

## مطالعه مقایسه‌ای جریان آب-هوا در پرش هیدرولیکی به کمک نرم‌افزارهای اوپن فوم و انسیس فلوئنت

ناهید میری زاده<sup>۱</sup>، محمد مناف پور<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲\*- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

### چکیده

پرش هیدرولیکی نوعی جریان متغیر سریع بوده که در اثر آن جریان فوق بحرانی در فاصله کوتاهی به جریان زیر بحرانی تبدیل می‌شود. این پدیده به دلیل کاربردها و مزیت‌های فراوانی که دارد همواره مورد توجه محققین بوده است. در تحقیق حاضر، میدان جریان دوفازی آب-هوا در پرش هیدرولیکی در حالت دوبعدی به کمک نرم‌افزارهای متن‌باز اوپن فوم و تجاری انسیس فلوئنت شبیه‌سازی شده که پرش هیدرولیکی از نوع کلاسیک برای جریان ورودی با عدد فرود  $7/5$  و عدد رینولدز  $10^6 * 1/4$  می‌باشد. در شبیه‌سازی عددی فصل مشترک بین دو فاز آب و هوا 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 تحقیق مقایسه شده است. نتایج تحقیق که شامل مشخصه‌های هیدرولیکی پرش از قبیل طول غلتک، عمق ثانویه، پروفیل سطح آزاد، حداکثر و حداقل سرعت در مقاطع قایم 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 اوپن فوم 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 اوپن فوم 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.

**کلمات کلیدی:** آشفتگی، جریان دوفازی آب-هوا، دینامیک سیالات محاسباتی، روش حجم سیال، مدل‌سازی عددی

پدیده پرش هیدرولیکی که از مهم‌ترین مکانیسم‌های استهلاک انرژی در سازه‌های پایانه تخلیه کننده‌های 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<sup>۱</sup> 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 حجیم شدن 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 اهم 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& (2016), Felder et al. (2022), Daneshfaraz et al. (2024) و (Gou et al. (2024) اشاره کرد که شامل بررسی کیفی و کمی اتلاف انرژی جریان، تاثیر هندسه حوضچه آرامش مانند عرض، شیب طولی بستر، زبری بستر و وجود آستانه در دریچه‌های کشویی بالادست حوضچه بر روی ویژه گیهای پرش می‌باشد.

Bayon et al. (2016) به بررسی عددی پرش هیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزارهای اوپن فوم<sup>۲</sup> و فلوتریدی<sup>۳</sup> به روش حجم سیال<sup>۴</sup> 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 نیمه تئوریکی را برای شبیه‌سازی غلظت هوا و توزیع سرعت با استفاده از عدد فرود<sup>۵</sup> ورودی در پرش‌های هیدرولیکی ارائه کردند که تحت شرایط جریان ورودی کمی توسعه یافته<sup>۶</sup> 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  $L_p/d_1$  به صورت خطی با عدد فرود افزایش می‌یابد.

Wüthrich et al. (2020) با ترتیب دادن آزمایش‌هایی، تغییرات مشخصه‌های جریان آب-هوا را در عرض کانال برای پرش هیدرولیکی با عدد فرود پایین  $2/4$  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 به عبارت دیگر اثر دیواره در کل عرض پرش، بر روی این دو پارامتر اعمال شده درحالی‌که سرعت جریان صرفاً تا فاصله کوتاهی از دیواره و به مقدار اندکی تحت تأثیر دیواره قرار گرفته است.

Stojnic (2020) مطالعه آزمایشگاهی اثر جریان نزدیک شونده 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 قابل توجه جریان‌های نزدیک شونده شوت پله‌ای روی فشار کف و طول پرش بوده به طوری‌که طول پرش هیدرولیکی بی‌بعد شده پایین‌دست شوت پله‌ای در مقایسه با شوت صاف حدود ۱۷٪ کمتر بود.

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

Tang et al. (2021) به صورت آزمایشگاهی اثرات وجود حباب‌های هوا (پیش هوادهی) در جریان ورودی با عددهای 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 نصب شده بر روی شوت استفاده شد تا اثر آن‌ها بر جریان نزدیک شونده 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 بیشتر شده، به طوری که 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) به طور آزمایشگاهی تأثیر کاربرد آستانه‌های زیر دریچه را در موقعیت‌های مختلف بر پارامترهای پرش هیدرولیکی، از جمله 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 به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها کمتر از مقادیر نظیر آزمایشگاهی گزارش شده در پیشینه تحقیق 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 فلوتریدی 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  $k-\epsilon$  و  $k-\epsilon$  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 تحقیق ارائه یک مقایسه ابتکاری از دو رویکرد مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی یعنی نرم‌افزارهای اوپن فوم و انسیس فلوئنت در زمینه شبیه‌سازی دقیق یک پدیده هیدرولیکی خاص با جریان بسیار آشفته و با تغییرات قابل توجه یعنی پرش هیدرولیکی می‌باشد که در مطالعات پیشین این جریان هیدرولیکی، چنین مقایسه‌ای بندرت به انجام رسیده است. امید است این تحقیق علاوه بر فایده آمدن بر محدودیت‌های مدل‌های آزمایشگاهی در استخراج نتایج در هر لحظه و هر مکانی از میدان جریان، کمک ارزشمندی در تصمیم‌گیری آگاهانه محققین به هنگام انتخاب بین این دو بسته نرم‌افزاری پرکاربرد CFD، با در نظر گرفتن عواملی مانند سهولت استفاده، کارایی محاسباتی و شرایط خاص هیدرودینامیکی، بنماید.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. مشخصات فیزیکی مدل آزمایشگاهی

