

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده کشاورزی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه های آبی

کنترل پرش هیدرولیکی با اعمال زبری های مختلف در کانال های مستطیلی با شیب معکوس

نگارنده: زهره اسمعیل زاده

استاد راهنما:

دکتر خلیل اژدری

استاد مشاور:

دکتر سید حسین حسینی

شهریور ۹۷

شماره: ۱۹۵  
تاریخ: ۳۹۷ / ۷ / ۷

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خاتم زهره اسمعیل زاده با شماره دانشجویی ۹۴۳۷۱۴۴ رشته مهندسی آب گزارش سازه‌های آبی تحت عنوان کنترل پرش هیدرولیکی با اعمال زبری‌های مختلف در کانال‌های مستطیلی با شیب معکوس که در تاریخ ۱۹/۰۶/۹۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: عالی)  - مردود   
نوع تحقیق: نظری  عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر خلیل ازدری	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور	دکتر سید حسین حسینی	استادیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر علی عباسپور		
۵- استاد ممتحن اول	دکتر صمد امامقلی زاده	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر زهرا گنجی نوروزی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمدرضا عامریان



توضیح: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در صورتی که تحصیل) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم نامه:

شکر شایان شمار ایند منان که توفیق رارفتی راهم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم.

تقدیم به همسر:

به پاس قدردانی از قلبی آکنده از عشق و معرفت که محیطی سرشار از سلامت و امنیت و آرامش و آسایش برای

من فراهم آورده است و در تمام مراحل تحصیل همراه من بوده است.

تقدیم به خانواده ام:

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان میسایم و از

ریشه آن ها شاخ و برگ گیرم و در سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم، برادر و خواهرم بهر انان

همیشگی و پشتوانه های زندگیم.

## شکر و قدردانی

سپاس و ستایش میکران خدایی را که به بید قدرت بی‌منتهایش دریای آفرینش را جاری کرد و به ارده ازلی اش همه خلق را صورت بخشید، هر کس را در سایه ارده اش به راهی راهو گردانید و آتش عشق خود را در وجودشان برانگیخت. اینک در آستانه راهی نو که در پرتو الطاف آفریدگار یکتا مکارش این پایان نامه به اتمام رسید بر خود لازم می دانم از کیهی عزیزانی که در طول دوران تحصیل زمینی رشد و ترقی اینجانب را فراهم نمودند، شکر نمایم. امیدوارم بتوانم سهمی هرچند اندک، در راه توسعه علمی ایران عزیز بردارم که چو ایران نباشد، تن من مباد.

از استاد راهنمای فرزانه و گرانقدرم جناب آقای دکتر خلیل اژدری که چه در طی دوران تحصیل و چه در انجام این تحقیق از راهنمایی های ارزشمند و بی دریغشان بهره مند بوده ام کمال شکر و قدردانی را دارم.

از استاد مشاور فرهیخته و ارجمندم جناب آقای دکتر سید حسین حسینی، که در کیهی مراحل انجام این رساله با کمک ها و راهنمایی های بی چشمداشت خود مرا یاری و بسیاری از سختی ها را بر ایمن آسان تر نمودند کمال شکر را دارم چرا که بدون راهنمایی های ایشان تأمین این پایان نامه بسیار مشکل می نمود.

از اساتید محترم جناب آقای دکتر صد اما متقی زاده و سرکار خانم دکتر زهرا گنجی نوروزی که زحمت داوری این پایان نامه را تقبل نمودند، نهایت شکر و سپاس را دارم.

از جناب آقای مهندس حسن گلی کارشناس آزمایشگاه هیدرولیک، به خاطر همکاری و همکاری های مستمر و مفیدی که در انجام آزمایشات این پژوهش داشتند کمال تشکر را دارم.

در پایان از زحمات و پشتیبانی خانواده ام که همیشه همراه و مشوق را هم بوده اند از صمیم قلب تشکر می نمایم.

از همسر م که در تمام مراحل زندگی، تحصیل و پروسه تکمیل پایان نامه همواره همراه و به کام اینجانب بوده و از هیچ تلاشی فروگذار نکرده، کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم.

زهره اسمعیل زاده

شهریور ۱۳۹۷

## تعهد نامه

اینجانب زهره اسمعیل زاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته سازه های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کنترل پرش هیدرولیکی با اعمال زبری های مختلف در کانال های مستطیلی با شیب معکوس تحت راهنمایی آقای دکتر خلیل اژدری متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

### تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

## چکیده

پرش هیدرولیکی نقش مؤثری در استهلاک انرژی جنبشی جریان در پایین دست سازه‌های آبی در حوضچه‌های آرامش ایفا می‌کند. زبری کف حوضچه و شیب معکوس عامل مهمی در کاهش طول و عمق ثانویه و نیز افزایش افت انرژی توسط پرش هیدرولیکی می‌باشند. در این مطالعه اثر فاصله زبری‌های مثلثی و شیب کف معکوس در کانال بر روی مشخصات پرش آبی به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها بر روی بستر صاف و بستر موج‌دار مثلثی با فاصله صفر و ۲ سانتی‌متر و همچنین اعمال سه نوع شیب معکوس در فلومی با مقطع مستطیلی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود بررسی و سپس مدل‌سازی در نرم افزار فلوئنت انجام شد. فلوم دارای عرض ۰/۰۸ متر و عمق ۰/۳ متر و طول ۵ متر بود. ۴۵ آزمایش در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۱۱ انجام شد. در همه آزمایش‌ها مشخصات اصلی پرش هیدرولیکی شامل عمق اولیه و ثانویه پرش و طول پرش اندازه‌گیری شد و همچنین پارامترهای هیدرولیکی به صورت تابعی از عدد فرود تعیین شد. سپس پرش هیدرولیکی با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد و به کارگیری نرم‌افزار دینامیک محاسباتی فلوئنت به صورت دوبعدی شبیه‌سازی گردید. مقایسه نتایج به دست آمده نشان داد عمق ثانویه و طول جهش آبی در بستر زبر با شیب معکوس نسبت به بستر صاف و بدون شیب، به‌طور متوسط به ترتیب ۱۲ و ۱۴ درصد کاهش داشته‌اند. همچنین افت انرژی افزایش می‌یابد که با افزایش عدد فرود این روند شدیدتر می‌گردد و به‌طور متوسط افزایش ۱۳ درصد را نشان می‌دهد. پروفیل‌های بی‌بعد سطح آب از یکنواختی چشمگیری برخوردار و برهم منطبق می‌باشند و می‌توان آن‌ها را به صورت یک منحنی بی‌بعد نمایش داد. نتایج نشان داد که مدل استفاده‌شده برای پیش‌بینی پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی روی بستر زبر مثلثی شکل مناسب بوده و خطای نسبی متوسط مقادیر سطح آب به دست آمده از مدل‌های عددی و اندازه‌گیری شده ۲ تا ۷ درصد است.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، جزء حجم سیال، مدل آشفتگی  $k-\epsilon$ ، زبری مثلثی، شیب معکوس، فلوئنت



## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- " بررسی آزمایشگاهی کنترل پرش هیدرولیکی در کانال های مستطیلی با شیب معکوس و اعمال زبری مثلثی "

زهره اسمعیل زاده، خلیل اژدری، سید حسین حسینی، پنجمین کنگره بین المللی عمران، معماری و شهرسازی، ۵ دی لغایت ۷ دی ماه ۱۳۹۶، دانشگاه شهید بهشتی تهران.

# فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل ۱ (مقدمه وهدف) .....
۱-۱-۱	مقدمه .....
۲-۱	ضرورت انجام تحقیق .....
۳-۱	هدف از انجام تحقیق .....
۴-۱	روش انجام تحقیق .....
۵-۱	اشاره به مطالب فصل‌های پایان‌نامه .....
۵	فصل ۲ (مبانی و مروری بر مطالعات پیشین) .....
۲-۲	مقدمه .....
۱-۲-۱	مبانی .....
۱-۱-۲	سازه‌های مستهلک کننده انرژی .....
۲-۱-۲	پرش هیدرولیکی .....
۳-۱-۲	خصوصیات پرش هیدرولیکی .....
۴-۱-۲	کاربردهای پرش هیدرولیکی .....
۲-۲-۱	اصول و مبانی نظری مدل‌سازی عددی .....
۱-۲-۲	مبانی .....
۲-۲-۲	جریان آشفته .....
۳-۲-۲	مدل‌های شبیه‌سازی چند فازی .....
۴-۲-۲	مدل k-E .....
۱-۴-۲-۲	مدل k-E استاندارد .....
۵-۲-۲	مدل حجم سیال .....
۳-۲-۳	مروری بر مطالعات گذشته .....
۱-۳-۲	مطالعات انجام شده در زمینه پرش هیدرولیکی روی بستر صاف و زبر .....
۲-۳-۲	مطالعات انجام شده در زمینه پرش هیدرولیکی روی سطوح با شیب معکوس و اعمال زبری .....
۳-۳-۲	مطالعات عددی انجام شده در زمینه پرش هیدرولیکی روی بستر صاف و زبر و همچنین اعمال شیب معکوس .....

۲۷	فصل ۳ (مواد و روش‌ها)
۲۸	۱-۳-۱ مقدمه
۲۸	۲-۳-۲ فلوم آزمایشگاهی
۳۰	۳-۳-۳ آنالیز ابعادی
۳۳	۴-۳-۴ معرفی و کاربرد مدل فلوئنت
۳۴	۱-۴-۳ مراحل کاری در فلوئنت
۳۵	۵-۳-۵ مراحل کاری در مرحله نرم‌افزاری در تحقیق حاضر
۳۵	۱-۵-۳-۱ تعریف محدوده هندسی
۳۶	۲-۵-۳-۲ ایجاد شبکه
۳۶	۳-۵-۳-۳ تعریف شرایط مرزی
۳۷	۴-۵-۳-۴ تعریف دوبعدی یا سه‌بعدی بودن فضای جریان
۳۷	۵-۵-۳-۵ تنظیمات عمومی
۳۷	۶-۵-۳-۶ تنظیمات مدل‌ها
۳۸	۷-۵-۳-۷ تعیین نوع مواد
۳۸	۸-۵-۳-۸ تحلیل یا عدم تحلیل انرژی حرارتی
۳۸	۹-۵-۳-۹ تراکم پذیر یا تراکم ناپذیر بودن جریان
۳۸	۱۰-۵-۳-۱۰ تنظیمات شرایط مرزی
۳۹	۱۱-۵-۳-۱۱ مرحله پردازش شبیه‌سازی
۴۰	۶-۳-۶-۱ شاخص‌های آماری
۴۰	۱-۶-۳-۱ خطای میانگین مجزور مربعات (RMSE)
۴۰	۲-۶-۳-۲ خطای میانگین مجزور مربعات نرمال شده (NRMSE)
۴۱	۳-۶-۳-۳ ضریب همبستگی (d)
۴۱	۴-۶-۳-۴ ضریب نش سات کلیف (NS)
۴۳	فصل ۴ (نتایج و بحث)
۴۴	۱-۴-۱ مقدمه
۴۴	۲-۴-۲ بررسی نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی
۴۴	۱-۴-۲-۱ تأثیر فاصله زبری بر نسبت اعماق پرش
۴۵	۲-۴-۲-۲ تأثیر فاصله زبری بر طول پرش
۴۵	۳-۴-۲-۳ تأثیر فاصله زبری بر افت انرژی
۴۶	۴-۴-۲-۴ تأثیر شیب معکوس بر نسبت اعماق پرش

۴۷.....	۵-۲-۴- تأثیر شیب معکوس بر طول پرش.....
۴۷.....	۶-۲-۴- تأثیر شیب معکوس بر افت انرژی.....
۴۸.....	۷-۲-۴- تغییرات $\frac{y_2}{y_1}$ در برابر عدد فرود.....
۴۹.....	۸-۲-۴- تغییرات طول پرش در برابر عدد فرود.....
۵۰.....	۹-۲-۴- بررسی تغییرات $\frac{\Delta E}{E_1}$ در برابر عدد فرود.....
۵۲.....	۱۰-۲-۴- بررسی اعماق پرش در برابر عدد فرود در سطح با زبری فاصله صفر.....
۵۲.....	۱۱-۲-۴- بررسی طول پرش در برابر عدد فرود در سطح با زبری فاصله صفر.....
۵۳.....	۱۲-۲-۴- بررسی افت انرژی پرش در برابر عدد فرود در سطح با زبری فاصله صفر.....
۵۴.....	۱۳-۲-۴- بررسی نسبت اعماق پرش در برابر عدد فرود در سطح با زبری فاصله دو.....
۵۵.....	۱۴-۲-۴- بررسی طول پرش در برابر عدد فرود در سطح با زبری فاصله دو.....
۵۵.....	۱۵-۲-۴- بررسی افت انرژی در برابر عدد فرود در سطح با زبری فاصله دو.....
۵۶.....	۳-۴- بررسی پروفیل سطح آب.....
۵۶.....	۱-۳-۴- تأثیر دبی جریان بر روی پروفیل سطح آب.....
۵۷.....	۲-۳-۴- تأثیر شیب معکوس بر روی پروفیل سطح آب.....
۵۸.....	۳-۳-۴- تأثیر زبری مثلثی بر روی پروفیل سطح آب.....
۶۰.....	۴-۴- نتیجه‌گیری از بررسی آزمایشگاهی.....
۶۰.....	۵-۴- بررسی نتایج شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت.....
۶۰.....	۱-۵-۴- مقدمه در مورد شبیه‌سازی عددی.....
۶۱.....	۲-۵-۴- صحت‌سنجی نرم‌افزار فلوئنت.....
۶۳.....	۳-۵-۴- نتایج حاصل از بررسی آزمایشگاهی و عددی مدل‌های منتخب.....
۶۴.....	۴-۵-۴- مقایسه پروفیل‌های سطح آب آزمایشگاهی و عددی.....
۷۲.....	۵-۵-۴- بردارهای سرعت در محل پرش.....
۷۴.....	۶-۵-۴- مقایسه عمق مزدوج نسبی در شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی.....
۷۵.....	۷-۵-۴- مقایسه تغییرات افت انرژی نسبی در شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی.....
۷۶.....	۶-۴- درصد خطا در اندازه‌گیری عددی با نتیجه آزمایشگاهی.....
۷۹.....	<b>فصل ۵ (نتیجه‌گیری و پیشنهادات)</b> .....
۸۰.....	۱-۵- نتیجه‌گیری.....
۸۲.....	۱-۵- پیشنهادات.....
۸۳.....	<b>منابع</b> .....

# فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

## فصل ۲

شکل ۲-۱ پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف (نژدعلی و همکاران ۱۳۹۱) ..... ۷

## فصل ۳

شکل ۳-۱ سیستم پمپاژ و کنترل دبی ..... ۲۸

شکل ۳-۲ شکل شماتیک فلوم مورد استفاده ..... ۲۹

شکل ۳-۳ شکل شماتیک سطح صاف در آزمایش‌ها ..... ۳۲

شکل ۳-۴ شکل شماتیک سطح با زبری مثلثی با فاصله صفر ..... ۳۲

شکل ۳-۵ شکل شماتیک سطح با زبری مثلثی با فاصله دو سانتی‌متر ..... ۳۳

شکل ۳-۶ هندسه مدل مورد نظر در نرم افزار Ansys ..... ۳۶

شکل ۳-۷ شبکه بندی مدل سطح صاف در قسمت Meshing ..... ۳۶

شکل ۳-۸ تعیین شرایط مرزی مدل در قسمت Meshing ..... ۳۷

## فصل ۴

شکل ۴-۱ تأثیر فاصله زبری بر نسبت اعماق پرش ..... ۴۴

شکل ۴-۲ تأثیر فاصله زبری بر طول پرش ..... ۴۵

شکل ۴-۳ تأثیر فاصله زبری بر افت انرژی ..... ۴۶

شکل ۴-۴ تأثیر شیب معکوس بر نسبت اعماق پرش ..... ۴۶

شکل ۴-۵ تأثیر شیب معکوس بر طول پرش ..... ۴۷

شکل ۴-۶ تأثیر شیب معکوس بر افت انرژی ..... ۴۸

شکل ۴-۷ بررسی نسبت اعماق پرش در برابر عدد فرود ..... ۴۹

شکل ۴-۸ بررسی طول پرش در برابر عدد فرود با اعمال شیب معکوس ..... ۵۰

شکل ۴-۹ بررسی افت انرژی در برابر عدد فرود با اعمال شیب معکوس ..... ۵۱

شکل ۴-۱۰ بررسی نسبت اعماق پرش در برابر عدد فرود ..... ۵۲

شکل ۴-۱۱ بررسی طول پرش در برابر عدد فرود ..... ۵۳

شکل ۴-۱۲ بررسی افت انرژی در برابر عدد فرود ..... ۵۴

شکل ۴-۱۳ بررسی اعماق پرش در برابر عدد فرود در سطح با زبری فاصله دو ..... ۵۴

- شکل ۴-۱۴ بررسی طول پرش در برابر عدد فرود بر سطح با زبری فاصله دو ..... ۵۵
- شکل ۴-۱۵ بررسی افت انرژی در برابر عدد فرود در سطح با زبری فاصله دو ..... ۵۵
- شکل ۴-۱۶ تغییرات پروفیل سطح آب بر روی سطح صاف به ازای دبی های مختلف ..... ۵۶
- شکل ۴-۱۷ تأثیر شیب بر پروفیل طولی به ازای دبی ۵ مترمکعب بر ساعت ..... ۵۷
- شکل ۴-۱۸ تأثیر شیب بر پروفیل طولی به ازای دبی ۷ مترمکعب بر ساعت ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۹ تأثیر زبری بر پروفیل طولی به ازای شیب معکوس ۵٪ و دبی ۵ مترمکعب بر ساعت ..... ۵۹
- شکل ۴-۲۰ تأثیر زبری بر پروفیل طولی به ازای شیب معکوس ۷٪ و دبی ۷ مترمکعب بر ساعت ..... ۵۹
- شکل ۴-۲۱ مقایسه عمق مزدوج نسبی حاصل از نتایج صحت‌سنجی و نتایج آزمایشگاهی برای بستر صاف ..... ۶۲
- شکل ۴-۲۲ مقایسه طول پرش هیدرولیکی حاصل از نتایج صحت‌سنجی و نتایج آزمایشگاهی برای بستر صاف ..... ۶۲
- شکل ۴-۲۳ شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد پرش هیدرولیکی با استفاده از روش (VOF) در مدل (M1) ..... ۶۵
- شکل ۴-۲۴ مقایسه پروفیل سطح آب به دست آمده از مدل آشفتگی K-ε و نتایج آزمایشگاهی مدل M1 ..... ۶۵
- شکل ۴-۲۵ پروفیل بی‌بعد سطح آب برای مدل M1 ..... ۶۶
- شکل ۴-۲۶ شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد پرش هیدرولیکی با استفاده از روش (VOF) در مدل (M3) ..... ۶۶
- شکل ۴-۲۷ مقایسه پروفیل سطح آب به دست آمده از مدل آشفتگی K-ε و نتایج آزمایشگاهی مدل (M3) ..... ۶۷
- شکل ۴-۲۸ پروفیل بی‌بعد سطح آب برای مدل (M3) ..... ۶۷
- شکل ۴-۲۹ شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد پرش هیدرولیکی با استفاده از روش (VOF) در مدل (M8) ..... ۶۸
- شکل ۴-۳۰ مقایسه پروفیل سطح آب به دست آمده از مدل آشفتگی K-ε و نتایج آزمایشگاهی مدل (M8) ..... ۶۹
- شکل ۴-۳۱ پروفیل بی‌بعد سطح آب برای مدل (M8) ..... ۶۹
- شکل ۴-۳۲ شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد پرش هیدرولیکی با استفاده از روش (VOF) در مدل (M9) ..... ۷۰
- شکل ۴-۳۳ مقایسه پروفیل سطح آب به دست آمده از مدل آشفتگی K-ε و نتایج آزمایشگاهی مدل (M9) ..... ۷۰
- شکل ۴-۳۴ پروفیل بی‌بعد سطح آب برای مدل (M9) ..... ۷۱
- شکل ۴-۳۵ شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد پرش هیدرولیکی با استفاده از روش (VOF) در مدل (M11) ..... ۷۱
- شکل ۴-۳۶ شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد پرش هیدرولیکی با استفاده از روش (VOF) در مدل (M12) ..... ۷۲
- شکل ۴-۳۷ بردارهای سرعت در محل پرش در مدل M1 ..... ۷۳
- شکل ۴-۳۸ بردارهای سرعت در محل پرش در مدل M9 ..... ۷۴
- شکل ۴-۳۹ مقایسه نسبت عمق ثانویه شبیه‌سازی و آزمایشگاهی ..... ۷۵
- شکل ۴-۴۰ مقایسه طول پرش شبیه‌سازی و آزمایشگاهی ..... ۷۵
- شکل ۴-۴۱ مقایسه افت انرژی نسبی در نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی ..... ۷۶
- شکل ۴-۴۲ نمودار درصد خطای عمق اولیه در مدل آزمایشگاهی بر اساس مدل عددی ..... ۷۷
- شکل ۴-۴۳ نمودار درصد خطای نسبت اعماق پرش در مدل آزمایشگاهی بر اساس مدل عددی ..... ۷۷
- شکل ۴-۴۴ نمودار درصد خطای طول پرش در مدل آزمایشگاهی بر اساس مدل عددی ..... ۷۷

# فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

## فصل ۲

جدول (۱-۲) : پارامترهای موجود در شکل (۱-۲) ..... ۷

## فصل ۳

جدول (۱-۳) ابعاد و پارامترهای مربوط به این تحقیق ..... ۳۰

جدول (۲-۳) پارامترهای مؤثر در تحقیق حاضر ..... ۳۲

## فصل ۴

جدول (۱-۴) مشخصات مربوط به مدل‌های آزمایشگاهی ..... ۶۱

جدول (۲-۴) شاخص‌های آماری حاصل از نتایج صحت‌سنجی عمق مزدوج نسبی ..... ۶۳

جدول (۳-۴) شاخص‌های آماری حاصل از نتایج صحت‌سنجی طول پرش هیدرولیکی ..... ۶۳

جدول (۴-۴) نتایج مربوط به مدل‌های آزمایشگاهی ..... ۶۴

جدول (۵-۴) نتایج مربوط به مدل عددی ..... ۶۴

جدول (۶-۴) محاسبه درصد خطا اندازه‌گیری عددی با نتیجه آزمایشگاهی ..... ۷۶

## علائم و اختصارات

عنوان	علامت
انرژی اولیه	$E_1$
سرعت اولیه	$V_1$
عمق اولیه	$Y_1$
طول پرش	$L_j$
انرژی ثانویه	$E_2$
عمق ثانویه	$Y_2$
سرعت ثانویه	$V_2$
افت انرژی	$E_L$
عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کلاسیک	$y_2^*$
عدد فرود در مقطع جریان فوق بحرانی	$Fr_1$
شتاب ثقل	$g$
زبری نسبی	$K$
ارتفاع معادل زبری	$k_e$
کاهش عمق نسبی	$D$
افت انرژی	$\Delta E$
اتلاف انرژی	$\varepsilon$
انرژی جنبشی	$k$
جرم مخصوص	$\rho$
سرعت	$v$
لزجت دینامیکی	$\mu$
ارتفاع زبری	$h$
فاصله زبری	$L$
شیب معکوس	$S$



# فصل اول

## مقدمه و هدف

## ۱-۱- مقدمه

بهره‌برداری از منابع آب، ذخیره آب و انتقال آب از محل ذخیره به محل مصرف یک موضوع اساسی و مهم به حساب می‌آید. از این‌رو در این راستا با توجه به پیشرفت سریع روش‌های علمی و مهندسی، طراحی و ساخت سازه‌های هیدرولیکی نظیر سد، کانال باز، لوله‌های تحت فشار، تندآب، سرریز، سیفون، حوضچه‌ی آرامش و غیره مورد توجه قرار گرفته است. از این سازه‌ها به منظور ذخیره، کنترل و انتقال جریان، استهلاک انرژی و تثبیت سطح آب استفاده می‌شود. در میان روش‌های انتقال آب، استفاده از نیروی ثقل و انتقال آب به صورت جریان با سطح آزاد در کانال‌ها و سازه‌های هیدرولیکی از متداول‌ترین روش‌های آبرسانی است. بنابراین شناخت مهندسی و طراحان از قوانین حاکم بر هیدرولیک اینگونه جریان‌ها، آن‌ها را به درک بهتری از طراحی سازه‌های مورد نیاز می‌رساند. به طور کلی در طراحی سازه‌های مرتبط با مجاری روباز، حفاظت از سازه‌ها در برابر افزایش سرعت و انرژی جنبشی حائز اهمیت فراوان است. در پایین‌دست سرریز سدها، به دلیل اختلاف ارتفاع زیاد، سرعت جریان و نهایتاً انرژی جنبشی به شدت افزایش می‌یابد که عدم کاهش این انرژی باعث فرسایش کف و ایجاد گودال در پایین‌دست سد خواهد شد که در درازمدت باعث تخریب سد می‌شود. بنابراین سازه‌هایی که باعث کاهش انرژی جریان و پایین آوردن سرعت هستند، ساخته شده‌اند.

## ۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

حوضچه‌های آرامش به عنوان مستهلک‌کننده‌های انرژی در پایاب سازه‌های هیدرولیکی کاربرد فراوانی دارند و این امر موجب انجام مطالعات فراوانی در زمینه پرش هیدرولیکی گردیده است. هزینه‌های عمده حوضچه آرامش از نوع پرش هیدرولیکی شامل ابعاد (طول آن)، رقوم بستر (بخصوص در حالی که عمق پایاب کمتر از عمق ثانویه است) و ضخامت دال کف آن می‌باشد. هر نوع تکنیکی که باعث کاهش ابعاد، عمق ثانویه و نیز ضخامت دال کف شود می‌تواند به طرح اقتصادی حوضچه کمک کند.

با توجه به بررسی‌های انجام گرفته در زمینه تحقیقات قبلی به دلیل مشکل بودن تشکیل پرش روی شیب‌های معکوس تحقیقات روی این نوع از پرش بسیار محدود بوده و از آنجایی که تشکیل پرش روی این نوع شیب باعث کاهش نسبت اعماق مزدوج و طول پرش نسبت به پرش کلاسیک می‌گردد، استفاده از شیب معکوس در داخل حوضچه‌های آرامش می‌تواند به کاهش طول حوضچه آرامش و دیواره‌های آن و در نتیجه به اقتصادی‌تر شدن آن کمک نماید. از طرفی طبق تحقیقات به عمل آمده به کارگیری بسترهای زبر در پرش هیدرولیکی، باعث افزایش تنش برشی در بستر پرش شده، که این عامل نیز خود باعث افزایش استهلاک پرش در مسیر کوتاه‌تری می‌شود.

### ۱-۳- هدف از انجام تحقیق

با توجه به مطالعات فوق‌الذکر و همچنین با توجه به این که زبری و شیب معکوس بستر کانال هردو به طراحی اقتصادی حوضچه‌ها کمک می‌کنند، هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر توأم زبری و شیب معکوس بر روی مشخصات جهش هیدرولیکی شامل نسبت عمق ثانویه، طول پرش و افت انرژی به صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی می‌باشد و از آن جا که شبیه‌سازی عددی سبب صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌گردد می‌توان از نرم‌افزار فلونت استفاده نمود. این نرم‌افزار معادلات را به صورت حجم محدود حل نموده و در این تحقیق از مدل حجم سیال برای شبیه‌سازی استفاده نموده‌ایم.

### ۱-۴- روش انجام تحقیق

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد. برای این منظور از یک فلوم آزمایشگاهی مجهز به دستگاه سنجش دبی جریان، مخزن انتقال آب و سیستم‌پمپاژ استفاده گردید. بدنه این فلوم از شیشه شفاف بوده و کف آن برای ایجاد زبری‌های مختلف قابل تنظیم بود.

در این تحقیق ابتدا به صورت آزمایشگاهی و تحت شرایط هندسی و هیدرولیکی مختلف پدیده پرش هیدرولیکی بررسی شده و سپس با استفاده از نرم افزار فلوئنت اقدام به شبیه سازی دو بعدی آن گردید. از جمله پارامترهای هیدرولیکی می توان به دبی جریان و عدد فرود اشاره کرد. پارامترهای هندسی نیز شامل شکل زبری، ارتفاع زبری و فاصله زبری است.

## ۱-۵- اشاره به مطالب فصل های پایان نامه

فصل اول این پایان نامه شامل مقدمه، کاربردها و اهمیت موضوع، اهداف پایان نامه و شرح کلی فصول پایان نامه است. در فصل دوم ابتدا مبانی تحقیق آورده شده و سپس به بررسی تحقیقات گذشته بر روی موضوع مورد مطالعه پرداخته شد. در فصل سوم ابتدا مروری بر مطالعات مربوط به آزمایشگاه و سپس مطالب مربوط به نرم افزار آورده شده است. در فصل چهارم ابتدا نمودارهای مطالعه آزمایشگاهی و تفسیر نمودارها آورده شده و سپس شبیه سازی عددی مورد بحث قرار گرفت و در نهایت به مقایسه این دو مطالعه پرداخته شد. در فصل پنجم ضمن ارائه نتایج به دست آمده به صورت کلی و خلاصه، پیشنهادهایی در رابطه با ادامه تحقیقات ارائه گردیده است.

## فصل دوم

### مبانی و مروری بر مطالعات پیشین

## ۲- مقدمه

### ۲-۱- مبانی

#### ۲-۱-۱- سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی

سازه‌هایی که باعث کاهش انرژی جریان و پایین آوردن سرعت به حد قابل قبولی می‌شوند.

الف) سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی در جهت افقی: در این سازه‌ها که بیشتر در پایین دست سرریز سدها، در کانال‌ها و در انتهای شیب‌شکن‌ها دیده می‌شوند، انرژی آب به صورت پرش هیدرولیکی تلف می‌شود که انواع حوضچه‌های آرامش از این نوع می‌باشند.

