

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران  
رشته مهندسی عمران گرایش هیدرولیک

رساله دکتری

## مطالعه خصوصیات هیدرولیکی پرش در حوضچه‌های آرامش شیبدار با مقاطع واگرا و بکارگیری بلوکهای اتلاف کننده انرژی

نگارنده: زهرا اشکو

اساتید راهنما

دکتر احمد احمدی

دکتر امیر احمد دهقانی

دی ماه ۹۷

تقدیم به همسر و فرزند عزیز  
و  
پدر و مادر فداکارم

از اساتید گرامی جناب آقای دکتر احمدی و جناب آقای دکتر دهقانی که این تحقیق حاصل راهنمایی‌های ارزشمند ایشان می باشد، تقدیر و تشکر نمایم.

همچنین از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان که امکانات آزمایشگاهی خود را در اختیار اینجانب قرار داد کمال تشکر و قدر دانی را دارم.

## تعهد نامه

صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مطالعه خصوصیات هیدرولیکی پرش در حوضچه‌های آرامش شبیدار با مقاطع واگرا و بکارگیری بلوکهای اتلاف کننده انرژی تحت راهنمایی جناب آقای دکتر احمد احمدی و دکتر امیراحمد دهقانی متعهد می‌شوم:

- 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 ارایه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « Shahrood University » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- 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.

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

حوضچه‌های آرامش معمولاً در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی به عنوان مستهلک‌کننده انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ابعاد حوضچه‌های آرامش مستقیماً به مشخصات پرش هیدرولیکی بستگی دارد. از اینرو تلاش پژوهشگران بر این بوده است تا با ایجاد تمهیداتی در محل وقوع پرش هیدرولیکی، بتوانند مشخصات پرش را بهبود بخشند تا صرفه‌جویی اقتصادی زیادی به همراه داشته باشد. افت انرژی بیشتر، طول پرش و نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه کمتر، از پارامترهای تعیین کننده در طراحی بهینه حوضچه آرامش می‌باشند. تا کنون تکنیکهای متعددی جهت افزایش افت انرژی، کاهش طول و عمق ثانویه در پرش هیدرولیکی به کار رفته است. ترکیبی از این تکنیک‌ها در سال‌های اخیر در جهت بهینه نمودن طرح حوضچه آرامش بسیار مورد توجه محققین بوده است. با توجه به نتایج قابل قبول استفاده از موانع، واگرایی جریان، شیب معکوس در افزایش اتلاف انرژی، کاهش طول پرش و عمق ثانویه، در مطالعه حاضر، پرش هیدرولیکی واگرایی معکوس با به کارگیری بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی به صورت آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی مورد بررسی قرار گرفت و اثر میزان واگرایی دیواره‌های کانال، شیب کف معکوس و چیدمان متفاوت بلوک‌های میانی بر مشخصه‌های پرش هیدرولیکی بررسی گردید. در مجموع، آزمایش‌ها برای مقاطع مستطیلی با شیب کف معکوس ۰، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد و زوایای واگرایی ۳، ۵، ۹ و صفر درجه (مستقیم) و با قرار دادن بلوک‌های اتلاف‌کننده‌ی انرژی انجام شد. بلوک‌های میانی در دو وضعیت واگرا و همگرا و به صورت متقارن نسبت به محور مرکزی کانال و در فواصل مختلف نسبت به دریچه‌ی بالادست قرار داده شد ( $\alpha = 0 - 80^\circ$ ). دامنه تغییرات مقادیر دبی و عدد فرود از ۳۹ الی ۸۱/۷ لیتر بر ثانیه و ۴/۴۴ الی ۸/۵۶ بود. نتایج نشان داد در حوضچه واگرا بکارگیری بلوک‌ها در وضعیت همگرا منجر به کاهش طول پرش نسبی و نسبت عمق ثانویه پرش می‌گردد و بهترین زاویه‌ی استقرار بلوک زاویه ۳۰ درجه بوده است. نتایج همچنین نشان داد بلوک‌های میانی به میزان قابل ملاحظه‌ای بر نسبت عمق ثانویه و طول پرش تاثیر می‌گذارند) در

مقایسه با حوضچه‌ی واگرای معکوس بدون بلوک). در زاویه استقرار بلوک ۳۰ درجه‌ی همگرا، میزان کاهش طول و نسبت عمق ثانویه پرش به ترتیب ۳۵ و ۱۶ درصد بوده است. در حوضچه آرامش مستطیلی نتایج مربوط به نحوه چیدمان بلوک‌ها دقیقاً عکس حوضچه‌ی واگرا به دست آمده است. بدین معنی که وضعیت واگرای بلوک‌ها منجر به کاهش طول نسبی پرش و نسبت عمق ثانویه گردیده و زاویه ۳۰ درجه بهترین نتایج کاهش را نشان داده است. در زاویه استقرار بلوک ۳۰ درجه‌ی واگرا، میزان کاهش طول و نسبت عمق ثانویه پرش به ترتیب ۴۰ و ۱۰ درصد بوده است. در حالیکه وضعیت همگرای بلوک‌ها منجر به افزایش طول پرش نسبی و نسبت عمق ثانویه گردیده است. معادله‌ای نیمه‌تحلیلی برای نسبت عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در کانال واگرا روی شیب معکوس با بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی ارائه گردید که تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد. در مدلسازی عددی توسط نرم افزار Flow3D بهترین مدل که کمترین اغتشاشات در سطح آب و نزدیکترین جواب‌ها را نسبت به نتایج مدل آزمایشگاهی نشان داد مدل  $k-\omega$  به دست آمده است و مطابقت خوبی بین نتایج آزمایشگاهی نیمرخ‌های طولی پرش و منحنی‌های مبتنی بر فرضیات مدلسازی عددی مشاهده گردید که صحت فرضیات به کار رفته در مدلسازی عددی را تایید نمود.

**واژگان کلیدی:** حوضچه آرامش واگرا، شیب کف معکوس، مشخصات هیدرولیکی پرش، بلوک‌های

کف حوضچه، زاویه استقرار

Journal papers

1. Eshkou, Z., Dehghani, A.A., Ahmadi, A., Experimental investigation of the characteristics of hydraulic jump in a diverging stilling basin with an adverse slope using baffle blocks. Journal of water and soil science., 2018. (in Persian)
2. Eshkou, Z., Dehghani, A.A., Ahmadi, A., Forced Hydraulic Jump in a Diverging Stilling Basin Using Angled Baffle Blocks. J. of Irrig. Drain Eng., 2018, 144(8): 06018004-1-10.
3. Eshkou, Z., Ahmadi, A., Dehghani, A.A., Experimental investigation of the effects of block inclinations on the hydraulic jump characteristics in the stilling basin (USBR III). J. of Water and Soil Conservation, Vol. 2016, 22(4).231-242. 2015.(in Persian)

Conference papers

1. Eshkou, Z., Ahmadi, A., Dehghani, A.A., Experimental study on effect of artificial roughness on hydraulic characteristics in diverging stilling basins with adverse slope. 14<sup>th</sup> Iranian hydraulic conference. 2015, Zahedan, Iran. (in Persian)
2. Eshkou, Z., Dehghani, A.A., Ahmadi, A., Experimental study on effect of artificial roughness on submerge limit of hydraulic jump in diverging stilling basins with adverse slope. 10<sup>th</sup> river engineering conference(10 IREC). 2016, Ahwaz, Iran. (in Persian)



## فهرست مطالب

۱	فصل ۱	مقدمه و کلیات
۱-۱	مقدمه	۲
۳	الف- حوضچه استاندارد USBR تیپ یک	۳
۳	ب- حوضچه استاندارد USBR تیپ دو	۳
۳	ج- حوضچه استاندارد USBR تیپ سه	۳
۴	د- حوضچه استاندارد USBR تیپ چهار	۴
۵	ه- حوضچه آرامش SAF	۵
۷	۲-۱- اهداف تحقیق حاضر	۷
۹	۳-۱- نوآوری و ضرورت انجام تحقیق حاضر	۹
۹	۴-۱- روش انجام تحقیق	۹
۱۱	۵-۱- فصل بندی رساله و موضوعات مورد بررسی در تحقیق حاضر	۱۱
۱۳	فصل ۲	مروری بر تحقیقات گذشته
۱۴	۱-۲- مقدمه	۱۴
۱۴	۲-۲- پرش‌های هیدرولیکی واگرا (شیب دیواره در پلان)	۱۴
۲۴	۳-۲- کنترل پرش هیدرولیکی توسط آبپایه (استفاده از موانع)	۲۴
۴۳	۴-۲- اثر شیب کف حوضچه بر پرش	۴۳
۴۹	۵-۲- تاثیر به کارگیری موانع میانی	۴۹
۵۷	۶-۲- بررسی عددی در زمینه تحقیق	۵۷
۶۷	فصل ۳	مواد و روشها
۶۸	۱-۳- مقدمه	۶۸
۶۸	۲-۳- تجهیزات آزمایشگاهی	۶۸
۷۱	۱-۲-۳- مخزن اولیه بالادست و مخزن تامین ارتفاع	۷۱
۷۲	۲-۲-۳- حوضچه آرامش واگرا و کانال پایین دست	۷۲
۷۳	۱-۲-۲-۳- تعیین طول حوضچه آرامش	۷۳
۷۳	۲-۲-۲-۳- تعیین عرض و عمق حوضچه آرامش	۷۳
۷۴	۳-۲-۲-۳- بلوک‌های اتلاف کننده انرژی و آبپایه انتهایی	۷۴
۷۵	۴-۲-۲-۳- کف کاذب	۷۵
۷۶	۵-۲-۲-۳- دیواره‌های واگرا	۷۶
۷۶	۳-۲-۳- سیستم‌های اندازه‌گیری	۷۶