در این پژوهش جهت انجام صحت سنجی 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 ونتوری متر نصب شده اندازه‌گیری می‌شود. شرایط جریان پایین‌دست توسط دریچه کشویی عمودی نازک کنترل می‌شود بطوریکه موقعیت طولی پنجه پرش با تغییر ارتفاع آن تنظیم می‌شود. برای اندازه‌گیری خواص جریان آب-هوا از یک پراب تشخیص فاز دوسوزنه<sup>۹</sup> و جهت اندازه‌گیری سطح آزاد از مترهای جابجایی آکوستیک<sup>۱۰</sup> استفاده شده است. عددهای رینولدز<sup>۱۱</sup> و فرود در آزمایش انجام شده به ترتیب  $10^5$  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.

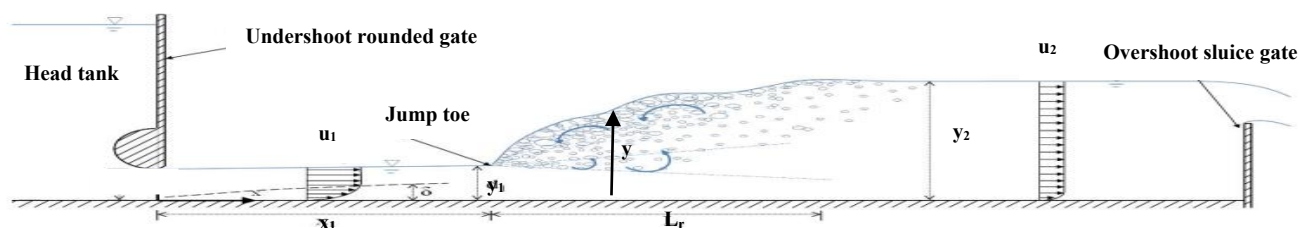


Figure 1. Laboratory model of Wang (2014)

## ۲.۲. مدل سازی عددی

اساس بنیادی تقریباً همه نرم افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱۲</sup> معادلات ناویر-استوکس<sup>۱۳</sup> می باشد که به شکل کلی حرکت سیال را توصیف می کند. نرم افزارهای اوپن فوم و انسیس فلونت از روش حجم محدود برای گسسته سازی این معادلات که شامل معادله پیوستگی و مومنتوم می باشد و در روابط (۱) و (۲) ذکر شده استفاده می کنند.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{u} = 0$$

رابطه ۱

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

رابطه ۲

که در آن ها  $\rho$  چگالی،  $u$  سرعت جریان،  $t$  زمان،  $P$  فشار،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی،  $F_s$  نیروی کشش سطحی و  $F_g$  نیروی حاصل از گرانش می باشد.

## ۳.۲. مشخصات مدل عددی

در پژوهش حاضر مدل سازی عددی دوبعدی پرش هیدرولیکی از طریق فناوری CFD و نرم افزار متن باز اوپن فوم ۱۸۱۲ و نرم افزار تجاری انسیس فلونت ۱۹/۲ انجام شده است که هر دو بر پایه روش حجم محدود (FVM) می باشد. الگوریتم کوپل فشار-سرعت استفاده شده در این نرم افزار روش پیمپل<sup>۱۴</sup> بوده و برای رسیدن به پایداری بیشتر در جریان آشفتگی مانند پرش هیدرولیکی، در هر دو نرم افزار روش گسسته سازی زمانی، طرح اولر ضمنی مرتبه اول<sup>۱۵</sup> انتخاب شد. حداکثر کورانت<sup>۱۶</sup> شبیه سازی روی عدد CFL=0.5 تنظیم شده که مناسب برای جریان های دوفازی می باشد (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 به صورت وزنی از روابط (۴ و ۵) استفاده شد. به دلیل هزینه محاسباتی بسیار بالای روش شبیه سازی گردابه های بزرگ (LES)<sup>۱۷</sup> در اوپن فوم که نرم افزاری غیرتجاری می باشد شبیه سازی ها با استفاده از روش های میانگین گیری رینولدز (RANS)<sup>۱۸</sup> انجام شد. در بین مدل های مختلف توربولانسی، مدل k-ε standard، k-ω sst و k-ε realisable امتحان شد که با توجه به خطای قابل قبول مدل k-ε standard در طی صحت سنجی برای پارامتر طول غلتک پرش (جدول ۱)، این مدل توربولانسی انتخاب شد که علاوه بر دقت بالا در شبیه سازی طول غلتک پرش، در محاسبه پروفیل سطح آزاد و سرعت جریان، پایداری بسیار بالایی را نسبت به دیگر روش های آشفتگی دارد. در نرم افزار انسیس فلونت نیز مدل k-ε standard به عنوان 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%   |

