تصمیم‌گیری آگاهانه پژوهش‌گران به هنگام انتخاب بین این دو بسته نرم‌افزاری پرکاربرد CFD، با درنظرگرفتن عواملی مانند سهولت استفاده، کارایی محاسباتی و شرایط خاص هیدرودینامیکی نماید.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. مشخصات فیزیکی مدل آزمایشگاهی

در این پژوهش جهت انجام صحت‌سنجی مدل عددی از نتایج مدل آزمایشگاهی Wang (2014) که در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه کوئینزلند استرالیا ساخته شده استفاده گردیده است. این مدل متشکل از کانالی مستطیلی با بستر افقی به طول $3/2$ متر، ارتفاع دیواره $0/41$ متر و عرض $0/5$ متر می‌باشد که در آن جریان آب از طریق مخزنی که در بالادست کانال تعبیه گردیده وارد کانال شده و دبی جریان نیز از طریق ونتوری‌متر نصب‌شده اندازه‌گیری می‌شود. شرایط جریان پایین‌دست توسط دریچه کشویی عمودی نازک کنترل می‌شود، به‌طوری‌که موقعیت طولی پنجه پرش با تغییر ارتفاع آن تنظیم می‌شود. برای اندازه‌گیری خواص جریان آب-هوا از یک پراب تشخیص فاز دوسوزنه^۹ و جهت اندازه‌گیری سطح آزاد از مترهای جابجایی آکوستیک^{۱۰} استفاده شده است. عددهای رینولدز^{۱۱} و فرود در آزمایش انجام شده به‌ترتیب $1/4 \times 10^5$ و $7/5$ بوده و دبی و ارتفاع آب ورودی $0/0706$ مترمکعب بر ثانیه و $0/03$ متر می‌باشد. شکل (۱) مدل آزمایشگاهی مربوطه را نمایش می‌دهد.

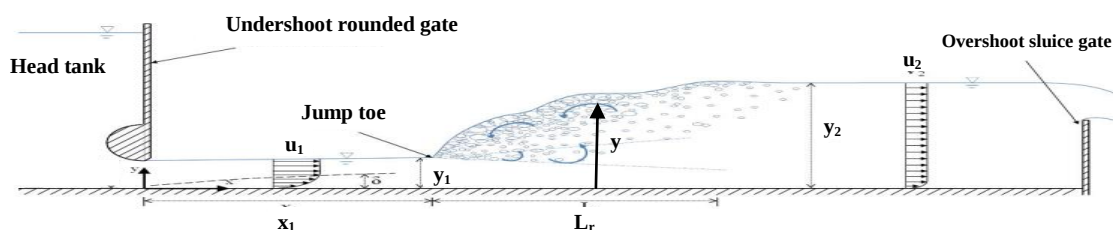


Figure 1. Laboratory model of Wang (2014)

۲.۲. مدل‌سازی عددی

اساس بنیادی تقریباً همه نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی^{۱۲} معادلات ناویر-استوکس^{۱۳} می‌باشد که به شکل

کلی حرکت سیال را توصیف می‌کند. نرم‌افزارهای اوپن‌فوم و انسیس‌فلوئنت از روش حجم محدود برای گسسته‌سازی این معادلات که شامل معادله پیوستگی و مومنتم می‌باشد و در روابط (۱) و (۲) ذکر شده استفاده می‌کنند.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \bar{u} + F_s + F_g \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در این روابط، ρ چگالی، u سرعت جریان، t زمان، P فشار، μ ویسکوزیته دینامیکی، F_s نیروی کشش سطحی و F_g نیروی حاصل از گرانش می‌باشد.

۳.۲. مشخصات مدل عددی

در پژوهش حاضر مدل‌سازی عددی دوبعدی پرش هیدرولیکی از طریق فناوری CFD و نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم ۱۸۱۲ و نرم‌افزار تجاری انسیس‌فلوئنت ۱۹/۲ انجام شده است که هر دو بر پایه روش حجم محدود (FVM) می‌باشد. الگوریتم کوپل فشار-سرعت استفاده‌شده در این نرم‌افزار روش پیمپل^{۱۴} بوده و برای رسیدن به پایداری بیش‌تر در جریان آشفته‌ای مانند پرش هیدرولیکی، در هر دو نرم‌افزار روش گسسته‌سازی زمانی، طرح اولر ضمنی مرتبه اول^{۱۵} انتخاب شد. حداکثر کورانت^{۱۶} شبیه‌سازی روی عدد $CFL=0.5$ تنظیم شده که مناسب برای جریان‌های دوفازی می‌باشد (Samkhaniani, 2023). جهت ردیابی سطح آزاد از روش حجم سیال (VOF) و معادله انتقال کسر حجمی سیال (رابطه ۳) و جهت محاسبه خواص سیال با استفاده از کسر سیال به‌صورت وزنی از روابط (۴) و (۵) استفاده شد. به‌دلیل هزینه محاسباتی بسیار بالای روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES)^{۱۷} در اوپن‌فوم که نرم‌افزاری غیرتجاری می‌باشد شبیه‌سازی‌ها با استفاده از روش‌های میانگین‌گیری رینولدز (RANS)^{۱۸} انجام شد. در بین مدل‌های مختلف توربولانسی، مدل $k-\omega$ sst، $k-\epsilon$ standard و $k-\epsilon$ realisable امتحان شد که با توجه به خطای قابل‌قبول مدل $k-\epsilon$ standard در طی صحت‌سنجی برای پارامتر طول غلتک پرش (جدول ۱)، این مدل توربولانسی انتخاب شد که علاوه بر دقت بالا در شبیه‌سازی طول غلتک پرش، در محاسبه پروفیل سطح آزاد و سرعت جریان، پایداری بسیار بالایی را نسبت به دیگر روش‌های آشفتگی دارد. در نرم‌افزار انسیس‌فلوئنت نیز مدل $k-\epsilon$ standard به‌عنوان مدل آشفتگی انتخاب شد.

Table 1. Estimation Error of the roller length using various turbulence models

RANS turbulence models	Hydraulic jump roller's length (m)	Error
k-ε standard	1.505	3.7%
k-ω sst	1.75	20%
K-ε relizable	1	30%

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \bar{u}) = 0 \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\rho = \alpha \rho_l + (1 - \alpha) \rho_g \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\mu = \alpha \mu_l + (1 - \alpha) \mu_g \quad \text{رابطه (۵)}$$

در روابط بالا، ρ_l و ρ_g به‌ترتیب چگالی مایع، گاز (هوا) و چگالی در کل دامنه و μ_l و μ_g ویسکوزیته دینامیکی مایع، گاز و ویسکوزیته در کل دامنه و α کسر فازی می‌باشد.

