

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی کشاورزی

گروه آب و خاک

پایان نامه کارشناسی ارشد

شبیه سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی سطوح زبر با استفاده از مدل **Flow-3D**

نسرین صمدی

استاد راهنما

دکتر خلیل اژدری

اساتید مشاور

دکتر صمد امامقلی زاده

مهندس فیروز قاسم زاده

بهمن ۱۳۹۴

تقدیم نامہ:

پاس خدای را کہ هرچه دارم از اوست.

این پایان نامہ را ضمن تشکر و سپاس بی کران و در کمال افتخار و اطمینان تقدیم می نمایم به:

محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم، به خاطر همه تلاش های محبت آمیزی که در دوران مختلف زندگی ام انجام داده اند و با مهربانی چگونگی زیستن

را به من آموخته اند.

به همسر مهربانم، که در تمام طول تحصیل همراه و یگام من بوده است و در تمامی لحظات صبورانه رفیق راه بوده.

به خانواده ام که وجودشان شادی بخش و صفایشان مایه آرامش من است.

مشکر و قدردانی:

باسپاس فراوان از جناب آقای دکتر خلیل اژدری که در کمال سه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از بیچ کلی در این عرصه بر من دینغ

تمودند و زحمت راهمبانی این پایان نامه را بر عهده گرفتند.

بمجنین از راهمبانی ها و زحمت اساتید محترم و کراتقدر که از ابتدای راه و در طی انجام این تحقیق، باراهمبانی های خود مراد بکارش این

پایان نامه یاری نمودند، کمال مشکر را دارم.

چکیده

برای جلوگیری از خسارت ناشی از انرژی زیاد آب در جریان‌های فوق بحرانی و نیز به منظور از بین بردن انرژی جنبشی اضافی در چنین جریان‌هایی از سازه‌هایی تحت عنوان مستهلک کننده انرژی در پایین دست این گونه جریان‌ها استفاده می‌شود. از جمله سازه‌های مستهلک کننده انرژی می‌توان به حوضچه‌های آرامش اشاره نمود که با تشکیل جهش هیدرولیکی و عملکرد ضمایم حوضچه، مقدار انرژی موجود را کاهش می‌دهند. در این مطالعه به شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی بر روی سطوح زبر با بلوک‌های یکپارچه دوزنقه‌ای قائم با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D و به کارگیری مدل $k-\epsilon$ پرداخته شد. در مجموع ۴۰ آزمایش عددی با دبی‌های مختلف در محدوده اعداد فرود $3/88$ تا $12/01$ با عمق اولیه $1/55$ سانتیمتر انجام گردید. آنالیز داده‌ها نشان داد که پروفیل سطح جریان در پرش هیدرولیکی برای تمام شبیه‌سازی‌های انجام شده با نرم‌افزار Flow-3D مشابه یکدیگر هستند. همچنین مقایسه نتایج به دست آمده از حل عددی و آزمایشگاهی نشان داد که مقادیر عمق ثانویه نسبی، طول پرش هیدرولیکی و طول ناحیه غلطاب شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی به نسبت باهم سازگار هستند. افزایش فاصله بین زبری‌ها باعث کاهش عمق ثانویه به میزان ۱۰ درصد گردید، همچنین طول پرش هیدرولیکی با افزایش فاصله بین زبری‌ها $6/4$ تا $22/8$ درصد کاهش یافت و طول غلطاب نیز با افزایش فاصله بین زبری‌ها کاهش یافت. توزیع بدون بعد سرعت در پرش هیدرولیکی به ازای تمامی اعداد فرود یکسان و مشابه بود. همچنین افزایش ارتفاع و فاصله زبری روی بستر باعث کاهش سرعت در نزدیکی بستر، افزایش تنش برشی و در نتیجه افزایش شیب خط توزیع سرعت در نزدیک بستر شد. در بسترهای زبر افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی با افزایش عدد فرود اولیه افزایش می‌یابد. به ازای اعداد فرود یکسان افت نسبی انرژی در بسترهای زبر بیشتر از بسترهای صاف است. تغییر ارتفاع و فاصله بین زبری‌ها باعث افزایش مقدار افت نسبی انرژی گردید.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، سطوح زیر، نرم‌افزار Flow-3D، مدل $k-\varepsilon$ ، عمق ثانویه، طول پرش هیدرولیکی، طول ناحیه غلطاب، توزیع سرعت، افت نسبی انرژی.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- " شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی سطوح زبر با مدل Flow-3D "

نسرین صمدی، خلیل اژدری، صمد امامقلی زاده، فیروز قاسم زاده، دهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، ۲۹ دی لغایت ۱ بهمن ۱۳۹۴، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- " بررسی تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر مشخصات پرش هیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزار

Flow-3D "

نسرین صمدی، خلیل اژدری، صمد امامقلی زاده، فیروز قاسم زاده، سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، ۲۰ و ۲۱ اسفند ۱۳۹۴، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تهران.

فصل اول

۱- کلیات	۲
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- تاریخچه	۴
۱-۳- ضرورت انجام تحقیق حاضر	۶
۱-۴- اهداف تحقیق	۸
۱-۵- روش تحقیق و موضوعات مورد بررسی در این تحقیق	۹

فصل دوم

۲- مروری بر تحقیقات گذشته	۱۲
۲-۱- مقدمه	۱۲
۲-۲- مطالعات انجام شده در زمینه شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف	۱۲
۲-۳- مطالعات انجام شده در زمینه شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر	۱۵

فصل سوم

۳- مواد و روش‌ها	۳۴
۳-۱- مقدمه	۳۴
۳-۲- مدل آزمایشگاهی	۳۴

۳۹	.....	Flow-3D معرفی نرم افزار
۴۱	.....	۱-۳-۳ معادلات حاکم
۴۱	.....	۱-۱-۳-۳ VOF روش
۴۲	.....	۲-۱-۳-۳ FAVOR روش
۴۳	.....	۳-۱-۳-۳ معادله پیوستگی
۴۴	.....	۴-۱-۳-۳ معادلات مومنتم
۴۷	.....	۲-۳-۳ روابط ورود هوا
۴۸	.....	۳-۳-۳ مدل های حل آشفتگی
۴۸	.....	۱-۳-۳-۳ جریان های آشفته
۴۹	.....	۲-۳-۳-۳ معادلات ناویر استوکس متوسط شده زمانی (RANS)
۵۱	.....	۴-۳-۳ مدل های آشفتگی مورد استفاده در Flow-3D
۵۲	.....	۱-۴-۳-۳ مدل دو معادله ای $k-\epsilon$
۵۳	.....	۴-۳-۳ تعریف مشخصات مدل برای شبیه سازی
۵۳	.....	۱-۴-۳-۳ زمان شبیه سازی
۵۳	.....	۲-۴-۳ شرایط فیزیکی
۵۳	.....	۳-۴-۳ تعریف هندسه مدل
۵۸	.....	۴-۴-۳ تعریف شبکه حل
۶۰	.....	۵-۴-۳ تعریف شرایط مرزی

۶۲	..... Flow-3D نرم افزار شده از استخراج های خروجی های
۶۵	..... ۵-۳- شاخص های آماری
۶۵	..... ۱-۵-۳ خطای میانگین مجذور مربعات (RMSE)
۶۵	..... ۲-۵-۳ خطای میانگین مجذور مربعات نرمال شده (NRMSE)
۶۶	..... ۳-۵-۳ ضریب همبستگی (d)
۶۶	..... ۴-۵-۳ ضریب نش سات کلیف (NS)

فصل چهارم

۶۸	..... ۴- نتایج و بحث
۶۸	..... ۱-۴- مقدمه
۶۸	..... ۲-۴- صحت سنجی نرم افزار Flow-3D
۷۱	..... ۳-۴- پروفیل های با بعد و بی بعد سطح آب
۷۱	..... ۱-۳-۴ تأثیر فاصله بین زبری ها بر پروفیل سطح آب
۷۴	..... ۲-۳-۴ تأثیر اندازه دبی جریان بر پروفیل سطح آب
۷۶	..... ۴-۴- نسبت عمق ثانویه
۷۶	..... ۱-۴-۴ نسبت عمق ثانویه بر روی بستر صاف
۷۷	..... ۲-۴-۴ تأثیر فاصله بین زبری ها بر نسبت عمق ثانویه
۷۹	..... ۳-۴-۴ مقایسه نتایج شبیه سازی عددی و آزمایشگاهی عمق مزدوج نسبی
۸۱	..... ۵-۴- طول پرش هیدرولیکی

- ۸۱-۵-۴- تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر طول پرش هیدرولیکی ۸۱
- ۸۳-۵-۴- تغییرات طول نسبی پرش در برابر عدد فرود در بستر صاف و بسترهای زبر ۸۳
- ۸۴-۵-۳- مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی طول پرش هیدرولیکی ۸۴
- ۸۶-۴-۶- طول ناحیه غلطاب ۸۶
- ۸۶-۴-۱- تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر طول ناحیه غلطاب ۸۶
- ۸۸-۴-۶-۲- مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی طول ناحیه غلطاب ۸۸
- ۹۰-۴-۷- توزیع سرعت در پرش هیدرولیکی ۹۰
- ۹۰-۴-۷-۱- توزیع با بعد سرعت ۹۰
- ۹۵-۴-۷-۲- توزیع بی‌بعد سرعت ۹۵
- ۹۸-۴-۷-۳- نتایج دو بعدی سرعت در پرش هیدرولیکی ۹۸
- ۹۹-۴-۷-۴- پروفیل طولی سرعت ۹۹
- ۱۰۰-۴-۸- افت انرژی ۱۰۰
- ۱۰۰-۴-۸-۱- تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر میزان افت انرژی ۱۰۰
- ۱۰۲-۴-۸-۲- مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی تغییرات نسبی انرژی ۱۰۲
- ۱۰۴-۴-۸-۳- درصد افزایش افت انرژی (G%) ۱۰۴

فصل پنجم

- ۱۰۶-۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۰۶
- ۱۰۶-۵-۱- نتیجه‌گیری ۱۰۶

۱۰۸ ۲-۵- پیشنهادات

۱۱۰ منابع

فهرست شکل‌ها:

شکل ۱-۱- مشخصات هندسی پرش هیدرولیکی ۵

شکل ۱-۲- شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد پرش هیدرولیکی با استفاده از روش (VOF) برای عدد فرود ۴ (عباسپور و آیشم،

۱۳۹۰) ۱۵

شکل ۲-۲- پرش هیدرولیکی بر روی سطوح موج‌دار (سانتی‌متر ثانیه بر متر) $q = 0/14$ ، (سانتی‌متر) $y_1 = 5/32$ (کاهه

و دهقانی، ۱۳۹۲) ۱۹

شکل ۳-۲- پروفیل سرعت افقی برای آبگذری ۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه در محور حوضچه (صباغ یزدی، ۱۳۸۷) ۲۰

شکل ۴-۲- نمودار مقایسه تغییرات سرعت به عمق با تغییر ابعاد و تعداد مش (حسینی، ۱۳۹۲) ۲۳

شکل ۵-۲- نمایش هندسه مدل با شرایط مرزی در Flow-3D (دانش‌فراز، ۱۳۹۲) ۲۵

شکل ۶-۲- شبکه‌بندی محدوده محاسباتی برای سرریز و حوضچه آرامش توسط نرم‌افزار Gambit (شجاعیان و کاشفی‌پور،

۱۳۹۲) ۲۶

شکل ۷-۲- مقایسه پروفیل‌های سطح آب به‌دست آمده از مدل آشفتگی k-ε استاندارد و داده‌های تجربی در عدد فرود ۶/۴

(حیدری فهونده، ۱۳۹۲) ۲۷

شکل ۸-۲- طرح کلی کانال آزمایشگاهی (صاحبی، ۱۳۹۱) ۲۹

شکل ۱-۳- نمای کلی از کانال آزمایشگاهی (راور و همکاران، ۱۳۸۹) ۳۵

شکل ۲-۳- نمونه‌ای از تصاویر ثبت شده از پرش هیدرولیکی برای رسم پروفیل سطح آب (راور و همکاران، ۱۳۸۹) ۳۶

- شکل ۳-۳- زبری‌های ذوزنقه‌ای با ارتفاع ۲ و ۳ و ۴ سانتی‌متر (راور و همکاران، ۱۳۸۹) ۳۸
- شکل ۳-۴- نمونه‌ای از کف زبر نصب شده در کانال (راور و همکاران، ۱۳۸۹) ۳۹
- شکل ۳-۵- نمایی از کف زبر ایجاد شده با استفاده از نرم‌افزار Auto CAD ۵۴
- شکل ۳-۶- نمایی از کانال و بستر زبر شبیه‌سازی شده ۵۵
- شکل ۳-۷- پلان چند نمونه از کف‌های زبر ۵۷
- شکل ۳-۸- نمایی از دریچه ابتدای کانال و سرریز انتهایی کانال ۵۸
- شکل ۳-۹- نمونه‌ای از کانال شبیه‌سازی شده و شبکه حل در فضای سه بعدی ۵۹
- شکل ۳-۱۰- شبکه حل مورد استفاده به صورت دو بعدی ۶۰
- شکل ۳-۱۱- شرایط مرزی استفاده شده در مدل عددی با شرط مرزی خروجی در پایین دست ۶۱
- شکل ۳-۱۲- شرایط مرزی استفاده شده در مدل عددی با شرط مرزی فشار در پایین دست ۶۱
- شکل ۳-۱۳- پرش هیدرولیکی شبیه‌سازی شده ۶۲
- شکل ۳-۱۴- پرش هیدرولیکی تشکیل شده بر روی بستر زبر و درصد حجم هوای وارد شده در جریان ۶۳
- شکل ۳-۱۵- نمونه‌ای از نتایج متنی جهت فراخوانی در نرم‌افزار Tec plot ۶۴
- شکل ۳-۱۶- میدان جریان در پرش هیدرولیکی ۶۵
- شکل ۴-۱- مقایسه عمق مزدوج نسبی حاصل از نتایج صحت‌سنجی و نتایج آزمایشگاهی برای بستر زبر $t3s1.5$ ۶۹
- شکل ۴-۲- مقایسه طول پرش هیدرولیکی حاصل از نتایج صحت‌سنجی و نتایج آزمایشگاهی برای بستر زبر $t3s1.5$ ۶۹
- شکل ۴-۳- پروفیل سطح آب برای آزمون سری $t2s1$ ۷۲
- شکل ۴-۴- پروفیل سطح آب برای آزمون سری $t2s4$ ۷۲

- شکل ۴-۵- پروفیل سطح آب برای بستر صاف ۷۳
- شکل ۴-۶- پروفیل‌های بی‌بعد سطح آب برای آزمون سری t2s1 ۷۳
- شکل ۴-۷- پروفیل‌های بی‌بعد سطح آب برای آزمون سری t2s4 ۷۴
- شکل ۴-۸- پروفیل‌های سطح آب برای آزمون سری t3s1.5 ۷۵
- شکل ۴-۹- پروفیل‌های بی‌بعد سطح آب در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر برای کلیه شبیه‌سازی‌ها ۷۵
- شکل ۴-۱۰- مقایسه عمق مزدوج نسبی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی بر روی بستر صاف ۷۶
- شکل ۴-۱۱- شبیه‌سازی تغییرات عمق مزدوج نسبی در برابر عدد فرود برای فواصل مختلف زبری با ارتفاع الف- ۲ سانتیمتر، ب- ۳ سانتیمتر و ج- ۴ سانتیمتر ۷۹
- شکل ۴-۱۲- مقایسه نسبت عمق ثانویه شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی ۸۰
- شکل ۴-۱۳- شبیه‌سازی تغییرات طول بی‌بعد پرش هیدرولیکی در برابر عدد فرود برای فواصل مختلف زبری با ارتفاع الف- ۲ سانتیمتر، ب- ۳ سانتیمتر و ج- ۴ سانتیمتر ۸۳
- شکل ۴-۱۴- تغییرات طول نسبی پرش در برابر عدد فرود در بستر صاف و بسترهای زبر برای مقادیر مختلف S/t ۸۴
- شکل ۴-۱۵- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی ۸۵
- شکل ۴-۱۶- شبیه‌سازی تغییرات طول ناحیه غلطاب در برابر عدد فرود برای فواصل مختلف زبری با ارتفاع الف- ۲ سانتیمتر، ب- ۳ سانتیمتر و ج- ۴ سانتیمتر ۸۸
- شکل ۴-۱۷- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی مربوط به تغییرات طول ناحیه غلطاب ۸۹
- شکل ۴-۱۸- نمایش توزیع سرعت در پرش هیدرولیکی ۹۱
- شکل ۴-۱۹- توزیع سرعت در مقاطع مختلف از ابتدای پرش (سری t2s4) ۹۳
- شکل ۴-۲۰- توزیع سرعت در مقاطع مختلف از ابتدای پرش (سری t3s6) ۹۴

- شکل ۴-۲۱- توزیع سرعت در مقاطع مختلف از ابتدای پرش (سری t4s6) ۹۵
- شکل ۴-۲۲- شبیه سازی توزیع بی بعد سرعت برای تمامی اعداد فرود برای بستر زبر الف- t2s1، ب- t3s1.5، ج- t4s6 و د- t4s8 ۹۷
- شکل ۴-۲۳- توزیع بدون بعد سرعت در پرش هیدرولیکی بر روی کلیه بسترهای زبر برای تمام اعداد فرود ۹۸
- شکل ۴-۲۴- سرعت افقی در پرش هیدرولیکی برای آزمون الف- t2s1 و ب- t3s1.5 ۹۹
- شکل ۴-۲۵- پروفیل طولی سرعت در پرش هیدرولیکی برای زبری t3s3 و فرود ۶/۶ ۱۰۰
- شکل ۴-۲۶- شبیه سازی تغییرات افت نسبی انرژی در برابر عدد فرود برای فواصل مختلف زبری با ارتفاع الف- ۲ سانتیمتر، ب- ۳ سانتیمتر و ج- ۴ سانتیمتر ۱۰۲
- شکل ۴-۲۷- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی تغییرات افت نسبی انرژی ۱۰۳
- شکل ۴-۲۸- تغییرات درصد افزایش افت انرژی پرش هیدرولیکی در برابر عدد فرود اولیه برای مقادیر مختلف s/t ۱۰۴

فهرست جدول ها:

- جدول ۳-۱- مشخصات فیزیکی بسترهای زبر شبیه سازی شده ۵۶
- جدول ۴-۱- شاخص های آماری حاصل از نتایج صحت سنجی عمق مزدوج نسبی ۷۰
- جدول ۴-۲- شاخص های آماری حاصل از نتایج صحت سنجی طول پرش هیدرولیکی ۷۰
- جدول ۴-۳- شاخص های آماری برای مقایسه عمق مزدوج شبیه سازی شده و آزمایشگاهی ۸۰
- جدول ۴-۴- شاخص های آماری برای مقایسه طول پرش هیدرولیکی شبیه سازی شده و آزمایشگاهی ۸۵
- جدول ۴-۵- شاخص های آماری برای مقایسه طول ناحیه غلطاب شبیه سازی شده و آزمایشگاهی ۸۹

جدول ۴-۶- شاخص‌های آماری برای مقایسه افت نسبی انرژی شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی ۱۰۳

فهرست علائم:

y_1 عمق متوسط در مقطع بالادست پرش هیدرولیکی

U_1 سرعت متوسط در مقطع بالادست پرش هیدرولیکی

y_2^* عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کلاسیک

Fr_1 عدد فرود در مقطع بالادست پرش هیدرولیکی

L_r طول ناحیه غلطاب

L_j طول پرش

k انرژی جنبشی

ε اتلاف انرژی

V_F کسر حجمی جریان

ρ دانسیته سیال

R_{DIF} عبارت پخش آشفتگی

R_{SOR} منبع جرم

u سرعت در جهت X

v سرعت در جهت Y

w سرعت در جهت Z

کسرهای سطحی برای جریان در جهت X	A_x
کسرهای سطحی برای جریان در جهت Y	A_y
کسرهای سطحی برای جریان در جهت Z	A_z
شعاع مرجع	r_m
ضریب پخش مومنتم	μ
سرعت موج	c
فشار	p
شتاب بدنه در جهت X	G_x
شتاب بدنه در جهت Y	G_y
شتاب بدنه در جهت Z	G_z
شتاب ناشی از لزجت در جهت X	f_x
شتاب ناشی از لزجت در جهت Y	f_y
شتاب ناشی از لزجت در جهت Z	f_z
افت جریان در محیط‌های دارای خلل و فرج در جهت X	b_x
افت جریان در محیط‌های دارای خلل و فرج در جهت Y	b_y
افت جریان در محیط‌های دارای خلل و فرج در جهت Z	b_z
مؤلفه‌های سرعت جزء منبع	U_w
مؤلفه‌های سیال در سطح منبع نسبت به خود آن	U_s

σ	ضریب تنش سطحی
P_d	انرژی جنبشی آشفته‌گی در واحد حجم برای یک المان سیال
g_n	مؤلفه شتاب گرانش
δV	حجم هوای وارد شده در واحد زمان
ε_T	اتلاف آشفته‌گی
k_T	انرژی جنبشی آشفته‌گی
P_T	تولید انرژی جنبشی آشفته‌گی
G_T	عبارت تولید شناوری
t	ارتفاع زبری‌ها
s	فاصله بین زبری‌ها
Q	دبی حجمی جریان
C	ضریب سرریز
L	طول سرریز
H_d	ارتفاع آب روی سرریز
X	مقدار اندازه‌گیری
Y	مقدار شبیه‌سازی شده
n	تعداد داده‌ها
O	میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده

d	ضریب همبستگی
O_e	میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده
x	فاصله طولی پرش از ابتدای پرش
y	عمق جریان
q	دبی در واحد عرض جریان
y_2	عمق ثانویه پرش هیدرولیکی
u_{max}	سرعت حداکثر
δ	فاصله از جدار کانال
u	سرعت برشی
E_1	انرژی مخصوص جریان در مقطع اولیه پرش
E_2	انرژی مخصوص جریان در انتهای پرش
E_L	افت انرژی در بستر زبر
E_L^*	افت انرژی در بستر صاف
$G\%$	درصد افزایش افت انرژی
R_L	افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی

فصل اول:

کلیات

۱- کلیات

۱-۱- مقدمه

برای جلوگیری از خسارت ناشی از انرژی زیاد آب در جریان‌های فوق بحرانی و نیز به منظور از بین بردن انرژی جنبشی اضافی در چنین جریان‌هایی از سازه‌هایی تحت عنوان مستهلک کننده انرژی^۱ در پایین دست این گونه جریان‌ها استفاده می‌شود. این گونه سازه‌ها علاوه بر از بین بردن انرژی آب وسیله‌ای برای کنترل و مهار پرش هیدرولیکی^۲ و به وجود آوردن شرایط جهت وقوع آن در یک موقعیت مکانی خاص به شمار می‌روند. از جمله سازه‌های مستهلک کننده انرژی می‌توان به حوضچه‌های آرامش^۳ اشاره نمود که با تشکیل جهش هیدرولیکی و عملکرد ضامیم حوضچه، مقدار انرژی موجود را کاهش می‌دهند.

پرش یا جهش هیدرولیکی از نوع جریان متغیر سریع می‌باشد که عبارت از تغییر حالت جریان از فوق بحرانی به زیر بحرانی است. بیشترین و عمومی‌ترین پرش‌ها در بسترهای افقی مستطیلی شکل می‌گیرند.

این پدیده که یکی از پدیده‌های مهم جریان آب در کانال‌های باز بوده و از ابتدا تا انتهای آن یک تلاطم و پیچش سطحی آب وجود دارد، به پرش هیدرولیکی یا پرش آبی موسوم است. در چنین حالت و به تناسب شدت پرش، آشفتگی‌هایی در سطح آب دیده می‌شود که به تدریج که به سمت انتهای پرش نزدیک می‌شویم از شدت آن‌ها کاسته شده و متناسباً و به جهت تبدیل انرژی به گرما، انرژی آب نیز کاهش می‌یابد. علاوه بر آن به جهت این آشفتگی و تلاطم و در اثر برخورد آب با هوا، مقداری هوا با آب و در قسمت‌های سطحی مخلوط شده که به سمت پایین دست منتقل و نهایتاً به شکل حباب‌های هوا می‌گردد.

¹ Energy Dissipators

² Control of Hydraulic Jump

³ Stilling Basins

برخی از کاربردهای جهش هیدرولیکی در کانال‌های روباز شامل موارد زیر است:

۱- کاهش انرژی آب در جریان از روی سدها، سرریزها و دیگر سازه‌های هیدرولیکی و نهایتاً محافظت قسمت‌های پایین دست.

۲- ترمیم و افزایش سطح آب در کانال‌ها به منظور پخش آب.

۳- افزایش دبی خروجی از زیر دریچه‌ها با دور نگه داشتن سطح پایاب^۱ و نهایتاً افزایش ارتفاع مؤثر در عرض دریچه.

۴- کاهش فشار بالابرنده^۲ در زیر سازه‌ها با افزایش عمق آب در دامنه سازه.

۵- مخلوط نمودن مواد شیمیایی جهت تصفیه آب یا فاضلاب و نیز جهت مصارف کشاورزی.

۶- هوادهی جریان‌ها و کلرزدائی فاضلاب.

۷- جدا نمودن هوای محبوس از جریان‌های موجود در کانال‌های باز دایروی.

۸- مشخص نمودن شرایط جریان‌های خاص نظیر وجود جریان فوق بحرانی یا وجود یک سطح مقطع کنترل جهت ایجاد ایستگاه‌های اندازه‌گیری کم خرج.

حوضچه آرامش یا حوضچه جهش آبی عبارت است از قسمت کوتاهی از یک کانال کف‌سازی شده که به‌صورت سازه‌ای خاص در انتهای سرریزها یا هر منبع دیگری که جریان فوق بحرانی ایجاد کند، ساخته می‌شود و هدف از ساختن آن به تشکیل پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه خلاصه می‌شود که در این

¹. Tailwater

². Uplift Pressure

صورت جریان فوق بحرانی، قبل از رسیدن به قسمت‌های غیر کف‌سازی شده رودخانه به جریان زیر بحرانی تغییر حالت داده و از انرژی فوق‌العاده آن کاسته و از خرابی‌های احتمالی جلوگیری می‌گردد.

هر حوضچه آرامش، بر حسب شدت پرش، احتیاج به اجزایی دارد تا ضمن شکل دادن پرش در یک موقعیت و محل خاص، تا حد امکان از طول آن بکاهند. از جمله این اجزا عبارتند از: بلوک‌های پای تندآب^۱، آب پایه^۲ و بلوک‌های آرام‌کننده^۳.

۱-۲- تاریخچه

پرش یا جهش هیدرولیکی از نوع جریان متغیر سریع می‌باشد که عبارت از تغییر حالت از فوق بحرانی به زیر بحرانی است. بیشترین و عمومی‌ترین پرش‌ها در بسترهای افقی مستطیلی شکل می‌گیرند. در چنین شرایطی اگر y_1 و U_1 به ترتیب عمق و سرعت متوسط در مقطع بالادست پرش هیدرولیکی باشد، مقدار عمق مزدوج در پایین دست پرش هیدرولیکی با صرف نظر کردن از اصطکاک از رابطه معروف بلانگر^۴ به دست می‌آید (حسینی و ابریشمی، ۲۰۰۱):

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

که در آن y_2^* عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کلاسیک و Fr_1^2 عدد فرود در مقطع بالادست پرش می‌باشد. قدرت و شدت پرش هیدرولیکی به عدد فرود در مقطع ۱ (محل شروع پرش هیدرولیکی) بستگی دارد که با افزایش آن نسبت $\frac{y_2^*}{y_1}$ و به عبارتی دیگر $(y_2^* - y_1)$ افزایش می‌یابد. یکی از پارامترهای بسیار مهم در پرش هیدرولیکی، طول پرش می‌باشد که از طریق تحلیل‌های ریاضی قابل محاسبه نبوده و لازم است تا در هر مورد، از نتایج تجربی و آزمایشگاهی استفاده گردد. در پرش‌های آبی عموماً دو طول مختلف مورد توجه

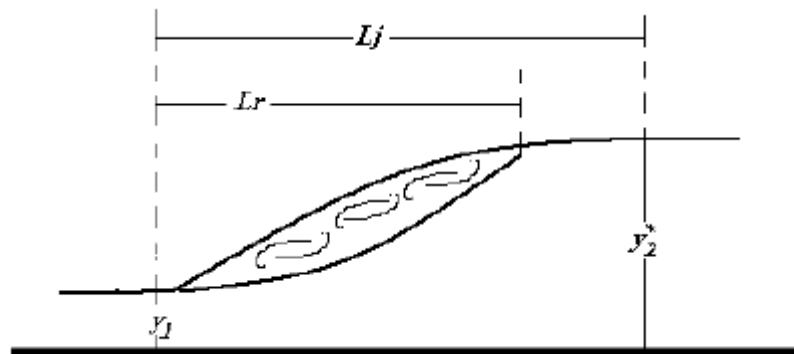
1. Chute Blocks

2. Sill

3. Baffle Piers

4. Belanger

قرار می‌گیرد. طول چرخش، L_r ، که عبارت است از فاصله شروع پرش تا نقطه‌ای که سرعت جریان در سطح معکوس شده است و L_j ، فاصله شروع پرش تا محلی که رقوم سطح آب تقریباً برابر با ارتفاع پایاب است (شکل ۱-۱).



شکل ۱-۱- مشخصات هندسی پرش هیدرولیکی

به منظور بهینه کردن و یا تغییر مشخصه‌های پرش هیدرولیکی مطالعات بسیاری صورت گرفته است، که از میان آن‌ها می‌توان به بررسی اثر زبری بر روی مشخصه‌های پرش هیدرولیکی اشاره کرد. راجاراتنام^۱ (۱۹۶۵) در بررسی‌های اولیه بیان کرد که در صورت ایجاد بستر زبر در پرش هیدرولیکی، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین ایشان نتیجه گرفت در پرش هیدرولیکی بر روی سطوح زبر، مقدار طول پرش به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

پژوهش‌های دیگری از جمله هوگنز و فلاک^۲ (۱۹۸۴)، هگر^۳ (۱۹۹۲)، ایزدجو و شفافی بجستان (۲۰۰۷)، توکیای^۴ (۲۰۰۵) و عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) کاهش قابل توجه طول پرش هیدرولیکی بر روی سطوح زبر

¹. Rajaratnam

². Hughes & Flack

³. Hager

⁴. Tokyay

را تایید کردند. اید و همکاران (۲۰۰۰) و اید و راجاراتنام (۲۰۰۲a) به بررسی پرش هیدرولیکی بر روی سطوح موج‌دار پرداختند. آن‌ها دریافتند که سطوح موج‌دار، با ایجاد اختلاط شدید در جریان باعث افزایش تنش رینولدز و اصطکاک بستر می‌شود. در این حالت پرش هیدرولیکی برای تشکیل به عمق پایاب کم‌تری نیاز داشته و در نتیجه طول پرش به شکل معنی‌داری کاهش می‌یابد.

محققان دیگری هم به بررسی عددی پرش هیدرولیکی بر روی سطوح زبر پرداختند و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی را با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند. از جمله این مطالعات می‌توان به بررسی‌های میسرا و ژائو^۱ (۲۰۰۴)، یونامی و همکاران^۲ (۲۰۰۰)، مهدی کاهه و امیر احمد دهقانی (۲۰۱۳)، سعیدرضا صباغ یزدی و همکاران (۲۰۱۴)، محمد حسینی و همکاران (۲۰۱۳)، معصومه آسمانی و همکاران (۲۰۱۱) و محمد هوشمندزاده (۲۰۰۸) اشاره کرد.

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق حاضر

حوضچه‌های آرامش به عنوان مستهلک‌کننده‌های انرژی در پایاب سازه‌های هیدرولیکی کاربرد فراوانی دارند و این امر موجب انجام مطالعات عددی در زمینه پرش هیدرولیکی گردیده است. زبری کف بستر، نقش مهمی را در کاهش عمق ثانویه و طول پرش، افزایش افت انرژی و تثبیت پرش هیدرولیکی ایفا می‌کند. بنابراین زبر کردن بستر عاملی برای کاهش هزینه‌های حوضچه آرامش می‌باشد. دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) علمی است که به مطالعه عددی پدیده‌های موجود در زمینه سیالات می‌پردازد. شاید بتوان ادعا کرد که پیدایش رایانه‌ها، با کاهش هزینه‌های محاسباتی استفاده از روش‌های عددی، تاثیر زیادی در پیشرفت این علم داشته و باعث شده است روز به روز بر تعداد روش‌های حل عددی و مدل‌های توسعه داده شده بر مبنای این روش‌ها افزوده شود. برای ایجاد یک پرش هیدرولیکی عوامل شناخته شده و ناشناخته بسیاری

1. Misra & Zhao

2. Unami et. al.

دخیل هستند، از این جهت است که محققین زیادی در آزمایشگاه‌ها با صرف زمان زیاد و هزینه‌های فراوان به بررسی و شناخت این عوامل می‌پردازند. یک پرش هیدرولیکی با اغتشاشات و آشفتگی‌هایی همراه است. محاسبه این آشفتگی‌ها با توجه به تصادفی بودن رفتار آن‌ها عملاً غیر قابل ممکن است. امروزه با توجه به پیشرفت علم دینامیک سیالات (CFD) دانشمندان توانسته‌اند از پدیده‌هایی که حتی با آشفتگی نیز همراه است، پارامترهای مهم و تاثیر گذار را محاسبه نمایند. در بحث پرش هیدرولیکی محققین با ارائه مدل‌های مختلف آشفتگی اقدام به محاسبه پارامترهای هیدرولیکی می‌نمایند. برنامه‌نویسان رایانه با توجه به قابلیت‌های رایانه‌های امروزی نرم‌افزارهایی را ایجاد نمودند که می‌توانند با شبیه‌سازی شرایط واقعی یک فلوم آزمایشگاهی و معرفی شرایط اولیه جریان به نرم‌افزار پارامترهای هیدرولیکی را در شرایط آشفتگی با استفاده از مدل‌های آشفتگی دقیقاً محاسبه و اعلام نمایند. از جمله قوی‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های آشفتگی که در محاسبه هیدرولیک جریان استفاده می‌گردد می‌توان به مدل RNG و مدل $k-\epsilon$ اشاره نمود. همان‌طور که اشاره گردید نرم‌افزارهای فراوانی وجود دارند که با استفاده از مدل‌های یاد شده اقدام به شبیه‌سازی و محاسبه پارامترهای هیدرولیکی جریان می‌نمایند. یکی از قوی‌ترین و پرکاربردترین این نرم‌افزارها نرم‌افزار Flow-3D می‌باشد. این نرم‌افزار توانایی دارد تا با شبیه‌سازی هر مدل هیدرولیکی به صورت سه‌بعدی و دریافت شرایط اولیه جریان همچون سرعت اولیه، دبی اولیه، هد پیزومتریک، زبری، درصد نفوذ هوا و ... ، کلیه پارامترهای مهم و تاثیرگذار از جمله اعماق مختلف در هر مقطع دلخواه از طول مسیر جریان، سرعت‌ها، فشارها، عدد فرود در مقاطع و اعماق مختلف، پتانسیل کاویتاسیون، مقدار انرژی جنبشی، میزان نفوذ هوا و بسیاری پارامترهای دیگر را محاسبه و اعلام نماید.