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

رابطه ۳

$$\rho = \alpha \rho_l + (1 - \alpha) \rho_g$$

رابطه ۴

$$\mu = \alpha \mu_l + (1 - \alpha) \mu_g$$

رابطه ۵

در روابط بالا  $\rho_l$ ،  $\rho_g$  و  $\rho$  به ترتیب چگالی مایع، گاز (هوا) و چگالی در کل دامنه و  $\mu_l$ ،  $\mu_g$  و  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی مایع، گاز و ویسکوزیته در کل دامنه و  $\alpha$  کسر فازی می‌باشد.

## ۴.۲. هندسه و مش بندی

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 به‌کاررفته (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 مش بندی در مدل عددی با اوپن فوم از قسمت blockMesh این نرم‌افزار و در انسیس فلوئنت از قسمت مش بندی استفاده شده است. اندازه مش به‌کاررفته 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.

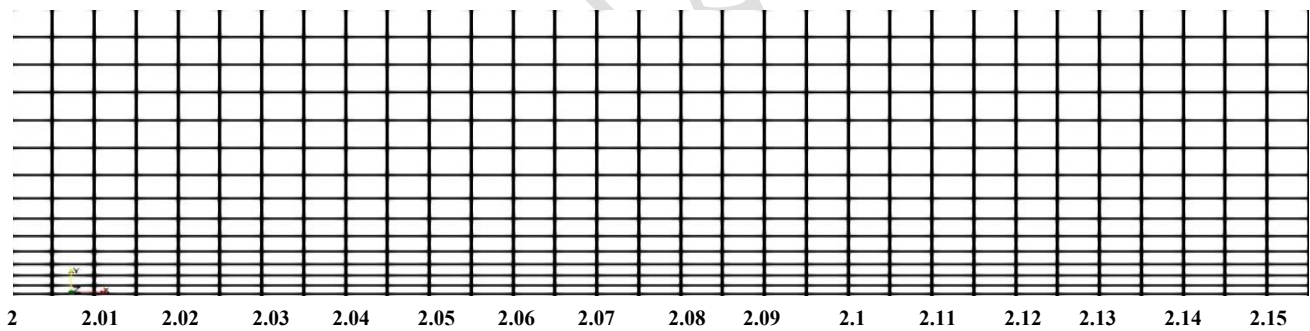


Figure 2. Flow field meshing

## ۵.۲. استقلال حل عددی از شبکه بندی

به‌منظور اعتبارسنجی استقلال حل عددی از شبکه‌بندی، از معیار شاخص همگرایی شبکه (GCI) استفاده شده است. این روش که توسط Roache (1994) پیشنهاد شده به‌نوعی برگرفته از روش رینولدز و بیانگر اختلاف نسبی نتایج بین دو حل گسسته سازی 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 به‌دست‌آمده از نتایج خروجی مدل عددی به‌کار گرفته شده است. روش شاخص همگرایی شبکه به شکل روابط (۶) و (۷) تعریف می‌شود:

$$P_{RE} = \ln \frac{(f_3 - f_2)}{(f_2 - f_1)} / \ln(r)$$

رابطه ۶

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

رابطه ۷

در روابط بالا،  $f_1$ ،  $f_2$  و  $f_3$  پارامترهای هیدرولیکی به دست آمده از شبیه سازی 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 می شود (زیرنویس ۱ برای مش کوچک تر می باشد). نسبت پالایش، طبق توصیه (Celik et al. (2008) باید عددی بزرگ تر از  $1/3$  باشد تا بتوان نتایج قابل قبولی گرفت.

Table 2. GCI calculations

| Variable | $f_1$ | $f_2$ | $f_3$ | $r_{12}$ | $r_{23}$ | $P_{RE}$ | $e_{12}$ | $e_{23}$ | $GCI_{12}$ | $GCI_{23}$ | $GCI_{23}/r_{12}^{PRE} * GCI_{12}$ |
|----------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|------------|------------------------------------|
| $L_r$    | 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 آنجائی که نسبت  $GCI_{23}/r_{12}^{PRE} * GCI_{12}$  نزدیک یک می باشد، نتایج عددی به دست آمده در محدوده همگرایی قرار داشته و به سمت مقدار واقعی می باشد، در نتیجه استقلال از مش حاصل گردیده و کوچک کردن بیشتر مش تأثیری بر نتایج عددی نخواهد داشت.