۷۶	..... اندازه‌گیری دبی جریان	۳-۲-۱
۷۸	..... برداشت نیمرخ و طول پرش	۳-۲-۲
۷۹	..... سیستم کنترل پرش هیدرولیکی	۳-۲-۴
۸۰	..... روش انجام آزمایش‌ها	۳-۳
۸۰	..... تنظیم شیب کف معکوس و زاویه واگرایی	۳-۱
۸۰	..... نحوه استقرار بلوکها و آبپایه انتهایی	۳-۲
۸۱	..... تنظیم دبی جریان	۳-۳
۸۱	..... تثبیت موقعیت پرش هیدرولیکی	۳-۴
۸۱	..... قرائت‌های صورت گرفته در هر آزمایش	۳-۵
۸۱	..... طبقه بندی آزمایش‌ها	۳-۴
۸۲	..... مدلسازی عددی مدل آزمایشگاهی با استفاده از نرم افزار Flow3D	۳-۵
۸۳	..... تعریف هندسه	۳-۵-۱
۸۵	..... تعریف هندسه مدل	۳-۵-۲
۸۶	..... انتخاب گام زمانی	۳-۵-۳
۸۶	..... ایجاد شرایط مرزی	۳-۵-۴
۸۷	..... مدل انتقال آشفتگی	۳-۵-۶
۸۹	..... تئوری پرشهای هیدرولیکی واگرا با شیب معکوس و بلوک‌های میانی	۳-۶
۸۹	..... تحلیل ابعادی	۳-۶-۱
۹۱	..... نسبت عمق ثانویه در پرش هیدرولیکی واگرا با شیب معکوس و بلوک‌های میانی	۳-۶-۲
۹۴	..... افت انرژی در پرش هیدرولیکی واگرا با شیب معکوس و بلوک‌های میانی	۳-۶-۳
۹۷	..... نتایج و بحث	فصل ۴
۹۸	..... مقدمه	۴-۱
۹۸	..... مشاهدات آزمایشگاهی	۴-۲
۱۰۳	..... نتایج آزمایشگاهی	۴-۳
۱۰۶	..... مقایسه چیدمان‌های واگرا و همگرای بلوکها	۴-۴
۱۱۱	..... بررسی تاثیر پارامترهای بی‌بعد بر مشخصه‌های هیدرولیکی پرش	۴-۵
۱۱۱	..... (الف) طول نسبی پرش	
۱۱۴	..... (ب) نسبت عمق ثانویه	
۱۱۸	..... روابط برازشی نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش	۴-۶
۱۲۴	..... نتایج تئوری و آزمایشگاهی نیمرخ پرش واگرای معکوس	۴-۷

۱۲۶	۸-۴- بررسی مدل نیمه تحلیلی نسبت عمق ثانویه .....
۱۲۹	۹-۴- نتایج به دست آمده از مدلسازی عددی .....
۱۳۲	۱۰-۴- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی نیمرخ طولی پرش .....
۱۳۴	۱۱-۴- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی نسبت عمق ثانویه .....
۱۳۶	۱۱-۴- مقایسه کلی نتایج آزمایشگاهی، عددی و نیمه تحلیلی .....
۱۳۹	فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادات .....
۱۴۰	۱-۵- مقدمه .....
۱۴۴	فهرست علائم .....
۱۴۵	لیست مراجع: .....

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱-۱ نمای شماتیک حوضچه آرامش USBR II (USBR 1964) ..... ۳
- شکل ۱-۲-۱ نمای شماتیک حوضچه آرامش USBR III (USBR 1964) ..... ۴
- شکل ۱-۳-۱ نمای شماتیک حوضچه آرامش USBR IV (USBR 1964) ..... ۵
- شکل ۱-۴-۱ نمای شماتیک حوضچه آرامش SAF (USBR 1964) ..... ۵
- شکل ۱-۲-۱-۱ تعریف شماتیک پرش هیدرولیکی شعاعی یا دایره‌ای (نتلتون و مک کورکودال ۱۹۸۹) ..... ۱۶
- شکل ۱-۲-۲-۱ ایجاد و تشدید پدیده جریان دوپایا با افزایش زاویه واگرایی دیواره ها در  $Fr_1$  ثابت (برمن و جگر، ۱۹۹۰) ..... ۲۳
- شکل ۱-۲-۳-۱ نسبت های طول پرش به ارتفاع پرش برای آستانه های انتهایی مستطیلی (نقل از بلازیدل، ۱۹۴۷) ..... ۲۵
- شکل ۱-۲-۴-۱ مقایسه نسبت های  $L_B / y_2$  برای حوضچه SAF و حوضچه مستطیلی به همراه آستانه انتهایی (نقل از بلازیدل، ۱۹۴۷) ..... ۲۵
- شکل ۱-۲-۵-۱ نتایج آزمایشگاهی تبدیل از ناحیه ۱ به ناحیه ۲ (نارایانان و شیزاس، ۱۹۸۰) ..... ۲۸
- شکل ۱-۲-۶-۱ شرایط جریان ناحیه ۲ (نارایانان و شیزاس، ۱۹۸۰) ..... ۲۹
- شکل ۱-۲-۷-۱ شرایط مختلف جریان عبوری از روی آستانه (نقل از اوتسو و همکاران، ۱۹۹۱) ..... ۳۰
- شکل ۱-۲-۸-۱ طبقه بندی شرایط جریان عبوری از روی آستانه لبه نازک برای یک عدد فرود ثابت (اوتسو و همکاران، ۱۹۹۱) ..... ۳۲
- شکل ۱-۲-۹-۱ پرش هیدرولیکی کنترل شده بوسیله آستانه لبه نازک (جگر و لی، ۱۹۹۲) ..... ۳۳
- شکل ۱-۲-۱۰-۱ جریان کنترل شده توسط آستانه  $S=1.4, Fr_1=5.23$  (جگر و لی، ۱۹۹۲) ..... ۳۵
- شکل ۱-۲-۱۱-۱ کاهش عمق ثانویه به واسطه وجود آستانه (جگر و لی، ۱۹۹۲) ..... ۳۵
- شکل ۱-۲-۱۲-۱ ضرائب  $\Delta Y_S$  و  $C$  به صورت تابعی از  $S$  (جگر و لی، ۱۹۹۲) ..... ۳۶
- شکل ۱-۲-۱۳-۱ طول حوضچه به صورت تابعی از موقعیت نسبی و ارتفاع نسبی آستانه (جگر و لی، ۱۹۹۲) ..... ۳۷
- شکل ۱-۲-۱۴-۱ طرح شماتیک حالت عمومی پرش (بیرامی و چمنی، ۲۰۱۰) ..... ۴۵
- شکل ۱-۲-۱۵-۱ طرح شماتیک پرش هیدرولیکی در کانال واگرا با شیب معکوس (اسماعیلی و همکاران، ۲۰۱۴) ..... ۴۷
- شکل ۱-۲-۱۶-۱ طرح شماتیک بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی (رنگا راجو و همکاران ۱۹۸۰) ..... ۵۴
- شکل ۱-۲-۱۷-۱ مدلسازی پرش هیدرولیکی ..... ۵۹
- شکل ۱-۲-۱۸-۱ مدل شبیه‌سازی شده از بستر موج و اجزای آن (کاهه و دهقانی ۱۳۹۱) ..... ۶۲
- شکل ۱-۲-۱۹-۱ طبقه بندی ارتفاعی از شبکه مورد مطالعه (کاهه و دهقانی ۱۳۹۲) ..... ۶۳
- شکل ۱-۲-۲۰-۱ شرایط مرزی مورد استفاده در مدلسازی (کاهه و دهقانی ۱۳۹۲) ..... ۶۴
- شکل ۱-۳-۱-۱ نمایی شماتیک از کانال آزمایشگاهی و مدل حوضچه آرامش ..... ۶۹
- شکل ۱-۳-۲-۱ نمای کلی از مدل آزمایشگاهی ..... ۷۰
- شکل ۱-۳-۳-۱ ایستگاه پمپاژ ..... ۷۰

- شکل ۳-۴: مخزن آرام کننده جریان ..... ۷۲
- شکل ۳-۵: آرایش بلوک‌های میانی در حوضچه آرامش واگرا و قرارگیری آنها در فواصل  $0.25 L_j$ ,  $0.5 L_j$ ,  $0.75 L_j$  .....  
الف) آرایش همگرا ب) آرایش واگرا ..... ۷۴
- شکل ۳-۶: بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی بکار رفته در آزمایش ..... ۷۵
- شکل ۳-۷: نمای کف کاذب قابل تنظیم برای شیب‌های مختلف ..... ۷۵
- شکل ۳-۸: نمای کلی کف معکوس و دیواره واگرا ..... ۷۶
- شکل ۳-۹: دستگاه دبی سنج آلتراسونیک ..... ۷۷
- شکل ۳-۱۰: منحنی واسنجی سرریز پایین دست ..... ۷۸
- شکل ۳-۱۱: عمق سنج دیجیتالی ..... ۷۸
- شکل ۳-۱۲: متر نصب شده برای اندازه‌گیری طول پرش ..... ۷۹
- شکل ۳-۱۳: دریچه پروانه‌ای انتهایی فلوم ..... ۷۹
- شکل ۳-۱۵: هندسه ترسیم شده در نرم افزار ..... ۸۳
- شکل ۳-۱۶: نحوه مش بندی مدل عددی ..... ۸۵
- شکل ۳-۱۷: نمایش شرایط مرزی مدل ..... ۸۷
- شکل ۳-۱۸: نمایش پارامترهای پرش هیدرولیکی در کانال واگرا با شیب معکوس و بکارگیری بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی ..... ۹۰
- شکل ۳-۱۹: طرح شماتیک پرش هیدرولیکی در کانال واگرا با شیب معکوس و بکارگیری بلوک‌های میانی و آستانه انتهایی ..... ۹۱
- شکل ۴-۱: مقایسه پروفیل‌های سطح آب در کانال مستطیلی الف) پرش کلاسیک (آزاد)، ب) پرش در حوضچه استاندارد USBR III، ج) پرش در چیدمان واگرای بلوک زاویه ۳۰ درجه و د) پرش در چیدمان واگرای بلوک زاویه ۷۰ درجه ..... ۹۹
- شکل ۴-۲: مقایسه پروفیل‌های سطح آب در کانال واگرای معکوس الف) پرش (آزاد)، ب) پرش در حوضچه با بلوک استاندارد USBR III، ج) پرش در چیدمان همگرای بلوک زاویه ۳۰ درجه و د) پرش در چیدمان همگرای بلوک زاویه ۷۰ درجه ..... ۱۰۱
- شکل ۴-۳: پیشانی پرش واگرای معکوس ..... ۱۰۲
- شکل ۴-۴: جریان دوپایا در پرش واگرای معکوس ..... ۱۰۳
- شکل ۴-۵: تغییرات طول نسبی پرش در مقابل عدد فرود در زاویه واگرایی ۹ درجه و شیب معکوس ۰/۷۵ الف) چیدمان واگرا ب) چیدمان همگرا ..... ۱۰۷
- شکل ۴-۶: تغییرات نسبت عمق ثانویه پرش در مقابل عدد فرود در زاویه واگرایی ۹ درجه و شیب معکوس ۰/۷۵ الف) چیدمان واگرا ب) چیدمان همگرا ..... ۱۰۸
- شکل ۴-۷: تغییرات طول نسبی پرش در مقابل عدد فرود در مقطع مستطیلی الف) چیدمان بلوک واگرا ب) چیدمان بلوک همگرا ..... ۱۱۰