۴.۲. هندسه و مش‌بندی

میدان حل فیزیکی موردنظر جهت شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی کلاسیک در این پژوهش، کانال مستطیلی با بستر افقی می‌باشد و به دلیل هندسه ساده میدان، مش‌های به کاررفته (شکل ۲) در هر دو مدل عددی از نوع ساختاریافته می‌باشد که نسبت به مش‌های غیرساختاریافته از دقت بالایی برخوردار بوده و هزینه محاسباتی آن کم‌تر می‌باشد. جهت انجام مش‌بندی در مدل عددی با اوپن‌فوم از قسمت blockMesh این نرم‌افزار و در انسیس فلوئنت از قسمت مش‌بندی استفاده شده است. اندازه مش به کاررفته پس از تکرار با مش‌های مختلف و بعد از انجام فرایند استقلال از مش، ۵ میلی‌متر می‌باشد. مقدار y^+ در این پژوهش در محدوده مجاز ۱۲ تا ۳۰۰ قرار گرفته است.

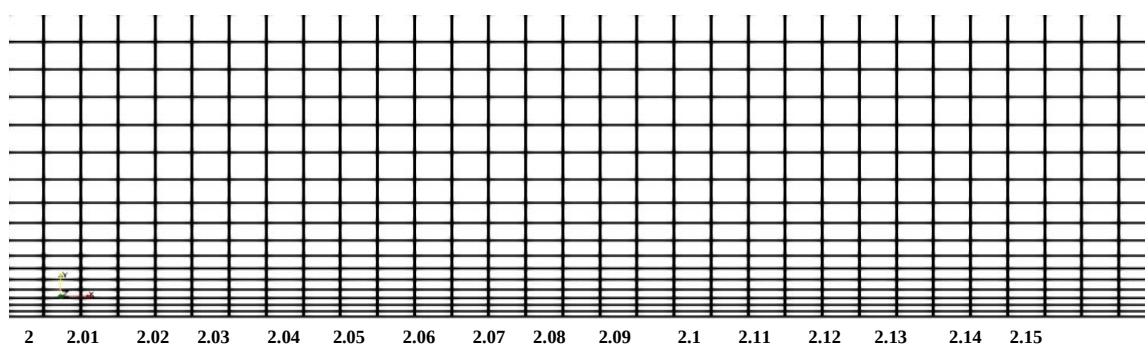


Figure 2. Flow field meshing

۵.۲. استقلال حل عددی از شبکه‌بندی

به منظور اعتبارسنجی استقلال حل عددی از شبکه‌بندی، از معیار شاخص همگرایی شبکه (GCI) استفاده شده است. این روش که توسط Roache (1994) پیشنهاد شده به نوعی برگرفته از روش رینولدز و بیانگر اختلاف نسبی نتایج بین دو حل گسسته‌سازی شده می‌باشد. بدین منظور، سه شبکه‌بندی با شبکه درشت، متوسط و ریز و برای ارزیابی دقت شبکه محاسباتی، دو کمیت طول غلتک و محل پنجه پرش به دست آمده از نتایج خروجی مدل عددی به کار گرفته شده است. روش شاخص همگرایی شبکه به شکل روابط (۶) و (۷) تعریف می‌شود:

$$P_{RE} = \ln \left(\frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_1} \right) / \ln(r) \quad \text{رابطه ۶}$$

$$GCI_{fine} = \frac{1.25|e|}{r^{P_{RE}} - 1} \quad \text{رابطه ۷}$$

در روابط بالا، f_1 ، f_2 و f_3 پارامترهای هیدرولیکی به دست آمده از شبیه‌سازی عددی، P_{RE} شاخص ظاهری همگرایی، $e = (f_2 - f_1)/f_1$ خطای نسبی و r نسبت پالایش است که به صورت نسبت اندازه مش درشت به مش ریز تعریف می‌شود (زیرنویس ۱ برای مش کوچک‌تر می‌باشد). نسبت پالایش، طبق توصیه Celik et al. (2008) باید عددی بزرگ‌تر از $1/3$ باشد تا بتوان نتایج قابل قبولی گرفت.

Table 2. GCI calculations

Variable	f_1	f_2	f_3	r_{12}	r_{23}	P_{RE}	e_{12}	e_{23}	GCI_{12}	GCI_{23}	$GCI_{23}/r_{12}^{P_{RE}} * GCI_{12}$
L_r	1.505	1.53	1.65	1.41	1.41	4.56	0.016	0.078	0.5%	2.57%	1.07
x_1	1.265	1.2	1.06	1.41	1.41	2.25	0.051	0.116	0.055	0.125	1.04

با توجه به جدول (۲) از آنجایی که نسبت $GCI_{12} * GCI_{23} / r_{12}^{P_{RE}}$ نزدیک یک می‌باشد، نتایج عددی به دست آمده در محدوده همگرایی قرار داشته و به سمت مقدار واقعی مجانب می‌باشد، در نتیجه استقلال از مش حاصل گردیده و کوچک کردن بیش تر مش تأثیری بر نتایج عددی نخواهد داشت.

۲.۶. شرایط مرزی

برای حل عددی معادلات حاکم بر جریان لازم است تا شرایط اولیه و شرایط مرزی تعریف گردد. شرایط مرزی به کاررفته در مدل عددی با اوپن فوم و انسیس فلونت به ترتیب در جدول‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است.

Table 3. Boundary condition for Openfoam

Variable	Inlet	Outlet	Walls	Atmosphere
U	Fixedvalue	ZeroGradient	No slip	Pressureinletoutletvelocity
P_rgh	Fixedfluxpressure	Zerogradient	Fixedfluxpressure	Ttotalpressure
Alpha.water	Fixedvalue	Zerogradient	Zerogradient	Inletoutlet
Nut	Calculated	Calculated	Nutkroughwallfunction	Calculated
K	Zerogradient	Zerogradient	KqRwallfunction	Zerogradient
Epsilon	Zerogradient	Zerogradient	EpsilonWallfunction	Zerogradient

Table 4. Boundary condition for Fluent

	Inlet	Outlet	Walls	Atmosphere
Boundary condition	Velocity inlet	Pressure outlet	Wall	Pressure inlet

در حل مسائلی که با سطح آزاد سروکار دارند، استفاده از حل گذرا برای رسیدن به شرایط همگرایی مناسب می‌باشد (Ansari *et al.*, 2018). در پژوهش حاضر نیز به عنوان شرط اولیه، سطح تراز آب در ناحیه فوق بحرانی و زیر بحرانی در مدل عددی اوپن فوم از طریق بخش SetField و در انسیس فلونت از طریق بخش Solution initialization معرفی گردید و از حل گذرا استفاده شد. در ادامه با گذر زمان، پرش هیدرولیکی به حالت پایدار خود رسید.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. صحت‌سنجی مدل عددی

جهت صحت‌سنجی مدل عددی، در دبی 0.0706 مترمکعب بر ثانیه، از کمیت‌های پروفیل سطح آزاد جریان، طول غلتک پرش، عمق ثانویه، حداکثر و حداقل سرعت در هر مقطع از غلتک پرش استفاده شده است. این پارامترها در صحت‌سنجی مدل‌های عددی، توسط پژوهش‌گران دیگری چون Bayon *et al.* (2016)، Witt (2014) و Perez (2020) نیز به کار گرفته شده است. از سه شاخص ضریب تعیین R^2 و معیار کلینگ گوپتا (KGE) و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) جهت اندازه‌گیری خطای حاصل از مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی که در روابط (۸) تا (۱۰) آمده است، استفاده شده است.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right)^2 \quad \text{رابطه ۸}$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad \text{رابطه ۹}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{exp} - X_{num})^2} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