## ۶.۲. 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 جدول (۳) و جدول (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 می باشد (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

### ۱.۳. صحت سنجی مدل عددی

جهت صحت سنجی مدل عددی، در دبی  $0.0706$  مترمکعب بر ثانیه، از کمیت های 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 صحت سنجی مدل های 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 ( $KGE$ )<sup>۹</sup> و خطای جذر میانگین مربعات ( $RMSE$ )<sup>۱۰</sup> جهت اندازه‌گیری خطای حاصل از مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی که در روابط (۸) تا (۱۰) آمده است، استفاده شده است.

رابطه ۸

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

رابطه ۹

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

رابطه ۱۰

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

$X_{exp}$  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  $r$ ،  $\alpha$  و  $\beta$  به ترتیب ضریب همبستگی، نسبت انحراف معیار و نسبت میانگین مقادیر بین داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده می‌باشد. شاخص آماری  $KGE$  بر اساس تقسیم‌بندی: بسیار خوب ( $0.7 < KGE < 1$ )، خوب ( $0.6 < KGE < 0.7$ )، رضایت‌بخش ( $0.5 < KGE < 0.6$ )، 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 مبدا 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 (بی بعد شده 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 ۰/۵ 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 انتهای 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 اوپن فوم حدود ۰/۳۳ متر بوده و با عمق ثانویه روش Belanger (1841) تطابق خوبی داشته است به طوری که خطای به‌دست‌آمده برای مدل عددی اوپن فوم 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.

رابطه ۱۱

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

نتایج مدل عددی به کمک نرم افزار انسیس فلونت نیز مطابقت خوبی با نتایج نظیر آزمایشگاهی و همچنین نتایج حاصل از مدل عددی به کمک نرم افزار اوپن فوم دارد اما با توجه به شاخص ضریب همبستگی ۰/۹۵ که کمتر از مقدار به دست آمده برای مدل عددی اوپن فوم (۰/۹۹) می باشد، به نظر می رسد که مدل عددی با اوپن فوم قابلیت بیشتری در شبیه سازی پروفیل سطح آزاد جریان دارد.

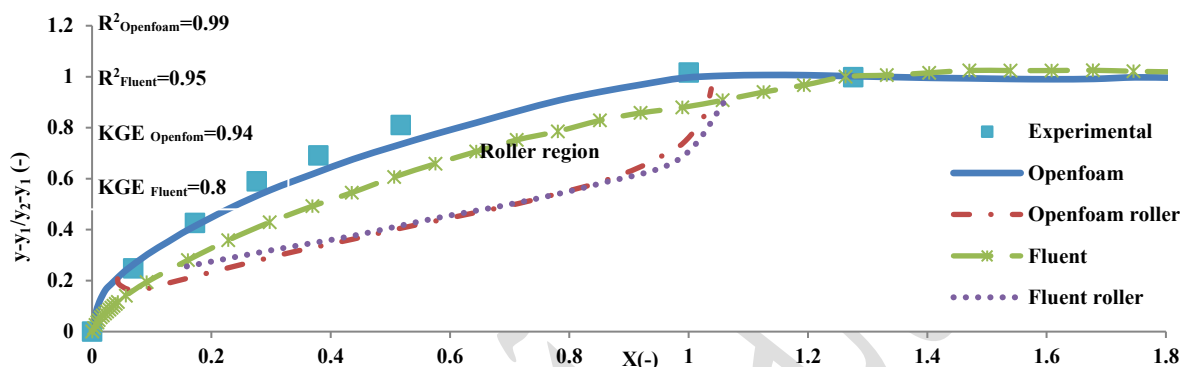


Figure 3. Dimensionless free surface profile comparing Fluent, Openfoam, and experimental results

### 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 موقعیت های مهم دیگری که در ادامه در رسم نمودارها نیاز می باشد از شکل (۴) استفاده شده است. با ترسیم پروفیل های عمودی سرعت متوسط جریان در موقعیت های مختلف در محور طولی پرش هیدرولیکی مقادیر حداکثر و حداقل سرعت جریان و نقطه ایستا (سرعت صفر) در هر پروفیل استخراج می شود. با به هم وصل نمودن نقاط ایستا در مقاطع مختلف پرش می توان به مرز جدا کننده (ایستا) ناحیه غلتک پرش از جریان اصلی دست یافت. تمیز دادن این ناحیه در مدل های عددی، بسیار آسان تر از مدل های آزمایشگاهی می باشد.

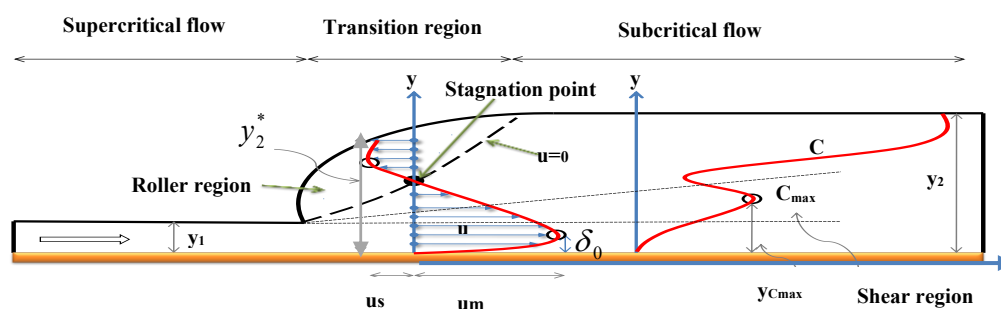


Figure 4. Velocity and air concentration distributions and location of maximum forward and backward velocity, stagnation line, shear region and maximum air concentration

