

## مقاله پژوهشی

# بررسی کارایی مدل Flow-3D در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی تحت زبری بستر، شیب معکوس و پله منفی ابتدایی

فرزین صیاد بیرانوند<sup>۱</sup>، منوچهر حیدرپور<sup>۲\*</sup> و ناهید پورعبدالله<sup>۳</sup>

### چکیده

پرش هیدرولیکی از نوع جریان‌های متغیر سریع بوده که از ابتدا تا انتهای آن تلاطم سطحی آب وجود دارد و به‌عنوان پدیده اتلاف‌کننده انرژی شناخته می‌شود. در این پژوهش به شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در حالت پله منفی ابتدایی ۳ و ۶ سانتی‌متر، زبری بستر ۲ سانتی‌متر و شیب معکوس ۱/۵ و ۳ درصد پرداخته شد. در این پژوهش از مدل‌های آشفتگی RNG (Renormalization group) و K-ε در نرم‌افزار Flow-3D استفاده شد. همچنین، از دو نوع شبکه‌بندی یکنواخت و غیریکنواخت استفاده شد. با توجه به نتایج مدل‌سازی عددی، مدل آشفتگی RNG برای نتایج شبیه‌سازی عددی نیمرخ آشفتگی K-ε با دقت بیشتری محاسبه کرد. میزان شاخص‌های آماری NRMSE،  $R^2$  و d برای نتایج شبیه‌سازی عددی نیمرخ سطح آب در پرش کلاسیک به ترتیب ۱۰/۱، ۰/۹۹۳ و ۰/۹۹۴ به دست آمد. همچنین مقدار این شاخص‌ها برای نتایج شبیه‌سازی نیمرخ سرعت به ترتیب ۱۶/۳۶، ۰/۹۴۴ و ۰/۹۷ محاسبه شدند. خطای مدل عددی در محاسبه مقادیر نیمرخ سرعت بیشتر بود، که علت آن را می‌توان در تلاطم شدید جریان و نوسانات سرعت لحظه‌ای در راستای قائم در محدوده وقوع پرش هیدرولیکی و تشدید اختلاط آب‌وهوا دانست. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی پروفیل سطح آب، پروفیل سرعت، نسبت اعماق مزدوج، طول غلتاب و طول پرش هیدرولیکی و نسبت افت انرژی نشان‌دهنده قابلیت مدل عددی در شبیه‌سازی سه‌بعدی میدان جریان پرش هیدرولیکی آزاد است.

**واژه‌های کلیدی:** پروفیل سرعت، عمق مزدوج، طول پرش، مدل آشفتگی، دینامیک سیالات محاسباتی.

**ارجاع:** صیاد بیرانوند ف. حیدرپور م. و پورعبدالله ن. ۱۴۰۳ بررسی کارایی مدل Flow-3D در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی تحت زبری بستر، شیب معکوس و پله منفی ابتدایی. مجله پژوهش آب ایران. ۱۳-۱: ۵۳. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2024.14757.2598>

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۳- دانشجوی سابق دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

\* نویسنده مسئول: [heidar@cc.iut.ac.ir](mailto:heidar@cc.iut.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۴

## مقدمه

پرش هیدرولیکی از تبدیل جریان فوق‌بحرانی به زیر بحرانی شکل گرفته و انرژی جنبشی را به انرژی پتانسیل تبدیل می‌کند (Omid et al., 2011)؛ (Thompson and Kilgore, 2006). از پرش هیدرولیکی برای اتلاف انرژی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی استفاده می‌شود. پرش هیدرولیکی روی بسترهای صاف به‌طور گسترده بررسی شده است (Rajaratnam, 1965; De Padova et al., 2018). روش‌های بسیاری برای کاهش عمق ثانویه، طول پرش و افزایش اتلاف انرژی پرش هیدرولیکی وجود دارد، مانند افزایش شیب معکوس بستر (Beirami and Chamani, 2006; Beirami and Chamani, 2010; Pourabdullah, et al., 2020a; McCorquodale and Mohamed, 1994). افزایش شیب معکوس بستر باعث افزایش مؤلفه افقی وزن آب و قرارگرفتن حجم آب در نزدیکی دریچه شده که باعث کاهش طول نسبی پرش می‌شود (Saiadi et al., 2021). وجود زبری روی بستر نیز دارای اثر مشابه است (Fallahi and Heidarpour, 2021; Carollo et al., 2007).

(Pourabdullah et al. 2020b) به بررسی حوضچه آرامش با شیب معکوس و پله مثبت پرداختند. نتایج نشان داد شیب معکوس نسبت به پله مثبت تأثیر بیشتری بر کاهش نسبت اعماق مزدوج، طول غلتاب و طول پرش هیدرولیکی داشت. (Saiadi et al. 2021) خصوصیات پرش هیدرولیکی را تحت تأثیر پله منفی ابتدایی و شیب معکوس بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد مقدار نسبت اعماق مزدوج، افت انرژی و طول پرش با افزایش شیب معکوس، به ترتیب ۱۲/۶، ۱۶/۸ و ۱۳/۹ درصد کاهش می‌یابد. (Bagheri et al. 2023) به بررسی آزمایشگاهی مشخصات پرش هیدرولیکی با استفاده از پره‌های مستغرق و شیب معکوس پرداختند. نتایج نشان داد نسبت اعماق مزدوج و طول پرش هیدرولیکی آزاد به ترتیب ۳۳ و ۴۷ درصد در مقایسه با حالت کلاسیک کاهش پیدا می‌کند. (Bayon et al. 2016) به ارزیابی عملکرد OpenFOAM و Flow-3D در مدل‌سازی عددی پرش هیدرولیکی پرداختند. نتایج نشان داد مدل Flow-3D تعامل بین

جریان فوق‌بحرانی و زیربحرانی و نسبت عمق‌های مزدوج را بهتر شبیه‌سازی می‌کند. (Kumar et al. 2018) پرش هیدرولیکی را در اعداد فرود ۴/۸-۳/۵۲ بررسی کردند و سپس به شبیه‌سازی عددی پرداختند. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی از تطابق خوبی برخوردار بودند. (Ali and Elhamaimi 2020) به بررسی تأثیر بسترهای موج‌دار بر خصوصیات پرش هیدرولیکی مستغرق و شبیه‌سازی آنها با استفاده از شبیه‌سازی عددی پرداختند. نتایج نشان داد مدل RNG با نتایج آزمایشگاهی تطابق بیشتری داشت. (Nikmehr and Aminpour 2020) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی در بستر زبر را با نرم‌افزار Flow-3D شبیه‌سازی کردند. آنها به تطابق خوب نتایج اندازه‌گیری شده با شبیه‌سازی رسیدند. (Ghaderi et al. 2021) به شبیه‌سازی عددی میدان جریان پرش هیدرولیک مستغرق در بستری با زبری‌های مثلثی پرداختند. نتایج نشان داد برای هر دو نوع بستر (صاف و ناهموار) در پرش مستغرق، به دلیل افزایش عمق و جریان گردابی، حداکثر فاصله سرعت از بستر کاهش می‌یابد.

