

## شبیه‌سازی عددی اثر واگرایی دیواره و شیب کف معکوس بر مشخصات جهش هیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزار FLOW3D

امیر کاسی کوزانی\*  
[amir.kasi63@gmail.com](mailto:amir.kasi63@gmail.com)

محمد حسین کریمی پاشاکی<sup>۱</sup>

### چکیده

یکی از سازه‌های متداول جهت استهلاک انرژی جریان‌های پر سرعت، حوضچه آرامش می‌باشد که از میان هندسه‌های مختلف قابل استفاده، حوضچه‌های آرامش واگرا با شیب کف معکوس دارای عملکرد هیدرولیکی مناسب‌تر و هزینه ساخت کمتر می‌باشند. در این تحقیق قابلیت مدل‌سازی عددی پرش هیدرولیکی واگرا بر روی شیب کف معکوس با استفاده از نرم‌افزار Flow3D مورد ارزیابی قرار گرفته است. داده‌های مدل آزمایشگاهی در زوایای واگرایی ۵ و ۱۰ درجه در شیب‌های کف معکوس ۱/۳، ۲/۳۵، ۳/۲ و ۴/۵۷ درجه به‌علاوه جهش هیدرولیکی کلاسیک مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه نتایج خروجی مدل شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که مدل مقادیر پروفیل‌های سطح آب، طول پرش و مقادیر حداکثر سرعت در عمق را با دقت خوبی نشان می‌دهد. نتایج مربوط به پروفیل سطح آب حاکی از آن است که خطای نسبی متوسط مقادیر عمق آب به‌دست آمده از مدل عددی و مقادیر اندازه‌گیری شده تقریباً ۱۵ درصد می‌باشد. پروفیل‌های سرعت نیز تطابق خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده داشتند.

**واژگان کلیدی:** جهش هیدرولیکی، شبیه‌سازی عددی، نرم‌افزار Flow3D

### Numerical Simulation of the effect of wall divergence and reverse slope on the characteristics of hydraulic jump using Flow3D software

Amir kasi Kovzani<sup>1</sup>, Mohammad hosein karimi Pashaki<sup>1</sup>

1-Water Resources Expert of Guilan Regional Water Authority, Rasht, Iran

### Abstract

Stilling basins are one of the most common structures for energy depreciation of flow with high velocity that among different sections and types of these basins, diverging stilling basins have better hydraulic performance and lower constructional costs. In this research, numerical modeling capability of diverging hydraulic jump on the reverse slope was investigated using Flow3D software. Experimental model data was used at divergence angles of 5 and 10 degrees in diverging angels of 1.3, 2.35, 3.2, 4.57 degrees in addition to classic hydraulic jump. The outputs of simulation model in comparison with the results of experimental data indicated that the model shows the amount of water surface profiles, jump length and maximum velocity in depth with good accuracy. The results showed that the mean relative error of water depth obtained from numerical model and measured values is about 15 percent. The velocity profiles were also in good agreement with the measured data.

**Keywords:** Hydraulic jump, Numerical simulation, FLOW3D

## ۱- مقدمه

معمولا در انتهای سازه‌هایی نظیر سرریز سدها، تنداب‌ها، آبشارها و دریچه‌ها، جریان سرعت زیادی داشته و برای جلوگیری از فرسایش و حفاظت از تأسیسات پایین دست احداث سازه‌ای برای استهلاک انرژی جریان و کاهش سرعت آن ضروری می‌باشد. یکی از متداول‌ترین سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی که برای این منظور به کار گرفته می‌شوند، حوضچه‌های آرامش بوده که در آن‌ها با شکل‌گیری جهش هیدرولیکی و تبدیل رژیم جریان از فوق بحرانی به زیر بحرانی، انرژی آن مستهلک می‌شود.

نخستین بار جهش هیدرولیکی توسط لئوناردو داوینچی مورد توجه قرار گرفته و بعد از او بیدون در سال ۱۸۱۸ این پدیده را مورد بررسی قرار داد. از آن زمان تاکنون، محققین زیادی شرایط و خصوصیات این پدیده مطالعه کرده‌اند. با وجود این، علی‌رغم گذشت نزدیک به دو قرن از شروع مطالعات در مورد جهش‌های هیدرولیکی، هنوز مسائل ناشناخته‌ای در مورد آن وجود دارد که محققین را برای ادامه پژوهش در این زمینه ترغیب می‌نماید.

در مطالعه جهش هیدرولیکی پارامترهای نسبت عمق ثانویه، طول نسبی جهش و افت نسبی انرژی از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشند. از این‌رو، محققین سعی نموده‌اند که در تحقیقات خود ضمن مطالعه روند تغییرات این پارامترها تحت شرایط هیدرولیکی و هندسی مختلف، به روابط تئوری، تجربی و یا ترکیبی از هر دو برای برآورد این پارامترها به منظور طراحی حوضچه‌های آرامش دست یابند (پترکا، ۱۹۸۳).

مطالعات صورت گرفته در رابطه با اثر واگرایی دیواره‌های حوضچه بر عملکرد پارامترهای مهم جهش هیدرولیکی نشان داده است که واگرایی باعث کاهش نسبت عمق ثانویه، افزایش افت نسبی انرژی و کاهش طول نسبی جهش، در مقایسه با جهش کلاسیک، جهش هیدرولیکی در حوضچه آرامش مستطیلی، می‌شود (اربه‌بهرام و ابله، ۱۹۷۱، خلیفه و کروکودل، ۱۹۷۹، امید و اسمعیلی ورکی، ۱۳۸۴ و امید و همکاران، ۲۰۰۷). همچنین نتایج تحقیقات انجام شده در رابطه با تأثیر توأم شیب جانبی و واگرایی طولی دیواره‌ها بر خصوصیات جهش هیدرولیکی نشان داده است که افزایش زاویه واگرایی دیواره‌های حوضچه در هر شیب جانبی، در مقایسه با حوضچه دوزنقه‌ای مستقیم، باعث کاهش نسبت عمق ثانویه و

طول نسبی جهش و افزایش افت نسبی انرژی می‌گردد. همچنین نتایج تحقیقات صورت گرفته نشان داد که در هر زاویه واگرایی با کاهش شیب جانبی، طول نسبی جهش افزایش، نسبت عمق ثانویه کاهش و افت نسبی انرژی نیز افزایش می‌یابد (امید و اسمعیلی ورکی، ۱۳۸۴ و امید و همکاران، ۲۰۰۷).

نتایج پژوهش‌های انجام گرفته توسط محققین در خصوص مشخصات جهش هیدرولیکی مستقیم در حوضچه مستطیلی با شیب کف معکوس حاکی از آن است که می‌توان با به‌کارگیری قوانین بقاء جرم و اندازه حرکت و استفاده از فرضیاتی که مهمترین آن‌ها به‌کارگیری تابع مناسب برای نیم‌رخ طولی سطح آب در امتداد جهش (خطی، ربع بیضی و معادله درجه دو) می‌باشد، رابطه‌ای تئوری-تجربی که تابعی از طول نسبی جهش است، برای برآورد نسبت عمق ثانویه ارائه نمود. همچنین نتایج تحقیقات انجام شده در این رابطه نشان داده است که با افزایش شیب کف معکوس، نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش کاهش و افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد (ابریشمی و صانعی، ۱۹۹۱، مک کورکودال و محمد، ۱۹۹۴، و پروگینلی و پاگلیارا، ۲۰۰۰، بیرامی و چمنی، ۲۰۰۶ و ۲۰۱۰).