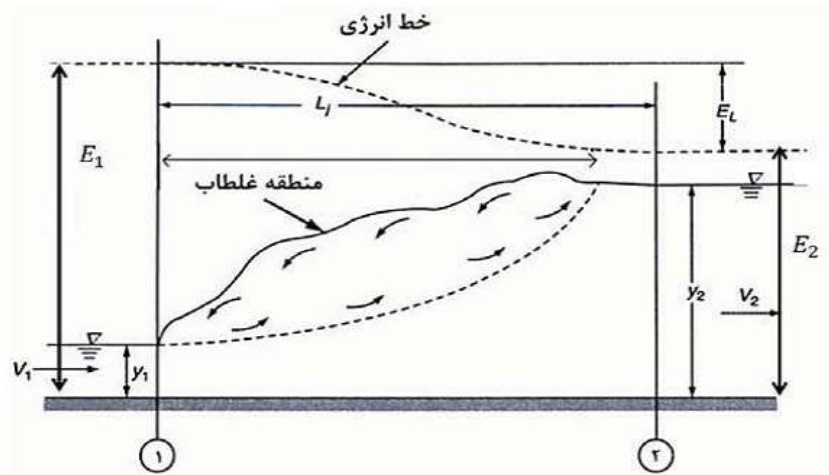
ب) سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی در جهت عمودی: این سازه‌ها بیشتر در کانال‌های آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرند و از انواع آن‌ها می‌توان به چاه آرامش اشاره نمود.

ج) سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی در دو جهت افقی و عمودی: این سازه‌ها شامل انواع شیب‌شکن‌های قائم و مایل می‌باشند که کاربرد غالب آن‌ها در کانال‌های آبیاری است.

#### ۲-۱-۲- پرش هیدرولیکی

پرش هیدرولیکی یکی از مهم‌ترین انواع جریان متغیر سریع در مجاری روباز است و وقتی رخ می‌دهد که در جریان فوق‌بحرانی، از سرعت جریان کاسته شده و سپس به سرعت زیر بحرانی تبدیل شود. به عبارت دیگر پرش هیدرولیکی به صورت انتقال ناگهانی جریان از حالت فوق‌بحرانی به جریان زیربحرانی توصیف می‌شود. با توجه به این‌که در بسیاری از کارهای عملی این پدیده وجود دارد، دانستن خواص و ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی پرش از نظر کاربردی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. وجود امواج در سطح آب به دلیل انرژی جنبشی آب می‌تواند خسارت جبران‌ناپذیری را به تأسیسات آبی وارد کند، بنابراین کنترل انرژی جنبشی آب اهمیت زیادی دارد. از جمله سازه‌های کنترل پرش هیدرولیکی حوضچه

آرامش است. تلاش محققان همواره برای ایجاد تمهیداتی بوده است که ساخت حوضچه آرامش علاوه بر مقاومت در برابر جریان، صرفه‌جویی اقتصادی به همراه داشته باشد. پرش هیدرولیکی در زیر دریچه‌های تنظیم‌کننده، در پای سرریزها و یا محلی که کف یک فلوم با شیب تند به طور ناگهانی مسلح می‌شود، به وجود می‌آید. در شکل (۱-۲) پرش هیدرولیکی در بستر صاف نشان داده شده است.



شکل (۱-۲) پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف (نژدعلی و همکاران ۱۳۹۱)

پارامترهای آن به صورت خلاصه در جدول (۱-۲) آمده است:

جدول (۱-۲) پارامترهای موجود در شکل (۱-۲)

نام پارامتر	علامت مشخصه در شکل
انرژی اولیه	$E_1$
سرعت اولیه	$V_1$
عمق اولیه	$Y_1$
طول پرش	$L_j$
انرژی ثانویه	$E_2$
عمق ثانویه	$Y_2$
سرعت ثانویه	$V_2$
افت انرژی	$E_L$

## ۲-۱-۳- خصوصیات پرش هیدرولیکی

از مهم‌ترین خصوصیات پرش هیدرولیکی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ایجاد آبشستگی در پایاب به علت توسعه گرداب‌های بزرگ مقیاس.
- جریان دوفازی ناشی از اختلاط آب و هوا.
- جریان بسیار متلاطم با سرعت و فشار دینامیکی زیاد.
- ایجاد کاویتاسیون و استهلاک انرژی در اثر تلاطم شدید جریان.
- نوسانات فشار، نیرو، سرعت و همچنین ایجاد و گسترش جریان موجی به سمت پایین‌دست.

## ۲-۱-۴- کاربردهای پرش هیدرولیکی

کاربردهای پرش هیدرولیکی بسیارمتنوع است که موارد زیر از آن جمله‌اند:

۱. استهلاک انرژی جنبشی آب در جریان از روی سدها، سرریزها و دیگر سازه‌های هیدرولیکی و نهایتاً محافظت از قسمت‌های پایین‌دست سازه‌ها.
۲. ترمیم و افزایش سطح آب در کانال‌ها به منظور توزیع آب و مقابله با نیروی زیرفشار در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی
۳. افزایش وزن آب بر روی کفبند و نتیجه کاهش اثر مخرب زیر فشار در سازه
۴. افزایش غلظت هوا در آب جهت کاربردهای خاص نظیر مخلوط کردن مواد شیمیایی در آب، هوادهی جریان آب و مخلوط کردن کودهای شیمیایی مایع با آب برای مصارف کشاورزی.
۵. استفاده از پرش هیدرولیکی برای شستشوی رسوبات تجمع‌یافته در جلوی دریچه مجاری تخلیه رسوب.



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

## ۲-۲- اصول و مبانی نظری مدل‌سازی عددی

### ۲-۲-۱- مبانی

به‌طور کلی روش‌های بررسی جریان سیال به دو صورت زیر می‌باشد :

۱- روش‌های تجربی (آزمایشگاهی)

۲- روش‌های تئوریک

در یک تقسیم‌بندی دیگر می‌توان دینامیک سیالات را به سه روش تقسیم کرد:

۱- دینامیک سیالات تجربی

۲- دینامیک سیالات تئوریک

۳- دینامیک سیالات محاسباتی

CFD در طراحی سیستم‌های سیالاتی چند مزیت منحصربه‌فرد نسبت به روش‌های تجربی دارا است:

۱- کاهش اساسی در زمان و قیمت طراحی‌های جدید.

۲- توانایی مطالعه سیستم‌هایی که انجام آزمایش‌ها روی آن‌ها مشکل و یا غیرممکن باشد.

۳- توانایی مدل کردن سیستم‌ها تحت شرایط تصادفی و بالاتر از حدود معمول آن‌ها.

۴- نتایج بسیار زیاد در سطح جزئیات.

در مدل‌های CFD به دلیل آن‌که از مفاهیم یک مدل ریاضی استفاده می‌شود، اعتبار مدل ریاضی، مفید بودن کار محاسباتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌طوری‌که کاربرد مدل ریاضی نامناسب موجب می‌شود تا روش عددی ایده‌آل نتایج بی‌ارزشی تولید نماید. در حالی‌که در تحقیق آزمایشگاهی، واقعیت مورد

مطالعه قرار می‌گیرد. از دیگر محدودیت‌های مدل CFD نیاز به محاسبات سنگین و پیچیده می‌باشد که نوع کامپیوتر مورد استفاده می‌تواند این مسئله را تحت تأثیر قرار دهد.

مدل‌های CFD علاوه بر خطاهایی که ممکن است به دلیل روش تعریف الگوریتم برنامه، روش برنامه‌نویسی و یا تعریف پارامترهای شرایط مرزی در روش‌های عددی به وجود آید، شامل سه خطای سیستماتیک زیر می‌باشند.

- خطای مدل‌سازی: این خطا در اثر اختلاف بین جریان در محدوده هندسی واقعی و حل کامل مدل ریاضی است، مانند خطای ایجاد شبکه بر روی هندسه مدل.
- خطای گسسته‌سازی: این خطا در اثر اختلاف بین حل دقیق معادلات حاکم با حل دقیق دستگاه معادلات جبری ناشی از گسسته‌سازی معادلات حاکم ناشی می‌شود.
- خطای تکرار کردن: این خطا در اثر اختلاف بین حل تکراری و حل دقیق دستگاه معادلات جبری است.

مهم‌ترین خطاهای موجود در مدل فیزیکی شامل خطای به مقیاس بردن مدل، خطای تکنیکی و خطای انسانی است.

## ۲-۲-۲- جریان آشفته

جریان‌های آشفته با توجه به نوسانات سرعت در میدان جریان شناخته می‌شوند. این نوسانات مقادیری مانند مومنوم، انرژی و ... را منتقل می‌کنند. معادله حاکم بر جریان سیالات، معادله ناویر-استوکس است. با توجه به شرایط جریانی که مدل شدن آن مدنظر است مانند: غیرقابل تراکم بودن، ماندگاری و ... می‌توان معادله ناویر-استوکس را ساده نمود. در کل دو روش برای حل معادله ناویر-استوکس وجود دارد:

۱- روش متوسط رینولدزی

۲- روش فیلتر کردن

مهم‌ترین مدل‌های شبیه‌سازی آشفتگی در روش متوسط رینولدزی عبارت‌اند از :

۱- مدل Spalart-Allmaras

۲- مدل  $k-\varepsilon$

۳- مدل  $k-\omega$

۴- مدل vof

۵- مدل تنش رینولدزی (RSM)

## ۲-۲-۳- مدل‌های شبیه‌سازی چند فازی

در روش‌های مدل‌سازی جریان‌های چند فازی، هدف تعیین تعامل بین فازهای مدل است. این تعامل در نتیجه پارامترهایی مانند: نیروی لیفت، نیروی درگ و ضریب تبادل مومنتوم و حرارت بین فازی است. در واقع در این مدل‌ها سعی می‌شود که مرز بین فازها تعیین‌شده و تأثیر فازها بر روی هم در حالت دینامیک بررسی شود.

مهم‌ترین مدل‌های شبیه‌سازی چند فازی عبارت‌اند از :

۱- مدل حجم سیال

۲- مدل اختلاط

۳- مدل اولرین

۴- مدل بخار مرطوب

## ۲-۲-۴-مدل $k-\epsilon$

از کاربردی‌ترین مدل‌های دو معادله‌ای، می‌توان مدل  $k-\epsilon$  را نام برد که در این تحقیق از این مدل استفاده شده است. شکل‌های متفاوتی از مدل  $k-\epsilon$  ارائه شده است. معادلات  $k-\epsilon$  برای بسیاری از جریان‌های لایه مرزی دو بعدی روی دیواره، جریان‌های مجاری، جریان‌های برشی آزاد، جریان‌های گردابه‌ای و ... با موفقیت به کار رفته‌اند.

در نرم‌افزار فلونت سه حالت مختلف  $k-\epsilon$  وجود دارد :

- مدل  $k-\epsilon$  استاندارد<sup>۱</sup>

- مدل  $k-\epsilon$  حالت RNG<sup>۲</sup>

- مدل  $k-\epsilon$  محسوس<sup>۳</sup>

## ۲-۲-۴-۱-مدل $k-\epsilon$ استاندارد

مدل  $k-\epsilon$  استاندارد فلونت از زمان پیشنهاد لاندر و اسپالدینگ تبدیل به مدلی پرکاربرد در محاسبات بسیاری از جریان‌های کاربردی مهندسی شده است. پایداری، محاسبات کم هزینه و دقت مناسب این مدل برای طیف گسترده‌ای از جریان‌های آشفته باعث محبوبیت آن در حل جریان‌های صنعتی و شبیه‌سازی انتقال حرارت شده است. این مدل نیمه تجربی بوده و استخراج معادلات آن متکی بر ملاحظات پدیده شناختی و تجربی گرایی است. در استخراج این معادلات چنین فرض شده است که جریان کاملاً آشفته بوده و اثر لزجت مولکولی بسیار ناچیز باشد. مدل  $k-\epsilon$  استاندارد در اعداد رینولدز بالا بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مدل  $k$  معرف انرژی جنبشی تلاطم و  $\epsilon$  معرف نرخ تلفات انرژی جنبشی تلاطم می‌باشد.

در این تحقیق برای شبیه‌سازی جریان آشفته از این مدل استفاده شده است.

<sup>1</sup> Standard  $k-\epsilon$  Model

<sup>2</sup> RNG  $k-\epsilon$  Model (Re-normalisation group)

<sup>3</sup> Realizable Model

## ۲-۲-۵- مدل حجم سیال

مدل حجم سیال بر این استوار است که دو یا چند سیال باهم ترکیب نمی‌شوند. برای هر فاز که به مدل اضافه می‌کنید، یک متغیر اضافه می‌شود که همان نسبت حجمی آن فاز در سلول محاسباتی است. در هر حجم کنترل مجموع نسبت‌های حجمی تمامی فازها یک است. مقادیر تمامی متغیرها و مشخصات به وسیله فازها به اشتراک گذاشته می‌شود و مقدار حجمی متوسط را نشان می‌دهد که به اندازه نسبت حجمی هر سیال در سلول محاسباتی است. پس مشخصات و مقادیر هر سلول به طور خالص نشان‌دهنده یکی از فازها و یا مخلوطی از فازها است که بسته به مقادیر نسبت حجمی بین صفر و یک متغیر است. مدل حجم سیال برای حالت ماندگار و غیر ماندگار قابل استفاده است. زمانی از حالت ماندگار استفاده می‌شود که شرایط حل بستگی به شرایط اولیه ندارد و برای هر فاز مرز ورودی مشخص وجود داشته باشد، مثلاً برای جریان یکنواخت در یک کانال می‌تواند به صورت ماندگار حل شود.

اگر نسبت حجمی سیال  $q$  در سلول به صورت  $\alpha_q$  نشان داده شود پس یکی از سه شرایط زیر وجود دارد:

۱.  $\alpha_q = 0$  ، سلول از سیال  $q$  خالی است.
۲.  $\alpha_q = 1$  ، سلول پر از سیال  $q$  است.
۳.  $0 < \alpha_q < 1$  ، سلول حاوی سطح مشترک بین سیال  $q$  و یک یا چند سیال دیگر است.

با توجه به مقدار  $\alpha_q$  ، مشخصه‌ها و مقادیر متناسب با آن‌ها به هر حجم سیال اختصاص داده می‌شود.

## ۲-۳- مروری بر مطالعات گذشته

در هشتاد سال گذشته، به دلیل اهمیت و کاربرد بسیار زیاد پرش هیدرولیکی، مطالعات گسترده‌ای در این مورد انجام گرفته است. محققین زیادی پرش هیدرولیکی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در ادامه به برخی از این تحقیقات اشاره می‌شود.

## ۲-۳-۱- مطالعات انجام شده در زمینه پرش هیدرولیکی روی بستر صاف و زبر

در این بخش به ترتیب ابتدا مطالعات انجام شده بر روی پرش هیدرولیکی در سطوح صاف و بستر زبر آورده شده است.

بلانگر در سال ۱۸۲۸ رابطه معروف خود را برای تعیین عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کلاسیک ( $y_2^*$ ) در ناحیه زیر بحرانی فرمول (۱-۲) را ارائه نمود:

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

که در این رابطه  $Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gy_1}}$  عدد فرود در مقطع جریان فوق بحرانی،  $v_1$  و  $y_1$  به ترتیب سرعت و عمق متوسط جریان فوق بحرانی در ابتدای پرش،  $y_2$  عمق ثانویه پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف و  $g$  شتاب ثقل می‌باشند.

راجاراتنام (۱۹۶۵) مطالعات گسترده‌ای بر روی توزیع سرعت متوسط در پرش ایجاد شده در پایین دست یک دریچه و بر روی یک کانال صاف و در محدوده اعداد فرود  $2/68$  تا  $9/78$  انجام داد. او نشان داد که پروفیل سرعت در پرش شبیه پروفیل سرعت در جت دیواری کلاسیک است.

راجاراتنام (۱۹۶۸) اولین محقی بود که به مطالعه‌ی آزمایشگاهی جهش هیدرولیکی در بسترهای زبر پرداخت. وی پارامتر زبری نسبی  $k = \frac{k_e}{y_1}$  را تعریف کرد که در آن  $k_e$  ارتفاع معادل زبری و  $y_1$  عمق جریان ورودی فوق بحرانی بر روی زبری‌ها است، او نشان داد که طول غلطاب و طول پرش تشکیل شده در بسترهای زبر کاهش قابل توجهی نسبت به پارامترهای مشابه روی بستر صاف دارند و زبری بستر می‌تواند به طور مشخصی عمق پایاب مورد نیاز برای تشکیل پرش را نسبت به عمق مزدوج خود در بستر صاف کاهش دهد.

لوت هاووزر و اشکیلر (۱۹۷۵) نشان داد که جریان‌های فوق بحرانی توسعه یافته در پایین دست دریچه‌ها بر روی بسترهای زبر در مقایسه با بسترهای صاف به طول کمتری نیاز دارند.

هیوز و فلاک (۱۹۸۴) مطالعه تجربی در رابطه با بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بستر زیر در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۱۰ و زبری نسبی ۰ تا ۰/۹ در فلوم مستطیلی با شیب کف افقی بر روی بستر صاف و پنج بستر زیر انجام دادند. نتایج نشان داد که اجزاء زبری می‌توانند عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی را کاهش دهند و میزان کاهش به عدد فرود اولیه و زبری نسبی بستگی دارد. کاهش طول پرش در تمام اعداد فرود مشاهده شد اما کاهش عمق ثانویه در اعداد فرود بزرگ‌تر از ۳/۵ قابل توجه بود.

اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) مطالعه آزمایشگاهی در خصوص جهش هیدرولیکی بر روی بسترهای موج‌دار سینوسی شکل در بازه اعداد فرود ۴ تا ۱۰ انجام دادند و نشان دادند که عمق پایاب لازم برای ایجاد جهش هیدرولیکی روی بستر موج‌دار کمتر از عمق پایاب لازم برای تشکیل جهش بر روی بسترهای صاف است. همچنین آن‌ها نشان دادند که طول جهش هیدرولیکی در بسترهای موج‌دار تقریباً نصف طول جهش هیدرولیکی در بسترهای صاف است. آن‌ها با تعریف پارامتر بی‌بعد کاهش عمق نسبی  $D = \frac{y_2^* - y_2}{y_2^*}$  در بازه مورد بررسی،  $D$  را تقریباً برابر با ۰/۲۵ به دست آوردند که در آن  $(y_2^*)$  عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کلاسیک و  $(y_2)$  عمق ثانویه پرش می‌باشند. همچنین تنش برشی تقریباً ۱۰ برابر تنش در بسترهای صاف است. آن‌ها افزایش تنش برشی بستر در نتیجه حضور زبری را عامل اصلی تغییرات دانستند.

ایزدجو و شفاعی بجستان (۲۰۰۷) با مطالعات خود بر روی بسترهای دوزنقه‌ای شکل نشان دادند که عمق مورد نیاز پایاب برای تشکیل جهش بر روی بسترهای زیر کمتر از  $(y_2^*)$  می‌باشد و مقدار ۰/۲ را برای پارامتر  $D$  به دست آوردند. دیگر نتایج این تحقیق نشان داد طول جهش کلاسیک بیش از دو برابر طول جهش در بستر زیر می‌باشد و بیشتر به فاصله تاج زبری‌ها بستگی دارد تا ارتفاع زبری‌ها و همچنین با برداشت پروفیل‌های سرعت نتیجه گرفتند که سرعت جریان فوق بحرانی قبل از پرش بین ۱/۵۳ تا

۴/۹ متر بر ثانیه و در دورترین پروفیل برداشت شده، سرعت حداکثر بین ۰/۵ تا ۱ متر بر ثانیه متغیر بوده است.

اید (۲۰۰۷) آزمایش‌های خود را بر روی سه بستر موج‌دار سینوسی، دوزنقه‌ای و منشوری انجام داد. او نتیجه گرفت زبری نسبی و شکل موج‌ها، تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی عمق مزدوج نسبی ندارند. با توجه به اینکه تراز تاج موج‌ها هم سطح کف کانال در بالادست می‌باشد، فواصل زبری‌ها به صورت گودافتادگی عمل می‌نمایند و تغییر ارتفاع آن‌ها اثر چندانی بر روی مشخصات جهش ندارد. او میزان پارامتر D را برابر با ۰/۴ به دست آورد، همچنین نتایج گزارشات قبلی مبنی بر کاهش عمق ثانویه در جهش آبی بر روی بستر زبر نسبت به عمق متناظر آن در بستر صاف را تأیید و علت آن را افزایش تنش برشی کف بر روی بستر زبر بیان کرد.

پالگیارا و همکاران (۲۰۰۸) ضمن معرفی پارامتر غیر یکنواختی زبری، نشان دادند که میزان کاهش مشخصات جهش هیدرولیکی علاوه بر عدد فرود و زبری نسبی به پارامتر غیریکنواختی زبری نیز بستگی دارد، به طوری که هرچه زبری بستر غیریکنواخت‌تر باشد میزان کاهش مشخصات جهش بیشتر خواهد بود.

گوهری و فرهودی (۲۰۰۹) آزمایش‌های خود را بر روی بسترهایی با زبری‌های نواری مستطیلی در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۱۰ انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند عمق ثانویه جهش بر روی سطوح زبر نسبت به سطح صاف کاهش دارد و این کاهش با افزایش فاصله بین زبری‌ها افزایش می‌یابد. همچنین پی بردند که تغییر ارتفاع زبری‌ها و عمق اولیه پرش اثر ناچیزی بر مشخصات هیدرولیکی دارد و مقادیر تنش برشی کف در بستر زبر حدوداً ۹ برابر بستر صاف به دست آمد.

عباسپور و حسین‌زاده (۲۰۰۹) با آزمایش‌های در محدوده اعداد فرود ۳/۸ تا ۸/۶ مشخصات پرش آبی را در بستر موج‌دار بررسی کردند. نتایج نشان داد که مقادیر عمق ثانویه و طول جهش آبی روی بستر موج‌دار به ترتیب ۲۰ و ۵۰ درصد کمتر از بستر صاف است. ضریب نیروی برشی در بستر موج‌دار به ازای



عدد فرود ۴ در حدود ۱۰ برابر بستر صاف است. آن‌ها پروفیل‌های سرعت را در ۲۰ آزمایش اندازه‌گیری نمودند که در این پروفیل‌ها تغییرات سرعت به صورت جت دیواره بوده، به طوری که با افزایش فاصله از ابتدای پرش لایه مرزی رشد نموده و سرعت حداکثر کاهش می‌یابد.

بدیع‌زادگان و همکاران (۱۳۹۰) در مطالعات خود در مورد پرش آبی در حوضچه‌های آرامش مستطیلی با بستر موج‌دار سینوسی شکل نشان دادند که با به‌کارگیری چنین بسترهای سینوسی در حوضچه‌ی آرامش، می‌توان شاهد کاهش نسبت اعماق ثانویه به اولیه‌ی تقریباً به میزان ۲۰ درصد، و کاهش طول پرش آبی به میزان ۳۵ درصد نسبت به پرش معمولی در این نوع حوضچه‌ها بود.

نژدعلی و همکاران (۱۳۹۱) در یک مطالعه اثر فاصله زبری‌های عرضی مثلثی بر روی مشخصات پرش آبی را مورد بررسی قرار دادند و در مجموع تعداد ۱۲۶ آزمایش بر روی بستر زبر در فاصله‌های مختلف در بازه اعداد فرود ۴ تا ۱۳/۷ انجام شد و در مقایسه نتایج به دست آمده نشان دادند که عمق ثانویه و طول جهش آبی در بستر زبر نسبت به بستر صاف به طور متوسط به ترتیب ۱۲ و ۲۴ درصد کاهش داشته‌اند. همچنین نشان دادند که افت انرژی افزایش یافته که با افزایش عدد فرود این روند شدیدتر شد و به طور متوسط افزایش ۱۳ درصد بود. آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش فاصله‌ی بین زبری‌ها طول جهش، طول غلطاب و عمق ثانویه کاهش یافته و افت انرژی افزایش می‌یابد و مقادیر تنش برشی کف نیز بر روی بسترهای زبر به بیش از ۱۰ برابر بستر صاف رسید.

غزالی و همکاران (۱۳۹۱) در یک بررسی آزمایشگاهی در فلومی با مقطع مستطیلی مشخصات پرش هیدرولیکی را بر روی پنج نوع بستر موج‌دار مثلثی مورد مطالعه قرار دادند. تأثیر زبری‌های بستر بر پرش هیدرولیکی در اعداد فرود ۶/۱ تا ۱۳/۶ با تحلیل پروفیل سرعت و استهلاك انرژی بررسی گردید و نتایج نشان داد که پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده در مقاطع مختلف پرش مشابه بوده و با پروفیل جت‌آب بر روی بستر صاف متفاوت می‌باشند. مقدار ضخامت لایه مرزی بی‌بعد بر روی بستر موج‌دار برابر ۰/۳۹

به دست آمد در حالی که این مقدار در بستر صاف معادل ۰/۱۶ به دست آمد. همچنین افت انرژی در پرش بر روی بستر موج‌دار به طور متوسط ۱۱/۳٪ بیشتر از بستر صاف بود.

صمدی بروجنی و همکاران (۲۰۱۳) مطالعات پرش را بر روی شش نوع بستر موج‌دار مثلثی انجام دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نیروی برشی بر روی بستر موج‌دار مثلثی حدود ۸/۵ برابر بستر صاف می‌باشد همچنین عنوان کردند نتایج تطابق خوبی با نتایج اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)، عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) دارد.

## ۲-۳-۲- مطالعات انجام شده در زمینه پرش هیدرولیکی روی سطوح با شیب معکوس و اعمال

### زبری

اولین مطالعه در مورد جهش در بسترهای با شیب معکوس توسط راوس (۱۹۳۸) انجام شد و به این نتیجه رسید که جهش هیدرولیکی در این‌گونه حوضچه‌ها، فقط در روی شیب‌های نزدیک به صفر پایدار خواهد بود.

استیونس (۱۹۴۴) با تحلیل تئوری نظریه راوس را رد کرده و نشان داد که تشکیل جهش هیدرولیکی بر روی تمامی شیب‌های معکوس بدون هیچ‌گونه محدودیتی پایدار است و عمق ثانویه این‌گونه جهش‌ها را تخمین زد.

خدر و راجاگوپال (۱۹۷۲) با انجام آزمایش‌هایی روی جهش هیدرولیکی روی شیب معکوس ۰/۰۲۵ به این نتیجه رسیدند که کنترل جهش هیدرولیکی در شیب‌های تندتر از این مقدار غیر ممکن است. همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که طول جهش هیدرولیکی در روی بستر با شیب معکوس نسبت به بستر افقی کمتر می‌باشد.

ابریشمی و صانعی (۱۹۹۴) نیز با انجام آزمایشاتی نتایج خدر و راجاگوپال را تأیید کردند. آن‌ها همچنین هیچ تغییر محسوسی بین افت انرژی کل جهش هیدرولیکی روی شیب افقی و معکوس مشاهده نکردند.

ابریشمی و اسماعیلی در سال (۱۳۷۶) مطالعاتی را در مورد پرش هیدرولیکی روی کانال‌های با شیب معکوس و پله مثبت انجام دادند. آن‌ها با استفاده از نتایج آزمایشگاهی حاصل مقادیر  $L_j/y_1$  و  $y_2/y_1$  و  $L_j/y_2$  و  $\Delta E/E_1$  را در مقابل  $Fr_1$  رسم کرده و با منحنی‌های حاصل از معادله بلانژ و نیز نتایج کارهای خدر در شیب‌های منفی و بدون پله مقایسه کردند.

ابریشمی و اسماعیلی (۱۳۷۹) پرش هیدرولیکی روی شیب‌های منفی و در حضور پله مثبت را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که حضور پله در انتهای حوضچه باعث کاهش نسبت عمق ثانویه می‌شود که با افزایش ارتفاع پله میزان کاهش بیشتر می‌گردد. همچنین با افزایش شیب معکوس از میزان تأثیر پله مثبت روی کاهش نسبت عمق ثانویه کاسته می‌گردد. همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش شیب معکوس و پله مثبت اختلاف زیادی در افت انرژی روی بسترهای افقی و معکوس ایجاد نمی‌کند.

بیرامی و چمنی (۲۰۰۶) با مطالعه جهش روی شیب معکوس در پایین‌دست سرریز اوجی، نوع جدیدی از جهش به نام B-F را معرفی کردند که در این نوع ابتدای جهش روی شیب مثبت و انتهای جهش روی شیب منفی تشکیل می‌گردد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش شیب معکوس، نسبت اعماق ثانویه کاهش می‌یابد. مشاهدات آن‌ها نشان داد که در اعداد فرود بزرگ‌تر مقادیر جهش کلاسیک نزدیک‌تر می‌گردد.

بیرامی و چمنی (۲۰۱۰) به مطالعه طول غلطاب و افت انرژی جهش هیدرولیکی در بسترهای شیب‌دار پرداختند و به این نتیجه رسیدند که طول جهش هیدرولیکی تابعی از عدد فرود جریان ورودی، عدد فرود جریان خروجی، نسبت عمق ثانویه و شیب بستر کانال است.

دستورانی و نصرآبادی (۱۳۹۰) در یک بررسی آزمایشگاهی اثر زبری بر مشخصات جهش هیدرولیکی روی شیب معکوس را در محدوده اعداد فرود بین ۳ تا ۶ مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش شیب معکوس نسبت عمق ثانویه و طول پرش کاهش می‌یابد و افزایش زبری کف کانال

به دلیل افزایش تنش برشی، باعث تشدید تأثیر شیب معکوس روی طول جهش می‌شود و عامل اصلی این تغییرات را تأثیر مؤلفه رو به پایین نیروی وزن در روی شیب معکوس و افزایش تنش برشی در روی بستر زبر دانستند و همچنین نتیجه گرفتند که افت انرژی جهش با افزایش شیب معکوس و ارتفاع زبری افزایش می‌یابد.

پارسا مهر و همکاران (۱۳۹۲) در یک بررسی آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی را بر روی شکل جدیدی از بستر زبر با زبری‌های به شکل نیم‌استوانه با سه ارتفاع ( $r$ ) و چهار فاصله ( $s=1D, 2D, 3D, 4D$ ) مورد بررسی قرار دادند. در مجموع ۲۳۸ آزمایش در محدوده اعداد فرود  $4/6$  تا  $7/4$  بر روی شیب افقی و دو شیب معکوس ۱ و  $1/5$  درصد انجام گرفت. نتایج نشان داد با افزایش ارتفاع، فاصله بین زبری‌ها، شیب معکوس و عدد فرود، عمق ثانویه پرش کاهش و افت انرژی و تنش برشی افزایش می‌یابد. در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با زبری‌های نیم‌استوانه‌ای شکل بر روی شیب معکوس  $1/5$  درصد، عمق مزدوج پرش نسبت به پرش کلاسیک به طور متوسط ۳۶ درصد کاهش یافت و ضریب تنش برشی به طور متوسط ۱۶ برابر بستر صاف و افقی شد. در مجموع، نتایج نشان داد که بستر زبر بر روی شیب معکوس به منظور کارایی بهتر می‌تواند جایگزین مناسبی در حوضچه‌های آرامش باشد.