تاکنون مطالعه‌ای در رابطه با شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در حضور پله منفی ابتدایی، شیب معکوس و زبری بستر صورت نگرفته است؛ بنابراین هدف این پژوهش شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در حضور چنین اجزایی به صورت مجزا و مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D با دو مدل آشفتگی RNG و K-ε بوده است. علاوه بر این در این مطالعه به چند سؤال مهم در مورد توانایی مدل عددی Flow-3D برای شبیه‌سازی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی و میزان تفاوت بین داده‌های تجربی و خروجی‌های عددی پاسخ خواهد داد.

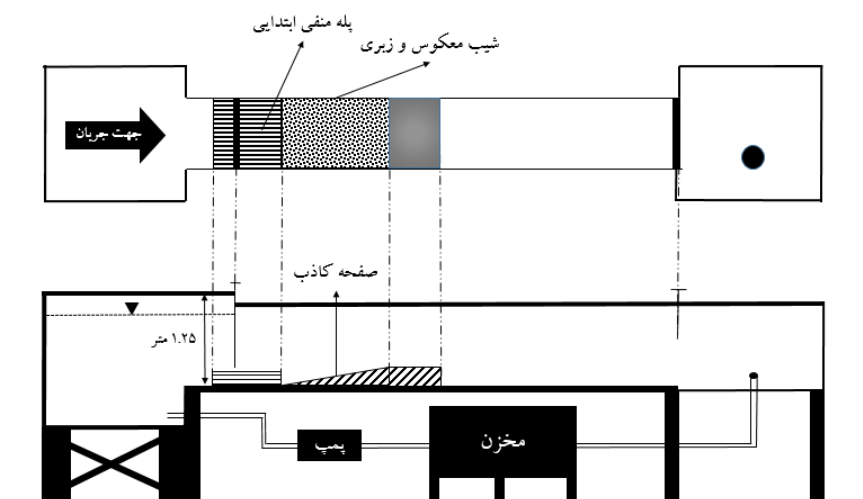
## مواد و روش‌ها

## مشخصات مدل آزمایشگاهی

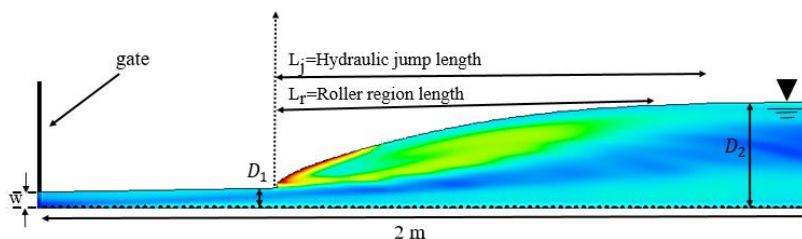
در این پژوهش برای صحت‌سنجی مدل عددی و شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی روی پله منفی ابتدایی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی (Saiadi et al. 2021) و شیب معکوس و بستر زبر از داده‌های آزمایشگاهی

برآورد خواهد شد. سپس به شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در حضور پله منفی ابتدایی در ارتفاع ۳ و ۶ سانتی‌متر، شیب معکوس ۱/۵ و ۳ درصد و زبری بستر ۲ سانتی‌متر به صورت مجزا پرداخته و توانایی مدل در بخش‌های مختلف سنجدیده خواهد شد. شکل ۲ نیز شرایط جریان و ویژگی‌های پرش هیدرولیکی را بر بستر زبر نشان می‌دهد.

(Fallahi and Heidarpour, 2021) که در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شده است، استفاده شد. در پژوهش آن‌ها از یک کانال مستطیلی با دیواره‌هایی از جنس پلاکسی گلاس شیشه‌ای شفاف به طول ۸، عرض ۰/۴ و ارتفاع ۰/۶ متر استفاده شد. شکل ۱ نمای شماتیک از فلوم آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در این پژوهش ابتدا با شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی کلاسیک، اندازه‌های مناسب و مدل آشفتگی مناسب،



شکل ۱- نمای شماتیک فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده (Saiadi et al., 2021; Fallahi and Heidarpour, 2021)



شکل ۲- نمای شماتیک پرش هیدرولیکی شکل گرفته از روی بستر ناهموار و ویژگی‌های آن

$$V_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (1)$$

در این معادله  $V_f$  مقدار نسبت حجم باز به حجم جریان،  $\rho$  دانسیته سیال، عبارت  $R_{DIF}$  پخش آشفتگی و  $R_{SOR}$  منبع جرم، اجزا سرعت  $(u, w, z)$  در جهات  $(x, y, z)$ ،  $(A_x, A_y, A_z)$  به ترتیب مقادیر نسبت مساحت در راستای  $(x, y, z)$ ،  $R$  و  $\xi$  مربوط به

### معادلات حاکم بر جریان در نرم‌افزار Flow-3D

معادلات حاکم بر جریان شامل معادله پیوستگی و مومنوم هستند.

#### الف) معادله پیوستگی یا بقای جرم

معادله پیوستگی جریان از قانون بقای جرم و با نوشتن موازنه جرم برای یک المان سیال به دست می‌آید. به صورت کلی این معادله به شکل زیر نوشته می‌شود (Ghasemzadeh, 2013):

به‌همین دلیل در این پژوهش، از دو نوع شبکه‌بندی استفاده شد. در شبکه‌بندی نوع اول، در همهٔ راستاها اندازهٔ سلول‌ها یکنواخت بود، اما در شبکه‌بندی نوع دوم، در جهت جریان (x) و عمق جریان (z) اندازهٔ سلول‌ها غیریکنواخت در نظر گرفته شد (شکل ۳). پس از بررسی نتایج به‌دست‌آمده از شبکه‌بندی یکنواخت استفاده شد. همچنین از آنجایی که در این پژوهش از نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است، بایستی شرایط مرزی مطابق با آزمایش‌های صورت‌گرفته در نظر گرفته شود؛ بنابراین در مرز ورودی بالادست کانال از شرط مرزی فشار مشخص (Specified pressure) برای تعریف فشار در وجه‌های شبکه حل استفاده می‌شود، در مرز خروجی پایین‌دست نیز فشار مشخص، در کف و دیوارهٔ کانال از شرط مرزی دیواره (Wall)، که مشابه یک دیوار مجازی عمل خواهد کرد و برای سطح آزاد و همچنین وجه‌های به هم چسبیده از شرط مرزی تقارن (Symmetry) استفاده شد (شکل ۴).