شکل ۴-۸- تغییرات نسبت عمق ثانویه در مقابل عدد فرود در مقطع مستطیلی الف) چیدمان بلوک واگرا ب) چیدمان بلوک همگرا ۱۱۱

- شکل ۴-۹- تاثیر شیب کف معکوس بر طول پرش نسبی در زاویه واگرایی ۹ درجه و زاویه استقرار بلوک ۳۰ درجه..... ۱۱۲
- شکل ۴-۱۰- تاثیر زاویه واگرایی بر طول پرش نسبی در شیب کف ۷/۵ درصد و زاویه استقرار بلوک ۳۰ درجه..... ۱۱۳
- شکل ۴-۱۱- تاثیر زاویه استقرار بلوکها بر طول پرش نسبی در زاویه واگرایی ۹ درجه و شیب کف ۷/۵ درصد..... ۱۱۴
- شکل ۴-۱۲- تاثیر شیب کف معکوس بر عمق ثانویه نسبی در زاویه واگرایی ۹ درجه و زاویه استقرار بلوک ۳۰ درجه..... ۱۱۵
- شکل ۴-۱۳- تاثیر زاویه واگرایی بر عمق ثانویه نسبی در شیب کف ۷/۵ درصد و زاویه استقرار بلوک ۳۰ درجه..... ۱۱۶
- شکل ۴-۱۴- تاثیر زاویه استقرار بلوکها بر عمق ثانویه نسبی در زاویه واگرایی ۹ درجه و شیب کف ۷/۵ درصد..... ۱۱۷
- شکل ۴-۱۵- ارزیابی عملکرد مدل برآورد نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش در مقاطع مستطیلی..... ۱۲۰
- شکل ۴-۱۶- مقایسه نتایج مدل رگرسیونی نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش در مقطع مستطیلی در زاویه بلوک ۳۰ درجه با نتایج آزمایشگاهی..... ۱۲۱
- شکل ۴-۱۷- ارزیابی عملکرد مدل برآورد نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش واگرای معکوس..... ۱۲۲
- شکل ۴-۱۸- مقایسه نتایج مدل رگرسیونی نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش واگرای معکوس در زاویه واگرایی ۹ درجه، شیب معکوس ۷/۵ درصد و زاویه بلوک ۳۰ درجه با نتایج آزمایشگاهی..... ۱۲۳
- شکل ۴-۱۹- مقایسه منحنی تئوری و آزمایشگاهی نیمرخ پرش در مقاطع واگرای معکوس..... ۱۲۵
- شکل ۴-۲۰- مقایسه منحنی تئوری و آزمایشگاهی نیمرخ پرش در مقاطع مستطیلی با بلوک واگرا در زوایای مختلف..... ۱۲۵
- شکل ۴-۲۱- مقایسه نتایج نیمه تحلیلی و آزمایشگاهی پرش واگرای معکوس در مقطع با زاویه واگرایی ۹ درجه، شیب کف معکوس ۵ درصد و زاویه استقرار بلوک ۳۰ درجه..... ۱۲۸
- شکل ۴-۲۲- مقایسه نتایج نیمه تحلیلی و آزمایشگاهی پرش واگرای معکوس در مقطع با زاویه واگرایی ۹ درجه، شیب کف معکوس ۷/۵ درصد و زاویه استقرار بلوک صفر درجه..... ۱۲۸
- شکل ۴-۲۳- ارزیابی عملکرد مدل نیمه تحلیلی برآورد نسبت عمق ثانویه پرش واگرای معکوس در مقطع با زاویه واگرایی ۹ درجه، شیب کف معکوس ۷/۵ درصد و زاویه استقرار بلوک صفر درجه..... ۱۲۹
- شکل ۴-۲۴- توزیع سرعت متوسط در مدل عددی..... ۱۳۰
- شکل ۴-۲۵- میزان عمق جریان در مدل عددی..... ۱۳۱
- شکل ۴-۲۶- توزیع عدد فرود در مدل عددی..... ۱۳۲
- شکل ۴-۲۷- مقایسه منحنی‌های تئوری و آزمایشگاهی نیمرخ پرش در مقاطع مستطیلی..... ۱۳۳
- شکل ۴-۲۸- مقایسه طول نسبی پرش مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی پرش در مقطع واگرا..... ۱۳۵
- شکل ۴-۲۹- مقایسه نسبت عمق ثانویه پرش مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی پرش در مقطع واگرا..... ۱۳۵
- شکل ۴-۳۰- ارزیابی عملکرد مدل عددی نسبت عمق ثانویه پرش واگرای معکوس در مقطع با زاویه واگرایی ۹ درجه، شیب کف معکوس ۷/۵ درصد و زاویه استقرار بلوک صفر درجه..... ۱۳۶
- شکل ۴-۳۱- مقایسه نتایج عددی، نیمه تحلیلی و آزمایشگاهی پرش واگرای معکوس در مقطع با زاویه واگرایی ۹ درجه، شیب کف معکوس ۷/۵ درصد و زاویه استقرار بلوک ۳۰ درجه..... ۱۳۷

شکل ۴-۳۲- مقایسه نتایج عددی، نیمه تحلیلی و آزمایشگاهی پرش واگرایی معکوس در مقطع با زاویه واگرایی ۵  
درجه، شیب کف معکوس ۵ درصد و زاویه استقرار بلوک ۳۰ درجه..... ۱۳۸

شکل ۴-۳۳- مقایسه نتایج عددی، نیمه تحلیلی و آزمایشگاهی پرش واگرایی معکوس در مقطع با زاویه واگرایی ۵  
درجه، شیب کف معکوس ۵ درصد و زاویه استقرار بلوک ۳۰ درجه..... ۱۳۸

## فهرست جداول

جدول ۱-۲ - مقادیر ثابت های $b, a$ در معادله (۶۶-۲).....	۴۲
جدول ۳-۲ - معرفی نرم افزار Flow3D.....	۵۷
جدول ۲-۴ - خواص فیزیکی آب در دمای ۲۰ درجه سلسیوس.....	۸۶
جدول ۱-۵ - محدوده پارامترهای اندازه گیری شده در آزمایش ها.....	۱۰۴
جدول ۲-۵ - قرائتهای انجام گرفته مربوط به پرش هیدرولیکی مستقیم (پرش کلاسیک).....	۱۰۴
جدول ۳-۵ - محاسبات صورت گرفته مربوط به پرش هیدرولیکی مستقیم (پرش کلاسیک).....	۱۰۵
جدول ۴-۵ - قرائتهای انجام گرفته مربوط به پرش هیدرولیکی واگرایی معکوس - بلوک همگرا با زاویه ۲۰ درجه - زاویه واگرایی ۳ درجه - شیب کف معکوس ۲/۵ درصد.....	۱۰۵
جدول ۵-۵ - محاسبات صورت گرفته مربوط به پرش هیدرولیکی واگرایی معکوس - بلوک همگرا با زاویه ۲۰ درجه - زاویه واگرایی ۳ درجه - شیب کف معکوس ۲/۵ درصد.....	۱۰۵



# فصل ۱

## مقدمه و کلیات

## ۱-۱ مقدمه

حوضچه آرامش قسمت کوتاهی از یک کانال کف‌سازی شده است که به صورت سازه‌ای خاص در انتهای سرریزها یا هر منبع دیگری که جریان فوق بحرانی ایجاد کند، ساخته شده و هدف از ساختن آن تشکیل پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه است. با استفاده از این سازه، جریان فوق بحرانی قبل از رسیدن به رودخانه به جریان زیربحرانی تبدیل شده و از آبشستگی پایین دست و خرابیهای احتمالی جلوگیری می‌شود. آب زمانی که از روی سرریز عبور می‌کند یا از مجراهای تحتانی تخلیه می‌شود دارای سرعت فوق‌العاده زیاد می‌شود. در چنین مواقعی جریان فوق بحرانی بوده و انرژی جنبشی زیاد و مخربی دارد. برای اینکه این انرژی جنبشی مخرب از آب گرفته شود، سازه‌های مستهلک‌کننده‌ی انرژی نظیر حوضچه‌های آرامش به کار گرفته می‌شوند. استهلاک انرژی و تلاطم جریان در حوضچه‌های آرامش با نوسانات شدید فشار همراه است. این نوسانات شدید به سه صورت، حوضچه آرامش را تحت تاثیر قرار می‌دهند. یکی از این اثرات، ایجاد نیروی برخاست قابل توجهی در زیر سازه سد است که باعث برخاستن و کنده شدن دال‌های کف حوضچه می‌شود. اثر دیگر نوسانات، ایجاد خستگی در مصالح و اعمال فشارهای دینامیکی زیاد ناشی از بارگذاری و باربرداری متناوب است که سبب کاهش مقاومت سازه و در نتیجه تخریب آن می‌شود. وقوع پدیده حفره‌زایی نیز یکی دیگر از اثرات نوسانات فشار است که باعث جدایش جریان از سازه و تخریب موضعی آن می‌شود (پترکا ۱۹۸۳).