پارسا مهر و همکاران (۱۳۹۲) در یک بررسی آزمایشگاهی خصوصیات پرش هیدرولیکی در یک کانال مستطیلی در دو حالت با کف افقی و با شیب معکوس به همراه آبپایه مورد مطالعه قرار دادند. در مجموع ۸۴ آزمایش با سه ارتفاع آبپایه و دو شیب معکوس ۱ و  $1/5$  برای بستر در محدوده اعداد فرود  $4/6$  تا  $7/4$  و محدوده نسبت عمق ثانویه  $4/5 < y_2/y_1 < 9/6$  انجام شد. نتایج نشان داد نصب آبپایه طول پرش هیدرولیکی را در بستر با شیب افقی به طور متوسط  $6/3$  درصد و در بستر با شیب معکوس  $1/5$  درصد،  $46/6$  درصد کاهش می‌دهد. در مجموع به کارگیری آبپایه در حوضچه آرامش باعث تثبیت پرش روی شیب معکوس و بهبود خصوصیات پرش هیدرولیکی گردید.

پور عبدالله و همکاران (۱۳۹۳) تحقیقی مبنی بر بررسی اثر میزان زبری و شیب معکوس بر خصوصیات هیدرولیکی پرش و تغییرات افت انرژی در حوضچه آرامش با شیب کف منفی و سه نوع زبری متفاوت انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقادیر عمق نسبی پرش در یک حوضچه آرامش با شیب کف منفی و افزایش زبری نسبت به حالت افقی کاهش یافت. آن‌ها زبری‌ها را در شرایط مختلف با اعداد فرود بین  $4/9$  تا  $7/8$  مورد آزمایش قرار داده و نتیجه گرفتند که کاهش اعماق نسبی در مطالعه آن‌ها به طور متوسط  $31/15\%$  بود. همچنین مقدار افت انرژی نسبی در حالت‌های مختلف شیب و زبری بیشتر از حالت کلاسیک بود.

پور عبدالله و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیقی تأثیر بستر زبر همراه با شیب کف منفی بر روی پرش هیدرولیکی را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه اثر سه زبری متفاوت و شیب منفی بستر بر پروفیل سرعت و سطح آب پرش هیدرولیکی در اعداد فرود اولیه  $4/9$  تا  $7/8$ ، و شیب‌های صفر،  $-0/6\%$ ،  $-0/3\%$  و  $2\%$  اندازه‌گیری گردید.

## ۲-۳-۳- مطالعات عددی انجام شده در زمینه پرش هیدرولیکی روی بستر صاف و زبر و همچنین اعمال شیب معکوس

بررسی دقیق پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای زبر و شیب‌دار با روش‌های تحلیلی مشکل به نظر می‌رسد. با توسعه تکنیک‌های پیشرفته عددی قابلیت مدل‌سازی جریان متلاطم با مرزهای پیچیده امکان پذیر شده و از این روش‌ها برای تعیین پروفیل‌های سطح آب و سرعت و توزیع تنش برشی بستر می‌توان استفاده نمود. مشکل بودن بررسی پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای زبر و شیب‌دار با استفاده از روش‌های تحلیلی فقط به دلیل شرایط مرزی این پدیده نیست بلکه به لحاظ پیچیدگی جریان متلاطم و فرآیند پخشیدگی بین جت جریان با دیواره‌ها، کف و سطح غلتان آب می‌باشد. با توجه به این که در پرش هیدرولیکی جریان متلاطم دو فاز آب و هوا برقرار است، شبیه‌سازی این پدیده با استفاده از مدل‌های آشفتگی مانند  $k-\epsilon$  استاندارد و  $k-\epsilon$  RNG با در نظر

گرفتن جزء حجم سیال (VOF) می تواند به نتایج دقیق تری منجر شود (زائو و میسرا ۲۰۰۴). شبیه سازی عددی پرش بر روی بسترهای صاف در کانال های مستطیلی توسط محققین زیادی بررسی شده است.

قارانجیک و چادری (۱۹۹۱) مدل عددی پرش هیدرولیکی را بررسی نمودند. در این تحقیق برای شبیه سازی جریانهای فوق بحرانی و زیر بحرانی و پرش هیدرولیکی در بستر مستطیلی با شیب کم از معادلات بوزینسک<sup>۱</sup> استفاده گردید.

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

سعیدپناه و همکاران (۲۰۰۱) با بررسی هایی که انجام دادند در معادله های جریان های متغیر تدریجی، عبارت هایی را برای در نظر گرفتن توزیع غیرهیدرواستاتیک فشار اضافه کردند و از حل معادله های حاصل به روش تفاضل محدود برای محاسبه پرش هیدرولیکی در یک کانال ذوزنقه ای استفاده نمودند. مقایسه نتایج به دست آمده از حل عددی و نتایج آزمایشگاهی صحت نتایج عددی را به طور قابل قبولی نشان داد.

سارکر و رودز (۲۰۰۲) پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای صاف را به صورت تجربی بررسی نموده و سپس با استفاده از مدل های آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG و روش VOF شبیه سازی نمودند.

زائو و میسرا (۲۰۰۴) مدل عددی پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف را با استفاده از معادلات پیوستگی و مومنتم و با مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  به صورت دو بعدی بررسی کرده و نتایج آن به صورت پروفیل های سرعت و سطح آب، محاسبه مقادیر انرژی جنبشی ( $k$ ) و اتلاف انرژی ( $\varepsilon$ ) در مقاطع مختلف پرش را ارائه نمودند.

---

<sup>1</sup> Bossinesq

آموریم و همکاران (۲۰۰۴) 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 صحت‌سنجی نمودند.

گونزالز و بومباردلی (۲۰۰۵) پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف را با مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  و روش گردابی LES شبیه‌سازی نموده و با نتایج تجربی لیو و همکاران (۲۰۰۴) مقایسه نمودند.

صبغ یزدی و همکاران (۲۰۰۷) در یک مدل سه بعدی به ارزیابی مدل‌های تلاطمی  $k-\varepsilon$  و RNG  $k-\varepsilon$  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.

فرومند و همکاران (۱۳۸۸) پرش هیدرولیکی در یک کانال مستطیلی با بستر صاف را به کمک نرم افزار Fluent شبیه‌سازی نمودند. همچنین از مدل آشفتگی RNG در ترکیب با روش VOF برای مدل‌سازی سطح آزاد و ایجاد جریان متلاطم دو فاز آب و هوا استفاده شد. در این مطالعه نتایج حاصل از مدل عددی از قبیل پروفیل سطح آب و توزیع عمقی سرعت با نتایج حاصل از اندازه‌گیری آزمایشگاهی گزارش شده توسط لیو و همکاران (۲۰۰۴) مقایسه گردید. نتایج عددی به دست آمده انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد.

عباسپور و همکاران (۱۳۸۹) در یک مطالعه عددی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار را با استفاده از مدل‌های  $k-\varepsilon$  استاندارد و RNG و به کارگیری نرم‌افزار Fluent به صورت دوبعدی شبیه‌سازی نمودند. در مطالعه آن‌ها سطح آزاد جریان با روش جزء حجم سیال VOF تعیین گردید و نتیجه گرفتند که مدل‌های آشفتگی  $k-\varepsilon$  و روش جزء حجم سیال VOF برای پیش‌بینی پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار مناسب بوده و خطای نسبی متوسط مقادیر سطح آب بدست آمده

از مدل های عددی و اندازه گیری شده ۲ تا ۷ درصد است. همچنین با بررسی تشابه پروفیل های سرعت در فواصل مختلف پرش هیدرولیکی نشان دادند که توزیع سرعت در آزمون های مختلف یکسان بوده و نتایج بدست آمده از مدل های عددی و داده های تجربی آید و راجار اتنام تطابق خوبی دارند. همچنین تأثیر بستر موج دار بر روی خصوصیات پرش هیدرولیکی در اعداد فرود مختلف با محاسبه موقعیت سطح آب، پروفیل سرعت و تنش برشی بستر در این مدل مورد بررسی قرار گرفت .

آصفی و ضیائی (۱۳۹۰) به شبیه سازی پرش بر روی سطوح شیب دار معکوس با پله با استفاده از نرم افزار Fluent و به کار گیری مدل  $k-\epsilon$  استاندارد پرداختند. پروفیل سطح آب استخراج شده از مدل در محدوده پرش دارای تطابق نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشگاهی بود. 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 می شود.

کریمی و همکاران (۱۳۹۰) در بررسی که انجام دادند، نتایج شبیه سازی دوبعدی پدیده پرش هیدرولیکی در زیر دریچه با استفاده از Fluent و روش های جریان چند فازی Mixture و VOF و مدل های آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد، RNG  $k-\epsilon$  و تنش رینولدز (RSM) با نتایج آزمایشگاهی سوندسن و همکاران (۲۰۰۲) تطابق خوبی داشت. نتایج روش های Mixture و VOF در توزیع سرعت تقریباً یکسان مشاهده شد، ولی روش VOF پروفیل مناسب تری از سطح آب ارائه داد.

حیدری فهونده و همکاران (۱۳۹۵) به شبیه سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای موج دار مثلثی شکل با استفاده از نرم افزار دینامیک محاسباتی Fluent و به کار گیری 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 (۲۰۱۰) در دانشگاه قاهره استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل  $k-\epsilon$  استاندارد و روش جزء حجم سیال (VOF) برای پیش بینی پروفیل های سطح آب در پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار مثلثی شکل مناسب بوده و با دقت حدودی ۳ تا ۷ درصد پروفیل سطح آب، شبیه سازی گردید.



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. در حالت اعمال سرعت ورودی یکنواخت، پرش به بالادست کانال منتقل، طول پرش کمتر و نیز سرعت در آن کمتر شد. در مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد نسبت به مدل  $RNG\ k-\varepsilon$  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 به دست آمده تراز سطح آب از آن دو با یکدیگر اختلاف داشت و روش حجم سیال در تطابق مناسب‌تری با نتایج آزمایشگاهی بود.

هدف از این تحقیق، شبیه‌سازی عددی پرش آبی بر روی بستر موج‌دار مثلثی شکل با اعمال شیب معکوس و تأثیر این عوامل بر مشخصات پرش می‌باشد. این تحقیق با استفاده از نرم افزار فلوئنت و با به‌کار بردن روش حجم محدود در حل معادلات ناویر-استوکس متوسط رینولدزی، انجام گرفته و سطح آزاد جریان نیز با بهره‌وری از روش عددی جزء حجم سیال (VOF) تعیین شده است. لازم به ذکر است که استفاده از روش VOF برای شبیه‌سازی مناسب سطح آزاد جریان در مطالعات متعددی از قبیل عباسپور و هاشمی‌کیا (۱۳۹۲) اثبات شده است.



فصل سوم

مواد و روش ها

### ۳-۱- مقدمه

در این بخش ابتدا مدل آزمایشگاهی و آزمایش‌های این تحقیق تشریح گردید، سپس آنالیز ابعادی مورد بررسی قرار گرفته و در بخش آخر به معرفی مدل عددی و نرم‌افزار فلونت پرداخته شده و توضیحاتی راجع به شبیه‌سازی آورده شد.

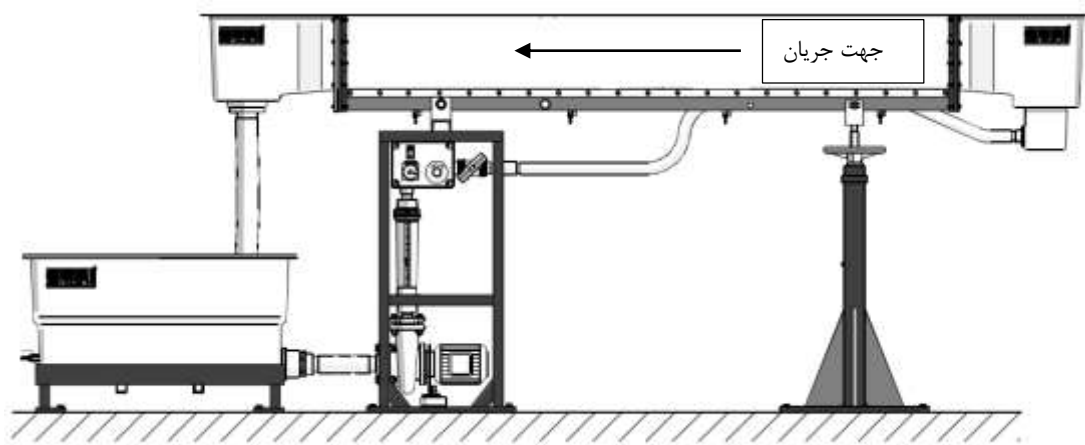
### ۳-۲- فلوم آزمایشگاهی

در این تحقیق از یک مدل آزمایشگاهی که در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود موجود بود، استفاده شد. طول فلوم ۵ متر، ارتفاع ۰/۳۰ متر و عرض ۰/۰۸ متر کف آن از جنس آلومینیوم و پایه‌های آن فولادی و شیب‌پذیر بود. این فلوم مجهز به سیستم چرخش آب بوده، به طوری که آب از طریق پمپ به بخش ورودی فلوم پمپاژ شده و از آنجا به درون فلوم هدایت می‌شود. شکل (۳-۱) ، سیستم پمپاژ و تنظیم دبی را در فلوم نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱) سیستم پمپاژ و کنترل دبی

لوله انتقال آب از یک سر به مخزن بزرگ ابتدایی و از یک سر به مخزن کوچک و ورودی فلوم متصل بود که آب را از مخزن بزرگ به مخزن ورودی هدایت می کرد. دیواره های کانال شفاف و از جنس پلکسی گلاس بود. به منظور تأمین دبی جریان از پمپ سانتریفیوژ با دبی حداکثر ۹ مترمکعب بر ساعت استفاده گردید. ارتفاع دیواره مخزن در بالادست جهت تأمین هد مورد نیاز پرش هیدرولیکی در اعداد فرود مختلف، ۷۰ cm در نظر گرفته شده و یک دریچه کشویی با بازشدگی ثابت و برابر ۱/۱ سانتی متر در ابتدای فلوم قرار داده شد. شکل (۲-۳) تصویر فلوم آزمایشگاهی را نشان می دهد.



شکل (۲-۳) شکل شماتیک فلوم مورد استفاده

سپس با نصب یک دریچه قطاعی در پایین دست فلوم و تغییر در ارتفاع بازشدگی این دریچه، محل دقیق پرش کنترل و تثبیت گردید. به منظور تعیین و تنظیم دبی عبوری از فلوم آزمایشگاهی، از دبی سنج نصب شده بر روی فلوم استفاده گردید، برای حالت شاهد سطح صاف چوبی با ارتفاع ۳/۷ cm در نظر گرفته شد. زبری های مورد استفاده در این تحقیق مثلثی شکل و چوبی بودند و در دو حالت فاصله صفر و دو سانتی متر از هم تعبیه شدند. مقادیر عمق اولیه و ثانویه با استفاده از Pointgauge یا عمق سنج فلوم با دقت  $\pm 0/1$  و طول پرش با استفاده از اشل نصب شده بر روی دیواره فلوم اندازه گیری شد. برای انجام آزمایش ابتدا دستگاه را روی شیب مورد نظر تنظیم کرده، سپس با روشن کردن پمپ، آب وارد فلوم شده و به کمک دریچه قطاعی محل پرش هیدرولیکی در داخل فلوم تنظیم گردید.

### ۳-۳- آنالیز ابعادی<sup>۱</sup>

به‌طور کلی خصوصیات پرش هیدرولیکی در بسترهای زبر و شیب معکوس به پارامترهای زیر بستگی دارد:

$$\mathcal{F}(\rho, v, \mu, g, h, L, S, y_1, y_2, \Delta h, L_j) = 0 \quad (۱-۳)$$

ابعاد و پارامترهای مربوط به این تحقیق در جدول (۱-۳) ارائه شده است:

جدول (۱-۳) ابعاد و پارامترهای مربوط به این تحقیق

بعاد	نام پارامتر	علامت پارامتر
$ML^{-3}$	جرم مخصوص	$\rho$
$LT^{-1}$	سرعت	$v$
$ML^{-1}T^{-1}$	لزجت دینامیکی	$\mu$
$LT^{-2}$	شتاب ثقل	$g$
$L$	ارتفاع زبری	$h$
$L$	فاصله زبری	$L$
بی‌بعد	شیب معکوس	$S$
$L$	عمق اولیه پرش	$y_1$
$L$	عمق ثانویه پرش	$y_2$
$L$	افت انرژی	$\Delta h$
$L$	طول پرش	$L_j$

متغیرهای تکراری  $v, \rho, y_1$  در نظر گرفته‌شد. بنابراین ۸ پارامتر بدون بعد خواهیم داشت. با استفاده از روش  $\Pi$  باکینگهام، آنالیز ابعادی به صورت زیر انجام می‌شود:

$$\mathcal{F}(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8) = 0 \quad (۲-۳)$$

$$\mathcal{F}\left(\frac{\mu}{\rho v y_1}, \frac{y_1 g}{v^2}, \frac{h}{y_1}, \frac{L}{y_1}, \frac{\Delta h}{y_1}, S, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}\right) = 0 \quad (۳-۳)$$

<sup>۱</sup> Dimensional analysis

$$\mathcal{F}(\text{Re}_1 = \frac{\rho v y_1}{\mu}, \text{Fr}_1 = \frac{v}{\sqrt{y_1 g}}, \frac{h}{y_1}, \frac{\Delta h}{y_1}, S, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{L}{y_1}) = 0 \quad (3-4)$$

که در این معادله،  $\text{Re}_1$  عدد رینولدز در مقطع اولیه جهش بوده برای  $\text{Re}$  در مقطع ورودی جریان مقدار ۷۱۹۸ حاصل شد که چون از ۴۰۰۰ بیشتر است جریان متلاطم بوده و می‌توان از آن صرف نظر نمود.

در نتیجه معادله (۳-۴) به صورت زیر خواهد شد:

$$\mathcal{F}(\text{Fr}_1, \frac{h}{y_1}, \frac{\Delta h}{y_1}, S, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{L}{y_1}) = 0 \quad (3-5)$$

در نهایت برای مشخصات پرش معادلات زیر را خواهیم داشت:

$$\frac{L_j}{y_1} = \mathcal{F}(\text{Fr}_1, \frac{h}{y_1}, \frac{\Delta h}{y_1}, S, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L}{y_1}) \quad (3-6)$$

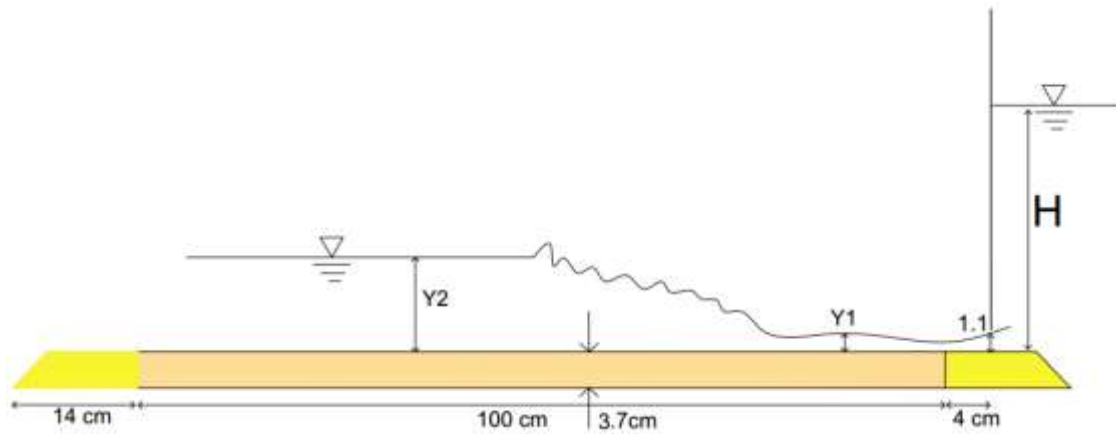
$$\frac{y_2}{y_1} = \mathcal{F}(\text{Fr}_1, \frac{h}{y_1}, \frac{\Delta h}{y_1}, S, \frac{L_j}{y_1}, \frac{L}{y_1}) \quad (3-7)$$

$$\frac{\Delta h}{y_1} = \mathcal{F}(\text{Fr}_1, \frac{h}{y_1}, S, \frac{L_j}{y_1}, \frac{L}{y_1}, \frac{y_2}{y_1}) \quad (3-8)$$

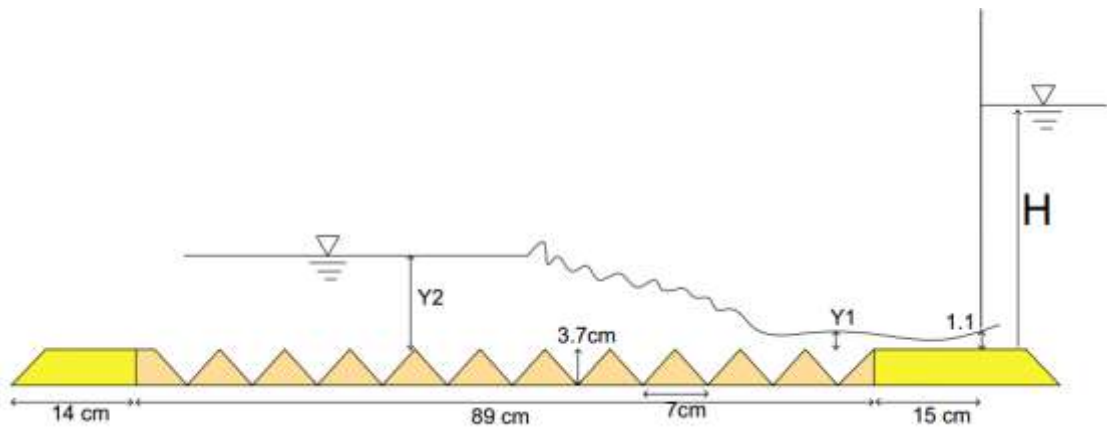
بنابراین آزمایش‌ها، در سه شیب کف فلوم (صفر، ۰/۵٪، ۰/۷۵٪)، ۵ دبی (۳، ۵، ۶، ۷ و ۸ مترمکعب بر ساعت) در محدوده اعداد فرود ۰/۲ تا ۱۱/۱۱ انجام شد. پرش‌های انجام‌شده از بازه ضعیف و نوسانی تا قوی بودند و سطح صاف به عنوان شاهد و یک نوع زبری سطح با دو فاصله انجام شد. در این تحقیق تأثیر پارامترهای عدد فرود، شیب معکوس، زبری مثلی بررسی گردید. در مجموع تعداد ۴۵ آزمایش انجام شد که ۱۵ آزمایش مربوط به بستر صاف و ۳۰ آزمایش مربوط به بسترهای زبر با فاصله زبری صفر و دو سانتی‌متر بود، پارامترهای اشاره شده فوق در جدول (۳-۲) توضیح داده شده‌اند. در تمامی آزمایش‌ها، عمق اولیه و ثانویه پرش، پروفیل سطح آب اندازه‌گیری گردید. شکل‌های (۳-۳)، (۳-۴) و (۳-۵) بسترهای با زبری مختلف را نمایش می‌دهد.

جدول (۲-۳) پارامترهای مؤثر در تحقیق حاضر

توضیحات	پارامترها
۳،۵،۶،۷،۸	دبی (مترمکعب بر ساعت)
۱/۱	میزان بازشدگی دریچه (سانتی متر)
بدون زبری، مثلثی شکل	زبری
۳/۷	ارتفاع زبری مثلثی (h)
۰،۲	فاصله زبری (L)
۰/۷۵، ۰/۵، ۰	شیب معکوس (٪)

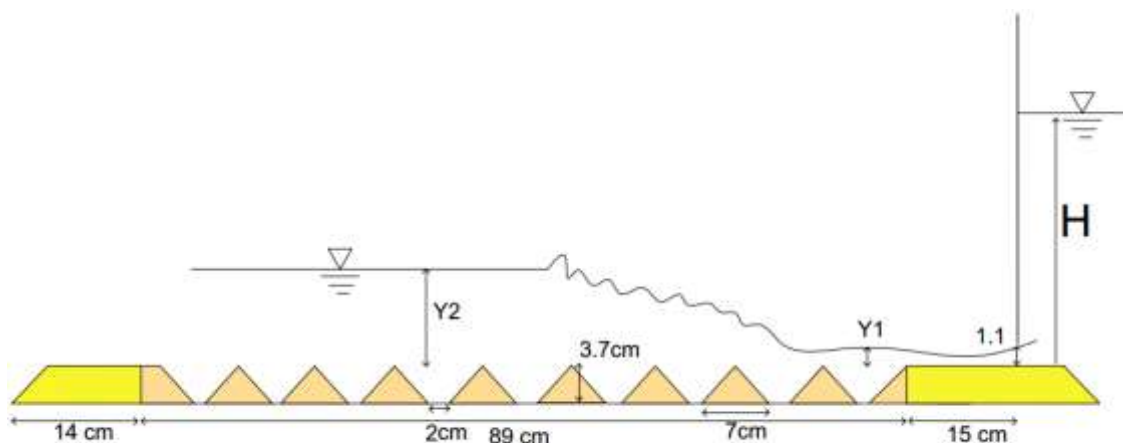


شکل (۳ - ۳) شکل شماتیک سطح صاف در آزمایشها



شکل (۴ - ۳) شکل شماتیک سطح با زبری مثلثی با فاصله صفر





شکل (۳-۵) شکل شماتیک سطح با زبری مثلی با فاصله دو سانتی متر

### ۳-۴- معرفی و کاربرد مدل فلوئنت<sup>۱</sup>

فلوئنت یکی از کامل ترین و کاربردی ترین مدل های CFD<sup>۲</sup> در دنیا است. این نرم افزار با زبان C نوشته شده و از معادلات ناویر-استوکس در تحلیل جریان استفاده می کند. در این مدل معادلات به روش حجم محدود حل می شوند. سهولت استفاده از مدل فلوئنت و قابلیت های فراوان آن در آنالیز جریان های مختلف سبب شده است که از این مدل در صنعت به صورت گسترده ای استفاده شود.

مهم ترین قابلیت مدل فلوئنت عبارت اند از (گلشاهی فر، ۱۳۸۷)

- مدل سازی جریان های تراکم پذیر و تراکم ناپذیر
- مدل سازی جریان های ماندگار و غیر ماندگار
- مدل سازی جریان های لزج، ورقه ای و آشفته
- مدل سازی حالت های مختلف انتقال حرارت و سیال (هدایت، جابجایی و تشعشع)
- مدل سازی سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی
- مدل سازی جریان های با مرکز متحرک و دوار

<sup>۱</sup> Fluent

<sup>۲</sup> Computational Fluid Dynamic

- مدل‌سازی فرآیندهای شیمیایی، احتراق و آلودگی ناشی از احتراق
- مدل‌سازی جریان‌های مختلف دوفازی و چند فازی
- مدل‌سازی جریان‌های تغییر فاز
- مدل‌سازی جریان‌های با سطح آزاد
- مدل‌سازی جریان‌های عبوری از مرزهای متخلخل
- مدل‌سازی جریان‌های تهویه مطبوع
- مدل‌سازی جریان‌های فن، رادیاتور و مبدل‌های حرارتی

### ۳-۴-۱- مراحل کاری در فلوئنت (گلشاهی‌فر، ۱۳۸۷)

۱. تعریف محدوده هندسی<sup>۱</sup>
۲. ایجاد شبکه<sup>۲</sup>
۳. تعریف دوبعدی یا سه‌بعدی بودن فضای جریان<sup>۳</sup>
۴. تعیین نوع جریان<sup>۴</sup>
۵. تعریف رژیم جریان<sup>۵</sup>
۶. تک فازی یا چند فازی بودن جریان<sup>۶</sup>
۷. تراکم پذیر یا تراکم ناپذیر بودن جریان<sup>۷</sup>
۸. تحلیل و یا عدم تحلیل انرژی در جریان<sup>۸</sup>

---

<sup>1</sup> Define geometry  
<sup>2</sup> Mesh generation  
<sup>3</sup> 2D /3D flow  
<sup>4</sup> Steady/Unsteady flow  
<sup>5</sup> Laminar/Turbulent/Inviscid flow  
<sup>6</sup> Single/Multi phase flow  
<sup>7</sup> Compressible/Incompressible flow  
<sup>8</sup> Head transfer (Energy equation)

۹. تعیین نوع مواد<sup>۱</sup>
۱۰. تعیین معادلات برای حل جریان<sup>۲</sup>
۱۱. شرایط مرزی<sup>۳</sup>
۱۲. گسسته سازی معادلات<sup>۴</sup>
۱۳. اجرای برنامه کامپیوتری<sup>۵</sup>
۱۴. استخراج نتایج<sup>۶</sup>

### ۳-۵- مراحل کاری در مرحله نرم‌افزاری در تحقیق حاضر

#### ۳-۵-۱- تعریف محدوده هندسی

در تحقیق حاضر برای ساخت هندسه و شبکه‌بندی از Ansys Work Bench استفاده شده است. محدوده هندسی فلوم مورد مطالعه در مدلی، در محیط Design Modeler از قسمت Work Bench از نرم‌افزار Ansys 17.2 با توجه به مدل ساخته شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود به صورت دوبعدی ترسیم گردید.

در شبیه‌سازی عددی پارامترهای هندسی مورد استفاده قرار گرفت:

۱. ارتفاع بازشدگی دریچه ورودی که بر روی سرعت ورودی تأثیر گذار است.
۲. سطح صاف و زبری مورد استفاده در آزمایش‌ها
۳. شیب معکوس اعمال شده

---

<sup>1</sup> Material properties  
<sup>2</sup> Conservation equation  
<sup>3</sup> Boundary condition  
<sup>4</sup> Discretization  
<sup>5</sup> Run program  
<sup>6</sup> Viewing result

۴. دریچه قطاعی انتهای فلوم که به جای استفاده از دریچه قطاعی برای نتیجه‌گیری دقیق‌تر از

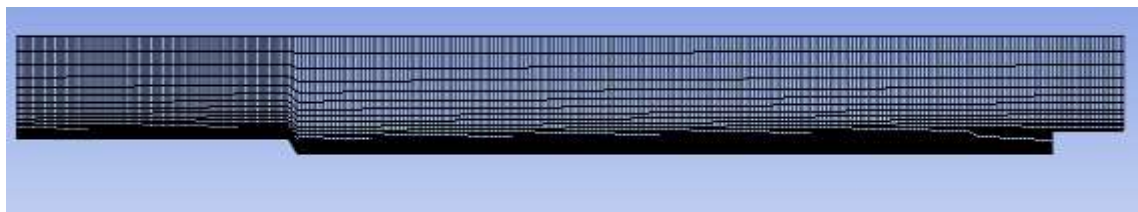
یک سرریز لبه‌پهن استفاده گردید که ارتفاع سرریز قبل از شبیه‌سازی کالیبره گردید. ( شکل ۳-۶ )



شکل (۳-۶) هندسه مدل مورد نظر در نرم افزار Ansys

### ۳-۵-۲- ایجاد شبکه

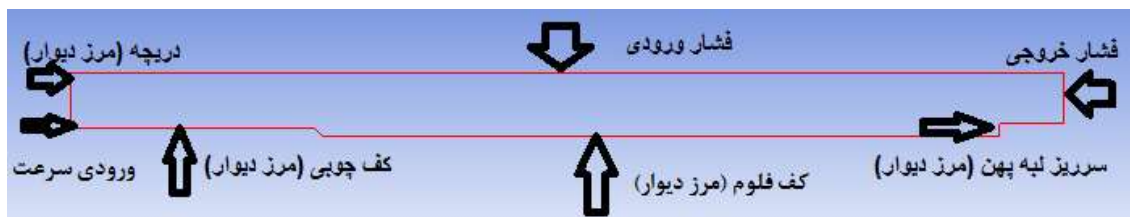
شبکه‌بندی به صورتی انجام‌شده که در قسمت کف کانال شبکه‌بندی ریزتر و در قسمت بالای کانال شبکه‌بندی درشت‌تر باشد. نام‌گذاری اجزای مختلف هندسه نیز در قسمت شبکه‌بندی انجام می‌شود. پس از ترسیم، هندسه و شبکه‌بندی انجام‌شده را در نرم‌افزار فلوئنت بازنموده و تنظیمات مربوطه برای هر آزمایش وارد می‌شود.