در این مطالعه به‌منظور تعیین مقدار بهینهٔ اندازهٔ سلول‌های شبکه (مش)، ابتدا پرش کلاسیک با استفاده از مدل آشفتگی RNG شبیه‌سازی شد. برای انجام شبیه‌سازی از مش‌بندی منظم و ساختاریافته دو سانتی‌متر استفاده شد. در ادامه شبیه‌سازی‌ها اندازهٔ سلول‌ها کاهش یافت و نتایج آن استخراج شد. این کاهش در اندازهٔ سلول‌ها (افزایش تعداد سلول‌ها) تا زمانی ادامه پیدا کرد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی تغییرات بسیاری نداشته و به نزدیک‌ترین مقدار به نتایج آزمایشگاهی رسیده باشد. سپس با در نظر گرفتن مش بهینه و با استفاده از مدل‌های آشفتگی RNG و  $k-\epsilon$  پرش کلاسیک مجدد شبیه‌سازی شد. با مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی مدل آشفتگی مناسب انتخاب شد. پس از انتخاب بهترین شبکهٔ حل و مدل آشفتگی مناسب، نتایج مدل‌سازی عددی شامل پروفیل‌های سطح آب، نیم‌رخ سرعت، نسبت اعماق مزدوج، طول غلتاب و طول پرش هیدرولیکی و نسبت افت انرژی استخراج و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند.

سیستم انتخابی است. برای سیال غیرقابل تراکم  $\rho$  در معادلهٔ پیوستگی ثابت است. با توجه به مختصات کارتیزین و غیرمتخلخل بودن محیط، معادلهٔ پیوستگی به‌صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 \quad (2)$$

در حالت کلی معادلهٔ (۲) به‌شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\nabla(V.A) = 0 \quad (3)$$

### ب) معادلات مومنتوم

از حل معادلات ناویر-استوکس معادلات مومنتوم یا حرکت حاصل می‌شوند. معادلات ناویر-استوکس با توجه به روش‌های به‌کاررفته در نرم‌افزار Flow-3D، غیرقابل تراکم بودن سیال، غیرمتخلخل بودن مسئله، ثابت بودن مرزهای جامد، انتخاب راستای z به‌عنوان راستای ثقل که در نهایت تنها شتاب ثقل ( $g_z$ ) وارد بر جریان خواهد بود و استفاده از مختصات کارتیزین به‌صورت زیر خلاصه می‌شوند (Ghasemzadeh, 2013):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right) \quad (4)$$

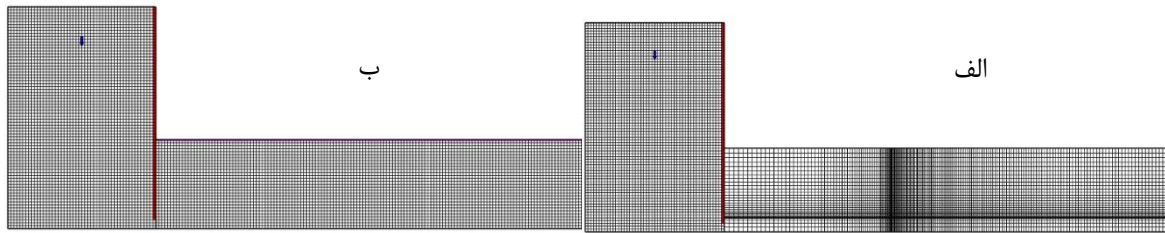
$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial P}{\partial y} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right) + g_z \quad (6)$$

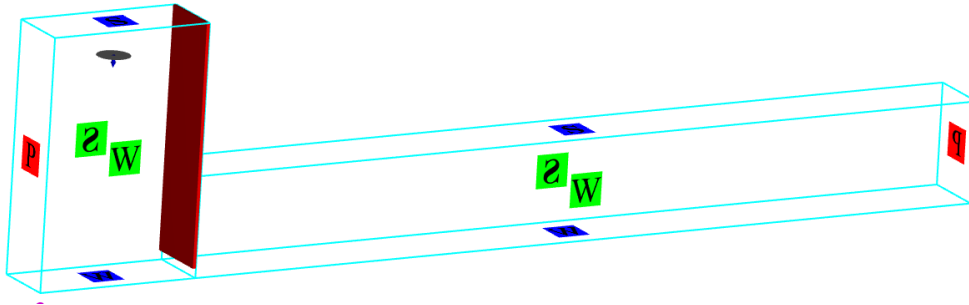
که در این رابطه  $A$  متوسط نسبت مساحت جریان در جهت‌های  $(x, y, z)$ ،  $u$ ،  $v$  و  $w$  متوسط سرعت در جهت‌های  $(z, y, x)$  هستند.

### شبکه‌بندی میدان حل و شرایط مرزی

به‌دلیل حساسیت مدل‌ها به شبکهٔ حل ایجادشده، برای نتایجی با نرخ همگرایی، زمان محاسبات و دقت مطلوب، دستیابی به شبکه‌ای مناسب بسیار ضروری است.



شکل ۳- الگوی شبکه بندی استفاده شده: الف) غیر یکنواخت، ب) یکنواخت



شکل ۴- شرایط مرزی اعمال شده در مدل

که در این معادلات  $X_i$ : مقادیر مشاهده‌ای،  $\bar{X}$ : میانگین داده‌های مشاهده‌ای،  $Y_i$ : مقادیر شبیه‌سازی شده،  $\bar{Y}$ : میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده،  $O$ : میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده و  $n$ : تعداد داده‌ها است.

### نتایج و بحث

#### انتخاب مش بهینه

مقادیر پروفیل سطح آب و سرعت حاصل از مدل عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده حاکی از توانایی مدل در شبیه‌سازی پروفیل سطح آب و سرعت است. همچنین در شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته به‌منظور دقت بیشتر در خروجی‌ها، ابعاد شبکه در چند مرحله تغییر داده شد (شکل ۵). مطابق با این شکل با افزایش تعداد سلول‌ها میزان سرعت به سمت یک مقدار ثابت تمایل پیدا می‌کند به طوری که از تعداد پنج میلیون سلول به بعد و با ریزتر شدن مش‌ها تغییر بسیار کمی در مقدار سرعت مشاهده شد؛ بنابراین سومین گام (اندازه سلول  $0.75$  سانتی‌متر) به‌عنوان بهترین حالت برای ابعاد شبکه انتخاب شد.

