

## شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در بستر با زبری سنگ‌ریزه‌ای با نرم‌افزار FLOW-3D

ناهید پورعبدالله<sup>۱\*</sup>، تورج هنر<sup>۲</sup>، شهاب انصاری<sup>۳</sup>

(۱) دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

(۲) دانشیار بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

(۳) دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

\*نویسنده مسئول: nahid7760@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۳

### چکیده

کنترل پرش هیدرولیکی در کانال‌های روباز به منظور کاهش انرژی و خسارات وارده بر ابنیه پایین دست همواره از موضوعات مورد توجه محققین بوده است. یکی از مهم‌ترین موارد در این زمینه ساخت انواع حوضچه آرامش با در نظر گرفتن عوامل اقتصادی و سهولت احداث می‌باشد. به همین خاطر اغلب قبل از تصمیم‌گیری برای احداث حوضچه، شبیه‌سازی جهت پیش‌بینی رفتار پرش در حالات مختلف انجام می‌گردد. یکی از روش‌های جدید کنترل پرش در کانال‌ها، احداث حوضچه آرامش با زبری سنگ‌ریزه‌ای است. لذا در این تحقیق شبیه‌سازی پرش بر روی بستر بدون شیب و با زبری سنگ‌ریزه‌ای در اعداد فرود اولیه ۴/۹ تا ۷/۸، در چهار زبری متفاوت صفر، ۱، ۴ و ۱۰ میلی‌متر با نرم‌افزار FLOW-3D انجام شد. در ادامه نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردیدند. براساس نتایج بدست آمده، بیش‌ترین و کم‌ترین خطا در تخمین عمق اولیه به ترتیب در بستر بدون زبری و با زبری ۴ میلی‌متر و بیش‌ترین و کم‌ترین خطا در تخمین عمق ثانویه به ترتیب در بستر با زبری ۴ میلی‌متر و بستر بدون زبری تعیین گردید. همچنین نتایج نشان داد بیش‌ترین و کم‌ترین خطا در تخمین طول پرش به ترتیب در بستر با زبری ۴ میلی‌متر و بستر بدون زبری رخ داده است.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، پروفیل سطح آب، زبری سنگ‌ریزه‌ای، FLOW-3D.