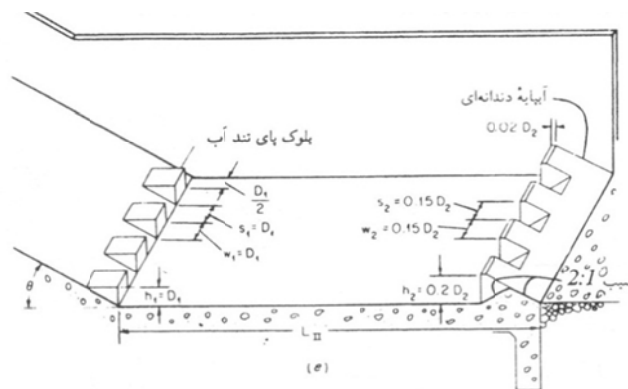
ابعاد حوضچه‌های آرامش مستقیماً به مشخصات پرش هیدرولیکی بستگی دارد. از اینرو تلاش پژوهشگران بر این بوده است تا با ایجاد تمهیداتی در محل وقوع پرش هیدرولیکی، بتوانند مشخصات پرش را بهبود بخشند تا صرفه‌جویی اقتصادی زیادی به همراه داشته باشد. افت انرژی بیشتر، طول پرش و نسبت عمق ثانویه به عمق اولیه کمتر، از پارامترهای تعیین کننده در طراحی حوضچه آرامش می‌باشند. حوضچه‌های آرامش انواع مختلفی دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به حوضچه‌های آرامش استاندارد یا تیپ اشاره کرد:

## الف - حوضچه استاندارد USBR تیب یک

این حوضچه‌ها برای عدد فرود بین ۱ تا ۲/۵ که پرش هیدرولیکی در آن بسیار ضعیف است طراحی می‌شود. در این حوضچه برای استهلاک انرژی از مانع استفاده نمی‌شود پس هیچگونه کنترلی روی جریان‌ها نداریم و امکان جابه‌جایی پرش وجود دارد، لذا به ندرت ساخته می‌شود. طول حوضچه برابر با چهاربرابر عمق ثانویه پرش هیدرولیکی به صورت سنگ چین یا بتنی ساخته می‌شود.

## ب - حوضچه استاندارد USBR تیب دو

اگر جریان آب دارای عدد فرود ۴/۵ الی ۹ باشد از حوضچه نوع دوم استفاده می‌شود. به شرط آن که سرعت قبل از پرش بیش از ۱۸ متر بر ثانیه باشد. در این حوضچه جهت کنترل پرش هیدرولیکی در پایین دست از آستانه دنداندار استفاده می‌شود. عمق آب در این حوضچه ۵ درصد بیشتر از عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در نظر گرفته می‌شود این حوضچه برای سدها تا ارتفاع ۶۰ متری و دبی ویژه ۴۶ متر بر ثانیه مناسب است. نمای شماتیک این حوضچه در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.

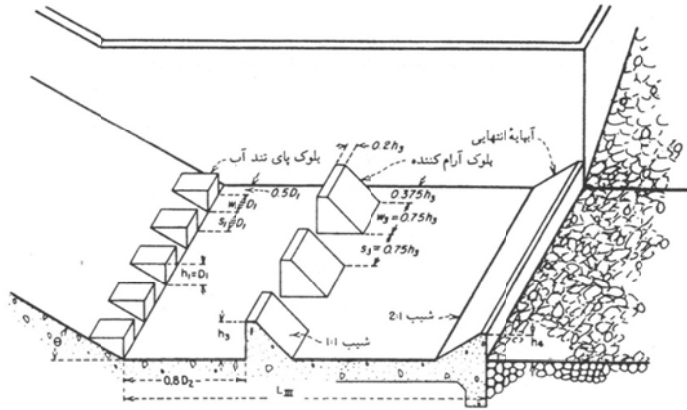


شکل ۱-۱ نمای شماتیک حوضچه آرامش USBR II (USB 1964)

## ج - حوضچه استاندارد USBR تیب سه

این حوضچه زمانی که سرعت جریان آب کمتر از ۱۸ متر بر ثانیه و عدد فرود بین ۴/۵ الی ۹ باشد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این حوضچه‌ها عمق آب با عمق ثانویه پرش برابر است و از آنها برای

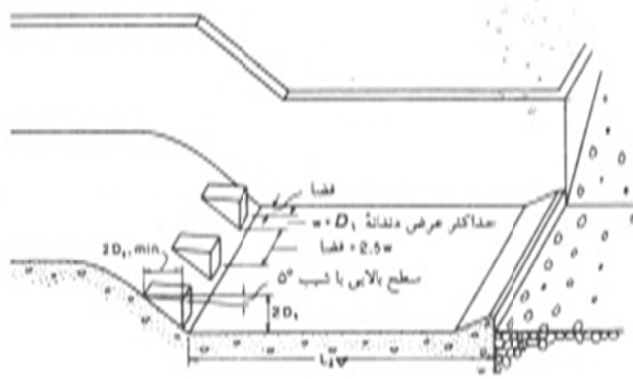
سریزهای کوتاه در کانالها و در بندهای انحرافی استفاده می‌شود. نمای شماتیک این حوضچه در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱ نمای شماتیک حوضچه آرامش USBR III (USBR 1964)

#### د- حوضچه استاندارد USBR تپ چهار

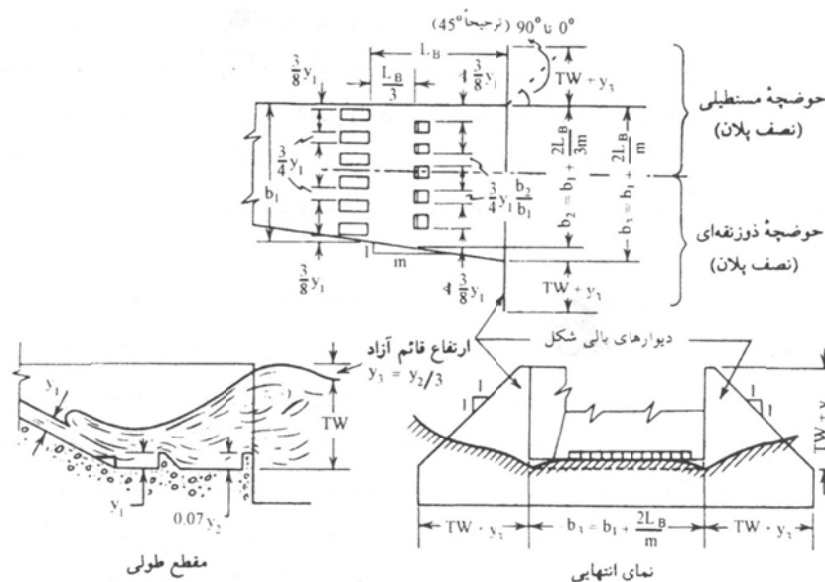
اگر عدد فرود در جریان بالا دست بین  $\frac{2}{5}$  تا  $\frac{4}{5}$  باشد از این حوضچه که فقط در مقاطع مستطیلی قابل اجرا است استفاده می‌شود. عمق پایاب در این حوضچه حدود ۵ تا ۱۰ درصد بیشتر از عمق ثانویه پرش انتخاب می‌شود. طول پرش نیز در این حالت برابر با طول پرش در کف‌های افقی و بدون مانع در نظر گرفته می‌شود در نتیجه طول حوضچه برابر با طول پرش خواهد بود. در حوضچه USBR نوع چهار تعداد بلوک‌های پای تند اب نباید از ۳ عدد کمتر باشد. همچنین می‌توان برای کنترل بهتر روی پرش آنها را نازک‌تر ولی با تعدادی بیشتر انتخاب کرد. این حوضچه‌ها برای سرریزهای کوچک در کانال‌هایی با دبی در واحد عرض کم و عدد فرود کم مناسب نیست و باید از حوضچه‌های جایگزین استفاده کرد. نمای شماتیک این حوضچه در شکل ۳-۱ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱ نمای شماتیک حوضچه آرامش USBRIV (USBR 1964)

### ه- حوضچه آرامش SAF

این حوضچه برای سازه‌های کوتاه شبکه آبیاری و برای عدد فرود در دامنه ۱/۷ الی ۱۷ که کانال آن درای مقطع مستطیلی است استفاده می‌شود. دیواره آن ممکن است در دونوع واگرا یا موازی اجرا شوند. حوضچه SAF شباهت زیادی به حوضچه USBR نوع سوم دارد با این تفاوت که ارزان تر است و از نظر سازه‌ای از حوضچه مشابه ضعیف تر بوده و ضریب اطمینان پایین تری را داراست. شماتیک این حوضچه در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱ نمای شماتیک حوضچه آرامش SAF (USBR 1964)

هنگامی که یک سازه کنترل هیدرولیکی در رودخانه قرار می‌گیرد، معمولاً باید جریان فشرده شده در کوتاهترین مسافت ممکن به جریان عریض رودخانه وارد گردد. یک روش موثر و اقتصادی انبساط جریان، به کارگیری حوضچه آرامش واگرا می‌باشد. تفاوت حوضچه آرامش واگرا با حوضچه مستطیلی در واگرایی دیواره‌هاست. مشکل اصلی حوضچه آرامش واگرا تمایل به تشکیل جریان دوپایا<sup>1</sup> می‌باشد. در این حالت جریان از یک دیواره جدا شده و به دیواره دیگر برخورد می‌کند، بنابراین باعث پرش نامتقارن با ناحیه مرده یا گردابه‌های جانبی در بخش جداشدگی و جت پخش شده در بخش دیگر می‌شود. این جت دوپایا به سمت پایین دست کانال گسترش می‌یابد و ممکن است باعث فرسایش شدیدی در کناره‌ها گردد.