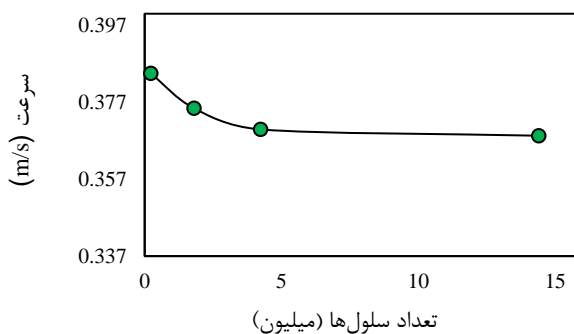
### شاخص‌های ارزیابی

ارزیابی دقت شبیه‌سازی در حالات مختلف با استفاده از سه شاخص آماری صورت گرفت:  $R^2$ : ضریب تبیین که میزان ارتباط خطی بین دو متغیر را اندازه‌گیری می‌کند،  $NRMSE$ : جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده و  $d$ : ضریب توافق که برای تعیین نوع و درجه بین دو متغیر کمی است. هرچه مقدار  $R^2$  و  $d$  به یک نزدیک‌تر و  $NRMSE$  برای یک مدل کوچک‌تر باشد، به معنی مطلوب بودن آن مدل است.

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \right)^2 \quad (7)$$

$$NRMSE = \frac{\left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2 \right]^{0.5}}{O} \quad (8)$$

$$d = 1 - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|X_i - \bar{X}| + |Y_i - \bar{Y}|)^2} \right\} \quad (9)$$



شکل ۵- مراحل انتخاب ابعاد شبکه از درشت به ریز

جدول ۱- بررسی دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی پروفیل‌های سطح آب در مدل K-ε با اندازه‌های مختلف مش‌بندی

d	NRMSE	R <sup>2</sup>	اندازه مش (cm)	
			در راستای طول (X)	در راستای عمق (Z)
۰/۹۶۷	۱۵/۱۱	۰/۹۷۹	۲	۲
۰/۹۹۲	۱۳/۳	۰/۹۸۷	۱	۱
۰/۹۹۲	۱۳/۱	۰/۹۸۸	۰/۷۵	۰/۷۵
۰/۹۷۶	۱۴/۱۱	۰/۹۶۴	۲، ۱	۲
۰/۹۹	۱۴/۳	۰/۹۸۷	۱، ۰/۵	۱
۰/۹۹۴	۱۲/۷	۰/۹۸۹	۰/۵	۰/۵

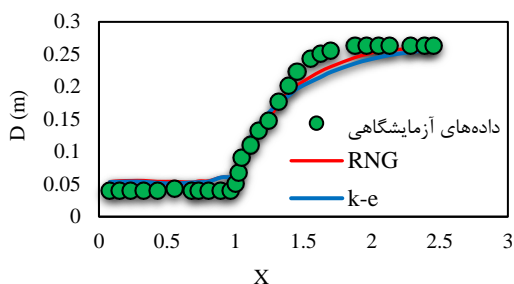
جدول ۲- بررسی دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی پروفیل‌های سرعت در مدل RNG با اندازه‌های مختلف مش‌بندی

d	NRMSE	R <sup>2</sup>	اندازه مش (cm)	
			در راستای طول (X)	در راستای عمق (Z)
۰/۸۴	۲۳/۱۴	۰/۸۱۵	۲	۲
۰/۹۴	۱۹/۵۸	۰/۹۳۲	۱	۱
۰/۹۶	۱۸/۲۳	۰/۹۴۴	۰/۷۵	۰/۷۵
۰/۸۶	۲۳/۱۴	۰/۸۲۱	۲، ۱	۲
۰/۹۵	۱۷/۵۵	۰/۹۳۵	۱، ۰/۵	۱
۰/۹۷	۱۶/۳۶	۰/۹۴۴	۰/۵	۰/۵

### مدل آشفتگی مناسب

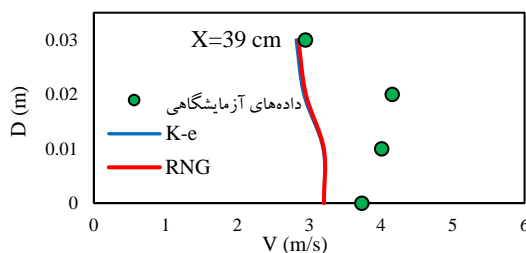
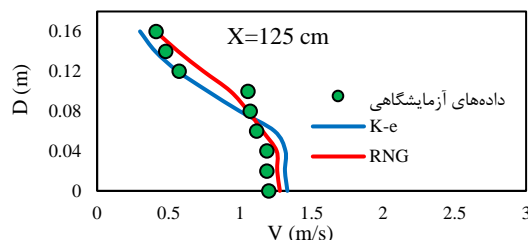
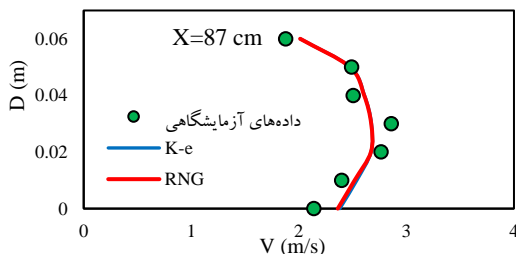
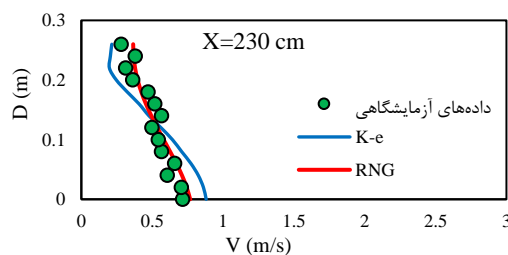
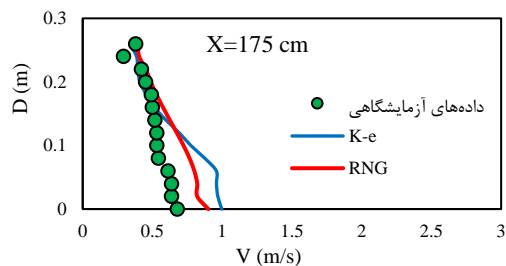
در این پژوهش برای بررسی میزان دقت مدل‌های آشفتگی k-ε و RNG، با استفاده از اندازه مش بهینه (۰/۷۵)، پرش کلاسیک شبیه‌سازی شده و پروفیل‌های سطح آب و سرعت با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. شکل ۶ نیمرخ سطح آب شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل‌های آشفتگی مختلف با داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، خطای ایجاد شده در تخمین پروفیل سطح آب، اغلب در محل آخرین موج غلطان است. همچنین پروفیل‌های

سرعت حاصل از مدل‌های آشفتگی و داده‌های آزمایشگاهی در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل‌ها مشخص است، در نواحی نزدیک به کف بین مقادیر آزمایشگاهی و مدل عددی اختلاف بیشتری مشاهده می‌شود که با نتایج Ghanami (2013) تطابق دارد. همچنین در نقاط میانی پرش (X=175 cm و X=125 cm) و نقطه ابتدایی پرش (X=0.39 cm) دقت مدل عددی در پیش‌بینی مقادیر سرعت کاهش می‌یابد. همچنین ضریب تبیین (R<sup>2</sup>)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و ضریب توافق (d) مقادیر نیمرخ سطح آب و سرعت به دست آمده از مدل عددی در



شکل ۶- مقایسه نیمرخ‌های سطح آب شبیه‌سازی شده از مدل‌های آشفتگی با نتایج آزمایشگاهی (پرش کلاسیک)

مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج مدل آشفتگی RNG نتایج بهتری را ارائه کرده است. نتایج پژوهش حاضر با نتایج Raiford and Khan, Ebrahimi et al. (2018) و Pourabdollah et al. (2023) و (2006) تطابق دارد.