در این روابط، X_{exp} مقدار داده آزمایشگاهی، X_{num} مقدار داده عددی، n تعداد داده‌ها، x_i مقدار هر داده آزمایشگاهی، $\bar{x}$ مقدار میانگین داده‌های آزمایشگاهی، y_i مقدار هر داده عددی و $\bar{y}$ مقدار میانگین داده‌های عددی می‌باشد همچنین α و β به ترتیب ضریب همبستگی، نسبت انحراف معیار و نسبت میانگین مقادیر بین داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده می‌باشد. شاخص آماری KGE براساس تقسیم‌بندی بسیار خوب ($0.7 < KGE < 1$)، خوب ($0.6 < KGE < 0.7$)، رضایت‌بخش ($0.5 < KGE \leq 0.6$)، قابل قبول ($0.4 < KGE \leq 0.5$) و نامطلوب ($KGE \leq 0.4$)، می‌تواند صحت معادلات ارائه‌شده را نشان دهد (Gupta et al., 2009; Daneshfaraz et al., 2022; Hassanzadeh et al., 2024).

۲.۳. پروفیل سطح آزاد جریان

شکل (۳) که در آن مبدأ مختصات نمودار، منطبق بر تراز سطح آزاد جریان با عمق اولیه پرش، محور افقی فاصله در امتداد جریان از پنجه پرش (فاصله نسبی از پنجه پرش) و محور عمودی فاصله قائم از سطح آب بالادست پرش (بی‌بعدشده نسبت به ارتفاع پرش) می‌باشد پروفیل بی‌بعدشده سطح آزاد پرش هیدرولیکی را نشان می‌دهد که در آن سطح آزاد پرش، متناسب با غلظت هوای مساوی با 0.5 در نظر گرفته شده است (Witt, 2014; Perez, 2020). طبق شکل و ضریب تعیین به‌دست‌آمده مشخص است که تطابق خوبی بین نتایج مدل عددی و نظیر آزمایشگاهی وجود دارد. جریان از پنجه پرش تا فاصله اندکی دورتر از غلتک به علت تبدیل از حالت فوق بحرانی به زیربحرانی، افزایش عمق داشته و بعد از این ناحیه به عمق یکنواختی می‌رسد که طبق تعریف پژوهش‌گران، این موقعیت انتهایی طول پرش محسوب می‌شود. در محاسبه پروفیل سطح آزاد جریان، مدل $k-\epsilon$ standard که در مقایسه با دیگر مدل‌ها پاسخ مناسب‌تری ارائه می‌دهد، به کار رفته است (Bayon et al., 2015). عمق ثانویه به‌دست‌آمده به کمک مدل عددی با اوپن‌فوم حدود 0.33 متر بوده و با عمق ثانویه روش Belanger (1841) تطابق خوبی داشته است، به‌طوری‌که خطای به‌دست‌آمده برای مدل عددی اوپن‌فوم با رابطه Belanger (1841) (رابطه ۱۱) کمتر از دو درصد بوده است. در رابطه زیر y_2 عمق ثانویه پرش، y_1 عمق اولیه پرش و Fr_1 عدد فرود اولیه پرش می‌باشد.

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \quad \text{رابطه ۱۱}$$

نتایج مدل عددی به کمک نرم‌افزار انسیس‌فلوئنت نیز مطابقت خوبی با نتایج نظیر آزمایشگاهی و همچنین نتایج حاصل از مدل عددی به کمک نرم‌افزار اوپن‌فوم دارد، اما با توجه به شاخص ضریب همبستگی 0.95 که کمتر از مقدار به‌دست‌آمده برای مدل عددی اوپن‌فوم (0.99) می‌باشد، به نظر می‌رسد که مدل عددی با اوپن‌فوم قابلیت بیش‌تری در شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد جریان دارد.

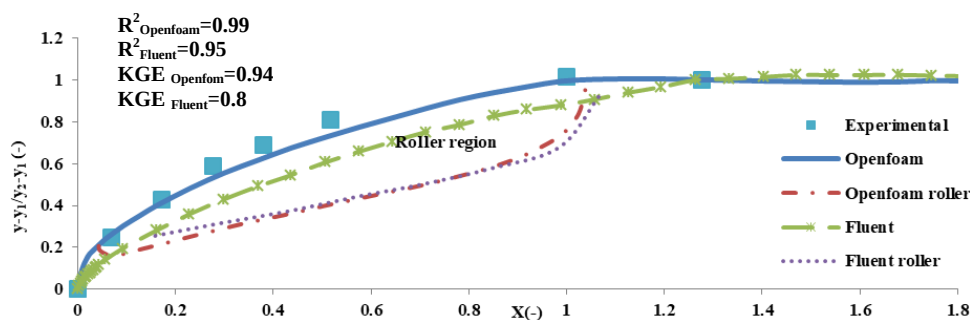


Figure 3. Dimensionless free surface profile comparing Fuent, Openfoam, and experimental results

۳.۳. توزیع میدان سرعت جریان

نحوه توزیع سرعت جریان در مقاطع قائم پرش هیدرولیکی از پارامترهای مهم دیگری است که در این پژوهش به آن پرداخته شده است. جهت استخراج نمودار توزیع سرعت و غلظت هوا، محل نقطه ایستا و موقعیت‌های مهم دیگری که در ادامه در رسم نمودارها نیاز می‌باشد، از شکل (۴) استفاده شده است. با ترسیم پروفیل‌های عمودی سرعت متوسط جریان در موقعیت‌های مختلف در محور طولی پرش هیدرولیکی مقادیر حداکثر و حداقل سرعت جریان و نقطه ایستا (سرعت صفر) در هر پروفیل استخراج می‌شود. با به هم وصل نمودن نقاط ایستا در مقاطع مختلف پرش می‌توان به مرز جداکننده (ایستا) ناحیه غلتک پرش از جریان اصلی دست یافت. تمیزدادن این ناحیه در مدل‌های عددی، بسیار آسان‌تر از مدل‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

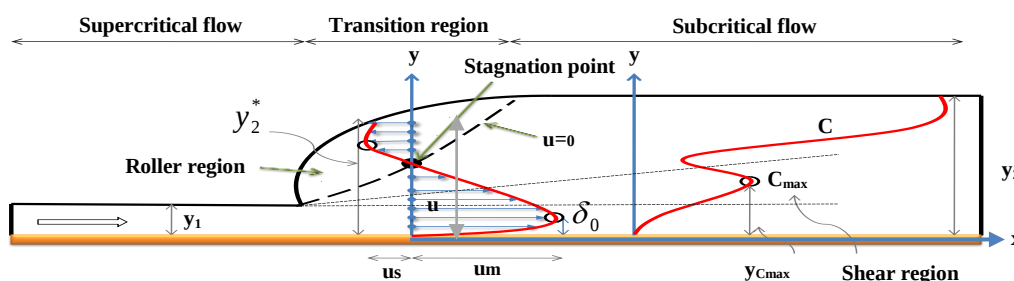


Figure 4. Velocity and air concentration distributions and location of maximum forward and backward velocity, stagnation line, shear region and maximum air concentration