مطالعه کاسی و همکاران (۱۳۸۹) به منظور بررسی تأثیر توأم شیب کف معکوس و واگرایی دیواره‌های حوضچه بر روی مشخصات جهش هیدرولیکی، در مجموع ۱۵۸ آزمایش با زوایای واگرایی و شیب‌های کف معکوس مختلف و در دامنه وسیعی از اعداد فرود اولیه (۹-۲/۵)، انجام گرفت. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل مشخصات اصلی جهش واگرا با شیب کف معکوس، شامل نسبت عمق ثانویه، افت نسبی انرژی و طول نسبی جهش نشان داد؛ مطابقت خوبی بین نتایج آزمایشگاهی نیم‌رخ‌های طولی جهش و منحنی‌های تئوری مبتنی بر سهموی بودن نیم‌رخ جهش مشاهده گردید که صحت فرضیه پیشنهادی در استفاده از معادله سهموی برای نیم‌رخ طولی جهش را تایید نمود. همچنین در کلیه آزمایش‌ها، بین مقادیر تئوری و نتایج آزمایشگاهی مربوط به نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی همبستگی بالایی وجود دارد. در هر زاویه واگرایی، با افزایش شیب کف معکوس، نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش کاهش و افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که به‌طور متوسط افزایش شیب کف معکوس از صفر به ۸ درصد باعث می‌گردد که در مقایسه با جهش کلاسیک، نسبت عمق ثانویه ۴۷ درصد و طول نسبی جهش ۳۵ درصد

ADV همچنین پروفیل‌های سرعت که با استفاده از دستگاه گردید مطابقت خوبی نشان داد.

عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)، پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار را با استفاده از مدل‌های  $k-\epsilon$  استاندارد و RNG شبیه‌سازی نمودند و نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج مدل فیزیکی ساخته شده بدین منظور را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج بیانگر کارایی مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  و VOF جهت برآورد پروفیل سطح آب بود و خطای مدل برای تعیین پروفیل سطح آب بین ۱ تا ۸/۶ درصد گزارش شد.

ابراهیمی، سلماسی و عباسپور (۲۰۱۳)، به مطالعه عددی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با بستر زبر پرداختند. در این تحقیق شبیه‌سازی دو بعدی پرش هیدرولیکی بر بستر زبر با مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد و روش حجم محدود سیال برای سطح آزاد جریان انجام گرفت. نتایج این شبیه‌سازی عددی که در بازه عدد فرود ۳ تا ۷ انجام گرفت، مطابقت خوبی را با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند.

صباغ یزدی و همکاران (۱۳۸۷) برای شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی از نرم‌افزار Flow-3D استفاده کردند. آن‌ها ابتدا برای صحت‌سنجی نرم‌افزار در پیش‌بینی پارامترهای جریان در پرش هیدرولیکی از یک نمونه آزمایشگاهی استفاده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با استفاده از دو مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  و RNG، را با آن مقایسه نمودند. در مرحله بعد از یک حوضچه آرامش استفاده گردید و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مربوطه مقایسه شد.

با توجه به اثر مطلوب تغییر شیب کف معکوس و زاویه واگرایی دیواره‌ها بر مشخصات جهش هیدرولیکی، در مقاله حاضر تاثیر توام تغییر هندسه‌های یاد شده در حوضچه آرامش بر پارامترهای مهم جهش شامل نسبت عمق ثانویه، طول نسبی جهش و افت نسبی انرژی در دامنه‌ای از شیب‌های کف معکوس و زوایای واگرایی به‌صورت آزمایشگاهی- عددی مورد مطالعه قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

### الف) داده‌های آزمایشگاهی

برای مطالعه آزمایشگاهی مشخصات جهش هیدرولیکی واگرا بر روی شیب معکوس، یک مدل آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد این مدل شامل یک مخزن آرام‌کننده به همراه سرریز مستطیلی لبه تیز برای اندازه‌گیری دبی و مخزن تامین هد در بالادست،

کاهش و افت نسبی انرژی ۲۰ درصد افزایش یابد. در شیب‌های کف معکوس، افزایش زاویه واگرایی از صفر به ۱۰ درجه، به‌طور متوسط منجر به کاهش ۵۱ درصدی در نسبت عمق ثانویه و ۳۸ درصدی در طول نسبی جهش و افزایش ۲۳ درصدی در افت نسبی انرژی در مقایسه با مشخصات جهش کلاسیک شده است. واگرایی دیواره‌های حوضچه آرامش، در تثبیت موقعیت جهش هیدرولیکی و پایداری آن بر روی شیب معکوس و کاهش طول آن موثر می‌باشد.

سارکر و رودز (۲۰۰۲) پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای صاف را به‌صورت تجربی بررسی نموده و سپس با استفاده از مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$ ، RNG1 و VOF (مدل جزء حجم سیال) شبیه‌سازی نمودند. نتایج عددی روش جزء حجم سیال آزمایشگاهی تطابق خوبی در حالت دو بعدی نشان داد اما محاسبات در شرایط سه بعدی از دقت لازم برخوردار نبود.

زائو و میسرا (۲۰۰۴)، با استفاده از معادلات پیوستگی و مومنوم و با مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  به صورت دو بعدی پرش هیدرولیکی را شبیه‌سازی نموده و نتایج تحقیق خود را به صورت پروفیل‌های سرعت و سطح آب، محاسبه مقادیر انرژی جنبشی ( $k$ ) و اتلاف انرژی ( $E$ ) ارائه نمودند.

لیو و همکاران (۲۰۰۴)، مطالعاتی بر روی خصوصیات آشفتگی پرش هیدرولیکی انجام دادند که برطبق نتایج بدست آمده، حداکثر شدت آشفتگی و تنش‌های رینولدز با دور شدن از پنجه پرش به‌طور خطی کاهش پیدا می‌کند و اندازه گرداب‌های تولید شده نیز در انتهای پرش بیشتر می‌شود.

گونزالز و بومباردلی (۲۰۰۵)، پرش هیدرولیکی روی بستر صاف را با استفاده از مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$  و روش شبیه‌سازی گرداب‌های بزرگ (LES2) بررسی نموده و نتایج را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه نمودند.

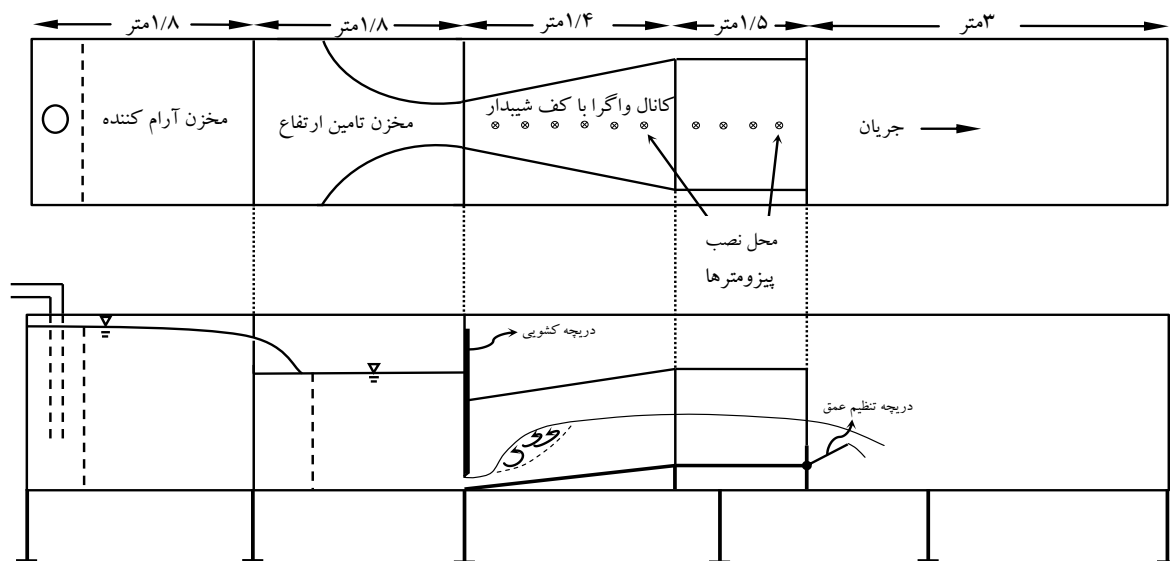
رومنگنولی و همکاران (۲۰۰۹) پرش هیدرولیکی رخ داده پس از دریچه و همچنین جریان ریزشی آب پس از پایین افتادگی کف کانال بعد از وقوع پرش را به صورت دو بعدی برای VOF شبیه‌سازی نمودند. در روند شبیه‌سازی از روش مدل‌سازی سطح آب و مدل آشفتگی استاندارد استفاده گردید. مقایسه‌های انجام شده بین خروجی مدل و پروفیل سطح آب و برداشت