شکل ۷- مقایسه پروفیل سرعت به دست آمده از مدل‌های آشفتگی و داده‌های آزمایشگاهی در فواصل مختلف طولی (پرش کلاسیک)

جدول ۳- بررسی دقت مدل‌های آشفتگی مختلف در شبیه‌سازی پروفیل‌های سطح آب و سرعت

d	NRMSE	R <sup>2</sup>	مدل آشفتگی	
۰/۹۹۴	۱۰/۱	۰/۹۹۳	RNG	پروفیل سطح آب
۰/۹۹۲	۱۳/۱	۰/۹۸۸	K-ε	
۰/۹۶	۱۸/۲۳	۰/۹۴۴	RNG	پروفیل سرعت
۰/۹۵	۱۹/۱۱	۰/۹۲۲	K-ε	

غیرکلاسیک با توجه به اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی ارزیابی شد. بررسی دقت شبیه‌سازی عددی نیمرخ سطح آب پرش‌های هیدرولیکی تحت شرایط مختلف در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که از جدول

### نیمرخ سطح آب

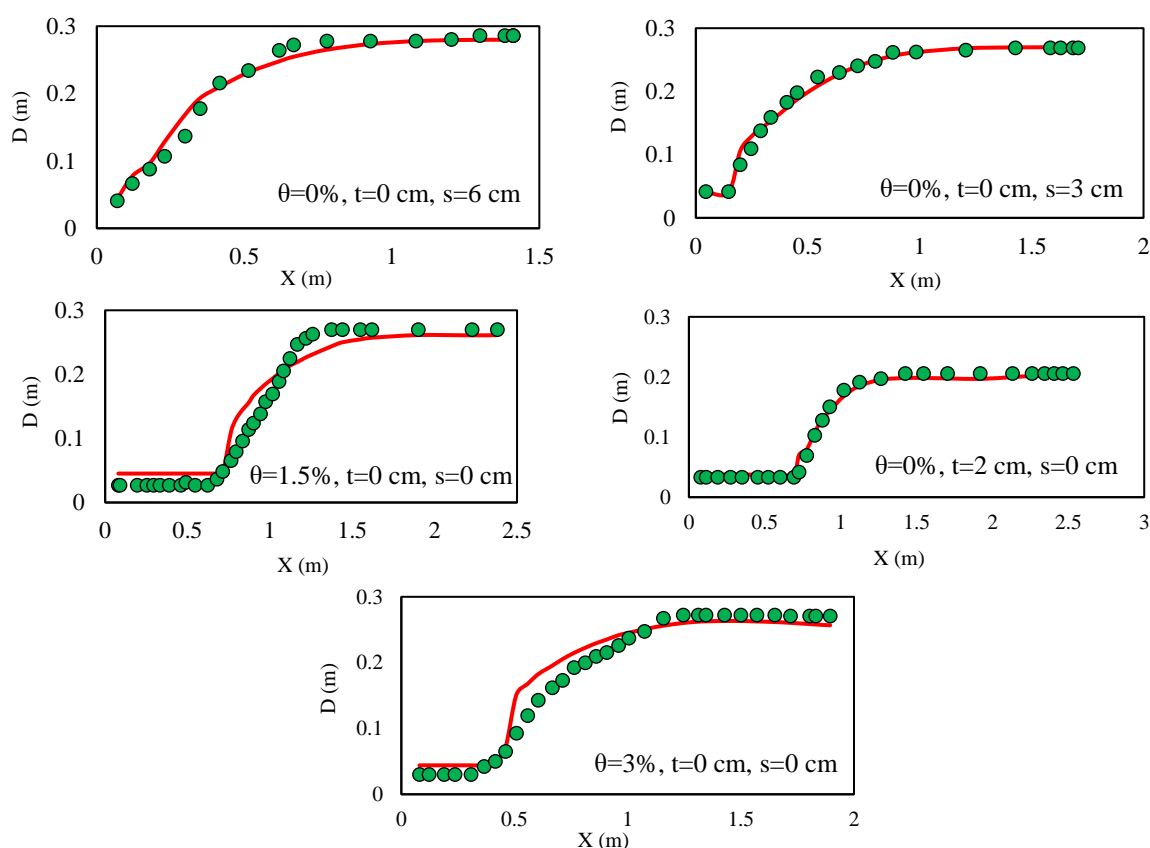
پس از تعیین اندازه مش بهینه (۰/۷۵) و همچنین مدل آشفتگی مناسب (RNG)، دقت مدل عددی در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در دیگر حالت‌های

نزدیک‌شدن به انتهای پرش مقدار اختلاف کمتر می‌شود. در واقع آشفتگی یک پدیده تصادفی با نوسانات غیرخطی است که شبیه‌سازی دقیق آن را دشوار می‌کند. درحالی‌که مدل‌های عددی می‌توانند ابزار ارزشمندی برای مطالعه پرش‌های هیدرولیکی باشند، مهم است به محدودیت‌های آن‌ها نیز توجه داشت.

مشخص است میزان تطابق با نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی بسیار زیاد است. همچنین نیمرخ‌های سطح آب حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی‌شده در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل‌ها پیداست، از ابتدا تا تاج پرش به دلیل آشفتگی اختلاف بیشتری بین داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌شده مشاهده می‌شود، اما با

جدول ۴- بررسی دقت شبیه‌سازی عددی سطح آب برای انواع حالت‌های پله منفی ابتدایی، شیب معکوس و زبری بستر

مدل‌ها	NRMSE	$R^2$	d
$\theta=1.5\%$ , $t=0$ cm, $s=0$ cm	۱۱/۸	۰/۹۶	۰/۹۷
$\theta=3\%$ , $t=0$ cm, $s=0$ cm	۱۱/۴	۰/۹۶	۰/۹۷۵
$\theta=0\%$ , $t=2$ cm, $s=0$ cm	۶/۱۹	۰/۹۹۵	۰/۹۹
$\theta=0\%$ , $t=0$ cm, $s=3$ cm	۴/۴	۰/۹۸	۰/۹۸۶
$\theta=0\%$ , $t=0$ cm, $s=6$ cm	۵/۹	۰/۹۸۶	۰/۹۹