## مقدمه

پرش هیدرولیکی زمانی اتفاق می‌افتد که جریان در قسمتی از مسیر خود بنا بر شرایط و موقعیت کانال از حالت فوق بحرانی به زیر بحرانی تبدیل شود. در نتیجه عمق جریان در فاصله نسبتاً کوتاهی افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته و ضمن کاهش انرژی به طور محسوس، از میزان سرعت به اندازه قابل توجهی کاسته می‌گردد. خاصیت کاهندگی شدید انرژی در این پدیده پژوهش‌گران را بر آن داشته که از آن به‌عنوان بخشی از سیستم استهلاک انرژی در پای سازه‌های هیدرولیکی نظیر سدها، سرریزهای بندها، تنداب‌ها و آبشارها که در آن‌ها جریان از سرعت زیادی برخوردار است، استفاده کنند. تاکنون تحقیقات وسیعی درباره پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی در حوضچه آرامش به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی انجام شده است. Mccorquodale (۱۹۹۴) مطالعاتی را در مورد پرش هیدرولیکی روی شیب‌های منفی ۰/۱، ۰/۱۶۷، ۰/۲ انجام دادند. بنابر گزارشات آن‌ها، تثبیت این نوع پرش در اعداد فرود کم‌تر از ۹ مشکل می‌باشد. آزمایشات انجام شده نشان می‌دهند که نسبت اعماق مزدوج و طول پرش در شیب‌های منفی در مقایسه با پرش کلاسیک کاهش می‌یابد. Pagliara (۲۰۰۰) با استفاده از دریچه کشویی در حوضچه‌ای به طول ۲ متر، عرض ۰/۴ متر و در شیب‌های منفی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد پرش هیدرولیکی را مورد بررسی قرار دادند. دبی بکار رفته در آن‌ها بین ۲۵ الی ۷۴ لیتر بر ثانیه بود و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی رابطه بین  $G$  و  $F_{r1}$  را که تابعی از شیب بستر (i) بودند را ارائه نمودند. Chamani و Beirami (۲۰۰۶) در آزمایشات خود بر روی شیب‌های صفر، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۰/۱- به این نتیجه رسید که اجزای نیروی ثقل در پرش مخالف با جهت گردش جریان است و سطح آب از سطح غلطان موجدار و ناپایدار شروع می‌شود. Hughes و Flake (۱۹۸۳) نیز در خصوص پرش هیدرولیکی تشکیل شده بر روی بسترهای زبر مطالعاتی انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که ناهمواری‌های مرزی بطور حتم عمق ثانویه و پرش هیدرولیکی را کاهش می‌دهند و میزان این کاهش به عدد فرود اولیه و میزان ناهمواری نسبی مربوط می‌باشد. Mohamed Ali (۱۹۹۱) با انجام یک سری آزمایشات بر روی بستر زبر شده با استفاده از المان مکعبی نشان داد که طول نسبی پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای زبر نسبت به حالت کلاسیک از ۳۷/۴ تا ۶۷/۴ درصد تغییر می‌کند. جهت شبیه‌سازی عددی معادلات حاکم بر این جریان‌ها استفاده شده است. نرم‌افزار Flow-3D توانایی محاسباتی بالایی در جریان‌های معادلات حاکم بر جریان سه بعدی در کانال روباز دارد. این نرم‌افزار حرکت سیال را با استفاده از تقریب‌های حجم محدود حل می‌کند. محیط جریان به شبکه‌ای با سلول‌های مستطیلی ثابت تقسیم‌بندی می‌شود که برای هر سلول مقدارهای میانگین کمیت‌های وابسته وجود دارد. یعنی همه متغیرها در مرکز سلول محاسبه می‌شوند، به جز سرعت که در مرکز وجوه سلول محاسبه می‌شود. در این نرم‌افزار از دو تکنیک عددی برای شبیه‌سازی هندسی استفاده شده است. اول، روش حجم سیال: این روش برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. دوم، روش کسر مساحت - حجم: مانع این روش برای شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی است. Yoo و همکاران (۲۰۰۰) به مطالعه ویژگی‌های میدان جریان در اطراف سد سویانگ، به‌صورت عددی پرداختند. در این شبیه-

سازی از نرم‌افزار Flow-3D برای حل عددی معادله‌های ناویر-استوکس در محیط محاسباتی استفاده شد. مقدارهای محاسباتی شامل فشار، مولفه‌های سرعت، نرخ جریان و تراز سطح آب هستند که با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی موجود مقایسه شدند. Zhao و Misra (۲۰۰۴) پرفش هیدرولیکی آشفته را با روش‌های عددی شبیه‌سازی کردند. نتایج مربوط به سرعت افقی با اندازه‌گیری‌های تجربی مقایسه شدند. González و Bombardelli (۲۰۰۵) در یک شبیه‌سازی عددی با استفاده از Flow-3D به بررسی مشخصات پرفش هیدرولیکی بر روی سطح صاف در دو حالت شبکه‌بندی ریز و شبکه‌بندی درشت به صورت دو بعدی و سه بعدی پرداختند. آن‌ها با استفاده از مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$  و RNG و گردابه‌های بزرگ پرفش هیدرولیکی روی یک بستر هموار را شبیه‌سازی کردند. Unami و همکاران (۲۰۰۰) به بررسی تخمین ضرایب انتقال و پخشیدگی جریان هوادهی شده در پرفش هیدرولیکی بر مبنای مسائل کنترل بهینه پرداختند. عباس‌پور و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از نرم‌افزار دینامیک محاسباتی FLUENT به شبیه‌سازی دو بعدی پرفش هیدرولیکی بر روی سطوح موج‌دار پرداختند. نتایج به دست آمده از بررسی آن‌ها توانایی این مدل را در تخمین پروفیل سطح آب با خطای حدود ۷-۲ درصد نشان می‌دهد. Liu و Wang (۲۰۰۰) چهار روش از احجام محدود را روی شبکه‌های مثلثی بی‌ساختار مورد بررسی قرار دادند و مسائلی چون حل دو بعدی آب‌های کم عمق، شکست سد به صورت دو بعدی، پرفش هیدرولیکی مایل، با این چهار روش، حل شدند و نتایج حل عددی، سرعت محاسبات و پایداری روش‌های حل، با یکدیگر مقایسه شدند. Narayanan و Gunal (۱۹۹۸) در یک مدل دو بعدی و با استفاده از مدل تلاطمی  $k-\epsilon$  و روش حجم محدود مشخصات پرفش هیدرولیکی مستغرق را مورد مطالعه قرار دادند. Sabbagh-Yazdi و همکاران (۲۰۰۷) نیز در یک مدل سه بعدی به ارزیابی مدل‌های تلاطمی  $k-\epsilon$  و RNG بر روی میزان ورود هوا در پرفش هیدرولیکی با استفاده از روش حجم محدود پرداختند. Sarker و Rhodes (۲۰۰۲) با شبیه‌سازی عددی و همچنین انجام آزمایش‌هایی، پرفش آبی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بین آشفتگی به همراه حجم سیال برای شبیه‌سازی عددی دو بعدی و نتایج آزمایشگاهی آن‌ها تطابق مناسبی وجود داشت. صابری و همکاران (۱۳۹۸) گزارش کردند که شعاع پرفش هیدرولیکی تابعی از شعاع جت ورودی، شعاع صفحه هدف مقعر و همچنین مقدار دبی جریان است. علاوه بر این براساس مشاهدات آزمایشگاهی با افزایش شعاع صفحه هدف مقعر شکل این پرفش‌ها از حالت دایروی خارج و پرفش‌های هیدرولیکی به صورت چندضلعی ظاهر می‌گردند. هدف از انجام این تحقیق شبیه‌سازی پرفش هیدرولیکی در بستر با زبری سنگ‌ریزه‌ای با نرم‌افزار FLOW-3D می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### مدل‌سازی آزمایشگاهی