نحوه توسعه پروفیل سرعت جریان در مقاطع مختلف ($x' = x - x_1$) در امتداد جریان در داخل پرش هیدرولیکی که مشتمل بر سه ناحیه مجزا می‌باشد در شکل (۵) به نمایش گذاشته شده است. ناحیه چرخشی در بالا، یک جریان ناپایدار قوی با حباب‌های هوا بزرگی است که از سطح آزاد غلتک وارد جریان شده‌اند. در این ناحیه گردابه‌های بزرگی تشکیل می‌شوند که نیروی گرانش نقش اصلی را در بقای آن‌ها بازی می‌کند. در زیر ناحیه چرخشی، ناحیه برشی اصلی واقع شده که در بخش بالادستی آن و در محل برخورد جت صفحه‌ای ورودی با پیشانی موج ایستای پرش، تعداد بی‌شمار گردابه‌های کوچک تشکیل شده و با ورود و محبوس شدن مستمر حباب‌های هوا در مرکز این گردابه‌ها، حباب‌های هوا به‌همراه گردابه‌ها در طول ناحیه برشی پرش به طرف پایین دست حرکت می‌کنند. در زیر ناحیه برشی اصلی، ناحیه برشی تحتانی قرار دارد که دارای الگوهای سرعتی مشابه جریان بالادست ورودی به پرش می‌باشد. در این ناحیه حباب‌های هوای کم‌تری حضور داشته یا اصلاً حضور ندارند. ضخامت ناحیه برشی اصلی در امتداد جریان به سرعت افزایش می‌یابد، درحالی‌که ضخامت ناحیه برشی تحتانی با فاصله گرفتن از پنجه کاهش می‌یابد. ناحیه برشی اصلی، محل نوسانات سرعت و آشفتگی‌های با شدت بالاست، درحالی‌که ناحیه برشی تحتانی تمایل دارد سطوح آشفته پایینی را تجربه کند. سطح آشفته‌گی بالاتر در ناحیه برشی اصلی به تعدادی از پدیده‌ها از جمله ساختار گردابی شبه‌دوره‌ای و نوسانات طولی پنجه پرش مرتبط است. ناحیه برشی تحتانی، کم‌تر تحت تأثیر ساختارهای آشفته مقیاس بزرگ قرار گرفته و میدان سرعت ساختار نسبتاً سازمان‌دهی تری نسبت به ناحیه برشی اصلی دارد (Wang et al., 2014).

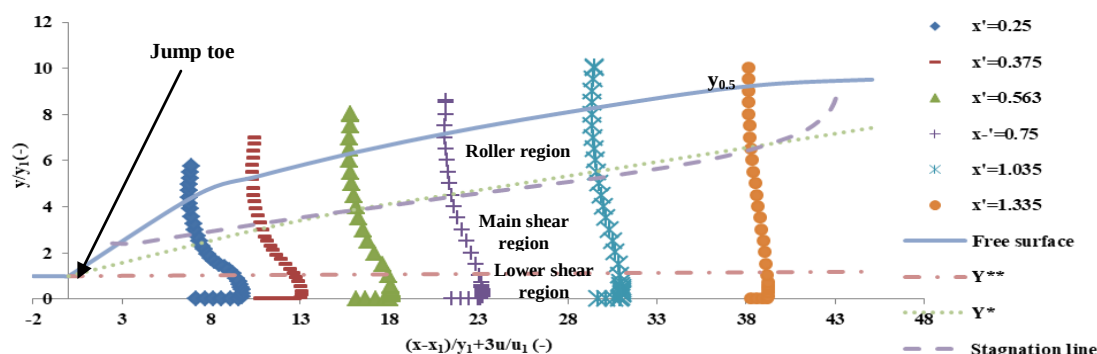


Figure 5. Longitudinal development of velocity profiles and sketch of the sub-regions in the turbulent shear region

Wang *et al.* (2014) روابط زیر را برای نواحی برشی تحتانی و اصلی برای اعداد فرود جریان ورودی بین ۳/۸ تا ۸/۵ ارائه دادند که برای این پژوهش، که عدد فرود جریان در این بازه قرار دارد، نیز معتبر است.

$$\frac{Y^{**} - y_1}{y_2 - y_1} = 0.0217 \times \frac{x - x_1}{L_r} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$\frac{Y^{*} - y_1}{y_2 - y_1} = 0.623 \times \frac{x - x_1}{L_r} + 0.11 \quad \text{رابطه ۱۳}$$

که در آن، Y^{**} ارتفاع ناحیه برشی تحتانی و Y^{*} ارتفاع ناحیه برشی اصلی زیر ناحیه چرخشی می‌باشد. سرعت‌های حداکثر به‌دست‌آمده برای مقاطع مختلف در نمودار شکل (۶) و سرعت‌های حداقل در کنار هم در نمودار شکل (۷) رسم شده است. با افزایش فاصله از پنجه پرش هیدرولیکی، همان‌طور که در شکل (۶) مشخص است حداکثر سرعت روند کاهشی داشته که به‌دلیل اثر اصطکاک بر سرعت جریان می‌باشد. این کمیت تطابق خوبی را بین داده‌های به‌دست‌آمده از نرم‌افزار اوپن‌فوم و انسیس فلوئنت با نمودار Hager (1992) دارد که برای اعداد فرود بین ۴/۳ تا ۸/۹ تعریف شده است، به‌طوری‌که ضریب تعیین بین داده‌های نرم‌افزار اوپن‌فوم و نمودار Hager (1992) بالاترین دقت را داشته است. همچنین داده‌های آزمایشگاهی Wang (2014)، در چهار نقطه در ابتدای پرش اندازه‌گیری شده که مقدار بیش‌تری را برای حداکثر سرعت نسبت به بقیه داده‌ها نشان می‌دهد. Hager (1992) با توجه به داده‌های آزمایشگاهی، برای اعداد فرود مختلف روابطی را برای حداکثر (روابط ۱۴ تا ۱۶) و حداقل (روابط ۱۷ و ۱۸) سرعت پیشنهاد داد. برای حداقل سرعت (شکل ۷) تفاوت بین مدل‌ها و نمودار Hager (1992) افزایش داشته است. این تفاوت‌ها را که Pérez *et al.* (2020) نیز در کار خود با آن مواجه شده‌اند به پیچیدگی جریان در ناحیه چرخشی مرتبط دانسته‌اند و همان‌طور که در شکل (۷) مشخص است برای مقادیر $X > 1$ نمودارها تطابق بهتری با یکدیگر دارند که به‌دلیل گذر از ناحیه چرخشی می‌باشد.