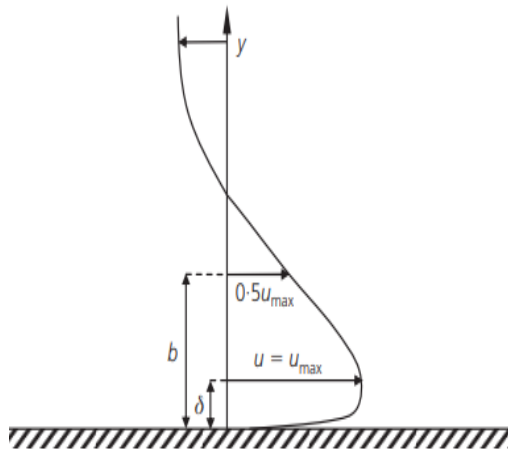


شکل ۸- مقایسه نیمرخ‌های سطح آب شبیه‌سازی‌شده و داده‌های آزمایشگاهی در انواع پله منفی ابتدایی، شیب معکوس و زبری بستر



## نیمرخ سرعت

حداکثر سرعت با افزایش ضخامت لایه مرزی کاهش می‌یابد. همچنین در پایین دست پرش، حداکثر سرعت با کاهش فشار افزایش می‌یابد. در پروفیل‌های رسم شده  $x$  فاصله از دریچه بالادست است. همچنین جدول ۵ شبیه‌سازی عددی نیمرخ سرعت برای حالت‌های مختلف را نشان می‌دهد. به‌طور کلی می‌توان به این نتیجه پی برد که عملکرد این نرم‌افزار در شبیه‌سازی نیمرخ‌های سرعت پرش هیدرولیکی مناسب بوده است.



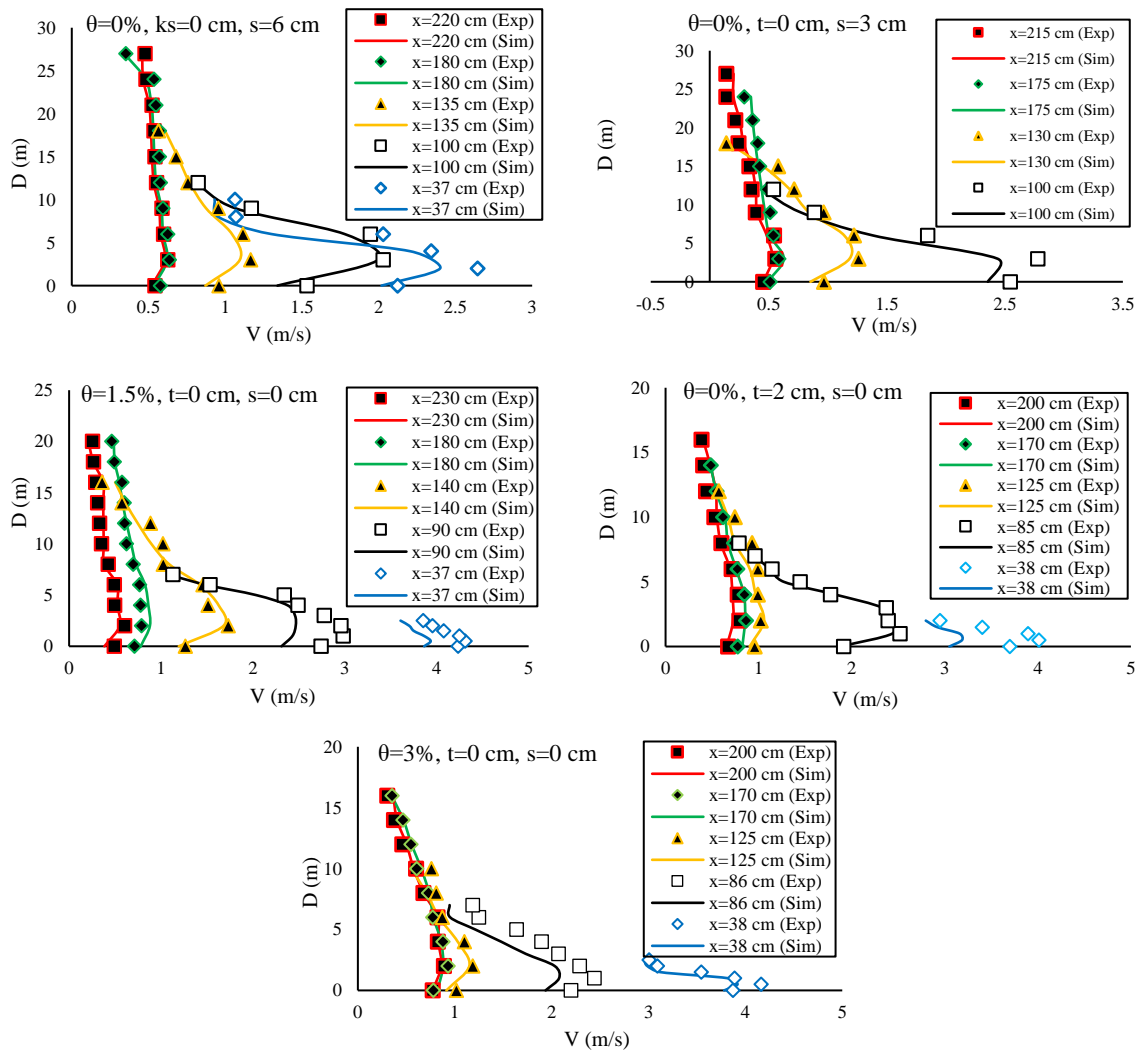
شکل ۹- توزیع سرعت معمولی در پرش هیدرولیک  
(Ghadery et al., 2021)

از مهم‌ترین ویژگی‌های پرش هیدرولیکی، پروفیل‌های سرعت است که این جریان را از سایر جریان‌هایی که در مجاری روباز رخ می‌دهد متمایز می‌سازد. توزیع سرعت معمولی پرش هیدرولیکی در شکل ۹ نشان داده شده است. پروفیل سرعت در پرش از دو جریان رو به جلو و جریان برگشتی به دلیل ایجاد تلاطم تشکیل می‌شود. در جریان به طرف جلو، سرعت ابتدا به بیشترین مقدار خود رسیده و سپس شروع به کاهش می‌کند.