مدل‌های ریاضی شبیه‌سازی جریان سیال که مبتنی بر CFD هستند در مقایسه با روش‌های تجربی دارای چند مزیت عمده هستند. چند نمونه از این مزایا عبارتند از:

- کاهش اساسی در زمان و هزینه طراحی‌ها

- افزایش توان مطالعه سیستم‌های پیچیده که انجام آزمایش‌های کنترل شده روی آن‌ها مشکل یا غیر ممکن است.

- افزایش سطح جزئیات در ارائه نتایج

با توجه به اهمیت موضوع و این‌که بیشتر مطالعات انجام شده در این زمینه به صورت آزمایشگاهی بوده است، در این تحقیق با استفاده از نرم افزار Flow-3D پرش هیدرولیکی بر روی سطوح زبر شبیه‌سازی می‌گردد و نتایج حاصل از آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود.

۱-۴- اهداف تحقیق

امروزه با مشخص شدن معادله‌های حاکم بر جریان سیال‌ها و روش‌های حل عددی این معادله‌ها و پیدایش کامپیوترهای قوی، امکان شبیه‌سازی بسیاری از مسائل فیزیک وجود دارد.

هدف این تحقیق، شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی سطوح زبر با بلوک‌های یکپارچه دوزنقه‌ای قائم، انتخاب درست شرایط مرزی، هندسه جریان، شبکه محاسباتی مناسب و مقایسه آن با حالت آزمایشگاهی و به‌دست آوردن خطاها می‌باشد. به منظور بررسی اثر چیدمان و ارتفاع بلوک‌های یکپارچه، اعداد فرود مختلف، تغییر ارتفاع و فاصله متفاوت بلوک‌ها از هم، متغیرهای اجراهای عددی این تحقیق را تشکیل می‌دهند. با توجه به اهداف مورد نظر که شامل بررسی عددی خصوصیات پرش هیدرولیکی شامل نیمرخ سطح آب، نسبت عمق ثانویه، طول پرش، طول ناحیه غلطاب، توزیع سرعت و افت انرژی برای پرش‌های تشکیل شده در حوضچه‌هایی با بلوک‌های یکپارچه دوزنقه‌ای قائم است شبیه‌سازی‌هایی صورت گرفت و به تجزیه و تحلیل نتایج و خروجی‌های مختلف به‌دست آمده از اجراهای نرم‌افزار Flow-3D پرداخته شد.

۱-۵- روش تحقیق و موضوعات مورد بررسی در این تحقیق

در این مطالعه پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با استفاده از قابلیت‌های نرم افزار Flow-3D شبیه سازی و نتایج حاصل از آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد.

در فصل دوم به برخی مطالعات انجام شده در زمینه شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای صاف و زبر اشاره خواهد شد. در فصل سوم به معرفی نرم افزار Flow-3D و معادلات حاکم بر آن پرداخته خواهد شد و در ادامه شرح مواد و روش‌ها که شامل ایجاد شبکه حل، تعریف شرایط مرزی، تعریف شرایط اولیه می‌باشد ذکر خواهد شد. فصل چهارم به مقایسه نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی و تحلیل نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی اختصاص دارد.

در نهایت نتایج کلی این تحقیق به همراه پیشنهادهایی برای مطالعات بعدی ارائه می‌گردد.

فصل دوم:

مروری بر تحقیقات گذشته

۲- مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۱- مقدمه

بررسی عددی پرش هیدرولیکی بر روی سطوح صاف توسط محققین زیادی انجام شده است و نتایج حاصل از آن برای تعیین مشخصات پرش هیدرولیکی ارائه شده است. در زمینه پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر نیز مطالعات عددی انجام گرفته است که بررسی‌های عددی اندک بر روی پرش هیدرولیکی ضرورت تحقیقات بیشتر را در این زمینه تاکید می‌نماید.

در فصل حاضر ابتدا مروری بر بررسی‌های عددی انجام شده بر روی سطوح صاف صورت می‌گیرد و سپس به تفصیل به بیان مطالعات عددی انجام شده در رابطه با پرش هیدرولیکی بر روی سطوح زبر با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D پرداخته می‌شود.

۲-۲- مطالعات انجام شده در زمینه شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی

بستر صاف

تاکنون مطالعات عددی بسیاری بر روی تعیین مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی سطوح صاف صورت گرفته که از میان آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- سعیدپناه و همکاران (۲۰۰۱) در معادله‌های جریان‌های متغیر تدریجی، عبارت‌هایی را برای در نظر گرفتن توزیع غیر هیدرواستاتیک فشار اضافه کردند و از حل معادله‌های حاصل به روش تفاضل محدود برای محاسبه

پرش هیدرولیکی در یک کانال ذوزنقه‌ای استفاده نمودند. مقایسه نتایج به دست آمده از حل عددی و نتایج آزمایشگاهی صحت نتایج عددی را به طور قابل قبولی نشان داد.

● گونال و نارایانان^۱ (۱۹۹۸) در یک مدل دو بعدی و با استفاده از مدل تلاطمی $k-\epsilon$ و روش حجم محدود مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق را مورد مطالعه قرار دادند.

● گونزالز و بومباردلی^۲ (۲۰۰۵) در یک شبیه سازی عددی با استفاده از Flow-3D به بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی سطح صاف در دو حالت شبکه بندی ریز و شبکه بندی درشت به صورت دو بعدی و سه بعدی پرداختند.

● صباغ یزدی و همکاران (۲۰۰۷) نیز در یک مدل سه بعدی به ارزیابی مدل های تلاطمی $k-\epsilon$ و RNG بر روی میزان ورود هوا در پرش هیدرولیکی با استفاده از روش حجم محدود پرداختند و اثر آن را بر روی دقت تخمین سرعت متوسط جریان با استفاده از مدل در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی موجود از پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار دادند.

● ژائو و میسرا^۳ (۲۰۰۴) با استفاده از معادلات پیوستگی و مومنتوم و با مدل آشفتگی $k-\epsilon$ به صورت دوبعدی بررسی شد و نتایج آن به صورت پروفیل های سرعت و سطح آب محاسبه مقادیر جنبشی (k) و اتلاف انرژی (ϵ) در مقاطع مختلف پرش ارائه گردید.

¹. Gunal & Narayanan

². Gonzalez & Bombardelli

³. Zho & Misra

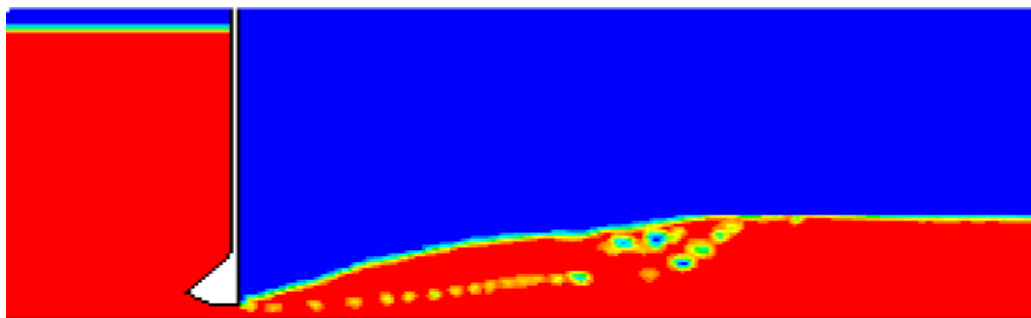
● قارانجیک و چادری^۱ (۱۹۹۱) مدل عددی پرش هیدرولیکی را بررسی نمودند. در این تحقیق برای شبیه‌سازی جریان‌های فوق بحرانی و زیر بحرانی و پرش هیدرولیکی در بستر مستطیلی با شیب کم از معادلات بوزینسک استفاده گردید.

● در بررسی که توسط فرومند و همکاران (۱۳۸۸) انجام شد پرش هیدرولیکی در یک کانال مستطیلی با بستر صاف به کمک نرم‌افزار Fluent شبیه‌سازی گردید. همچنین از مدل آشفتگی RNG در ترکیب با روش VOF برای مدل‌سازی سطح آزاد و ایجاد جریان متلاطم دو فازی آب و هوا استفاده شد. در این مطالعه از نتایج آزمایشگاهی گزارش شده توسط لیو و همکاران (۲۰۰۴) که در یک فلوم مستطیلی افقی به طول ۷/۶ متر، ارتفاع ۰/۶ متر و عرض ۰/۴۶ انجام شده بود استفاده شده است. نتایج حاصل از حل عددی از قبیل پروفیل سطح آب و توزیع عمقی سرعت با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید. نتایج عددی به‌دست آمده انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد.

● عباسپور و آیشم (۱۳۹۰) به شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف با به‌کار بردن نرم‌افزار دینامیک محاسباتی Fluent و با استفاده از مدل‌های آشفتگی RNG k-ε و RSM پرداختند و با نتایج بررسی زیبر (۲۰۱۰) مقایسه کردند. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که مدل‌های آشفتگی RNG k-ε و روش جزء حجم سیال (VOF) برای پیش‌بینی پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف مناسب بوده و با دقت ۲ تا ۷ درصد پروفیل سطح آب شبیه‌سازی گردید. در شکل (۱-۲) پروفیل سطح آزاد آب به‌دست آمده از مدل آشفتگی RNG k-ε و جزء حجم سیال VOF نشان داده شده است. حداکثر سرعت در ابتدا و در ناحیه چرخشی پرش بوده و حداقل سرعت در نزدیکی سطح آب و بستر کانال

¹. Gharangik & Chaudhry

دیده می‌شود. شدت‌های تلاطم طولی، قائم و تنش‌های رینولدزی به‌دست آمده از مدل با داده‌های آزمایشگاهی زیبر و همکاران (۲۰۱۰) تطابق دارند.



شکل ۲-۱- شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد پرش هیدرولیکی با استفاده از روش (VOF) برای عدد فرود ۴ (عباسپور و آیشم، ۱۳۹۰)

۳-۲- مطالعات انجام شده در زمینه شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی

بستر زبر

از آن جا که هزینه قابل ملاحظه‌ای از طراحی سدها به طرح سرریز و حوضچه آرامش آن اختصاص می‌یابد، طراحی بهینه حوضچه آرامش تا کنون بیشتر از طریق مدل‌سازی آزمایشگاهی به‌دست می‌آید، که این موضوع هزینه زیادی را به اعتبارات طرح اضافه می‌نماید. به کارگیری مدل‌های عددی در راستای کاهش هزینه‌ها و شبیه‌سازی جریان در حالت‌های مختلف می‌تواند نقش به‌سزایی ایفا نماید. امروزه مطالعه بر روی پرش هیدرولیکی به عنوان یک چالش همچنان ادامه دارد، از جمله این مطالعات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- آموریم، رودیگوس و مارکوس^۱ (۲۰۱۰) به مطالعه عددی و آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش پرداختند. آن‌ها در یک آزمایش هیدرولیکی، مشخصات مختلف جریان همچون اعماق، سرعت و فشار پیزومتریک را در مقاطع مختلف فلوم برداشت و سپس با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به مطالعه عددی جریان پرداختند و نتایج را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و صحت سنجی نمودند.
- وانگ و لیو^۲ (۲۰۰۰) چهار روش از احجام محدود را بر روی شبکه‌های مثلثی بی‌ساختار مورد بررسی قرار دادند. و مسائلی چون حل دو بعدی آب‌های کم‌عمق، شکست سد به صورت دو بعدی، پرش هیدرولیکی مایل با این چهار روش حل شدند و نتایج حل‌های عددی، سرعت محاسبات و پایداری روش‌های حل با یکدیگر مقایسه شدند.
- یونامی و همکاران^۳ (۲۰۰۰) به بررسی تخمین ضرایب انتقال و پخشیدگی جریان هوادهی شده در پرش هیدرولیکی بر مبنای مسائل کنترل بهینه پرداختند.
- یو و همکاران^۴ (۲۰۰۲) به مطالعه خصوصیات میدان جریان در اطراف سد سویانگ، به صورت عددی پرداختند. در این شبیه‌سازی از نرم‌افزار Flow-3D، برای حل عددی معادلات ناویر استوکس در محیط محاسباتی استفاده شد. مقادیر محاسباتی شامل فشار، مؤلفه‌های سرعت، نرخ جریان و تراز سطح آب می‌باشند که با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی موجود مقایسه گردیدند.
- میسرا و ژائو (۲۰۰۴) پرش هیدرولیکی آشفته را با روش‌های عددی شبیه‌سازی کردند. نتایج مربوط به سرعت افقی با اندازه‌گیری‌های تجربی مقایسه شدند.

¹. Amorim, Rodriques & Marques

². Wang & Liu

³. Unami et al.

⁴. Yoo et. al.

● اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) با در نظر گرفتن زبری بستر، پارامترهای پرش هیدرولیکی را به دست آوردند. بر طبق نتایج به دست آمده، عمق پایاب مورد نیاز برای پرش‌های هیدرولیکی در کف کنگره‌دار در مقایسه با کف صاف کمتر است و در نتیجه طول پرش در این شرایط کمتر از طول پرش در کف صاف است.

● لیو و همکاران^۱ (۲۰۰۴) مطالعاتی بر روی خصوصیات آشفتگی پرش هیدرولیکی انجام دادند. بر طبق نتایج آزمایشات، حداکثر شدت آشفتگی و تنش‌های رینولدز با دور شدن از پنجه پرش به‌طور خطی کاهش پیدا می‌کند. اندازه گردابه‌های تولید شده نیز در انتهای پرش بیشتر می‌شود.

● فرومند (۱۳۸۸) مدل عددی پرش هیدرولیکی را به‌صورت دوبعدی بر روی بستر صاف و موج‌دار بررسی نمود. نتایج حاصل از حل عددی از قبیل پروفیل سطح آب و توزیع عمقی سرعت برای بسترهای صاف و موج‌دار با نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی لیو و همکاران (۲۰۰۴) و ایزدجو و همکاران (۱۳۸۳) مقایسه شد که انطباق خوبی با هم داشته‌اند. طول پرش هیدرولیکی در مدل نیز ۴/۵ درصد با طول پرش اندازه‌گیری شده در مدل فیزیکی اختلاف داشت. در این مطالعه از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG در ترکیب با روش VOF، برای مدل‌سازی سطح آزاد و ایجاد جریان متلاطم دوفازی آب و هوا استفاده شده است که مدل $k-\epsilon$ استاندارد دقت بیشتری نسبت به $k-\epsilon$ RNG نشان داد.

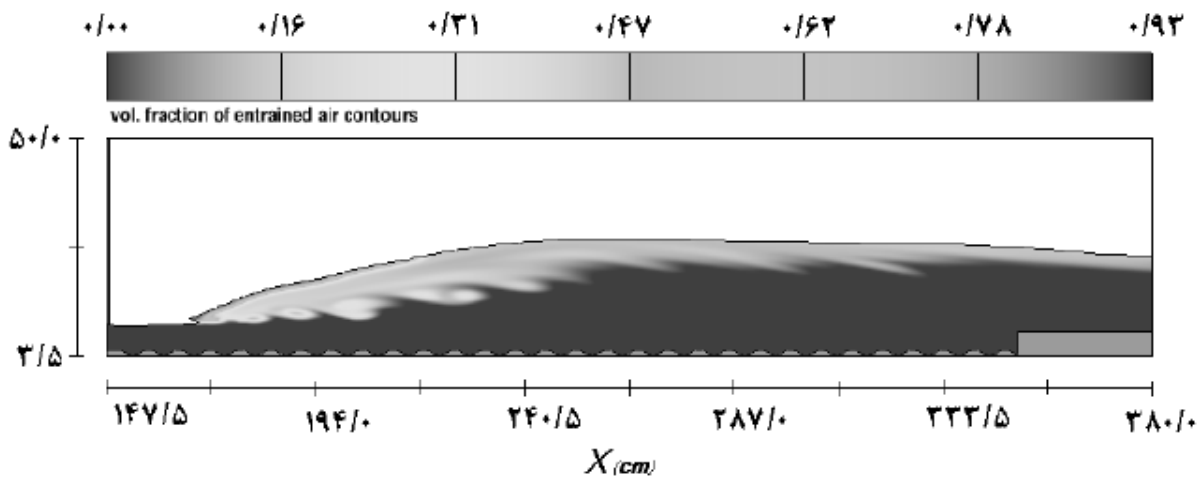
● کریمی و همکاران (۱۳۸۹) مدل‌های آشفتگی مختلف جهت شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در پایین‌دست دریاچه را مقایسه کردند. در قسمت‌های ابتدایی و میانی پرش، مدل $k-\epsilon$ استاندارد نسبت به مدل‌های $k-\epsilon$ ، RNG و RSM برای مقادیر مؤلفه‌های سرعت افقی نتایج بهتری داشته‌اند. اما در نواحی انتهایی پرش مدل‌های $k-\epsilon$ ، RNG و RSM نتایج به نسبت بهتری داشته‌اند.

¹. Liu et al.

● لانگ و همکاران^۱ (۱۹۹۱) به شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی با استفاده از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ پرداختند. ایشان با مقایسه پروفیل سرعت عددی و آزمایشگاهی مشاهده کردند که نتایج در ناحیه جت دیواره‌ای تطابق خوبی دارند، ولی در قسمت ناحیه برگشتی دارای اختلاف می‌باشند. دلیل این امر را پخش عمودی بیش از اندازه‌ای می‌دانند که در مدل عددی اتفاق می‌افتد.

● کاهه و دهقانی (۱۳۹۲) به شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی سطوح موج‌دار پرداختند. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D و به کارگیری روش حجم سیال (VOF) در تحلیل جریان آزاد و مدل‌های تلاطمی $k-\varepsilon$ و RNG $k-\varepsilon$ شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی سطوح موج‌داری با ارتفاع زبری ۱۳ میلی‌متر، فواصل بین زبری ۶۸ میلی‌متر، در اعداد فرود $1/5-3/5$ انجام شد و با نتایج به‌دست آمده از بررسی‌های آزمایشگاهی توسط پژوهش‌گران مختلف مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج توانایی مدل RNG $k-\varepsilon$ را در تخمین عمق ثانویه، طول پرش و توزیع سرعت را به خوبی نشان داد. ضریب تنش برشی برآورد شده به نتایج به‌دست آمده توسط اید و راجاراتنام (۲۰۰۲a)، ایزدجو و شفافی بجمستان (۲۰۰۷)، عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) و عباسپور و همکاران (۲۰۱۰) بسیار نزدیک بوده و به طور متوسط ۸ برابر مقدار آن در پرش هیدرولیکی بر روی سطوح صاف است. شکل (۲-۲) نمونه‌ای از مدل شبیه‌سازی شده پرش هیدرولیکی بر روی سطح موج‌دار را نشان می‌دهد.

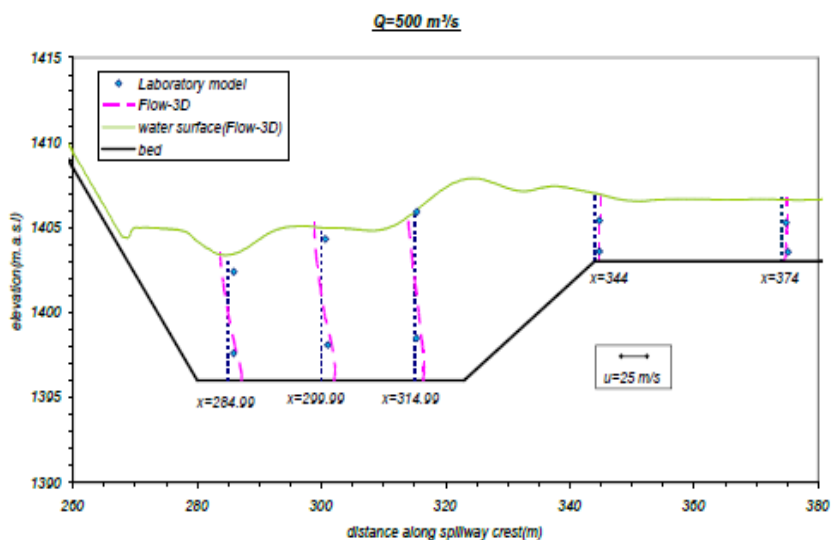
¹. Long et al.



شکل ۲-۲- پرش هیدرولیکی بر روی سطوح موج‌دار (سانتی‌متر ثانیه بر متر) $q = 0/14$ ، $y_1 = 5/32$ (سانتی‌متر) (کاهه و دهقانی، ۱۳۹۲)

● صباغ یزدی و همکاران (۱۳۸۷) به بررسی عددی جریان در حوضچه آرامش پرش هیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D و روش VOF پرداختند. برای شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی از نتایج آزمایشگاهی (H. Chanson and T. Brattberg (۲۰۰۰) استفاده شد. این آزمایش در یک فلوم شیشه‌ای به طول ۳/۲ متر، عرض ۰/۲۵ متر و با دیواره‌هایی به ارتفاع ۰/۳ متر انجام شد. آزمایشات برای دو عدد فرود $6/33$ و $8/48$ تکرار شد. به منظور کاربرد نرم‌افزار در یک نمونه آزمایشگاهی، از نتایج مربوط به مدل آزمایشگاهی حوضچه آرامش سرریز سد نازلو چای استفاده گردید. با توجه به پروفیل‌های سطح آب مشاهده شد که نرم افزار نتایج خوبی را در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها، پیش‌بینی کرده است، مخصوصاً تراز سطح آب بعد از حوضچه، تطابق خوبی با مقادیر آزمایشگاهی داشت. در شکل (۲-۳) مقادیر سرعت افقی در حوضچه ارائه شده است. انتظار می‌رود به علت چرخش جریان در این ناحیه، سرعت افقی در حوضچه و در نزدیکی سطح آب دارای

مقادیر منفی باشند. توزیع عمقی سرعت افقی جریان در حوضچه آرامش که توسط نرم‌افزار محاسبه گردیده است، به خوبی این مطلب را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳- پروفیل سرعت افقی برای آبگذری ۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه در محور حوضچه (صباغ یزدی، ۱۳۸۷)

● سارکر و رودز^۱ (۲۰۰۲) با شبیه‌سازی عددی، و همچنین انجام آزمایش‌هایی، پرش هیدرولیکی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از شبیه‌سازی RNG k-ε به همراه روش حجم سیال برای شبیه‌سازی سطح آزاد استفاده کردند. بین شبیه‌سازی عددی دو بعدی و نتایج آزمایشگاهی آن‌ها تطابق مناسبی وجود داشت.

¹. Sarker & Rhodes

● رومنگنولی و همکاران^۱ (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 دوبعدی شبیه‌سازی نمودند. در روند شبیه‌سازی از روش VOF برای مدل‌سازی سطح آب و مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده نمودند. پروفیل سطح آب و پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده مطابقت خوبی با یکدیگر داشتند.

● نصر اصفهانی و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی عددی و آزمایشگاهی پرش آبی نوع B در حوضچه آرامش با پله ناگهانی و بستر زیر با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D و به کارگیری مدل $k-\varepsilon$ RNG پرداختند. الگوی کلی شبیه به کار رفته در این تحقیق براساس نمونه فیزیکی ساخته شده به وسیله نصر اصفهانی و شفافی بجستان (۱۳۹۱) می‌باشد. در اعداد فرود کمتر از ۳، پرش تشکیل شده در نمونه فیزیکی از نوع موجی مشاهده شد، در نمونه شبیه‌سازی شده نیز همین پرش در محدوده عدد فرود کمتر از ۳ تشکیل گردید. درصد کاهش نسبت اعماق متناظر در نمونه فیزیکی ۱/۳٪ و در شبیه ریاضی ۴/۵٪ به دست آمد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی شبیه تلاطمی $k-\varepsilon$ RNG در تعیین نیمرخ‌های سرعت در طول پرش آبی در مقایسه با نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی بسیار نزدیک بود. ضریب تنش برشی برآورد شده به نتایج به دست آمده آزمایشگاهی بسیار نزدیک بود. تا قبل از عدد فرود ۵، مقادیر ε کمتر از پرش کلاسیک به دست آمده، و در مقادیر عدد فرود اولیه بیشتر از ۵، این مقدار افزایش یافته است.

● در مطالعه‌ای که توسط آسمانی و صالحی نیشابوری (۱۳۹۰) انجام شد پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش سد Pit6 با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D شبیه‌سازی شد، همچنین نیروی درگ وارد بر بلوک آرام کننده در حوضچه آرامش اندازه‌گیری شد. در این مطالعه از روش VOF برای تعیین پروفیل سطح آزاد جریان و نیز مدل آشفتگی RNG موجود در نرم‌افزار استفاده شد. به منظور صحت‌سنجی مدل عددی در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی و پیش‌بینی نیروی درگ وارد بر بلوک‌های آرام کننده از نتایج آزمایش‌های

¹. Romangnoli et al.

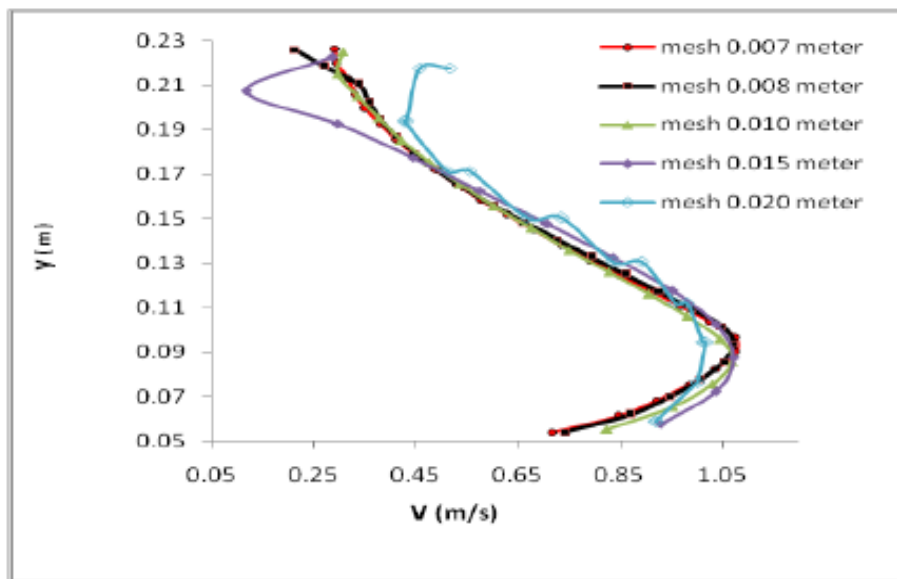
Tatsuaki Nakato که مقاله آن در سال ۲۰۰۰ چاپ شده است، استفاده گردید. نرم افزار Flow-3D توانایی بالایی در مدل کردن جریان‌های چرخشی در اطراف بلوک و نیز آشفتگی‌های موجود در پرش هیدرولیکی را نیز دارد. همچنین فشار در نواحی‌ای که جریان گردابه‌ای وجود دارد و در ناحیه اتصال مجدد در پشت بلوک آرام کننده، حداقل می‌باشد. پروفیل سطح آب برای دبی‌های ذکر شده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. بیشترین خطا بین مقادیر عددی و آزمایشگاهی در قسمت پایین دست برای دبی ۱۴۱۶ متر مکعب بر ثانیه در حدود ۱۸٪ مشاهده شد. همچنین نیروی درگ وارد بر بلوک‌های آرام کننده در حوضچه آرامش با افزایش دبی و یا به عبارتی با کاهش عدد فرود افزایش می‌یابد.

● جانسون و براتبرگ^۱ (۲۰۰۰) آزمایشات جدیدی را بر روی لایه برشی در حال توسعه در پرش هیدرولیکی با جریان ورودی نیمه توسعه یافته انجام دادند. در این آزمایشات توزیع غلظت هوا، سرعت متوسط جریان آب - هوا و فرکانس حباب‌های هوا اندازه‌گیری شدند. پروفیل سرعت در این آزمایشات شباهت زیادی به پروفیل سرعت جت مماسی داشت، همچنین رابطه بین میزان هوا و فرکانس‌های حباب‌های هوا به شکل سهمی بود.

● حسینی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از قابلیت‌های نرم افزار Flow-3D با مدل‌سازی سه بعدی یک فلوم آزمایشگاهی، پرش هیدرولیکی را در محدوده اعداد فرود پایین (۱/۷ الی ۳) شبیه‌سازی و پارامترهای هیدرولیکی را با استفاده از سه مدل آشفتگی RNG، k-ε و LES توسط این نرم افزار محاسبه نمودند. در این تحقیق از مدل آزمایشگاهی آقای لیو و همکاران (۲۰۰۴) استفاده شد. مدل یک فلوم آزمایشگاهی مستطیلی شکل به طول ۷/۶ متر، عرض ۰/۴۶ متر و ارتفاع دیواره ها ۰/۶ متر بوده است. در این تحقیق برای سه مدل آشفتگی، ۵ مدل مش شبیه‌سازی شد. مدل برای سه شیب ۵٪، صفر و ۳٪- به برنامه

¹. Chanson & Brattberg

معرفی گردید. همانطور که در نمودار شکل (۲-۴) مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سلول‌ها، مقادیر تغییرات سرعت نسبت به عمق در حالات مش مختلف با افزایش تعداد سلول‌ها تغییر پیدا نموده و روند نمودارها به یکدیگر نزدیکتر می‌شوند. نتایج نشان داد که در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در یک کانال مستطیلی و در حالت مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$, RNG, LES مقادیر خطا در پارامترهایی همچون عمق ثانویه و عدد فرود اولیه و ثانویه، آنچنان متفاوت نیست اما به طور کلی می‌توان گفت که مدل آشفتگی LES در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی و ارائه نتایج نزدیک به واقعیت از مقدار خطای کمتری نسبت به دو مدل دیگر برخوردار می‌باشد.



شکل ۲-۴- نمودار مقایسه تغییرات سرعت به عمق با تغییر ابعاد و تعداد مش (حسینی، ۱۳۹۲)

● هوشمندزاده (۱۳۸۷) به برآورد طول پرش هیدرولیکی و تعیین نیمرخ سطح آب با استفاده از تئوری ورود هوا به درون پرش هیدرولیکی و مدل سازی عددی آن با استفاده از مدل $k-\varepsilon$ پرداخت. آزمایشات در یک فلوم آزمایشگاهی با مقطع مستطیل شکل با عرض ۰/۴۶ متر، عمق ۰/۶ متر و طول ۷/۶ انجام گردید.

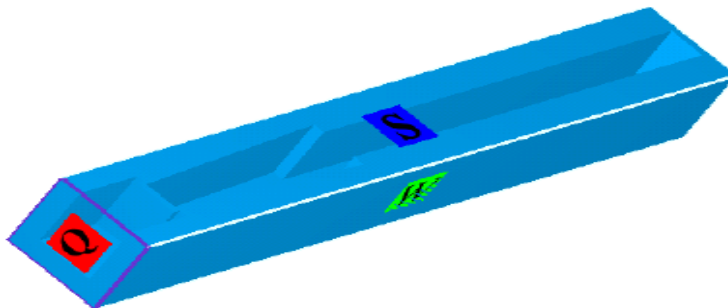
آزمایشات برای سه عدد فرود مختلف ۲، ۲/۵ و ۳/۳۲ انجام شد. در این تحقیق از شرایط اولیه و مرزی به کار رفته توسط لیو و همکاران (۲۰۰۴) برای عدد فرود معادل ۲ استفاده گردید. در این تحقیق نتایج مدل سازی دو بعدی با مقادیر به دست آمده در آزمایشگاه مقایسه شدند. مقدار طول پرش هیدرولیکی تخمین زده شده برابر ۳/۵ فوت بوده که تفاوت قابل ملاحظه‌ای با ۳/۷ فوت به دست آمده به وسیله لیو و همکاران ندارد. نیمرخ‌های سرعت به دست آمده در نقاط مختلف پرش هیدرولیکی با مشاهدات لیو و همکاران دارای تطابق رضایت بخشی بود. مقدار متوسط هوای وارد شده به درون پرش هیدرولیکی برابر ۱۰٪ بود. نیمرخ عمودی توزیع غلظت هوا مشابه نیمرخ به دست آمده توسط جانسون و براتبرگ (۲۰۰۰) بود. نیمرخ سطح آب به دست آمده از شبیه‌سازی عددی به نتایج آزمایشگاهی و نمودارهای به دست آمده توسط هاگر شباهت بسیار زیادی داشت.

● عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار را با استفاده از مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ 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 روش VOF جهت برآورد پروفیل سطح آب بود و خطای مدل برای تعیین پروفیل سطح آب بین ۱ تا ۸/۶ درصد گزارش شد.

● دانش‌فراز و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی تغییرات اعداد فرود و زاویه واگرایی بر خصوصیات پرش-هیدرولیکی در حوضچه آرامش واگرا با استفاده از مدل Flow-3D بر اساس داده‌های آزمایشگاهی پرداختند. این تحقیق با توجه به داده‌ها و اطلاعات اولیه مدل‌های عددی و آزمایشگاهی گرد نوشهری و همکاران (۱۳۸۸) و یانگ و همکاران^۱ (۲۰۰۵) و سایر تحقیقات مشابه پایه‌گذاری شده است و نتایج به دست آمده با نتایج تحقیقات مذکور مورد مقایسه قرار گرفت. مدل آزمایشگاهی یک کانال مستطیلی به عرض ۰/۵

^۱. Wang et al.