شکل (۳-۷) شبکه بندی مدل با سطح صاف در قسمت Meshing

### ۳-۵-۳- تعریف شرایط مرزی

در نرم‌افزار فلوئنت، موارد متعددی از انواع شرایط مرزی (۱۰ نوع) تعریف شده که با استفاده از آن‌ها می‌توان مشخصات جریان را در ورودی‌ها و خروجی‌های جریان به راحتی مشخص نمود. شرایط مرزی فشار ورودی، سرعت ورودی، دبی جرمی ورودی، فشار خروجی، فشار در بینهایت، جریان خروجی، دریچه ورودی، فن ورودی، دریچه خروجی و فن خروجی، جزء ده نوع شرط مرزی ورودی و خروجی جریان می‌باشند. سایر شرایط مرزی شامل شرط مرزی دیواره، شرط مرزی تقارن، شرط مرزی پریودیک و شرط مرزی تقارن محوری نیز در فلوئنت وجود دارند که بر حسب شرایط مسائل قابل استفاده هستند.



شکل (۳-۸) شرایط مرزی مدل در قسمت Meshing

### ۳-۵-۴- تعریف دوبعدی یا سه بعدی بودن فضای جریان

پس از انجام مرحله شبکه بندی وارد قسمت تنظیمات شده، پنجره ای باز می شود که در آن دوبعدی بودن جریان را مشخص گردید. پس از بازخوانی فایل، مقیاس<sup>۱</sup> مدل تعریف شده و با بررسی شبکه<sup>۲</sup>، اطمینان از عدم وجود مشکل در المان ها حاصل شد.

### ۳-۵-۵- تنظیمات عمومی<sup>۳</sup>

گام بعدی در فلونت تنظیمات حل<sup>۴</sup> می باشد. نوع روش حل جریان را بر پایه فشار قرار داده و مقدار سرعت را مطلق در نظر گرفته و سپس نوع جریان از قبیل ماندگار<sup>۵</sup> و یا غیر ماندگار بودن<sup>۶</sup> را تعیین کردیم. با توجه به دوفازی بودن جریان در پرش هیدرولیکی، مدل فلونت جریان را به صورت غیر ماندگار شبیه سازی می کند، در نهایت تأثیر شتاب ثقل را فعال نموده و به آن مقدار داده شد.

### ۳-۵-۶- تنظیمات مدل ها<sup>۷</sup>

مدل فلونت قابلیت مدل کردن جریان های زیر لزج، ورقه ای و آشفته را دارد. در این تحقیق با توجه به تلاطم زیاد جریان، رژیم جریان آشفته در نظر گرفته شد و از روش VOF<sup>۸</sup> استفاده نموده و فرمول

<sup>1</sup> Scale

<sup>2</sup> Check

<sup>3</sup> General

<sup>4</sup> Solver

<sup>5</sup> Steady

<sup>6</sup> Transient

<sup>7</sup> Models

<sup>8</sup> Volume of Fluid

حل ، Implicit انتخاب شد. بنابراین مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد<sup>۱</sup> و تابع دیواره استاندارد<sup>۲</sup> در نظر گرفته شد.

### ۳-۵-۷- تعیین نوع مواد<sup>۳</sup>

با توجه به ماهیت جریان در فلوم و ایجاد پرش هیدرولیکی و تأثیر دو فاز بر روی یکدیگر، در این مدل نوع جریان به صورت دوفازی شبیه سازی و فاز اولیه و ثانویه به ترتیب هوا و آب تعریف شد مشخصات فیزیکی این دو سیال در دمای آزمایشگاهی  $20^{\circ}\text{C}$  فرض شد.

### ۳-۵-۸- تحلیل یا عدم تحلیل انرژی حرارتی

در مدل فلونت قابلیت انتقال حرارت بین سیال ها و یا سیال با سطوح جامد وجود دارد. در این تحقیق چون تبادل حرارتی بین فازها و یا فازها با سطوح جامد دارای اهمیت نیست، برای کاهش تعداد معادلات حل شده و زمان حل، از حل معادله انرژی حرارتی صرف نظر گردید.

### ۳-۵-۹- تراکم پذیر یا تراکم ناپذیر بودن جریان

در این تحقیق هدف تحلیل جریان آب است و چگالی هوا در مقابل چگالی آب ( $1/225 \text{ kg/m}^3$  نسبت به  $998/2 \text{ kg/m}^3$ ) ناچیز است. همچنین سرعت انتقال موج در آب بسیار کمتر از سرعت انتقال صوت در آب است، پس می توان جریان را غیرقابل تراکم در نظر گرفت.

### ۳-۵-۱۰- تنظیمات شرایط مرزی

در تنظیمات مربوط به شرایط مرزی<sup>۴</sup> در قسمت ورودی سرعت<sup>۵</sup> به آن مقدار داده می شود که با توجه به عمق آب در مخزن بالادست به دست آمد. فرمول سرعت به صورت معادله (۳-۹) می باشد:

<sup>1</sup> K-epsilon(eqn) Standard model

<sup>2</sup> Standard Wall Functions

<sup>3</sup> Materials

<sup>4</sup> Boundary Conditions

<sup>5</sup> Velocity Inlet

$$V = \sqrt{2gh} \quad (9-3)$$

که در آن  $V$  سرعت ورودی به فلوم،  $g$  شتاب ثقل،  $h$  ارتفاع آب در مخزن ورودی می‌باشد.

دیگر شرایط مربوط به لایه مرزی مقادیر فشار ورودی<sup>۱</sup> و فشار خروجی<sup>۲</sup> هستند که مقدار آن‌ها را در این مسأله برابر صفر قرار داده شد.

همچنین مقادیر قطر هیدرولیکی<sup>۳</sup>، شدت اغتشاش<sup>۴</sup> در این بخش وارد می‌شود.

$$A = h_g * b \quad (10-3)$$

$$P = (h_g + b) * 2 \quad (11-3)$$

$$R = A/P, D = 4 * R \quad (12-3)$$

$$Re_1 = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (13-3)$$

$$TI = 16 * Re^{-\frac{1}{8}} \quad (14-3)$$

### ۳-۵-۱۱- مرحله پردازش شبیه‌سازی

در زمان شروع جریان (زمان صفر) مخزن دارای آب می‌باشد، و محاسبات را بر اساس مقدار سرعت ورودی تنظیم می‌کنیم و سپس با توجه به گام زمانی تعریف شده حل معادله جریان غیرماندگار به صورت تکراری شروع می‌شود تا جریان به حالت ماندگار برسد. انتخاب گام زمانی کوچک باعث طولانی شدن و انتخاب گام زمانی بزرگ باعث واگرا شدن جواب‌ها می‌شود. بهترین گام زمانی برای مدل فلونت، زمانی است که به واسطه آن همگرایی جواب‌ها تضمین شده باشد. در این تحقیق پس از انجام چندین مرحله شبیه‌سازی و همگرا شدن جواب‌ها، فاصله گام زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه و تعداد گام زمانی ۲۰۰۰۰ در

<sup>1</sup> Pressure Inlet

<sup>2</sup> Pressure Outlet

<sup>3</sup> Hydraulic Diameter

<sup>4</sup> Turbulence Intensity

نظر گرفته شد. در نهایت برای شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی از هندسه مدل آزمایشگاهی استفاده شد و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. در شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی، اثر زبری‌های مختلف بستر و شیب معکوس در بستر کانال بر روی مشخصات پرش بررسی شده است. دو وضعیت شامل بستر بدون شیب و بستر با شیب ۰/۷۵٪ مورد بررسی قرار گرفت. همچنین سطح صاف و سطح با زبری مثلی به فاصله صفر و ۲ از هم شبیه‌سازی گردید. همچنین مدل سطح زبر با فاصله ۱ از هم نیز شبیه‌سازی گردید که در آزمایشگاه انجام نشده بود.

### ۳-۶- شاخص‌های آماری

#### ۳-۶-۱- خطای میانگین مجذور مربعات<sup>۱</sup> (RMSE)

$$RMSE = \left\{ \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2 \right] \right\}^{0.5} \quad (15-3)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n (X_i) \right] \quad (16-3)$$

#### ۳-۶-۲- خطای میانگین مجذور مربعات نرمال شده<sup>۲</sup> (NRMSE)

$$NRMSE = \frac{\left\{ \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2 \right] \right\}^{0.5}}{\bar{X}} \quad (17-3)$$

در این روابط X مقدار اندازه‌گیری، Y مقدار شبیه‌سازی شده، n تعداد داده‌ها و  $\bar{X}$  میانگین داده‌های اندازه‌گیری می‌باشد.

<sup>۱</sup> Root-mean-square deviation

<sup>۲</sup> Normalized-root-mean-square deviation



### ۳-۶-۳- ضریب همبستگی d

$$d = 1 - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|X_i - \bar{X}| + |Y_i - \bar{Y}|)} \right\} \quad (18-3)$$

در این رابطه d ضریب همبستگی و  $\bar{Y}$  میانگین داده‌های شبیه‌سازی می‌باشد.

مقادیر NRSME و d بین صفر و ۱ تغییر می‌کند. هر چقدر مقدار NRSME به صفر نزدیک‌تر شود و همچنین d به ۱ نزدیک شود نشان‌دهنده این است که مدل با دقت بالایی شبیه‌سازی را انجام می‌دهد.

### ۳-۶-۴- ضریب نش سات کلیف<sup>۱</sup> (NS)

$$NS = 1 - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \right\} \quad (19-3)$$

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

---

<sup>۱</sup> Nash-Sutcliffe model efficiently coefficient



فصل چہارم

نتیجہ و بحث

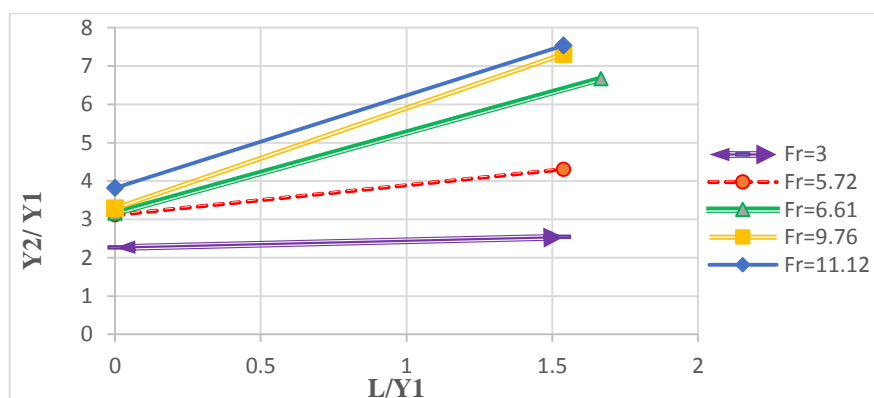
#### ۴-۱- مقدمه

در این فصل نتایج آزمایشگاهی و عددی مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی سطوح با زبری مثلثی و شیب معکوس، ارائه شده است. مطالب این فصل در سه بخش اصلی، نتایج آزمایشگاهی، مدل عددی و مقایسه مدل عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۴-۲- بررسی نتایج مدل آزمایشگاهی

##### ۴-۲-۱- تأثیر فاصله زبری بر نسبت اعماق پرش

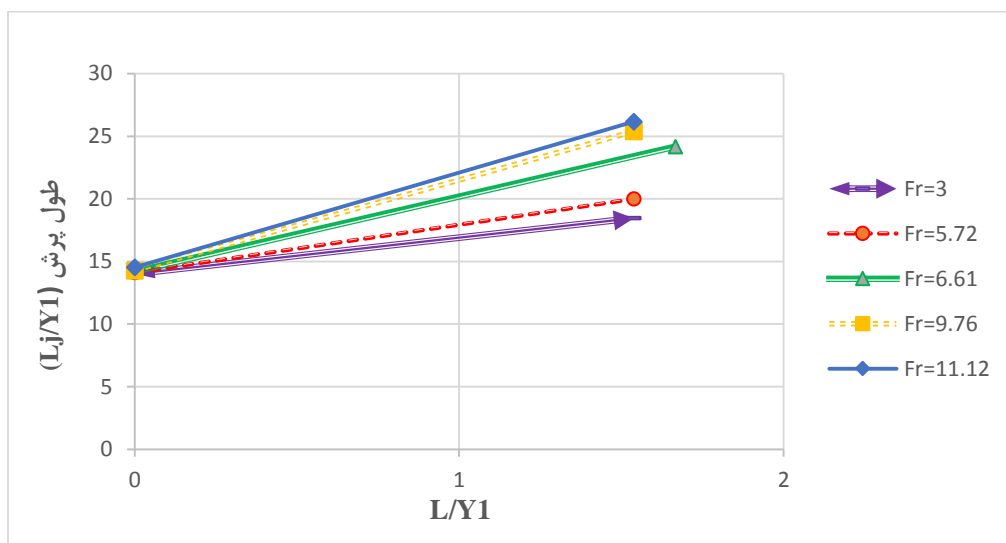
نتیجه تأثیر فاصله زبری بر نسبت اعماق پرش  $\left(\frac{y_2}{y_1}\right)$  در شکل (۴-۱) آمده است. در اثر زبری بستر، به دلیل افزایش تنش برشی بستر، اغتشاش جریان بیشتر شده و عمق ثانویه پرش هیدرولیکی سریع‌تر شکل گرفت، در نهایت نسبت اعماق پرش  $\left(\frac{y_2}{y_1}\right)$  نسبت به پرش کلاسیک کاهش یافت. برای سطوح زبر در حالتی که فاصله زبری‌ها برابر صفر بود، نسبت  $\frac{y_2}{y_1}$  کمترین مقدار را داشت. با افزایش فاصله بین زبری‌ها از شدت اغتشاش جریان به علت وجود زبری مثلثی کاسته شده و فاصله بین زبری‌ها همانند یک حوضچه عمل نمود و به این صورت با افزایش فاصله بین زبری‌ها از عملکرد زبری کاسته شد. بیشترین درصد کاهش مربوط به فرود  $9/76$  و برابر با  $55\%$  بود. همچنین با افزایش عدد فرود، نسبت  $\frac{y_2}{y_1}$  برای حالت‌های مختلف افزایش یافت. در این نمودار منظور از  $L$  فاصله بین زبری‌ها است.



شکل (۴-۱) تأثیر فاصله زبری بر نسبت اعماق پرش

#### ۲-۲-۴- تأثیر فاصله زبری بر طول پرش

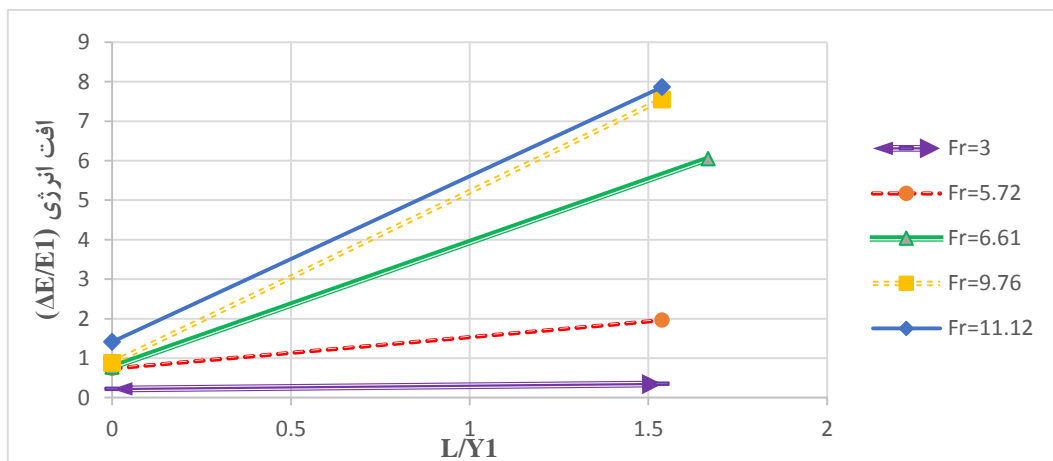
همانطور که در شکل (۲-۴) آمده است، مقادیر طول پرش توسط عمق اولیه پرش بی بعد شدند. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود نسبت  $\frac{Lj}{y_1}$  افزایش می‌یابد و افزایش فواصل زبری، عملکرد آنها را در کاهش  $\frac{Lj}{y_1}$  تحت تأثیر قرار می‌دهد و با مقایسه درصدهای کاهش طول پرش برای یک زبری ثابت، بیشترین کاهش مربوط به فرود ۱۱/۱۲ و برابر با ۴۴/۳٪ به دست آمد.



شکل (۲-۴) تأثیر فاصله زبری بر طول پرش

#### ۳-۲-۴- تأثیر زبری بر افت انرژی

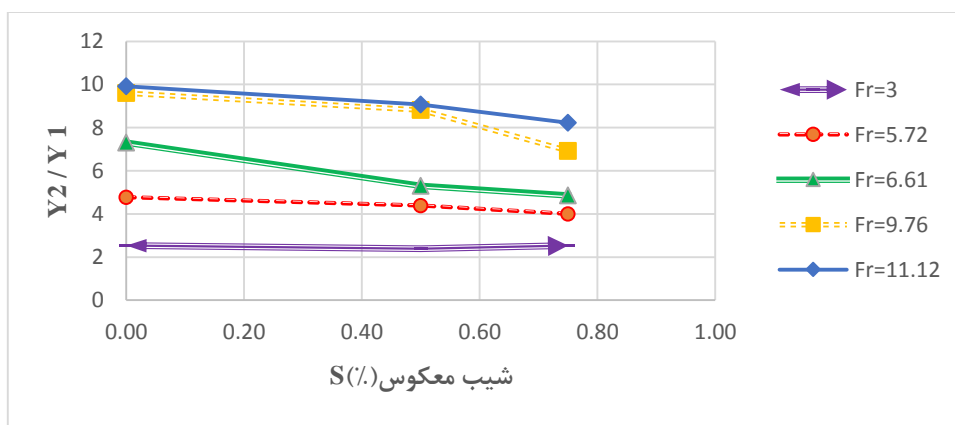
همان‌طور که در نمودار شکل (۳-۴) مشخص است، در حالتی که فاصله زبری‌های مثلی برابر صفر بود، مقدار نسبی افت انرژی به کمترین مقدار خود متمایل شد از آن‌جا که در داخل زبری‌ها اغتشاش جریان بیشتر شده و به میزان زیادی از انرژی اولیه کاسته شد ولی برای فاصله زبری دو سانتی‌متر، مقدار افت به میزان زیادی افزایش یافت. بیشترین درصد کاهش نسبت افت بر اساس فاصله زبری مربوط به فرود ۹/۷۶ و در زبری فاصله صفر برابر با ۸۸٪ بود، همچنین با افزایش عدد فرود مقدار افت انرژی افزایش پیدا کرد.



شکل (۳-۴) تأثیر فاصله زبری بر افت انرژی

#### ۴-۲-۴- تأثیر شیب معکوس بر نسبت اعماق پرش

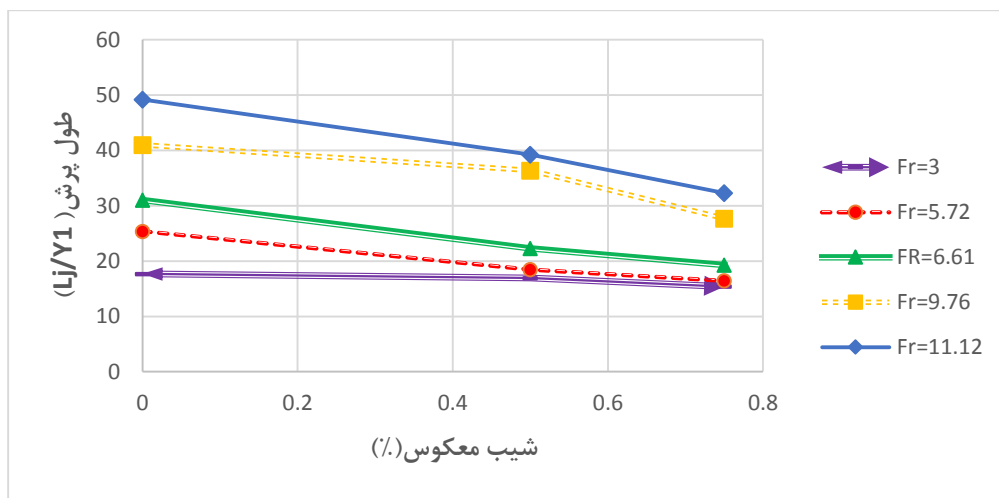
تغییرات  $\frac{y_2}{y_1}$  به ازای شیب‌های معکوس مختلف در شکل (۴-۴) آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود روند تغییرات  $\frac{y_2}{y_1}$  طوری است که این نسبت با افزایش عدد فرود از ۳ به ۱۱/۱۲ افزایش یافته و با افزایش شیب معکوس از صفر درصد به ۰/۷۵٪ نسبت  $\frac{y_2}{y_1}$  روند کاهشی ملایمی داشته است. بیشترین تغییرات نسبت  $\frac{y_2}{y_1}$  بر اساس عدد فرود ۹/۷۶ به میزان ۰/۲۱٪ بود. همچنین از تجزیه و تحلیل این شکل متوسط تغییرات  $\frac{y_2}{y_1}$ ، مقدار ۰/۱۲٪ به دست آمد. از آنجایی که در شیب معکوس، مؤلفه نیروی وزن در امتداد بستر در جهت عکس با جهت جریان بوده، سبب می‌شود که عمق ثانویه سریع‌تر اتفاق افتاده و به تبع آن نسبت اعماق پرش کاهش می‌یابد.



شکل (۴-۴) تأثیر شیب معکوس بر نسبت اعماق پرش

#### ۴-۲-۵- تأثیر شیب معکوس بر طول پرش

همان‌طور که در شکل (۴-۵) مشخص است با افزایش عدد فرود از ۳ به ۱۱/۱۲ طول پرش افزایش یافت، همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش شیب معکوس از صفر به ۰/۷۵٪ مقدار طول پرش روند کاهشی داشته و بیشترین مقدار تغییرات مربوط به عدد فرود ۶/۶۱ و به میزان ۳۷/۸ درصد بود و با توجه به همه نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که متوسط تغییرات طول پرش ۳۰ درصد بود. با افزایش شیب معکوس طول نسبی جهش کاهش می‌یابد و زبری بستر میزان این تغییرات را تشدید می‌کند، افزایش تنش برشی بستر در اثر حضور زبری و تأثیر مؤلفه روبه پایین وزن سیال در شیب معکوس از عوامل اصلی این تغییرات می‌باشند. با توجه به این‌که در اعداد فرود کم، مقدار نیروی برشی افزایش زیادی نخواهد داشت و وزن سیال کمتر می‌باشد، طول جهش در اعداد فرود کم کاهش کمتری خواهد داشت.

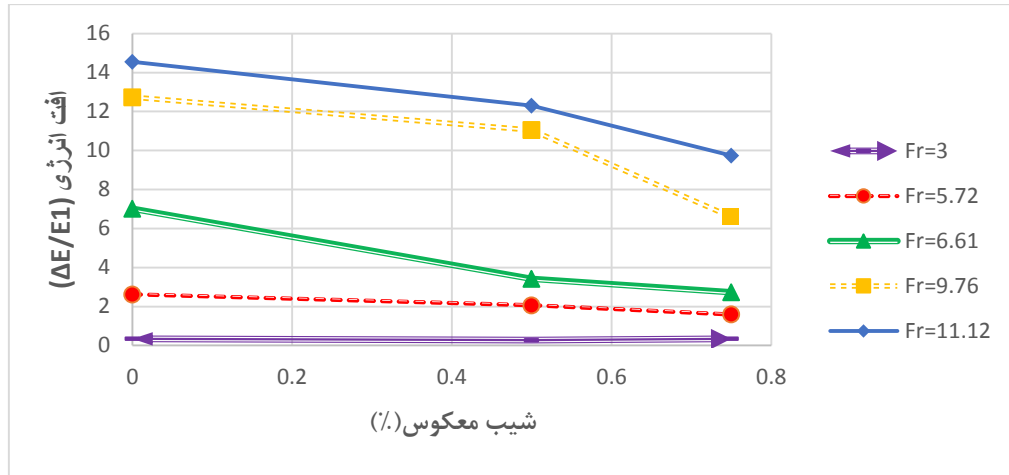


شکل (۴-۵) تأثیر شیب معکوس بر طول پرش

#### ۴-۲-۶- تأثیر شیب معکوس بر افت انرژی

برای اعداد فرود کمتر از ۶/۶۱ افزایش شیب معکوس تأثیری بر میزان نسبی افت انرژی نداشت، اما در اعداد فرود بزرگ‌تر، با افزایش شیب معکوس میزان افت انرژی کاهش یافت، همچنین با افزایش عدد

فرود از ۳ به ۱۱/۱۲ مقدار افت انرژی افزایش یافت و با توجه به نمودارها این نتیجه حاصل شد، که متوسط تغییرات افت انرژی ۴۲/۷ درصد بود.