حداکثر سرعت به‌دست‌آمده به کمک مدل عددی انسیس فلوئنت (شکل ۶) ضمن تأیید تطابق، بار دیگر نشان می‌دهد که این مدل عددی نسبت به اوپن‌فوم دقت کم‌تری دارد، اما برای حداقل سرعت، هر دو مدل عددی ضریب همبستگی یکسانی با داده‌های آزمایشگاهی دارند و مدل عددی به کمک انسیس فلوئنت مقدار کم‌تری را برای حداقل سرعت‌ها نسبت به مدل عددی به کمک اوپن‌فوم نشان می‌دهد.

$$U_m = \exp(-2X^{1.8}), \quad 0 < X < 1.4 \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$U_m = \frac{u_m - u_2}{u_1 - u_2} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

$$X = \frac{x - x_1}{L_r} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

در این روابط، U_m حداکثر سرعت بی‌بعدشده، u_m حداکثر سرعت، u_2 سرعت ثانویه پرش، u_1 سرعت اولیه پرش، X طول بی‌بعدشده افقی، x_1 محل پنجه پرش و L_r طول غلتک پرش می‌باشد.

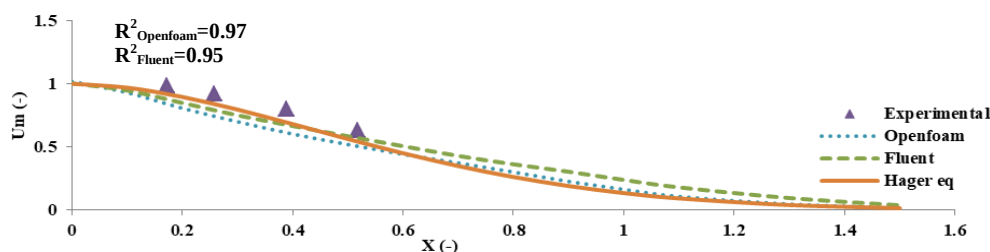


Figure 6. Velocity analysis: maximum forward velocity

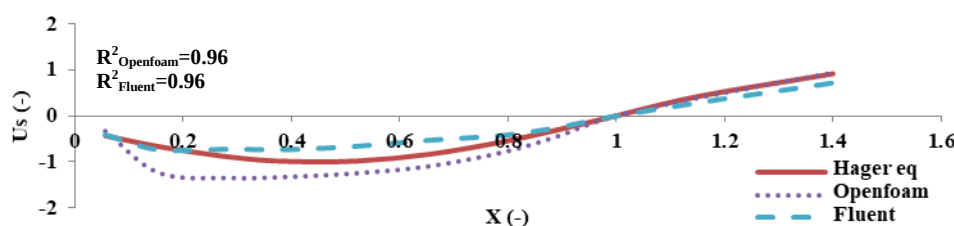


Figure 7. Velocity analysis: maximum backward velocity

$$U_s = -\sin \frac{X+0.1}{1.1}, \quad 0.05 < X < 1.4 \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$U_s = \frac{u_s}{u_2} \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

که در این روابط، U_s حداقل سرعت بی‌بعدشده، u_s حداقل سرعت می‌باشد.

شکل (۸-الف و ب) به ترتیب نحوه توزیع میدان سرعت جریان بی‌بعدشده در اعماق مختلف پرش هیدرولیکی را در مقاطع مختلف در طول غلتک پرش هیدرولیکی در دو مدل عددی با نرم‌افزار اوپن‌فوم و فلوئنت نشان می‌دهد که با نمودار Hager (1992) که به صورت رابطه (۱۹) تعریف شده، مقایسه شده است. با توجه به شکل‌ها مشخص است که مدل عددی به کمک نرم‌افزار اوپن‌فوم تطبیق بیشتری با نمودار Hager نسبت به مدل عددی به کمک فلوئنت نشان می‌دهد، اما سرعت‌های کم‌تری را نسبت به نمودار Hager برای نقاط مشخص، نشان می‌دهد و این تفاوت در نواحی تغییر سرعت از مقادیر مثبت به مقادیر منفی در هر مقطع، بیش‌تر نمود پیدا می‌کند که نشان می‌دهد توانایی مدل عددی در بازتولید دقیق میدان سرعت در محل ورود به ناحیه غلتکی با افت مواجه می‌شود.

$$U = [\cos(100Y')]^2, \quad 0 \leq Y' \leq 1 \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

که در آن، U سرعت بی‌بعدشده هر نقطه و Y' عمق بی‌بعدشده معادل آن نقطه می‌باشد که در روابط (۲۰) و (۲۱) مشخص شده است.

$$U = \frac{u - u_s}{u_m - u_s} \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

$$Y' = \frac{y - \delta_0}{y_2^* - \delta_0} \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

در این روابط، u سرعت و δ_0 ارتفاع معادل محل حداکثر سرعت و y_2^* عمق جریان در مقطع موردنظر می‌باشد که در شکل (۴) نشان داده شده بود.

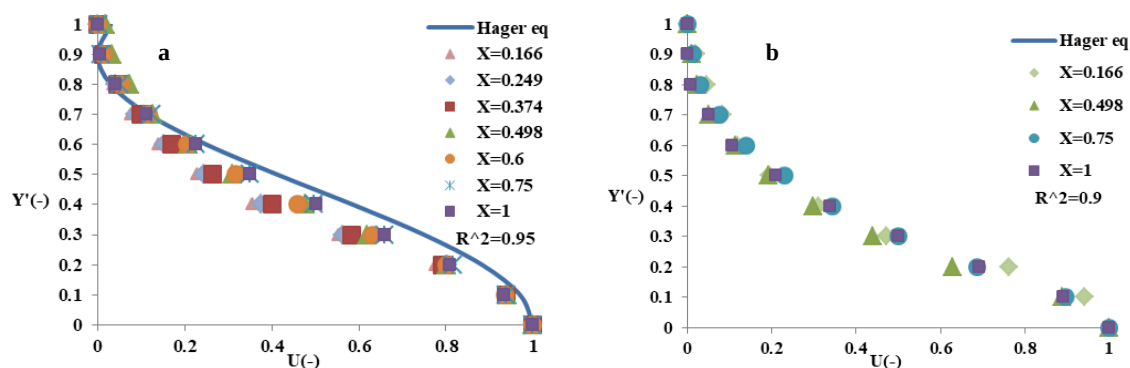


Figure 8. Velocity profiles along longitudinal axis in hydraulic jump roller region; (a) Openfoam, (b) Fluent