مطالعات انجام شده در خصوص پرش هیدرولیکی روی شیب معکوس نشان داده علی‌رغم مزایایی که در کاهش طول پرش، کاهش نسبت عمق ثانویه و افزایش افت انرژی نسبی دارد، کنترل پرش سخت و تقریباً غیرممکن است. به نظر می‌رسد استفاده از بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی در چیدمان مناسب می‌تواند عملکرد پرش واگرای معکوس را بهبود بخشد (پارسامهر و همکاران ۱۳۹۲).

همانگونه که ذکر شد، شیب‌دار نمودن کف و دیواره‌های حوضچه و بکارگیری آستانه انتهایی از جمله تکنیک‌هایی است که در این راستا مورد استفاده قرار گرفته است. به کارگیری بلوک‌های اتلاف کننده انرژی نیز در طراحی اقتصادی حوضچه‌ها دارای اهمیت است، همانگونه که حوضچه آرامش SAF و حوضچه آرامش‌های استاندارد USBR نیز از این بلوک‌ها استفاده نموده‌اند.

تا کنون تکنیک‌های متعددی جهت افزایش افت انرژی، کاهش طول و عمق ثانویه در پرش هیدرولیکی به کار رفته است. ترکیبی از این تکنیک‌ها در سال‌های اخیر در جهت بهینه نمودن طرح حوضچه آرامش بسیار مورد توجه محققین بوده است. با توجه به نتایج قابل قبول استفاده از موانع، واگرایی جریان، شیب معکوس در افزایش اتلاف انرژی، کاهش طول پرش و عمق ثانویه، در مطالعه حاضر، پرش هیدرولیکی واگرای معکوس با به کارگیری بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی به صورت

---

<sup>1</sup> bistable

آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است و اثر میزان واگرایی دیواره‌های کانال، شیب کف معکوس و چیدمان متفاوت بلوک‌های میانی بر مشخصه‌های پرش هیدرولیکی بررسی گردید.

## ۱-۲- اهداف تحقیق حاضر

اهداف پژوهش حاضر را می‌توان در قالب سؤالات زیر ارائه نمود:

۱- آیا می‌توان با بکارگیری ترکیبی از انواع روشهای موثر در بهبود مشخصه‌های پرش (شیب کف معکوس، واگرایی، بکارگیری بلوکهای اتلاف کننده انرژی و آبپایه انتهایی)، پارامترهای موثر از جمله نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش را بهبود بخشید؟

با بررسی تحقیقات گذشته مشخص شد که با وجود مطالعات فراوانی که در سالهای اخیر روی ترکیب روشهای مختلف در جهت کاهش طول پرش و افزایش افت انرژی به منظور طراحی بهینه حوضچه آرامش انجام شده است، اما بررسی حوضچه آرامش شیبدار با مقطع واگرا همراه با به کارگیری بلوکهای اتلاف کننده انرژی در چیدمانهای مختلف در جهت انتخاب چیدمان بهینه کاملاً جدید است.

۲- آیا استفاده از بلوکهای میانی و آبپایه انتهایی می‌تواند عملکرد پرش واگرای معکوس را بهبود بخشد؟

اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۴) پرش هیدرولیکی معکوس در حوضچه آرامش واگرای تدریجی با سطح مقطع مستطیلی را به صورت آزمایشگاهی و تئوریک مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که افزایش شیب بستر و افزایش زاویه واگرایی دیواره حوضچه باعث کاهش عمق ثانویه و طول نسبی پرش و افزایش افت انرژی نسبی در مقایسه با پرش هیدرولیکی کلاسیک می‌گردد. مطالعات انجام شده توسط ایشان در خصوص پرش هیدرولیکی روی شیب معکوس نشان داده علی‌رغم مزایایی که در کاهش طول پرش، کاهش نسبت عمق ثانویه و افزایش افت انرژی نسبی

دارد، کنترل پرش سخت و تقریباً غیرممکن است. به نظر می‌رسد استفاده از بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی در چیدمان مناسب می‌تواند عملکرد پرش واگرای معکوس را بهبود بخشد.

۳- آیا استفاده از بلوک‌های میانی در زوایای استقرار مختلف می‌تواند عملکرد پرش مستقیم یا واگرای معکوس را بهبود بخشد؟

در پژوهش‌های گذشته محققین بسیاری از بلوک‌های میانی در جهت بهبود مشخصه‌های پرش استفاده نموده‌اند. اما تا کنون تغییر زاویه و نوع چیدمان بلوک‌ها (وضعیت واگرا یا همگرا) مورد توجه قرار نگرفته است. در این پژوهش سعی بر آن است تاثیر تغییر زاویه و چیدمان بلوک‌های میانی بر طول پرش، نسبت عمق ثانویه و افت انرژی نسبی مورد بررسی قرار گیرد.

۴- مدل آشفتگی مناسب در مدلسازی سه بعدی پرش واگرای معکوس با به کارگیری بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی توسط نرم افزار Flow3D کدام است؟

در مطالعاتی که توسط برخی از محققین همچون کاستیلو و همکاران (۲۰۱۴) با انتخاب مدل‌های آشفتگی دو معادله ای  $k-\varepsilon$  و  $k-\omega$  در پرش هیدرولیکی آزاد و مستغرق در یک کانال مستطیلی انجام گرفته است، مدل  $k-\varepsilon$  پیش‌بینی دقیقی از ناحیه recirculation در نیمه دوم پرش نداشته و مدل  $k-\omega$  تطابق بهتری از نتایج در این ناحیه به دست می‌دهد. کاهه و همکاران (۲۰۱۰) نیز مدل‌های آشفتگی  $k-\varepsilon$  و  $k-\omega$  را جهت تخمین پروفیل‌های سرعت در پرش هیدرولیکی بر روی سطوح موج‌دار مورد بررسی و مقایسه قرار دادند و نشان دادند با توجه به نتایج بدست آمده، مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  در مقایسه با مدل  $k-\varepsilon$  در مدل‌سازی پرش هیدرولیکی بر روی سطوح موج‌دار از دقت بالایی برخوردار است. در پژوهش حاضر به دلیل هندسه خاص مدل لازم است مدلسازی عددی اولیه با در نظر گرفتن ۳ معادله مختلف آشفتگی  $k-\varepsilon$ ،  $k-\omega$  و LES انجام شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردد تا بهترین و مشابه‌ترین نتایج نسبت به کار آزمایشگاهی مبنای مدل‌سازی‌های بعدی در این زمینه قرار گیرد.



۵- آیا امکان ارائه رابطه‌ی تحلیلی برای پرش هیدرولیکی واگرای معکوس با به کارگیری بلوک-

های میانی و آبپایه انتهایی وجود داد؟

در این پژوهش تلاش گردیده با معلوم بودن نیروهای وارد بر حجم کنترل انتخابی در پرش، و قرارداد آنها در معادله‌ی مومنتوم و ساده‌سازی، رابطه‌ای تحلیلی جهت برآورد پارامترهای پرش ارائه گردد.

### ۱-۳- نوآوری و ضرورت انجام تحقیق حاضر

با بررسی تحقیقات گذشته مشخص شد که با وجود مطالعات فراوان در زمینه تکنیک‌های به کار رفته در بهینه سازی عملکرد حوضچه‌های آرامش، ترکیب توام واگرایی، شیب معکوس و استفاده از بلوک‌های میانی تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. یکی از مطالعاتی که در این زمینه لازم است انجام شود آن است که زاویه و محل قرارگیری بلوک‌ها تغییر داده شود و تاثیر آن بر مشخصه‌های پرش هیدرولیکی بررسی گردد. نوآوری این تحقیق را می‌توان در تغییر نحوه چیدمان و زاویه استقرار بلوک‌های میانی بیان نمود. مدلسازی عددی سه بعدی هندسه‌ی خاص پژوهش حاضر نیز با هدف انتخاب بهترین مدل آشفستگی انجام شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده تا بهترین و مشابه‌ترین نتایج نسبت به کار آزمایشگاهی مبنای مدل‌سازی در این زمینه قرار گیرد. همچنین رابطه‌ای نیمه‌تحلیلی جهت برآورد پارامترهای مهم پرش ارائه گردیده تا نتایج آزمایشگاهی با این رابطه مقایسه گردد.

### ۱-۴ روش انجام تحقیق

از آنجایی که اساس این پژوهش مطالعه آزمایشگاهی است، به منظور بررسی شرایط و خصوصیات پرش هیدرولیکی واگرا در حوضچه با شیب کف معکوس و به کارگیری بلوک‌های اتلاف کننده انرژی، یک مدل آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد و روند تغییر پارامترهای مهم پرش با تغییر شرایط مدل

بررسی گردید. پارامترهای مهم پرش که شامل نسبت عمق ثانویه، افت نسبی انرژی و طول نسبی پرش می‌باشد با تغییر در مشخصات مقطع (زاویه واگرایی و شیب کف معکوس) ، جهت و محل قرارگیری بلوک‌ها اندازه‌گیری گردید. قبل از انجام هر آزمایش ابتدا کف کاذب برای رسیدن به شیب کف معکوس مورد نظر قرار داده می‌شد. سپس دیواره‌های حوضچه آرامش برای زاویه واگرایی مورد نظر تنظیم می‌گردید. بعد از تنظیم دیواره‌های حوضچه برای زاویه واگرایی مورد نظر، حوضچه به طور کامل توسط چسب‌های مخصوص شیشه اتومبیل آب بندی می‌گردید. بلوک‌های میانی در دو وضعیت واگرا و همگرا نسبت به محور مرکزی کانال قرار داده شد و در هر وضعیت ۸ زاویه استقرار ۱۰،۲۰،۳۰،۴۰،۵۰،۶۰،۷۰،۸۰ درجه برای بلوک‌ها در نظر گرفته شد. در هر آزمایش ابتدا بلوک‌های میانی در وضعیت واگرا یا همگرا، در زاویه و فاصله‌ی مشخص از دریچه‌ی بالادست نصب گردید. سپس آبپایه انتهایی با محاسبه‌ی تئوری طول پرش از گرافهای USBR در محل انتهایی پرش حوضچه USBRIII نصب گردید. بعد از آماده شدن تنظیمات حوضچه و اطمینان از آب بندی آن، با راه اندازی پمپ، جریان وارد مدل می‌گردید. سپس با قرائت فلومتر، دبی جریان برای تامین عدد فرود مورد نظر تنظیم می‌گردید. پس از برقراری دبی مورد نظر و اطمینان از تثبیت جریان در فلوم، از طریق باز و بسته کردن دریچه پروانه‌ای انتهایی فلوم، پیشانی پرش طوری تنظیم می‌گردید که حداقل فاصله نسبت به ابتدای حوضچه که به عنوان نقطه مبنا انتخاب گردیده بود را دارا باشد. در هر آزمایش بعد از طی شدن مراحل فوق، نیمرخ طولی پرش از شروع تا انتها توسط عمق‌سنج برداشت شده و همچنین عکسبرداری از پروفیل نیز صورت گرفته، سپس فاصله پیشانی و انتهایی پرش از نقطه مبنا طول پرش و طول غلطاب قرائت می‌گردید.