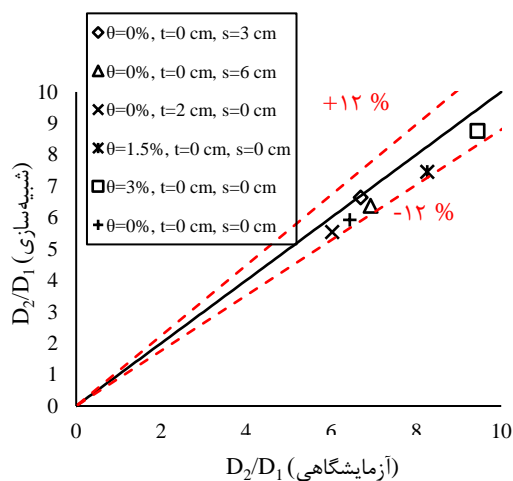
در شکل ۱۰، نیمرخ‌های سرعت حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر شبیه‌سازی شده برای مدل‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت در ابتدای پرش بیشترین مقدار را دارد و هرچه به انتهای پرش نزدیک می‌شویم، سرعت کمتر شده و از یکنواختی بیشتری برخوردار می‌شود. این تغییرات نشان‌دهنده افت انرژی در طول پرش است. همچنین در هر پروفیل، در لایه کوچک نزدیک بستر سرعت از کف کانال افزایش یافته و در نقطه‌ای به حداکثر مقدار خود می‌رسد و پس از آن به دلیل جریان‌های ثانویه سطحی دوباره روند کاهشی به خود می‌گیرد. به‌طور کلی در بالادست پرش هیدرولیکی

جدول ۵- بررسی دقت شبیه‌سازی عددی نیمرخ سرعت برای انواع حالت‌های پله منفی ابتدایی، شیب معکوس و زبری بستر

مدل‌ها	NRMSE	R <sup>2</sup>	d
$\theta=1.5\%$ , $t=0$ cm, $s=0$ cm	۱۴/۷۵	۰/۹۵	۰/۹۴
$\theta=3\%$ , $t=0$ cm, $s=0$ cm	۱۲/۹۵	۰/۹۷	۰/۹۵
$\theta=0\%$ , $t=2$ cm, $s=0$ cm	۱۱/۱۶	۰/۹۸	۰/۹۷
$\theta=0\%$ , $t=0$ cm, $s=3$ cm	۱۶/۱۱	۰/۹۸	۰/۹۳
$\theta=0\%$ , $t=0$ cm, $s=6$ cm	۱۹/۱۸	۰/۹۵	۰/۹۳



شکل ۱۰- مقایسه نیمرخ سرعت داده‌های آزمایشگاهی و عددی در انواع پله منفی ابتدایی، شیب معکوس و زبری بستر



شکل ۱۱- مقایسه اعماق مزدوج حاصل از اندازه‌گیری آزمایشگاهی و عددی

### نسبت اعماق مزدوج

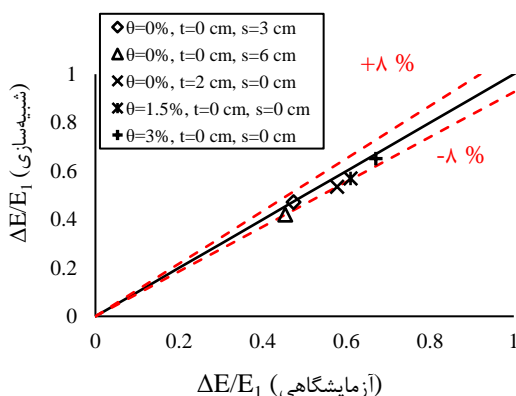
در شکل ۱۱ نسبت اعماق مزدوج حاصل از نتایج آزمایشگاهی و داده‌های شبیه‌سازی شده با هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی شده از تطابق مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی برخوردار هستند. میزان خطا در برآورد نسبت اعماق مزدوج برابر با  $\pm 12\%$  درصد است. Nikmehr and Aminpour (2020) میزان خطای مدل عددی Flow-3D را در برآورد نسبت اعماق مزدوج بر بستر زبر ۱۰ درصد محاسبه کردند.

## طول غلتاب و طول پرش هیدرولیکی

طول پرش هیدرولیکی در مطالعات گذشته به روش‌های مختلفی تعریف و اندازه‌گیری شده است؛ برای مثال، Rajaratnam and Subramanya (1968) از پنجه پرش تا بخشی که توزیع سرعت در آن یکنواخت می‌شود را به‌عنوان تعریف طول پرش هیدرولیکی در نظر گرفتند. همچنین، Ohtsu et al. (1999) طول پرش را تا کمی بالاتر از انتهای غلطاب تعریف کردند. از طرف دیگر، Bremen and Hager (1993) طول پرش هیدرولیکی را در انتهای بخشی تخمین زدند که فقط حباب‌های کوچک هوا به سطح آب رسیدند. در این مطالعه، مشابه نتایج آزمایشگاهی تعریف پیشنهادی Bremen and Hager (1993) برای اندازه‌گیری طول پرش استفاده شد. مقایسه نتایج  $L_r/D_2$  و  $L_r/D_1$  آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در شکل ۱۲ (الف و ب) نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل‌ها پیداست، نتایج آزمایشگاهی و عددی از تطابق قابل‌قبولی برخوردار هستند و حداکثر خطا نسبت به اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی برای  $L_r/D_2$  و  $L_r/D_1$  به ترتیب  $\pm 12\%$  و  $\pm 16\%$  درصد بوده است.

## نسبت افت انرژی

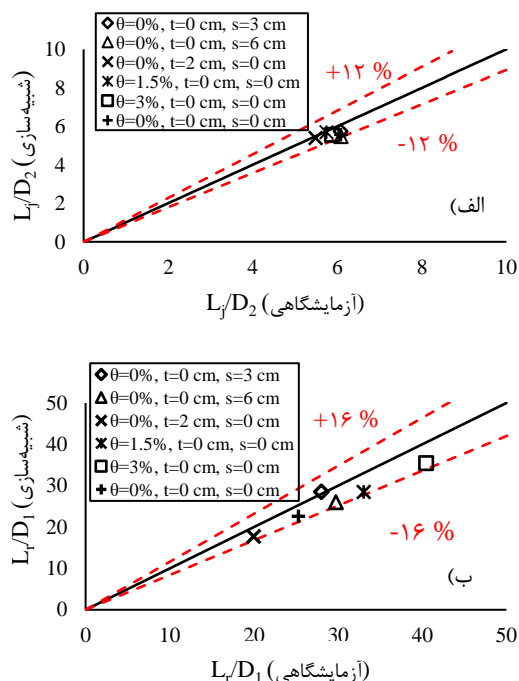
اتلاف انرژی در پرش  $(\Delta E)$  برابر است با تفاوت بین انرژی قبل و بعد از پرش  $(E_1-E_2)$  (Abbaspour et al., 2009). در شکل ۱۳ مقایسه نسبت  $\Delta E/E_1$  نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، تطابق مناسبی بین مقادیر  $\Delta E/E_1$  حاصل از شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. مطابق با این شکل، حداکثر خطای بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی ۸ درصد است.