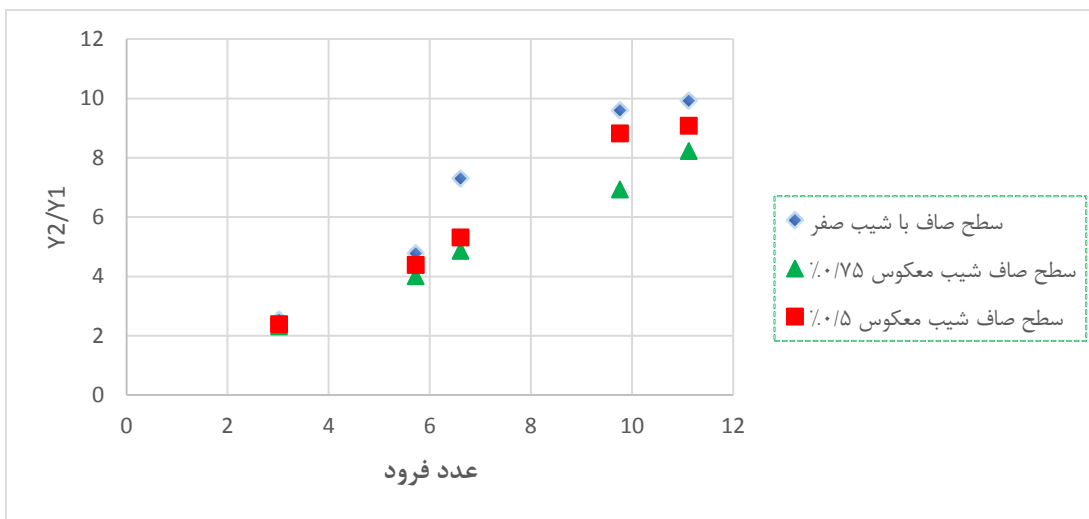
شکل (۴-۶) تأثیر شیب معکوس بر افت انرژی

#### ۴-۲-۷- تغییرات $\frac{y_2}{y_1}$ در برابر عدد فرود

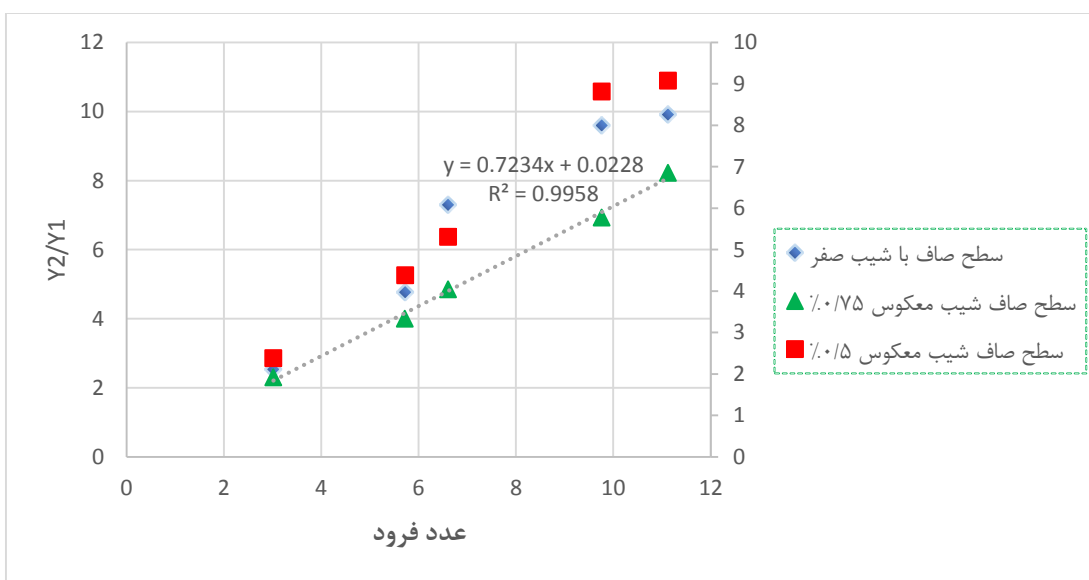
همان گونه که در نمودار شکل (۴-۷ الف) مشخص است با افزایش عدد فرود نسبت اعماق پرش افزایش یافت که دلیل آن را می توان افزایش قدرت پرش دانست. روند تغییرات  $\frac{y_2}{y_1}$ ، برای شیب های مختلف روندی خطی داشت. در سطح با شیب معکوس ۰/۷۵٪ میزان  $\frac{y_2}{y_1}$  نسبت به سطح صاف و سطح با زبری ۰/۵٪ کمتر بود، به عبارت دیگر با افزایش میزان شیب معکوس مقدار نسبت اعماق کاهش یافت و بیشترین مقدار کاهش در فرود ۶/۶۱ بود که مقدار  $\frac{y_2}{y_1}$  ۳۳/۴۶٪ کاهش داشته است. در شکل (۴-۷ ب) با برازش خط بر داده ها در سطح صاف با شیب معکوس ۰/۷۵٪ معادله زیر به دست آمد:

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.7234Fr_1 + 0.0228 \quad R^2 = 0.996 \quad (4-1)$$





شکل (۷-۴ الف)



شکل (۷-۴ ب)

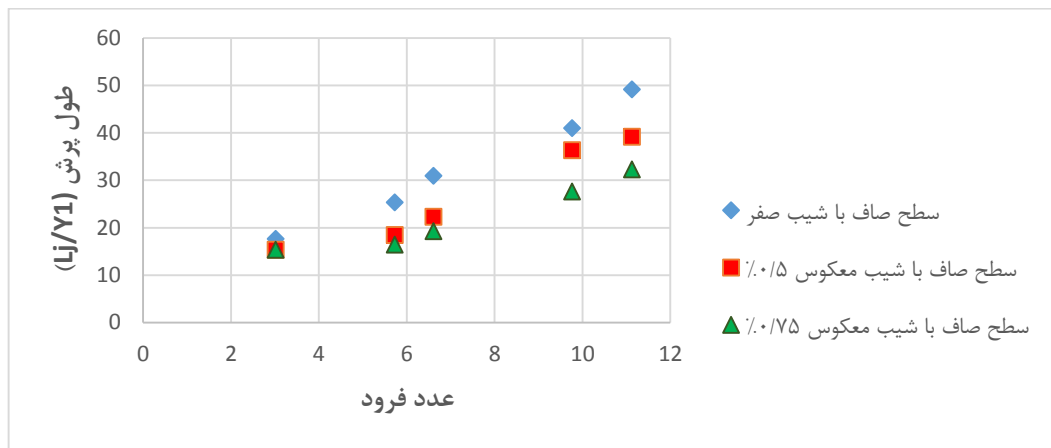
شکل (( ۷-۴ الف ، ب ) بررسی نسبت اعماق پرش در برابر عدد فرود

#### ۸-۲-۴- تغییرات طول پرش در برابر عدد فرود

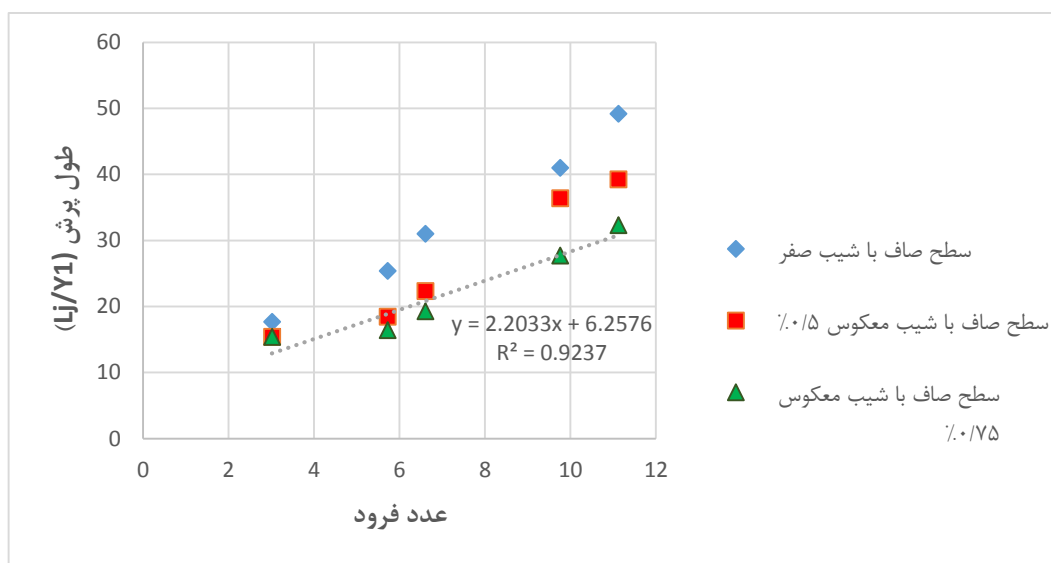
با توجه به شکل (( ۷-۴ الف)) با افزایش شیب معکوس، طول پرش کاهش یافت و مقدار آن در شیب ۰/۷۵٪ نسبت به شیب‌های دیگر کمتر بود، بیشترین تغییرات طول پرش بر اساس فرود ۶/۶۱ به میزان ۳۷/۷۹٪ بود و متوسط تغییرات طول پرش ۳۰/۵۷٪ محاسبه گردید. همچنین در یک شیب ثابت با

افزایش عدد فرود نسبت  $\frac{L_j}{y_1}$  افزایش یافت. با برازش خط داده‌ها در شیب معکوس ۰/۷۵٪ در شکل (۴-۸ ب) معادله زیر حاصل گردید:

$$\frac{L_j}{y_1} = 2.2033 Fr_1 + 6.2576 \quad R^2 = 0.924 \quad (۴-۲)$$



شکل (۴-۸ الف)



شکل (۴-۸ ب)

شکل (۴-۸ الف و ب) تغییرات طول پرش در برابر عدد فرود با اعمال شیب معکوس

#### ۴-۲-۹- بررسی تغییرات $\frac{\Delta E}{E_1}$ در برابر عدد فرود

همانطور که در شکل (۴-۹) آمده با افزایش عدد فرود نسبت افت انرژی افزایش یافت به طوری که در

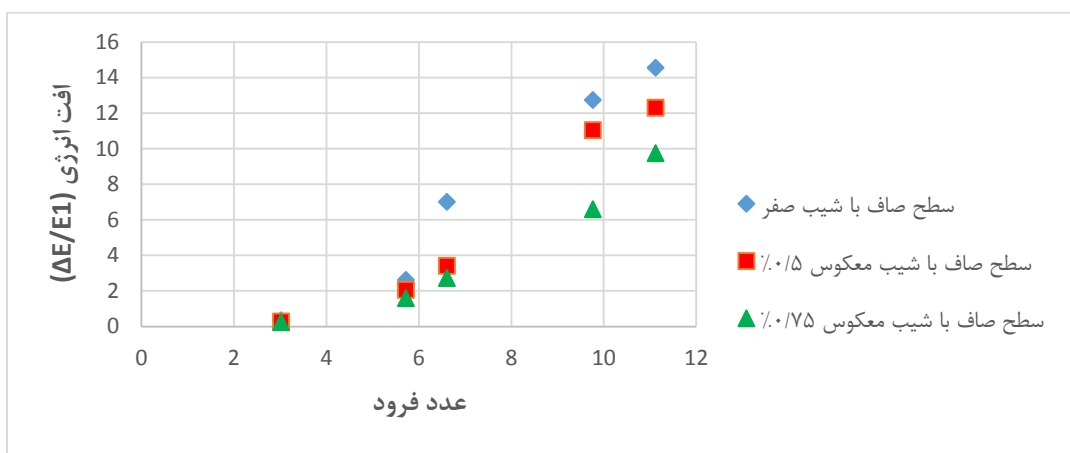
عدد فرود ۱۱/۱۲ مقدار  $\frac{\Delta E}{E_1}$  برای شیب صفر در حدود ۱۲ به دست آمد. در یک فرود ثابت با افزایش

شیب معکوس نسبت  $\frac{\Delta E}{E_1}$  کاهش یافت و بیشترین تغییرات افت انرژی در فرود ۶/۶۱ اتفاق افتاد و افت

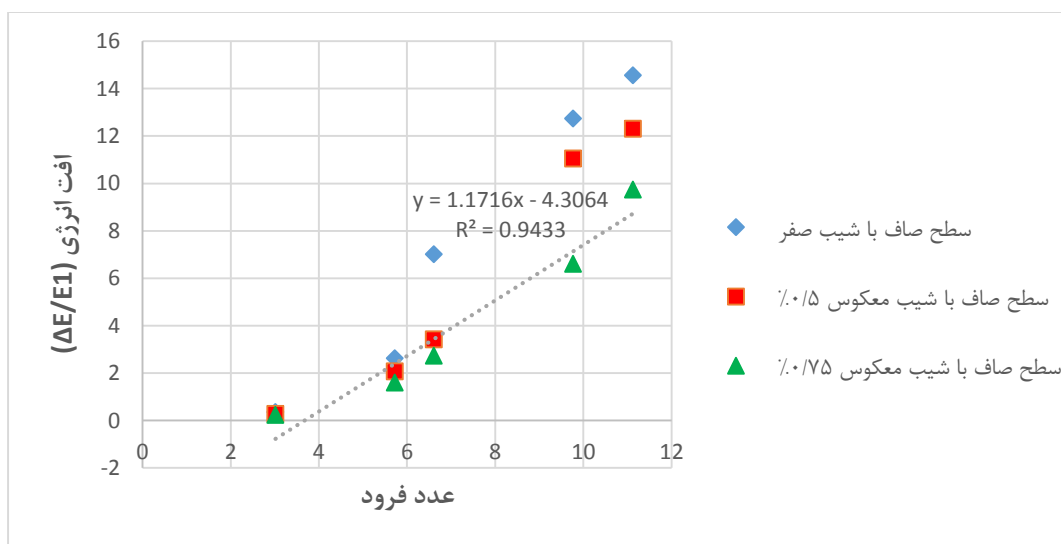
به میزان ۰/۶۱٪ کاهش پیدا کرد. با برازش خط داده‌ها در شیب معکوس ۰/۷۵٪ در شکل (۴-۹ ب)

معادله زیر حاصل گردید:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = 1.1716 Fr_1 - 4.3064 \quad R^2 = 0.943 \quad (3-4)$$



شکل (۴-۹-الف)



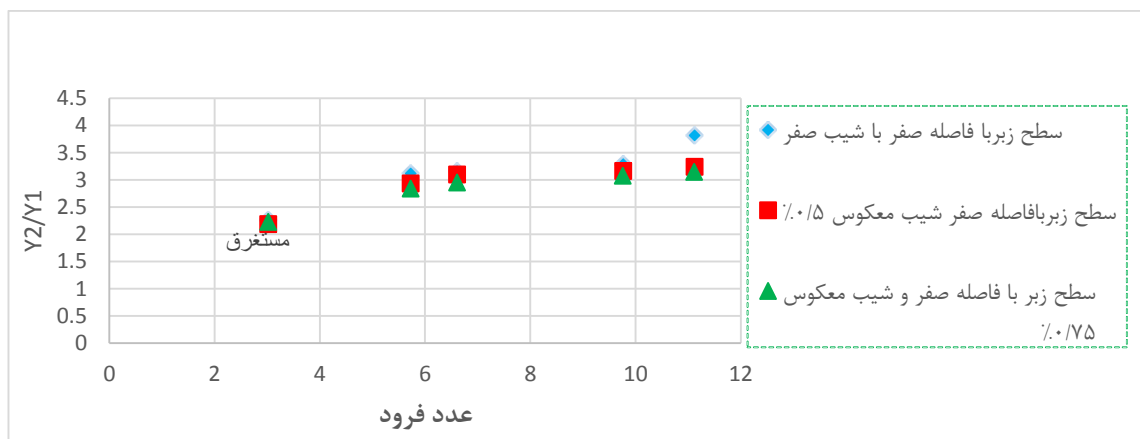
شکل (۴-۹-ب)

شکل (۴-۹ الف و ب) بررسی افت انرژی در برابر عدد فرود با اعمال شیب معکوس

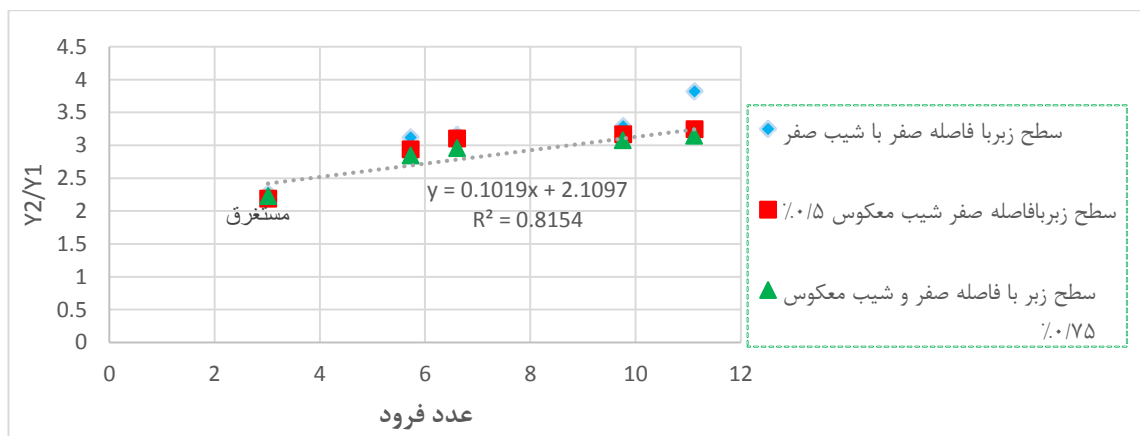
#### ۴-۲-۱۰- بررسی اعماق پرش در برابر عدد فرود در سطح با زبری و فاصله صفر

همانطور که در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است در سطح با زبری مثلی با فاصله صفر،  $\frac{y_2}{y_1}$  با افزایش عدد فرود افزایش یافته و با افزایش شیب معکوس از مقدار ۰ به ۰/۷۵ درصد مقدار  $\frac{y_2}{y_1}$  به طور متوسط ۱۰٪ کاهش داشت. همچنین برازش خط بر داده‌های شیب معکوس ۰/۷۵٪، بین  $\frac{y_2}{y_1}$  و عدد فرود اولیه رابطه به صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.1019Fr_1 + 2.1097 \quad R^2 = 0.815 \quad (۴-۴)$$



شکل (۴-۱۰ - الف)

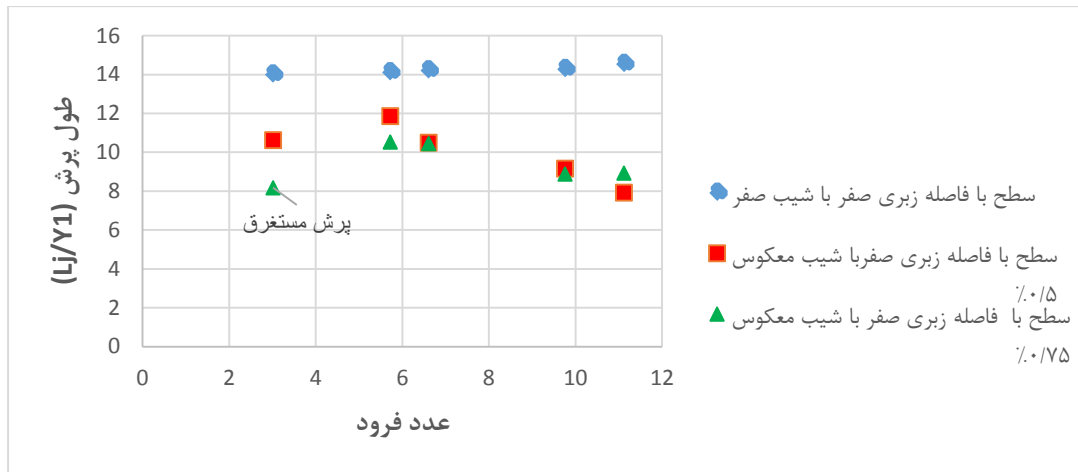


شکل (۴-۱۰ - ب)

شکل (۴-۱۰ الف و ب) بررسی نسبت اعماق پرش با اعمال شیب معکوس

#### ۴-۲-۱۱- بررسی طول پرش در برابر عدد فرود در سطح با زبری و فاصله صفر

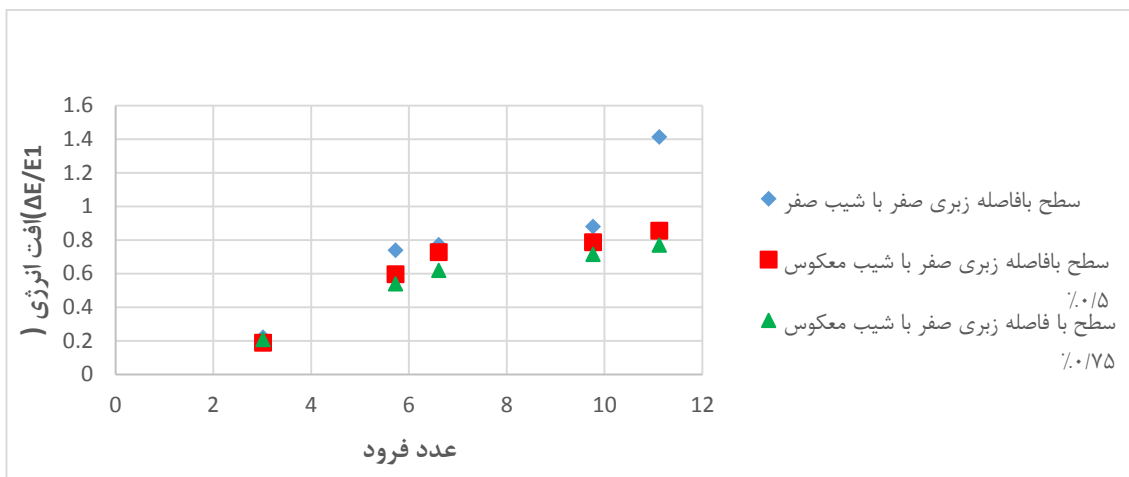
همان‌طور که در شکل (۴-۱۱) آمده، تغییرات طول پرش در برابر عدد فرود اولیه با افزایش عدد فرود روند تقریباً ثابتی داشت و می‌توان گفت که در یک فرود ثابت با افزایش شیب معکوس مقدار طول پرش کاهش پیدا کرد و در عدد فرود ۱۱/۱۲ به میزان ۳۸ درصد کاهش طول مشاهده گردید.



شکل (۴-۱۱) تغییرات طول پرش در برابر عدد فرود با اعمال شیب معکوس

#### ۴-۲-۱۲- بررسی افت انرژی در برابر عدد فرود در سطح با زبری فاصله صفر

همان‌طور که در شکل (۴-۱۲) مشاهده می‌گردد هرچه عدد فرود اولیه بیشتر شد افت انرژی هم افزایش یافت چون با افزایش عدد فرود نیروی برشی نسبت به بستر صاف افزایش یافته که می‌توان دلیل آن را افزایش نیروی برشی بستر به خاطر تشکیل جریان‌های گردابه‌ای در داخل زبری‌های مثلثی بستر دانست و با افزایش شیب معکوس از میزان کاهش افت کاسته شد به این معنی که در فرود ۱۱/۱۲ با افزایش شیب معکوس از صفر به ۰/۷۵ درصد افت انرژی ۲۹ درصد کاهش داشت و این نشان می‌دهد که شیب معکوس در روند استهلاک انرژی تأثیر مثبتی خواهد داشت.



شکل ( ۴-۱۲) بررسی افت انرژی در برابر عدد فرود با اعمال شیب معکوس بر سطح با زبری فاصله صفر

#### ۴-۲-۱۳- بررسی نسبت اعماق پرش در برابر عدد فرود در سطح با زبری و فاصله دو

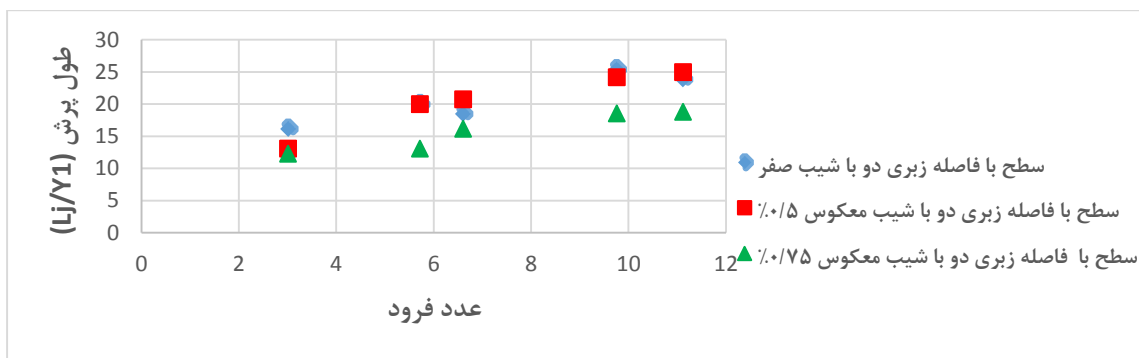
در شکل (۴-۱۳) مشاهده می‌شود که در سطح با زبری مثلثی فاصله ۲ سانتی‌متر، با افزایش عدد فرود مقدار  $\frac{y_2}{y_1}$  در سطح زبر با شیب صفر به میزان ۶۶ درصد و در سطح با شیب معکوس ۵/۰٪ مقدار ۶۲٪ و در شیب معکوس ۷۵/۰٪ به میزان ۳۸٪ افزایش داشته است با توجه به این درصدها می‌توان استنباط نمود با افزایش عدد فرود،  $\frac{y_2}{y_1}$  افزایش یافته و بیشترین مقدار افزایش در سطح بدون شیب بوده همچنین هرچه شیب معکوس در یک فرود ثابت افزایش پیدا کند از مقدار نسبت  $\frac{y_2}{y_1}$  کاسته شده و بیشترین مقدار کاهش مربوط به فرود ۹/۷ و برابر با ۳۴/۵٪ بود و متوسط کاهش نسبت اعماق مزدوج با افزایش شیب معکوس برابر با ۳۰/۹٪ حاصل شد.



شکل ( ۴-۱۳) بررسی اعماق پرش در برابر عدد فرود با اعمال شیب معکوس (زبری ۲)

#### ۴-۲-۱۴- بررسی طول پرش در برابر عدد فرود در سطح با زبری فاصله دو

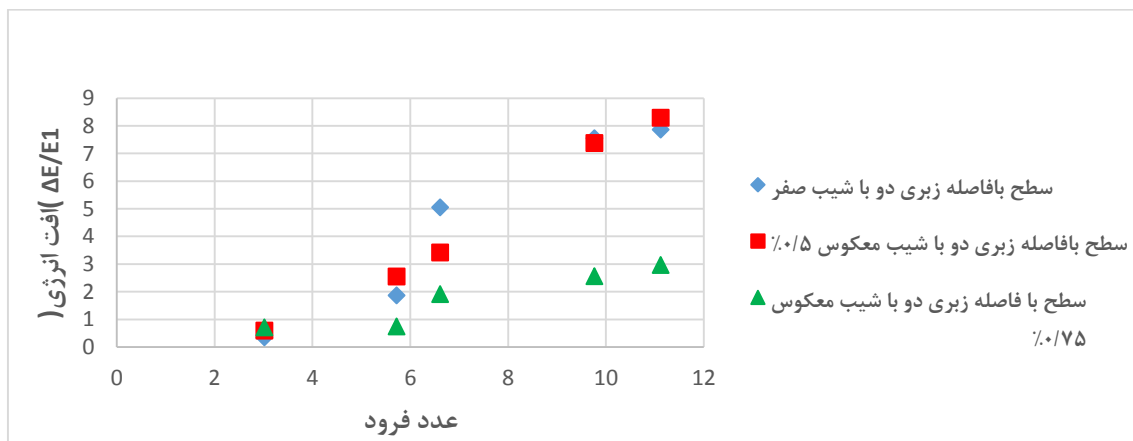
با توجه به شکل (۴-۱۴ الف) می‌توان مشاهده نمود که با افزایش عدد فرود نسبت  $\frac{L_j}{y_1}$  برای شیب‌های مختلف به طور متوسط ۳۸/۱۸٪ افزایش یافت. همچنین در یک عدد فرود ثابت با افزایش شیب معکوس نسبت  $\frac{L_j}{y_1}$  به طور متوسط ۲۳/۷۶٪ کاهش داشت.



شکل (۴-۱۴) بررسی طول پرش در برابر عدد فرود با اعمال شیب معکوس (زبری فاصله دو)

#### ۴-۲-۱۵- بررسی افت انرژی در برابر عدد فرود در سطح با زبری فاصله دو

از شکل (۴-۱۵ الف) می‌توان فهمید که با افزایش عدد فرود در همه شیب‌ها افت انرژی بیشتر شد و بیشترین افت مربوط به شیب ۰/۷۵٪ و برابر با ۰/۷۶٪ بود. همچنین در هر عدد فرود با افزایش شیب معکوس مقدار افت انرژی افزایش یافت و بیشترین مقدار آن مربوط به فرود ۹/۷۶ و برابر با ۰/۶۶٪ بود.



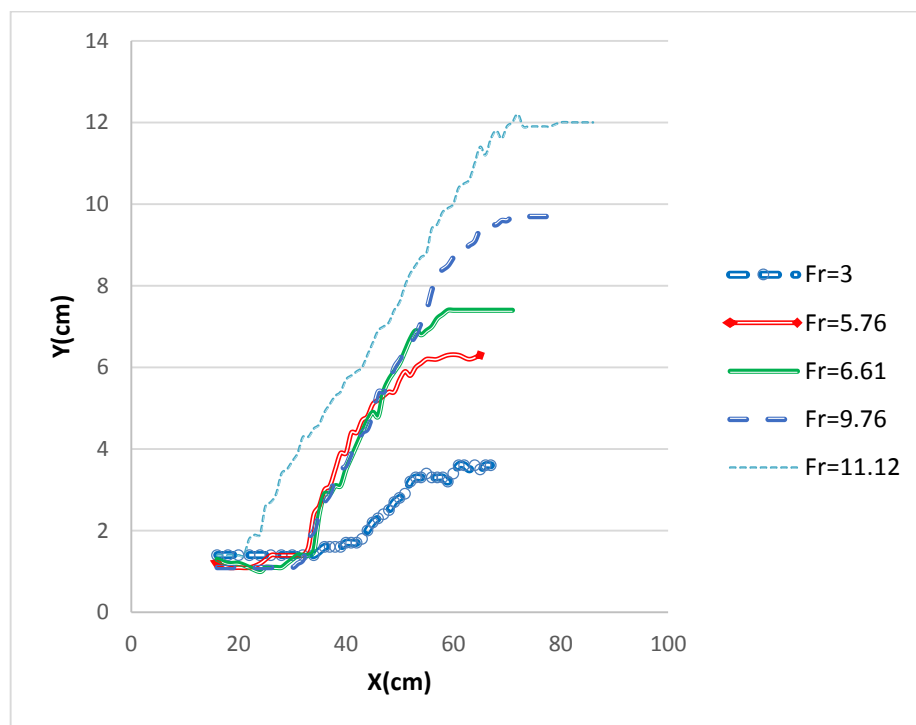
شکل (۴-۱۵) بررسی افت انرژی در برابر عدد فرود در سطح با زبری فاصله دو

با توجه به نتایج محققان قبلی و استنباط از نتایج آزمایشگاهی این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که افزایش شیب معکوس در پرش هیدرولیکی استهلاک بالای انرژی را سبب می‌گردد.

### ۳-۴- بررسی پروفیل سطح آب

#### ۳-۴-۱- تأثیر افزایش عدد فرود بر روی پروفیل سطح آب

شکل (۴-۱۶) پروفیل سطح آب در طول پرش را برای سطح صاف و به ازای اعداد فرود مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش عدد فرود با توجه به نوع پرش، عمق جریان افزایش یافت. همچنین می‌توان نتیجه گرفت درصد افزایش عمق برای فرود  $11/12$  مقدار  $88$  درصد بوده و برای فرود  $3$  مقدار  $61$  درصد حاصل شد، یعنی با افزایش عدد فرود عمق جریان به میزان  $27\%$  افزایش یافت.

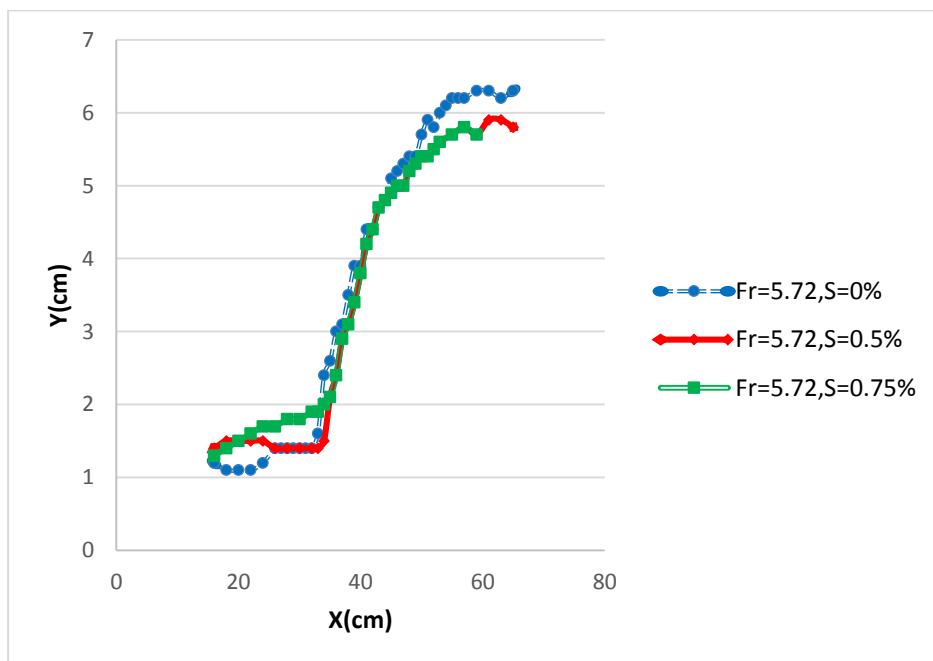


شکل (۴-۱۶) تغییرات پروفیل سطح آب بر روی سطح صاف به ازای دبی‌های مختلف

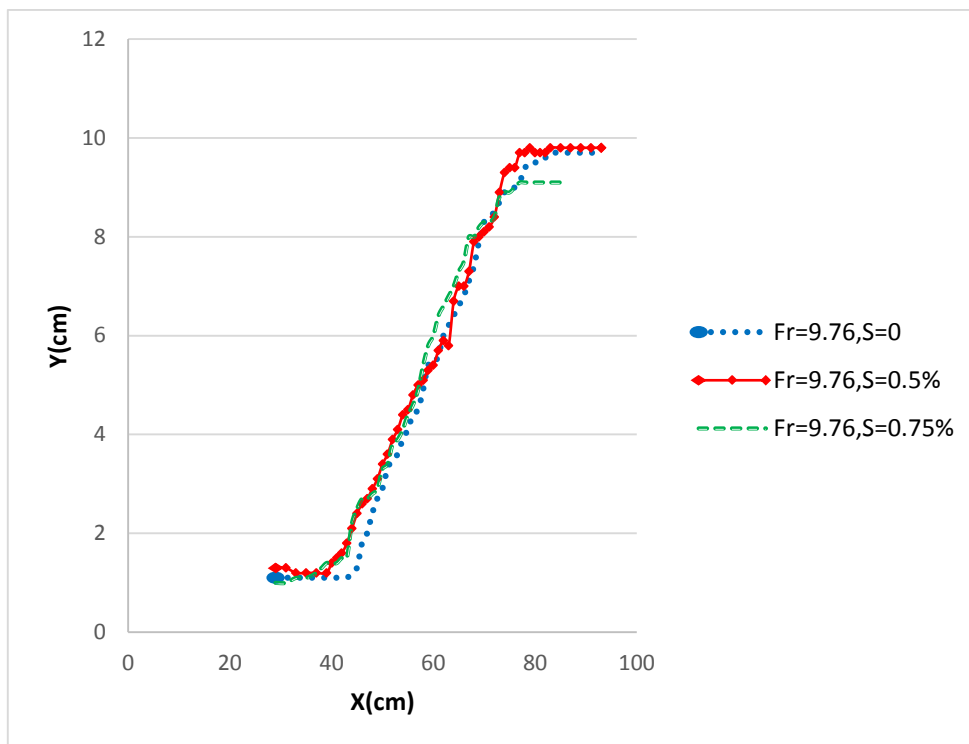


#### ۴-۳-۲- تأثیر شیب معکوس بر روی پروفیل سطح آب

شکل (۴-۱۷) و (۴-۱۸) تغییرات پروفیل سطح آب را برای شیب‌های مختلف برای اعداد فرود  $5/72$  و  $9/76$  نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش شیب، عمق ثانویه مربوط به عمق اولیه سریع‌تر اتفاق افتاده، پرش سریع‌تر تشکیل شد، در نتیجه پرش به سمت بالادست حرکت کرد. چنین به نظر می‌رسد که با افزایش شیب، طول پرش هیدرولیکی کاهش یافته به طوری که عملکرد شیب  $0/75$  درصد در کاهش طول پرش از شیب  $0/5$  بیشتر می‌باشد.