نحوه توسعه پروفیل سرعت جریان در مقاطع مختلف در امتداد جریان در داخل پرش هیدرولیکی که مشتمل بر سه ناحیه مجزا می باشد در شکل (۵) به نمایش گذاشته شده است. ناحیه چرخشی در بالا، یک جریان ناپایدار قوی با حباب های 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 بقا 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 دخول و محبوس شدن مستمر حبابهای هوا در مرکز این گردابه‌ها، حبابهای هوا به همراه گردابه‌ها در طول ناحیه برشی پرش به طرف پایین 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 آشفتگی پایین‌تری را تجربه کند. سطح آشفتگی بالاتر در ناحیه برشی اصلی به تعدادی از پدیده‌ها از جمله ساختار گردابی شبه دوره‌ای و نوسانات طولی پنجه پرش مرتبط است. ناحیه برشی تحتانی، کمتر تحت تأثیر ساختارهای آشفته مقیاس بزرگ قرار گرفته و میدان سرعت ساختار نسبتاً سازمان‌دهی‌تری نسبت به ناحیه برشی اصلی دارد (Wang et al., 2014).

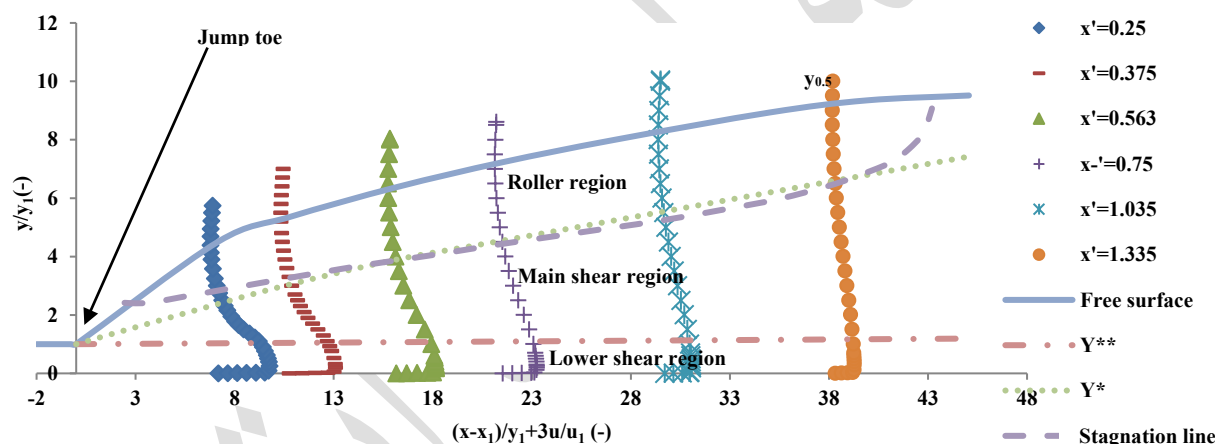


Figure 5. Longitudinal development of velocity profiles and sketch of the sub-regions in the turbulent shear region

Wang et al. (2014) روابط زیر را برای نواحی برشی تحتانی و اصلی برای اعداد فرود جریان ورودی بین  $\frac{3}{8}$  تا  $\frac{8}{5}$  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 به دلیل اثر اصطکاک بر سرعت جریان می‌باشد. این کمیت تطابق خوبی را بین داده‌های به‌دست‌آمده از نرم‌افزار اوپن فوم و انسیس فلوئنت با نمودار (Hager 1992) دارد که برای اعداد فرود بین  $\frac{4}{3}$  تا  $\frac{8}{9}$  تعریف شده است؛ به‌طوری‌که ضریب تعیین بین داده‌های نرم‌افزار اوپن

فوم 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 (رابطه ۱۴ تا ۱۶) و حداقل (رابطه 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 به دلیل 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 اوپن فوم 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 سرعت نسبت به مدل عددی به کمک اوپن فوم نشان می‌دهد.