مدلسازی عددی در نرم افزار Flow3D با تعریف هندسه مدل، شرایط مرزی و انتخاب مدل آشفتگی انجام شد و در نهایت نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی به دست آمده مقایسه گردید یک مدل نیمه تحلیلی نیز برای پیش بینی نسبت عمق ثانویه حوضچه تحت آزمایش ارائه گردید.

## ۱-۵- فصل بندی رساله و موضوعات مورد بررسی در تحقیق حاضر

رساله حاضر در پنج فصل نگارش و تدوین شده است. فصل اول که شامل مقدمه و هدف می‌باشد خلاصه‌ای از مطالب مندرج در هر فصل به همراه اهداف کلی رساله ارائه می‌دهد. فصل دوم این تحقیق سوابق مطالعاتی در زمینه پرش های هیدرولیکی واگرا، روی شیب معکوس، با به کارگیری بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی را شامل می‌شود. در انتها به بررسی مطالعات انجام شده در زمینه مدلسازی عددی پرش هیدرولیکی توسط نرم افزار Flow 3D پرداخته می‌شود. در فصل سوم مبانی تئوری پرش هیدرولیکی مستقیم ارائه شده و در انتها ضمن تبیین مبانی تئوری پرش هیدرولیکی واگرای معکوس با بلوکهای میانی و آبپایه انتهایی رابطه‌ای تحلیلی برای این وضعیت استخراج شده است. فصل چهارم معرفی تجهیزات و دستگاههای مورد استفاده و نحوه انجام آزمایش‌ها و مدلسازی عددی را دربر می‌گیرد و روند تغییرات پارامترهای مهم پرش که شامل نسبت عمق ثانویه، افت نسبی انرژی و طول نسبی پرش می‌باشد را با تغییر در مشخصات مقطع، جهت و محل قرارگیری بلوک‌ها بررسی می‌کند. همچنین مبانی تئوری پرش هیدرولیکی واگرای معکوس با بلوکهای میانی و آبپایه انتهایی برای استخراج رابطه‌ای تحلیلی ارائه گردیده است. نتایج و مشاهدات آزمایشگاهی در فصل چهارم ارائه شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و فصل پنجم نیز نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات برای تحقیقات آینده را دربرمی‌گیرد. منابع مورد استفاده در تحقیق به همراه مقالات مستخرج از این پژوهش به همراه سایر مطالب مورد نیاز به صورت پیوست ارائه گردیده است.



## فصل ۲

### مروری بر تحقیقات

### گذشته

## ۲-۱- مقدمه

بیشتر مطالعات انجام گرفته در مورد پرش هیدرولیکی معطوف به پرش در مقاطع مستطیلی بوده و در مورد پرش هیدرولیکی در مقاطع غیر مستطیلی و یا در مقاطع واگرا اطلاعات زیادی در دسترس نمی‌باشد. با توجه به اهمیت عملی مقاطع واگرا و موضوع مورد بررسی در این تحقیق، در این بخش مروری بر مطالعات صورت گرفته در چهار قسمت پرش‌های هیدرولیکی واگرا، کنترل پرش هیدرولیکی توسط آبپایه، اثر شیب کف حوضچه و اثر زبری بر پرش مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتها به بررسی مطالعات انجام شده در زمینه مدلسازی عددی پرش هیدرولیکی توسط نرم افزار Flow 3D پرداخته می‌شود.

## ۲-۲- پرش‌های هیدرولیکی واگرا (شیب دیواره در پلان)

در یک سازه کنترل آبیاری، اغلب از لحاظ هزینه، به صرفه است تا عرض دریاچه‌ها را به حداقل رسانده و از عرض کامل کانال جهت حوضچه آرامش استفاده کرد. ساده‌ترین حوضچه آرامش، شامل کانالی مستطیلی، مستقیم و تقریباً افقی می‌شود که در آن فرمول بلانگر<sup>۲</sup> می‌تواند به منظور محاسبه نسبت عمق‌های مزدوج به کار رود. ولی این نوع حوضچه آرامش دارای مشکلاتی نظیر نیاز به تراز پائین دست نسبتاً زیاد جهت تضمین تبدیل مناسب جریان فوق بحرانی به زیر بحرانی و پایدار می‌باشد. موارد ذکر شده در بالا منجر به ایجاد اتلاف انرژی کارآمدتری می‌شود و می‌توان مقطع کانال را به صورت تدریجی افزایش داد. پرش‌های هیدرولیکی در واگرایی‌های تدریجی<sup>۳</sup> تحت عنوان پرش‌های هیدرولیکی دایره‌ای<sup>۴</sup> یا شعاعی<sup>۵</sup> نیز نامیده می‌شوند.

---

<sup>۲</sup> - Belanger

<sup>۳</sup> - Gradual Enlargement

<sup>۴</sup> - Circular Hydraulic jump

<sup>۵</sup> - Radial Hydraulic jump

اولین آزمایش ها در مورد پرش های هیدرولیکی در کانال واگرا، توسط ریگل<sup>۶</sup> (۱۹۱۷) در بخش حفاظت محیط زیست میامی<sup>۷</sup> انجام گرفت. جگر<sup>۸</sup> (۱۹۹۲) اولین کسی است که تئوری اندازه حرکت را برای کانال های مستطیلی افقی و واگرای تدریجی به درستی به کار برد. لیکن نتایج وی در بردارنده فاکتورهای تصحیحی نامشخصی بودند (نقل از جگر، ۱۹۸۵).

راجاراتنام<sup>۹</sup> (۱۹۶۷) رابطه زیر را برای توصیف پرش شکل گرفته در کانال واگرا ارائه کرد.

$$1 + \frac{\gamma}{3}(Y - 1)(Y^2 - Y + 1) - [1 + \gamma(Y - 1)]Y^2 = 2Fr_1^2 \left[ \frac{1}{Y(1 + \gamma(Y - 1))} - 1 \right] \quad (1-2)$$

که در آن  $Fr_1^2 = \frac{Q^2}{(b^2 g y_1^3)}$ ،  $Y = \frac{y_2}{y_1}$ ،  $\gamma = (1/m) \tan \theta \left( \frac{2y_1}{b} \right)$  و  $m = \frac{L_j}{(y_2 - y_1)}$

است. در این معادله، پارامترهای بدون بعد،  $Fr_1$ ،  $\gamma$ ،  $Y$  و  $m$  برحسب عرض پنجه پرش  $b$ ، زاویه واگرایی دیواره کانال نسبت به محور مرکزی کانال  $\theta$ ، عمق متوسط در پنجه پرش  $y_1$ ، عمق انتهای پرش  $y_2$  و طول پرش  $L_j$  بیان شده اند (نقل از اربهابهیراما و ابلا، ۱۹۷۱).

کلوسیوس و احمد<sup>۱۰</sup> (۱۹۶۹)، با فرض سیال تراکم ناپذیر، جریان شعاعی و ماندگار، ناچیز بودن افت ناشی از تنش برشی در طول پرش، هیدرواستاتیک بودن توزیع فشار در مقاطع عمق های مزدوج، برابر واحد بودن ضرایب تصحیح انرژی و اندازه حرکت، صرف نظر کردن از شتاب عمودی و خطی فرض کردن تغییرات عمق از مقاطع اولیه تا ثانویه، روابط زیر را برای نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی در پرش هیدرولیکی دایره‌ای ارائه کردند (نقل از نتلتون، ۱۹۸۳):

$$\frac{r_0 - 1}{3}(Y^2 + Y + 1) + 1 - r_0 Y^2 = 2Fr_1^2 \left[ \frac{1 - r_0 Y}{r_0 Y} \right] \quad (2-2)$$

$$\frac{E_L}{y_1} = \frac{[r_0(2r_0 + 1)Y^3 - (r_0^2 + 9r_0 - 1)Y^2 - (r_0^2 - 9r_0 - 1)Y - (r_0 + 2)]}{12r_0 Y} \quad (3-2)$$

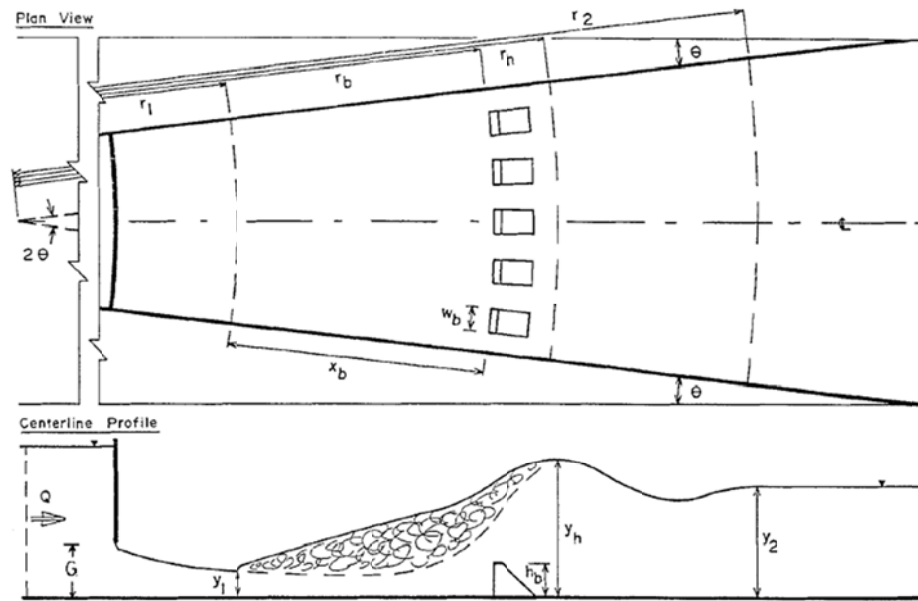
<sup>6</sup>- Riegel

<sup>7</sup>- Miami Conservancy District

<sup>8</sup>- Jaeger

<sup>9</sup>- Rajaratnam

<sup>10</sup>- Kouluseus and ahmad



شکل ۲-۱- تعریف شماتیک پرش هیدرولیکی شعاعی یا دایره‌ای (نتلتون و مک کورکودال<sup>۱۱</sup> ۱۹۸۹)

در رابطه فوق  $r_0 = r_2/r_1$  نسبت شعاع ثانویه به شعاع اولیه پرش می باشد. در این تحقیق بعد از تجزیه و تحلیل های انجام گرفته بر روی داده های آزمایشگاهی حاصل، نتایج زیر بدست آمد:

۱- با افزایش شعاع نسبی ( $r_0$ )، میزان عمق ثانویه در مقایسه با پرش مستطیلی کاهش می یابد و میزان افت نسبی انرژی افزایش می یابد.