۴.۳. طول غلتک پرش

طول غلتک پرش به عنوان فاصله‌ای تعریف می‌شود که عمق آب به طور پیوسته از عمق مزدوج اولیه به عمق مزدوج ثانویه افزایش می‌یابد (Wang, 2014). Hager *et al.* (1990) این طول را محل برخورد مرز بین جریان‌های رو به جلو و رو به عقب قسمت چرخشی پرش هیدرولیکی با سطح آزاد آب تعریف کرده‌اند که از پنجه پرش شروع و به نقطه ایستا در سطح آزاد ختم می‌شود. طبق کار Bayon *et al.* (2016) تعیین این متغیر، زمانی آسان‌تر است که بتوان ناحیه ایستای جریان (جایی که سرعت جریان صفر می‌شود) را شناسایی کرد. در پژوهش حاضر نیز طبق کار Bayon مرز ایستا برای شناسایی این متغیر استفاده شده است و محل تلاقی سطح آزاد متوسط و مرز ایستا، پایان موقعیت غلتک را نشان می‌دهد (Perezet *et al.*, 2020). Bai *et al.* (2021) برای مرز ایستا معادله‌ای نمایی را معرفی کردند که در رابطه (۲۲) بیان شده است. طول غلتک پرش L_r نیز تا به امروز فقط با روابط تجربی تخمین زده شده که در اینجا روابط تجربی ارائه شده توسط Hager *et al.* (1990) و Wang and Chanson (2015) به ترتیب در روابط (۲۳) و (۲۴) آورده شده است:

$$\frac{y_r - y_1}{y_2 - y_1} = 0.08 \exp\left(\alpha \cdot \frac{x - x_1}{L_j}\right) \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

$$\frac{L_r}{y_1} = 160 \times \tanh\left(\frac{Fr_1}{20}\right) - 12, \quad y_1/W < 0.1, \quad 2 < Fr_1 < 16 \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

$$\frac{L_r}{y_1} = 6(Fr_1 - 1), \quad 2 < Fr < 10 \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

در این روابط، $\alpha = 4/3$ مقدار ثابت و y_r ارتفاع متناظر با $u=0$ در هر مقطع قائم (x) می‌باشد. جدول (۵) مقادیر طول غلتک به دست آمده به کمک نرم‌افزارهای به کاررفته در این پژوهش و معادلات تجربی اشاره شده در روابط (۲۳) و (۲۴) و میزان خطای ایجاد شده نسبت به مقدار آزمایشگاهی Wang (2014) را نشان می‌دهد که حاکی از برتری نسبی مدل عددی به کمک نرم‌افزار اوپن‌فوم و معادله Hager دارد.

Table 5. Length of hydraulic jump's roller

Experimental	Openfoam	Ansys Fluent	Hager eq	Chanson eq
1.45	1.505	1.55	1.49	1.28
Error%	3.7	6.8	3.1	11.2

۵.۳. توزیع میدان غلظت هوا

شکل (۹) توزیع عمودی غلظت متوسط زمانی هوا را در امتداد محور طولی کانال در مقاطع مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است حداکثر غلظت هوا در پروفیل توزیع غلظت عمودی هوا در ناحیه برشی اصلی پرش

اتفاق می‌افتد که مطابق با مطالعات Chanson (1995) می‌باشد. این مقدار حداکثر، با حرکت از پنجه پرش به سمت پایین‌دست کاهش می‌یابد. در پرش هیدرولیکی مورد مطالعه در این پژوهش حداکثر غلظت هوا در فاصله $x' = 0/25$ و در عمقی برابر $1/42$ برابر عمق اولیه اتفاق می‌افتد و مقدار آن معادل $0/41$ می‌باشد.

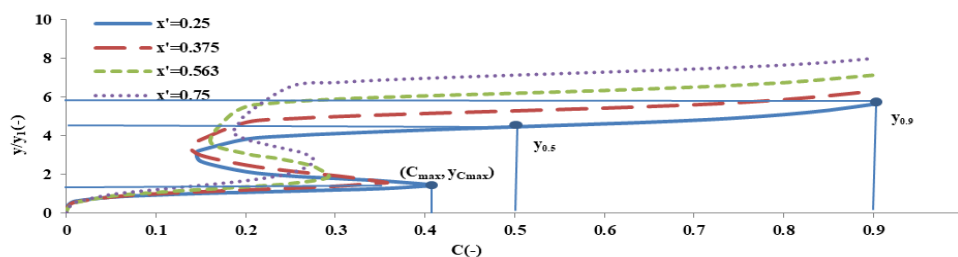


Figure 9. Time-averaged air concentration profiles

در این نمودار که در چهار مقطع در طول کانال مطابق با مقاطع آزمایشگاهی Wang (2014) اندازه‌گیری شده است، موقعیت عمودی نقطه حداکثر غلظت هوا (y_{Cmax} / y_1) با افزایش فاصله نسبت به پنجه پرش افزایش می‌یابد که Murzyn and Chanson (2009) علت آن را مربوط به اثرات شناوری مطرح کردند که با افزایش فاصله از پنجه پرش غالب می‌شود و رابطه زیر را بدین منظور ارائه کردند:

$$\frac{y_{Cmax}}{y_1} = 1 + 0.11 \frac{x - x_1}{y_1} \quad \text{رابطه ۲۵}$$

همچنین میزان حداکثر غلظت هوا با افزایش فاصله از پنجه پرش کاهش می‌یابد که رابطه زیر را ارائه دادند:

$$C_{max} = 0.07 F_r \exp\left(-0.064 \frac{x - x_1}{y_1}\right) \quad \text{رابطه ۲۶}$$

شکل (۱۰) نحوه توسعه پروفیل غلظت هوا در مقاطع مختلف ($x' = x - x_1$) در امتداد جریان در پرش هیدرولیکی و لایه‌های مختلف داخل پرش هیدرولیکی مطابق با مباحث ارائه‌شده قبلی (بخش توزیع میدان سرعت) را نشان می‌دهد.

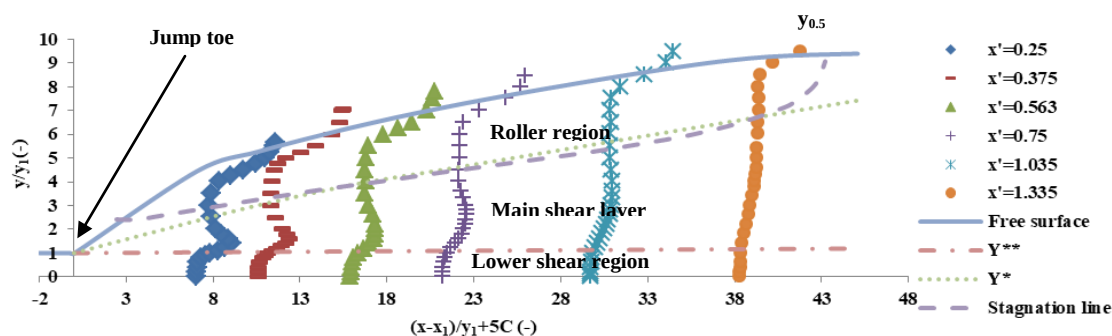


Figure 10. Longitudinal development of void fraction profiles and sketch of the sub-regions in the turbulent shear region

شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به ترتیب تصویر آزمایشگاهی و تصویر گرافیکی حاصل از نتایج عددی را برای ناحیه برشی پرش هیدرولیکی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است حباب‌های کوچک‌تر در این ناحیه ادغام شده و حباب‌های بزرگ‌تری تشکیل می‌دهند که هنگام حرکت به سمت پایین‌دست به کمک نیروی شناوری به سمت سطح آزاد جریان هدایت شده و از جریان خارج می‌شود همچنین بسته‌های هوا وارد شده به ناحیه برشی آشفته که حاوی بیش‌ترین میزان فرکانس حباب هواست، به سرعت شکسته شده و به حباب‌های هوا تبدیل می‌شوند.