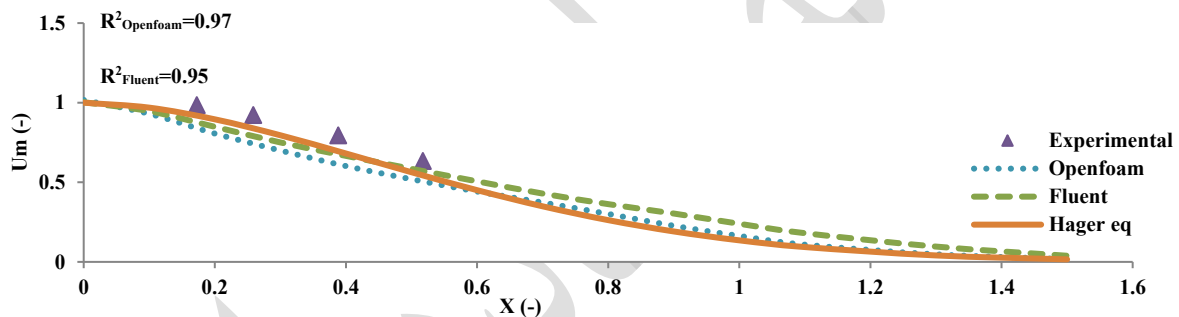


Figure 6. Velocity analysis: maximum forward velocity

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

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

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

$U_m$  حداکثر سرعت بی‌بعد شده،  $u_m$  حداکثر سرعت،  $u_2$  سرعت ثانویه پرش،  $u_1$  سرعت اولیه پرش،  $X$  طول بی‌بعد شده افقی،  $x_1$  محل پنجه پرش و  $L_r$  طول غلتک پرش می‌باشد.

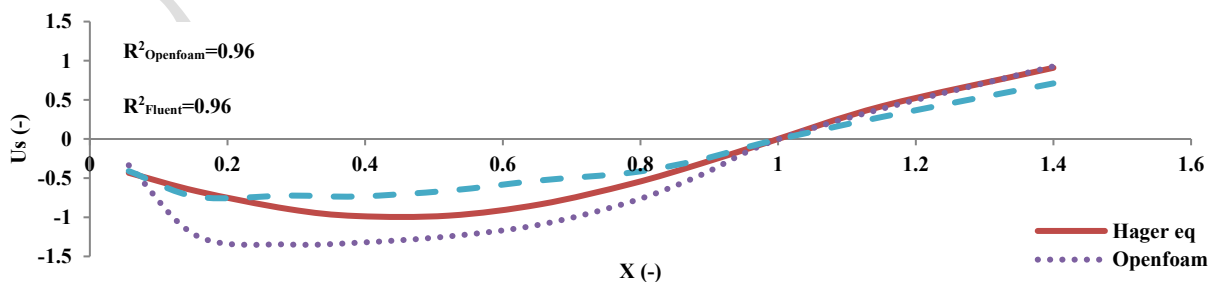


Figure 7. Velocity analysis: maximum backward velocity

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

$$U_s = \frac{u_s}{u_2}$$

$U_s$  حداقل سرعت بی بعد شده،  $u_s$  حداقل سرعت می باشد.

شکل (۸ آوب) به ترتیب نحوه توزیع میدان سرعت جریان بی بعد شده در اعماق مختلف پرش هیدرولیکی را در مقاطع مختلف در طول غلتک پرش هیدرولیکی در دو مدل عددی با نرم افزار اوپن فوم و فلوئنت نشان می دهد که با نمودار Hager (1992) که به صورت رابطه (۱۹) تعریف شده، مقایسه شده است. با توجه به شکل ها مشخص است که مدل عددی به کمک نرم افزار اوپن فوم تطبیق بیشتری با نمودار Hager نسبت به مدل عددی به کمک فلوئنت نشان می دهد اما سرعت های کمتری را نسبت به نمودار Hager برای نقاط مشخص، نشان می دهد و این تفاوت در نواحی تغییر سرعت از مقادیر مثبت به مقادیر منفی در هر مقطع، بیشتر نمود پیدا می کند که نشان می دهد توانایی مدل عددی در بازتولید دقیق میدان سرعت در محل ورود به ناحیه غلتکی با افت مواجه می شود.

$$U = [\cos(100Y')]^2, \quad 0 \leq Y' \leq 1$$

$U$  سرعت بی بعد شده هر نقطه و  $Y'$  عمق بی بعد شده معادل آن نقطه می باشد که در روابط (۲۰) و (۲۱) مشخص شده است.