3- ReNormalization-Group  $k-\epsilon$  model (RNG)

4-Large Eddy Simulation

ایجاد جریان فوق بحرانی تا عدد فرود ۹ را در داخل حوضچه فراهم می‌نمود. جهت اندازه‌گیری عمق آب در طول جهش، پیزومترهایی به فواصل ۵ سانتی‌متر در طول خط مرکزی جریان و بر کف حوضچه نصب شدند. برای ایجاد عمق پایاب لازم، جهت تشکیل جهش در داخل حوضچه و تثبیت آن، درپچه پروانه‌ای در انتهای قسمت افقی حوضچه نصب گردید. در (جدول ۱) مقادیر داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده برای شبیه‌سازی آورده شده است.

درپچه کشویی لبه تیز، یک کانال مستطیلی با کف و دیواره‌هایی از جنس شیشه به عرض و ارتفاع ۱ متر و طول ۵/۹ متر و یک مخزن با سرریز مستطیلی واسنجی شده در پایین دست می‌باشد. طرح کلی مدل آزمایشگاهی در (شکل ۱) نشان داده شده است. مدل حوضچه آرامش دارای طولی به اندازه ۱/۴ متر بوده که بلافاصله بعد از درپچه کشویی مستقر گردید. این مدل به گونه‌ای طراحی شد که امکان ایجاد شیب‌ها و زوایای واگرایی متفاوت وجود داشته باشد. مخزن تامین هد بالادست امکان



شکل ۱- طرح کلی کانال آزمایشگاهی

جدول ۱- مقادیر داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده برای شبیه‌سازی

عدد فرود در محل عمق ثانویه جهش	عمق ثانویه جهش	دبی بر واحد عرض	عرض ثانویه جهش	طول جهش	طول غلظت	محل شروع جهش	عدد فرود در محل شروع جهش	عمق اولیه	دبی بر واحد عرض	عرض اولیه جهش	فاصله پنجه جهش از درپچه	زاویه واگرایی دیواره (درجه)	شیب کف (درجه)	عمق آب پشت درپچه (متر)	دبی (متر مکعب بر ثانیه)	عمق آب روی سرریز مثلثی
$Fr_2$	$y_2$ (m)	$q_2$ ( $m^2/s$ )	$b_2$ (m)	$L_2$ (m)	$L_c$ (m)	$Fr_1$	$Fr_1$	$y_1$ (m)	$q_1$ ( $m^2/s$ )	$b_1$ (m)	$X$ (m)	$\theta$ (°)	$S$ (°)	$H_g$ (m)	$Q$ (cms)	$H_w$ (m)
0.3	0.1652	0.054	0.25	1.08	0.7	7.2	7.2	0.02	0.054	0.25	0.14	0	0	0.49	0.0135842	0.1452
0.2	0.1316	0.034	0.4424751	0.9	0.52	7.1	7.1	0.018	0.053	0.2849955	0.2	5	0	0.45	0.0152309	0.152
0.3	0.0978	0.031	0.3619855	0.53	0.35	5.3	5.3	0.0184	0.042	0.2692475	0.11	5	1.3	37.4	0.0111974	13.44
0.4	0.1305	0.055	0.4424751	0.8	0.48	6.4	6.4	0.0197	0.055	0.2852654	0.1	0	2.35	55	0.0137721	14.6
0.4	0.085	0.034	0.5321232	0.7	0.48	6.9	6.9	0.0207	0.064	0.2852654	0.1	10	3.2	65.5	0.0181936	16.32
0.4	0.096	0.041	0.3637353	0.55	0.3	5.4	5.4	0.022	0.055	0.2674977	0.1	5	4.57	41	0.0147349	15

از FLOW-3D یک شبکه متشکل از سلول‌های مستطیلی استفاده می‌کند که دارای مزایایی برای تولید آسان و نظم مناسب برای بهبود بخشیدن به شبیه‌سازی عددی است و به کم‌ترین ذخیره حافظه احتیاج دارد. این نرم‌افزار شامل الگوهای فیزیکی مختلفی می‌باشد که عبارتند از: آب‌های کم عمق، لزجت، کاویتاسیون، آشفتگی، کشش سطحی و محیط‌های متخلخل. این مدل‌ها در زمینه‌هایی چون ریخته‌گری مواد، مهندسی فرایند، هیدرولیک، مهندسی محیط زیست، هواضا، علوم دریایی، نفت، گاز و غیره کاربرد دارند.

### ب) شبیه‌سازی جریان در نرم‌افزار FLOW-3D

FLOW-3D نرم‌افزاری قوی در زمینه دینامیک سیالات می‌باشد که تولید، توسعه و پشتیبانی آن توسط Flow Science, Inc صورت گرفته است. این نرم‌افزار برای تحقیق در مورد رفتار یک، دو و سه بعدی دینامیکی سیالات در محدوده کاربردی وسیعی طراحی شده است. یکی از قابلیت‌های عمده این برنامه برای آنالیزهای هیدرولیکی، توانایی مدل کردن جریان‌های با سطح آزاد با روش VOF می‌باشد. نرم‌افزار

$$\frac{\delta w}{\delta t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\delta w}{\delta x} + V A_y R \frac{\delta w}{\delta y} + w A_z \frac{\delta w}{\delta z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta \rho}{\delta z} + G_z + f_z - b_z - \frac{RSOR}{\rho V_F} w$$

وقتی گزینه آشفتگی در مدل‌سازی استفاده می‌شود، لزوجت شامل دو حالت آشفته و مولکولی می‌شود. برای سیال‌های غیرنیوتونی، لزجت سیال می‌تواند تابعی از نرخ کرنش و یا دما باشد. یک عبارت عمومی در نرم‌افزار FLOW-3D استفاده می‌شود که نرخ کرنش وابسته به لزجت را به صورت زیر بیان می‌کند:

$$\mu = \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 E_r - \mu_{\infty}}{\lambda_{\infty} + [\lambda_{\infty} (\lambda_y E_r)^2 e_{ij} e_{ij}]^{\frac{1-n}{2}}} + \frac{\lambda_2}{\sqrt{e_{ij} e_{ij}}}$$

که در آن،  $e_{ij}$  به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\delta u_i}{\delta x_j} + \frac{\delta u_j}{\delta x_i} \right)$$

در نرخ کرنش سیال برای نمایش تانسور کارتیزین مقادیر  $\mu_{\infty}, \mu_0, \lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$  و مقدار  $n$  ثابت بوده و داریم:

$$E_T = \exp \left[ a \left( \frac{T^*}{T - b} - c \right) \right]$$

که در آن، مقادیر  $C, T^*, a, b$  ثابت بوده و  $T$  دمای سیال می‌باشد.