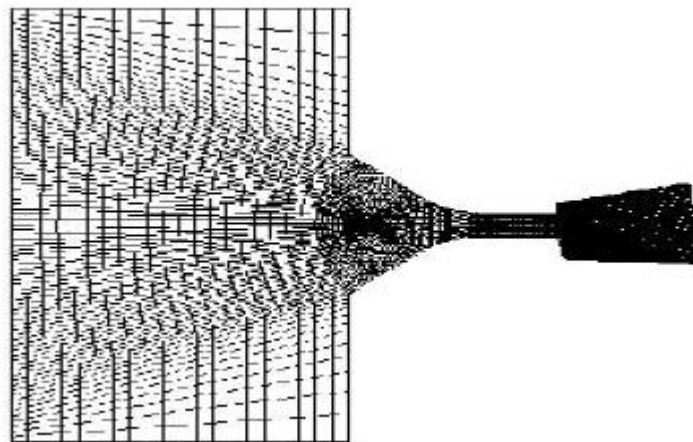
متر، عمق ۰/۶ متر و طول ۹ متر می‌باشد. در این مطالعه زوایای واگرایی دیواره جانبی حوضچه آرامش نسبت به محور مرکزی کانال، ۰، ۳ و ۹ درجه انتخاب شدند. از مدل آشفتگی k-ε، برای شبیه‌سازی جریان‌های متلاطم استفاده شد. شکل (۲-۵) نمایی از هندسه مدل را نشان می‌دهد. افت نسبی پرش، در مقطع با واگرایی دیواره ۹ درجه نسبت به پرش هیدرولیکی با زاویه واگرایی ۳ درجه افزایش یافت و در عین حال طول پرش نیز در پرش مستقیم و زوایای واگرایی کمتر، بیشتر از پرش در مقطع با واگرایی دیواره ۹ درجه بود. نسبت عمق ثانویه به اولیه با افزایش عدد فرود به صورت خطی افزایش یافت. همچنین با افزایش زاویه واگرایی شیب این خطوط کاهش یافت. به طور کلی، مدل آشفتگی k-ε به منظور شبیه‌سازی آشفتگی جریان و پرش هیدرولیکی تشکیل شده در حوضچه‌های واگرا و مستقیم، از دقت خوبی برخوردار است.



شکل ۲-۵- نمایش هندسه مدل با شرایط مرزی در Flow-3D (دانش‌فراز، ۱۳۹۲)

- شجاعیان و کاشفی‌پور (۱۳۹۲) به شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش سد مخزنی نمود پرداختند. در شبیه‌سازی جریان در حوضچه آرامش از مدل آشفتگی RNG استفاده شد. شکل (۲-۶) شبکه‌بندی صورت گرفته برای سرریز و حوضچه آرامش توسط نرم‌افزار Gambit را نشان می‌دهد. با توجه به تغییرات عمق جریان در پرش هیدرولیکی برای عمق پایاب ثابت در مدل آزمایشگاهی و نرم‌افزار

برای سیلاب‌های ۱۰۰۰۰ ساله و PMF مشخص شد که نرم‌افزار نتایج خوبی را در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها در مدل آزمایشگاهی، پیش‌بینی کرده است. به‌خصوص تراز سطح آب بعد از پرش هیدرولیکی تطابق خوبی با مقادیر آزمایشگاهی دارد. روند تغییرات فشار در کف حوضچه آرامش در یک عمق پایاب ثابت، توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی و با مقادیر مدل آزمایشگاهی مقایسه شد. فشار در اطراف موانع ابتدایی و انتهای حوضچه دارای مقدار بالایی است که این پدیده به علت برخورد جریان با این موانع به‌وجود می‌آید. نرم‌افزار توزیع عمقی سرعت جریان را در مقایسه با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی به‌خوبی محاسبه کرده است.

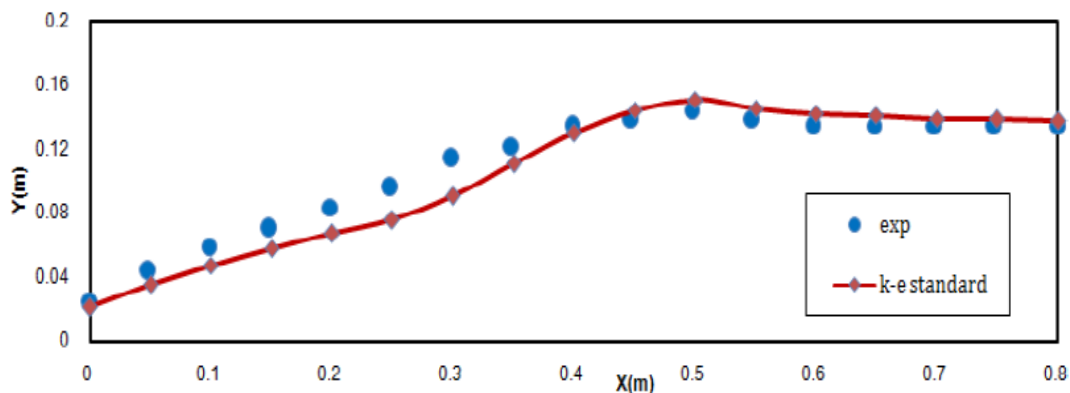


شکل ۲-۶- شبکه‌بندی محدوده محاسباتی برای سرریز و حوضچه آرامش توسط نرم‌افزار Gambit (شجاعیان و کاشفی‌پور،

۱۳۹۲)

● حیدری فهونده و همکاران (۱۳۹۲) به شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای موج‌دار مثلثی شکل با استفاده از نرم‌افزار دینامیک محاسباتی Fluent و به‌کارگیری مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۷/۵ پرداختند. در این تحقیق، از نتایج آزمایشگاهی گزارش شده توسط السبایه

و شبایک^۱ (۲۰۱۰) در دانشگاه قاهره استفاده شده است. این آزمایش‌ها در یک فلوم مستطیلی به عرض ۰/۲۹۵ متر، ارتفاع ۰/۳۲ متر و طول ۹ متر انجام گرفته است. آزمایش‌ها در فلوم مستطیلی افقی با بستر موج‌دار مثلثی شکل و با ارتفاع موج‌های (t) ۱۸ میلی‌متر و طول موج (S) ۶۵ میلی‌متر انجام شد. مدل آشفتگی k-ε استاندارد و روش جزء حجم سیال (VOF) برای پیش‌بینی پروفیل‌های سطح آب در پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار مثلثی شکل مناسب بوده و با دقت حدودی ۳ تا ۷ درصد پروفیل سطح آب، شبیه‌سازی گردید. نمونه‌ای از مقایسه پروفیل‌های سطح آزاد آب با داده‌های تجربی السبایه و شبایک (۲۰۱۰) در شکل (۷-۲) نشان داده شده است. زبری‌های مثلثی شکل می‌توانند باعث کاهش عمق پایاب مورد نیاز برای ایجاد پرش در مقایسه با پرش کلاسیک به مقدار حدودی ۲۸/۳ تا ۳۸/۳ درصد و به‌طور میانگین ۳۴/۸ درصد گردند.



شکل ۷-۲- مقایسه پروفیل‌های سطح آب به‌دست آمده از مدل آشفتگی k-ε استاندارد و داده‌های تجربی در عدد فرود ۶/۴

(حیدری فهونده، ۱۳۹۲)

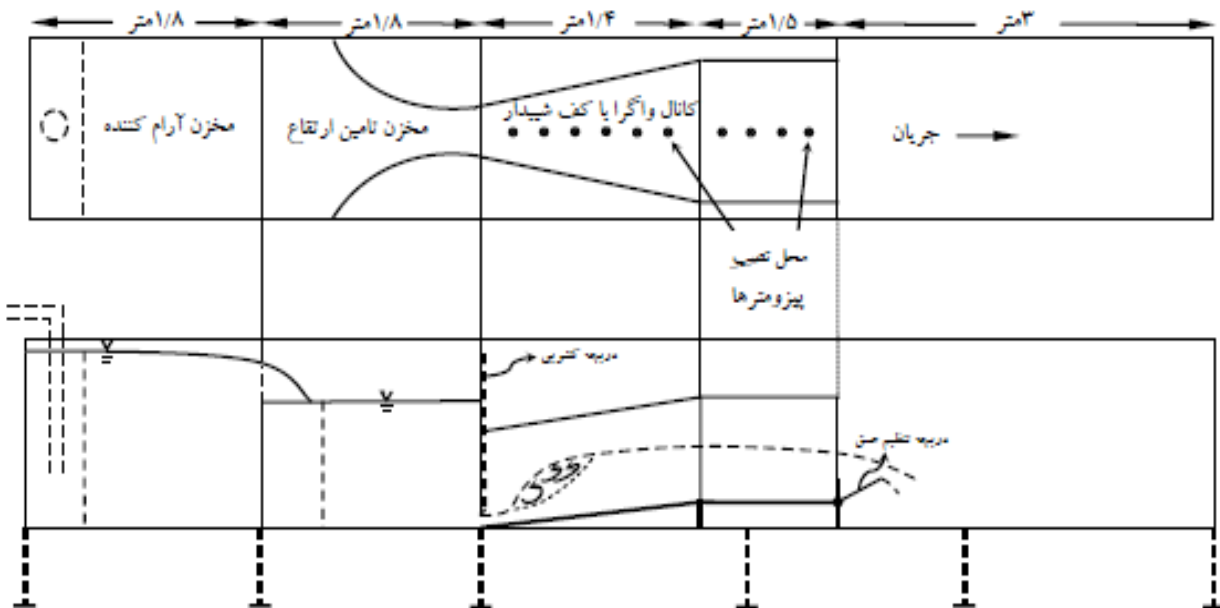
¹. Elsebaie & Shabayek

● آصفی و ضیائی (۱۳۹۰) به شبیه‌سازی پرش بر روی سطح شیب‌دار معکوس با پله با استفاده از نرم افزار Fluent و به‌کارگیری مدل $k-\epsilon$ استاندارد پرداختند. آزمایشات در فلوام مستطیلی به طول ۴/۴ متر، ارتفاع ۰/۲ متر و عرض ۷/۵ سانتیمتر انجام شد. پروفیل سطح آب استخراج شده از مدل در محدوده پرش دارای تطابق نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشگاهی بود. طول پرش اندازه‌گیری شده در مدل ۲۲ سانتیمتر می‌باشد که با مقدار ۲۰ سانتیمتر اندازه‌گیری شده در مدل فیزیکی مطابقت خوبی داشت. پروفیل توزیع انرژی جنبشی اغتشاشی در عمق آب در سه مقطع در طول پرش برداشت شد و مشاهده شد که پله باعث کاهش ۵۰ درصد این انرژی نسبت به حالت بدون پله آن می‌شود.

● عباسپور و همکاران (۱۳۸۹) به شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار با مدل Fluent پرداختند. در این تحقیق از داده‌های تجربی اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) استفاده شد. آزمایش‌ها در یک فلوام مستطیلی به عرض ۰/۴۴۶ متر، ارتفاع ۰/۶ متر و طول ۷/۶ متر انجام گرفته است. بسترهای موج‌دار با ارتفاع موج‌های (t) ۱۳ و ۲۲ و طول موج (s) ۶۸ میلی‌متر ساخته شد. نتایج نشان داد که مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ و روش جز حجم سیال VOF برای پیش‌بینی پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار مناسب بوده و خطای نسبی متوسط مقادیر سطح آب به‌دست آمده از مدل‌های عددی و اندازه‌گیری شده ۲ تا ۷ درصد است. بررسی تشابه پروفیل‌های سرعت در فواصل مختلف پرش هیدرولیکی نشان داد توزیع سرعت در آزمون‌های مختلف یکسان بوده و نتایج به‌دست آمده از مدل‌های عددی و داده‌های تجربی اید و راجاراتنام تطابق خوبی دارد.

● صاحبی و همکاران (۱۳۹۱) به شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی و اگر به‌صورت سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار Fluent و با به‌کارگیری مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و RNG و روش VOF پرداختند. برای مطالعه آزمایشگاهی مشخصات پرش هیدرولیکی در مقاطع و اگر از نتایج مدل آزمایشگاهی ساخته شده توسط کاسی و همکاران استفاده شد. طرح کلی کانال آزمایشگاهی در شکل (۲-۲)

۸) نمایش داده شده است. بررسی‌های انجام شده نشان داد که روش جزء حجم سیال (VOF) برای پیش‌بینی پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا مناسب می‌باشند. مدل عددی قادر است پروفیل سطح آب را با دقت ۷ درصد شبیه‌سازی نماید. با توجه به نتایج مدل آشفتگی RNG $k-\epsilon$ ، پروفیل‌های سرعت را نسبت به مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد بهتر شبیه‌سازی نموده است. مدل استاندارد مقادیر حداکثر سرعت در مقاطع پرش را نسبت به مدل RNG بهتر ارائه نموده است به طوری که میانگین خطای نسبی مقادیر حداکثر سرعت به دست آمده از مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و RNG در مدل‌ها به ترتیب برابر $1/9$ و $3/2$ درصد محاسبه شد.



شکل ۲-۸- طرح کلی کانال آزمایشگاهی (صاحبی، ۱۳۹۱)

- در بررسی که توسط کریمی و همکاران (۱۳۹۰) انجام شد، نتایج شبیه‌سازی دو بعدی پدیده پرش هیدرولیکی در زیر دریچه با استفاده از نرم‌افزار Fluent و روش‌های جریان چند فازی Mixture و VOF

و مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد، RNG $k-\epsilon$ و تنش رینولدز (RSM) ارائه شده است. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی سوندسن و همکاران¹ (۲۰۰۲) مقایسه شد. به‌طور کلی نتایج به‌دست آمده از مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد، RNG $k-\epsilon$ و تنش رینولدز (RSM) در هر دو روش Mixture و VOF تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی سوندسن و همکاران (۲۰۰۲) داشت. نتایج روش‌های VOF و Mixture در توزیع سرعت تقریباً یکسان مشاهده شد، ولی روش VOF پروفیل مناسب‌تری از سطح آب ارائه داد.

● معینی و بنکداری (۱۳۹۳) به شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی همراه با سطح شیبدار معکوس با پله منفی در انتهای شیب و محل وقوع آن با استفاده از نرم‌افزار Fluent پرداختند. آزمایش‌ها در یک فلوم مستطیلی افقی با عرض ۷/۵ سانتیمتر، طول ۴/۴ متر و ارتفاع ۰/۲ انجام شده است. حوضچه آرامش به شیب ۰/۱ و طول ۰/۴۵ متر و یک پله منفی به ارتفاع ۱۲/۵ میلیمتر که در انتهای آن قرار دارد می‌باشد. در حالت اعمال سرعت ورودی یکنواخت، پرش به بالادست کانال منتقل، طول پرش کمتر و نیز سرعت در آن کمتر شد. در مدل $k-\epsilon$ استاندارد نسبت به مدل (RNG) $k-\epsilon$ طول پرش، سرعت جریان و در نتیجه انرژی پرش کمتر شد. دو مدل حجم سیال و طرح اختلاط در شبیه‌سازی روند تشکیل پرش هیدرولیکی تقریباً شبیه هم عمل نمودند اما مقادیر به‌دست آمده تراز سطح آب از آن دو با یکدیگر اختلاف داشت و روش حجم سیال در تطابق مناسب‌تری با نتایج آزمایشگاهی بود.

● قبادیان (۱۳۹۰) به شبیه‌سازی آزمایشگاهی و عددی جریان عبوری از سرریز جانبی در شرایط وجود پرش هیدرولیکی پرداخت. به‌منظور ارزیابی و واسنجی مدل در شرایط وقوع پرش هیدرولیکی از نتایج اندازه‌گیری آزمایشگاهی استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد در صورت در نظر گرفتن ضرایب تخلیه مناسب برای شرایط قبل از پرش، محدوده پرش و بعد از پرش هیدرولیکی و همچنین طول مناسب پرش

¹. Svendsen et al.

هیدرولیکی می‌توان پروفیل سطح آب اندازه‌گیری شده را با دقت بالایی پیش‌بینی نمود. همچنین شرط همگرایی معادلات تأثیر بسیار قابل ملاحظه‌ای بر روی نتایج به‌خصوص نقطه شروع پرش هیدرولیکی دارد.

با توجه به این‌که مطالعات عددی که جهت بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی صورت گرفته است محدود می‌باشد و همچنین مطالعات عددی کمتری با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D صورت گرفته است، در این تحقیق از مدل Flow-3D برای شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی بر روی سطوح زبر استفاده شده است. از طرفی، جهت بررسی شکل جدیدی از زبری‌ها بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی، از زبری‌های ذوزنقه‌ای قائم استفاده شده است و تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر مشخصات پرش هیدرولیکی از جمله پروفیل سطح آب، عمق ثانویه، طول پرش هیدرولیکی، طول ناحیه غلطاب، پروفیل سرعت و افت انرژی بررسی می‌گردد. همچنین برای بررسی دقت نرم‌افزار Flow-3D در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی، مقایسه‌ای بین نتایج عددی و آزمایشگاهی صورت می‌گیرد.

فصل سوم:

مواد و روش‌ها

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- مقدمه

در این بخش ابتدا مدل آزمایشگاهی که در این تحقیق از نتایج آن استفاده شده است، تشریح می‌گردد، سپس به معرفی نرم‌افزار Flow-3D پرداخته می‌شود و در ادامه حالت‌های مختلف آزمایش ارائه شده و در انتها به نحوه تولید شبکه محاسباتی و حل معادلات جریان در این شبکه‌ها در نرم‌افزار Flow-3D پرداخته می‌شود. همچنین شرایط مرزی و هندسه زبری‌های بستر استفاده شده مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۳-۲- مدل آزمایشگاهی

جهت صحت سنجی مدل عددی و شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر و پیش‌بینی مشخصات پرش هیدرولیکی از داده‌های آزمایشگاهی (راور و همکاران، ۱۳۸۹) که در آزمایشگاه هیدرولیک گروه آبیاری و آبادانی دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی دانشگاه تهران انجام گردیده است، استفاده شد. در این آزمایش از کانال فلزی مستطیلی با دیواره‌های شیشه‌ای به طول ۱۲ متر، عرض ۰/۲۵ متر و ارتفاع ۰/۵ متر استفاده شده بود. شکل (۳-۱) نمایی از کانال آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

سامانه تأمین آب شامل یک مخزن اصلی مجهز به یک دستگاه پمپ شعاعی و یک مخزن هوایی است. نقش مخزن هوایی تأمین هد ثابت است که این امر توسط سرریزی که درون آن تعبیه شده بود انجام گرفت. این سرریز آب اضافی پمپ شده به مخزن هوایی را دوباره به مخزن اصلی برمی‌گرداند و بدین ترتیب دبی جریان در سامانه ثابت می‌ماند. جریان پس از عبور از کانال آزمایشگاهی به سمت یک سرریز لبه تیز مستطیلی هدایت می‌شد که اندازه‌گیری دبی توسط این سرریز صورت می‌گرفت. در نهایت آب موجود در کانال به سمت مخزن اصلی هدایت می‌شد.



شکل ۳-۱- نمای کلی از کانال آزمایشگاهی (راور و همکاران، ۱۳۸۹)

جهت اندازه‌گیری دبی جریان از یک سرریز لبه تیز مستطیلی به طول $0/8$ متر در پایین دست کانال استفاده شد. برای اندازه‌گیری ارتفاع آب بالای تاج سرریز از یک لیمنیتر الکتریکی استفاده شد.

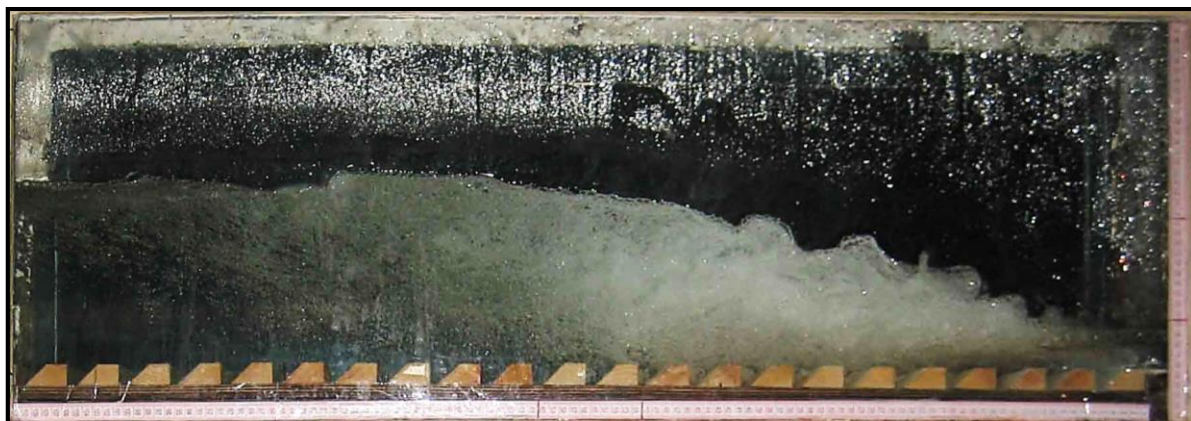
در طول آزمایش‌ها فاصله ابتدای پرش آبی مطابق با شروع بستر زبر و در فاصله 17 سانتی‌متری از دریچه بالادست تثبیت شد.

در هر آزمون پس از تثبیت دبی و سطح آب پشت دریچه، ارتفاع آب درون مخزن تأمین فشار توسط پیزومتر منصوب در کنار مخزن قرائت شد. علاوه بر آن با عکس‌برداری مستقیم از پیزومترها، توسط یک دوربین نصب شده در مقابل مخزن و رقومی کردن تصاویر به وسیله نرم‌افزار گرافر 17 ، صحت قرائت‌ها کنترل شد.

¹. Grapher7

برای اندازه‌گیری عمق اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی در کانال از یک عمق سنج^۱ با دقت $\pm 0/1$ میلیمتر استفاده شد.

برای ثبت پروفیل سطح آب در طول پرش هیدرولیکی با استفاده از یک دوربین دیجیتال از نیمرخ طولی پرش آبی به صورت مستقیم عکس‌برداری شد طوری که فاصله و زاویه دوربین نسبت به کانال در کلیه آزمایش‌ها ثابت باشد. سپس عکس‌های به دست آمده توسط نرم‌افزار گرافر ۷ رقومی گردید. نمونه‌ای از تصاویر ثبت شده برای رسم پروفیل سطح آب در شکل (۲-۳) قابل ملاحظه است.



شکل ۲-۳- نمونه‌ای از تصاویر ثبت شده از پرش هیدرولیکی برای رسم پروفیل سطح آب (راور و همکاران، ۱۳۸۹)

برای اندازه‌گیری طول پرش آبی و طول غلطاب از یک نوار متری منصوب در بدنه کانال استفاده شد به طوری که صفر آن در ابتدای بستر زبر (ابتدای جهش هیدرولیکی) قرار داشت. طول پرش هیدرولیکی برابر با فاصله شروع پرش تا نقطه‌ای از سطح آب در نظر گرفته شد که تلاطم سطح آب محو می‌گردد. علاوه بر اندازه‌گیری

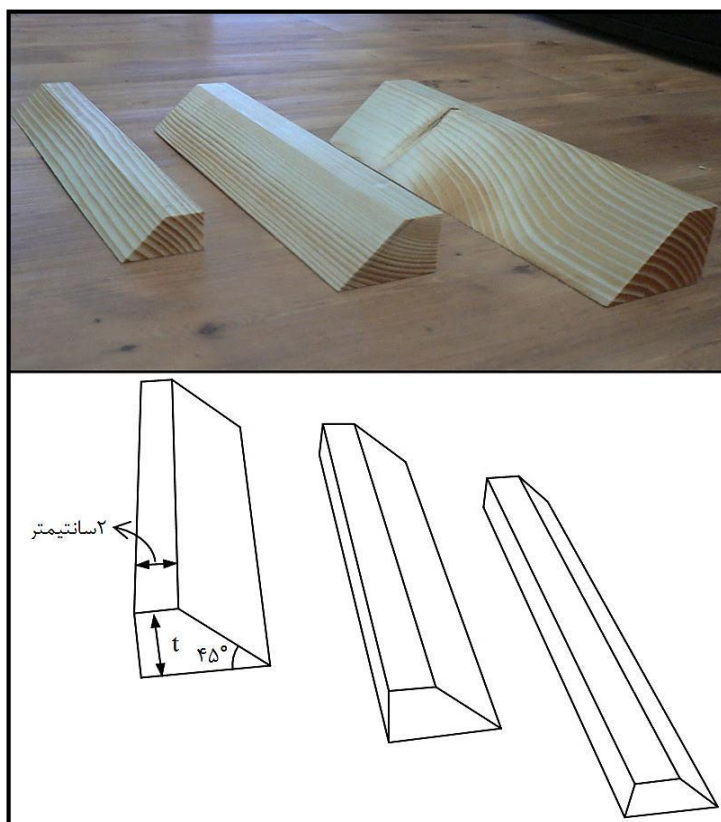
¹. Point Gage

مستقیم، از پروفیل‌های ثابت شده توسط عکس برداری نیز برای تعیین طول پرش استفاده شد که نتایج این دو روش تقریباً بر هم منطبق بود.

طول غلطاب نیز از ابتدای پرش تا نقطه‌ای در نزدیکی سطح آب در نظر گرفته شد که در آن نقطه گردابه‌های ایجاد شده پایان می‌یابند. برای تشخیص محل اتمام گردابه‌ها یک نوار پارچه‌ای از انتهای پایین دست پرش به سمت بالادست بر روی سطح آب حرکت داده شد و نقطه‌ای که در آن جهت نوار توسط نیروی گردابه‌ها تغییر کرد به عنوان پایان منطقه غلطاب در نظر گرفته شد.

در این تحقیق با توجه به شرایط موجود، برای کنترل پرش در مدل آزمایشگاهی یک دریچه کرکره‌ای در انتهای پایین دست کانال نصب شد به گونه‌ای که با تنظیم دریچه امکان تثبیت پرش در فاصله ۱۷ سانتی-متری از دریچه بالادست فراهم گردد.

زبری‌های مورد نیاز از جنس چوب به عرض ۲۵ سانتی‌متر و با مقطع دوزنقه‌ای قائم و زاویه رأس ۴۵ درجه با پهنای تاج ثابت ۲ سانتی‌متر در سه ارتفاع (سانتی‌متر ۴ و ۳ و ۲) ساخته شدند (شکل ۳-۳).



شکل ۳-۳- زبری‌های دوزنقه‌ای با ارتفاع ۲ و ۳ و ۴ سانتی‌متر (راور و همکاران، ۱۳۸۹)

برای مقاوم‌سازی زبری‌ها در برابر آب، سطح مدل‌های چوبی توسط مواد رنگی پوشانده شد به طوری که امکان نفوذ آب و تغییر شکل مدل‌ها از بین برود.

جهت ساخت بسترهای زبر با فاصله زبری‌های مختلف (S)، زبری‌های دوزنقه‌ای ساخته شده با فاصله معین به وسیله پیچ بر روی ورقه‌های چوبی (کف کاذب) نصب شدند (شکل ۳-۴). برای تعیین فاصله بین زبری‌ها در هر ارتفاع، چهار نسبت برای S/t به دست آمد (۲ و $1/5$ و $1/5$ و $0/5$). عرض کف کاذب معادل عرض کانال مستطیلی و برابر با ۲۵ سانتی‌متر و طول بسترهای زبر ایجاد شده برابر با $1/68$ متر در نظر گرفته شد.

کف‌های زبر طوری در کانال تثبیت شدند که تاج زبری‌ها هم‌تراز با سطح بستر بالادست و پایین‌دست قرار گیرد. این امر علاوه بر اینکه از اغتشاش جریان در هنگام ورود از مخزن به طرف دریچه جلوگیری می‌کند، باعث می‌شود فرورفتگی‌های ایجاد شده در کف بستر، مجموعه‌ای از جریان‌های گردابی را ایجاد کنند و تنش برشی کف افزایش یابد.



شکل ۳-۴- نمونه‌ای از کف زبر نصب شده در کانال (راور و همکاران، ۱۳۸۹)

۳-۳- معرفی نرم‌افزار Flow-3D

مطالعه تجربی پدیده‌های موجود در زمینه سیالات، اطلاعات دقیق و با ارزشی در مورد این پدیده‌ها در اختیار محققین می‌گذارد ولی به دلیل محدودیت در تجهیزات، زمان و هزینه و همچنین عدم تشابه کامل بین جریان در مدل‌های فیزیکی و جریان طبیعی، این نوع مطالعه در اغلب موارد راه حل خوبی نیست. امروزه، استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی در مطالعه محیط سیال رشد و توسعه یافته‌اند و به دلیل تولید نتایج قابل اطمینان، توانسته‌اند جایگزین خوبی برای مدل‌های فیزیکی باشند.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) علمی است که به مطالعه عددی پدیده‌های موجود در زمینه سیالات می‌پردازد. شاید بتوان ادعا کرد که پیدایش رایانه‌ها، با کاهش هزینه‌های محاسباتی استفاده از روش‌های عددی، تأثیر زیادی در پیشرفت این علم داشته و باعث شده است روز به روز بر تعداد روش‌های حل عددی و مدل‌های توسعه داده شده بر مبنای این روش‌ها افزوده شود.

مدل‌های ریاضی شبیه‌سازی جریان سیال که مبتنی بر CFD هستند در مقایسه با روش‌های تجربی دارای چند مزیت عمده هستند. چند نمونه از این مزایا عبارتند از:

- کاهش اساسی در زمان و هزینه طراحی‌ها
- افزایش توان مطالعه سیستم‌های پیچیده که انجام آزمایش‌های کنترل شده روی آن‌ها مشکل یا غیر ممکن است.

● افزایش سطح جزئیات در ارائه نتایج

مدل Flow-3D یکی از مدل‌های بسیار قوی در زمینه دینامیک سیالات است که توسعه و پشتیبانی آن توسط Flow Science, Inc صورت گرفته است. اخیراً این مدل توانسته در تحقیقات و صنعت کاربرد زیادی پیدا کند.

این مدل قابلیت تحلیل سه بعدی میدان جریان را دارد و محدوده کاربردی بسیار وسیعی را در مسائل مربوط به سیالات دارد. معادلات حاکم در این مدل، معادلات ناویر استوکس و معادله بقای جرم است و برای حل آشفتگی نیز از پنج روش مختلف استفاده می‌شود.

شبکه حل در این مدل متشکل از سلول‌های مکعب مستطیلی است. شاید این نوع شبکه در نگاه اول به عنوان یک محدودیت مطرح شود، در صورتی که، اولاً به دلیل تولید آسان این نوع شبکه، نظم مناسب و نیاز

به حافظه کم تر در آن و ثانياً به دلیل به کارگیری دو ابزار مفید VOF^1 و $FAVOR^2$ در مدل Flow-3D، شبکه حل به فرم مذکور یک مزیت خواهد بود.

۳-۳-۱ معادلات حاکم

۳-۳-۱-۱ روش VOF

روش های VOF و FAVOR مثال هایی از روش های جز حجمی^۳ هستند. در این روش ها، ناحیه ای که باید مدل شود، ابتدا به شبکه ای از المان های کوچک تر و یا حجم کنترل هایی تقسیم می شود. برای المان های حاوی سیال، مقادیر عددی برای هر کدام از متغیرهای جریان نظیر فشار، دما و سرعت در داخل آن ها نگهداشته می شود. معمولاً این مقادیر نشانگر میانگین حجمی مقادیر در هر المان هستند.

زمانی که جریان دارای سطح آزاد است، تمام سلول ها پر از سیال نیستند و تعدادی از سلول ها که در سطح جریان قرار دارند، نیمه پر هستند. روش مناسب برای نشان دادن وضعیت سلول ها این است که کمیتی به نام F ، که بیانگر جزئی از سلول است که توسط سیال پر شده است، تعریف شود. این کمیت تابع حجم سیال (Volume of fluid) نامیده می شود.

با دانستن مقادیر F ، می توان محل سطح آزاد و زاویه آن را در میان سلول های میدان حل مشخص کرد. این عمل با کنترل کردن مقدار سیال در سلول های مجاور انجام پذیر است. بخش عمده سیال در داخل یک سلول سطحی به سلول مجاور با سیال بیشتر نزدیک است.

بعد از تعیین موقعیت و زاویه سطح جریان، اعمال شرایط مرزی مناسب در سطح جریان برای محاسبه حرکت سیال مقدور خواهد بود. با حرکت سیال، مقادیر F نیز با آن حرکت می کنند. سطوح آزاد به طور

1. Volume of Fluid

2. Fractional Area-Volume Obstacle Representation

3. Volume-Fraction Methods

اتوماتیک با حرکت سیال در داخل یک شبکه ثابت رصد می‌شود. البته این فرآیند باید به گونه‌ای باشد که پله‌ای بودن تابع F حفظ شود.

مزیت بزرگ روش VOF این است که سیال در داخل یک شبکه ثابت جریان دارد و هیچگونه تغییر شکل و جابه‌جایی شبکه وجود ندارد. همچنین توده‌های سیال می‌توانند بر اساس اثر نیروها باهم مخلوط یا از هم جدا شوند بدون این که منطق خاصی برای تعیین سطوح مشترک نیاز باشد. این ویژگی‌ها باعث می‌شود تا روش VOF در مدل‌سازی فرآیندهای با تر و خشک شدن متناوب، نظیر موج در سواحل یا امواج جز و مدی، روش مناسب‌تری باشد.

۳-۱-۲-۳-۳ روش FAVOR

روش FAVOR یکی دیگر از فنون جز حجمی است که برای تعیین هندسه به کار برده می‌شود. همان‌طور که جز حجمی سیال در داخل هر سلول شبکه برای تعیین موقعیت سطح سیال به کار برده می‌شود، یک کمیت جز حجمی دیگر نیز می‌تواند برای تعیین سطح بدنه صلب استفاده شود. از طرفی، این کمیت می‌تواند در مشخص کردن حجمی از سلول که توسط بدنه صلب اشغال نشده است (V_f) نیز استفاده شود. زمانی که، در هر سلول، حجم اشغال شده توسط بدنه صلب مشخص باشد با روشی مشابه روش VOF می‌توان مرز صلب را در داخل شبکه ثابت مشخص کرد. این مرز برای تعیین شرایط مرزی دیواره که جریان باید از آن تبعیت کند، به کار برده می‌شود.