این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شیراز در فلومی به طول ۱۵، عرض ۰/۷ و ارتفاع ۰/۶ متر با دیوارهای شفاف صورت گرفت. به منظور افزایش عدد فرود اولیه، ۲ متر ابتدای کانال (قبل از دریچه بالادست)، ارتفاع از ۰/۶ متر به ۱/۱ متر افزایش یافت. همچنین به منظور ایجاد پرفش از یک دریچه کشویی در فاصله ۲ متری از منبع ورودی و در ادامه از دریچه کشویی دیگری

به منظور تثبیت پرش استفاده گردید. پرش هیدرولیکی پس از باز نمودن دریچه اول، با تغییر میزان بازشدگی دریچه ایجاد و با استفاده از دریچه دوم تثبیت گردید. برای تغییر شیب حوضچه آرامش در زیر آن تسمه‌های فلزی متناسب با شیب موردنظر جوش داده شد. در این تحقیق آزمایشات بر روی بستریهایی با سه زبری به قطر ۱، ۴ و ۱۰ میلی‌متر و در دبی ۵۰ لیتر در ثانیه انجام گردید. در هر مرحله دانه‌بندی زبری‌ها در کل حوضچه یکسان بوده و زبری‌های ذکر شده توسط چسب بر روی صفحه فلزی تثبیت و پس از خشک شدن درون کانال قرار گرفت. اندازه‌گیری عمق جریان با عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت ۰/۱ میلی‌متر انجام گردید. برای ترسیم پروفیل سطح آب نیز از دوربین دیجیتالی استفاده شد. بدین ترتیب که از هر پرش چندین عکس گرفته شده و سپس در نرم‌افزار Grapher7 عکس‌ها رقومی گردیدند. سپس پروفیل‌های سطح آب و توزیع سرعت ترسیم شدند. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار Curve Expert معادله‌ای برای پروفیل سطح آب استخراج شد. دامنه متغیرهای این تحقیق در (جدول ۱) نشان داده شده است.

جدول ۱: دامنه متغیرها در آزمایشات تحقیق حاضر

متغیرها	عدد فرود اولیه	دبی (LPS)	زبری (mm)	شیب کف حوضچه (%)
دامنه تغییرات	۴/۹-۷/۸	۵۰	۱،۴، ۱۰	۰

### شبیه‌سازی رایانه‌ای

جهت شبیه‌سازی از نرم‌افزار Flow-3D استفاده شد. این نرم‌افزار توانایی محاسباتی بالایی در جریان‌های معادلات حاکم بر کانال روباز دارد. نرم‌افزار Flow-3D حرکت سیال را با استفاده از تقریب‌های حجم محدود حل می‌کند. محیط جریان به شبکه‌های با سلول‌های مستطیلی ثابت تقسیم‌بندی می‌شود که برای هر سلول مقدارهای میانگین کمیت‌های وابسته وجود دارد. یعنی همه متغیرها در مرکز سلول محاسبه می‌شوند، به جز سرعت که در مرکز وجوه سلول محاسبه می‌شود.