برای بررسی جریان‌های آشفته روش‌های مختلفی وجود دارد. به‌عنوان نمونه با استفاده از معادلات ناویر-استوکس می‌توان جریان آشفته را تحلیل نمود با این شرط که بتوان نوسان‌های نامنظم لحظه‌ای و اتفاقی کمیت‌های میدان جریان را در هر لحظه و در هر نقطه مدل نمود. مقادیر لحظه‌ای سرعت و فشار یا هر کمیت دیگر می‌توان برحسب مقادیر متوسط زمانی نوشت، در این صورت روابط ذیل برقرار هستند.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g x_i + \mathcal{G} \nabla^2 u_i$$

$$u_i = \overline{u_i} + u_i'$$

در این رابطه  $\overline{u_i}$  سرعت متوسط،  $u_i'$  نوسان‌های سرعت و  $u_i$  سرعت لحظه‌ای می‌باشد.

$$p_i = \overline{p_i} + p_i'$$

$$\varphi_i = \overline{\varphi_i} + \varphi_i'$$

$$\overline{\varphi_i} = \frac{1}{\Delta t} \int_1^{1+\Delta t} \varphi_i dt$$

### ج) معادلات حاکم

FLOW-3D یک برنامه کامپیوتری با کاربردهای کلی و توانایی‌های بسیار است. کاربر می‌تواند با وارد کردن اطلاعات مدل‌های مختلفی را به منظور ارائه محدوده وسیعی از پدیده‌های جریان، انتخاب کند. در این نرم‌افزار از تقریب تفاضل و حجم محدود برای محاسبه زمانی و مکانی در معادلات حرکت استفاده شده است. معادله پیوستگی در نرم‌افزار FLOW-3D به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$V V_F = \frac{\delta \rho}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x} (\rho u A_x) + R \frac{\delta}{\delta y} (\rho v A_y) +$$

$$\frac{\delta}{\delta z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = RDIF + RSOR$$

که در آن،  $V_F$  نسبت کسر حجمی فضای باز به جریان،  $\rho$  دانسیته سیال،  $RDIF$  ترم نفوذپذیری آشفتگی و  $RSOR$  برابر منبع جرم است.  $u, v, w$  اجزای سرعت در جهت‌های  $x, y, z$  هستند. ضریب  $R$  وابسته به انتخاب سیستم مختصات به صورت زیر است:

$$R = r_m / r$$

به طوری که  $\gamma = r_m \theta$  و  $r_m$  برابر با شعاع از مبدا ثابت است.

وقتی که از مختصات کارتیزین استفاده شود  $R = 1$  و  $\xi = 0$  است. اولین ترم در طرف راست معادله پیوستگی برابر ترم نفوذ آشفتگی به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$RDIF = \frac{\delta}{\delta x} (v_0 A_x \frac{\delta \rho}{\delta x}) + R \frac{\delta}{\delta y} (V_0 A_y \frac{\delta \rho}{\delta y}) +$$

$$\frac{\delta}{\delta z} (V_0 A_z \frac{\delta \rho}{\delta z}) + \xi \frac{\rho V_0 A_x}{x}$$

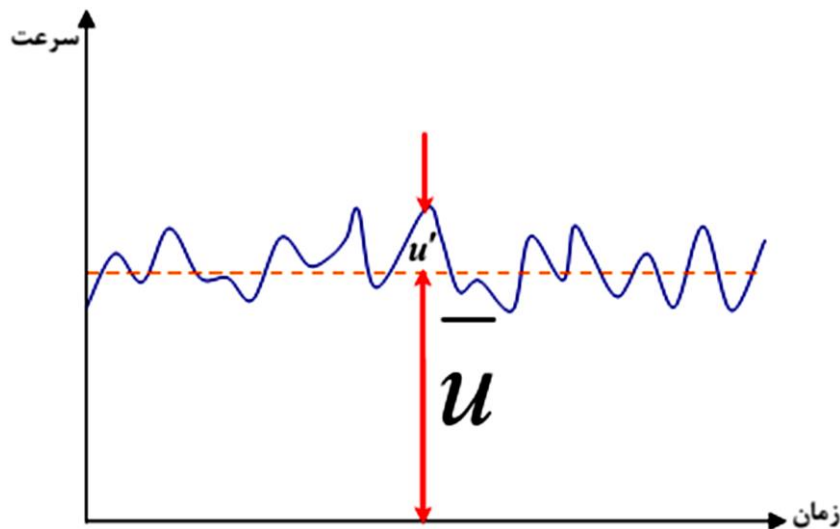
ترم  $RSOR$  مربوط به چگالی است که به‌عنوان مثال در مدل‌سازی تزریق جرم از خلل و فرج یک دیوار استفاده می‌شود.

$$\frac{\delta}{\delta x} (u A_x) + R \frac{\delta}{\delta y} (v A_y) + \frac{\delta}{\delta z} (w A_z) + \xi \frac{u A_x}{x} = \frac{RSOR}{\rho}$$

معادلات مومنتم (معادلات ناویر-استوکس) برای اجزای سرعت سیال  $x, y, z$  در سه جهت مختصات، با یک‌سری ترم‌های اضافی به شرح زیر هستند:

$$\frac{\delta u}{\delta t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\delta u}{\delta x} + V A_y R \frac{\delta u}{\delta y} + w A_z \frac{\delta u}{\delta z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta \rho}{\delta x} + G_x + f_x - b_x - \frac{RSOR}{\rho V_F} u$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\delta v}{\delta x} + V A_y R \frac{\delta v}{\delta y} + w A_z \frac{\delta v}{\delta z} \right\} - \xi \frac{A_y v u}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta \rho}{\delta y} + G_y + f_y - b_y - \frac{RSOR}{\rho V_F} v$$



شکل ۲- تغییرات کمیت سرعت بر حسب زمان

پیوستگی و مومنتم متوسط رینولدزی به صورت روابط زیر می‌باشند.

معادله ناویر-استوکس متوسط رینولدزی

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j})$$

فرضیه بوزینسک بیان می‌کند که می‌توان تنش‌های رینولدز را به نرخ میانگین تغییر شکل‌ها ارتباط داد. تنش‌های لزجت به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\tau_{ij} = \mu e_{ij} = \mu \left[ \frac{\delta u_i}{\delta x_j} + \frac{\delta u_j}{\delta x_i} \right]$$

ارتباط تنش‌های رینولدز با نرخ میانگین تغییر شکل‌ها به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left[ \frac{\delta u_i}{\delta x_j} + \frac{\delta u_j}{\delta x_i} \right]$$

که در آن،  $\mu_t$  لزجت گردابه‌ای یا مولکولی نامیده شده و واحد آن pa.s. است.

مدل‌های آشفتگی با توجه به فرضیات گفته شده و تعداد معادلات دیفرانسیل جهت ارتباط تنش‌های آشفتگی با سرعت‌های متوسط‌گیری شده با گرادپان آنها به صورت زیر تقسیم می‌شوند.