از آن جا که هندسه مجرای یک جریان ثابت است لذا جز حجمی V_f و جز سطحی A_f در طول مدل‌سازی تغییر نمی‌کند. زمانی که دو روش VOF و FAVOR با هم ترکیب می‌شوند، جز حجمی سیال، F ، به عنوان بخشی از جز خالی سلول (V_f) که توسط بدنه صلب اشغال نشده است تعریف می‌شود، لذا اگر حجم یک سلول برابر Γ باشد، حجم واقعی سیال در آن سلول عبارت است از $\Gamma(FV_f)$ نه $\Gamma(F)$.

۳-۱-۳-۳- معادله پیوستگی

به طور کلی، معادله پیوستگی جرم به صورت زیر است:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (۱-۳)$$

که در آن، V_F کسر حجمی جریان، ρ دانسیته سیال، R_{DIF} عبارت پخش آشفتگی و R_{SOR} منبع جرم می‌باشند.

اجزاء سرعت (u, v, w) در جهات (x, y, z) یا (r, θ, z) هستند. A_x ، A_y و A_z برابر کسرهای سطحی برای جریان در جهت‌های x و y و z است و مقدار ضریب R بستگی به نوع سیستم مختصات دارد. وقتی که مختصات استوانه‌ای استفاده شود مشتقات y باید به مشتقات قطبی تبدیل شود:

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \quad (۲-۳)$$

این تبدیل با استفاده از معادله زیر صورت می‌گیرد:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} = \frac{r_m}{r} \frac{\partial}{\partial y} \quad (۳-۳)$$

به طوری که $y = r_m \theta$ و r_m برابر شعاع مرجع ثابت است.

انتقالی که با معادله بالا نشان داده شده بسیار راحت و آسان است، برای این که برای انجام آن فقط ضرب

$y = r_m / r$ روی هر مشتق y در معادلات کارتزینی اصل انجام می‌شود. در مختصات کارتزین، R برابر ۱

و ξ برابر صفر است. در مختصات استوانه‌ای ξ برابر ۱ است.

عبارت اول در سمت راست معادله پیوستگی جرم برابر با عبارت پخش آشفتگی است:

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left[v_{\rho} A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right] + R \frac{\partial}{\partial y} \left[v_{\rho} A_y R \frac{\partial \rho}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[v_{\rho} A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right] + \xi \frac{\rho v_{\rho} A_x}{x} \quad (4-3)$$

به طوری که ضریب v_{ρ} برابر $C_p \mu / \rho$ است که μ برابر ضریب پخش مومنتم (لزجت) و C_p یک ثابت است که معکوس آن مربوط به عدد آشفتگی اشمیت¹ است. این نوع پخش جرم تنها برای فرآیندهای اختلاط آشفتگی در سیالاتی که دارای گرادیان غیریکنواخت چگالی هستند، کاربرد دارند.

عبارت دوم در سمت راست معادله پیوستگی جرم، R_{SOR} ، عبارت مربوط به دانسیته است که برای مدل سازی تزریق جرم از خلل و فرج یک دیواره استفاده می شود.

برای سیالات غیرقابل تراکم، ρ در معادله پیوستگی ثابت است و رابطه (3-1) به صورت زیر ساده می شود:

$$\frac{\partial}{\partial x} (u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (5-3)$$

معادله پیوستگی اصلاح شده به صورت زیر حاصل می شود:

$$\frac{V_F}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u A_x}{\partial x} + R \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} + \xi \frac{u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (6-3)$$

که در آن، c^2 توان دوم سرعت موج و p فشار است.

۳-۳-۱-۴- معادلات مومنتم

معادلات حرکت برای مؤلفه های سرعت سیال (u, v, w) در سه جهت مختصات یا به عبارت دیگر معادلات

ناویر-استوکس به صورت زیر هستند.

¹. Turbulent Schmidt number

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y u v}{x V_F} = \\ - \frac{1}{\rho} \left[R \frac{\partial p}{\partial y} \right] + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \end{aligned}$$

در این معادلات (G_x, G_y, G_z) شتاب‌های بدنه، (f_x, f_y, f_z) شتاب‌های ناشی از لزجت، (b_x, b_y, b_z) افت جریان در محیط‌های دارای خلل و فرج و عبارت آخر سمت راست مربوط به تزریق جرم در سرعت صفر است.

$U_w = (u_w, v_w, w_w)$ مؤلفه‌های سرعت جزء منبع است که در صورت وجود ^{1}GMO مقدارشان غیر

از صفر است. $U_s = (u_s, v_s, w_s)$ مؤلفه‌های سیال در سطح منبع نسبت به خود آن است.

برای لزجت دینامیک μ ، شتاب‌های لزجت عبارتند از:

¹. General Moving Object

$$\begin{aligned}
\rho V_F f_x = w_{sx} - & \left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xx}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{xz}) \\ & + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xx} - A_y \tau_{yy}) \end{aligned} \right\} \\
\rho V_F f_y = w_{sy} - & \left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xy}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{yz}) \\ & + \frac{\xi}{x} (A_x - A_y \tau_{xy}) \end{aligned} \right\} \quad (۸ - ۳) \\
\rho V_F f_z = w_{sz} - & \left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) \\ & + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xz}) \end{aligned} \right\}
\end{aligned}$$

به طوری که:

$$\begin{aligned}
\tau_{xx} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\
\tau_{yy} &= -2\mu \left\{ R \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\
\tau_{zz} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \quad (۹ - ۳) \\
\tau_{xy} &= -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\xi v}{x} \right\} \\
\tau_{xz} &= -\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right\} \\
\tau_{yz} &= -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right\}
\end{aligned}$$

۳-۳-۲- روابط ورود هوا

مدل‌های انتقال آشفته‌گی بر اساس انرژی جنبشی آشفته‌گی، k و تابع استهلاک ε طبقه‌بندی می‌شوند. طول مشخصه گردابه‌های آشفته‌گی با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$L_t = \frac{cnu \sqrt{1.5k^3}}{\varepsilon} \quad (۱۰-۳)$$

Cnu در این رابطه عبارت است از یک پارامتر که مقدار پیش فرض آن $۰/۰۹$ است. از این مقیاس در تعیین آشفته‌گی‌های سطحی جریان استفاده می‌شود. انرژی جنبشی آشفته‌گی در واحد حجم برای یک المان سیال که تا ارتفاع L_t بالا می‌آید عبارت است از:

$$P_d = \rho g_n L_t - \sigma / L_t \quad (۱۱-۳)$$

به طوری که ρ چگالی سیال، σ ضریب تنش سطحی و g_n مؤلفه شتاب گرانش در جهت عمود بر سطح آزاد است. در صورتی که انرژی جنبشی آشفته‌گی در واحد حجم بیشتر از P_d باشد، خواهد توانست بر نیروی تعادل سطحی غلبه کند فلذا هوا وارد جریان خواهد شد. حجم هوای وارد شده در واحد زمان (δV) از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\delta V = C_{air} A_s (2(P_t - P_d) / \rho)^{0.5} \quad (۱۲-۳)$$

C_{air} یک ضریب تناسب است و انتظار می‌رود مقادیر کم‌تر از یک باشد. حدس اولیه مناسب برای این ضریب $۰/۵$ است.

۳-۳-۳- مدل‌های حل آشفتگی

جریان سیال به دو صورت آرام^۱ (لایه‌ای) و آشفته^۲ (متلاطم) است. در جریان آرام، ذرات سیال مسیرهای منظم و همواری را طی می‌کنند به طوری که هر لایه به آرامی روی لایه مجاور سر می‌خورد. در این جریان هرگونه گرایش به آشفتگی توسط لزجت سیال مستهلک می‌شود. در صورتی که مقدار لزجت سیال کم و مقادیر سرعت جریان و طول مشخصه زیاد باشند، جریان به جریان آشفته تبدیل خواهد شد. در این جریان ذرات سیال، به علت انرژی جنبشی بالا و غلبه بر نیروی لزجت، مسیرهای نامنظمی را طی می‌کنند. انتقال مومنتم در جریان آرام در مقیاس مولکولی بوده و با برخورد مولکول‌ها به هم، انتقال مومنتم صورت می‌گیرد. در جریان آشفته علاوه بر انتقال در مقیاس مولکولی، توده‌های سیال نیز بین لایه‌ها جابه‌جا شده و باعث انتقال مومنتم می‌شوند.

معیار تفکیک جریان آرام و آشفته، عدد رینولدز است. در رینولدزهای پایین ($Re < 500$) جریان آرام است و در رینولدزهای بالا ($Re > 2000$)، جریان آشفته می‌شود.

۳-۳-۳-۱- جریان‌های آشفته

تلاطم یا آشفتگی عبارت است از حرکت بی‌نظم و ناپایدار سیالات و زمانی اتفاق می‌افتد که نیروهای کافی برای پایدار کردن جریان وجود نداشته باشد. اکثر جریان‌های موجود در طبیعت، از نوع آشفته هستند. در جریان آشفته، یک حالت تصادفی از حرکت ذرات سیال در جایی که سرعت و فشار به طور پیوسته نسبت به زمان تغییر می‌کنند، اتفاق می‌افتد. جریان‌های آشفته دارای خصوصیات زیر هستند:

1. Laminar flow
2. Turbulent flow

● به شدت غیریکنواخت و ناپایدار هستند. اگر تابع سرعت در برابر زمان برای این نوع جریان رسم شود، شبیه یک تابع تصادفی خواهد بود.

● معمولاً دارای ماهیت سه بعدی است.

● متشکل از گرداب‌های کوچک بسیار زیاد است که شکل آن‌ها نامتقارن است و تغییرات آن‌ها با شدت نوسانات فشار متناسب است.

● به دلیل آشفتگی جریان و نوسانات شدید در مقادیر مشخصه‌های جریان، شدت جریان‌های چرخشی نیز زیاد است.

در جریان آشفتگی، جریان‌هایی با مقادیر مختلف اندازه حرکت به هم برخورد می‌کنند و در اثر لزجت، گرداب‌های سرعت کاهش می‌یابد. این امر باعث کاهش انرژی جنبشی سیال می‌شود لذا تلاطم، یک پدیده مستهلک کننده انرژی خواهد بود. انرژی تلف شده در اثر اختلاط و تلاطم طی یک فرآیند یک طرفه به انرژی داخلی سیال (حرارت) تبدیل می‌شود.

۳-۳-۲- معادلات ناویر استوکس متوسط شده زمانی^۱ (RANS)

اساس معادلات حاکم برای حل جریان‌های آرام و متلاطم یکسان بوده و از معادلات پیوستگی و ناویر استوکس استفاده می‌شود. با این تفاوت که برای حل جریان متلاطم، معادلات ناویر استوکس را متوسط‌گیری زمانی می‌کنند. با این عمل، یکسری عبارت‌های اضافی در معادلات ناویر استوکس ظاهر می‌شود که از نوع

¹. Reynolds Averaged Navier stokes (RANS)

تنش تفسیر می‌شوند و آن‌ها را تنش‌های آشفتگی (تنش‌های رینولدز) می‌نامند. مدل‌های آشفتگی برای حل عبارت‌های اضافی ظاهر شده در معادلات ناویر استوکس مورد استفاده قرار می‌گیرند.

برای بررسی جریان آشفته بهتر است ابتدا خصوصیات لحظه‌ای جریان (برای مثال مؤلفه‌های سرعت و فشار) را به یک مقدار میانگین و یک مقدار نوسانی تجزیه کنیم:

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (۱۳-۳)$$

$$P = \bar{P} + P' \quad (۱۴-۳)$$

در روابط بالا پارامترهای اول سمت راست عبارت‌اند از مقادیر متوسط زمانی و پارامترهای دوم عبارت‌اند از مقادیر نوسانات.

دلیل تجزیه بالا این است که بتوان با استفاده از معادلات ناویر استوکس به مطالعه جریان‌های آشفته پرداخت. چون برای مطالعه جریان‌های آشفته با استفاده از فرم معمولی معادلات ناویر استوکس نیاز خواهد بود که ابعاد سلول‌های شبکه و گام‌های زمانی حل بسیار ریز باشد.

با جایگذاری روابط (۱۳-۳) و (۱۴-۳) در معادلات ناویر استوکس و پیوستگی و متوسط‌گیری زمانی از روابط حاصل، روابط زیر نتیجه می‌شود:

پیوستگی:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (۱۵-۳)$$

ناویر استوکس:

(۱۶-۳)

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = F_x - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \Delta \bar{u} - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) = F_y - \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu \Delta \bar{v} - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) = F_z - \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \Delta \bar{w} - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z} \right)$$

عبارت‌های آخری در سمت راست معادلات ناویر استوکس متوسط‌گیری شده زمانی (رابطه (۱۶-۳)) عبارت-
اند از تنش‌های رینولدزی. فرم خلاصه معادلات ناویر استوکس به شکل زیر می‌باشد:

$$\rho \frac{D\bar{u}_i}{Dt} = F_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \Delta \bar{u}_i - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \right) \quad (۱۷-۳)$$

در رابطه بالا، عبارت داخل پرانتز تنش رینولدزی است.

۳-۳-۴- مدل‌های آشفتگی مورد استفاده در Flow-3D:

شبیه‌سازی آشفتگی در Flow-3D با استفاده از یکی از پنج مدل آشفتگی مورد استفاده توسط این نرم‌افزار صورت می‌گیرد. مدل‌های آشفتگی مورد استفاده توسط Flow-3D عبارت‌اند از: طول اختلاط پیرانتل^۱، یک معادله‌ای انرژی جنبشی آشفتگی^۲، مدل دو معادله‌ای^۳ k-ε، مدل گروه‌های نرمال شده^۴ (RNG) و مدل

1. Prandtl mixing-length model
2. Open-equation, turbulent energy model
3. Two equation (k-ε) model
4. Renormalized group (RNG) model

شبهه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۱. مدل‌سازی آشفتگی در Flow-3D تا حدی از مدل‌سازی‌های دیگر متفاوت است زیرا اثر کسرهای حجمی و سطحی روش FAVOR در معادلات مربوط به مدل‌های آشفتگی اعمال شده است و تولید یا تنزل آشفتگی به وسیله نیروهای شناوری تعمیم یافته‌اند.

۳-۳-۴-۱- مدل دو معادله‌ای k-ε

یک مدل پیچیده و پرکاربرد که شامل دو معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی و اتلاف آن است، مدل k-ε است. این مدل تقریب مطلوبی برای جریان‌های مختلف ارائه کرده است. معادله انتقال برای اتلاف آشفتگی، ϵ_T ، عبارت است از:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \epsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial \epsilon_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \epsilon_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \epsilon_T}{\partial z} \right\} \\ & = \frac{CDIS1 \cdot \epsilon_T}{k_T} (P_T + CDIS3 \cdot G_T) + Diff_\epsilon - CDIS2 \frac{\epsilon_T^2}{k_T} \end{aligned} \quad (۱۸-۳)$$

که در این رابطه، k_T عبارت است از انرژی جنبشی آشفتگی، V_F ، A_x ، A_y و A_z عبارت‌اند از توابع FAVOR، P_T تولید انرژی جنبشی آشفتگی، G_T نیز عبارت تولید شناوری است.

CDIS1، CDIS2 و CDIS3 پارامترهای بی‌بعدی هستند که مقدارشان توسط کاربر اختصاص داده می‌شود و برای مدل k-ε، به ترتیب دارای مقادیر پیش فرض ۱/۴۴، ۱/۹۲ و ۰/۲ هستند. پخش اتلاف نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

¹. Large eddy simulation model

$$\text{Diff}_\varepsilon = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(v_\varepsilon A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_\varepsilon A_y R \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_\varepsilon A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) + \xi \frac{v_\varepsilon A_x \varepsilon_T}{x} \right\} \quad (3-19)$$

۳-۴- تعریف مشخصات مدل برای شبیه‌سازی

۳-۴-۱- زمان شبیه‌سازی

زمان شبیه‌سازی می‌تواند یک حدس اولیه بر اساس تجربیات آزمایشگاهی باشد و بیانگر زمانی است که پیش‌بینی می‌شود پرش هیدرولیکی برای شبیه‌سازی در این زمان پایدار و یا کامل شود. براین اساس در همه آزمایش‌های شبیه‌سازی شده زمان شبیه‌سازی ۱۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین شبیه‌سازی‌ها در سیستم آحاد SI انجام شدند.

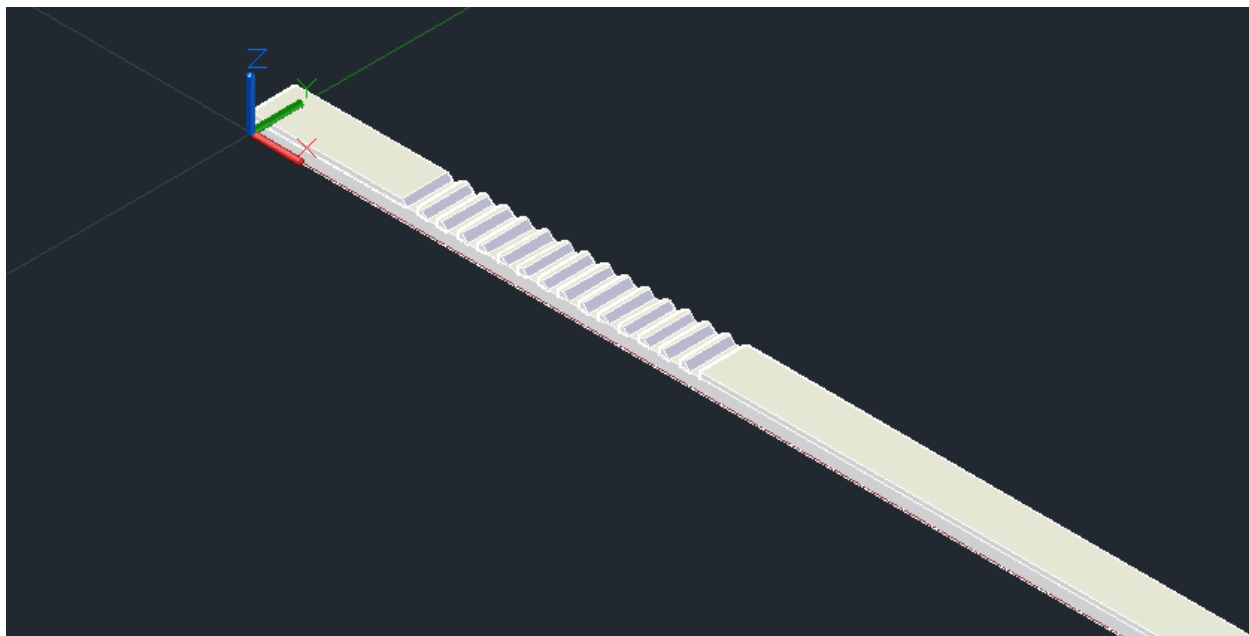
۳-۴-۲- شرایط فیزیکی

مؤلفه Z شتاب گرانش با توجه به سیستم آحاد انتخابی برابر ۹/۸۱- انتخاب شد. در این تحقیق از مدل آشفستگی (k-ε) برای شبیه‌سازی استفاده شد. همچنین از شرط فیزیکی ورود هوا^۱ به عنوان یک مدل متمم برای مدل جریان اصلی استفاده شد. سیال شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار، آب با دمای ۲۹۳ کلوین تعریف شد.

۳-۴-۳- تعریف هندسه مدل

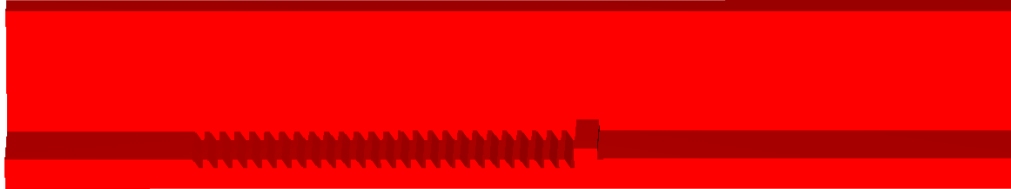
برای مدل‌سازی جریان پیرامون این سازه، لازم است که هندسه (شکل و ابعاد) مدل عددی با شرایط آزمایشگاهی یکسان باشد. در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Auto CAD بسترهای زیر از نوع دوزنقه‌ای مطابق با ابعاد آزمایشگاهی ایجاد شدند (شکل ۳-۵).

¹. Air entrainment



شکل ۳-۵- نمایی از کف زیر ایجاد شده با استفاده از نرم‌افزار Auto CAD

سپس بسترهای زیر ایجاد شده در اتوکد، در نرم‌افزار Flow-3D فراخوانی شدند و دیواره‌های کانال به طول ۱۲ متر و ارتفاع ۰/۵ متر ایجاد شدند. شکل (۳-۶) نمایی از کانال و بستر زیر شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶- نمایی از کانال و بستر زبر شبیه‌سازی شده

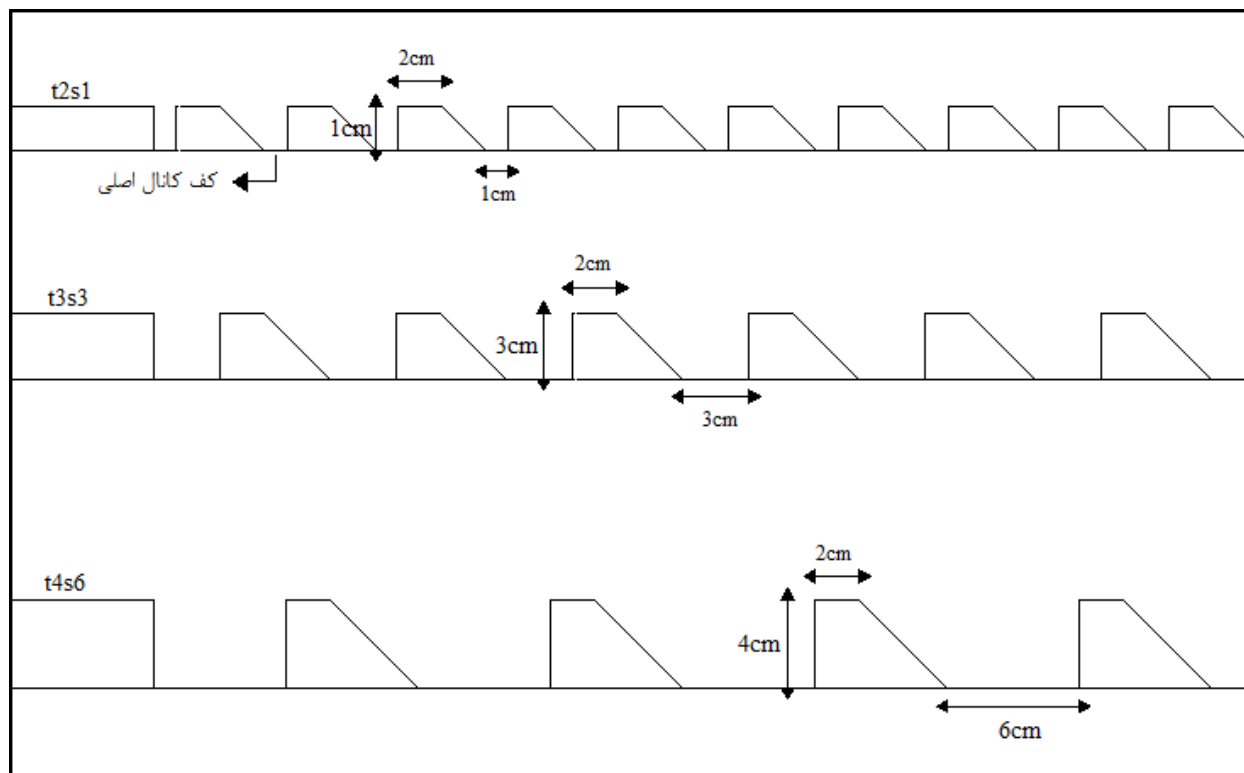
در جدول (۱-۳) و شکل (۳-۷) مشخصات فیزیکی بسترهای زبری که در شبیه‌سازی استفاده شد ارائه شده است.

جدول ۳-۱- مشخصات فیزیکی بسترهای زبر شبیه‌سازی شده

نام بستر	t (سانتی‌متر)	s (سانتی‌متر)	s/t	پهنای تاج (سانتی‌متر)	زاویه رأس (درجه)	عرض زبری (سانتی‌متر)
t2s1	۲	۱	۰/۵	۲	۴۵	۲۵
t2s4	۲	۴	۲	۲	۴۵	۲۵
t3s1.5	۳	۱/۵	۰/۵	۲	۴۵	۲۵
t3s3	۳	۳	۱	۲	۴۵	۲۵
t3s6	۳	۶	۲	۲	۴۵	۲۵
t4s6	۴	۶	۱/۵	۲	۴۵	۲۵
t4s8	۴	۸	۲	۲	۴۵	۲۵

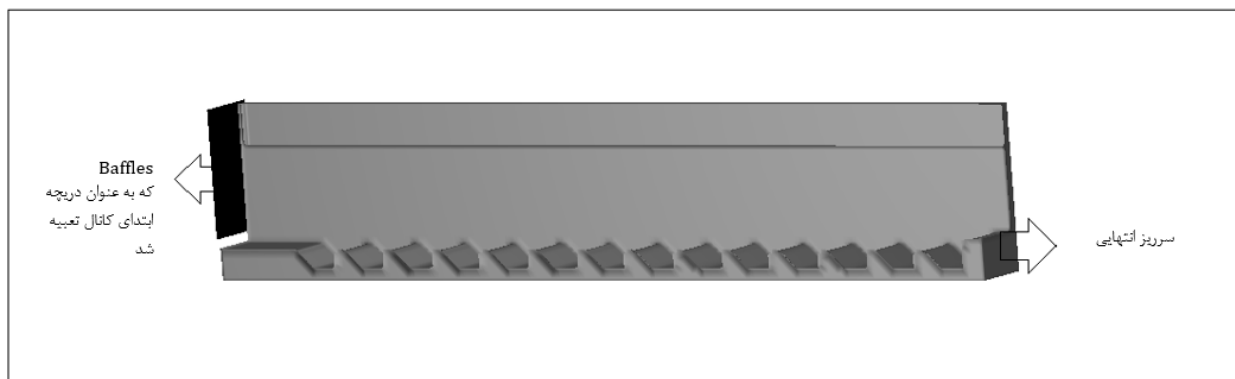
t: ارتفاع زبری‌ها

s: فاصله بین زبری‌ها



شکل ۳-۷- پلان چند نمونه از کف‌های زبر

برای تنظیم جریان ورودی به کانال، یک بفل در ابتدای کانال ایجاد شد که نقش دریچه را ایفا میکند. برای تثبیت پرش هیدرولیکی در فاصله ۱۷ سانتی متری از دریچه بالادست، یک سرریز در انتهای بستر زبر تعبیه شد که با تنظیم ارتفاع این سرریز پرش در فاصله مورد نظر تثبیت شد (شکل ۳-۸).



شکل ۳-۸- نمایی از دریچه ابتدای کانال و سرریز انتهایی کانال

با توجه به رابطه سرریز لبه تیز مستطیلی:

$$Q = CLH_d^{3/2} \quad (۳ - ۲۰)$$

که در آن C ضریب سرریز، L طول سرریز و H_d ارتفاع آب روی سرریز می باشد.

ضریب سرریز در مطالعات آزمایشگاهی (راور و همکاران، ۱۳۸۹) ۱/۸ به دست آمد. با استفاده از رابطه (۳-۲۰)

(۲۰) مقدار دبی در هر آزمایش جایگزین شد و به این صورت ارتفاع سرریز در هر آزمایش محاسبه شد.

۳-۴-۴- تعریف شبکه حل

نرم افزار Flow-3D، فقط قابلیت تولید شبکه های حل منظم (مکعبی) را دارد. شاید در نگاه اول، این شیوه

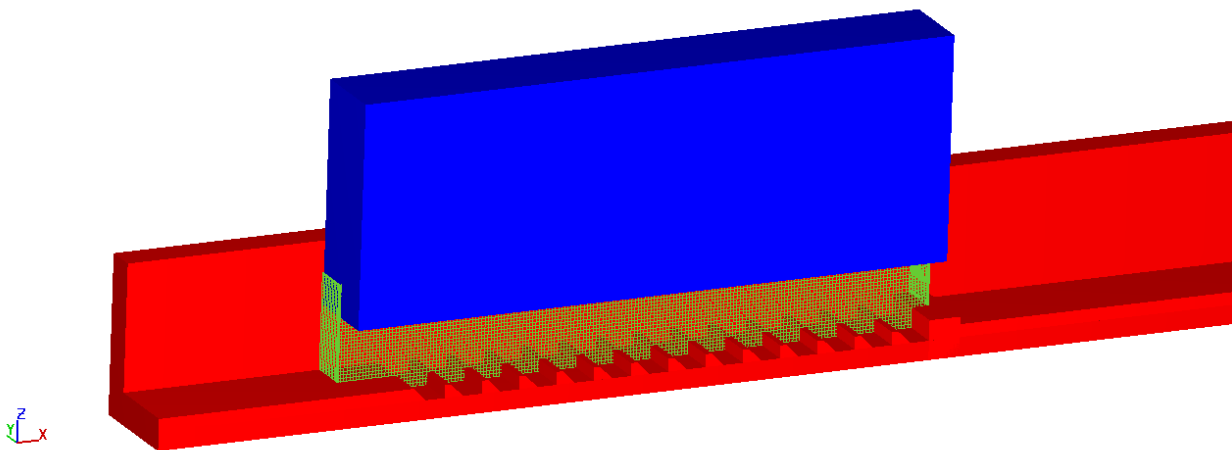
عمل به عنوان یک محدودیت برای این برنامه مطرح شود در حالی که استفاده از شبکه های مکعبی، همچنان

که قابلیت تولید نتایج مطلوب را حفظ می کند، سرعت تولید شبکه حل را نیز بسیار بالا می برد.

در این تحقیق از یک شبکه مکعبی با تعداد سلول های ۲۰۰۰۰۰۰ استفاده شد.

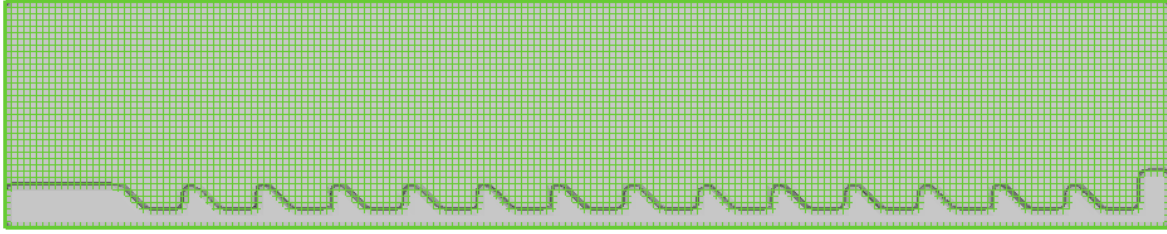
نکته‌ای که باید در مورد شبکه حل رعایت شود، نسبت اندازه^۱ و نسبت شکل^۲ سلول‌های شبکه حل می‌باشد. طبق تعریف، نسبت اندازه سلول‌ها عبارت است از نسبت ابعاد دو سلول مجاور هم در یک امتداد خاص و نسبت شکل عبارت است از نسبت بزرگترین بعد یک سلول به کوچکترین بعد آن. اندازه دو نسبت مذکور بسیار مهم بوده و محدودیت‌هایی در اندازه آنها وجود دارد. در تعریف یک بلوک از میدان حل، حداکثر مقدار نسبت اندازه سلول‌های مجاور هم و نسبت شکل آنها باید کنترل شود. برای حصول نتایج درست و منطقی و کاهش خطاها و زمان شبیه‌سازی، باید نسبت اندازه دو سلول مجاور تا حد ممکن نزدیک به ۱ باشد و حداکثر از ۱/۲۵ تجاوز نکند. همچنین نسبت شکل نیز تا حد ممکن نزدیک به ۱ باشد و حداکثر از ۳ تجاوز نکند.

در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته ابعاد شبکه به گونه‌ای تعیین شد که حداکثر مقدار نسبت اندازه سلول‌های مجاور هم و نسبت شکل آنها مناسب باشد. شکل‌های (۳-۹) و (۳-۱۰) نمونه از شبکه حل مورد استفاده در این تحقیق می‌باشند.