شکل ۱۳- مقایسه تغییرات  $\Delta E/E_1$  حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و مدل عددی

## نتیجه‌گیری

مدل‌های CFD توانایی قابل‌قبولی در شبیه‌سازی خصوصیات پرش هیدرولیکی آزاد تحت شرایط مختلف هیدرولیکی دارند. در این مطالعه ویژگی‌های پرش هیدرولیکی شامل پروفیل سطح آب، نیمرخ سرعت، نسبت اعماق مزدوج، طول غلتاب، طول پرش هیدرولیکی و نسبت افت انرژی به‌صورت مجزا در حضور پله منفی ابتدایی، شیب معکوس و زبری بستر با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D شبیه‌سازی و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. دقت محاسبات در این نرم‌افزار به عوامل مختلفی از جمله نوع شبکه‌بندی محاسباتی، مدل آشفتگی و دقت پارامترهای ورودی بستگی دارد. نتایج به‌طور کلی نشان داد Flow-3D می‌تواند نتایج دقیقی از ویژگی‌های مختلف پرش هیدرولیکی ارائه کند. بیشترین خطای مدل در محاسبه مقادیر سرعت بود که علت آن را می‌توان در تلاطم شدید جریان و نوسانات سرعت لحظه‌ای در هر راستای قائم در محدوده وقوع پرش



شکل ۱۲- مقایسه تغییرات طول پرش و طول غلتاب حاصل از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی (الف)  $L_r/D_2$  و (ب)  $L_r/D_1$

11. Fallahi, B. and Heidarpour, M., 2021. Investigation of of shear force, boundary layer and cavitation phenomenon in abrupt expanding stilling basin with rough bed. *Iranian Water Researches Journal*, 15(2): 1-9. [In Persian].
12. Ghaderi, A., Dasineh, M., Aristodemo, F., Arico, C., 2021. Numerical Simulations of the Flow Field of a Submerged Hydraulic Jump over Triangular Macroroughnesses. *Water*, 13(5), pp.674.
13. Ghanami, S., 2013. Numerical simulation of hydraulic jump downstream of a sudden opening using FLOW-3D. Master's thesis in the field of water-oriented civil engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. [In Persian].
14. Ghasemzadeh, F., 2013. Simulation of hydraulic question in Flow-3D. Noavar Publications. Tehran. [In Persian].
15. Kumar, N.S. and Prasanna, S.V.S.N.D.L., 2018. Turbulence modeling for estimation of hydraulic jump height. *STM Journals*, 5: 1-11.
16. McCorquodale, J.A. and Mohamed, M.S., 1994. Hydraulic jumps on adverse slopes. *Journal of Hydraulic Research*, 32(1): 119-130.
17. Nikmehr, S. and Aminpour, Y., 2020. Numerical simulation of hydraulic jump over rough beds. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64(2): 396-407.
18. Ohtsu, I., Yasuda, Y. and Ishikawa, M., 1999. Submerged hydraulic jumps below abrupt expansions. *Journal of hydraulic engineering*, 125(5): 492-499.
19. Omid, M.H., Nasrabadi, M. and Farhoudi, J., 2011. Suspended sediment effects on hydraulic jump characteristics. *Water Management*, 164(2): 91-101.
20. Pourabdullah, N., Heydarpour, M. and Abedi koupai, J., 2023. Numerical simulation of hydraulic jump in different conditions of roughness, reverse slope and end positive step. *Journal of Water and Soil Science*, 27(3): 1-16. [In Persian].
21. Pourabdollah, N., Heidarpour, M. and Abedi Koupai, J., 2020a. Characteristics of free and submerged hydraulic jumps in different stilling basins. *In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 173(3): 121-131.
22. Pourabdollah, N., Heidarpour, M., Abedi Koupai, J. and Mohamadzadeh-Habili, J., 2020b. Hydraulic jump control using stilling basin with adverse slope and positive step. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(1): 10-17.
- هیدرولیکی، تشدید اختلاط آب‌وهوا و همچنین ضعف ابزار اندازه‌گیری سرعت در مدل آزمایشگاهی دانست. در حالی که مدل‌های عددی می‌توانند ابزار ارزشمندی برای مطالعه پرش‌های هیدرولیکی باشند، مهم است به محدودیت‌های آن‌ها نیز توجه شود.
- ### منابع
1. Abbaspour, A., Dalir, A.H., Farsadizadeh, D. and Sadraddini, A.A., 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *Journal of Hydro environment Research*, 3(2): 109-117.
  2. Ali, H.M., and Elhamaimi, A.A., 2020. An experimental and numerical investigation for characteristics of submerged hydraulic Jump over corrugated beds. *Port-Said Engineering Research Journal*, 24(1): 1-11.
  3. Bagheri, H., Heidarpour, M. and Noghani, F., 2023. Laboratory investigations on hydraulic jump characteristics using submerged vanes and adverse slope. *Journal of Hydro-environment Research*, 51: 15-24.
  4. Bayon, A., Valero, D., Garcia-Bartual, R. and Lopez-Jimenez, P.A., 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.
  5. Beirami, M.K. and Chamani, M.R., 2006. Hydraulic jumps in sloping channels: sequent depth ratio. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(10): 1061-1068.
  6. Beirami, M.K. and Chamani, M.R., 2010. Hydraulic jump in sloping channels: roller length and energy loss. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(4): 535-543.
  7. Bremen, R. and Hager, W.H., 1993. T-jump in abruptly expanding channel. *Journal of Hydraulic Research*, 31(1): 61-78.
  8. Carollo, F.G., Ferro, V. and Pampalone, V., 2007. Hydraulic jumps on rough beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(9): 989-999.
  9. De Padova, D.F., Mossa, M. and Sibilla, S., 2018. SPH numerical investigation of the characteristics of an oscillating hydraulic jump at an abrupt drop. *Journal of Hydrodynamic*, 30: 106-113.
  10. Ebrahimian, P., Haji-Kandi, H., Shafai Bejestan, M., Jamali, S. and Asadi, A., 2018. Investigating the influence of the lateral slope of the trapezoidal channel on the bed shear stress and hydraulic jump characteristics using the FLOW-3D model. *Iran-Water Resources*, 13(4): 103-112. [In Persian].

25. Rajaratnam, N., 1965. The Hydraulic Jump as a Wall Jet. *Journal of the Hydraulics Division*, 91(5): 107-132.
26. Saiadi, K., Heidarpour, M. and Ghadampour, Z., 2021. Study of the effect of adverse slope and elementary negative step on hydraulic jump characteristics. *Iranian Water Researches Journal*, 15(4): 35-43. [In Persian].
27. Thompson, P. and Kilgore, R., 2006. Hydraulic jump. Hydraulic Engineering Series. BSc Thesis, University of Lagos.
23. Raiford, J.P. and Khan, A.A., 2006. Numerical modeling of internal flow structure in submerged hydraulic jumps. In *World Environmental and Water Resource Congress 2006: Examining the Confluence of Environmental and Water Concerns* (pp. 1-10).
24. Rajaratnam, N. and Subramanya, K., 1968. Hydraulic jumps below abrupt symmetrical expansions. *Journal of the Hydraulics Division*, 94(2): 481-504.