#### د) ساخت هندسه مدل فیزیکی حوضچه آرامش

جهت ساخت هندسه حوضچه و انجام شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان، ابتدا محدوده هندسه مدل با استفاده از طرح مدل

در رابطه فوق دوره تناوبی است که نوسان‌های اتفاقی آشفته را بیان می‌کند. این پارامتر به اندازه کافی بزرگ می‌باشد ولی در مقایسه با زمان لازم برای جریان غیردائمی کوچک است. با جایگزینی روابط فوق در معادلات پیوستگی و مومنتم، در معادله مومنتم پارامتر  $\overline{u'_i u'_j}$  اضافه می‌شود. معادلات

در معادله مومنتم ناویر-استوکس متوسط رینولدزی P به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho = \alpha_A \rho_A + \alpha_w \rho_w$$

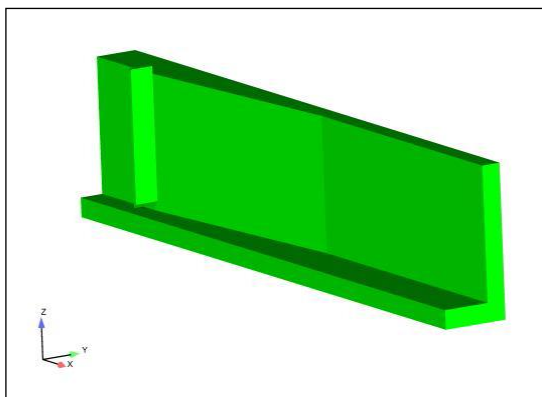
در روابط فوق  $u_i$  نشان‌دهنده مولفه‌های سرعت جریان،  $\alpha_w$  و  $\alpha_A$  نسبت آب و هوا،  $\rho_A$  و  $\rho_w$  به ترتیب جرم مخصوص هوا و آب می‌باشد.  $\delta_{ij}$  نیز دلتای کرونکر می‌باشد که برای  $i = j$  مقدار آن برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر می‌باشد.

پارامتر  $\overline{u'_i u'_j}$  را تنش رینولدز می‌نامند که اثر گردابه‌های آشفتگی در جریان سیال آشفته را نشان می‌دهد. در اکثر جریان‌های آشفته، همواره مقدار تنش رینولدز بیش‌تر از تنش

$$g \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

ناشی از لزجت مولکولی است. از آنجا که برآورد مستقیم تنش آشفتگی رینولدز مشکل است، بطور معمول از مدل‌های آشفتگی مختلف بدین منظور استفاده می‌شود.

بسیاری از مدل‌های آشفتگی بر پایه این فرضیه استوار هستند. با افزایش نرخ میانگین تغییر شکل‌ها، آشفتگی افزایش می‌یابد.



شکل ۳- نمایی از مدل شبیه سازی در محیط نرم افزار

### ۳- نتایج و بحث

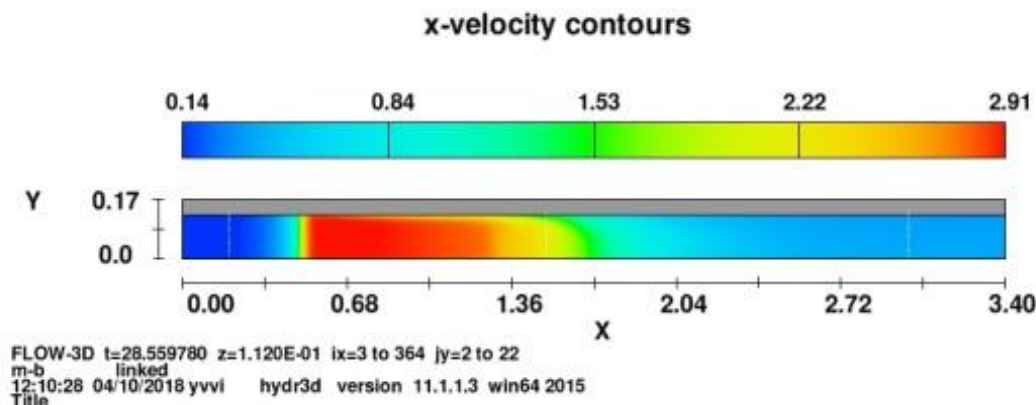
#### ۳-۱- بررسی عملکرد مدل عددی Flow-3D در شبیه‌سازی

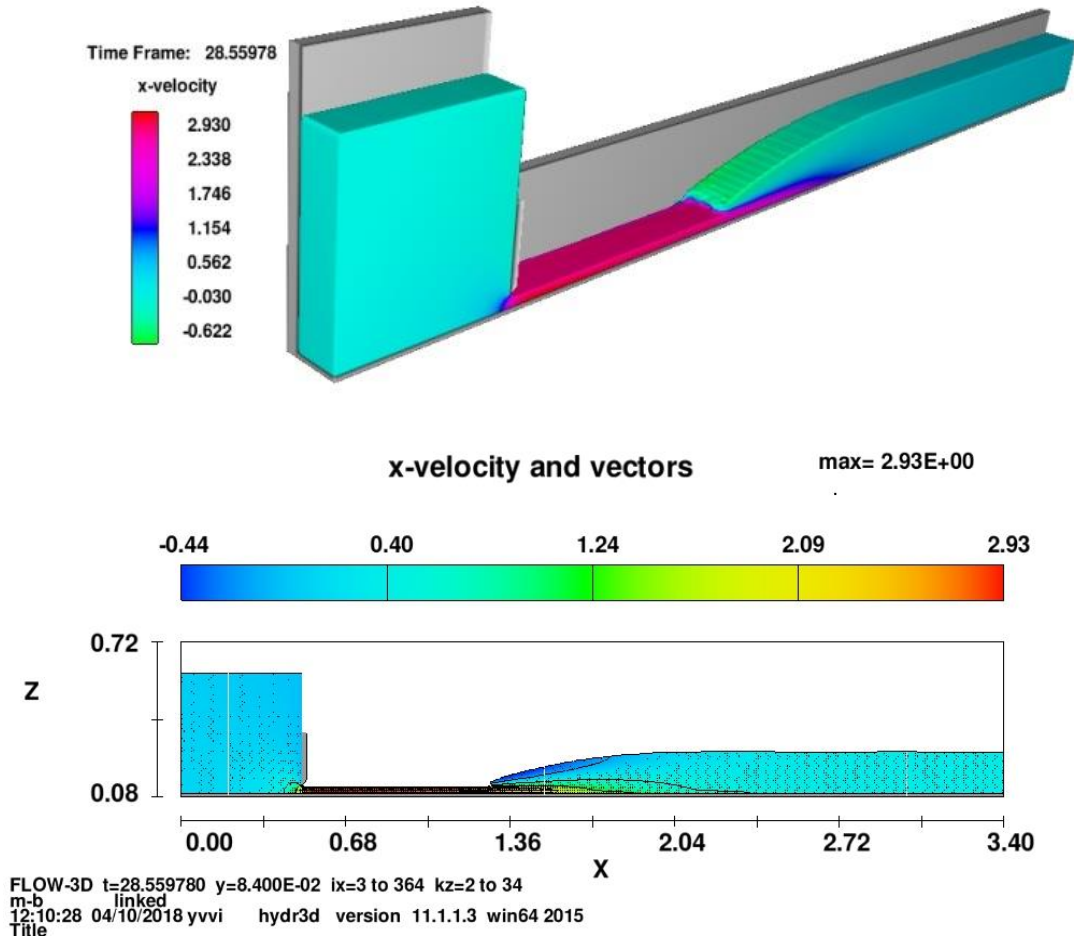
##### نیمرخ سطح آب

در (شکل ۴) تصاویری از نتایج شبیه سازی جهش هیدرولیکی با نرم‌افزار فلو تری دی نشان داده شده است. در (شکل ۵) مقایسه نیمرخ سطح آب آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D برای مدل حوضچه آرامش نشان داده شده است. مقایسه نتایج نشان داد که مقدار متوسط شاخص RAE، در برآورد نیمرخ سطح آب در مقایسه با پروفیل برداشت شده آزمایشگاهی بین  $0.5/37 - 0.20/12$  درصد و شاخص RMSE بین ۱ الی  $0.4/3$  سانتی‌متر می‌باشد. همچنین در جدول (۱) مقادیر شاخص‌های آماری و تغییرات خطای شبیه‌سازی آورده شده است. با توجه به نتایج حاصل از مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی با نتایج حاصل از مدل عددی، مشاهده می‌شود که این نرم‌افزار قابلیت مناسبی برای مدل‌سازی نیمرخ سطح آب را دارا می‌باشد.