شکل ۳-۹- نمونه‌ای از کانال شبیه‌سازی شده و شبکه حل در فضای سه بعدی

1. Size ratio
2. Aspect ratio

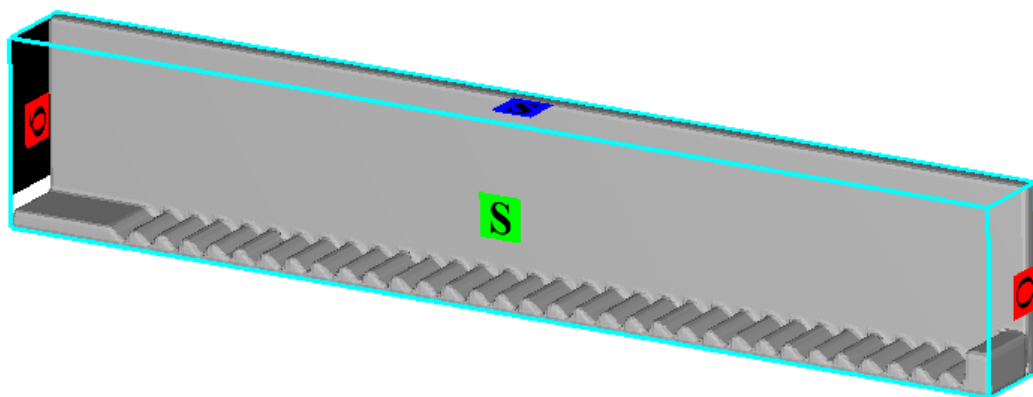


شکل ۳-۱۰- شبکه حل مورد استفاده به صورت دو بعدی

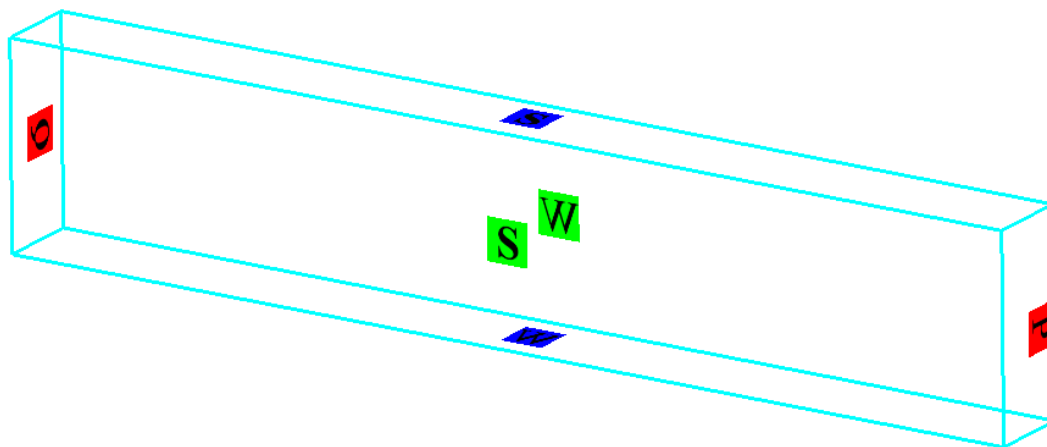
۳-۴-۵- تعریف شرایط مرزی

شرایط مرزی در ۶ وجه مکعب شبکه حل اعمال شد. شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی بدین گونه است که مرز بالادست به صورت مقدار حجم جریان^۱، مرز پایین‌دست به صورت خروجی^۲، مرز دیواره جانبی y_{min} به صورت متقارن^۳، مرز دیواره جانبی y_{max} به صورت دیواره^۴، مرز در کف بستر به صورت دیواره و مرز در سطح آب به صورت متقارن انتخاب گردید. نکته مهم در شبیه‌سازی‌ها این است که هنگامی که شرایط مرزی پایین‌دست از نوع خروجی اعمال شد، پرش با دبی‌های کمتر در فاصله کم‌تری از دریچه بالادست تثبیت شد. به همین دلیل در این پرش‌ها شرایط مرزی پایین‌دست از نوع فشار^۵ اعمال شد. شکل (۳-۱۱) و (۳-۱۲) به ترتیب شرایط مرزی استفاده شده در مدل عددی با شرط مرزی خروجی و فشار در پایین‌دست را نشان می‌دهند.

-
1. Volume flow rate
 2. Outflow
 3. Symmetry
 4. Wall
 5. Specified Pressure



شکل ۳-۱۱- شرایط مرزی استفاده شده در مدل عددی با شرط مرزی خروجی در پایین دست

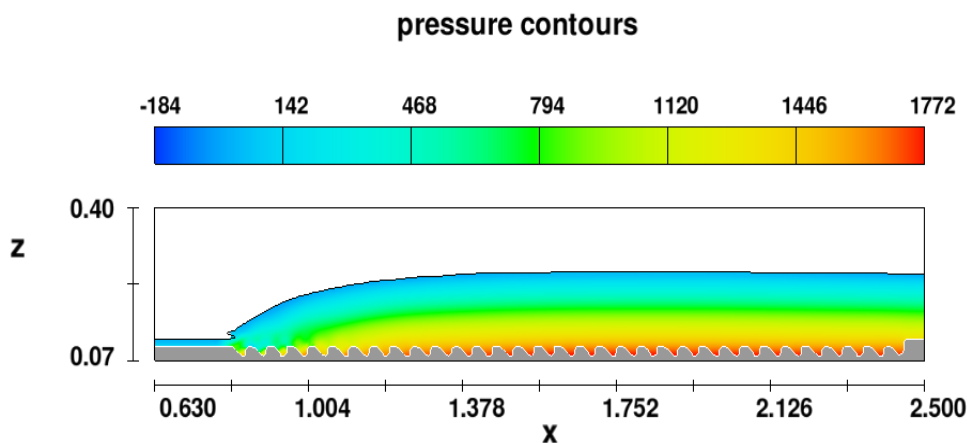


شکل ۳-۱۲- شرایط مرزی استفاده شده در مدل عددی با شرط مرزی فشار در پایین دست

پس از تعریف شرایط اولیه جریان و شبکه حل، با توجه به مشخصات هر یک از آزمایش‌ها، شبیه‌سازی‌ها انجام شدند. هر شبیه‌سازی چندین بار تکرار می‌شد تا پرش هیدرولیکی در فاصله ۱۷ سانتی‌متری از شروع زبری تثبیت شود. سپس خروجی‌های مورد نیاز از نرم‌افزار استخراج شد.

۳-۴-۶- خروجی‌های استخراج شده از نرم‌افزار Flow-3D

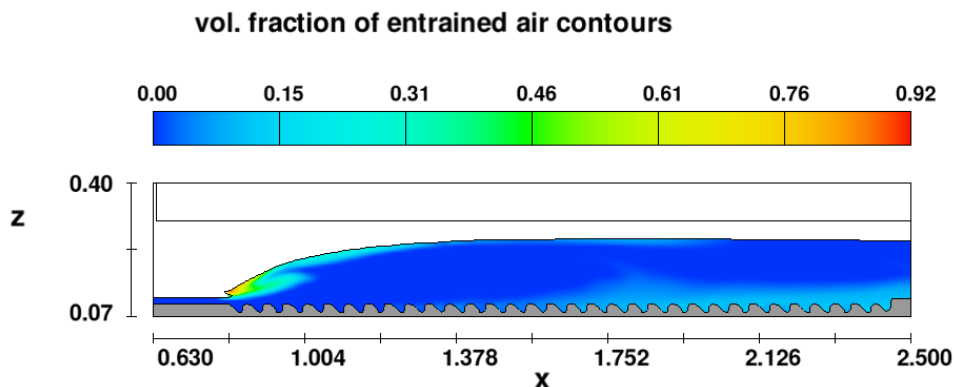
عمق جریان در هر نقطه از پرش در راستای محور X استخراج شد و با توجه به این نتایج، پروفیل سطح آب و پروفیل بی‌بعد سطح آب رسم شدند. شکل (۳-۱۳) نمونه‌ای از نتایج دوبعدی پرش هیدرولیکی شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۳- پرش هیدرولیکی شبیه‌سازی شده

برای اندازه‌گیری طول پرش هیدرولیکی از نرم‌افزار گرافر ۷ استفاده شد. به این صورت که تصاویر نتایج دو بعدی شبیه‌سازی که مقدار حجم هوای وارد شده به جریان را نشان می‌دهد در نرم‌افزار گرافر فراخوانی شد.

طبق تعریف طول پرش هیدرولیکی، از نقطه شروع پرش تا نقطه‌ای که آخرین دسته حباب هوا از سطح آب خارج می‌شود به عنوان طول پرش اندازه‌گیری شد (شکل ۳-۱۴).



شکل ۳-۱۴- پرش هیدرولیکی تشکیل شده بر روی بستر زبر و درصد حجم هوای وارد شده در جریان

برای اندازه‌گیری طول غلطاب از نرم‌افزار تک پلات استفاده شد. به این صورت که نتایج متنی سرعت از نرم‌افزار Flow-3D استخراج شد و سپس به فرمتی که قابل استفاده در نرم‌افزار تک پلات باشد تبدیل شد. بعد از این مرحله، داده‌های سرعت در نرم‌افزار تک پلات فراخوانی شد. سپس میدان جریان در این نرم‌افزار رسم شد. طبق تعریف طول غلطاب، از نقطه شروع پرش تا نقطه برگشت آب به عنوان طول غلطاب اندازه‌گیری شد. شکل (۳-۱۵) نمونه‌ای از نتایج متنی جهت فراخوانی در نرم‌افزار تک پلات را نشان می‌دهد.

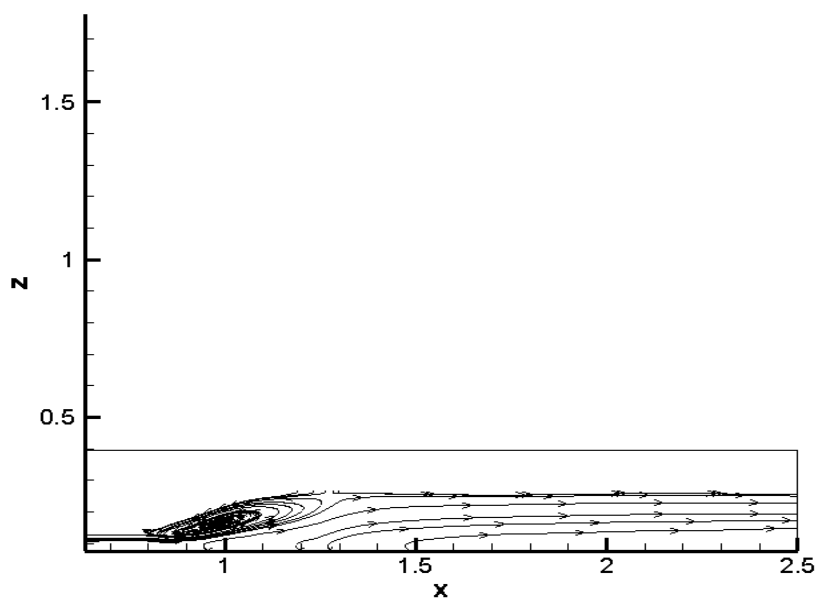
```

lr.txt - Notepad
File Edit Format View Help
Variables= x z p u w
Zone T="28" I=239 k=42 F=point
6.34E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
6.42E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
6.50E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
6.57E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
6.65E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
6.73E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
6.81E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
6.89E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
6.97E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
7.04E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
7.12E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
7.20E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
7.28E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
7.36E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
7.43E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
7.51E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
7.59E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
7.67E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
7.75E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
7.83E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
7.90E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
7.98E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
8.06E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
8.14E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
8.22E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
8.30E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
8.37E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
8.45E-01 7.39E-02 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00

```

شکل ۳-۱۵- نمونه‌ای از نتایج متنی جهت فراخوانی در نرم‌افزار Tec plot

شکل (۳-۱۶) میدان جریان رسم شده با استفاده از نرم‌افزار تک پلات را نمایش می‌دهد. در هر شبیه سازی میدان جریان در صفحه X-Z رسم شد. لبه برگشتی جریان و جهت سرعت جریان در شکل قابل مشاهده است.



شکل ۳-۱۶- میدان جریان در پرش هیدرولیکی

۳-۵- شاخص‌های آماری

۳-۵-۱- خطای میانگین مجذور مربعات (RMSE)

$$\text{RMSE} = \left\{ \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2 \right] \right\}^{0.5} \quad (۳-۲۱)$$

۳-۵-۲- خطای میانگین مجذور مربعات نرمال شده (NRMSE)

$$\text{NRMSE} = \frac{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2 \right]^{0.5}}{O} \quad (۳-۲۲)$$

در این روابط X مقدار اندازه‌گیری، Y مقدار شبیه‌سازی شده، n تعداد داده‌ها و O میانگین داده‌های اندازه‌گیری می‌باشد.

۳-۵-۳- ضریب همبستگی (d)

$$d = 1 - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|X_i - 0| + |Y_i - 0_e|)^2} \right\} \quad (۲۳ - ۳)$$

در این رابطه d ضریب همبستگی و O_e میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده می‌باشد.

مقادیر d و $NRMSE$ بین صفر تا ۱ تغییر می‌کند. هر چقدر مقدار $NRMSE$ به صفر نزدیک شود و همچنین d به ۱ نزدیک شود نشان دهنده این است که مدل با دقت بالایی شبیه‌سازی را انجام می‌دهد.

۳-۵-۴- ضریب نش سات کلیف (NS)

$$NS = 1 - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - 0)^2} \right\} \quad (۲۴ - ۳)$$

مقدار NS از ۱ تا $-\infty$ تغییر می‌کند و هر چقدر به ۱ نزدیک شود نشان دهنده مطابقت بالای مقادیر حاصل از مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد.

با توجه به قابلیت‌های نرم‌افزار Flow-3D در شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولیکی، در این تحقیق برای شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی بر روی سطوح زبر از نرم‌افزار Flow-3D استفاده شده است. به‌طور کلی، شرایط فیزیکی و هیدرولیکی پرش هیدرولیکی ایجاد شده در آزمایشگاه به نرم‌افزار معرفی شد و هر شبیه‌سازی با تغییر ارتفاع سرریز انتهایی کانال جهت تثبیت پرش هیدرولیکی در فاصله مورد نظر تکرار شد که پس از انجام شبیه‌سازی‌های مورد نظر، مقادیر عمق ثانویه، طول پرش هیدرولیکی، طول ناحیه غلطاب، مقادیر سرعت و انرژی در پرش هیدرولیکی از مدل استخراج شد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

فصل چہارم:

نتایج و بحث

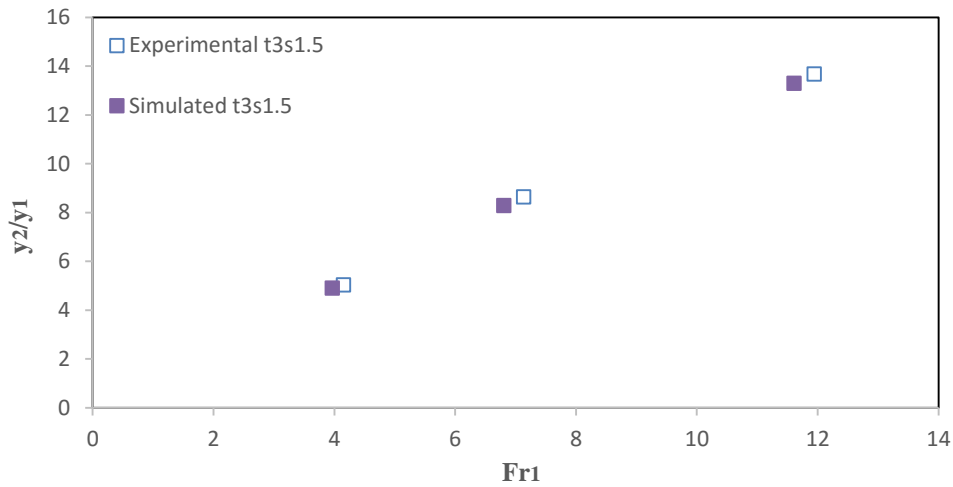
۴- نتایج و بحث

۴-۱- مقدمه

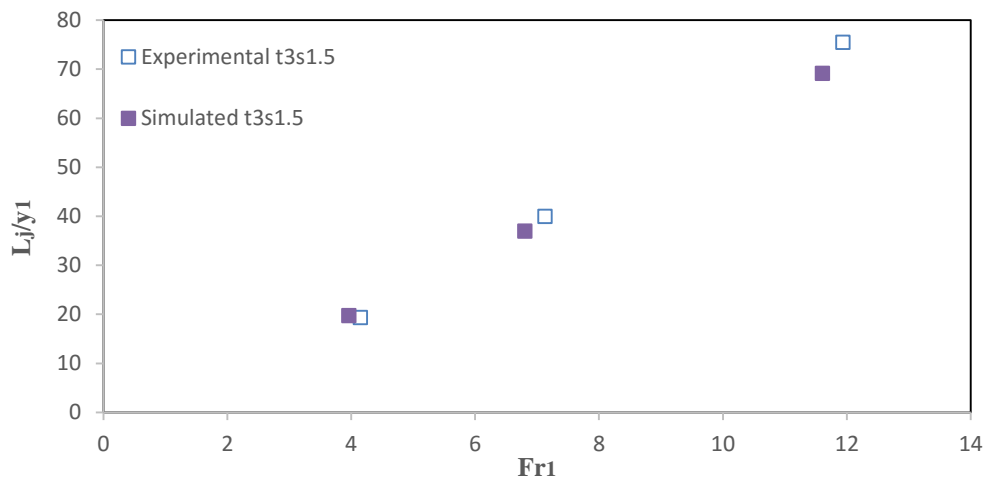
در تحقیق حاضر به شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی بر روی سطوح زبر با بلوک‌های یکپارچه دوزنقه‌ای قائم با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D پرداخته شد. اهداف این تحقیق بررسی عددی خصوصیات پرش هیدرولیکی شامل پروفیل سطح آب، نسبت عمق ثانویه، طول جهش، طول ناحیه غلطاب، توزیع سرعت و افت انرژی برای پرش‌های تشکیل شده در حوضچه‌هایی با بلوک‌های یکپارچه دوزنقه‌ای قائم است.

۴-۲- صحت‌سنجی نرم‌افزار Flow-3D

قبل از انجام شبیه‌سازی‌ها، مدل مربوطه با داده‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی شد. مقدار دبی جریان ورودی، عمق اولیه جریان، ارتفاع و فاصله بین زبری‌ها داده‌های ورودی به این نرم‌افزار می‌باشند. بدین منظور از سه دبی $0.251 \text{ m}^3/\text{s}$ ، $0.431 \text{ m}^3/\text{s}$ و $0.721 \text{ m}^3/\text{s}$ و همچنین مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استفاده شد. شکل (۴-۱) و (۴-۲) به ترتیب عمق مزدوج نسبی و طول پرش هیدرولیکی حاصل از نتایج صحت‌سنجی برای زبری با ارتفاع ۳ سانتیمتر و فاصله ۱/۵ سانتیمتر را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها مشاهده می‌شود که نرم‌افزار Flow-3D از دقت بالایی در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی برخوردار است و نتایج عددی و آزمایشگاهی سازگاری خوبی با هم دارند.



شکل ۴-۱- مقایسه عمق مزدوج نسبی حاصل از نتایج صحت‌سنجی و نتایج آزمایشگاهی برای بستر زیر $t3s1.5$



شکل ۴-۲- مقایسه طول پرش هیدرولیکی حاصل از نتایج صحت‌سنجی و نتایج آزمایشگاهی برای بستر زیر $t3s1.5$

برای مقایسه نتایج صحت‌سنجی عددی و آزمایشگاهی شاخص‌های آماری $NRMSE$ ، d و E محاسبه شد که مقادیر آن‌ها در جدول (۴-۱) و (۴-۲) ارائه شده است. مقادیر این شاخص‌های آماری نشان می‌دهد که مدل در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی عملکرد خوبی دارد و نتایج عددی و آزمایشگاهی تطابق خوبی با هم

دارند. به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که نرم‌افزار Flow-3D توانایی بالایی در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی دارد.

جدول ۴-۱- شاخص‌های آماری حاصل از نتایج صحت‌سنجی عمق مزدوج نسبی

E	d	NRMSE	بستر زبر / شاخص آماری
۰/۹۹۲۶	۰/۹۹۸۱	۰/۰۳۳۳	t3s1.5

جدول ۴-۲- شاخص‌های آماری حاصل از نتایج صحت‌سنجی طول پرش هیدرولیکی

E	d	NRMSE	بستر زبر / شاخص آماری
۰/۹۶۹۴	۰/۹۹۱۳	۰/۰۹۰۱	t3s1.5

در مجموع ۴۰ آزمایش عددی با دبی‌های مختلف در محدوده اعداد فرود $3/88$ تا $12/01$ با عمق اولیه $1/55$ سانتیمتر انجام شده است. در این فصل به مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی تغییرات خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای زبر و تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از اجراهای نرم‌افزار Flow-3D پرداخته شده است. اعم نتایج اخذ شده از تحلیل بر روی موضوعات زیر می‌باشد:

۱- شبیه‌سازی پروفیل سطح آب

۲- شبیه‌سازی بر مبنای عمق ثانویه

۳- شبیه‌سازی بر مبنای طول پرش

۴- شبیه‌سازی بر مبنای طول ناحیه غلطاب

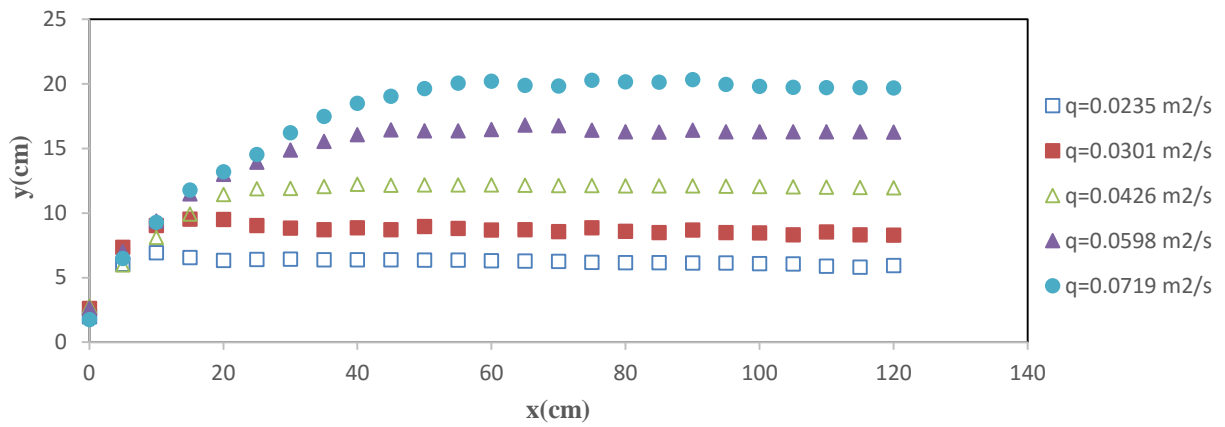
۵- شبیه‌سازی بر مبنای پروفیل سرعت

۶- شبیه‌سازی بر مبنای افت انرژی

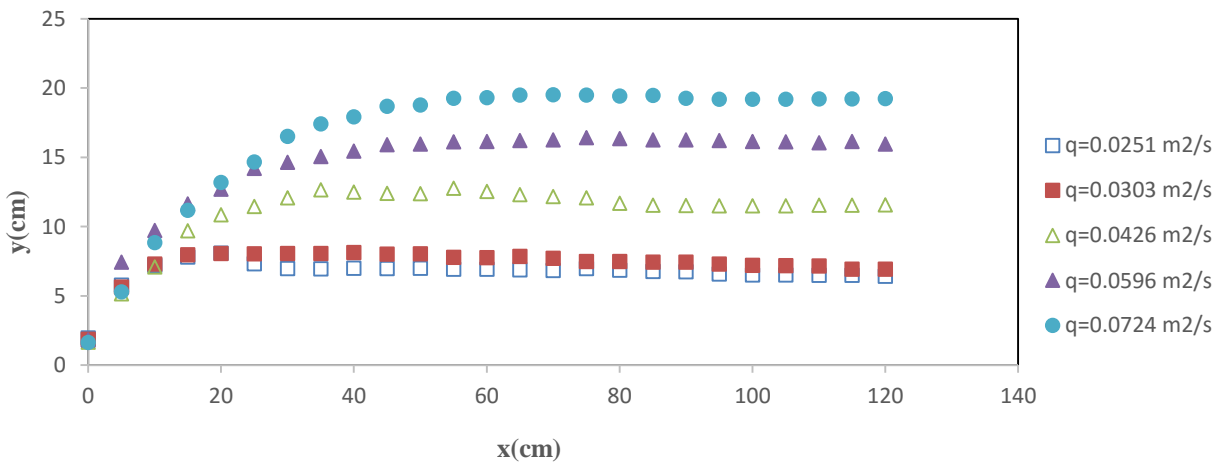
۴-۳- پروفیل‌های با بعد و بی‌بعد سطح آب

۴-۳-۱- تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر پروفیل سطح آب

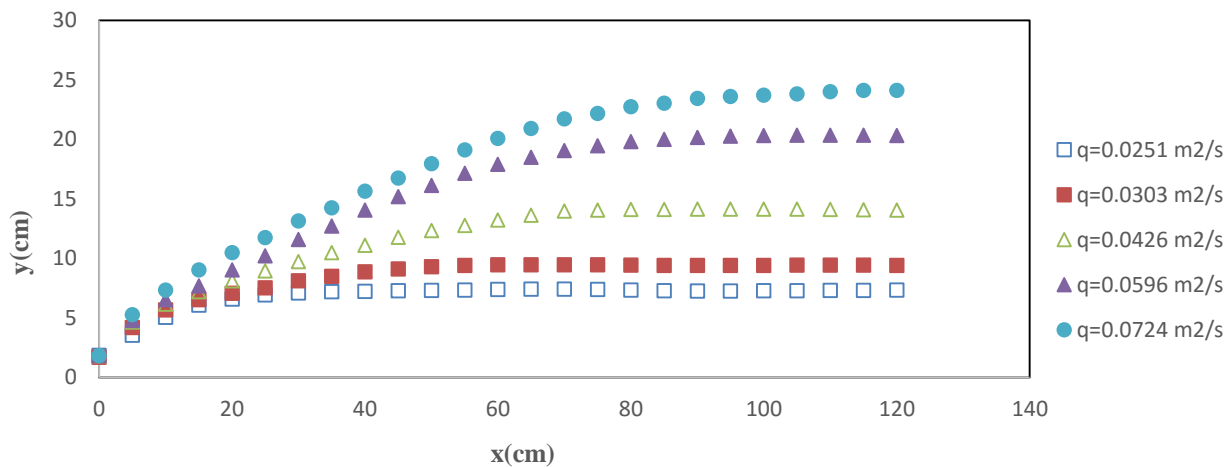
با تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از مدل‌سازی، پروفیل‌های سطح آب به دست آمد. به این صورت که با رسم مقادیر فاصله طولی پرش از ابتدای پرش (X) در مقابل عمق جریان (Y) پروفیل‌های سطح آب استخراج شدند. شکل‌های (۴-۳) و (۴-۴) تأثیر فاصله زبری را بر پروفیل سطح آب نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود به ازای دبی حداکثر برای زبری با ارتفاع ۲ سانتیمتر، با افزایش فاصله بین زبری‌ها از ۱ به ۴ سانتیمتر مقدار سطح جریان $\frac{3}{5}$ درصد کاهش می‌یابد. از طرفی، با مقایسه شکل (۴-۴) و (۴-۵) مشاهده می‌شود که به ازای دبی حداکثر برای زبری با ارتفاع ۲ و فاصله ۴ سانتیمتر نسبت به بستر صاف، سطح جریان $\frac{23}{4}$ درصد کاهش می‌یابد، که این کاهش عمق به دلیل حرکت گردابه‌ها در فضای بین زبری‌ها می‌باشد.



شکل ۳-۴- پروفیل سطح آب برای آزمون سری t_{2s1}

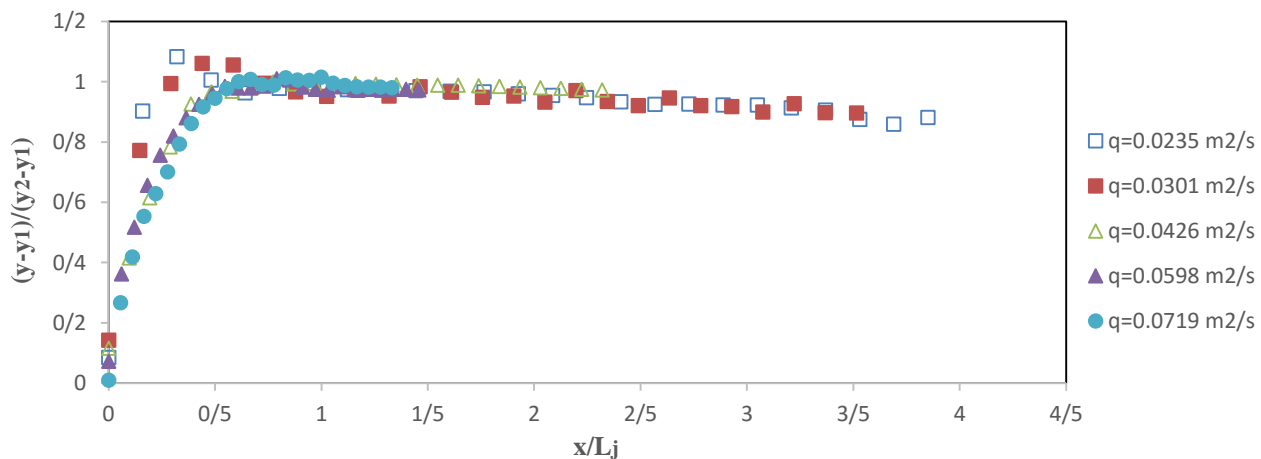


شکل ۴-۴- پروفیل سطح آب برای آزمون سری t_{2s4}

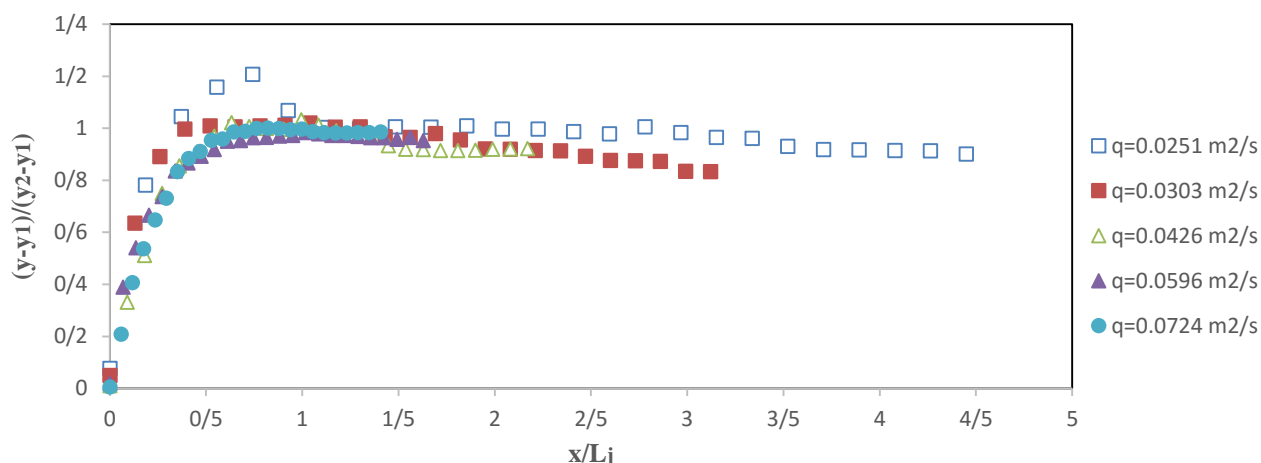


شکل ۴-۵- پروفیل سطح آب برای بستر صاف

با رسم مقادیر بی بعد x/L_j و $(y - y_1)/(y_2 - y_1)$ در مقابل یکدیگر، پروفیل‌های بی بعد سطح جهش برای آزمون‌های مختلف به دست آمدند. که نمونه‌هایی از آن‌ها در شکل‌های (۴-۶) و (۴-۷) نشان داده شده اند. همان‌طور که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود پروفیل‌های سطح آب مشابه یکدیگر هستند.



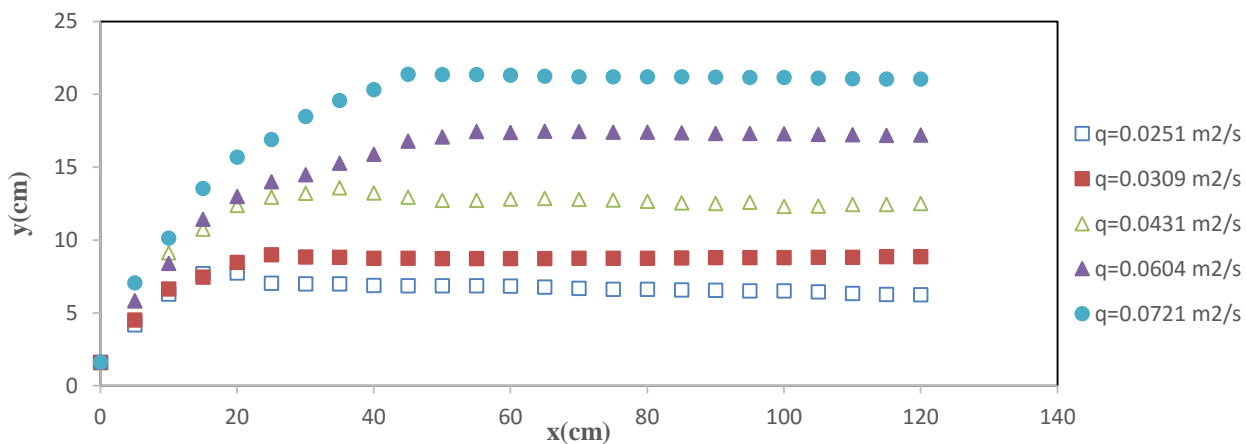
شکل ۴-۶- پروفیل‌های بی بعد سطح آب برای آزمون سری t2s1



شکل ۴-۷- پروفیل‌های بی‌بعد سطح آب برای آزمون سری t2s4

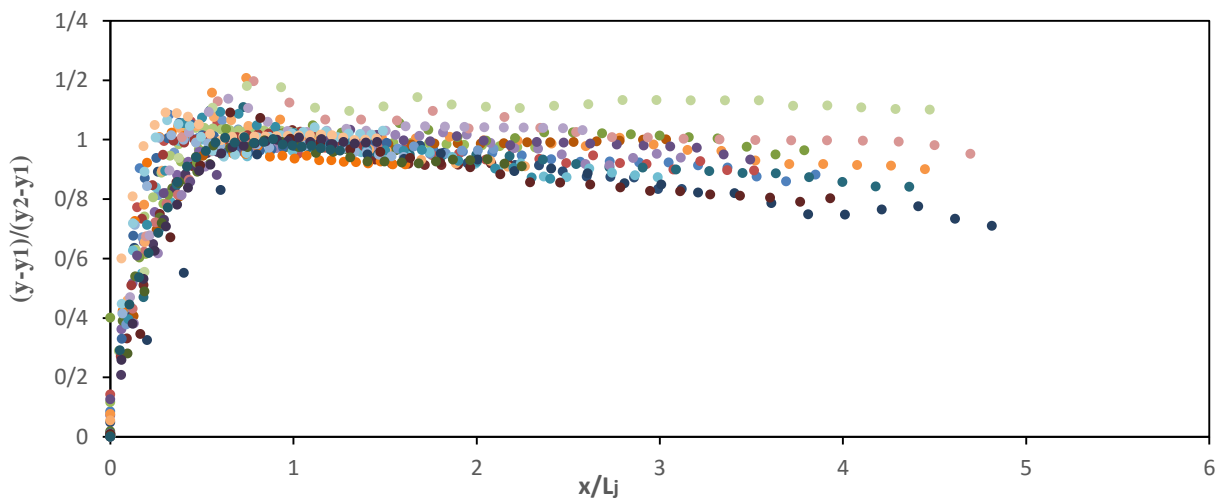
۴-۳-۲- تأثیر اندازه دبی جریان بر پروفیل سطح آب

شکل (۴-۸) تأثیر دبی را بر پروفیل سطح آب نشان می‌دهند. همان‌طور که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار دبی، سطح جریان هم افزایش می‌یابد، به طوری که برای آزمون t3s1.5 (زبری با ارتفاع ۳ سانتیمتر و فاصله ۱/۵ سانتیمتر) با افزایش دبی از $0.0251 \text{ m}^2/\text{s}$ به $0.0724 \text{ m}^2/\text{s}$ مقدار سطح جریان ۲/۹ برابر می‌شود، همچنین با افزایش مقدار دبی جریان، پرش در فاصله طولی بیشتری به عمق ثابت می‌رسد یا به عبارتی با افزایش دبی، عمق ثانویه در فاصله بیشتری اتفاق می‌افتد. زیرا با افزایش دبی پرش قوی‌تر تشکیل می‌شود که نتیجه آن افزایش سطح جریان می‌باشد. بنابراین در جریان‌های قوی برای کنترل و مهار پرش، باید تمهیداتی در نظر گرفته شود.