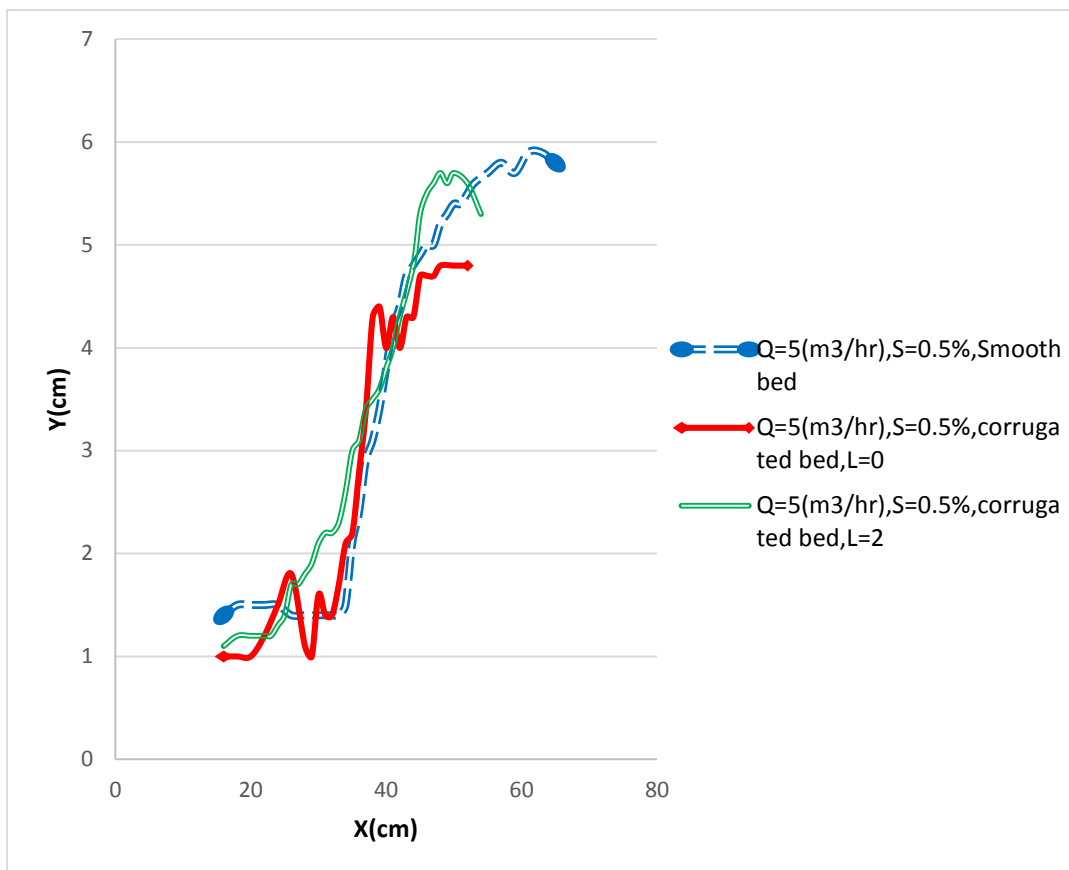
شکل (۴-۱۷) تأثیر شیب بر پروفیل طولی به ازای دبی  $5$  مترمکعب بر ساعت



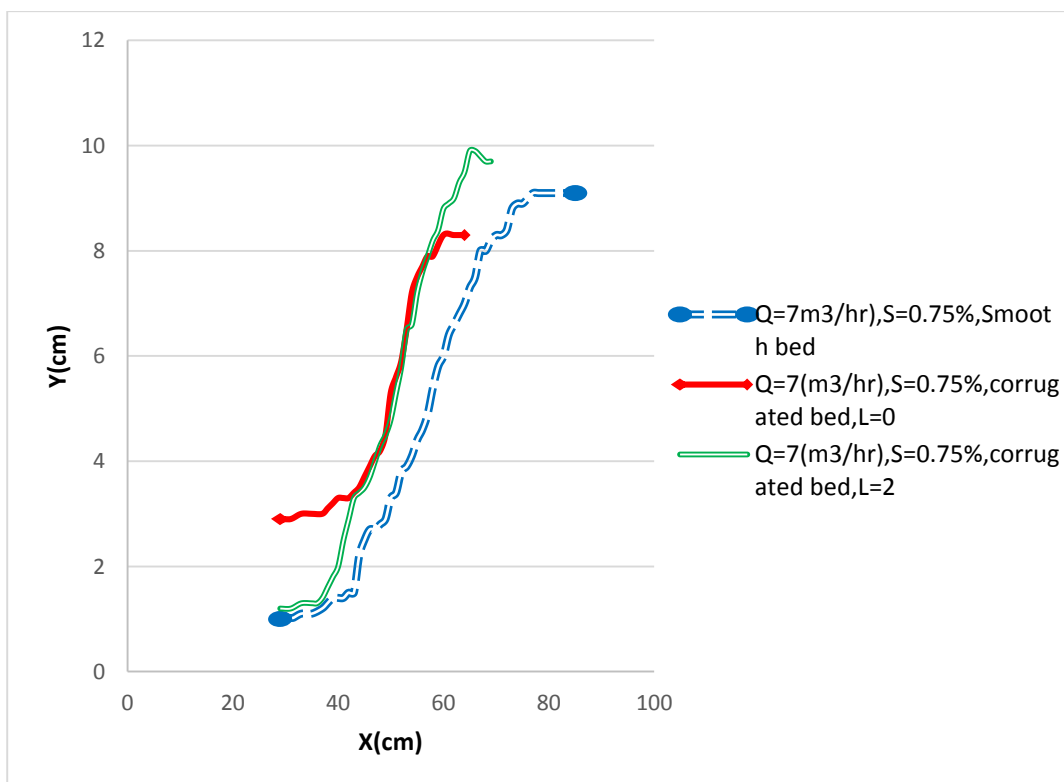
شکل (۴-۱۸) تأثیر شیب بر پروفیل طولی به ازای دبی ۷ مترمکعب بر ساعت

#### ۴-۳-۳- تأثیر زبری مثلثی بر روی پروفیل سطح آب

همان‌طور که در شکل‌های (۴-۱۹) و (۴-۲۰) مشخص است با کار گذاشتن زبری نسبت به شرایط صاف تغییرات پروفیل سطح آب در طول پرش کاهش یافت. در واقع استفاده از زبری سبب کاهش تلاطم شده که نتیجه آن کنترل می‌باشد. برای زبری با فاصله متفاوت با افزایش فاصله زبری از عملکرد آنها در کنترل مشخصات پرش کاسته شد، که نتیجه آن تغییرات بیشتر سطح آب در محل پرش بود. بهترین عملکرد در کنترل پرش و نوسانات سطح آب مربوط به زبری با فاصله صفر بود. اجرای شیب معکوس همراه با بستر زبر تأثیر زیادی بر روی تغییرات سطح آب داشت، به طوری که در اعداد فرود  $۵/۷۲$  و  $۹/۷۶$ ، اختلاف عمق اولیه و ثانویه پرش کمتر شده و پرش زودتر اتفاق افتاد که علت آن کاهش قدرت و کنترل پرش بود.



شکل (۴-۱۹) تأثیر زبری بر پروفیل طولی به ازای شیب معکوس  $0.5\%$  و دبی ۵ مترمکعب بر ساعت



شکل (۴-۲۰) تأثیر زبری بر پروفیل طولی به ازای شیب معکوس  $0.75\%$  و دبی ۷ مترمکعب بر ساعت

استفاده توأم شیب معکوس و زبری طول پرش هیدرولیکی را برای دو دبی ۵ و ۷ مترمکعب بر ساعت به ترتیب در حدود ۴۰٪ و ۴۴/۷۴٪ کاهش داد، همچنین عمق مزدوج نسبی و افت انرژی برای دبی ۷ با شیب ۰/۷۵٪ و زبری با فاصله صفر نسبت به حالت صاف به شدت کاهش یافت.

#### ۴-۴- نتیجه‌گیری از بررسی آزمایشگاهی

در این تحقیق تأثیر زبری مثلثی و شیب معکوس بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش شیب معکوس و اعمال زبری طول پرش هیدرولیکی و نسبت عمق‌های پرش کاهش می‌یابد، به طوری که بهترین عملکرد مربوط به شیب ۰/۷۵٪ و در حدود ۶۱٪ بود. استفاده از زبری مثلثی نیز طول پرش را کاهش داد که بهترین عملکرد مربوط به فاصله زبری صفر و در حدود ۴۵٪ کاهش طول پرش بود. همچنین کاربرد توأم زبری و شیب معکوس نیز نتایج رضایت بخشی را نشان داد به طوری که برای دو دبی ۵ و ۷ لیتر بر دقیقه میزان کاهش در حدود ۴۰٪ و ۴۴٪ حاصل شد. همچنین با کاربرد شیب معکوس و زبری مثلثی، عدد فرود جریان کاهش یافته که نتیجه آن کاهش قدرت پرش بوده و سبب کاهش نوسانات سطح آب در طول پرش گردید.

#### ۴-۵- بررسی نتایج شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت

##### ۴-۵-۱- مقدمه در مورد شبیه‌سازی عددی

در بررسی تحقیق حاضر به صورت عددی، هندسه مدل در نرم‌افزار انسیس فلوئنت رسم شد و مشخصات مدل آزمایشگاهی در نرم‌افزار اعمال گردید. با توجه به نتایج آزمایشگاهی، چند مدل برای بررسی عددی انتخاب شدند. با شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار مثلثی، مشخصات پرش شامل پروفیل سطح آب، طول پرش و بردارهای سرعت در طول پرش برداشت شدند. با توجه به تجارب محققان

قبلی در زمینه شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی و کاربرد مدل‌های آشفتگی متفاوت و این‌که در اکثر گزارشات آن‌ها مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد جواب‌های بهتری تولید کرده است، در این تحقیق در مدل‌سازی از معادلات ناویر-استوکس به منظور حل میدان جریان و از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد برای مدل‌سازی آشفتگی جریان استفاده شد و سطح آزاد جریان با روش جزء حجم سیال (VOF) تعیین گردید و صحت نتایج حاصله از مدل عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در خصوص پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات آزمایش‌های منتخب و مدل‌های مربوط به آن‌ها در جدول (۴-۱) آورده شده است.

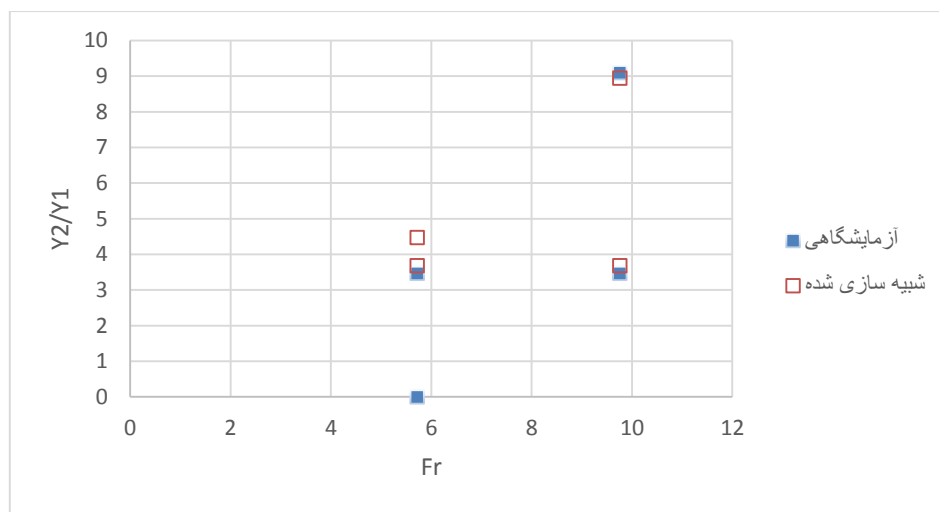
جدول (۴-۱) مشخصات مربوط به مدل‌های آزمایشگاهی

مدل عددی	عدد فرود	دبی (مترمکعب بر ساعت)	شیب معکوس	نوع زبری	مدل آزمایشگاهی
M1	۵/۷۲	۵	صفر	سطح صاف	آزمایش ۴
M2	۵/۷۲	۵	۰/۷۵٪	سطح صاف	آزمایش ۶
M3	۹/۷۶	۷	صفر	سطح صاف	آزمایش ۱۰
M4	۹/۷۶	۷	۰/۷۵٪	سطح صاف	آزمایش ۱۲
M5	۵/۷۲	۵	صفر	زبری فاصله صفر	آزمایش ۱۹
M6	۵/۷۲	۵	۰/۷۵٪	زبری فاصله صفر	آزمایش ۲۱
M7	۹/۷۶	۷	صفر	زبری فاصله صفر	آزمایش ۲۵
M8	۹/۷۶	۷	۰/۷۵٪	زبری فاصله صفر	آزمایش ۲۷
M9	۹/۷۶	۷	صفر	زبری فاصله دو	آزمایش ۴۰
M10	۹/۷۶	۷	۰/۷۵٪	زبری فاصله دو	آزمایش ۴۲

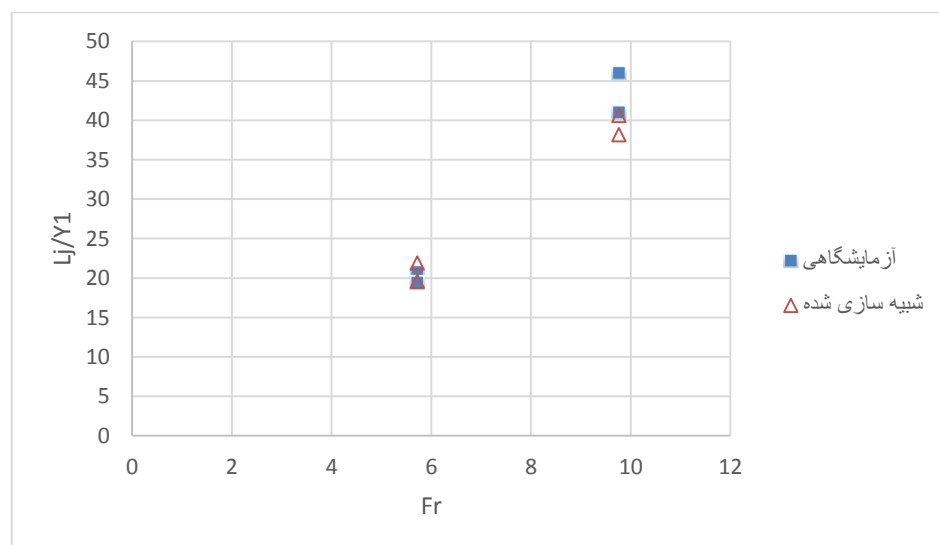
#### ۴-۵-۲- صحت سنجی نرم افزار فلوئنت

قبل از انجام شبیه‌سازی‌ها، مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی مربوط به سطح بدون زبری با شیب صفر و ۰/۷۵٪ صحت‌سنجی شد. سرعت جریان ورودی و هندسه مربوط به فلوم آزمایشگاهی، داده‌های ورودی به این نرم‌افزار بودند. بدین منظور از دو دبی ۵ و ۷ (مترمکعب بر ساعت) با شیب صفر و ۰/۷۵٪

، همچنین مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد برای مدل سازی آشفتگی جریان استفاده شد و سطح آزاد جریان با روش جزء حجم سیال (VOF) تعیین گردید. شکل های (۴-۲۱) و (۴-۲۲) به ترتیب عمق مزدوج نسبی و طول پرش هیدرولیکی حاصل از نتایج صحت سنجی برای دو دبی ۵ و ۷ (مترمکعب بر ساعت) با شیب صفر و ۰/۷۵ را نشان می دهد. با توجه به این شکل ها مشاهده می شود که نرم افزار فلونت از دقت بالایی در شبیه سازی پرش هیدرولیکی برخوردار است و نتایج عددی و آزمایشگاهی سازگاری خوبی باهم دارند.



شکل (۴-۲۱) مقایسه عمق مزدوج نسبی حاصل از نتایج صحت سنجی و نتایج آزمایشگاهی برای بستر صاف



شکل (۴-۲۲) مقایسه طول پرش هیدرولیکی حاصل از نتایج صحت سنجی و نتایج آزمایشگاهی برای بستر صاف

برای مقایسه نتایج صحت‌سنجی عددی و آزمایشگاهی از شاخص‌های آماری NRMSE، d و NS استفاده شد که مقادیر آن‌ها در جدول (۲-۴) و (۳-۴) ارائه شده است. مقادیر این شاخص‌های آماری نشان می‌دهد که مدل در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی عملکرد خوبی داشت و نتایج عددی و آزمایشگاهی تطابق خوبی باهم داشتند. به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که نرم‌افزار فلونت توانایی بالایی در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی دارد.

جدول ۲-۴ شاخص‌های آماری حاصل از نتایج صحت‌سنجی عمق مزدوج نسبی

NS	d	NRMSE	بستر صاف / شاخص آماری
۰/۹۹۰	۰/۹۹۷۴	۰/۰۴۳	بستر صاف با شیب صفر و ۰/۷۵٪ در دو دبی ۵ و ۷ متر مکعب بر ساعت

جدول ۳-۴ شاخص‌های آماری حاصل از نتایج صحت‌سنجی طول پرش هیدرولیکی

NS	d	NRMSE	بستر صاف / شاخص آماری
۰/۹۲۰۵	۰/۹۷۵۱	۰/۱۰۵۱	بستر صاف با شیب صفر و ۰/۷۵٪ در دو دبی ۵ و ۷ متر مکعب بر ساعت

#### ۳-۵-۴- نتایج حاصل از بررسی آزمایشگاهی و عددی مدل‌های منتخب

در مجموع ۱۲ آزمایش عددی با شیب‌های مختلف در اعداد فرود ۵/۷۲ و ۹/۷۶ با سرعت ورودی ۱/۸۸ و ۳/۲۱ متر بر ثانیه انجام شد. در این بخش به مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی تغییرات خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای زبر مثلثی و تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از نرم‌افزار فلونت پرداخته شده است.

جدول (۴-۴) نتایج مربوط به مدل‌های آزمایشگاهی

$\frac{y_2}{y_1}$	$\frac{L_j}{y_1}$	$\frac{L_j}{y_2^*}$	$L_j$ (cm)	$y_2$ (cm)	$y_1$ (cm)	$u_1$ (m/s)	$q$ ( $m^2/s$ )	$Q$ ( $m^3/hr$ )	مدل
۴/۸	۲۱	۴	۲۷	۶/۲	۱/۳	۱/۳	۰/۰۱۷	۵	M1
۳/۵	۱۹	۶	۳۳	۵/۹	۱/۷	۱	۰/۰۱۷	۵	M2
۹/۶	۴۱	۴	۴۱	۹/۶	۱	۲/۴	۰/۰۲۴	۷	M3
۹/۱	۴۶	۴	۴۶	۹/۱	۱	۲/۴	۰/۰۲۴	۷	M4
۵/۳	۳۰	۴	۳۰	۵/۳	۱	۱/۷	۰/۰۱۷	۵	M5
۳/۷	۱۰	۳	۱۵	۵/۶	۱/۵	۱/۲	۰/۰۱۷	۵	M6
۲/۴	۱۰	۵	۲۹	۶/۶	۲/۸	۰/۹	۰/۰۲۴	۷	M7
۲/۸	۸	۵	۲۴	۸/۳	۳	۰/۸	۰/۰۲۴	۷	M8
۷/۲	۲۴	۳	۳۱	۹/۴	۱/۳	۱/۹	۰/۰۲۴	۷	M9
۲/۵	۶	۵	۲۱	۸/۳	۳/۳	۰/۷	۰/۰۲۴	۷	M10

جدول (۵-۴) نتایج مربوط به مدل‌های عددی

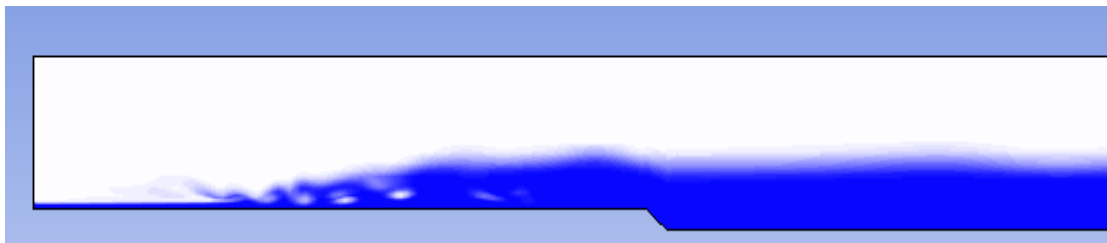
$\frac{y_2^*}{y_1}$	$\frac{y_2}{y_1}$	$\frac{L_j}{y_1}$	$\frac{L_j}{y_2^*}$	$L_j$ (cm)	$y_2^*$ (cm)	$y_2$ (cm)	$y_1$ (cm)	$u_1$ (m/s)	$q$ ( $m^2/s$ )	$Q$ ( $m^3/hr$ )	مدل
۴/۱	۴/۵	۲۰	۵	۲۸	۶	۶/۴	۱/۴۳	۱/۲	۰/۰۱۷	۵	M1
۳/۴	۳/۷	۲۲	۶	۳۵	۵	۵/۹	۱/۶	۱/۱	۰/۰۱۷	۵	M2
۹	۸/۹	۳۸	۴	۴۲	۱۰	۹/۸	۱/۱	۲/۲	۰/۰۲۴	۷	M3
۱۰	۹	۴۱	۴	۴۱	۱۰	۹/۰۴	۰/۰۱	۲/۴	۰/۰۲۴	۷	M4
۷/۱	۵/۲	۳۱	۴	۳۲	۷	۵/۲۶	۱/۰۲	۱/۷	۰/۰۱۷	۵	M5
۳/۶	۳/۷	۱۱	۳	۱۷	۶	۵/۷	۱/۵۵	۱/۱	۰/۰۱۷	۵	M6
۲/۲	۲/۵	۱۱	۵	۳۰	۶	۶/۵۵	۲/۶۱	۰/۹	۰/۰۲۴	۷	M7
۱/۶	۲/۷	۷	۵	۲۳	۵	۸/۴	۳/۱	۰/۸	۰/۰۲۴	۷	M8
۷/۲	۷/۵	۲۵	۴	۳۲	۹	۹/۵	۱/۲۷	۱/۹	۰/۰۲۴	۷	M9
۱/۵	۲/۶	۷	۵	۲۲	۵	۸/۴	۳/۲	۰/۸	۰/۰۲۴	۷	M10

#### ۴-۵-۴- مقایسه پروفیل‌های سطح آب آزمایشگاهی و عددی

با تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، پروفیل‌های سطح آب با رسم مقادیر فاصله طولی پرش از ابتدای پرش (X) در مقابل عمق جریان (Y) استخراج شدند با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی مدل M1 نتیجه گرفته شد که عمق اولیه پرش در  $x=42\text{cm}$  تشکیل شده و  $y_1=1.43\text{cm}$  بود، همچنین عمق ثانویه پرش در  $x=70\text{cm}$  تشکیل شده و  $y_2=6.4$  در نتیجه طول پرش  $L_j = 28\text{cm}$

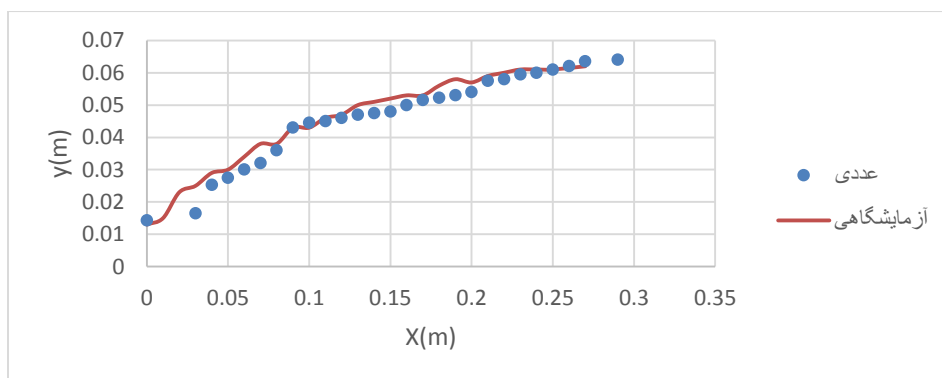


حاصل گردید و مقدار درصد خطای  $\frac{L_j}{y_1}$  در مقایسه با نتیجه آزمایشگاهی ۵/۷۲ درصد به دست آمد که تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت (شکل ۴-۲۳).



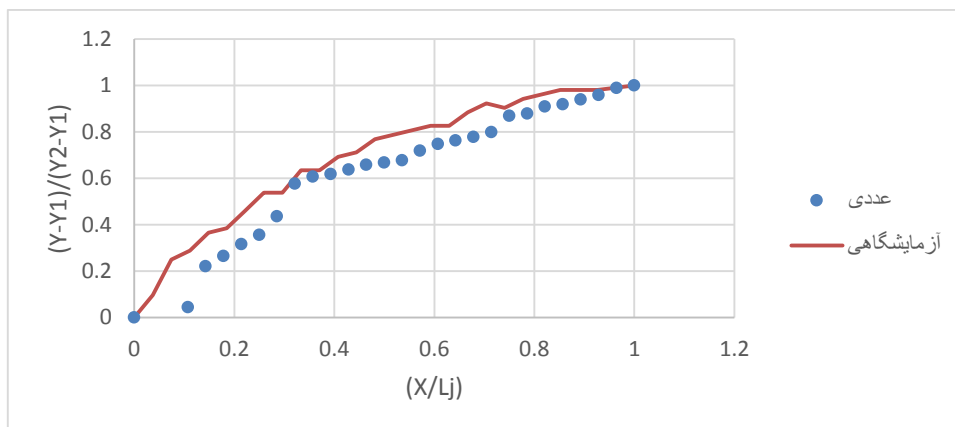
شکل (۲۳-۴) شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد پرش هیدرولیکی با استفاده از روش (VOF) در مدل M1

در شکل (۴-۲۴) پروفیل سطح آب به دست آمده از مدل عددی M1 با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. خطای نسبی متوسط مقادیر سطح آب به دست آمده از مدل عددی و آزمایشگاهی ۴/۶ درصد بود.



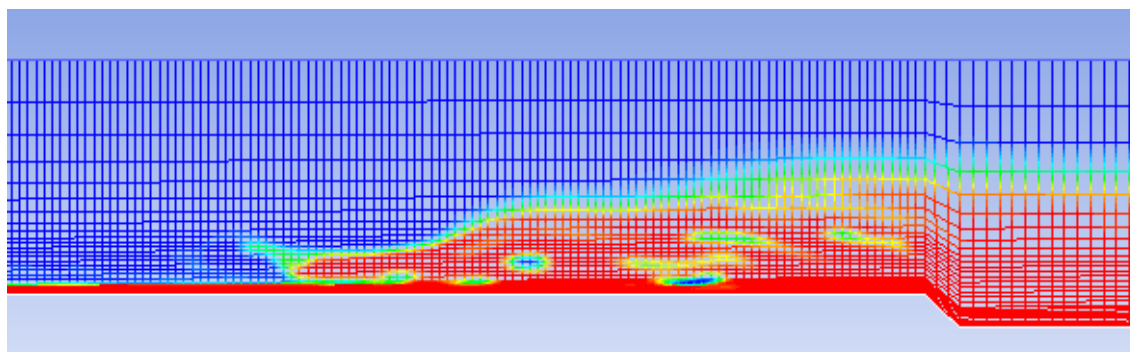
شکل ۴-۲۴ مقایسه پروفیل سطح آب به دست آمده از مدل آشفتگی k-ε و نتایج آزمایشگاهی مدل M1

به منظور مقایسه پروفیل سطح آب به دست آمده از بررسی عددی با نتایج آزمایشگاهی پروفیل‌های استاندارد شده پرش هیدرولیکی برای مدل‌های عددی و آزمایشگاهی تهیه شدند. شکل (۴-۲۵) منحنی بی‌بعد  $\frac{(y-y_1)}{(y_2-y_1)}$  در مقابل پارامتر بی‌بعد  $\frac{X}{L_j}$  برای مدل M1 (فرود ۵/۷۲، سطح صاف بدون زبری، شیب صفر) نشان می‌دهد و در این شکل نیز انطباق بسیار نزدیک منحنی مربوط به شبیه‌سازی مدل با نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.