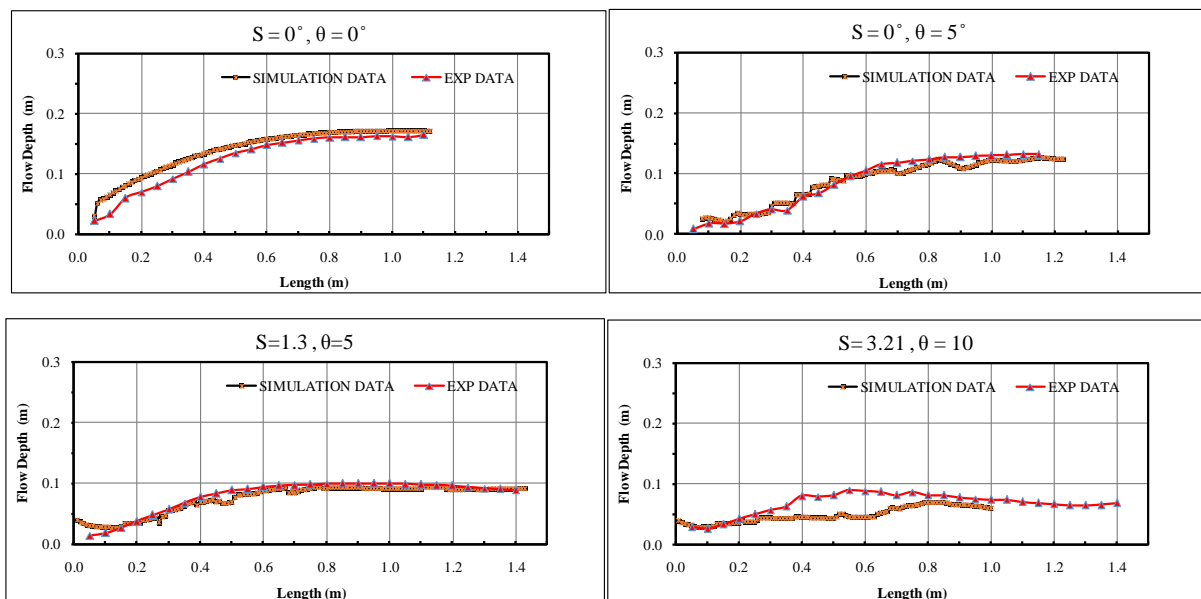
فیزیکی موجود، در محیط نرم‌افزار اتوکد ایجاد و سپس فایل مورد نظر با پسوند stl ذخیره گردید و با فراخوانی در محیط نرم‌افزار Flow-3D شبکه‌بندی شد. (شکل ۳)

پس از ورود اطلاعات در نرم‌افزار، می‌بایست زمان انجام شبیه‌سازی مشخص گردد که در تحقیق حاضر این عدد بین ۱۰۰ و ۷۰۰ در نظر گرفته شد. سپس ویژگی‌های سیال را در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد از طریق کپی کردن در اطلاعات پیش‌فرض سیستم وارد شد. با انتخاب مدل آشفتگی RNG و وارد نمودن پارامترهایی نظیر عمق آب پشت دریچه، دبی جریان، مدل برای اجرا آماده می‌گردد. در نهایت برای استخراج نتایج می‌بایست شبیه‌سازی تا ماندگاری کامل جریان ادامه یابد و تغییرات نیمرخ سرعت، عمق جریان و دبی ورودی و خروجی ثابت گردد. انتخاب نوع شبکه بستگی به نوع کاربر و مسئله موردنظر دارد. در این انتخاب می‌بایست به زمان تولید شبکه و نیز هزینه محاسبات دقت کرد. شبکه محاسباتی برای تحلیل جهش هیدرولیکی در مدل شبیه‌سازی شده حوضچه آرامش، ابتدا به سه ناحیه بالادست دریچه (۱)، محل دریچه (۲) و پایین‌دست آن (۳) به ترتیب با ابعاد شبکه ۱ سانتی‌متر، ۳ میلی‌متر و ۱ سانتی‌متر تقسیم‌بندی شد. شرایط مرزی کف مخزن ورودی جریان از نوع دبی (Q)، دیواره‌های مخزن و کف فلووم  $Z_{min}$ ،  $Y_{min}$  و  $Y_{max}$  دیوار (wall)، شرایط مرزی  $Z_{max}$  در بلوک شبکه‌بندی به صورت متقارن (symmetry) منظور شد و شرایط خروجی جریان نیز از نوع جریان خروجی (Out flow) وارد شد.





شکل ۴- تصویر نتایج مدل شبه‌سازی با فلو تری دی برای جهش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با شیب کف صفر درجه و زاویه واگرایی صفر



شکل ۵- مقایسه نیمرخ سطح آب آزمایشگاهی و عددی برای حوضچه آرامش در شیب صفر -واگرایی صفر درجه، شیب صفر واگرایی ۵ درجه، شیب معکوس ۱/۳ درجه و واگرایی ۵ درجه، شیب معکوس ۳/۲۱ درجه و واگرایی ۱۰ درجه



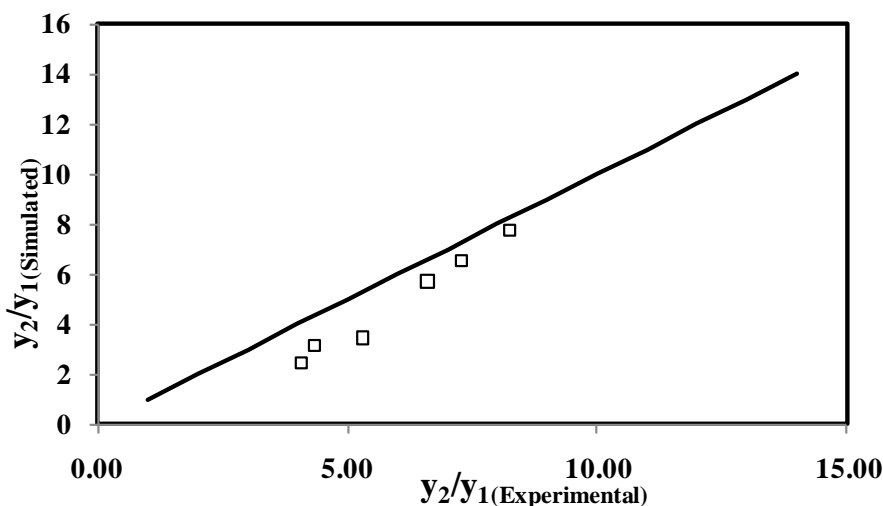
جدول ۲- مقایسه مقدار خطای مدل عددی در شبیه‌سازی نیمرخ سطح آب برای حوضچه آرامش در شرایط مختلف

ردیف	درجه شیب کف	درجه زاویه واگرایی	پارامتر RAE%	پارامتر RMSE (cm)
۱	۰	۰	۱۷/۲۵	۱/۵
۲	۰	۵	۱۷/۵۹	۱/۱
۳	۱/۳	۵	۱۲/۲	۱
۴	۳/۲۱	۱۰	۳۷/۰۵	۳/۴
۵	۲/۳۵	۰	۱۴/۲	۱/۳
۶	۴/۵۷	۵	۲۰/۲۱	۱/۸

می‌شود نتایج شبیه‌سازی و نظری به نسبت با هم سازگار هستند و اختلاف موجود را می‌توان به خطاهای موجود در شمای حل عددی به کار گرفته شده و فرضیه‌های موجود استناد کرد. حداکثر میزان خطای نسبی بین نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی حدود ۳۰ است.