شکل ۴-۸- پروفیل‌های سطح آب برای آزمون سری $t3s1.5$

شکل (۴-۹) پروفیل بی‌بعد سطح جهش برای کلیه آزمون‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، پروفیل‌های سطح آب مشابه یکدیگر هستند و می‌توان آن‌ها را با یک منحنی متوسط نشان داد.

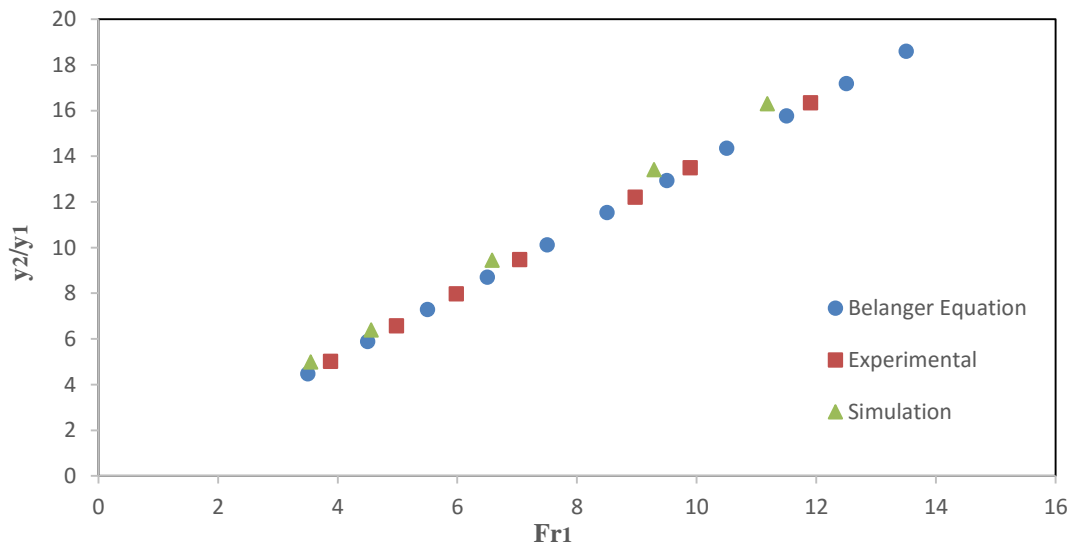


شکل ۴-۹- پروفیل‌های بی‌بعد سطح آب در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر برای کلیه شبیه‌سازی‌ها

۴-۴- نسبت عمق ثانویه

۴-۴-۱- نسبت عمق ثانویه بر روی بستر صاف

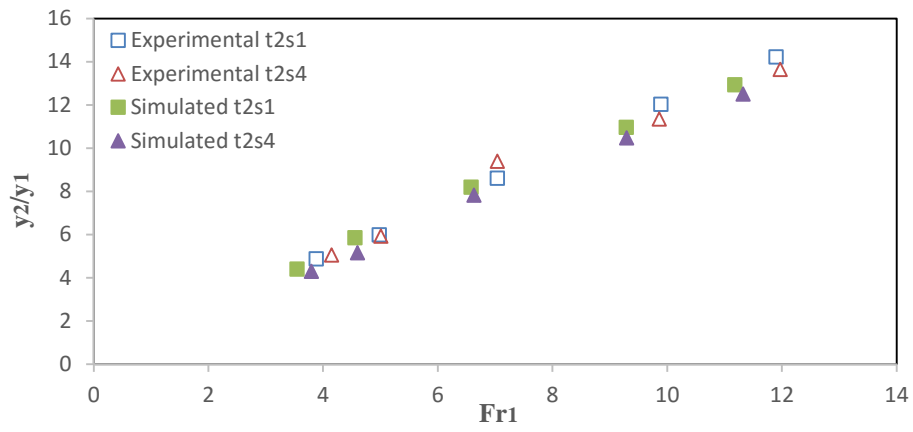
در شکل (۴-۱۰) مقایسه‌ای بین نتایج اندازه‌گیری عددی و آزمایشگاهی عمق مزدوج نسبی بر روی بستر صاف و داده‌های حاصل از معادله بلانگر (۱۸۲۸) نشان داده شده است. در این شکل مقادیر y_2/y_1 در مقابل Fr_1 رسم شده است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود مقدار عمق مزدوج نسبی y_2/y_1 با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد و این روند در بستر صاف شبیه‌سازی شده مشابه نتایج آزمایشگاهی و معادله بلانگر می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش مقدار دبی از $0.235 m^3/s$ به $0.719 m^3/s$ ، نسبت عمق ثانویه بر روی بستر صاف $2/3$ برابر می‌شود. با مقایسه نتایج عددی با آزمایشگاهی مشاهده شد که اختلاف بین آن‌ها به‌طور متوسط 0.83 درصد می‌باشد که اختلاف معنی‌داری نمی‌باشد.



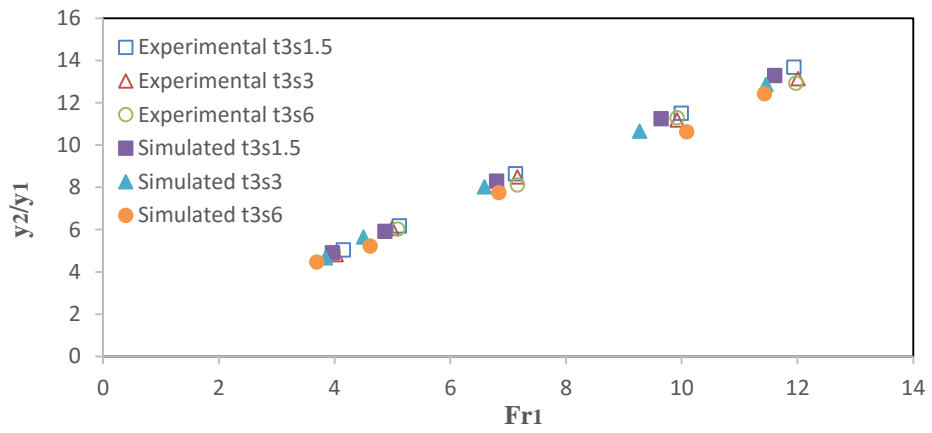
شکل ۴-۱۰- مقایسه عمق مزدوج نسبی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی بر روی بستر صاف

۴-۴-۲- تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر نسبت عمق ثانویه

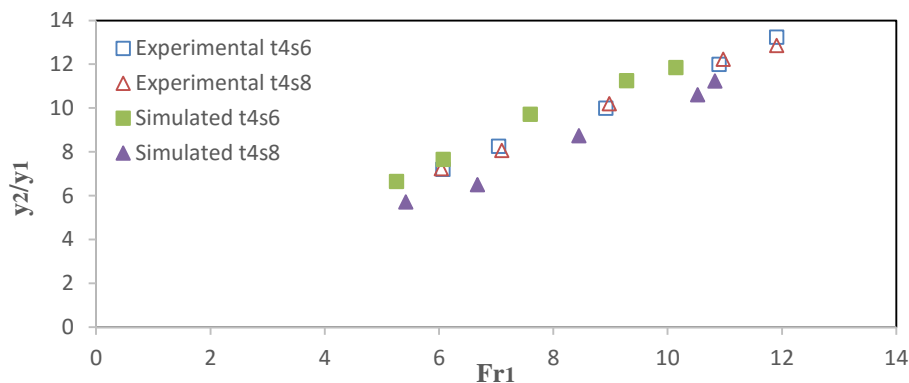
تأثیر فاصله زبری‌ها (S) بر عمق مزدوج نسبی ($\frac{y_2}{y_1}$) برای ارتفاع‌های مختلف زبری در شکل (۴-۱۱) بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تغییرات نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی سازگاری خوبی با هم دارند. با توجه به گراف‌های رسم شده در شکل (الف) مشاهده می‌شود که برای ارتفاع زبری ۲ سانتیمتر، با افزایش فاصله زبری از ۱ سانتیمتر به ۴ سانتیمتر، عمق مزدوج نسبی به‌طور متوسط ۵/۳ درصد کاهش می‌یابد. در شکل (ج) که مربوط به تغییرات عمق مزدوج نسبی برای زبری با ارتفاع ۴ سانتیمتر است مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله بین زبری از ۶ سانتیمتر به ۸ سانتیمتر عمق مزدوج نسبی به‌طور میانگین ۱۰ درصد کاهش پیدا می‌کند. از طرفی با افزایش ارتفاع و فاصله زبری‌ها عمق مزدوج نسبی در بستر زبر نسبت به بستر صاف به‌ازای دبی حداکثر بین ۱۸/۵ تا ۳۱/۱ درصد کاهش می‌یابد. همان‌طور که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود فاصله بین زبری بستر موجب کاهش عمق ثانویه برای تمام مقادیر Fr_1 شده و افزایش عدد فرود این روند را افزایش می‌دهد. به‌عبارت دیگر کاهش ضخامت لایه مرزی به نوعی اثرات زبری بستر را بیشتر و روند کاهش عمق ثانویه را شدت می‌بخشد. همچنین می‌توان این کاهش ناچیز را به افزایش عملکرد حرکت گردابی به‌وجود آمده در فضای بین زبری‌ها نسبت داد که با افزایش عدد فرود، جریان فوق‌بحرانی ورودی شدت بیشتری پیدا می‌کند.



(الف)



(ب)



(ج)

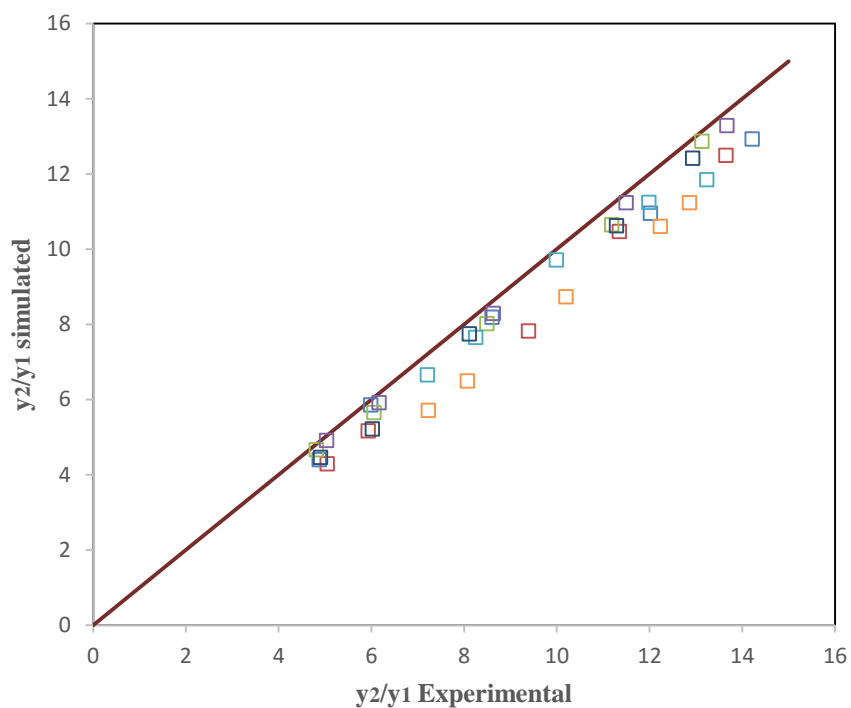
شکل ۴-۱۱- شبیه‌سازی تغییرات عمق مزدوج نسبی در برابر عدد فرود برای فواصل مختلف زبری با ارتفاع الف- ۲

سانتیمتر، ب- ۳ سانتیمتر و ج- ۴ سانتیمتر

۴-۴-۳- مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی عمق مزدوج نسبی

در شکل (۴-۱۲) مقادیر نسبت عمق ثانویه شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی در مقابل هم رسم شده‌اند. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی اختلاف کمی وجود دارد که می‌تواند مربوط به خطاهای نرم‌افزاری باشد. اختلاف بین مقادیر عمق مزدوج نسبی شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی ۸ درصد به دست آمد. برای مقایسه نتایج مدل با داده‌های اندازه‌گیری از شاخص‌های آماری مختلف که در فصل سوم به آن‌ها اشاره شده است، استفاده شد.

مقادیر خطای میانگین مجذور مربعات نرمال شده (NRMSE)، ضریب همبستگی (d) و ضریب نش سات کلیف (NS) محاسبه شده در جدول (۴-۳) نمایش داده شده است. مقادیر شاخص‌های آماری نشان دهنده دقت بالای شبیه‌سازی مدل Flow-3D با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. همچنین با توجه به مقادیر به دست آمده بر اساس شاخص‌های آماری نتیجه گرفته می‌شود که مدل با دقت قابل قبولی عملیات شبیه‌سازی را انجام داده و نتایج رضایت بخش می‌باشد.



شکل ۴-۱۲- مقایسه نسبت عمق ثانویه شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی

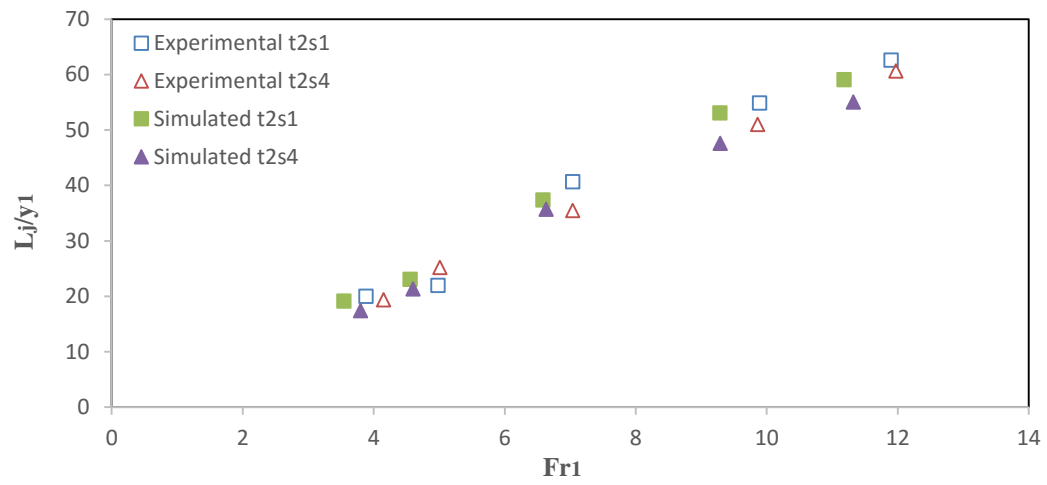
جدول ۴-۳- شاخص‌های آماری برای مقایسه عمق مزدوج شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی

NS	d	NRMSE	نوع زبری / شاخص‌های آماری
۰/۹۴۸۸	۰/۹۸۵۶	۰/۰۸۷۴	t2s1
۰/۸۹۰۶	۰/۹۷۱۴	۰/۱۱۷۸	t2s4
۰/۹۹۲۰	۰/۹۹۷۹	۰/۰۳۱۸	t3s1.5
۰/۹۸۳۸	۰/۹۹۵۹	۰/۰۴۵	t3s3
۰/۹۶۳۸	۰/۹۹۰۹	۰/۰۶۷	t3s6
۰/۸۷۲۶	۰/۹۶۴۴	۰/۰۷۹۰	t4s6
۰/۷۰۱۸	۰/۸۹۲۲	۰/۱۲۴۴	t4s8

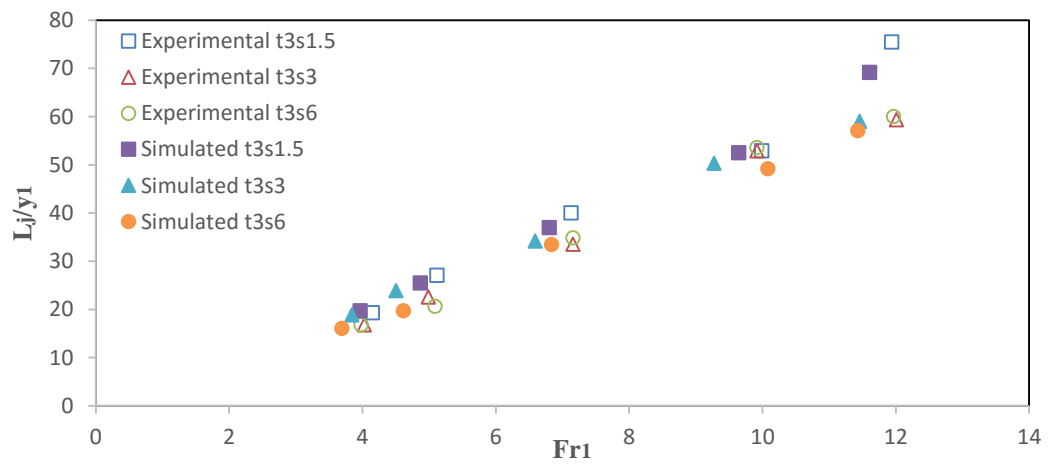
۴-۵- طول پرش هیدرولیکی

۴-۵-۱- تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر طول پرش هیدرولیکی

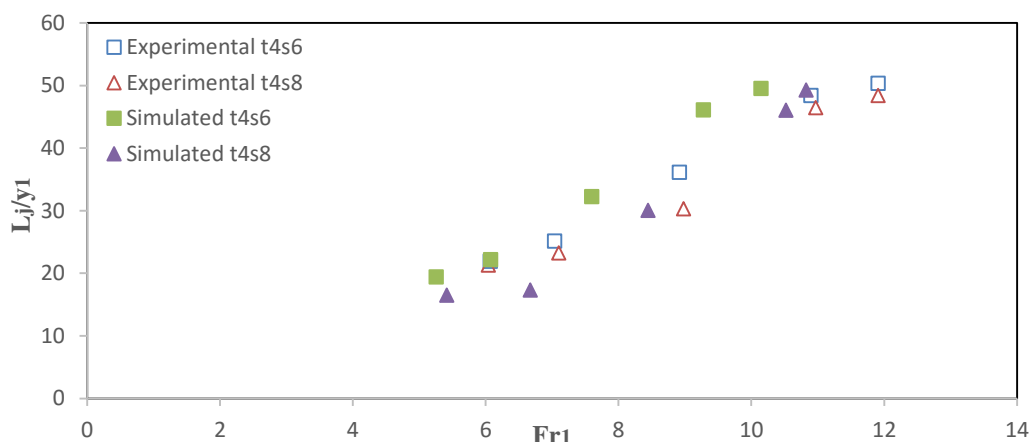
برای مقایسه اثر فاصله بین زبری‌ها، تغییرات طول بی‌بعد پرش (Lz/γ_1) در مقابل عدد فرود در شکل (۴-۱۳) نمایش داده شده است. با توجه به این شکل‌ها روند تغییرات نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی به نسبت با هم سازگاری دارند. در شکل (الف) برای زبری با ارتفاع ۲ سانتیمتر، با افزایش فاصله بین زبری‌ها از ۱ سانتیمتر به ۴ سانتیمتر، طول پرش هیدرولیکی بین ۴/۵ تا ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین برای زبری با ارتفاع ۳ سانتیمتر که نمودار تغییرات طول پرش آن در شکل (ب) نشان داده شده است با افزایش فاصله بین زبری‌ها از ۱/۵ به ۳ سانتیمتر، طول پرش هیدرولیکی بین ۴/۲ تا ۱۴/۷ درصد کاهش پیدا می‌کند، درحالی که برای همین ارتفاع زبری با افزایش فاصله زبری از ۱/۵ سانتیمتر به ۶ سانتیمتر، طول پرش به اندازه ۶/۴ تا ۲۲/۸ درصد کاهش می‌یابد. برای ارتفاع زبری ۴ سانتیمتر، همانند دو گراف قبل افزایش فاصله بین زبری‌ها باعث کاهش طول پرش هیدرولیکی می‌گردد. همچنین، با افزایش ارتفاع و فاصله بین زبری‌ها طول پرش هیدرولیکی در بستر زبر نسبت به بستر صاف به ازای دبی حداکثر ۲۸/۶ تا ۵۰/۱ درصد کاهش می‌یابد. این مسأله متأثر از شرایط هیدرودینامیکی جریان در ناحیه بین زبری‌ها است که امکان به‌وجود آمدن جریان‌های چرخشی را در این ناحیه فراهم آورده است و اثرات آن به‌صورت کاهش فشار و افزایش حباب‌های اختلاط آب و هوا بروز می‌نماید.



(الف)



(ب)



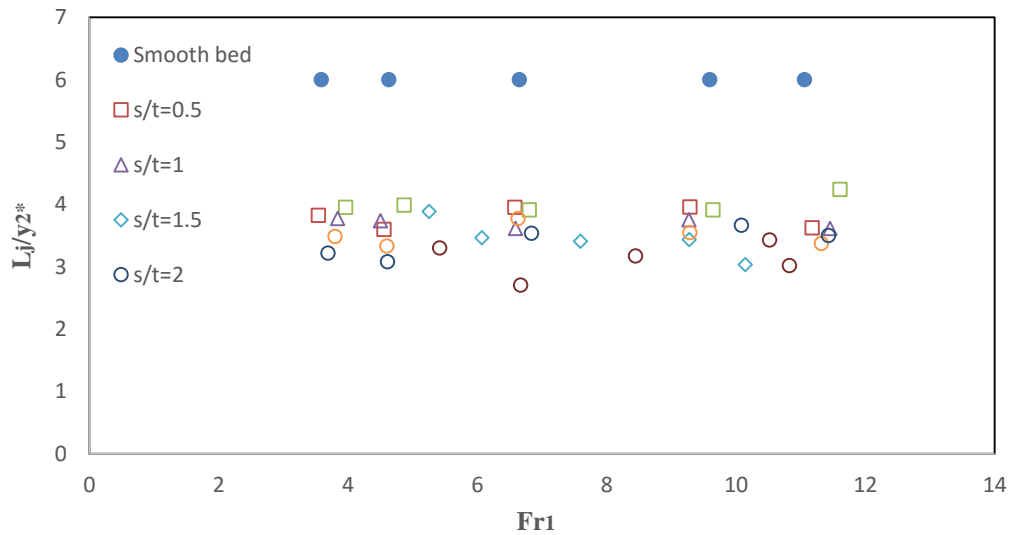
(ج)

شکل ۴-۱۳- شبیه‌سازی تغییرات طول بی‌بعد پرش هیدرولیکی در برابر عدد فرود برای فواصل مختلف زبری با ارتفاع الف-

۲ سانتیمتر، ب- ۳ سانتیمتر و ج- ۴ سانتیمتر

۴-۵-۲- تغییرات طول نسبی پرش در برابر عدد فرود در بستر صاف و بسترهای زبر

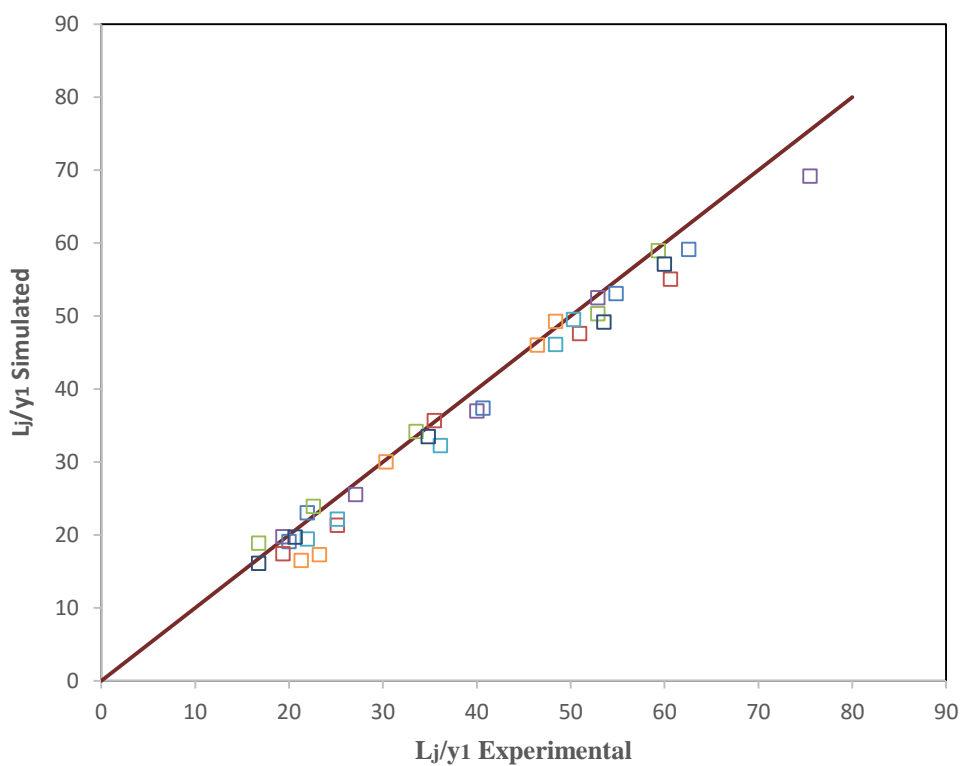
تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی (L_j/y_2^*) در مقابل اعداد فرود جریان فوق بحرانی ورودی (Fr_1) برای کلیه شبیه‌سازی‌ها بر روی بستر زبر به همراه داده‌های بستر صاف شبیه‌سازی شده در شکل (۴-۱۴) نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقدار (L_j/y_2^*) با تغییر اعداد فرود نسبتاً ثابت و در حدود ۳/۵ می‌باشد. طول نسبی پرش بر روی بستر صاف (L_j/y_2^*) در حدود ۶ به دست آمد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که طول پرش بر روی بستر زبر تقریباً ۵۸ درصد طول پرش بر روی بستر صاف است.



شکل ۴-۱۴- تغییرات طول نسبی پرش در برابر عدد فرود در بستر صاف و بسترهای زیر برای مقادیر مختلف s/t

۴-۵-۳- مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی طول پرش هیدرولیکی

شکل (۴-۱۵) نیز میزان اختلاف نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی را بهتر نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل اختلاف بین مقادیر طول پرش هیدرولیکی شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی $5/8$ درصد برآورد شد. مقادیر خطای میانگین مجذور مربعات نرمال شده (NRMSE)، ضریب همبستگی (d) و ضریب نش سات کلیف (NS) محاسبه شده‌اند که با توجه به این شاخص‌های آماری، مدل از دقت خوبی برخوردار است و نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج اندازه‌گیری شده مطابقت قابل قبولی دارد (جدول ۴-۴).



شکل ۴-۱۵- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی

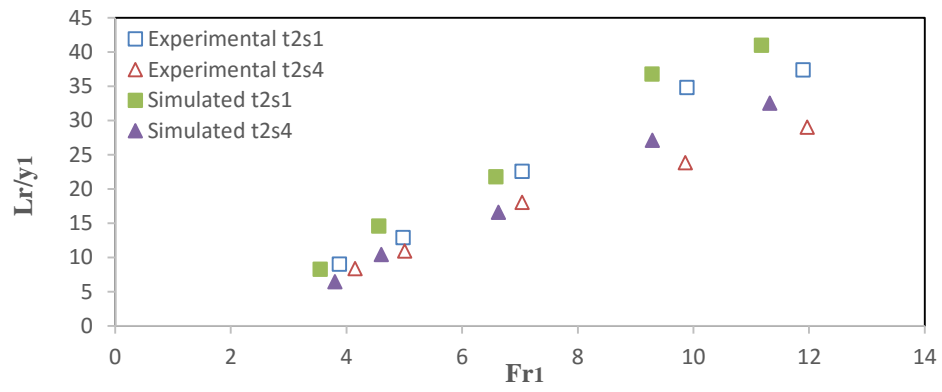
جدول ۴-۴- شاخص‌های آماری برای مقایسه طول پرش هیدرولیکی شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی

NS	d	NRMSE	نوع زبری/ شاخص‌های آماری
۰/۹۸۰۸	۰/۹۹۴۸	۰/۰۵۸۹	t2s1
۰/۹۴۸۶	۰/۹۸۶۳	۰/۰۹۱۵	t2s4
۰/۹۷۳۶	۰/۹۹۲۷	۰/۰۷۵	t3s1.5
۰/۹۹۰۳	۰/۹۹۷۳	۰/۰۴۴	t3s3
۰/۹۷۹۱	۰/۹۹۴۴	۰/۰۶۶۹	t3s6
۰/۹۴۵۷	۰/۹۸۷۰	۰/۰۷۴۲	t4s6
۰/۹۰۹۲	۰/۹۸۱۳	۰/۱۰۱۴	t4s8

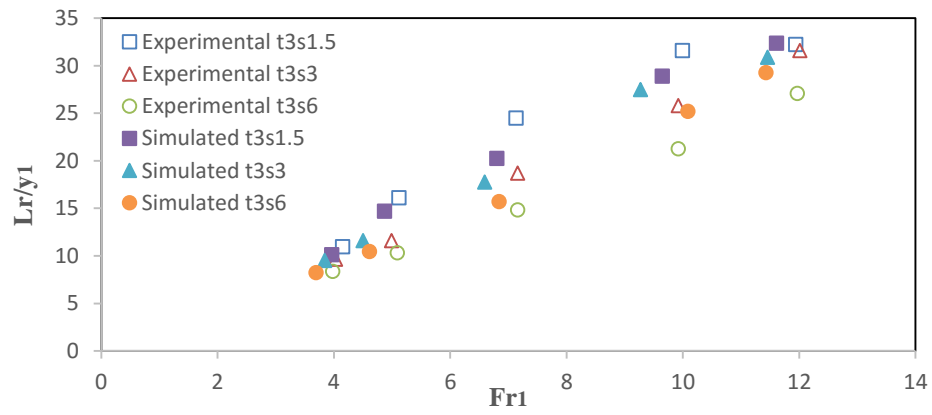
۴-۶- طول ناحیه غلطاب

۴-۶-۱- تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر طول ناحیه غلطاب

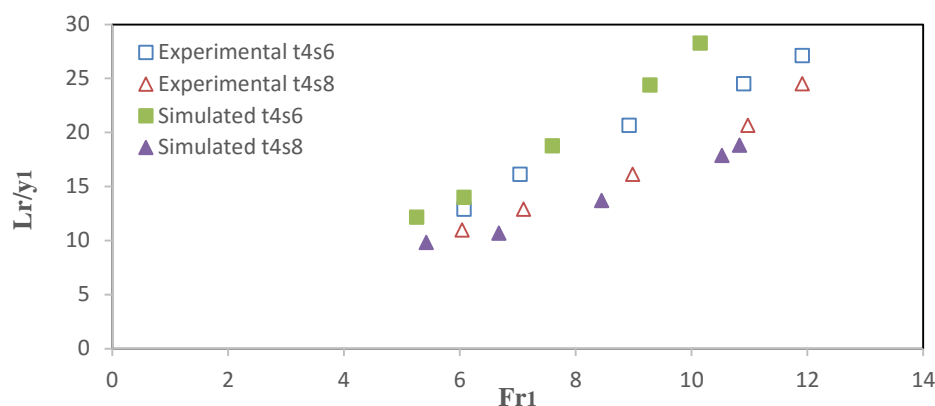
در شکل (۴-۱۶) نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی تغییرات طول نسبی غلطاب پرش هیدرولیکی Lr/y_1 با تغییر فاصله بین زبری‌ها نشان داده شده است. با توجه به شکل (الف) مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله بین زبری‌ها از ۱ سانتیمتر به ۴ سانتیمتر، طول ناحیه غلطاب به اندازه ۲۴/۲ درصد کاهش پیدا می‌کند. همچنین برای زبری با ارتفاع ۴ سانتیمتر که گراف مربوط به آن در شکل (ج) رسم شده است، افزایش فاصله زبری از ۶ سانتیمتر به ۸ سانتیمتر باعث کاهش ۲۶ درصدی طول ناحیه غلطاب می‌گردد. بررسی‌ها نشان داده است که کاهش طول غلطاب به طور عمده به فضای ایجاد شده بین زبری‌ها، که در آن جریان گردابی شکل می‌گیرد، بستگی دارد. به همین دلیل با افزایش ارتفاع و فاصله بین زبری‌ها، مقادیر طول ناحیه غلطاب به ازای دبی حداکثر تا حدود ۵۴ درصد کاهش می‌یابد. نتایج فوق نشان می‌دهد که در بسترهای زبر، پرش هیدرولیکی و استهلاك انرژی جریان در طول بیشتری نسبت به شرایطی که اعداد فرود کمتری اعمال شده است اتفاق می‌افتد. به طوری که در شرایط اعمال کمترین عدد فرود آزمایش‌ها، کمترین طول ناحیه غلطاب و آشفتگی را شاهد خواهیم بود. بنابراین در شرایط اعمال اعداد فرود و دبی‌های زیاد جریان، بایستی ارتفاع و فاصله بین بلوک‌ها را جهت استهلاك کامل انرژی تغییر داد و یا در طراحی‌ها طول حوضچه آرامش را افزایش داد.