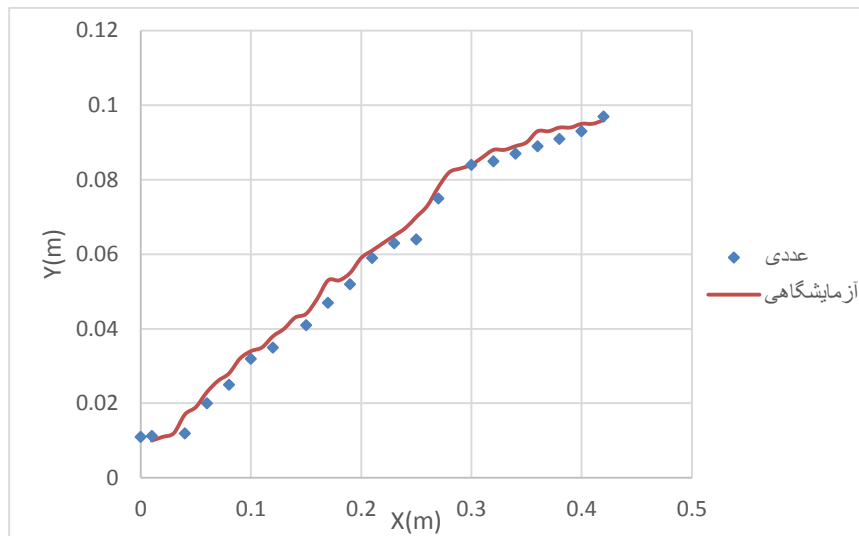
شکل (۴-۲۵) پروفیل بی بعد سطح آب برای مدل M1

در شکل (۴-۲۶) پروفیل سطح آزاد به دست آمده از مدل آشفتگی k-ε استاندارد و جزء حجم سیال VOF برای مدل M3 (فرود ۹/۷۶ ، سطح صاف بدون زبری، شیب صفر) نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل از مدل سازی عددی عمق اولیه پرش در  $x=58\text{cm}$  تشکیل شده و  $y_1=1.1\text{ cm}$  بود، همچنین عمق ثانویه پرش در  $x=100\text{ cm}$  تشکیل شده و  $y_2=9.8$  در نتیجه طول پرش  $L_j = 42\text{cm}$  حاصل گردید و مقدار درصد خطای  $\frac{L_j}{y_1}$  در مقایسه با نتیجه آزمایشگاهی ۶/۸۷٪ به دست آمد که تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت.



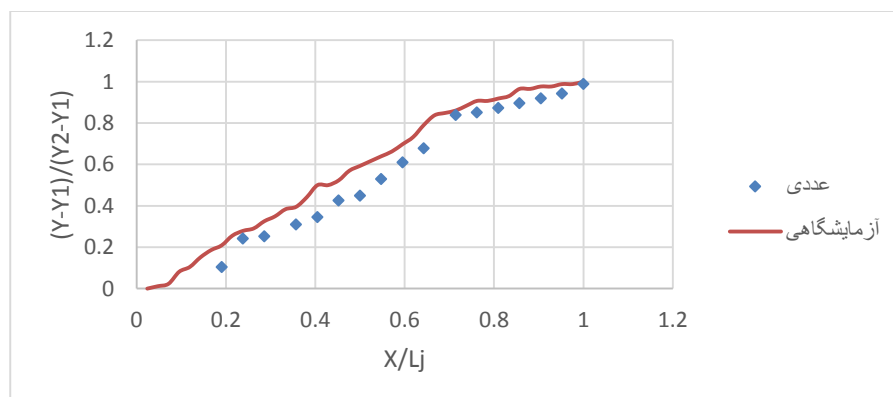
شکل (۴-۲۶) شبیه سازی پروفیل سطح آزاد پرش هیدرولیکی با استفاده از روش (VOF) در مدل M3

در شکل (۴-۲۷) پروفیل های سطح آب به دست آمده از مدل عددی M3 با داده های آزمایشگاهی مقایسه شده است. خطای نسبی متوسط مقادیر سطح آب به دست آمده از مدل عددی و آزمایشگاهی ۶/۹ درصد می باشد.



شکل ( ۴-۲۷ ) مقایسه پروفیل سطح آب به دست آمده از مدل آشفتگی k-ε و نتایج آزمایشگاهی مدل M3

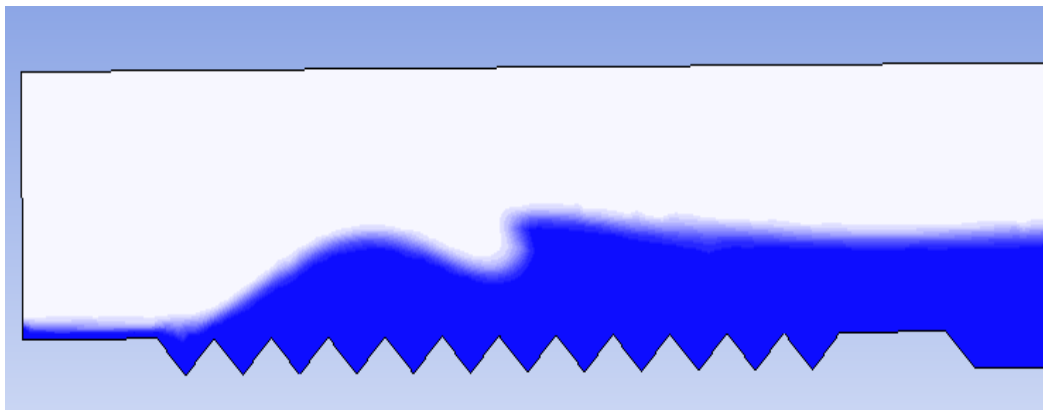
به منظور مقایسه پروفیل سطح آب به دست آمده از بررسی عددی با نتایج آزمایشگاهی پروفیل‌های استاندارد شده پرش هیدرولیکی برای مدل‌های عددی و آزمایشگاهی تهیه شدند. این شکل نشان می‌دهد روند حرکت منحنی مربوط به نتیجه عددی و آزمایشگاهی مشابه به هم می‌باشند. شکل (۴-۲۸) منحنی بی‌بعد  $\frac{(y-y_1)}{(y_2-y_1)}$  در مقابل پارامتر بی‌بعد  $\frac{X}{L_j}$  برای مدل M3 (فرود ۹/۷۶، سطح صاف بدون زبری، شیب صفر) نشان می‌دهد که میزان خطای منحنی عددی و آزمایشگاهی حداقل است.



شکل ( ۴-۲۸ ) پروفیل بی‌بعد سطح آب برای مدل M3

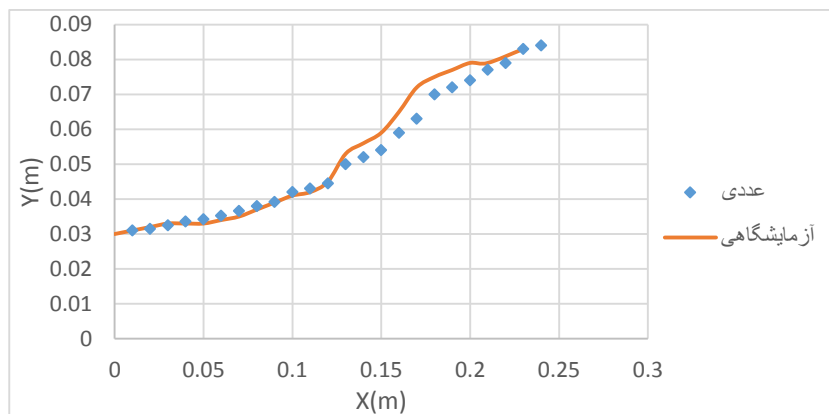
در این تحقیق در شبیه‌سازی عددی مشخص گردید که روند شبیه‌سازی برای مدل‌های M4 تا M7 مشابه مدل‌های M1 تا M3 می‌باشد لذا از تحلیل آن‌ها در این قسمت صرف نظر شد.

در شکل (۴-۲۹) پروفیل سطح آزاد به دست آمده از مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  استاندارد و جزء حجم سیال VOF برای مدل M8 (فروود  $9/76$ ، سطح با زبری مثلثی فاصله صفر، شیب  $0/75$ ٪) نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی، عمق اولیه پرش در  $x=38\text{cm}$  تشکیل شده و  $y_1=3.1\text{cm}$  بود، همچنین عمق ثانویه پرش در  $x=61\text{cm}$  تشکیل شده و  $y_2=8.4\text{cm}$  در نتیجه طول پرش  $=23\text{cm}$  حاصل گردید و مقدار درصد خطای  $\frac{L_j}{y_1}$  در مقایسه با نتیجه آزمایشگاهی  $7/26$ ٪ به دست آمد که تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت.



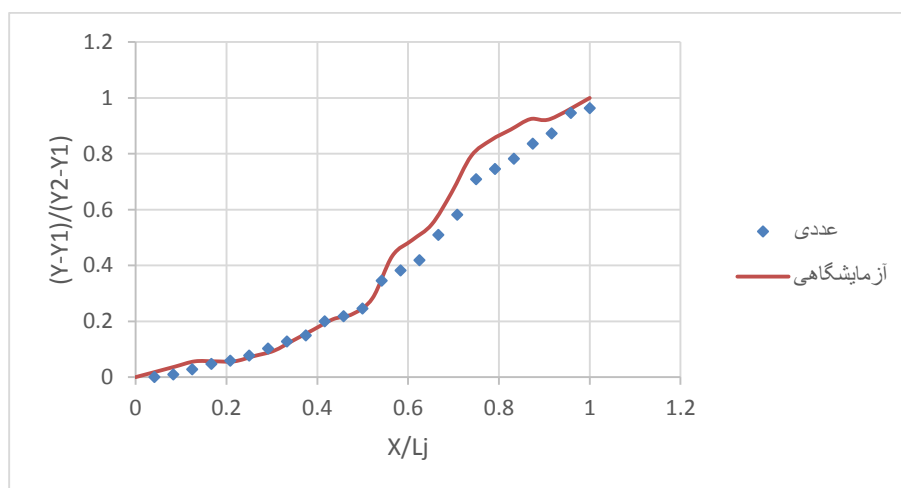
شکل (۴-۲۹) شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد پرش هیدرولیکی با استفاده از روش (VOF) در مدل M8

در شکل (۴-۳۰) پروفیل‌های سطح آب به دست آمده از مدل عددی M8 با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. خطای نسبی متوسط مقادیر سطح آب به دست آمده از مدل عددی و آزمایشگاهی  $4/5$  درصد می‌باشد.



شکل (۳۰-۴) مقایسه پروفیل سطح آب به دست آمده از مدل آشفتگی k-ε و نتایج آزمایشگاهی مدل M8

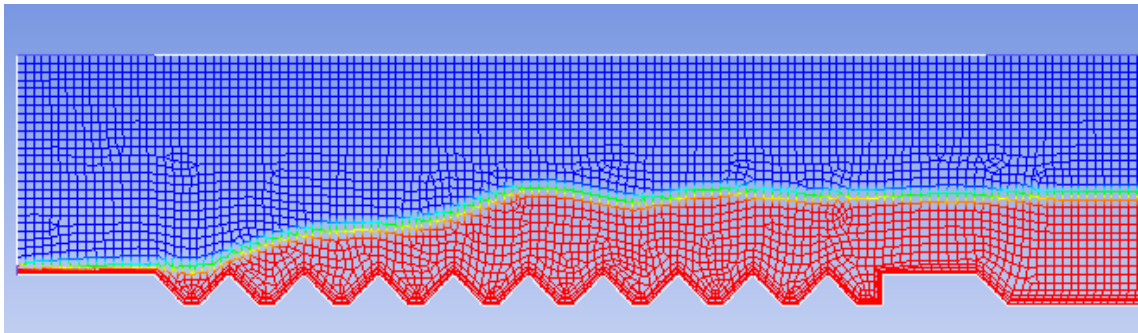
به منظور مقایسه پروفیل سطح آب به دست آمده از بررسی عددی با نتایج آزمایشگاهی پروفیل‌های استاندارد شده پرش هیدرولیکی برای مدل‌های عددی و آزمایشگاهی تهیه شدند. شکل (۳۱-۴) منحنی بی‌بعد  $\frac{(y-y_1)}{(y_2-y_1)}$  در مقابل پارامتر بی‌بعد  $\frac{X}{L_j}$  برای مدل M8 (فرود ۹/۷۶، سطح با زبری مثلثی فاصله صفر، شیب ۰/۷۵٪) نشان می‌دهد.



شکل (۳۱-۴) پروفیل بی‌بعد سطح آب برای مدل M8

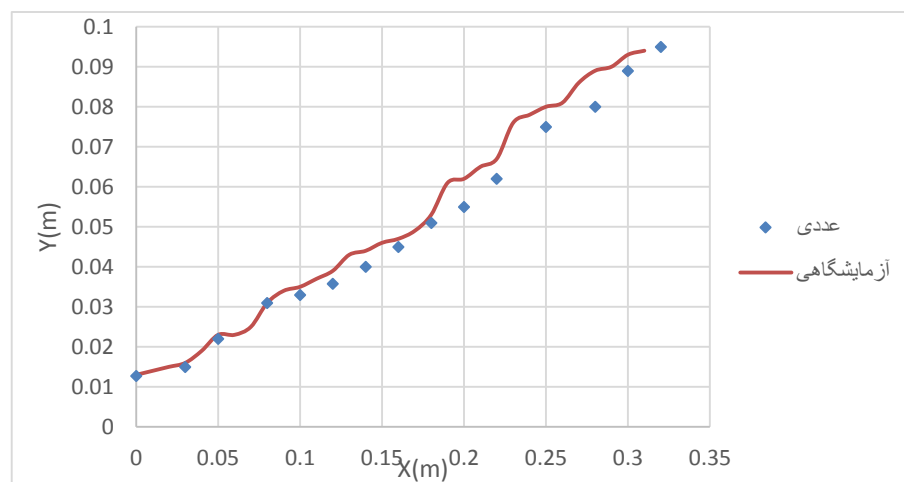
در شکل (۳۲-۴) پروفیل سطح آزاد به دست آمده از مدل آشفتگی k-ε استاندارد و جزء حجم سیال VOF برای مدل M9 (فرود ۹/۷۶، سطح با زبری مثلثی فاصله دو، شیب صفر) نشان داده شده است.

با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی مدل M9 عمق اولیه پرش در  $x=22\text{cm}$  تشکیل شده و  $y_1=1.27\text{cm}$  بود، همچنین عمق ثانویه پرش در  $x=54\text{cm}$  تشکیل شده و  $y_2=9.5\text{cm}$  در نتیجه طول پرش  $L_j = 32\text{cm}$  حاصل گردید و مقدار درصد خطای  $\frac{L_j}{y_1}$  در مقایسه با نتیجه آزمایشگاهی  $5/66\%$  به دست آمد که تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت.



شکل (۴-۳۲) شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد پرش هیدرولیکی با استفاده از روش (VOF) در مدل M9

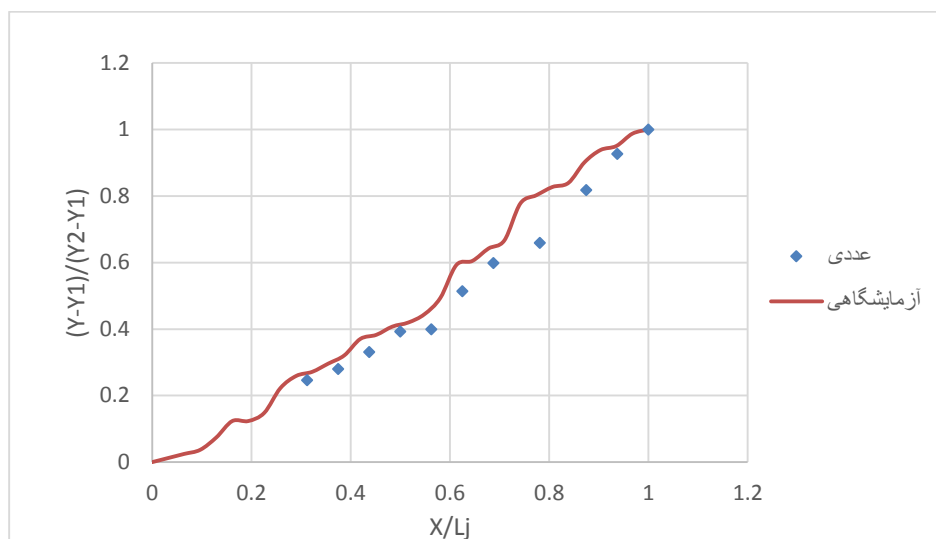
همچنین (شکل ۴-۳۳) خطای نسبی متوسط مقادیر سطح آب به دست آمده از مدل عددی و آزمایشگاهی M8 را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۳۳) مقایسه پروفیل سطح آب به دست آمده از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  و نتایج آزمایشگاهی مدل M9

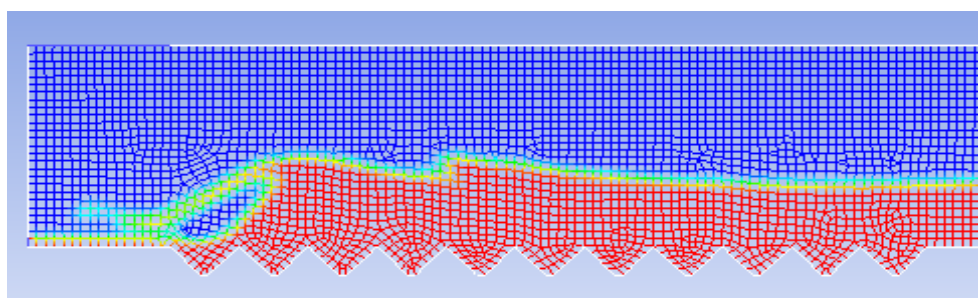
شکل (۴-۳۴) منحنی بی‌بعد  $\frac{(y-y_1)}{(y_2-y_1)}$  در مقابل پارامتر بی‌بعد  $\frac{X}{L_j}$  برای مدل M9 (فرود ۹/۷۶، سطح

با زبری مثلثی فاصله دو، شیب صفر) نشان می‌دهد.



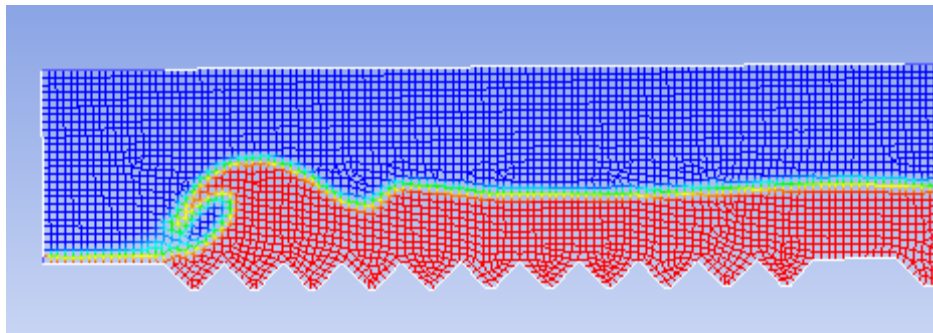
شکل (۴-۳۴) پروفیل بی‌بعد سطح آب برای مدل M9

همچنین دو مدل دیگر در نرم‌افزار شبیه‌سازی شد که در آزمایشگاه انجام نشده بود و نتایج پروفیل سطح آب در آن‌ها به صورت شکل‌های (۴-۳۵) و (۴-۳۶) می‌باشد. از این نتایج برای مقایسه فاصله زبری در حالت‌های مختلف و تأثیر آن‌ها بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی استفاده شده است. در شکل (۴-۳۵) پروفیل سطح آب در شبیه‌سازی مدل M11 با مشخصات عدد فرود ۹/۷۶، سطح با زبری مثلثی با فاصله ۱ سانتی‌متر و شیب صفر آمده است و نشان می‌دهد در زبری مثلثی با فاصله ۱ سانتی‌متر پرش هیدرولیکی به سمت بالادست زبری‌ها حرکت کرده و در ابتدای زبری‌ها پرش تشکیل شده است.



شکل (۴-۳۵) شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد پرش هیدرولیکی با استفاده از روش (VOF) در مدل M11

در شکل (۴-۳۶) پروفیل سطح آب در شبیه‌سازی مدل M12 با مشخصات عدد فرود  $9/76$ ، سطح با زبری مثلثی با فاصله ۱ سانتی‌متر از هم و شیب  $0/75$ ٪ آمده است و نشان می‌دهد در زبری مثلثی با فاصله ۱ سانتی‌متر پرش هیدرولیکی به سمت بالادست زبری‌ها حرکت کرده و در ابتدای زبری‌ها پرش تشکیل شده است. همچنین در مقایسه پروفیل سطح آب M12 با M11 می‌توان نتیجه گرفت که با اعمال شیب معکوس در سطح با زبری مثلثی، پرش هیدرولیکی بیشتر به سمت بالادست حرکت کرده و عمق اولیه پرش هیدرولیکی در ابتدای زبری‌ها شکل گرفته و همچنین طول پرش کمتر می‌گردد به عبارت دیگر پرش سریع‌تر اتفاق افتاده است.

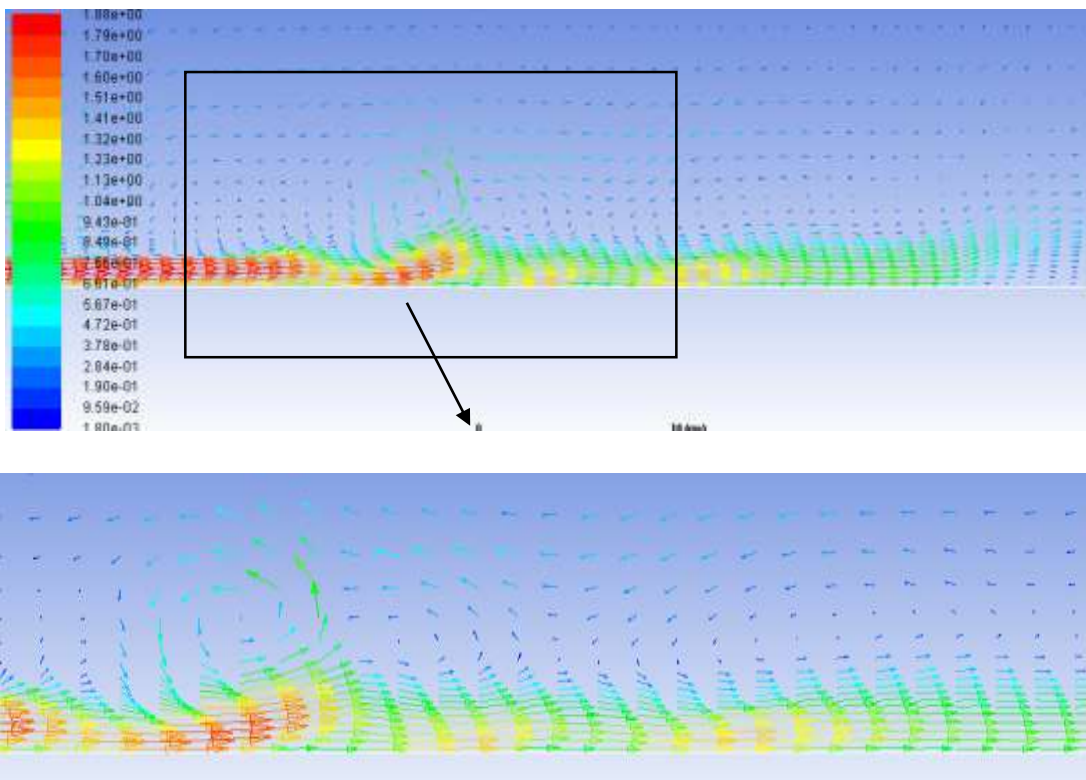


شکل (۴-۳۶) شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد پرش هیدرولیکی با استفاده از روش (VOF) در مدل M12

#### ۴-۵-۵- بردارهای سرعت در محل پرش

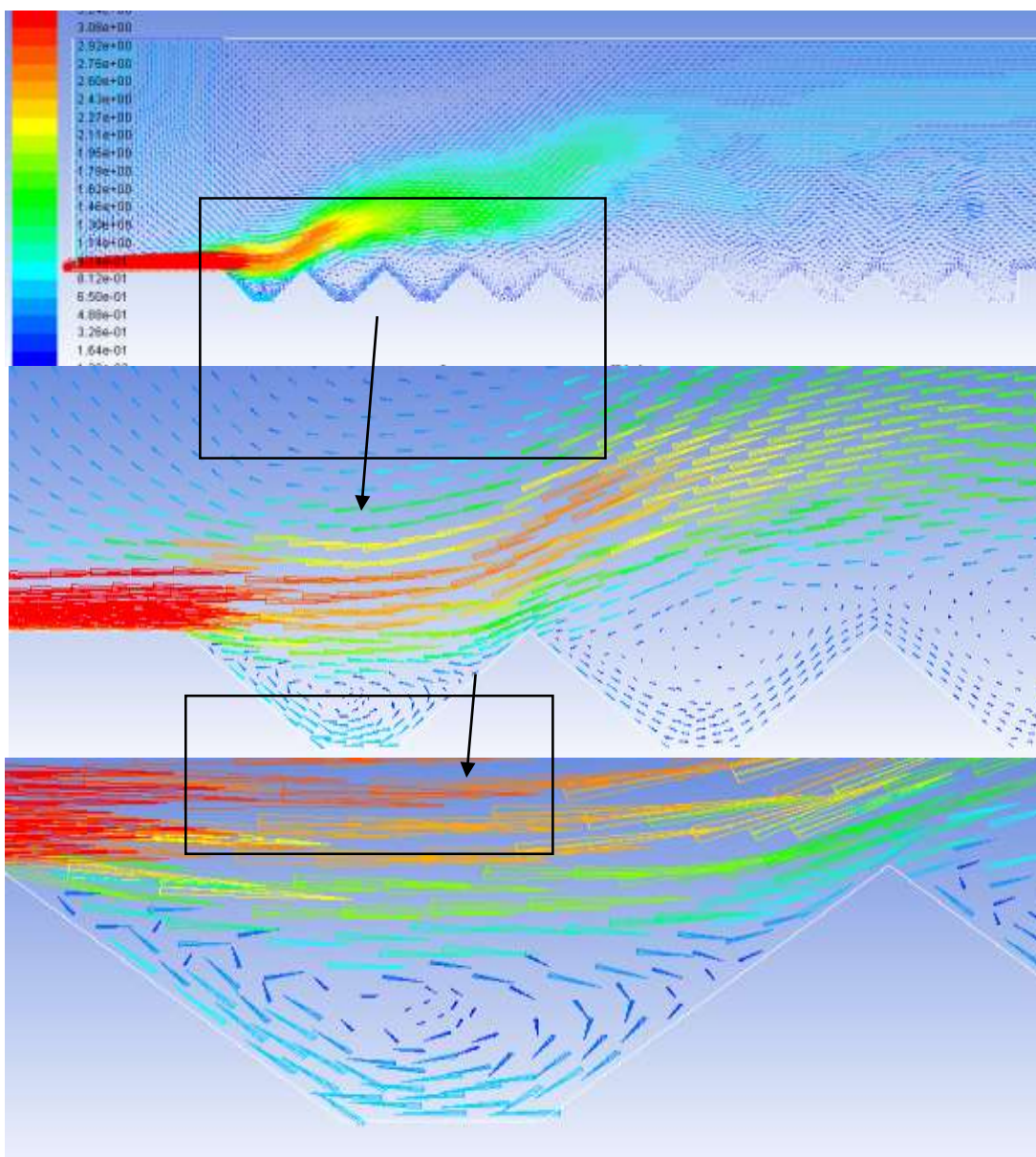
در شکل (۴-۳۷) بردارهای سرعت در امتداد پرش برای مدل M1 که کف آن بدون زبری و با شیب صفر می‌باشد، نشان داده شده است. اندازه و رنگ این بردارها نشان‌دهنده مقدار سرعت طولی در امتداد پرش می‌باشد. بردارها نشان می‌دهد که حداکثر سرعت در ابتدا و در ناحیه چرخشی پرش بوده و حداقل سرعت در نزدیکی سطح آب رخ می‌دهد و در پایین دست پرش گرادیان سرعت‌ها رفته رفته کاهش یافت.





شکل (۴-۳۷) بردارهای سرعت در محل پرش در مدل M1

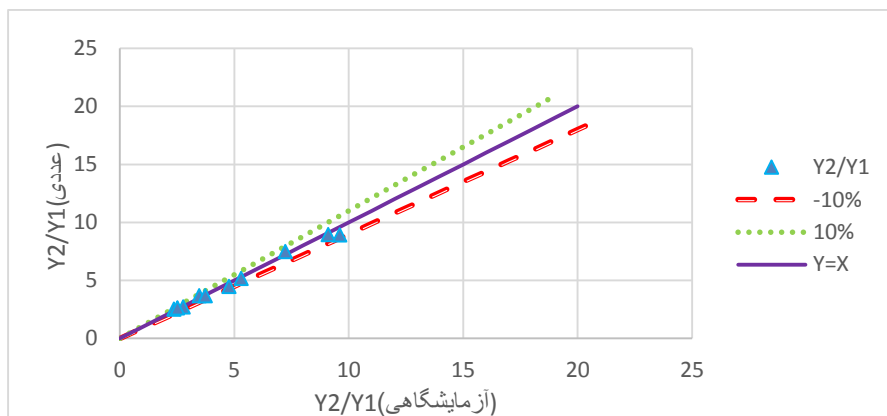
در شکل (۴-۳۸) بردارهای سرعت در مدل M9 که سطح آن دارای زبری مثلثی با فاصله ۲ سانتی‌متر از هم می‌باشد، نشان داده شده‌است. این شکل نشان می‌دهد که حداکثر سرعت موضعی در ابتدای زبری‌ها و حداقل آن در نزدیکی سطح آب و بستر موج‌دار مثلثی شکل دیده می‌شود، در پایین‌دست پرش‌گرادیان سرعت‌ها رفته رفته کاهش یافت و همچنین سرعت‌های منفی (آبی پررنگ) در نزدیکی سطح آب و در فرورفتگی زبری‌ها وجود دارد و در شکل (۴-۳۸) - ج، گرداب‌های سرعت را در داخل زبری‌ها قابل مشاهده است.