### تعریف میدان جریان

به‌منظور شبیه‌سازی جریان، میدان حل براساس مطالعات آزمایشگاهی و با همان ابعاد (مقیاس یک به یک) و همان شدت جریان در نرم‌افزار طراحی شد. سپس میدان جریان مش‌بندی گردید. ابعاد مش‌بندی در هر سه جهت مختصات به‌صورت بهینه (با سعی و خطا) در سمت مخزن ۵ سانتی‌متر و در کانال ۲/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. بهینه نمودن ابعاد مش براساس هم‌گرایی حل، تطابق نتایج با مطالعات آزمایشگاهی انجام شد. همچنین براساس سعی و خطای صورت گرفته زمان شبیه‌سازی جریان جهت رسیدن به پایداری ۱۰۰ ثانیه و گام زمانی حل ۱ ثانیه در نظر گرفته شد.

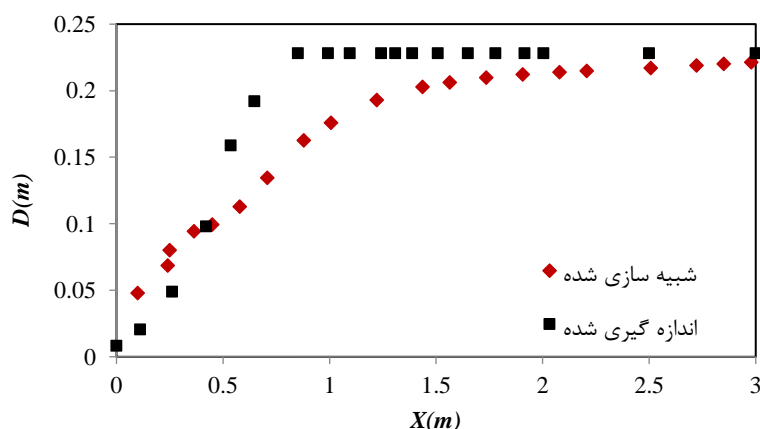
## شرایط مرزی

به منظور شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی، شرایط مرزی جدار بستر و سطح آب در نرم‌افزار به این صورت تعیین گردیدند که در مخزن شرط مرزی در جهت اصلی جریان در ابتدا به صورت فشار و دبی ثابت و در انتها به صورت Symmetry تعریف گردید. همچنین شرایط مرزی جداره‌های جانبی و بستر مخزن از نوع دیوار و در سطح آب از نوع فشار نسبی صفر (اتمسفِر) تعریف گردید. در کانال شرط مرزی در جهت اصلی جریان در ابتدا به صورت Symmetry و در انتها به صورت فشار ثابت تعریف گردید. همچنین شرایط مرزی جداره‌های جانبی و بستر کانال از نوع دیوار و در سطح آب از نوع فشار نسبی صفر (اتمسفِر) تعریف گردید.