(الف)



(ب)



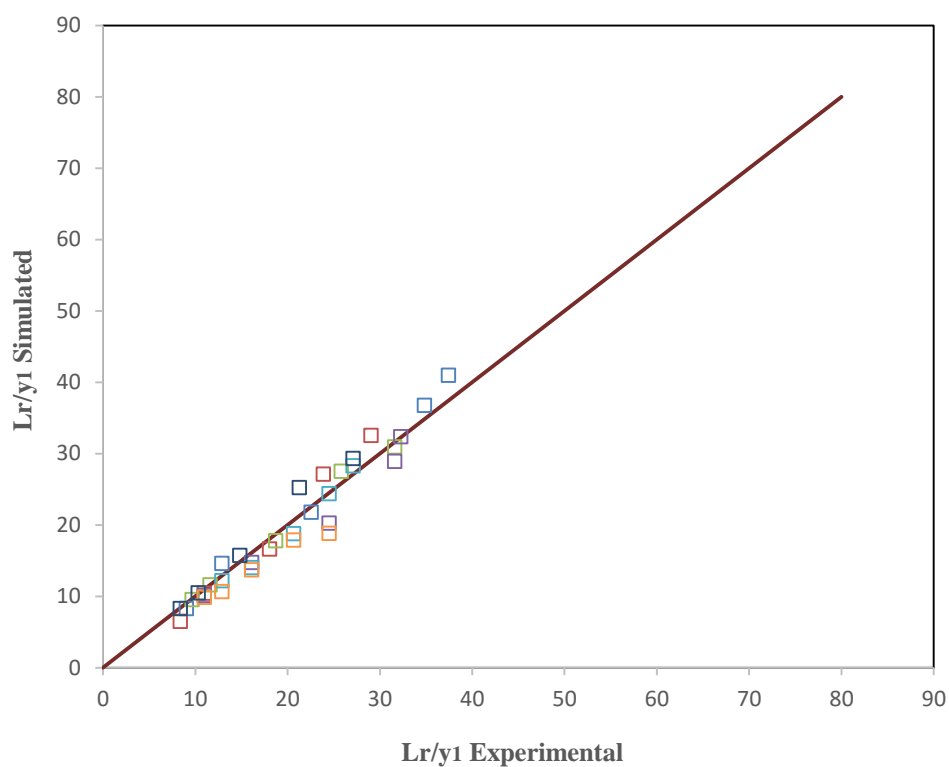
(ج)

شکل ۴-۱۶- شبیه‌سازی تغییرات طول ناحیه غلطاب در برابر عدد فرود برای فواصل مختلف زبری با ارتفاع الف- ۲

سانتیمتر، ب- ۳ سانتیمتر و ج- ۴ سانتیمتر

۴-۶-۲- مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی طول ناحیه غلطاب

شکل (۴-۱۷) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی مربوط به تغییرات طول ناحیه غلطاب را نشان می‌دهد. طبق این شکل مشاهده می‌شود که بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی اختلاف کمی وجود دارد و مدل Flow-3D توانایی قابل قبولی برای شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی دارد. مقدار اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی طول ناحیه غلطاب ۵/۹ درصد به دست آمد. شاخص‌های آماری $NRMSE$ ، d و NS در جدول (۴-۵) ارائه شده است. طبق مقادیر این شاخص‌های آماری مشاهده می‌شود که مدل در برآورد طول ناحیه غلطاب از دقت کافی برخوردار است و نتایج عددی و آزمایشگاهی تطابق خوبی با هم دارند.



شکل ۴-۱۷- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی مربوط به تغییرات طول ناحیه غلطاب

جدول ۴-۵- شاخص‌های آماری برای مقایسه طول ناحیه غلطاب شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی

NS	d	NRMSE	نوع زبری/ شاخص‌های آماری
۰/۹۶۹۲	۰/۹۹۲۸	۰/۰۸۶۵	t2s1
۰/۹۰۳۴	۰/۹۸۱۲	۰/۱۳۲۷	t2s4
۰/۹۲۰۶	۰/۹۷۹۹	۰/۱۰۲۶	t3s1.5
۰/۹۸۷۷	۰/۹۹۶۹	۰/۰۴۷۲	t3s3
۰/۹۱۲۶	۰/۹۸۱۵	۰/۱۲۵۴	t3s6
۰/۹۲۶۴	۰/۹۸۴۲	۰/۰۶۹۹	t4s6
۰/۷۷۵۸	۰/۸۵۷۸	۰/۱۹۰۲	t4s8

۷-۴- توزیع سرعت در پرش هیدرولیکی

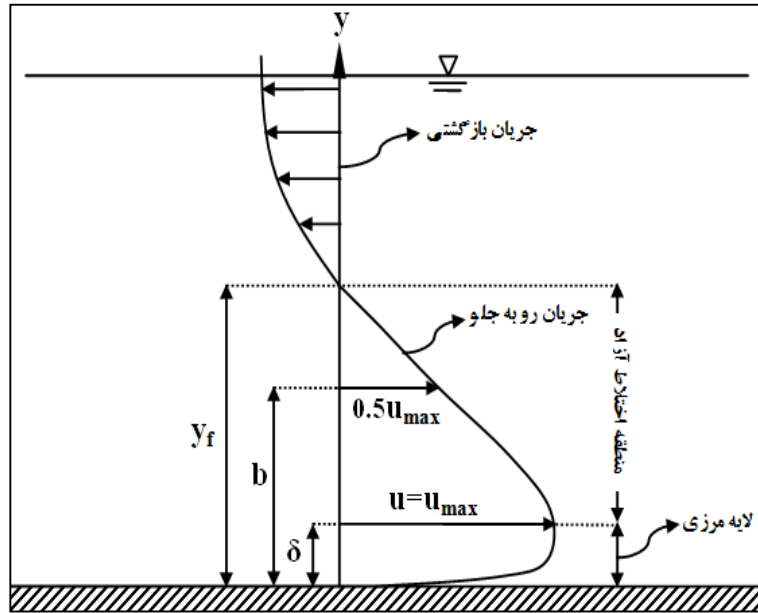
۷-۴-۱- توزیع با بعد سرعت

با رسیدن جریان فوق بحرانی به مقطع اولیه پرش، قسمت فوقانی پرش و دیواره‌های کانال، تحت تاثیر لایه برشی قرار می‌گیرند. در مقطع با سرعت زیاد، سطح بالایی جریان دارای سرعت بیشتر و در نتیجه تنش برشی بیشتری بوده و لایه برشی آزادی را ایجاد می‌کند که سیال را با خود به عقب می‌کشانند. تنش برشی موجود در بستر کانال نیز باعث کندی سرعت جریان در لایه مرزی می‌شود. در نتیجه توزیع سرعت در مقطع واقع در فاصله x از مقطع اولیه پرش مطابق شکل (۴-۱۸) خواهد بود. بدین ترتیب توزیع سرعت دارای دو مقطع متمایز است: یکی در قسمت پایینی بدنه اصلی پرش قرار دارد و جریان در آن به سمت جلو است و دیگری در قسمت بالایی پرش واقع بوده و جریان در آن دارای سرعت منفی است. در جریان رو به جلو^۱ به علت وجود لایه برشی، دبی حجمی بیشتر از دبی حجمی ورودی به مقطع اولیه پرش است. جهت برقراری معادله پیوستگی در قسمت بالایی، جریان بازگشتی^۲ خواهد بود. چنین وضعیتی منجر به پیدایش غلظاب‌ها در پرش هیدرولیکی خواهد شد.

نیمرخ جریان رو به جلو دارای سرعت صفر در جدار کانال و سرعت حداکثر u_{max} در فاصله δ از جدار بوده که به تدریج از مقدار سرعت کاسته می‌شود و در فاصله y_f از جدار دوباره به صفر می‌رسد.

1. Forward flow

2. Reverse flow



شکل ۴-۱۸- نمایش توزیع سرعت در پرش هیدرولیکی

منطقه محدود بین $0 < y < \delta$ "لایه مرزی"^۱ و منطقه محدود بین $\delta < y < y_f$ "منطقه اختلاط آزاد"^۲ نامیده می‌شود. مقدار سرعت جریان در فاصله y از جدار در منطقه لایه مرزی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{u - u_{max}}{u} = f\left(\frac{y}{\delta}\right) \quad (۱ - ۴)$$

که در آن $u = (\tau_0/\rho)^{0.5}$ سرعت برشی است.

در منطقه اختلاط آزاد، مقدار سرعت از رابطه زیر به دست می‌آید (به ازای $y/b > 0.16$):

$$\frac{u_{max}}{u} = f\left(\frac{y}{b}\right) \quad (۲ - ۴)$$

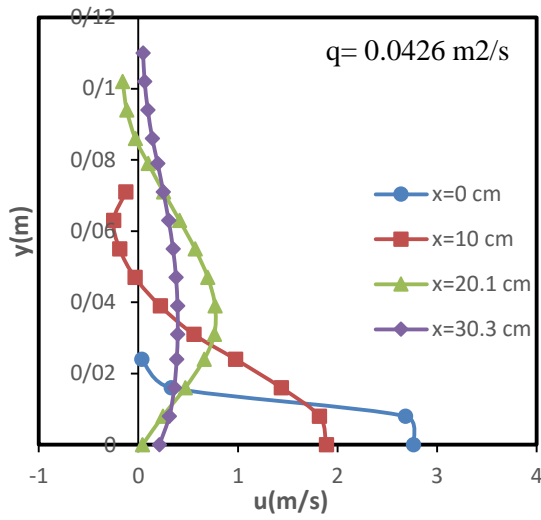
^۱. Boundary Layer
^۲. Free mixing zone

در این رابطه b فاصله‌ای از جدار است که در آن مقدار سرعت برابر با نصف سرعت حداکثر $u = 0.5u_{max}$ می‌باشد. سرعت حداکثر نیز در فاصله $y = \delta = 0.16b$ اتفاق می‌افتد. گفتنی است که نیمرخ بدون بعد سرعت مستقل از مقادیر Fr_1 و X است. مقادیر u_{max} و b نیز از روابط زیر که مستقل از X هستند به دست می‌آیند:

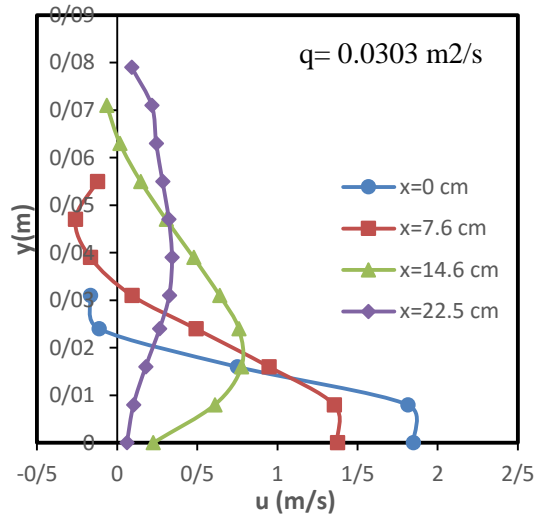
$$\frac{u_{max}}{u_1} = f\left(\frac{x}{y_1}\right) \quad (3-4)$$

$$\frac{\delta_1}{y_1} = f\left(\frac{x}{y_1}\right) \quad (4-4)$$

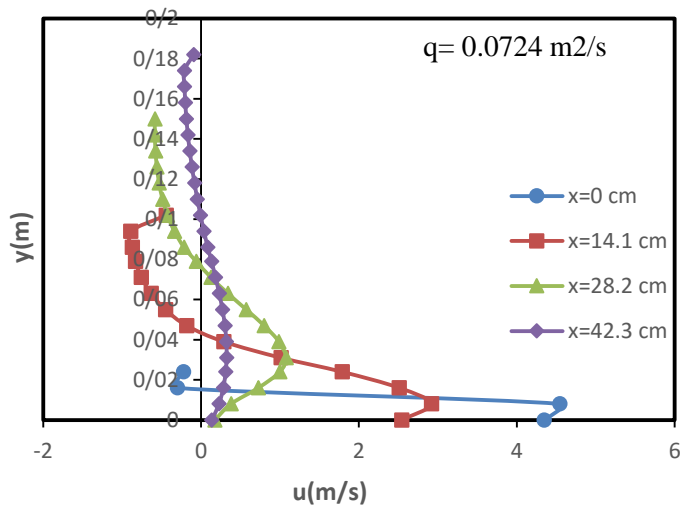
در این تحقیق توزیع سرعت در ۴ مقطع در طول پرش اندازه‌گیری شد. در شکل‌های (۱۹-۴) تا (۲۱-۴) مقادیر توزیع سرعت حاصل از انجام شبیه‌سازی‌ها در فواصل مختلف از ابتدای پرش و به ازای دبی‌های مختلف نشان داده شده است. در این شکل‌ها X ، فاصله از ابتدای پرش است. با توجه به اینکه تنش برشی با افزایش فاصله از ابتدای پرش کاهش و همچنین عمق جریان افزایش می‌یابد، سرعت ماکزیمم در هر مقطع در امتداد پرش کاهش خواهد یافت. همان‌طور که از این شکل‌ها مشخص است تغییرات سرعت در تمام زبری‌ها دارای روند مشابهی است.



(ب)

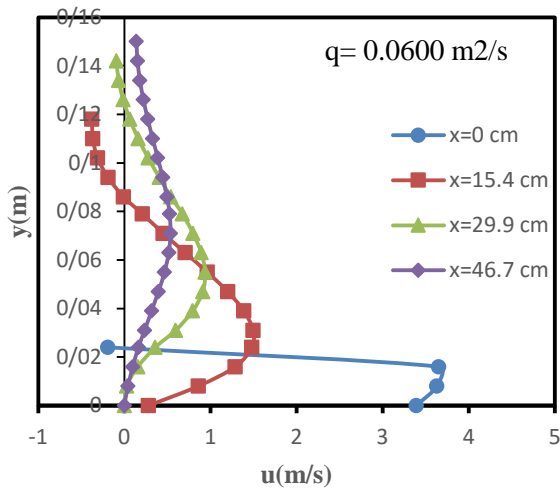


(الف)

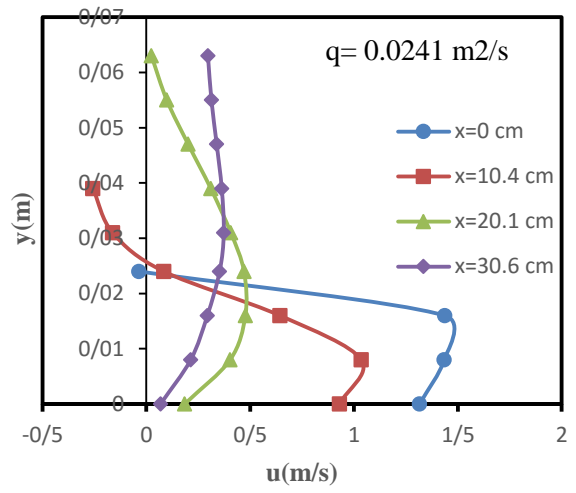


(ج)

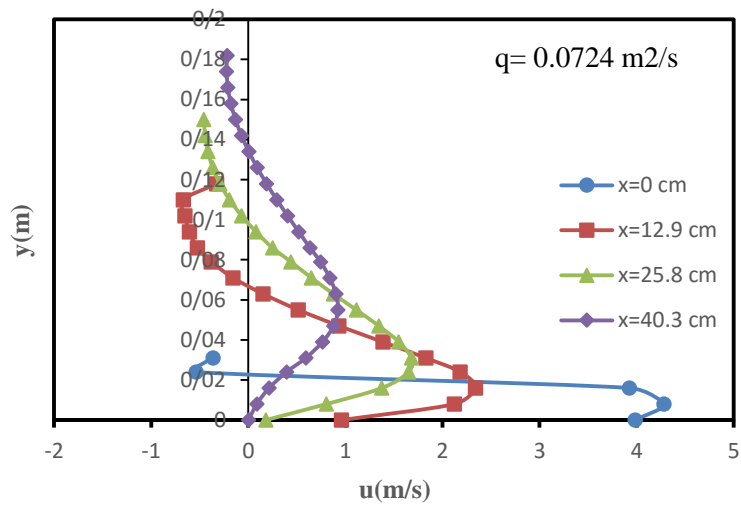
شکل ۴-۱۹- توزیع سرعت در مقاطع مختلف از ابتدای پرش (سری 4s2) (سر ۴-۱۹)



(ب)

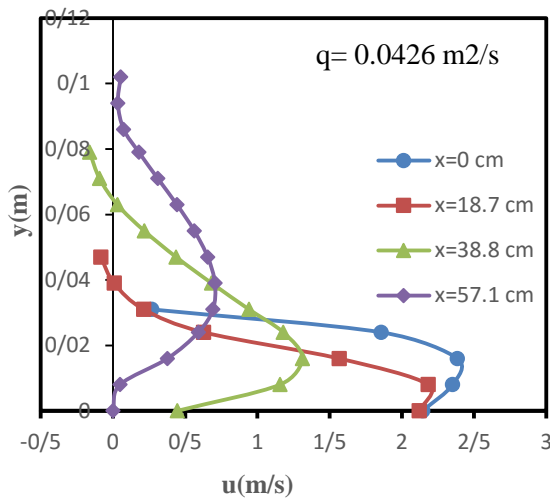


(الف)

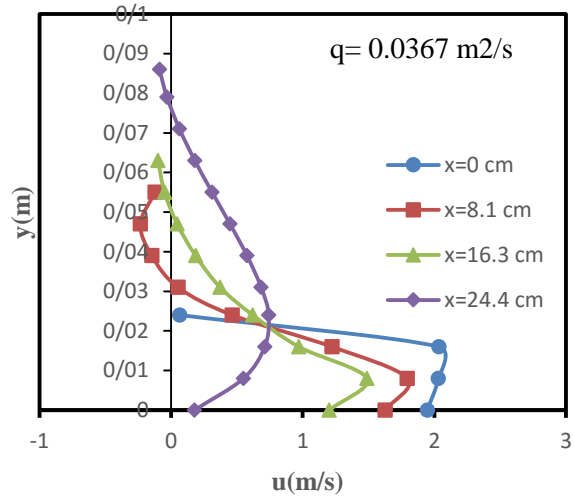


(ج)

شکل ۴-۲۰- توزیع سرعت در مقاطع مختلف از ابتدای پرش (سری 13S6)



(ب)



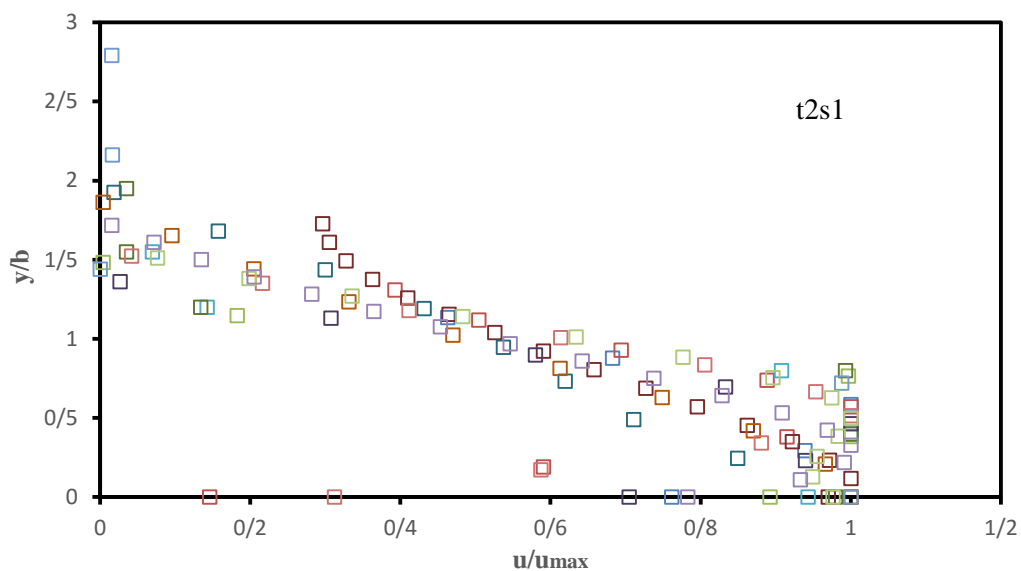
(الف)

شکل ۴-۲۱- توزیع سرعت در مقاطع مختلف از ابتدای پرش (سری 4s6)

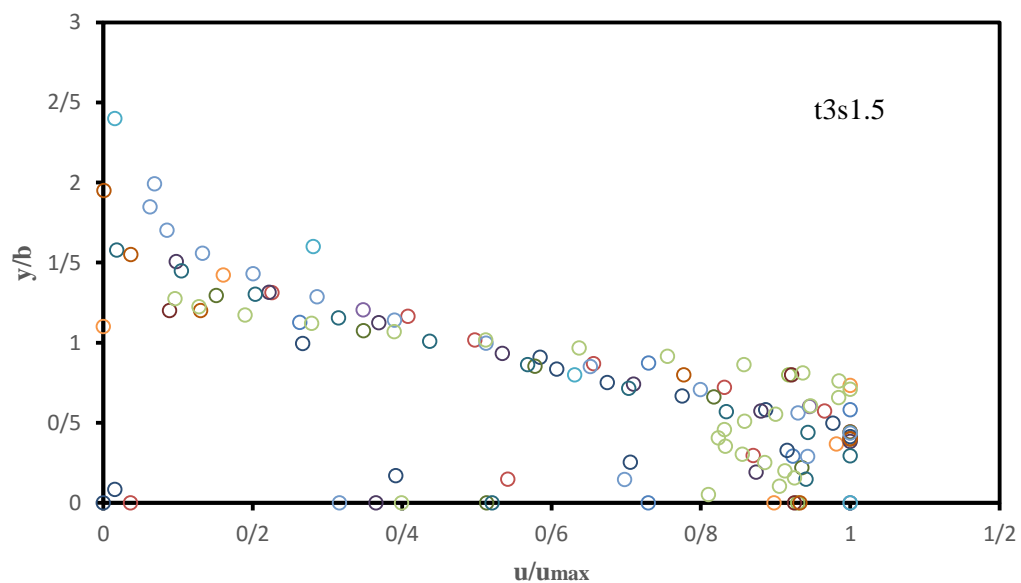
۴-۷-۲- توزیع بی بعد سرعت

با توجه به توضیحات ذکر شده در ابتدای بخش توزیع بی بعد سرعت برای پرش هیدرولیکی با رسم مقادیر y/b در مقابل u/u_{max} در شکل (۴-۲۲) نشان داده شده است. با توجه به شکل، توزیع بدون بعد سرعت در پرش هیدرولیکی برای تمامی اعداد فرود یکسان و مشابه است. همچنین افزایش فاصله و ارتفاع زبری روی بستر باعث کاهش سرعت در نزدیکی بستر، افزایش تنش برشی و در نتیجه افزایش شیب خط توزیع سرعت در نزدیکی بستر می شود. به عبارت دیگر در بستر زبر سرعت ماکزیمم در فاصله بیشتری از بستر رخ خواهد داد که این نشان دهنده افزایش تنش برشی در اثر وجود زبری روی بستر و همچنین افزایش ضخامت لایه درونی توزیع سرعت افقی است. البته این تغییرات بسیار ناچیز است و در شکل های زیر کاملاً مشهود نیست. در شکل (۴-۲۳) توزیع بدون بعد سرعت در پرش هیدرولیکی بر روی تمامی بسترهای زبر شبیه سازی

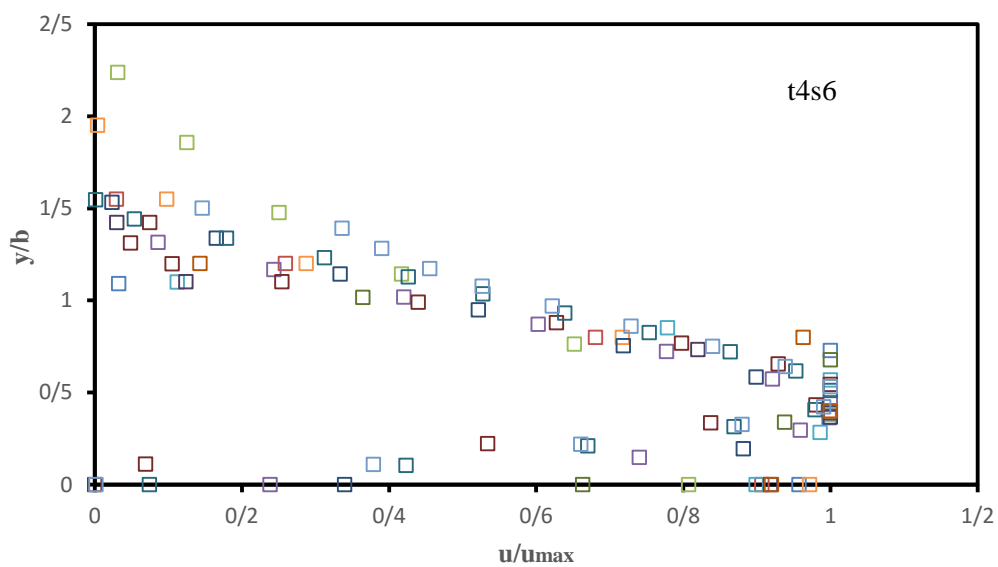
شده در این تحقیق نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود این توزیع برای تمامی شرایط از یک روند ثابت پیروی می کند و تغییر ارتفاع و فاصله زبری اثر قابل توجهی بر توزیع سرعت ندارد.



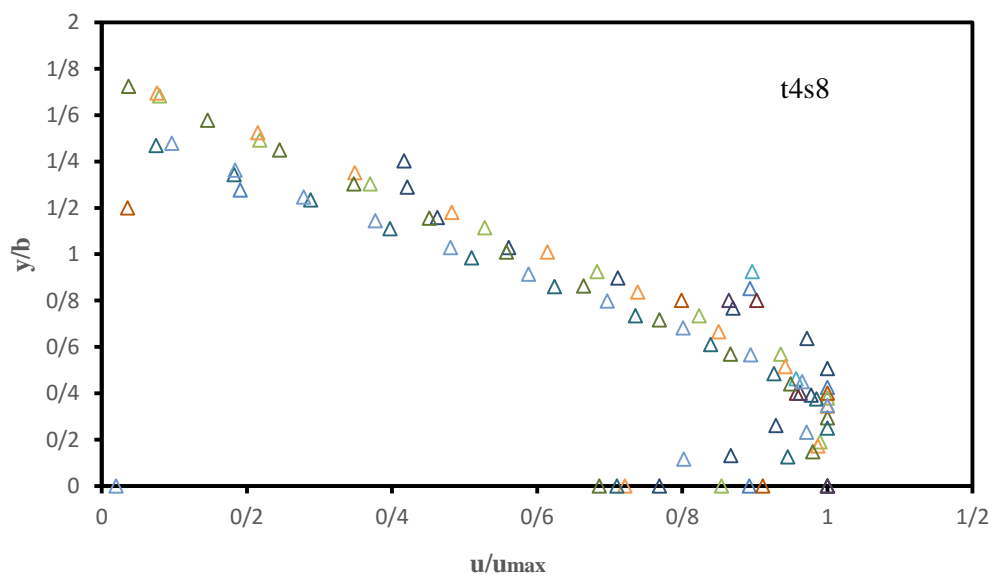
(الف)



(ب)

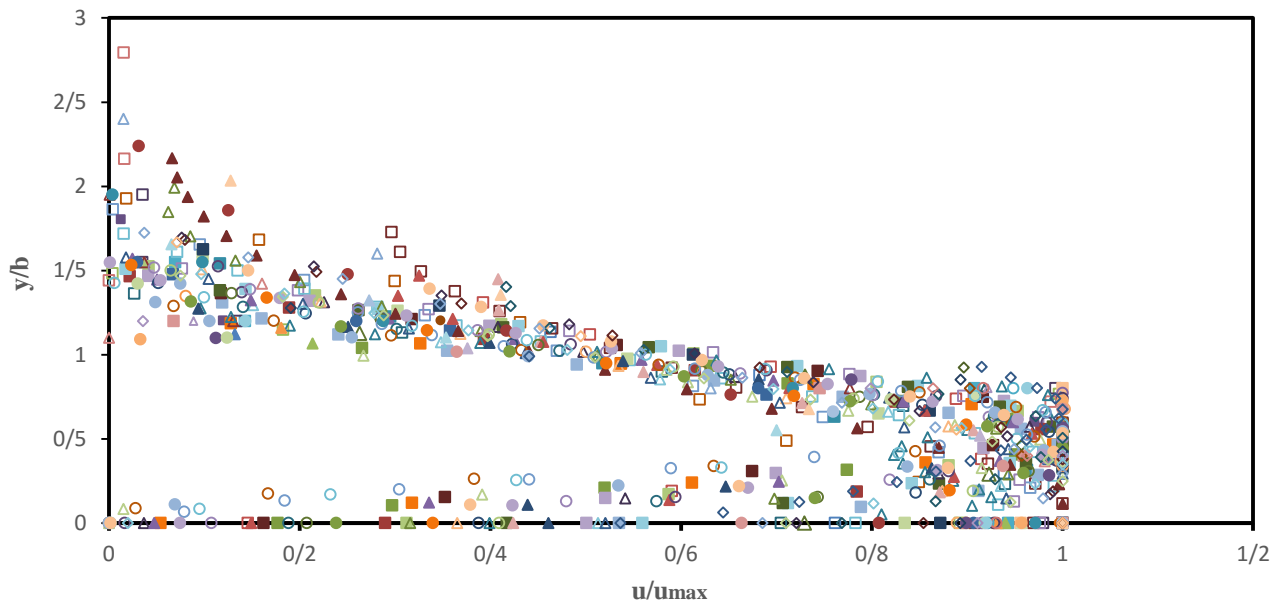


(ج)



(د)

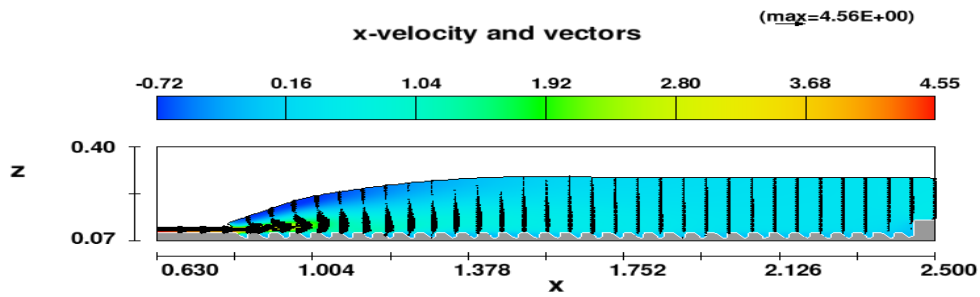
شکل ۴-۲۲- شبیه سازی توزیع بی بعد سرعت برای تمامی اعداد فرود برای بستر زیر الف- t2s1، ب- t3s1.5، ج- t4s6 و د- t4s8



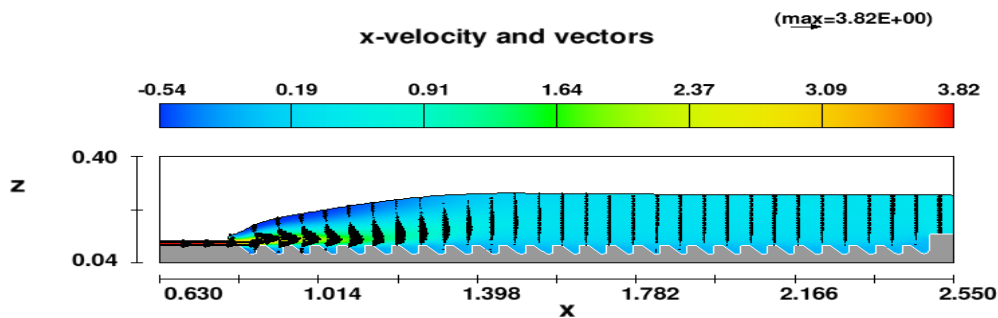
شکل ۴-۲۳- توزیع بدون بعد سرعت در پرش هیدرولیکی بر روی کلیه بسترهای زبر برای تمام اعداد فرود

۴-۷-۳- نتایج دوبعدی سرعت در پرش هیدرولیکی

شکل (۴-۲۴) نتایج دو بعدی از سرعت افقی در پرش هیدرولیکی را نشان می‌دهند. همان‌طور که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود، سرعت با فاصله از جدار ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که سرعت ماکزیمم در هر مقطع از پرش با افزایش فاصله از ابتدای پرش کاهش می‌یابد.



(الف)

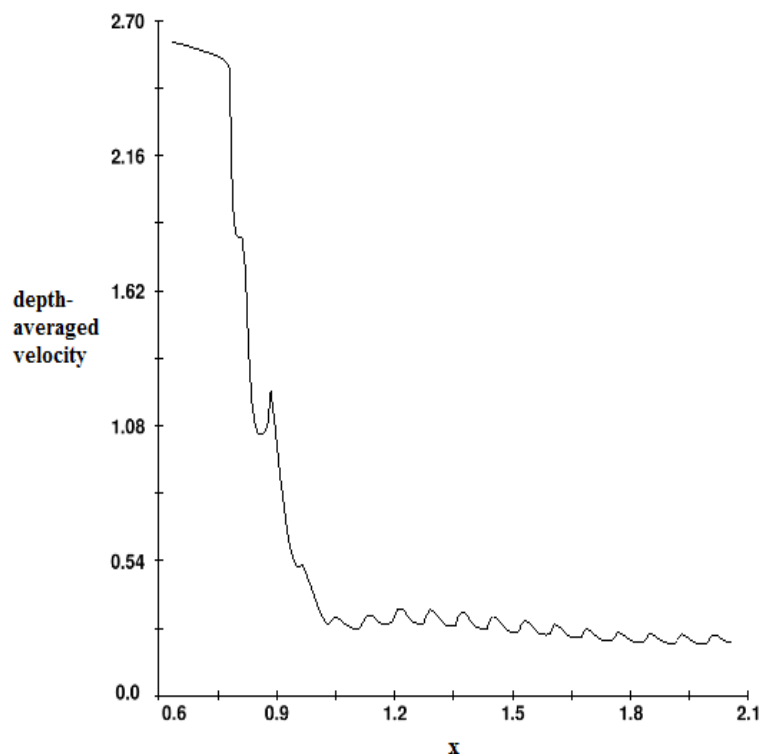


(ب)

شکل ۴-۲۴- سرعت افقی در پرش هیدرولیکی برای آزمون الف- $t=2s$ و ب- $t=1.5s$

۴-۷-۴- پروفیل طولی سرعت

شکل (۴-۲۵) پروفیل طولی سرعت در پرش هیدرولیکی در یک خط ارتفاعی مشخص را برای زبری $t=3s$ (زبری با ارتفاع ۳ و فاصله ۳ سانتیمتر) با عدد فرود $6/6$ نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل زیر مشخص است، سرعت در ابتدای جت ورودی، به علت عبور جریان از زیر دریچه بیشترین مقدار را دارد و با عبور از روی زبری‌ها از مقدار سرعت کاسته می‌شود. این شکل نشان می‌دهد که زبری‌های کف بستر نقش خود را به عنوان استهلاک‌کننده انرژی به خوبی ایفا می‌کنند.