شکل (۴-۳۸) (الف-ب-ج) بردارهای سرعت در محل پرش در مدل M9

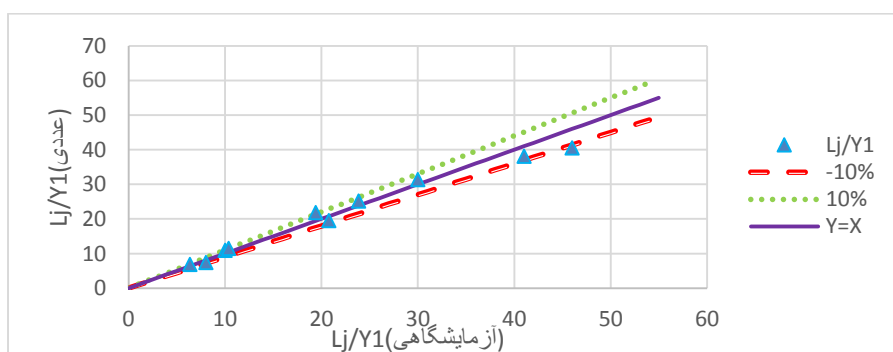
#### ۴-۵-۶- مقایسه عمق مزدوج نسبی در شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی

در شکل (۴-۳۹) مقادیر نسبت عمق ثانویه شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی ترسیم شده‌اند. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی اختلاف کمی وجود دارد. اختلاف بین مقادیر عمق مزدوج نسبی شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی کمتر از ۱۰ درصد بود.



شکل (۴-۳۹) مقایسه نسبت عمق ثانویه شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی

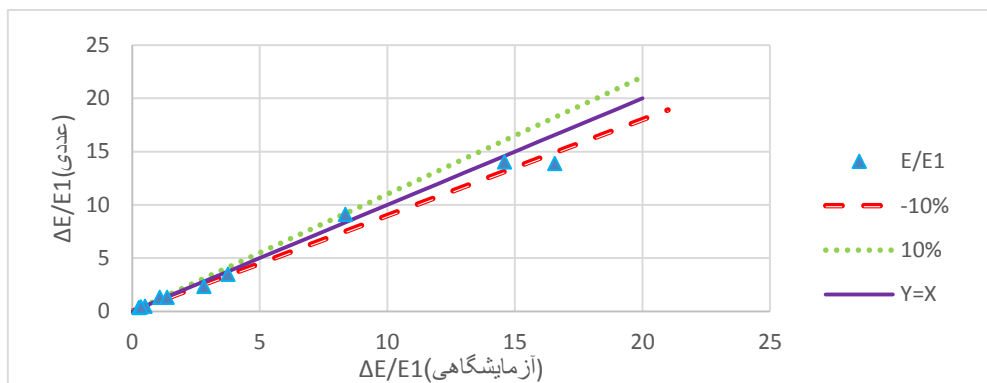
شکل (۴-۴۰) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مربوط به طول پرش را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل اختلاف بین مقادیر طول پرش شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی ۶/۲ درصد برآورد شده است.



شکل (۴-۴۰) مقایسه طول پرش شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی

#### ۴-۵-۷- مقایسه تغییرات افت نسبی انرژی شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی

مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و مدل آزمایشگاهی افت نسبی انرژی در شکل (۴-۴۱) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج عددی و آزمایشگاهی به نسبت باهم سازگار هستند. اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی افت نسبی انرژی ۸/۵ درصد برآورد شد.



شکل (۴-۴) مقایسه افت انرژی نسبی در نتایج شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی

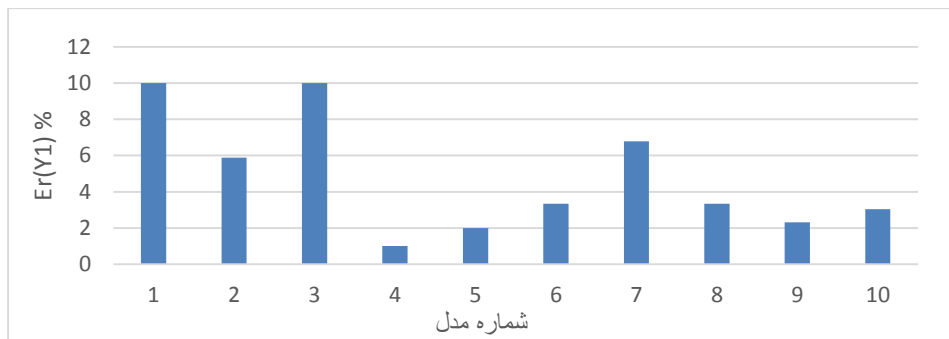
#### ۴-۶ - درصد خطا در اندازه‌گیری عددی با نتیجه آزمایشگاهی

در پایان این فصل به جمع‌بندی درصد خطاهای اندازه‌گیری عددی و آزمایشگاهی می‌پردازیم. با توجه به جدول (۴-۶) و شکل‌های (۴-۴) تا (۴-۴۴) می‌توان نتیجه گرفت که درصد خطاهای حاصل از اندازه‌گیری آزمایشگاهی و محاسبه نرم‌افزاری بسیار کم بوده و زیر ۱۰ درصد می‌باشد و این نشان‌دهنده قابلیت نرم‌افزار فلونت در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی می‌باشد.

جدول (۴-۶) محاسبه درصد خطا اندازه‌گیری عددی با نتیجه آزمایشگاهی

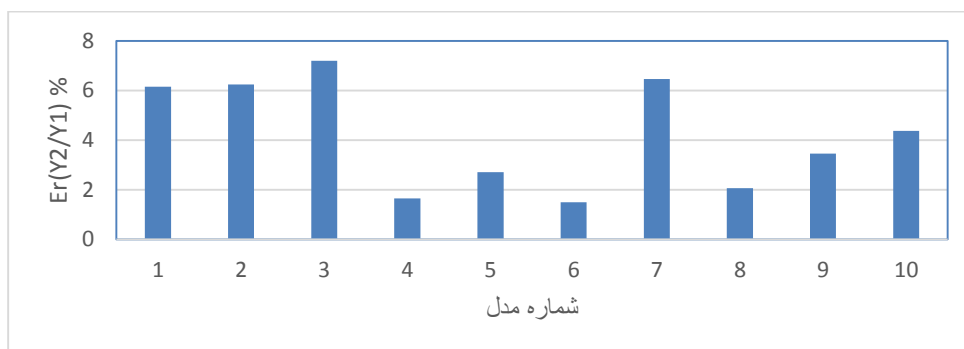
$\frac{y_2}{y_1}$ %	$\frac{L_j}{y_1}$ %	$Er(L_j)$ %	$Er(y_2)$ %	$Er(y_1)$ %	q ( $m^2/s$ )	Q ( $m^3/hr$ )	مدل
۶/۲	۶	۳/۷	۳/۲۳	۱۰	۰/۰۱۷	۵	M1
۶/۳	۱۳	۶/۰۶	۰	۵/۸۸	۰/۰۱۷	۵	M2
۷/۲	۷	۲/۴۴	۲/۰۸	۱۰	۰/۰۲۴	۷	M3
۱/۶	۱۲	۱۰/۹	۰/۶۶	۱	۰/۰۲۴	۷	M4
۲/۷	۵	۶/۶۷	۰/۷۵	۲	۰/۰۱۷	۵	M5
۱/۵	۱۰	۱۳/۳	۱/۷۹	۳/۳۳	۰/۰۱۷	۵	M6
۶/۵	۱۱	۳/۴۵	۰/۷۶	۶/۷۹	۰/۰۲۴	۷	M7
۲/۱	۷	۴/۱۷	۱/۲	۳/۳۳	۰/۰۲۴	۷	M8
۳/۵	۶	۳/۲۳	۱/۰۶	۳/۳۱	۰/۰۲۴	۷	M9
۴/۴	۸	۴/۷۶	۱/۲	۳/۰۳	۰/۰۲۴	۷	M10

با توجه به نمودار شکل (۴-۴۲) می توان نتیجه گرفت که متوسط درصد خطا در اندازه گیری عمق اولیه به صورت آزمایشگاهی و عددی ۴/۷۷ درصد بود.



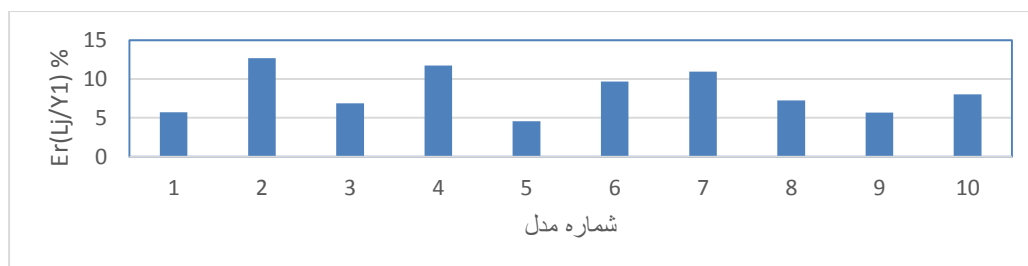
شکل (۴-۴۲) نمودار درصد خطای عمق اولیه در مدل آزمایشگاهی بر اساس مدل عددی

همچنین متوسط درصد خطا در محاسبه نسبت اعماق مزدوج به صورت آزمایشگاهی و عددی ۴/۱۸ درصد بود (شکل ۴-۴۳).



شکل (۴-۴۳) نمودار درصد خطای نسبت اعماق پرش در مدل آزمایشگاهی بر اساس مدل عددی

با توجه به نمودار شکل (۴-۴۴) میتوان نتیجه گرفت که متوسط درصد خطا در محاسبه طول پرش به صورت آزمایشگاهی و عددی ۸/۳ درصد بود.



شکل (۴-۴۴) نمودار درصد خطای طول پرش در مدل آزمایشگاهی بر اساس مدل عددی



# فصل پنجم

## نیج گیری و پیشنهادات

## ۵-۱- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر به بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر زبری‌های مثلثی و اعمال شیب معکوس در پرش هیدرولیکی پرداخت از این مطالعه نتایج زیر حاصل گردید:

- سطوح با زبری‌های مثلثی شکل توانستند باعث کاهش عمق پایاب مورد نیاز برای پرش در مقایسه با پرش معمولی به میزان تقریبی  $34/8$  درصد گردند و با افزایش فاصله زبری از عملکرد زبری در کاهش نسبت  $\frac{y_2}{y_1}$  کاسته شد، همچنین با افزایش عدد فرود، نسبت  $\frac{y_2}{y_1}$  برای حالت‌های مختلف افزایش یافت که دلیل آن را می‌توان افزایش قدرت پرش دانست همچنین روند تغییرات  $\frac{y_2}{y_1}$ ، برای شیب‌های مختلف روندی خطی داشت و با افزایش میزان شیب معکوس از صفر درصد به  $0/75$  نسبت  $\frac{y_2}{y_1}$  روند کاهشی ملایمی (به طور متوسط  $10\%$ ) داشته است. به طور کلی می‌توان گفت که در حداکثر شیب معکوس و زبری مثلثی با فاصله صفر نسبت  $\frac{y_2}{y_1}$  تا حدود  $12$  درصد نسبت به جهش کلاسیک کاهش یافت.
- کاربرد زبری مثلثی و اعمال شیب معکوس نسبت به شرایط صاف و شیب صفر، سبب کاهش نوسانات سطح آب در طول پرش گردید (تغییرات پروفیل سطح آب در طول پرش کاهش یافت). در واقع استفاده از زبری مثلثی سبب کاهش تلاطم شده که نتیجه آن کنترل می‌باشد ولی برای زبری با فاصله متفاوت با افزایش فاصله زبری از عملکرد آن‌ها در کنترل مشخصات پرش کاسته شد، که نتیجه آن تغییرات بیشتر سطح آب در محل پرش بود. بهترین عملکرد در کنترل پرش و نوسانات سطح آب مربوط به زبری با فاصله صفر بود. اجرای شیب معکوس همراه با بستر زبر تأثیر زیادی بر روی تغییرات سطح آب داشت.
- پروفیل سطح آب استخراج شده از مدل در محدوده پرش دارای تطابق نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشگاهی بود



- مدل آشفتگی K-ε استاندارد و روش جزء حجم سیال (VOF) برای پیش‌بینی نیمرخ‌های سطح آب در پرش آبی بر روی بستر موج‌دار مثلثی شکل مناسب بوده و با دقت ۳ تا ۷ درصد نیمرخ سطح آب، شبیه‌سازی می‌گردد.
- نتایج این تحقیق با ایجاد پرش روی شیب معکوس نشان داد که با افزایش شیب، عمق ثانویه مربوط به عمق اولیه سریع‌تر اتفاق افتاده، پرش سریع‌تر تشکیل شد، در نتیجه پرش به سمت بالادست حرکت کرد یعنی در یک فرود ثابت با افزایش شیب معکوس از صفر به ۰/۷۵٪ مقدار طول پرش روند کاهشی داشته و متوسط تغییرات طول پرش ۳۰ درصد بود.
- کانال‌های با بستر زبر به طور قابل ملاحظه‌ای طول پرش هیدرولیکی را کاهش می‌دهند با افزایش عدد فرود نسبت  $\frac{Lj}{y_1}$  افزایش یافت و افزایش فواصل زبری، عملکرد آن‌ها را در کاهش  $\frac{Lj}{y_1}$  تحت تأثیر قرار داد، افزایش تنش برشی بستر در اثر حضور زبری و تأثیر مؤلفه روبه پایین وزن سیال در شیب معکوس از عوامل اصلی این تغییرات است.
- اعمال همزمان زبری مثلثی با فاصله صفر و افزایش شیب معکوس تأثیر بسزایی در کاهش طول پرش داشته که می‌تواند عاملی کاربردی در کاهش هزینه ساخت حوضچه آرامش باشد.
- در یک فرود ثابت با افزایش شیب معکوس نسبت  $\frac{\Delta E}{E_1}$  افزایش یافت. همچنین با افزایش عدد فرود، افت انرژی افزایش یافت و متوسط تغییرات افت انرژی ۴۲/۷ درصد بود. شیب معکوس در روند استهلاک انرژی تأثیر مثبتی داشت.
- در حالتی که فاصله زبری‌های مثلثی برابر صفر بود، مقدار نسبی افت انرژی به کمترین مقدار خود متمایل شد و برای فاصله زبری دو سانتی‌متر، مقدار افت به مقدار زیادی افزایش یافت، همچنین با افزایش عدد فرود مقدار افت انرژی افزایش یافت.
- به ازای حداکثر شیب معکوس و فاصله زبری صفر، افت نسبی انرژی جهش تا حدود ۲۱ درصد افزایش می‌یابد.

- بررسی بردارهای سرعت شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد با افزایش فاصله از ابتدای پرش آبی، از سرعت جریان کاسته شد. به عبارت دیگر حداکثر سرعت در ابتدای زبری‌ها و ناحیه‌ی چرخشی جریان بوده و حداقل آن در نزدیکی سطح آب و بستر موج‌دار مثلثی شکل دیده می‌شود، در پایین-دست پرش گرادیان سرعت‌ها رفته رفته کاهش یافت و همچنین سرعت‌های منفی (آبی پررنگ) در نزدیکی سطح آب و در فرورفتگی زبری‌ها وجود دارد.
- اختلاف بین مقادیر عمق مزدوج نسبی شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی کمتر از ۱۰ درصد بود.
- با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، می‌توان نتیجه گرفت که از مدل عددی فلونت در تحلیل جریان درون حوضچه‌های آرامش برای شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی به عنوان روشی کارآمد می‌توان استفاده نمود و در پروژه‌های عملی آن را به کار گرفت.

## ۵-۲- پیشنهادات

- در این تحقیق به بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی با شیب معکوس با اعمال زبری‌های مثلثی پرداخته شد که پیشنهاد می‌شود مطالعات زیر نیز صورت پذیرد:
- در این بررسی ارتفاع زبری‌های مثلثی ثابت بودند و در دو فاصله صفر و ۲ سانتی‌متر از هم بررسی شدند که پیشنهاد می‌شود زبری‌های مثلثی با ارتفاع‌ها و فاصله‌های بیشتر اعمال گردد.
  - شیب معکوس اعمال شده در این بررسی به دلیل محدودیت دستگاه از صفر تا ۰/۷۵٪ بود که پیشنهاد می‌شود نتایج مشخصات پرش با اعمال شیب‌های معکوس بیشتر بررسی گردد.
  - بررسی پرش هیدرولیکی مستغرق و تعیین مشخصات آن در شرایط وجود زبری و شیب معکوس

منابع و مأخذ

۱. آصفی م و ضیائی ع.ن، (۱۳۹۰)، "شبییه سازی عددی دو بعدی پرش هیدرولیکی روی سطوح شیبدار معکوس همراه با پله در انتها با نرم‌افزار FLUEN"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
۲. ابریشمی ج و اسماعیلی ک، (۱۳۷۶) "پرش هیدرولیکی روی کانال‌های با شیب معکوس با پله مثبت" انتشارات امیر کبیر، ص ۲۷۶-۲۹۹.
۳. ابریشمی ج، حسینی م، (۱۳۸۵) "هیدرولیک کانال‌های باز" چاپ چهاردهم، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع).
۴. اسماعیلی ک و ابریشمی ج، (۱۳۷۹) "پرش هیدرولیکی روی کانال‌های با شیب معکوس و پله منفی" مجله استقلال، شماره ۱۹، دوره ۲، ص ۹۷-۱۱۰.
۵. بدیع‌زادگان ر، اسماعیلی ک، فغفورمغربی م و صانعی م، (۱۳۹۰) "مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش کانال‌های آبیاری با بستر موجدار" نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۵، شماره ۳، ص ۶۸۷-۶۷۶.
۶. پارسامهر پ و حسین‌زاده دلیر ع، (۱۳۹۲) "بررسی آزمایشگاهی اثر بستر زیر بر عمق مزدوج نسبی پرش هیدرولیکی بر روی شیب معکوس" مجله علمی کشاورزی، شماره ۱ دوره ۳۶، ص ۱۰۱-۸۹.
۷. پارسامهر پ، حسین‌زاده دلیر ع، فرسادی‌زاده د و عباسپور ا، (۱۳۹۲) "بررسی آزمایشگاهی اثر آبپایه بر خصوصیات پرش هیدرولیکی روی شیب معکوس" مجله پژوهش آب ایران، شماره ۱۳، سال ۷، ص ۸۹-۹۶.
۸. پورعبدالله ن، هنر ت و فتاحی ر، (۱۳۹۳) "تأثیر زبری در شیب‌های معکوس بر عمق ثانویه و نرخ استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی" مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال ۱۸، شماره ۶۷، ص ۱۶۹-۱۷۳.

۹. پورعبدالله ن، هنرت و فتاحی ر، (۱۳۹۴) "بررسی پروفیل سطح آب و سرعت در پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با شیب معکوس" نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۱، ص ۱۵۲-۱۴۳.
۱۰. حسینی م و ابریشمی ج، (۱۳۸۵) "هیدرولیک کانال‌های باز" چاپ چهاردهم، انتشارات دانشگاه امام رضا، ص ۶۱۳.
۱۱. حیدری فهونده ا و برهمند ن، (۱۳۹۵) " کاربرد شبیه‌آشفتگی  $K-\epsilon$  مرسوم و روش جزء حجم سیال VOF در پیش‌بینی نیمرخ‌های سطح آب در پرش آبی بر روی بسترهای موجدار سه‌گوشه ای" مجله مهندسی منابع آب، سال نهم، ص ۳۳.
۱۲. دانشفرار ر، نیک‌پور م، صادقی ح، (۱۳۹۲) "شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولیکی با استفاده از فلوئنت"، چاپ اول، انتشارات عمیدی، تبریز، ص ۶۵-۱.
۱۳. دستورانی م و نصرآبادی م.، (۱۳۹۰) " اثر زبری بستر بر مشخصات جهش هیدرولیکی روی شیب معکوس" مجله پژوهش آب ایران، سال پنجم، شماره نهم، ص ۹۱-۱۰۰.
۱۴. سعادت‌تی ا، زین‌العابدینی م، (۱۳۹۴) "اصول شبیه‌سازی مقدماتی و پیشرفته دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از Fluent و CFX"، چاپ اول، لیتوگرافی و چاپ تندیس نقره‌ای به سفارش شرکت مهندسی پرداد پترو دانش، تهران.
۱۵. عباسپور ا، فرسادی‌زاده د، حسین‌زاده دلیر ع و صدرالدینی ع، (۱۳۸۹) " شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج دار با مدل FLUENT" مجله دانش آب و خاک، جلد ۲۰/۱، شماره ۲، ص ۸۵-۹۰.
۱۶. عباسپور ا. و هاشمی کیا س. (۱۳۹۲) " شبیه‌سازی عددی جریان بر روی سرریز استوانه‌ای با در نظر گرفتن مؤلفه زبری با استفاده از شبیه  $k-\epsilon$  معیار، مجله مهندسی منابع آب، شماره ۱۸، دوره ۶، ص ۸۷-۹۸.

۱۷. غزالی م. و صمدی ح، (۱۳۹۱) " مطالعه آزمایشگاهی پروفیل سرعت در طول پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با زبری‌های مثلثی"، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال ۲، شماره ۸، ص ۱۱۷-۱۲۸.
۱۸. فرومند س.ع.، اسماعیلی ک.، خدانشناس س.ر. و ضیائی ع. ن. (۱۳۹۲) " مدلسازی پرش هیدرولیکی در کانالی با بستر موج با استفاده از Fluent"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد.
۱۹. کریمی ر.، اقبال‌زاده ا. و جوان م. (۱۳۸۹) " مقایسه مدل‌های آشفتگی مختلف جهت شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در پایین‌دست دریچه"، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس.
۲۰. گلشاهی فر، م. (۱۳۸۷) "فلوئنت کاربردی"، چاپ اول، انتشارات صانعی شه‌میرزادی.
۲۱. محمدنژاد ب، فاطمی کیا م.ا.، بهمنش ج و منتصری م. (۱۳۹۳) "شبیه‌سازی عددی انتشار موج ناشی از شکست سد به صورت دو بعدی قائم" نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، شماره ۴۴، پاییز ۱۳۹۳، ص ۵۳-۵۶.
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، تبریز، دانشگاه تبریز- گروه مهندسی آب.
۲۳. نژاد علی ع، اسماعیلی ک و فرهودی ج، (۱۳۹۱) " اثر فاصله زبری‌های مثلثی بستر بر ویژگی‌های پرش هیدرولیکی" نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، شماره ۲، جلد ۲۶، ص ۲۸۹-۲۸۲.
۲۴. ورجاوند پ، (۱۳۸۸)، پایان‌نامه ارشد " شبیه‌سازی جریان در سازه کنترل سیلاب سد ونیار با مدل CFD"، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

25. Abbaspour A, Hosseinzadeh Dalir A, Farsadizadeh D and Sadraddini A.A.(2009) “ Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics” **Journal of Hydro-environmental Research** ., 3, pp 109-117.
26. Abrishami J and Saneie M. (1994) “Hydraulic jump in adverse basin slopes” **Iranian J. of Water Research Engineering.**, 2, 1, pp 51-63.
27. Amorim J.C.C. , Rodrigues C.R. and Marques M.G (2004) “ A numerical and Experimental study of Hydraulic Jump Stilling Basin” , advances in Hydro-Science and- Engineering, Volume VI, Proceedings of Abstracts and Papers of the 6<sup>th</sup> International Conference on Hydro-Science and –Engineering , Brisbane,Australia, 2004, University Of Mississippi, Oxford, MS.
28. Beirami M.K. and Chamani M.R.( 2006) “Hydraulic jumps in sloping channels:sequent depth rati” **Journal of Hydraulic Engineering.**, 132, 10, pp 1061-1068.
29. Beirami M.K and Chamani M.R.(2010) “Hydraulic jumps in sloping channels: roller length and energy loss” **Journal of Canadian Civil Engineering.**, 37, pp 535-543.
30. Belanger J.B. (1828) “ Essai Sur la Solution Numériaue de Quelques Problèmes Relatifs au Mouvement Permanent des Eaux Courantes” **Carulian-Goeury**, Paris, France (in French).
31. Ead S.A and Rajaratnam N. (2002) “Hydraulic jumps on corrugated beds” **Journal of Hydraulic Engineering.**,128 , 7, pp 656-663.
32. Ead S.A. (2007), “**Effect of bed corrugations on the characteristics of hydraulic jump**”, Final Research Report 14/427. King Saud University.College Of Engineering. Research Center.
33. Elsebaie IH. and Shabayek Sh. (2010) “Formation of hydraulic jumps on corrugated beds” **Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS.**,10,1, pp 40-50.
34. Flow Science Inc. 2009. Flow3D user's manual. Sanata Fe. N.M.
35. Gharangik A.M. and Chaudhry M.H. ( 1991) “ Numerical model of hydraulic jump” **Journal of Hydraulic Engineering ASCE.**, 117, pp 1195-1209.
36. Gohari A., and Farhoudi J., (2009) “The characteristics of hydraulic jump on rough bed stilling basin”, 33<sup>rd</sup> IAHR Congress,Water Engineering for a Sustainable Environment. Vancouver. British Columbia.

37. Gonzalez A. and Bombardelli F., (2005) “Two-phase flow theory and numerical models for hydraulic jumps” , including air entrainment, Congress, Seoul, Korea, pp 15-24.
38. Gunal M. and Narayanan R. (1998) “K- $\epsilon$  turbulence modeling of submerged hydraulic jump using boundary-fitted coordinates” **Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water maritime and energy.**, 130, 2, pp 104-114
39. Hager W.H. (1992) “Energy dissipators and hydraulic jump” **Kluwer Academic Publisher.** Dordrecht., pp 185-224.
40. Hughes W.C and Flack J.E. (1984) “Hydraulic jump properties over a rough bed” **Journal of Hydraulic Engineering.**, 110, 12, pp 1755-1771.
41. Izadjo F. and Shafai Bejestan M. (2007) “Corrugated bed hydraulic jump stilling basin” **Journal of Applied Sciences ANSI.**, 7, pp 1164-1169.
42. Khadar M.H.A and Rajagopal S. (1972) “Hydraulic jump in adverse channel slopes” **Irrig. PWT**, 29, pp 77-82.
43. Leutheusser H.J. and Schiller E.J. (1975) “Hydraulic jump in a rough channel” **Water power and Dam Construction.**,27, 5, pp 186-191
44. Liu C.R., Ma W.J. and HuHe A.D. ( 2002) “ Numerical investigation of flow over a weir” **Journal of Acta Mechanica Sinica.**, 18, pp 594-602.
45. Liu M., Rajaratnam N. and Zhu D.( 2004) “Turbulence structure of hydraulic jumps of low Froude numbers” , **Journal of Hydraulic Engineering ASCE.**, 130, pp 511-520.
46. McCorquodale J.A and Mohamed M.S. (1994) “Hydraulic jumps on adverse slope” **Journal of Hydraulic Research.**, IAHR,32, 1, pp 119-130.
47. Pagliara S. Lotti I. and Palermo M. (2008) “Hydraulic Jump on rough bed of stream rehabilitation structures” **Journal of Hydro-environment Resrarch.**, 2, pp 29-38.
48. Peterka A.J. (1958) “**Hydraulic design of stilling basins and energy dissipaters**” Engineering Monograph , No. 25, USBR, Denver, Colorado, USA.
49. Rajaratnam N. (1965) “The hydraulic Jump as a wall Jet” **Journal of Hydraulic Division.**, 91,5, pp 107-132.
50. Rajaratnam N. (1967) “ Hydraulic jump adverse slope” **Hydrosci**, 4 , pp 197-280.



51. Rajaratnam N.(1968) “Hydraulic jump on rough bed” **Trans. Eng. Inst. Canada.**, 11, A-2, pp 1-8.
52. Rous H. (1938) “Fluid mechanics for hydraulic engineers” **McGraw Hill Book Company**. New York.
53. 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.
54. Saeedpanah A. and Kavianpour M. and Hamed M.H., (2001) “Mathematical Modeling of hydraulic jumps”, 3th Iranian Hydraulic Association, School of Civil Engineering, pp 190-198, Tehran University, Tehran, Iran ,.
55. Samadi Boroujeni H. Ghazali M. Ghorbani B. and Fatahi R. (2013) “Effect of triangular corrugated beds on the hydraulic jump characteristics” **Canadian Journal of Civil Engineering**, 40, pp 841-847.
56. Sarker M.A. and Rhodes D.G.( 2002) “ **Physical Modeling and CFD Applied to Hydraulic Jumps**” Cranfield University Report, Institute of Technology , Bangladesh.
57. Stevens J.C. (1944) “Discussion of the paper by Kindsvater Hydraulic jump in sloping channel” **Trane.of the ASCE.**, 109, pp 1125-1135.
58. Zhao Q. and Misra S.K. (2004) “Numerical study of a turbulent hydraulic jump”, 17<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Conference, University of Delaware, New York, DE.

## **Abstract**

Hydraulic jump plays a significant role in dissipation of kinetic energy downstream of hydraulic structures in a stilling basin. Basin bottom roughness and reverse slope are the important factors for reducing length and secondary depth and increase of energy loss by hydraulic jump. In this study the effects of triangular roughness distance and reverse slope on hydraulic jump have been investigated experimentally and numerically. Experiments carried out a triangular rough bed with a distance of 0 and 2 cm, and three reverse slopes in a rectangular flume in a hydraulic laboratory of the Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Iran, Then experimental model was simulated by Fluent. The flume has 0.08 m wide, 0.3 m deep and 5 m long. In all experiments, the main characteristics of hydraulic jump including primary and secondary depth and the length of hydraulic jump were measured, also hydraulic parameters were determined as a function of the Froude number. 2D simulation was done by Fluent in two dimensions using standard k- $\epsilon$  RNG model. Comparing the final results showed that the secondary depth and hydraulic jump length on the rough bed with the reverse slope compared to the flat bed, decreased about 12 and 14 percent, respectively. Also the energy loss will increase and it will be intensified by increase of Froude number. Average of increase was about 13%. The non dimensional flow profile of hydraulic jump was uniform and showed a good agreement. The results showed that the CFD model used to predict the water surface profile in hydraulic jump was suitable on a triangular rough bed and the relative error of the water surface values obtained from the numerical and measured models is 2 up to 7 percent.

**Keywords** Fluent, Fluid volume component, Hydraulic jump, K- $\epsilon$  turbulence model, Reverse slope, Triangular rough.



Shahrood University of Technology

Faculty of Agriculture

Department of Water and Soil

M.Sc. Thesis in Water Structures Engineering

**Control of Hydraulic Jump by Application of Different  
Roughness in Rectangular Channels with Reverse Slope**

By: Zohreh Esmailzadeh

Supervisor

Dr. Khalil Azhdary

Advisor

Dr. Seyyed Hossein Hosseini

September 2018