## نتایج و بحث

### شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در بستر بدون زبری

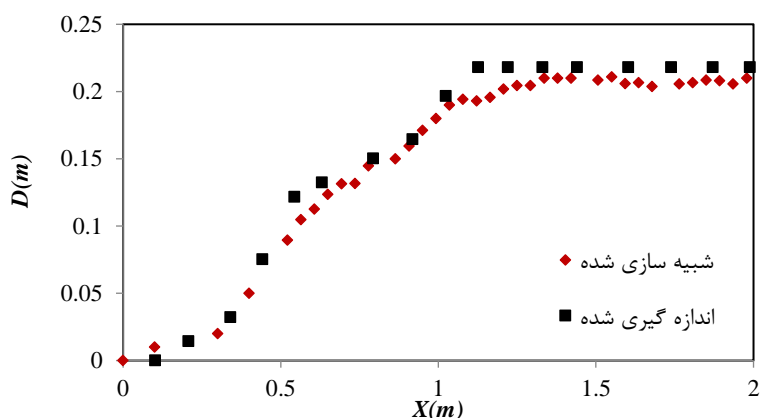
باتوجه به نتایج آزمایشات برای دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه و بستر بدون زبری و بدون شیب، مقدار عمق اولیه برابر با ۲/۱۱ سانتی‌متر و عمق ثانویه برابر با ۲۲/۲ سانتی‌متر تعیین گردید. پس از شبیه‌سازی این پرش مطابق با روش ذکر شده، مقدار عمق اولیه و ثانویه به ترتیب برابر با ۳ و ۲۲/۱۶ سانتی‌متر بدست آمد. خطای شبیه‌سازی شده برای عمق اولیه و ثانویه به ترتیب ۲۹/۶۷ و ۰/۲۳۲ درصد بدست آمد. لذا دقت شبیه‌سازی نرم‌افزار FLOW-3D در حد قابل قبولی بوده است. مقدار طول پرش هیدرولیکی در آزمایش انجام شده برابر با ۱۳۵ سانتی‌متر بدست آمد. این مقدار با شبیه‌سازی FLOW-3D برابر با ۱۴۵ سانتی‌متر حاصل شده است که حاکی از خطای ۶/۸۴ درصدی در شبیه‌سازی نسبت به اندازه‌گیری است. در شکل زیر پروفیل سطح آب برای نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پروفیل سطح آب شبیه‌سازی شده به نتایج آزمایشگاهی نزدیک می‌باشد و شبیه‌سازی از دقت نسبتاً خوبی برخوردار می‌باشد.



شکل ۱: پروفیل سطح آب در بستر بدون زبری و بدون شیب

### شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در بستر با زبری یک میلی‌متر

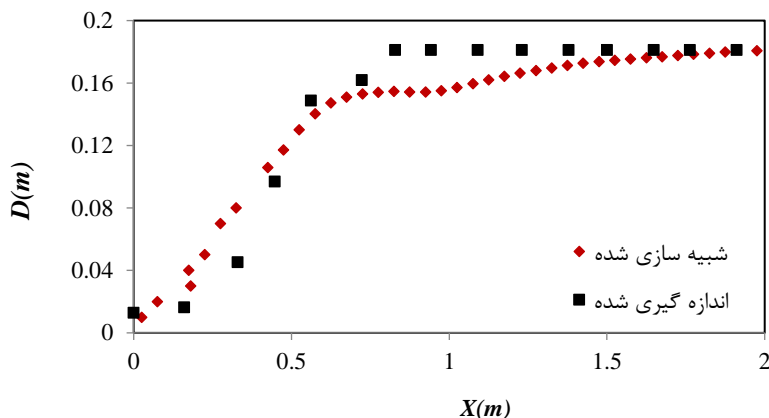
باتوجه به نتایج آزمایشات برای دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه و بستر با زبری ۱ میلی‌متر و بدون شیب، مقدار عمق اولیه برابر با ۲/۴۵ سانتی‌متر و عمق ثانویه برابر با ۲۱/۸ سانتی‌متر تعیین گردید. پس از شبیه‌سازی این پرش با نرم‌افزار FLOW-3D مقدار عمق اولیه و ثانویه به ترتیب برابر با ۳ و ۲۲/۱۵ سانتی‌متر بدست آمدند. خطای شبیه‌سازی شده برای عمق اولیه و ثانویه به ترتیب ۱۸/۶۹ و ۱/۵۰۵ درصد بدست آمد. لذا دقت شبیه‌سازی نرم‌افزار FLOW-3D در حد قابل قبولی بوده است. مقدار طول پرش هیدرولیکی در آزمایش انجام شده برابر با ۱۳۱ سانتی‌متر بدست آمد. این مقدار با شبیه‌سازی FLOW-3D برابر با ۱۴۰ سانتی‌متر حاصل شده است که حاکی از خطای ۶/۳۴ درصدی در شبیه‌سازی نسبت به اندازه‌گیری است. در (شکل ۲) پروفیل سطح آب برای نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پروفیل سطح آب شبیه‌سازی شده به نتایج آزمایشگاهی نزدیک می‌باشد و شبیه‌سازی از دقت قابل قبولی برخوردار است.