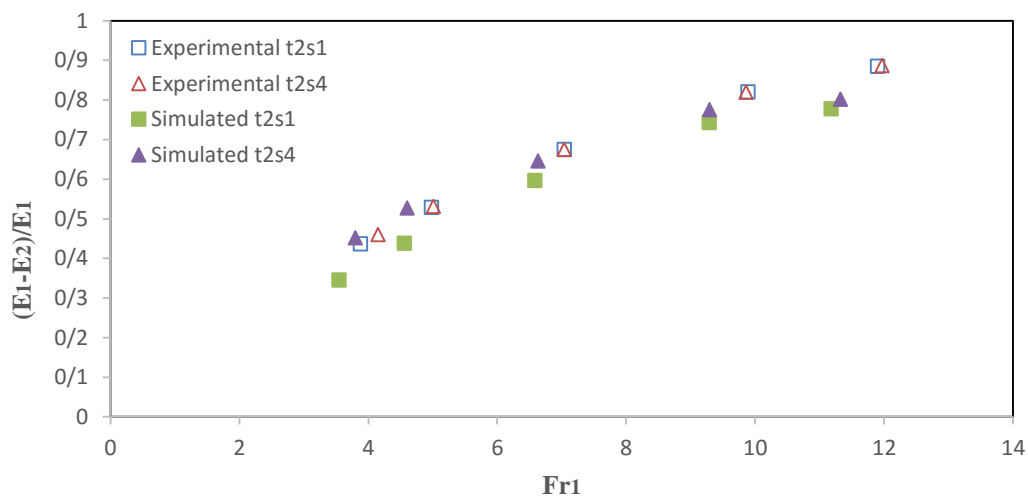
شکل ۴-۲۵- پروفیل طولی سرعت در پرش هیدرولیکی برای زبری t3S3 و فرود ۶/۶

۴-۸- افت انرژی

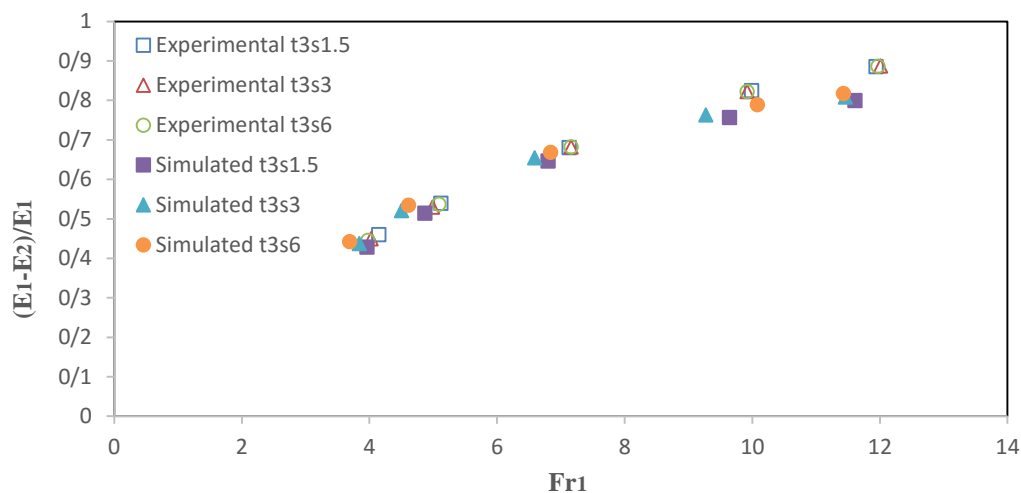
۴-۸-۱- تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر میزان افت انرژی

در شکل (۴-۲۶) تغییرات افت نسبی انرژی در مقابل عدد فرود اولیه برای تمامی بسترهای زبر شبیه‌سازی شده با تغییر فاصله بین زبری‌ها نمایش داده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش دبی، مقدار افت انرژی هم افزایش می‌یابد. با توجه به شکل (الف) که افت انرژی در زبری با ارتفاع ۲ سانتیمتر را نشان می‌دهد، افزایش فاصله بین زبری‌ها از ۱ سانتیمتر تا ۴ سانتیمتر باعث افزایش افت انرژی تا ۱۳ درصد می‌شود. همچنین در زبری با ارتفاع ۴ سانتیمتر که تغییرات افت انرژی مربوط به آن در

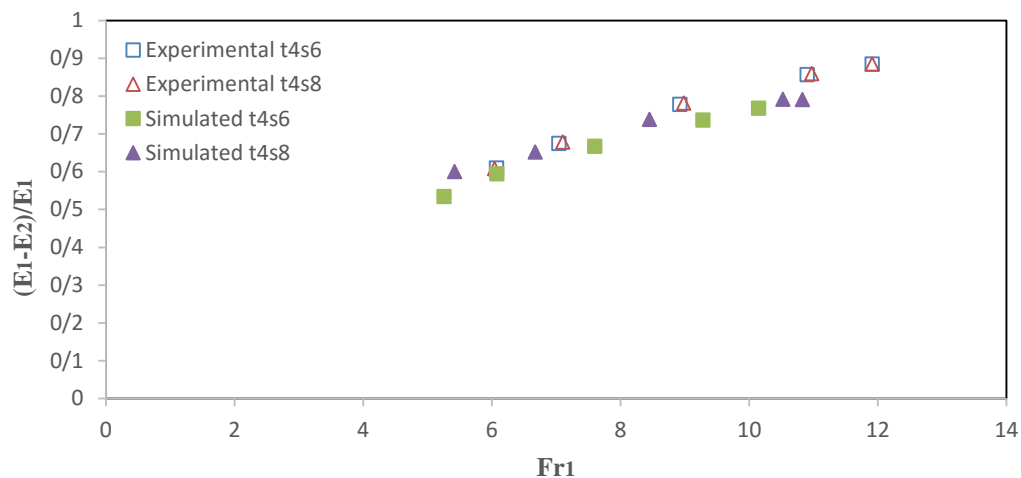
شکل (ج) قابل مشاهده است، در صورت افزایش فاصله زبری‌ها از ۶ سانتیمتر تا ۸ سانتیمتر، شاهد افزایش افت انرژی به میزان ۸/۶ درصد هستیم. همان‌طور که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود با افزایش فاصله بین زبری‌ها، مقدار افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد. همچنین روند تغییرات نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی سازگاری خوبی با هم دارند.



(الف)



(ب)

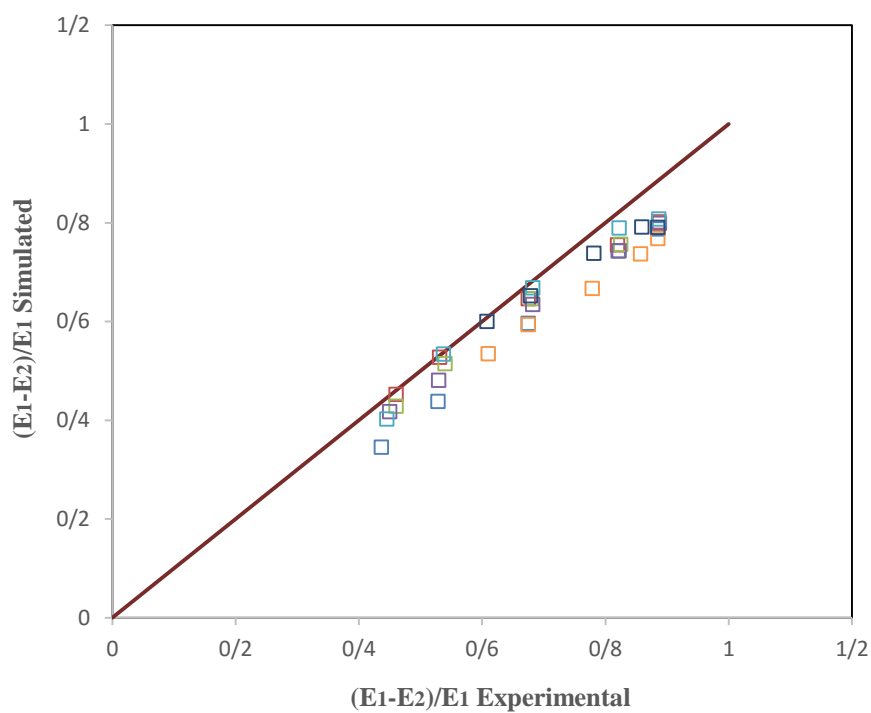


(ج)

شکل ۴-۲۶- شبیه‌سازی تغییرات افت نسبی انرژی در برابر عدد فرود برای فواصل مختلف زبری با ارتفاع الف- ۲ سانتیمتر، ب- ۳ سانتیمتر و ج- ۴ سانتیمتر

۴-۸-۲- مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی تغییرات افت نسبی انرژی

مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایشگاهی افت نسبی انرژی در شکل (۴-۲۷) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج عددی و آزمایشگاهی به نسبت با هم سازگار هستند. اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی افت نسبی انرژی ۸ درصد برآورد شد که خطای موجود را می‌توان به خطاهای نرم‌افزاری نسبت داد. شاخص‌های آماری مشابه بخش‌های قبلی محاسبه شد و نتایج آن‌ها در جدول (۴-۶) نمایش داده شده است. با توجه به این مقادیر می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حل عددی و آزمایشگاهی نسبتاً با هم تطابق دارند و نرم‌افزار توانایی بالایی در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی دارد.



شکل ۴-۲۷- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی تغییرات افت نسبی انرژی

جدول ۴-۶- شاخص‌های آماری برای مقایسه افت نسبی انرژی شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی

NS	d	NRMSE	نوع زبری / شاخص‌های آماری
۰/۸۲۰۱	۰/۹۲۹۲	۰/۱۳۳۸	t2s1
۰/۹۲۵۲	۰/۹۷۷۷	۰/۰۶۶۰	t2s4
۰/۸۸۶۵	۰/۹۶۷۴	۰/۰۸۰۵	t3s1.5
۰/۹۲۴۲	۰/۹۷۷۷	۰/۰۶۸۰	t3s3
۰/۹۵۷۲	۰/۹۸۷۷	۰/۰۵۰۹	t3s6
۰/۹۵۶۴	۰/۷۱۳۱	۰/۱۳۴۹	t4s6
۰/۸۱۲۲	۰/۹۰۳۱	۰/۰۷۴۲	t4s8

۴-۸-۳- درصد افزایش افت انرژی (G%)

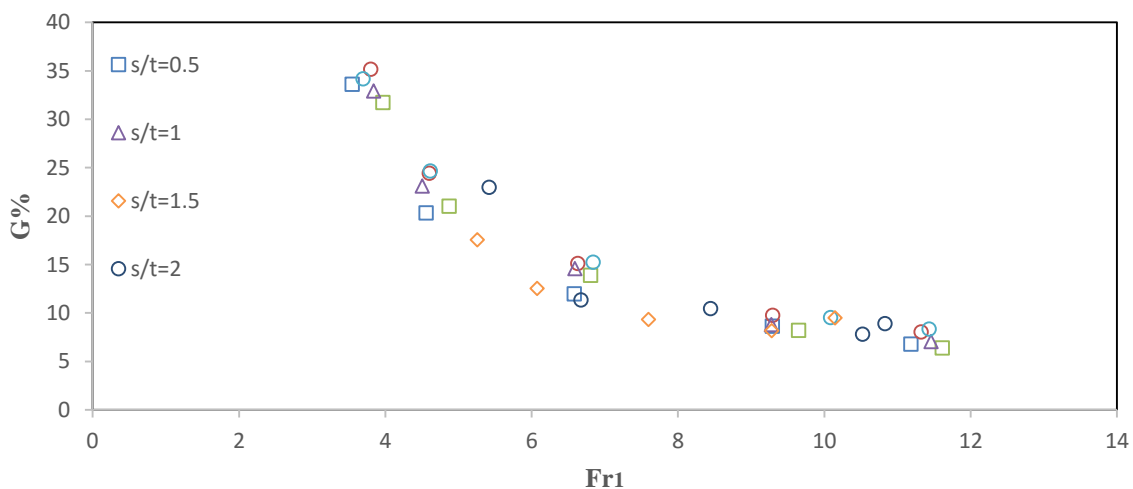
درصد افزایش افت انرژی پرش هیدرولیکی در بستر زبر نسبت به بستر صاف را با پارامتر G% نمایش می‌دهیم که توسط توکیای (۲۰۰۵) به صورت زیر تعریف شد:

$$G = \frac{E_L - E_L^*}{E_L} \times 100 = \frac{(E_2 - E_1) - (E_2^* - E_1)}{(E_2 - E_1)} \times 100 \quad (۴-۵)$$

که E_L افت انرژی در بستر زبر، E_L^* افت انرژی در بستر صاف برای Fr_1 و y_1 مشابه با بستر زبر می‌باشد.

شکل (۴-۲۸) نشان می‌دهد که درصد افزایش افت انرژی در پرش بر روی بسترهای زبر نسبت به بستر صاف با افزایش عدد فرود کاهش می‌یابد. میانگین پارامتر G% برای کلیه شبیه‌سازی‌ها در حدود ۱۳/۵ درصد می‌باشد.

همچنین با مقایسه نتایج افت انرژی بر روی بستر زبر با ارتفاع و فاصله ۳ و ۶ سانتیمتر و بستر صاف مشاهده شد که جریان با دبی $0.241 \text{ m}^3/\text{s}$ نسبت به بستر صاف ۶۶/۷ درصد و جریان با دبی $0.724 \text{ m}^3/\text{s}$ نسبت به بستر صاف ۱۰/۳ درصد افت انرژی دارد.



شکل ۴-۲۸- تغییرات درصد افزایش افت انرژی پرش هیدرولیکی در برابر عدد فرود اولیه برای مقادیر مختلف s/t

فصل پنجم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی عددی خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی سطوح زبر شامل پروفیل سطح آب، نسبت عمق ثانویه، طول پرش، طول ناحیه غلطاب، توزیع سرعت و افت انرژی برای پرش‌های تشکیل شده در حوضچه‌هایی با بلوک‌های یکپارچه دوزنقه‌ای قائم پرداخته شد و نتایج و خروجی‌های استخراج شده از اجراهای نرم‌افزار Flow-3D تجزیه و تحلیل و بررسی شد. گفتنی است به منظور شبیه‌سازی آشفتگی جریان و پرش هیدرولیکی تشکیل شده در حوضچه‌های با بلوک‌های دوزنقه‌ای قائم، از مدل آشفتگی (k-ε) استفاده شد که با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی از دقت خوبی برخوردار است. از این مطالعه نتایج زیر به دست آمد:

- پروفیل‌های بی‌بعد سطح آب برای تمام شبیه‌سازی‌های انجام شده با نرم‌افزار Flow-3D مشابه یکدیگر هستند. این نتیجه در مطالعه آزمایشگاهی نیز به دست آمده بود.
- مقادیر عمق ثانویه نسبی شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی به نسبت با هم سازگار بودند. همچنین نتایج نشان داد که ارتفاع و فاصله زبری‌های بستر موجب کاهش عمق ثانویه برای تمام مقادیر Fr_1 شده و افزایش عدد فرود در بستر زبر این روند را شدت می‌بخشد. همچنین با افزایش ارتفاع و فاصله زبری‌ها، عمق مزدوج نسبی در بستر زبر نسبت به بستر صاف به ازای دبی حداکثر بین ۱۸/۵ تا ۳۱/۱ درصد کاهش یافت.
- مقادیر طول پرش هیدرولیکی شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی تقریباً با هم مطابقت داشتند. همچنین افزایش ارتفاع و فاصله زبری‌ها، مقادیر طول پرش هیدرولیکی را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد و افزایش

عدد فرود این روند را افزایش می‌دهد. همچنین، با افزایش ارتفاع و فاصله بین زبری‌ها طول پرش هیدرولیکی در بستر زبر نسبت به بستر صاف به ازای دبی حداکثر $28/6$ تا $50/1$ درصد کاهش پیدا کرد.

● با افزایش ارتفاع و فاصله بین زبری‌ها، مقادیر طول ناحیه غلطاب به ازای دبی حداکثر تا حدود 54 درصد کاهش یافت. نتایج نشان داد که در بسترهای زبر، پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی جریان در طول بیشتری نسبت به شرایطی که اعداد فرود کمتری اعمال شده است اتفاق می‌افتد. به طوری که در شرایط اعمال کمترین عدد فرود آزمایش‌ها، کمترین طول ناحیه غلطاب و آشفتگی را شاهد خواهیم بود. بنابراین در شرایط اعمال اعداد فرود و دبی‌های زیاد جریان، بایستی ارتفاع و فاصله بین بلوک‌ها را جهت استهلاک کامل انرژی تغییر داد و یا در طراحی‌ها طول حوضچه آرامش را افزایش داد.

● با تحلیل داده‌های سرعت در طول پرش هیدرولیکی مشخص شد با توجه به اینکه تنش برشی با افزایش فاصله از ابتدای پرش کاهش و همچنین عمق جریان افزایش می‌یابد، سرعت ماکزیمم در هر مقطع در امتداد پرش کاهش می‌یابد.

● توزیع بدون بعد سرعت در پرش هیدرولیکی به ازای تمامی اعداد فرود یکسان و مشابه بود. همچنین افزایش ارتفاع و فاصله زبری روی بستر باعث کاهش سرعت در نزدیکی بستر، افزایش تنش برشی و در نتیجه افزایش شیب خط توزیع سرعت در نزدیک بستر می‌شود. به عبارت دیگر در بستر زبر سرعت ماکزیمم در فاصله بیشتری از بستر رخ خواهد داد که این نشان دهنده افزایش تنش برشی در اثر حضور زبری روی کف و همچنین افزایش ضخامت لایه درونی توزیع سرعت افقی است.

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

- در بسترهای زبر افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی ($R_L = E_L/E_1$) با افزایش عدد فرود اولیه افزایش یافت. به ازای اعداد فرود یکسان، افت نسبی انرژی در بسترهای زبر بیشتر از بسترهای صاف است. تغییر ارتفاع و فاصله بین زبری‌ها باعث افزایش مقدار افت نسبی انرژی گردید. به طوری که، در زبری با ارتفاع ۲ سانتیمتر افزایش فاصله بین زبری‌ها از ۱ سانتیمتر تا ۴ سانتیمتر باعث افزایش افت انرژی تا ۱۳ درصد شد.
- این نتایج نشان می‌دهد که زبری‌های نواری که به صورت عمود بر جهت جریان قرار می‌گیرند می‌توانند هنگامی که سرعت جریان زیاد است جایگزین خوبی برای بلوک‌های داخل و انتهایی در حوضچه‌های آرامش باشند.

۵-۲- پیشنهادات

- در این تحقیق به بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های با بلوک‌های دوزنقه‌ای قائم پرداخته شد که پیشنهاد می‌شود مطالعاتی با هندسه‌های دیگر زبری و مقایسه تأثیر شکل‌های مختلف زبری بر روی پرش هیدرولیکی انجام شود.
- بررسی عددی پرش هیدرولیکی از نوع پرش هیدرولیکی مستغرق.
- در این تحقیق به بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D پرداخته شد که پیشنهاد می‌شود از نرم‌افزارها و مدل‌های عددی دیگر از سری CFD همچون نرم‌افزار Fluent نیز بدین منظور استفاده شود.

● در این تحقیق بلوک‌هایی با نسبت فاصله به ارتفاع مختلف ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ جهت بررسی اثر این تغییرات بر مشخصات پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفتند که پیشنهاد می‌شود فاصله بلوک‌های دیگری نیز بدین منظور مورد بررسی قرار گیرد.

● در این تحقیق به شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های با بلوک‌های دوزنقه‌ای قائم با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D و مدل آشفتگی یا تلاطم ($k-\epsilon$) پرداخته شد که پیشنهاد می‌شود مدل‌های آشفتگی دیگر این نرم‌افزار نیز مورد مقایسه قرار بگیرند.

منابع:

- ۱- آسمانی، م. و صالحی نیشابوری، ع.، (۱۳۹۰). شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی و محاسبه نیروی درگ وارد بر بلوک‌های آرام کننده در حوضچه آرامش با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D. دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه گیلان.
- ۲- آصفی، م. و ضیائی، ع.ن.، (۱۳۹۰). شبیه‌سازی عددی دو بعدی پرش هیدرولیکی روی سطوح شیب‌دار معکوس همراه با پله در انتها با نرم‌افزار FLUENT. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ۶ و ۷ اردیبهشت.
- ۳- حسینی، م. و ابریشمی، ج.، (۱۳۹۰). هیدرولیک کانال‌های باز. انتشارات آستان قدس رضوی، دانشگاه امام رضا (ع)، چاپ بیست و هفتم.
- ۴- حسینی، م. مروج، م. و حسینی، ع.، (۱۳۹۲). شبیه‌سازی سه بعدی پرش هیدرولیکی با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف آشفتگی تحت اعداد فرود پایین با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D. سومین کنفرانس بین‌المللی برنامه‌ریزی و مدیریت محیط زیست، دانشگاه تهران.
- ۵- حیدری فهونده، ا. برهمند، ن و جاعل، آ.، (۱۳۹۲). شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای موج‌دار مثلثی شکل. چهارمین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی. دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب. ۶ الی ۸ اسفند ۱۳۹۲.
- ۶- دانش فراز، ر. روحی، ج و روحی، ج.، (۱۳۹۲). بررسی تغییرات اعداد فرود و زاویه واگرایی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش واگرا با استفاده از مدل Flow-3D بر اساس داده‌های آزمایشگاهی. اولین همایش ملی بحران آب.
- ۷- راور، ز.، (۱۳۸۹). بررسی خصوصیات جهش هیدرولیکی بر روی بسترهای زبر با زبری‌های یکپارچه دوزنقه‌ای قائم. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی.
- ۸- شجاعیان، ز و کاشفی پور، م.، (۱۳۹۲). شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش سد مخزنی نمود. نشریه دانش آب و خاک / جلد ۲۳ شماره ۲ صفحه‌های ۲۸۳ تا ۲۹۵.

- ۹- صاحبی، ف. فرسادی زاده، د. اسمعیلی ورکی، م. و عباسپور، ا. (۱۳۹۱). بررسی کارایی مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در مقطع مستطیلی واگرا. نهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، اهواز، دانشگاه شهید چمران.
- ۱۰- صباغ یزدی، س. شاملو، ح. و رستمی، ف. (۱۳۸۷). بررسی عددی جریان در حوضچه آرامش پرش هیدرولیکی با استفاده از روش VOF. دومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برقابی.
- ۱۱- عباسپور، ا. و آیشم، س. (۱۳۹۰). بررسی عددی ساختار تلاطمی پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای صاف با استفاده از مدل تلاطمی RSM. پنجمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک، ۹ الی ۱۰ اسفند ماه، کرمان، انجمن مهندسی آبیاری و آب ایران.
- ۱۲- عباسپور، ا. فرسادی زاده، د. حسین زاده دلیر، ع. و صدرالدینی، ع. (۱۳۸۹). شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار با مدل Fluent. مجله دانش آب و خاک، جلد ۲۰/۱ شماره ۲.
- ۱۳- فرومند، ع. (۱۳۸۸). شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی روی بستر موج با مدل عددی FLUENT. پایان نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد.
- ۱۴- فرومند، ع. اسماعیلی، ک. خدائشناس، س. و نقی ضیائی، ع. (۱۳۸۸). شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی به کمک نرم‌افزار Fluent. اولین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌ها، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران.
- ۱۵- قاسم‌زاده، ف. و کوچک‌زاده، ص. (۱۳۹۲). شبیه‌سازی مسائل هیدرولیکی در FLOW-3D. نوآور، تهران، چاپ دوم.
- ۱۶- قبادیان، ر. (۱۳۹۰). شبیه‌سازی آزمایشگاهی و عددی جریان عبوری از سرریز جانبی در شرایط وجود پرش هیدرولیکی. دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه گیلان.
- ۱۷- کاسی، ا. ج. فرهودی و م. اسمعیلی ورکی. (۱۳۹۱). مطالعه تئوری و آزمایشگاهی جهش هیدرولیکی واگرا با شیب کف معکوس. مجله پژوهش آب ایران، سال پنجم/ شماره نهم/ پاییز و زمستان ۱۳۹۰ (۱۲۱-۱۳۰).
- ۱۸- کاهه، م. و دهقانی، ا. (۱۳۹۲). شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی سطوح موج‌دار. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد بیستم، شماره پنجم، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

- ۱۹- کریمی، ر.، اقبالزاده، ا. و جوان، م. (۱۳۸۹). مقایسه مدل‌های آشفتگی مختلف جهت شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در پایین‌دست دریاچه. نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۸ تا ۲۰ آبان، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۲۰- کریمی، ر. میناتور، ی. اقبالزاده، ا. و جوان، م. (۱۳۹۰). مقایسه مدل‌های چند فازی در شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی پایین‌دست دریاچه. چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران.
- ۲۱- گرد نوشهری، ا. و امید، م. ح. و کوچک زاده، ص. (۱۳۸۹). اثر آستانه لبه پهن بر روی مشخصات جهش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش واگرا، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، (۴۱) ۱، (۷۹-۸۵).
- ۲۲- معینی، ح. و بنکداری، ح. (۱۳۹۳). بررسی عددی پرش هیدرولیکی روی سطح شیب‌دار معکوس همراه با پله در انتها با استفاده از مدل‌های آشفتگی و چند فازی مختلف. سیزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه تبریز، دانشکده کشاورزی. گروه مهندسی آب.
- ۲۳- نصر اصفهانی، م. شفاعی بجستان، م. کاشفی‌پور، م. و فتحی مقدم، م.، (۱۳۹۲). بررسی عددی و آزمایشگاهی پرش آبی نوع B در حوضچه آرامش با پله ناگهانی و بستر زیر. مجله مهندسی منابع آب، سال ششم.
- ۲۴- هوشمندزاده، م.، (۱۳۸۷). برآورد طول پرش هیدرولیکی و تعیین نیمرخ سطح آب با استفاده از تئوری ورود هوا به درون پرش هیدرولیکی و مدل‌سازی عددی آن.

25. 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.

26. Belanger, J. B., (1828). Essai Sur la Solution Numérique de Quelques Problèmes Relatifs au Mouvement Permanent des Eaux Courantes. Carilian-Goeury, Paris, France (in French).

27. Belanger, J. B. 1828. Essay on numerical solution of some problems relative to Steady flow of water. Carilian- Goeury, Paris, France.

28. Chanson, H., and Brattberg, T. (2000). "Experimental Study of the Air-Water Shear Flow in a Hydraulic Jump. "Intl JI of Multiphase Flow, Vol. 26 No.4, pp. 583-607 (ISSN 0301-9322).
29. Chanson H and Chacherau Y, 2011. Bubbly flow measurements in hydraulic jumps with small inflow Froude Numbers. International Journal of Multiphase Flow, 37(6): 555-564.
30. Ead, S.A., and Rajaratnam, N. 2002a. Hydraulic jumps on corrugated beds. J. Hydr. Engin. ASCE. 128: 7. 656-663.
31. Ead, S.A., Rajaratnam, N., Katopodis, C., and Ade, F. 2000. Turbulent openchannel flow in circular corrugated culverts. J. Hydraul. Eng. 126: 10. 750-757.
32. Elsebaie I.H.and Shabayek Sh.2010. Formation of hydraulic jumps on corrugated beds.civil & Environmental Engineering 10(1): 40- 45.
33. Gharangik, A.M. and Chaudhry, M.H, 1991. Numerical model of hydraulic jump. J. of Hydraulic Engineering ASCE 117: 1195-1209.
34. González, A.E., and Bombardelli, F.A. 2005. Two-phase-flow theoretical and numerical models for hydraulic jumps including air entrainment. Proc. 31st Biennia/JAHR Congress, Seoul, Korea, B.H. Jun, S.I. Lee, I. W. Seo and G. W. Choi, Editors (CD-ROM).
35. Gunal, M., and Narayanan, R. 1998. K- ϵ turbulence modeling of submerged hydraulic jump using boundary-fitted coordinates. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Water maritime and energy. 130: 2. 104-114.
36. Hager, W.H. 1992. Energy dissipators and hydraulic jump. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. Pp: 185-224.
37. Hughes, W.C., and Flack, J.E. 1984. Hydraulic jump properties over a rough bed. J. Hydraul. Eng. 110: 12. 1755-1771.
38. Izadjoo, F., and Shafai-Bajestan, M. 2007. Corrugated Bed Hydraulic Jump Stilling Basin. J. Appl. Sci. 7: 8. 1164-1169.
39. Jose Carlos C Amorim , Rentana C Rodriques , Marcelo G Marques., 2010; "A numerical and experimental study of hydraulic jump stilling basin" advances in hydraulic and engineering , Volume VI.

40. Liu, M. Rajaratnam, N. and Zhu, D., Turbulence Structure of hydraulic jumps of low Froude number, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 130, No. 6, June 2004, pp. 512-520.
41. Long, D., P. M. Steffler and N. Rajaratnam (1991). «A numerical study of submerged hydraulic jumps.» *Journal of Hydraulic Research* 29(3), pp. 293-308.
42. Nakato, T., (2000), “Model Tests of Hydraulic Performance of Pit 6 Dam Stilling Basin” *J. Hydr. Eng.*, Vol. 126, No. 9, pp 638-652.
43. Nasr Esfahani, M.J, and M. Shafai Bajestan. 2012. Design of stilling basins using artificial roughness. *J. Civil Eng. and Urban. (JCEU)* 2: 131-135.
44. Rajaratnam, N. 1965. The hydraulic jump as a wall jet. *J. Hydraulic. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 91: 5. 107-132.
45. Romangnoli, M., Portapila, M., and Morvan, Y.H. 2009. Simulacion Computacional Del Resalto Hidraulico. *Mecanica Computacional VOL XXVII*: 1661-1672. (in Spain).
46. 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 12th WSEAS International Conference on Applied Mathematics*. Stevens Point, Wisconsin, USA. Pp: 168-174.
47. Saeedpanah, A., Kavianpour, M., and Hamedi, M.H. 2001. Mathematical Modeling of hydraulic jumps. 3th Iranian Hydraulic Association, School of Civil Engineering, Tehran University, Tehran-Iran, Pp: 190-198.
48. Sarker, M.A., and D.G. Rhodes. 2002. Physical modeling and CFD applied to hydraulic jump. *Cranfield University Report*.
49. Svendsen, I. A., Veeramony, J., Bakunin, J. and Kirby, J. T., (2000), “The flow in weak turbulent hydraulic jump,” *Journal of Fluid Mechanics*, 418, pp 25-57.
50. Tokyay, N.D. 2005. Effect of Channel Bed Corrugations on Hydraulic Jumps. *Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress*. Anchorage, Alaska, United States, Pp: 1-9.
51. Tokyay, N. D., (2005). Effect of Channel Bed Corrugations on Hydraulic Jumps. In: *Impacts of Global Climates Change Conference*, EWRI, May, Anchorage, Alaska, USA, pp. 408-416. Doi: 1.1061/40792(173)408.

52. 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): 475-481.
53. 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): 171-184.
54. Yoo M, Chen Y and Zhou Q, 2000. Case study of an s-shape spillway using physical and numerical models. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 132(9): 892-898.
55. Zhao Q and Misra SK, 2004. Numerical study of a turbulent hydraulic jump pp. 78-85. *17. Engineering Mechanics conference, University of Delaware, New York.*
56. Romagnoli, M., Portapila, M., and Morvan, Y.H. 2009. Simulacion Computacional Del Resalto Hidraulico. *Mecanica Computacional VOL XXVII*: 1661-1672. (in Spain)
57. Zobeyer, A.T.M., Jahan, N., Islama, Z., Singh, G. and Rajaratnama, N., 2010. Turbulence characteristics of the transition region from hydraulic jump to open channel flow. *J. of Hydraulic Research*, 48: 3, 395 – 399.

Abstract

To prevent damage brought about by high energy of water in supercritical streams and also to get rid of excess kinetic energy in the streams, structures such as energy dissipators in the downstream of the flow. Stilling basins is a good example of dissipators structures that can be formed in which the hydraulic jump stilling basins and ponds annexes performance, reduce the amount of energy available. In the present work, hydraulic jump on the rough levels with the integrated trapezoidal blocks using the software flow-3d and a $k-\epsilon$ model were simulated. Forty numerical experiments with different discharges in ranging Froude numbers from 3/88 to 12/01 with an initial depth, 55.1cm, was implemented. Our results indicated that the current profile in the hydraulic jump for all the simulations conducted with the use of flow-3d software are the same. Also, the comparison of numerical and experimental results showed that the sequent depth ratio amounts, length of hydraulic jump and roller length simulated and experimental are relatively compatible with each other. Additionally, the sequent depth ratio was reduced by increasing the distance between the roughness reduced by 10 percent, also, the hydraulic jump length and roller length as well as increasing distance between the roughness were reduced (6.4 to 22.8 for hydraulic jump length). Distribution without the speed dimension in the hydraulic jump for all Froude numbers was the same. Increasing distance and height the roughness not only reduced the speed near the bed but also increased shear stress and the velocity distribution slope near the bed. In rough substrates, relative energy loss are increased by raising the Froude number.

Relative energy loss in rough substrates are more than of flat substrates in the same Froude number. Change the height and the distance between the roughness increases the amount of relative energy loss.

Keywords: hydraulic jump, rough levels, software flow-3d, model $k-\epsilon$, sequent depth, hydraulic jump length, roller length, velocity distribution, relative energy loss.



Faculty of Agriculture Engineering
Department of Water and Soil

**Numerical simulation of hydraulic jump on rough surfaces by
using Flow-3D model**

Nasrin Samadi

Supervisor

Dr. Khalil Azhdari

Advisors

Dr. Samad Emamgholizadeh

Firouz Ghasemzadeh

February 2016