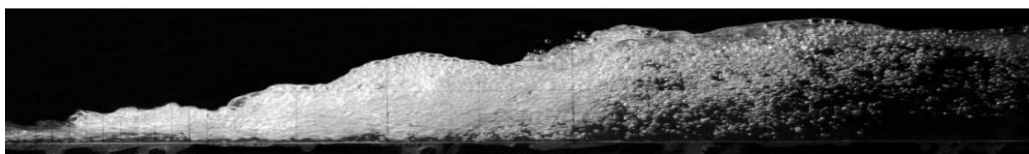


Figure 11. Bubbles in hydraulic jump: laboratory image of Viti (2019)



Figure 12. Bubbles in hydraulic jump: numerical (openfoam) image

۴. نتیجه‌گیری

پرش هیدرولیکی به دلیل وجود آشفتگی شدید، گردابه‌ها و جریان چرخشی، افزایش ارتفاع و کاهش سرعت در فاصله کوتاه، ساختار پیچیده‌ای دارد که در این پژوهش به صورت دوبعدی مورد بررسی عددی قرار گرفته است. سطح آزاد توسط روش VOF و آشفتگی توسط روش RANS از نوع $k-\epsilon$ standard توسط دو نرم‌افزار شبیه‌سازی شد تا توانایی این دو نرم‌افزار یعنی اوپن‌فوم و انسیس‌فلوئنت برای مدل‌سازی این پدیده مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج حاصل از این پژوهش در موارد زیر خلاصه می‌گردد:

– هر دو نرم‌افزار اوپن‌فوم و انسیس‌فلوئنت به طور مؤثر قادر به شبیه‌سازی جریان دو فازه آب-هوا پرش هیدرولیکی می‌باشند، نتایج به دست آمده از این شبیه‌سازی‌ها مطابقت قابل توجهی با داده‌های نظیر آزمایشگاهی موجود و روابط تجربی موجود در ادبیات فنی را نشان می‌دهد.

– نتیجه تجزیه و تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش نشان می‌دهد که ضریب تعیین و معیار کلینگ گوپتا (KGE) برای پروفایل سطح آزاد جریان در مدل عددی با اوپن‌فوم به ترتیب 0.99 و 0.94 و برای انسیس‌فلوئنت 0.95 و 0.8 می‌باشد. این نتایج حاکی است که مدل عددی مبتنی بر اوپن‌فوم در مقایسه با مدل عددی مبتنی بر انسیس‌فلوئنت از قابلیت نسبی بالاتری در شبیه‌سازی پروفایل سطح آزاد پرش هیدرولیکی برخوردار می‌باشد.

– در این پژوهش خط ایستا و در نتیجه طول غلتک پرش هیدرولیکی در هر دو مدل با دقت خوبی تخمین زده شد، به طوری که خطای تقریبی در برآورد طول غلتک معادل چهار درصد برای مدل با اوپن‌فوم و حدود هفت درصد برای مدل با انسیس‌فلوئنت به دست آمد.

– حداکثر سرعت جریان در مقاطع قائم در طول پرش هیدرولیکی با حرکت به سمت پایین دست کاهش می‌یابد که حکایت از تأثیر قابل توجه نیروی اصطکاکی دیواره کانال بر نحوه توزیع سرعت دارد. علاوه بر این، به دلیل ساختار آشفتنه جریان و وجود گردابه‌ها در ناحیه غلتکی، دقت مدل‌سازی عددی در تخمین سرعت‌های منفی پایین می‌باشد که این خود نمودی از وجود چالش‌های ذاتی در شبیه‌سازی عددی جریان‌های با دینامیک آشفتنه می‌باشد.

– با حرکت از پنجه پرش به طرف پایین دست، میزان حداکثر غلظت هوا در مقاطع قائم کاهش می‌یابد، در حالی که موقعیت عمودی مربوطه افزایش می‌یابد. این پدیده تأثیر نیروهای شناوری بر حباب‌های هوا و انتقال آن‌ها به سطح آزاد پرش در جهت جریان را منعکس می‌کند.

– در تخمین طول غلتک پرش، مدل توربولانسی $k-\epsilon$ standard نسبت به سایر مدل‌های توربولانسی از دقت بیش‌تری برخوردار بوده است.

– نتایج این پژوهش تأییدی است بر کاربرد فراگیر مدل‌های عددی، توأم با صرف هزینه و زمان کم‌تر، برای مطالعه پدیده‌های پیچیده هیدرولیکی همچون جریان آب-هوا پرش هیدرولیکی در جنب مدل‌های تجربی می‌باشد.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Roller
2. Openfoam
3. Flow3d
4. Volume of fluid (VOF)
5. Froude
6. Partially developed
7. Fully developed
8. Ansys fluent
9. Dual-tip phase-detection probe
10. Acoustic displacement meters
11. Reynolds
12. Computational fluid dynamics (CFD)
13. Navier stokes equations
14. Pimple
15. First order implicit euler
16. Courant number
17. Large eddy simulation
18. Reynolds averaged navier stoks
19. Kling gupta efficiency
20. Root mean square error

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Abbaszadeh, H., Daneshfaraz, R., & Norouzi, R. (2023). Experimental investigation of hydraulic jump parameters in sill application mode with various synthesis. *Journal of Hydraulic Structures*, 9(1), 18-42.
- Abbaszadeh, H., Norouzi, R., Sume, V., Kuriqi, A., Daneshfaraz, R., & Abraham, J. (2023). Sill role effect on the flow characteristics (experimental and regression model analytical). *Fluids*, 8(8), 235.
- Abbaszadeh, H., Daneshfaraz, R., Sume, V., & Abraham, J. (2024). Experimental investigation and application of soft computing models for predicting flow energy loss in arc-shaped constrictions. *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 73 (3), 637-661.
- Ansari, M., & Esmailpour, M. (2018). Comparison of the VOF and the two-fluid models for the numerical simulation of aeration and non aeration stepped spillway. *Modares Mechanical Engineering*, 17 (12), 255-265. (In Persian).
- Bai, R., Wang, H., Tang, R., Liu, S., & Xu, W. (2021). Roller Characteristics of Preaerated High-Froude-Number Hydraulic Jumps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 147(4), 040210081-0402100819
- Bayon-Barrachina, A., Lopez, J., & Petra A. (2015). Numerical analysis of hydraulic jumps using Openfoam. *Journal of Hydroinformatics*, 17(4), 662-678.
- Bayon-Barrachina, A., Valero, D., García-bartual, R., & Jos, F. (2016). Performance assessment of Openfoam and Flow-3d in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump. *Environmental Modelling & Software*, 80, 322-335
- Celik, I., Ghia, U., Roache, P., Freitas, C., Coleman, H., & Raad, P. (2008). Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. *Journal of Fluids Engineering*, 130(7), 0780011-0780014.
- Chanson, H. (1995). Air entrainment in two-dimensional turbulent shear flows with partially developed inflow conditions. *Journal of Multiphase Flow*, 21(6), 1107-1121.
- Chanson, H. (2004a). The hydraulics of open channel flow: an introduction. Oxford, UK, 2nd edition, 630 pages.