شکل ۲: پروفیل سطح آب در بستر با زبری ۱ میلی‌متر و بدون شیب

### شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در بستر با زبری چهار میلی‌متر

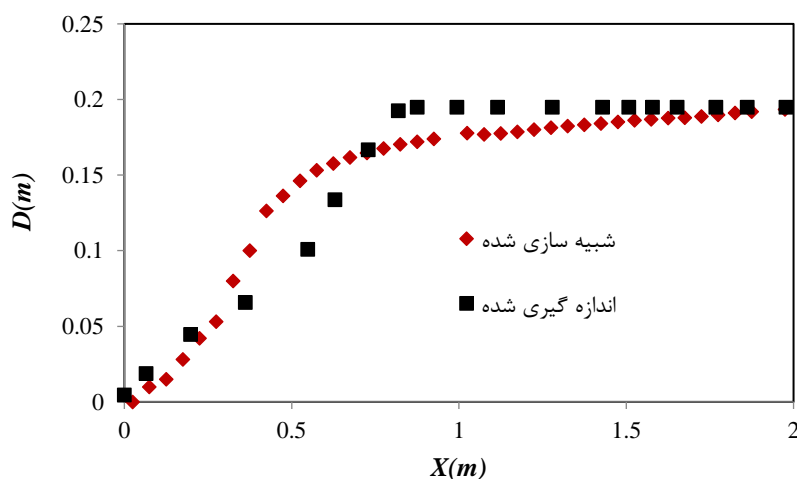
باتوجه به نتایج آزمایشات برای دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه و بستر با زبری ۴ میلی‌متر و بدون شیب مقدار عمق اولیه برابر با ۲/۷۷ سانتی‌متر و عمق ثانویه برابر با ۱۹/۹ سانتی‌متر تعیین گردید. پس از شبیه‌سازی این پرش با نرم‌افزار FLOW-3D مقدار عمق اولیه و ثانویه به ترتیب برابر با ۳/۲ و ۱۸/۱۳ سانتی‌متر بدست آمد. خطای شبیه‌سازی شده برای عمق اولیه و ثانویه به ترتیب ۱۳/۴۸ و ۹/۰۳۶ درصد بدست آمد. لذا دقت شبیه‌سازی نرم‌افزار FLOW-3D در حد قابل قبولی بوده است. مقدار طول پرش هیدرولیکی در آزمایش انجام شده برابر با ۱۲۸ سانتی‌متر بدست آمد. این مقدار با شبیه‌سازی FLOW-3D برابر با ۱۳۵ سانتی‌متر حاصل شده است که حاکی از خطای ۴/۸۴ درصدی در شبیه‌سازی نسبت به اندازه‌گیری است. در (شکل ۳) پروفیل سطح آب برای نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پروفیل سطح آب شبیه‌سازی شده به نتایج آزمایشگاهی نزدیک می‌باشد و شبیه‌سازی از دقت قابل قبولی برخوردار است.



شکل ۳: پروفیل سطح آب در بستر با زبری ۴ میلی‌متر و بدون شیب

### شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در بستر با زبری ده میلی‌متر

باتوجه به نتایج آزمایشات برای دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه و بستر با زبری ۱۰ میلی‌متر و بدون شیب، مقدار عمق اولیه برابر با ۲/۸۲ سانتی‌متر و عمق ثانویه برابر با ۱۹/۵ سانتی‌متر تعیین گردید. پس از شبیه‌سازی این پرش با نرم‌افزار FLOW-3D مقدار عمق اولیه و ثانویه به ترتیب برابر با ۳/۴ و ۱۹ سانتی‌متر بدست آمد. خطای شبیه‌سازی شده برای عمق اولیه و ثانویه به ترتیب ۱۴/۷۷ و ۲/۷۳ درصد بدست آمد. لذا دقت شبیه‌سازی نرم‌افزار FLOW-3D در حد قابل قبولی بوده است. مقدار طول پرش هیدرولیکی در آزمایش انجام شده برابر با ۱۱۳ سانتی‌متر بدست آمد. این مقدار با شبیه‌سازی FLOW-3D برابر با ۱۲۰ سانتی‌متر حاصل شده است که حاکی از خطای ۵/۴۲ درصدی در شبیه‌سازی نسبت به اندازه‌گیری است. در (شکل ۴) پروفیل سطح آب برای نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پروفیل سطح آب شبیه‌سازی شده به نتایج آزمایشگاهی نزدیک می‌باشد و شبیه‌سازی از دقت قابل قبولی برخوردار است.