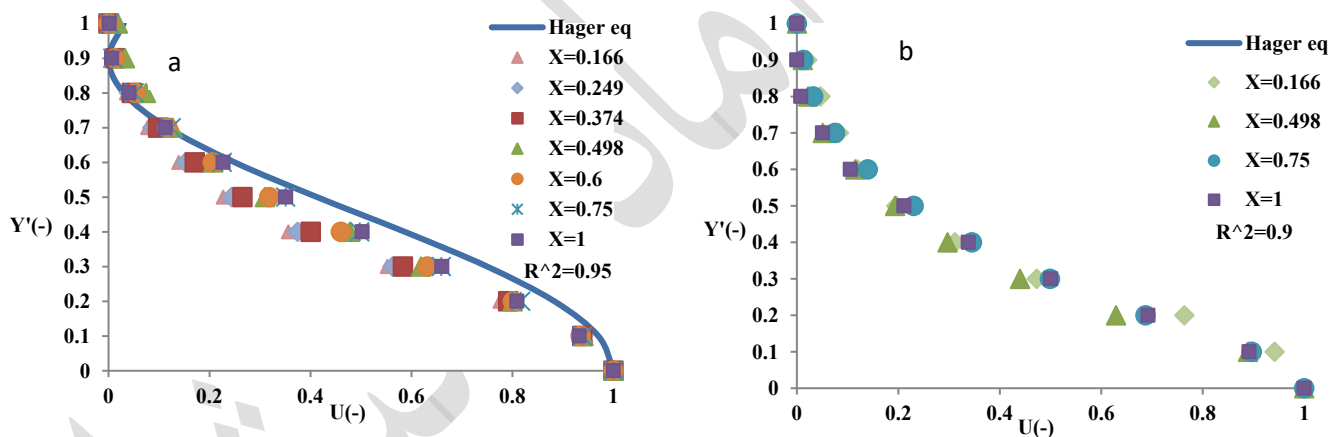


Figure 8. Velocity profiles along longitudinal axis in hydraulic jump roller region: (a) Openfoam; (b) Fluent

$$U = \frac{u - u_s}{u_m - u_s}$$

$$Y' = \frac{y - \delta_0}{y_2^* - \delta_0}$$

$u$  سرعت و  $\delta_0$  ارتفاع معادل محل حداکثر سرعت و  $y_2^*$  عمق جریان در مقطع موردنظر می باشد که در شکل (۴) نشان داده شده بود.

### ۴.۳. طول غلتک پرش

طول غلتک پرش به عنوان فاصله ای تعریف می شود که عمق آب به طور پیوسته از عمق مزدوج اولیه به عمق مزدوج ثانویه افزایش می یابد (Wang, 2014). Hager et al. (1990) این طول را محل برخورد مرز بین جریان های رو به جلو و رو به عقب قسمت چرخشی پرش هیدرولیکی با سطح آزاد آب تعریف کرده اند که از پنجه پرش شروع و به نقطه ایستا در سطح آزاد ختم می شود. طبق کار Bayon et al. (2016) تعیین این متغیر، زمانی آسان تر است که بتوان ناحیه ایستای جریان (جایی که سرعت جریان صفر می شود) 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 (Perez 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:

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

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

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

$\alpha' = 4.3$  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 نرم افزارهای به کاررفته در این تحقیق 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 نرم افزار اوپن فوم 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 پایین دست کاهش می‌یابد. در پرش هیدرولیکی مورد مطالعه در این تحقیق 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.

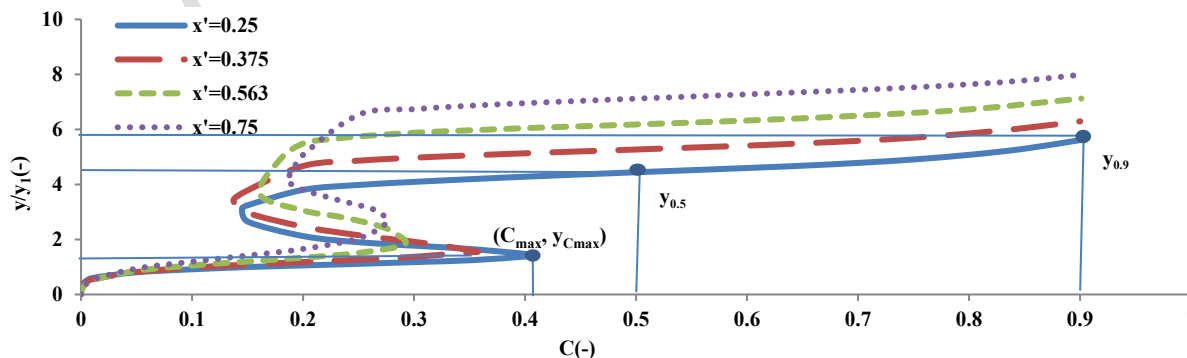


Figure 9. Time-averaged air concentration profiles

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:

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

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.

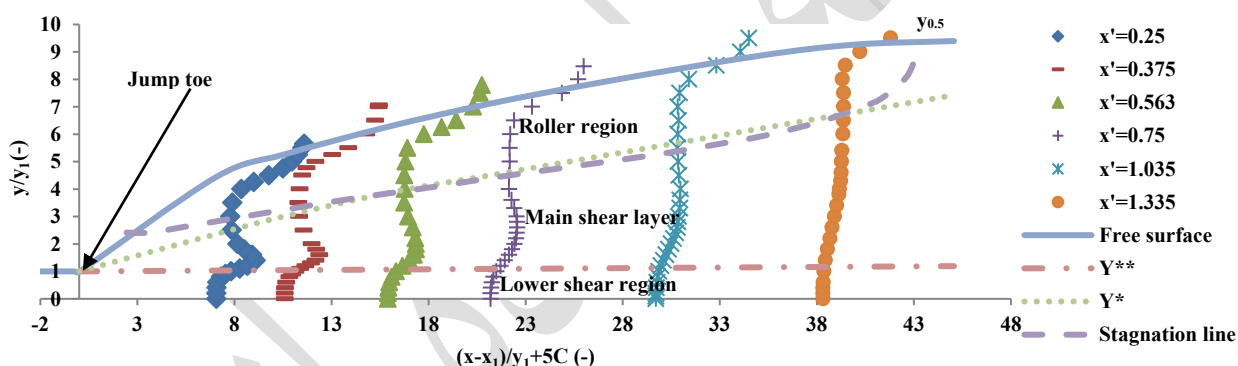


Figure 10. Longitudinal development of void fraction profiles and sketch of the sub-regions in the turbulent shear region

شکل (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 هوا است به سرعت شکسته شده و به حباب‌های هوا تبدیل می‌شوند.