- Chanson, H., & Brattberg, T. (2000). Experimental study of the air-water shear flow in a hydraulic jump. *International Journal of Multiphase Flow*, 26(4), 583-607.
- Daneshfaraz, R., Norouzi, R., Abbaszadeh, H., & Azamathulla, H. M. (2022). Theoretical and experimental analysis of applicability of sill with different widths on the gate discharge coefficients. *Water Supply*, 22(10), 7767-7781.
- Daneshfaraz, R., Norouzi, R., Abbaszadeh, H., Kuriqi, A., & Di Francesco, S. (2022). Influence of Sill on the Hydraulic Regime in Sluice Gates: An Experimental and Numerical Analysis. *Fluids*, 7(7), 244.
- Estrella, J., Wüthrich, D., & Chanson, H. (2022). Two-phase air-water flows in hydraulic jumps at low Froude number: similarity, scale effects and the need for field observations. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 130, 110486.
- Felder, S., & Chanson, H. (2016). *An experimental study of air–water flows in hydraulic jumps with channel bed roughness: Research Report*. University of New South Wales, Sydney, Australia, WRL WRL 259.
- Felder, S., Montano, L., Cui, H., Peirson, W., & Kramer, M. (2021). Effect of inflow conditions on the free-surface properties of hydraulic jumps. *Journal of Hydraulic Research*, 59, 1004-1017.
- Gou, W., & Shen, Zh. (2024). Numerical study of transition hydraulic jumps in different types of stilling basins using lattice Boltzmann methods. *Physics of Fluids*, 36 (11), 115120.
- Gualtieri, C., & Chanson, H. (2007). Experimental analysis of Froude number effect on air entrainment in the hydraulic jump. *Environ Fluid Mech*, 7, 217-238.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1-2), 80-91.
- Hager, W. H., Bremen, R., & Kawagoshi, N. (1990). Classical hydraulic jump: length of roller. *Journal of Hydraulic Research*, 28 (5), 591-608.
- Hager, W. H. (1992). *Energy dissipators and hydraulic jump*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers. Vol. 8
- Hassanzadeh, Y., Abbaszadeh, H., Abedi, A. & Abraham, J. (2024). Numerical simulation of the effect of scouring-sediment profile of combined spillway-gate. *AQUA-Water Infrastructure, Ecosystems and Society* 1 December, 73 (12), 2322-2343.
- Hosseini, S. M., & Abrishami, J. (2010). *Open channel hydraulics*. Mashhad, Imam Reza University Press. (In Persian).
- Mukha, T., Almeland, S.K., & Bensow, R.E. (2022). Large-eddy simulation of a classical hydraulic jump: influence of modelling parameters on the predictive accuracy. *Fluids*, 7(3)-101.
- Murzyn, F., & Chanson H. (2009). Experimental investigation of bubbly flow and turbulence in hydraulic jumps. *Environ Fluid Mech*, 9, 143-159.
- Nilsson, H°. (2017). *A description of isoAdvector- A numerical method for improved surface sharpness in two-phase flows*, in *Proceedings of CFD with opensource software: Course notes*. <http://dx.doi.org/10.17196>.
- Pérez, J. F. (2020). *Numerical and physical modelling approaches to the study of the hydraulic jump and its application in large-dam stilling basins*. Doctoral dissertation, Politécnica Valencia University, Spain.
- Pérez, J. F., Bayón, A., García-Bartual R., López-Jiménez P. A., & José Vallés-Morán F. (2020). Characterization of structural properties in high Reynolds hydraulic jump based on CFD and physical modeling approaches. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(12)-04020079-1-13.
- Pérez, J.F., García-Bartual, R., & López-Jiménez, P.A. (2023). Numerical modeling of hydraulic jumps at negative steps to improve energy dissipation in stilling basins. *Applied Water Science*, 13, 203.
- Samkhaniani, N. (2023). *Openfoam 9 training via problem-solving*. (In Persian).
- Sayad Beyranvand, F., Heidarpour, M., & Salehi, S. (2024). Hydraulic characteristics of the hydraulic jump on the stepped, reverse slope and roughness. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-19.
- Stojnic, I. (2020). *Stilling basin performance downstream of stepped spillways*. Doctoral dissertation, EPFL University, Switzerland.
- Tang, R., Bai, R., & Wang, H. (2021) . A Comparative Study of Pre-Aeration Effects on Hydraulic Jump Air–Water Flow Properties at High Froude Numbers. *Environmental Fluid Mechanics*, 21, 1333-1355.
- Viti, N., Valero, D., & Gualtieri, C. (2019). Numerical Simulation of Hydraulic Jumps. Part 2: Recent Results and Future Outlook. *Water*, 11(1), 28.
- Wang, H. (2014). *Turbulence and air entrainment in hydraulic jumps*. Doctoral dissertation, The University of Queensland, Australia.

- Wang, H., Felder, S., & Chanson, H. (2014). An experimental study of turbulent two-phase flow in hydraulic jumps and application of a triple decomposition technique. *Exp Fluids*, 55, 1775.
- Wang, H., & Chanson, H. (2013). Two-phase flow properties and free-surface deformations in hydraulic jumps. *8th International Conference on Multiphase Flow (ICMF)*, 26-31 May, Jeju, Korea, 1-9
- Wang, H., Murzyn, F., & Chanson, H. (2014). *Pressure, turbulence and two-phase flow measurements in hydraulic jumps*. Report CH95/14. School of Civil Engineering, The University of Queensland, 75-78.
- Wang, H., & Chanson, H. (2015a). Air entrainment and turbulent fluctuations in hydraulic jumps. *Urban Water Journal*, 12(6), 502-518.
- Wang, H., Murzyn, F., & Chanson, H. (2015). Interaction between free-surface, two-phase flow and total pressure in hydraulic jump. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 64, 30-41.
- Wang, H., & Chanson, H. (2018). Estimate of void fraction and air entrainment flux in hydraulic jump using Froude number. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 45(2), 105-116.
- Witt, A.M. (2014). *Analytical and numerical investigation of an air entraining hydraulic jump*. Doctoral dissertation, University of Minnesota, USA.
- Wüthrich, D., Shi, R., Wang, H., & Chanson, H. (2020). Three-dimensional air-water flow properties of a hydraulic jump with low Froude numbers and relatively high Reynolds numbers. *8th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures ISHS2020*, 12-15 May, Santiago, Chile, Brisbane, QLD, Australia: The University of Queensland.