شکل ۴: پروفیل سطح آب در بستر با زبری ۱۰ میلی‌متر و بدون شیب

## نتایج شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی و خطای حاصل از آن

شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با بستر زیر و بدون شیب در دبی ۵۰ لیتر در ثانیه توسط نرم‌افزار FLOW-3D انجام گردید. زبری بستر با استفاده از سنگ‌ریزه و بصورت یکنواخت در هر آزمایش و در اندازه‌های ۱، ۴ و ۱۰ میلی‌متر ایجاد گردید. مطالعات صورت گرفته شامل اندازه‌گیری عمق اولیه، عمق ثانویه و طول پرش بود. در (جدول ۲) نتایج کلی برای آزمایشات اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده خلاصه شده است. براساس نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، بیش‌ترین و کم‌ترین خطا در تخمین عمق اولیه به ترتیب در بستر بدون زبری و با زبری ۴ میلی‌متر تعیین گردید. همچنین بیش‌ترین و کم‌ترین خطا در تخمین عمق ثانویه به ترتیب در بستر با زبری ۴ میلی‌متر و بستر بدون زبری تعیین گردید.

جدول ۲: خلاصه نتایج آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده

درصد خطای Lj	درصد خطای D <sub>r</sub>	درصد خطای D <sub>l</sub>	Lj (cm)	D <sub>r</sub> (m)	D <sub>l</sub> (m)	نحوه تعیین	(mm) زبری
۶/۸۴	۰/۲۳۲	۲۹/۶۷	۱۳۵	۰/۲۲۲۲	۰/۰۲۱۱	اندازه‌گیری شده	۰
			۱۴۵	۰/۲۲۱۷	۰/۰۳	شبیه‌سازی شده	
۶/۳۴	۱/۵۰۵	۱۸/۶۹	۱۳۱	۰/۲۱۸۲	۰/۰۲۴۵	اندازه‌گیری شده	۱
			۱۴۰	۰/۲۲۱۵	۰/۰۳۰۱	شبیه‌سازی شده	
۴/۸۴	۹/۰۳۶	۱۳/۴۸	۱۲۸	۰/۱۹۹۳	۰/۰۲۷۷	اندازه‌گیری شده	۴
			۱۳۵	۰/۱۸۱۳	۰/۰۳۲	شبیه‌سازی شده	
۵/۴۳	۲/۷۳	۱۴/۷۷	۱۱۳	۰/۱۹۵۳	۰/۰۲۸۲	اندازه‌گیری شده	۱۰
			۱۲۰	۰/۱۹	۰/۰۳۳	شبیه‌سازی شده	

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی بستر زیر و شیب معکوس با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D انجام شد. نتایج نشان داد که از ابتدای پرش تا تاج پرش به دلیل آشفتگی‌های بسیار زیاد، اندکی اختلاف بین داده‌های آزمایشگاهی و عددی وجود داشته است. البته با نزدیک شدن به انتهای پرش به دلیل کاهش تلاطم، این میزان اختلاف نیز از بین رفته و داده‌ها بر هم منطبق شده‌اند. ضمن آنکه وجود زبری و شیب معکوس باعث کاهش تلاطم پرش هیدرولیکی نسبت به حالت کلاسیک شده و در نتیجه دقت شبیه‌سازی عددی افزایش یافته است. نتایج نشان داد کمترین و بیشترین خطا در تخمین طول پرش به ترتیب در بستر با زبری ۴ میلی‌متر و بستر بدون زبری رخ داده است. بنابراین بطور کلی می‌توان بیان نمود که نرم‌افزار Flow-3D قادر به شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی با دقت مناسب در حالت‌های مختلف می‌باشد.

## منابع

صابری، ا.، مه‌پیکر، م. ر. و تیمورتاش، ع. ر. (۱۳۹۸). بررسی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی دایروی روی صفحه مقعر. مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۲۰، شماره ۲، ص ۳۲۸-۳۲۱.