### ۲-۳- بررسی نتایج مدل‌سازی عددی Flow-3D در شبیه‌سازی نسبت عمق ثانویه

در (شکل ۶) مقایسه‌ای بین نتایج اندازه‌گیری عددی و آزمایشگاهی عمق مزدوج نسبی در حوضچه آرامش با شیب کف معکوس با دیواره واگرا رسم شده است. همان‌طور که مشاهده

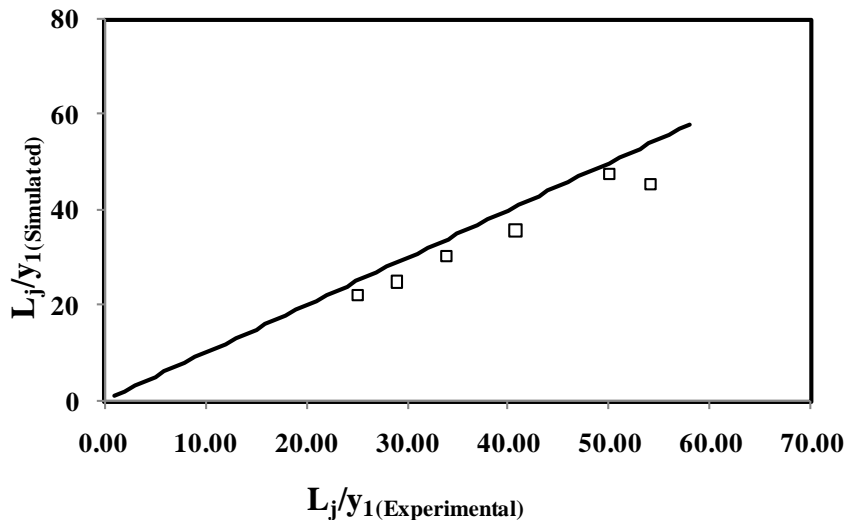


شکل ۶- مقایسه عمق مزدوج نسبی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی

چشمی، طول از ابتدای جهش تا مکانی که آخرین دسته حباب هوا به سطح آب می‌رسد، اندازه‌گیری شد. در (شکل ۷) نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی تغییرات طول نسبی جهش هیدرولیکی ( $L_j/y_1$ ) نشان داده شده است. با توجه به این شکل روند تغییرات نتایج آزمایشگاهی و نظری سازگاری خوبی با هم دارند. حداکثر اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و مقادیر شبیه‌سازی عددی حدود ۱۵ درصد مشاهده شده است. این اختلاف بین آن‌ها می‌تواند ناشی از تفاوت در معیار اندازه‌گیری طول جهش باشد.

### ۳-۳- بررسی نتایج مدل‌سازی عددی Flow-3D در شبیه‌سازی طول جهش هیدرولیکی

در مطالعه آزمایشگاهی (کاسی و همکاران، ۱۳۸۹) طول جهش هیدرولیکی برابر با فاصله شروع جهش تا نقطه‌ای از سطح آب در نظر گرفته شد که تلاطم سطح آب محو می‌گردد. علاوه بر اندازه‌گیری مستقیم، از پروفیل‌های ثبت شده توسط عکس‌برداری نیز برای تعیین طول جهش استفاده شد که نتایج این دو روش به تقریب بر هم منطبق بود. به همین ترتیب در مطالعه عددی نیز از همین روش برای تعیین طول جهش استفاده گردید. به طوری که پس از شبیه‌سازی، به صورت



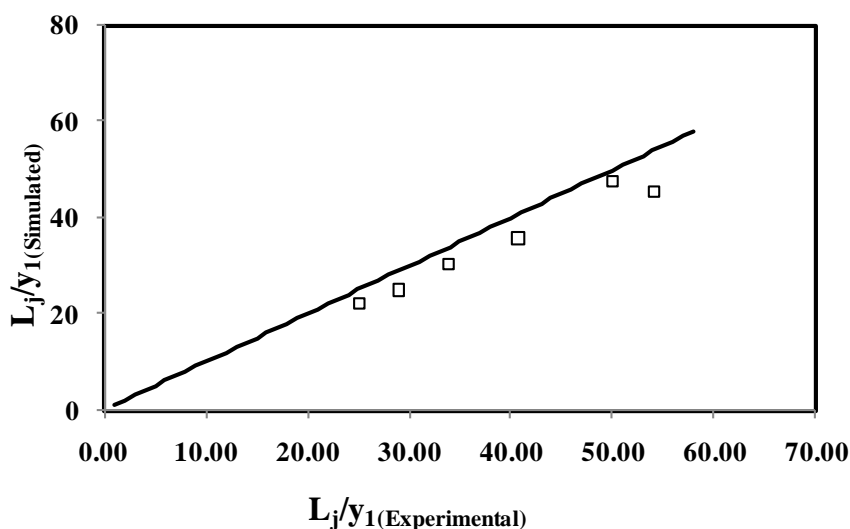
شکل ۷- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی تغییرات طول نسبی جهش هیدرولیکی ( $L_j/y_1$ )

نشان داد که بطور متوسط افزایش شیب کف معکوس از صفر به ۸ درصد باعث می‌گردد که در مقایسه با جهش کلاسیک، نسبت عمق ثانویه ۴۷ درصد و طول نسبی جهش ۳۵ درصد کاهش و افت نسبی انرژی ۲۰ درصد افزایش یابد. در شیب‌های کف معکوس، افزایش زاویه واگرایی از صفر به ۱۰ درجه، به‌طور متوسط منجر به کاهش ۵۱ درصدی در نسبت عمق ثانویه و ۳۸ درصدی در طول نسبی جهش و افزایش ۲۳ درصدی در افت نسبی انرژی در مقایسه با مشخصات جهش کلاسیک شده است (کاسی و همکاران، ۱۳۸۹). بطور کلی نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل حوضچه آرامش تطابق خوبی با نتایج مدل آزمایشگاهی دارد.

### ۳-۴- بررسی نتایج مدل‌سازی عددی Flow-3D در شبیه‌سازی طول ناحیه غلطاب

در (شکل ۸) تغییرات طول نسبی غلطاب جهش هیدرولیکی  $L_r/y_1$  مدل شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده است. در این تحقیق طول غلطاب نیز همانند روش تعیین طول جهش (به صورت چشمی) از ابتدای جهش تا محل برگشت آب اندازه‌گیری شده است. حداکثر اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و مقادیر شبیه‌سازی عددی حدود ۲۸ درصد مشاهده شده است.

بررسی‌ها نشان داده است که در هر زاویه واگرایی، با افزایش شیب کف معکوس، نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش کاهش و افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد. تجزیه و تحلیل نتایج



شکل ۸- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی تغییرات طول ناحیه غلطاب ( $L_r/y_1$ )

## ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی عددی خصوصیات پرش هیدرولیکی شامل نیمرخ سطح آب، نسبت عمق ثانویه، طول جهش، طول ناحیه غلطاب و توزیع سرعت برای پرش‌های تشکیل شده در حوضچه‌هایی با شیب کف و زاویه واگرایی دیواره‌های مختلف پرداخته شد و نتایج و خروجی‌های مختلف بدست آمده از اجزای نرم‌افزار Flow-3D تجزیه و تحلیل شد. گفتنی است به منظور شبیه‌سازی آشفتگی جریان و پرش هیدرولیکی تشکیل شده در حوضچه‌های با شیب کف معکوس و دیواره‌های واگرا، از مدل آشفتگی Renormalized group (RNG) استفاده شد که با توجه به نتایج به دست آمده از دقت خوبی برخوردار است. نتایج این تحقیق به طور خلاصه در زیر آمده است:

نیمرخ‌های بی‌بعد سطح جهش برای آزمون‌های مختلف بدست آمده مشابه یکدیگر هستند. این نتیجه در مطالعه آزمایشگاهی نیز بدست آمده بود.