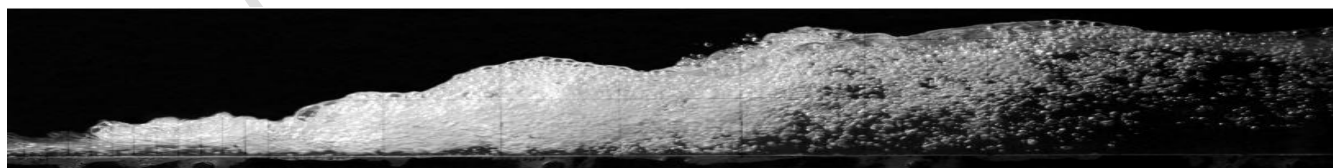


Figure 11. Bubbles in hydraulic jump: laboratory image of Viti (2019)

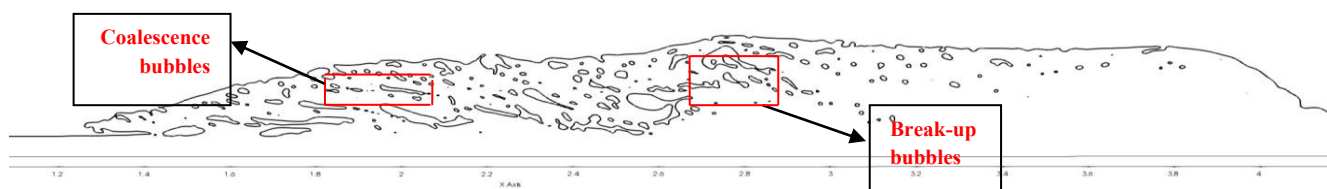


Figure 12. Bubbles in hydraulic jump: numerical (openfoam) image

## ۴. نتیجه گیری

پرش هیدرولیکی به دلیل وجود آشفته‌گی 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 آشفته‌گی توسط روش RANS از نوع  $k-\epsilon$  standard توسط دو نرم‌افزار شبیه‌سازی شد تا توانایی این دو نرم‌افزار یعنی اوپن فوم و انسیس فلوئنت برای مدل‌سازی این پدیده مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج حاصل از این پژوهش در موارد زیر خلاصه می‌گردد:

- هر دو نرم‌افزار اوپن فوم و انسیس فلوئنت 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 تحقیق نشان می‌دهد که ضریب تعیین و معیار کلینگ گوپتا (KGE) برای پروفایل سطح آزاد جریان در مدل عددی با اوپن فوم به ترتیب  $0.99$  و  $0.94$  و برای انسیس فلوئنت  $0.95$  و  $0.8$  می‌باشد. این نتایج حاکی است که مدل عددی مبتنی بر اوپن فوم در مقایسه با مدل عددی مبتنی بر انسیس فلوئنت از قابلیت نسبی بالاتری در شبیه‌سازی پروفایل سطح آزاد پرش هیدرولیکی برخوردار می‌باشد.

- در این تحقیق خط ایستا و در نتیجه طول غلتک پرش هیدرولیکی در هر دو مدل با دقت خوبی تخمین زده شد بطوریکه خطای تقریبی در برآورد طول غلتک معادل چهار درصد برای مدل با اوپن فوم و حدود هفت درصد برای مدل با انسیس فلوئنت به دست آمد.

- حداکثر سرعت جریان در مقاطع قایم 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 آشفته 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 آشفته می‌باشد.

- با حرکت از پنجه پرش به طرف پایین دست، میزان حداکثر غلظت هوا در مقاطع قایم کاهش می‌یابد درحالی 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 تحقیق تاییدی 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 stokes
- 19- Kling gupta efficiency
- 20- Root mean square error

## ۶. تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

## ۷. منابع

- Abbaszadeh, H. , Daneshfaraz, R. and 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, 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, I., 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* 1 November 2024; 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. *J. Hydrol*, 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 downstream material on 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, SK., & Bensow, RE. (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. *Model. Earth Syst. Environ.* 10, 6859–6877.
- 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.

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

Nahid Mirizadeh<sup>1</sup>, Mohammad Manafpour<sup>2 \*</sup>

1-PhD Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

2\*-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

## 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  $1.4 \times 10^6$ . 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.

**Keywords:** Air-water two-phase flow, Computational fluid dynamics, Numerical modeling, Turbulence, Volume of fluid method