عباس پور.ا.، فرسادی زاده، د.، حسین زاده دلیر، ع. و صدرالدینی، س.ع. (۱۳۸۹). شبیه سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار با مدل FLUENT. دانش آب و خاک، دوره ۲۰، شماره ۲، ص ۸۳-۹۶.

**Beirami, M.K. and Chamani, M.R. (2006).** Hydraulic jump in sloping channel: Sequent Depth Ratio. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132 (10), pp: 1061-1068.

**Gonzalez, A. and Bombardelli, F. (2005).** Two-Phase flow theory and numerical models for hydraulic jumps, including air entrainment. *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*. pp: 28-29.

**Gunal, M. and Narayanan, R. (1998).** K- $\epsilon$  turbulence modeling of submerged hydraulic jump using boundary-fitted coordinates. *Proceedings of the ICE-Water, Maritime and Energy*, 130 (2), pp: 104-114.

**Hughes, W.C. and Flake, J.E. (1983).** Hydraulic jump properties over a rough bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110 (12), pp: 1755-1771.

**Mccorquodale, J.A. (1994).** Hydraulic jump on adverse slope. *Journal of Hydraulic Research*, 32 (1), pp: 119-130.

**Mohamed Ali, H.S. (1991).** Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117 (1), pp: 83-93.

**Pagliara, S. (2000).** Limiting and sill-controlled adverse-slope hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126 (11), pp: 847-851.

**Sabbagh-Yazdi, S.R., Rostami, F. and Mastorakis, N.E. (2007).** Turbulent modeling effects on finite volume solution of three dimensional aerated hydraulic jumps using volume of fluid. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Applied Mathematics*. Stevens Point, Wisconsin, USA. pp: 168-174.

**Sarker, M.A. and Rhodes, D.G. (2002).** Physical modeling and CFD applied to hydraulic jump. Cranfield University Report.

**Unami, K., Kawachi, T., Munir, B.M. and Itagaki, H. (2000).** Estimate of diffusion and convection coefficients in an aerated hydraulic jump. *Advances in Water Resources*, 23 (4), pp: 475-481.

**Wang, J. and Liu, R. (2000).** A comparative study of finite volume methods on unstructured meshes for simulation of 2D shallow water wave problems. *Mathematics and Computers in Simulation*, 53 (5), pp: 171-184.

**Yoo, M., Chen, Y. and Zhou, Q. (2000).** Case study of an s-shape spillway using physical and numerical models. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132 (9), pp: 892-898.

**Zhao, Q. and Misra, S.K. (2004).** Numerical study of a turbulent hydraulic jump. 17th ASCE Engineering mechanics Conference, 13-16 June 2004, University of Delaware, Newark, DE.

## Simulation of hydraulic jump on bed with gravel roughness using FLOW- 3D software

Nahid Pourabdollah<sup>\*1</sup>, Tooraj Honar<sup>2</sup>, Shahab Ansari<sup>3</sup>

- 1) Graduated student, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
- 2) Associate Professor, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.
- 3) Ph.D. of Irrigation and drainage, college of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

\* Corresponding Author: nahid7760@yahoo.com

Received Date: 2021. 06. 24

Accepted Date: 2021. 10. 30

### Abstract

Hydraulic jump control in open channels to reduce energy and damage to downstream constructions has always been a topic of researchers' interests. One of the most important cases in this field is the build of various types of stilling basin considering economic factors and ease of construction. For this reason, jump simulations are often performed before deciding to construct a stilling basin to predict jump behavior in different conditions. One of the new methods of jump control in channels is the construction of a stilling basin with gravel roughness. Therefore, in this research, jump simulation on a non-sloped bed with gravel roughness in the initial Froude numbers of 4.9 to 7.8 and four different roughness's diameters of zero, 1, 4 and 10 mm was performed using FLOW-3D software and results were compared with experimental results. Results showed that the maximum and minimum errors in estimating the initial depth were determined on the bed without roughness and with diameter roughness of 4 mm and the highest and lowest errors in estimating the sequent depth were determined on the bed with diameter roughness of 4 mm and the bed without roughness, respectively. Moreover, the highest and lowest errors in estimating the jump length occurred in the bed with a diameter roughness of 4 mm and the bed without roughness, respectively.

**Keywords:** FLOW-3D, Gravel roughness, Hydraulic jump, Water surface profile.