مقادیر عمق ثانویه نسبی شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی به نسبت با هم سازگار هستند. حداکثر میزان خطای نسبی بین نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی حدود ۳۰ درصد مشاهده شد که این اختلاف را می‌توان به خطاهای موجود در شمای حل عددی به کار گرفته شده و فرضیه‌های موجود در رابطه بلانگر استناد کرد. همچنین نتایج نشان داد که افزایش شیب کف و واگرایی دیواره‌ها به میزان قابل ملاحظه‌ای موجب کاهش عمق ثانویه و طول نسبی جهش برای تمام مقادیر  $Fr_1$  می‌شود.

حداکثر اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و مقادیر شبیه‌سازی عددی طول جهش هیدرولیکی حدود ۱۵ درصد مشاهده شد. این اختلاف بین آن‌ها می‌تواند ناشی از تفاوت در معیار اندازه‌گیری طول جهش باشد. همچنین با افزایش شیب و واگرایی دیواره‌ها مقادیر طول جهش هیدرولیکی کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است و افزایش عدد فرود این روند را شدت می‌دهد. به طوری که به ازای اعداد فرود حداکثر تا حدود ۲۸ درصد کاهش در طول جهش مشاهده گردید.

با تحلیل داده‌های سرعت در طول جهش هیدرولیکی مشخص شد با توجه به این که تنش برشی با افزایش فاصله از ابتدای جهش کاهش و همچنین عمق جریان افزایش می‌یابد، سرعت ماکزیمم در هر مقطع در امتداد جهش کاهش خواهد یافت.

همچنین با افزایش فاصله از ابتدای جهش فاصله وقوع سرعت حداکثر و به عبارتی ضخامت لایه درونی توزیع سرعت افقی جریان افزایش می‌یابد.

مدل شبیه‌سازی گرداب‌های ایجاد شده در نتیجه واگرایی دیواره‌ها و همچنین جریان چرخشی در محل وقوع پرش را به خوبی نمایش داده است و در مقایسه با نتایج برمن و هاگر نیز مطابقت خوبی داشته است. با توجه به نتایج صحت‌سنجی، می‌توان از مدل عددی فلوتری دی در تحلیل جریان درون حوضچه‌های آرامش واگرا که دارای کارایی مناسب‌تری نسبت به حوضچه‌های استاندارد می‌باشند، در مرحله طراحی استفاده نمود.

## ۵- مراجع

۱- ابریشمی، ج. و حسینی، م. (۱۳۷۷). هیدرولیک کانال‌های باز، انتشارات آستان قدس رضوی، دانشگاه امام رضا(ع)، چاپ دهم.

۲- اسماعیلی، ک. و ابریشمی، ج. (۱۳۷۹). پرش هیدرولیکی بر روی کانال‌های با شیب معکوس و پله منفی، مجله استقلال، سال ۱۹، شماره ۲، ص ۹۷-۱۱۰.

۳- اسمعیلی ورکی، م. (۱۳۸۲). مطالعه خصوصیات جهش هیدرولیکی واگرا در حوضچه‌های آرامش دوزنقه‌ای، پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران.

۴- امید، م. ح. (۱۳۷۵). بررسی عملکرد جهش هیدرولیکی در مقاطع دوزنقه‌ای، مجله علوم کشاورزی ایران، جلد ۲۷، شماره ۲، ص ۱۷-۲۷.

۵- امید، م. ح. و اسمعیلی ورکی، م. (۱۳۸۴). مطالعه تئوری و آزمایشگاهی جهش هیدرولیکی واگرا در مقاطع دوزنقه‌ای شکل، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال نهم، شماره ۲، ص ۱۳-۱.

۶- صاحبی و همکاران ۱۳۹۲، مقایسه مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$  در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا با استفاده از نرم‌افزار Fluent، نشریه آب و خاک دانشگاه فردوسی مشهد، (۱) ۲۷: ۲۴۶-۲۳۵.

۷- صاحبی ف.، اسمعیلی ورکی م.، نوابیان م. و امیری ز. ۱۳۹۱. ارزیابی اقتصادی تأثیر واگرایی دیواره‌های حوضچه

- 14-Gonzalez A., and Bombardelli F. 2005. Two-Phase Flow Theory and Numerical Models for Hydraulic Jumps, Including Air Entrainment. University of California, USA.
- 15- Arabhabhirama, A. and A. Abela. 1971. Hydraulic jump within gradually expanding channel. *J. Hydraul. Eng.*, 97(1): 31-42.
- 16- Abrishami, J. and M. Saneie. 1994. Hydraulic Jump in adverse basin slopes. *International Journal of Water Resource Engineering*, 2(1), 51-63.
- 17- Lawson, J. D and B. C. Phillips. 1983. Circular hydraulic jump. *J. Hydraul. Eng.* 109 (4): 505-518.
- 18- Khelifa, A. M. and A. M. McCorquodale. 1979. Radial hydraulic jump. *J. Hydraul. Eng.* 105(9): 1065-1078.
- 19- Kouluseus, H. j and Ahmad, D. 1961. Circular hydraulic jump. *J. Hydraul. Eng.* 95(1): 409-422.
- 20- McCorquodale, J. A., and Mohamed, M. S. 1994. Hydraulic jump on adverse slopes. *J. Hydraul. Res.* 31(1): 119-130.
- 21- Omid, M. H, M. Esmaeeli Varaki and R. Narayana. 2007. Gradually Expanding Hydraulic Jump in a Trapezoidal Channel. *J. Hydraul. Res.* (4): 512-518.
- 22- Peruginelli, A., and S. Pagliara. 2000. Limiting and sill-controlled adverse-slope hydraulic jump. *J. Hydraul. Eng.* 126(11): 847-851.
- آرامش بر تغییر هزینه‌های ساخت آن. یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، آبان ماه، دانشگاه ارومیه.
- ۹- کاسی ا. ۱۳۸۹. مطالعه آزمایشگاهی خصوصیات جهش هیدرولیکی واگرا در حوضچه آرامش با شیب کف معکوس. پایان نامه کارشناسی ارشد در گرایش ساز ه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران.
- ۱۰- صباغ یزدی، س.، شاملو، ح.، رستمی، ف. ۱۳۸۷. بررسی عددی جریان در حوضچه آرامش پرش هیدرولیکی با استفاده از VOF، دومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برقابی، اردیبهشت ۱۳۸۷.
- ۱۱- شجاعیان، ز و کاشفی پور، م. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش سد مخزنی نمود، نشریه دانش آب و خاک (۲) - ۲۳: ۲۹۵-۲۸۳.
- 12- Abbaspour A., Farsadizadeh D., Hosseinzadeh Delir A., and Sadraddini A. 2009. Numerical study of hydraulic jumps on corrugated beds using turbulence models. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Science, TUBITAC*, 33: 61-72.
- 13- Bremen R., and Hager W.H. 1990. Ressauts Hydrauliques dans les canaux avec elargissement. *Proc. Of XXII Convengo di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Cosenza, Italy, Vol. 1: 171-182 (in Italian).*