۲- طول پرش در حالت دایره ای در مقایسه با پرش در مقطع مستطیلی کاهش یافته و تقریباً ۳/۵ تا ۴/۵ برابر عمق ثانویه می گردد.

۳- طول غلتاب پرش از رابطه تجربی زیر قابل محاسبه می باشد:

$$\frac{L_r}{y_2} = 4.5 - 0.75(r_0 - 1) \quad (4-2)$$

اربابهیراما و ابلا<sup>۱۲</sup> (۱۹۷۱)، با در نظر گرفتن اینکه خطوط جریان شعاعی است، جریان ماندگار، تراکم ناپذیر و در بالادست و پائین دست پرش یکنواخت است، نیروی اصطکاک در جداره ها ناچیز و توزیع فشارها در سرتاسر پرش هیدرواستاتیک و اثر ورود هوا صرفنظر گردیده و منحنی نیمرخ سطح آب در

<sup>11</sup> Nettelton and Mccorquodale

<sup>12</sup> - Arbbahhirama and Abella



طول پرش ربعی از بیضی بوده، برای نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی در پرش هیدرولیکی واگرا در کانال مستطیلی روابط زیر را ارائه دادند:

$$2(r_0 - 1) \left( \frac{Y^2}{3} + 0.118Y + 0.048 \right) + 1 - r_0 Y^2 = 2Fr_1^2 \left[ \frac{1-r_0Y}{r_0Y} \right] \quad (5-2)$$

$$\frac{E_L}{y_1} = \frac{Fr_1^2}{2} \left( \frac{r_0^2 Y^2}{r_0 Y} - 1 \right) + (1 - Y) \quad (6-2)$$

معادله (5-2)، معادله پرش در کانال واگراست و مشابه معادله (3-2) که بوسیله کلوسیوس و احمد (1969) برای پرش هیدرولیکی دایره‌ای با پروفیل سطحی خطی بدست آمده می‌باشد.

اربابهیراما و ابلا (1971) با در نظر گرفتن  $Fr_e^2 = Fr_1^2 r_0 + C_p$  به عنوان عدد فرود موثر و فاکتور تصیحی فشار جانبی  $C_p$  که به صورت زیر محاسبه می‌شود، معادله (5-2) را به صورت مشابه معادله عمق‌های مزدوج پرش کلاسیک ساده کردند (معادله (8-2)).

$$C_p = \frac{r_0 Y (r_0 - 1) \left[ r_0 \left( \frac{Y^2}{3} + 0.118Y + 0.048 \right) + \frac{1}{2} \right]}{r_0 Y - 1} \quad (7-2)$$

$$r_0 Y = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8Fr_e^2} - 1 \right) \quad (8-2)$$

نتایجی که از داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق حاصل شد به شرح زیر می‌باشند:

۱- مطابقت نزدیک بین منحنی‌های تئوری و تجربی مربوط به نیمرخ پرش.

۲- کاهش طول پرش در حالت واگرا در مقایسه با حالت مستقیم.

۳- ارائه رابطه زیر برای محاسبه عمق ثانویه با استفاده از روش حداقل مربعات:

$$\frac{F_s Y_s}{Y_2} = 0.829 + 1.132 \frac{r_1 \theta}{y_2} \quad (9-2)$$

که  $F_s$  و  $Y_s$  به ترتیب عمق و عدد فرود بعد از دریچه و  $\Gamma_1$  شعاع اولیه پرش است.

خليفة<sup>۱۳</sup> (۱۹۸۰) خصوصيات پرش هيدورليکي را با در نظر گرفتن پروفيل موثر سطح آب به صورت  
 يک چند جمله‌اي درجه دوم مورد بررسي قرار داده‌اند که از رابطه زير پيروي مي‌کند (نقل از نتلتون،  
 ۱۹۸۳).

$$Y_s = A_e R^2 + B_e R \quad (10-2)$$

در رابطه فوق  $Y_s$  برابر  $(y-y_1)/(y_2-y_1)$ ،  $R$ ، معادل  $(r-r_1)/r_2-r_1$  و  $A_e$  و  $B_e$  ضرايبي وابسته به  
 مقدار هوای وارد شده و عدد فرود اوليه مي‌باشند. در نهايت با در نظر گرفتن فرضياتي و برقراري اصول  
 پيوستگي، انرژي و اندازه حرکت برای مقاطع قبل و بعد از پرش، روابط زير برای نسبت عمق ثانويه و افت  
 نسبي انرژي ارائه گرديد.

$$(r_0^2 - C_s r_0) Y^3 + (2r_0 C_s - D_s r_0) Y^2 + (D_s r_0 - C_s r_0 - r_0^2 - 2r_0 F r_1^2) Y + 2F r_1^2 = 0 \quad (11-2)$$

$$R_l = 1 - \left[ \frac{F r_1^2 + 2r_0^2 Y^3}{r_0^2 Y^2 (F r_1^2 + 2)} \right] \quad (12-2)$$

که  $C_s$  و  $D_s$  از روابط زير بدست مي‌آيند:

$$C_s = \frac{1}{(r_0 - 1)^4} \left[ \begin{aligned} & \frac{r_0^5 - 1}{5} A_e^2 + \frac{r_0^4 - 1}{4} (r_0 - 1) \left( 2A_e B_e - \frac{4A_e^2}{r_0 - 1} \right) \\ & + \frac{r_0^3 - 1}{3} (6A_e^2 + B_e^2 (r_0^2 - 2r_0 + 1) + 2A_e B_e (3 - 3r_0)) \\ & + \frac{r_0^2 - 1}{3} (-4A_e^2 + 2A_e B_e (3 - 3r_0) + B_e^2 (-2r_0^2 + 4r_0 - 2)) \\ & + (r_0 - 1) (A_e^2 + 2A_e B_e (1 - r_0) + B_e^2 (r_0^2 - 2r_0 + 1)) \end{aligned} \right] \quad (13-2)$$

$$D_s = \frac{1}{(r_0 - 1)^2} \left[ \frac{2A_e (r_0^3 - 1)}{3} + \frac{r_0^2 - 1}{2} (-4A_e + 2B_e (r_0 - 1)) + (r_0 - 1) (2A_e + 2B_e (1 - r_0)) \right] \quad (14-2)$$

از روی داده‌های آزمایشگاهی و با استفاده تحلیل‌های آماری این دو محقق پی بردند که معادلات  
 پروفيل سطح آب و خط گراديان هيدورليکي به ترتيب به صورت زير هستند:

$$\bar{Y}_s = A_{el} R^2 + B_{el} R \quad (15-2)$$

<sup>13</sup> -Khalifa.

$$\frac{P/\gamma - y_1}{y_2 - y_1} = A_{e2}R^2 + B_{e2}R \quad (16-2)$$

که  $P/\gamma$  هد فشار در بستر حوضچه است. برای ضرائب دو معادله بالا روابط زیر برحسب عدد فرود اولیه ارائه شدند:

$$A_{e1} = -1.8 + 0.171Fr_1 \quad (17-2)$$

$$A_{e2} = -0.36 + 0.016Fr_1 \quad (18-2)$$

$$B_{e1} = 2.8 - 0.171Fr_1 \quad (19-2)$$

$$B_{e2} = 1.3 - 0.025Fr_1 \quad (20-2)$$

همچنین برای کسر هوای وارد شده در انتهای پرش ( $A_p$ ) رابطه تجربی زیر بدست آمد:

$$A_p = 0.034Fr_1 \quad (21-2)$$

در نهایت جهت حل معادله (۲-۱۱)، ضرائب پروفیل موثر سطح آب، به صورت زیر در نظر گرفته شدند:

$$A_e = A_{e1}A_p + A_{e2}(1 - A_p) \quad (22-2)$$

$$B_e = B_{e1}A_p + B_{e2}(1 - A_p) \quad (23-2)$$

نتایج حاصل شده از داده‌های آزمایشگاهی این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- نسبت عمق ثانویه برای  $Fr_1 > 3.0$  در مقایسه با مقطع مستطیلی مستقیم کاهش می‌یابد.
- ۲- میزان افت نسبی انرژی نسبت به حالت مستطیلی ۱۵ درصد افزایش می‌یابد.
- ۳- طول پرش در حالت شعاعی ۷۰ درصد طول پرش در حالت مستقیم می‌باشد.
- ۴- با تجزیه و تحلیل‌های آماری بر روی داده‌های آزمایشگاهی، روابط زیر برای محاسبه نسبت عمق ثانویه و طول پرش بدست آمد:

$$Y = 0.3r_0 + 0.65Fr_1 \left(1 + \frac{1}{r_0}\right) \left(R^2 = 0.98, \theta = 6.75, 1.2 \leq r_0 \leq 1.85, Fr_1 \leq 9.0\right) \quad (24-2)$$

$$\frac{L_j}{Y_2} = 4.7 - \frac{4.2}{Fr_1} \quad (R^2 = 0.17, \theta = 6.75, 1.2 \leq r_0 \leq 1.85, Fr_1 \leq 9.0) \quad (25-2)$$

لاسون و فیلیپس<sup>۱۴</sup> (۱۹۸۳)، با فرض تراکم ناپذیری سیال، جریان شعاعی و ماندگار، صرف نظر کردن از نیروی برشی اصطکاکی در طول جداره‌ها، توزیع فشار هیدرواستاتیک در مقاطع قبل و بعد از پرش، عدم ورود هوا به داخل پرش و پروفیل خطی پرش به رابطه (۲-۵) برای نسبت عمق ثانویه پرش هیدرولیکی دایره‌ای رسیدند.

نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

- ۱- مطابقت نزدیکی بین منحنی‌های تئوری و آزمایشگاهی مربوط به نیمرخ پرش وجود داشت.
- ۲- نسبت عمق ثانویه در پرش هیدرولیکی دایره‌ای در مقایسه با نسبت عمق ثانویه در مقطع مستطیلی کاهش می‌یابد.
- ۳- افت انرژی در حالت پرش هیدرولیکی دایره‌ای در مقایسه با پرش در مقطع مستطیلی افزایش می‌یابد.
- ۴- طول پرش هیدرولیکی دایره‌ای بطور قابل ملاحظه‌ای کمتر از طول پرش مستطیلی می‌باشد.
- ۵- فرض پروفیل خطی در این مدل، فرض مناسبی می‌باشد.

جگر<sup>۱۵</sup> (۱۹۸۵)، پرش‌های هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی غیرمنشوری تقریباً افقی را مورد بررسی قرار داد. لیکن شرایط جریان جدا نشده و جدا شده تمایز صورت گرفت؛ نوع اول مربوط به پرش هیدرولیکی در کانال واگرای تدریجی بود در حالیکه نوع دوم به پرش هیدرولیکی در انبساط ناگهانی عرض کانال مربوط می‌شد. در این تحقیق با فرض نیمرخ خطی برای پرش، روابط زیر برای نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی پرش هیدرولیکی نوع اول ارائه شدند:

$$Fr_1^2 = \frac{(\beta + 1)(Y^2 - 1)\beta Y}{4(\beta Y - 1)} \quad (26-2)$$

<sup>14</sup> -Lawson and Phillips.

<sup>15</sup> -Hager.

$$R_l = \left( 1 - \frac{Y + \frac{Fr_1^2}{2\beta^2 Y^2}}{1 + \frac{Fr_1^2}{2}} \right) \quad (27-2)$$

که  $\beta = b_2 / b_1$  می‌باشد. این محقق معادله (26-2) را به صورت حدی به شکل زیر ساده کرد:

$$Y = \sqrt{\frac{2}{\beta+1}} \left( \sqrt{2Fr_1} - \frac{1}{2} \right) \quad (28-2)$$

همواره مقادیر حاصل از این معادله اندکی کمتر از معادله (26-3) می‌باشد. با استفاده از معادله (2)-2-

(28) می‌توان معادله (27-2) را نیز به شکل ساده شده زیر نوشت:

$$R_l = \left( 1 - \sqrt{\frac{2}{1+\beta}} \frac{\sqrt{2}}{Fr_1} \right)^2 \quad (29-2)$$

نتایج حاصل از این تحقیق به صورت زیر می‌باشند:

۱- در مقایسه با پرش هیدرولیکی معمولی در کانال مستطیلی مستقیم، پرش در داخل کانال واگرا

برای شرایط جریان ورودی یکسان، به عمق پایاب کمتری احتیاج دارد.

۲- استهلاک نسبی انرژی حوضچه واگرا بیشتر از حوضچه‌های مستطیلی مستقیم است.

۳- خصوصیات طولی، تقریباً مستقل از نسبت عرض هستند و دارای مرتبه مقداری مشابه کانال‌های

مستقیم می‌باشند.

۴- حجم پرش‌های هیدرولیکی در کانال‌های مستطیلی افقی، تنها وابسته به عدد فرود جریان ورودی

است و به نسبت عرض بستگی ندارد.

۵- پرش‌های هیدرولیکی در کانال‌های افقی، کاملاً نسبت به موقعیت طولی ناپایدار هستند؛ تثبیت

پرش می‌تواند با استفاده از آستانه‌ها، پله‌های مثبت و منفی، یا دیگر ضمام حاصل شود.

خلیفه و مک کورکودال<sup>۱۶</sup> (۱۹۹۲) پرش هیدرولیکی شعاعی را با استفاده از مدل ریاضی انتگرال

نواری (SIM) شبیه‌سازی کردند. هدف این مطالعه ایجاد مدل ساده عددی برای پیش‌بینی توزیع سرعت

<sup>16</sup> - Khalifa and McCorquodale.

داخلی، پروفیل سطح آزاد و خصوصیات طولی این نوع پرش هیدرولیکی بود. به این منظور ساده سازی- هایی روی معادلات اندازه حرکت عمودی و افقی در مختصات قطبی برای تسهیل حل آنها با استفاده از روش انتگرال گیری نواری، صورت گرفت. روش انتگرال گیری نواری به صورت فرآیند کلی انتگرال گیری معادلات اندازه حرکت و پیوستگی در مختصات استوانه‌ای ایجاد شده است که می‌تواند برای پیش‌بینی جریان داخلی پرش هیدرولیکی شعاعی، به کار رود. مدل پیشنهاد شده توسط این دو محقق می‌تواند طول پرش، طول غلتنده، توزیع سرعت، پروفیل سطح آب، پروفیل گرادیان هیدرولیکی و استهلاك انرژی در طول پرش را پیش‌بینی کند. تمامی مقادیر برآورد شده از طریق این مدل، با نتایج حاصله از آزمایش‌ها قبلی مطابقت خوبی داشتند.

مسئله‌ای که در حوضچه‌های آرامش مستطیلی واگرا مشاهده شده است، تمایل به ایجاد جریان دوپایا<sup>۱۷</sup> می‌باشد. این مسئله تا حدودی بوسیله اسکات مونکریف<sup>۱۸</sup> (۱۹۷۴)، مک کورکودال<sup>۱۹</sup> (۱۹۸۰) و میلوچ<sup>۲۰</sup> و همکاران (۱۹۷۹) مطالعه شد. در این حالت جریان از یک دیواره جدا شده و به دیواره دیگر برخورد می‌کند. در نتیجه پرشی نامتقارن به همراه یک ناحیه ساکن<sup>۲۱</sup> یا گردابه جانبی<sup>۲۲</sup> در طرف جدانشدگی و یک جت قوی در سمت دیگر شکل می‌گیرد. این جت دوپایا تمایل به گسترش به سمت کانال پائین دست دارد و گاهی موجب فرسایش شدید کناره کانال می‌شود (نقل از نتلتون، ۱۹۸۳).

این مسئله با افزایش زاویه واگرایی حوضچه ( $\theta$ ) بیشتر می‌شود. حوضچه آرامش SAF<sup>۲۳</sup>، حداکثر زاویه واگرایی دیواره‌ها را برحسب عدد فرود اولیه پرش، به صورت رابطه زیر توصیه کرده است (نقل از نتلتون، ۱۹۸۳):

$$\theta < \tan^{-1} \left( \frac{1}{c Fr_1} \right) \quad (30-2)$$

<sup>17</sup> - Bi-Stable flow

<sup>18</sup> - Scott-Moncrieff.

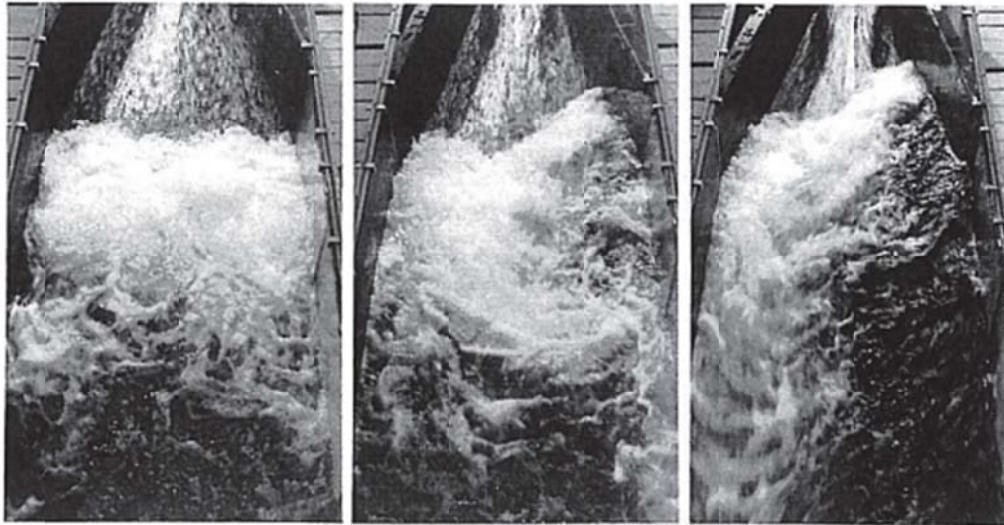
<sup>19</sup> - Mc Corquodale.

<sup>20</sup> - Meloche.

<sup>21</sup> - Dead Zone

<sup>22</sup> - Side eddy.

<sup>23</sup> - St. Anthony Falls.



شکل ۲-۲- ایجاد و تشدید پدیده جریان دوپایا با افزایش زاویه واگرایی دیواره ها در  $Fr_1$  ثابت (برمن و جگر<sup>۲۴</sup>، ۱۹۹۰) که  $C$  ثابت پایداری زاویه واگرایی می باشد. USBR برای این ثابت مقدار ۳ را توصیه کرده است. خلیفا و مک کورکودال (۱۹۷۹) پی بردند که با استفاده از دریچه های کنترل قطاعی، سینماتیک جریان ورودی تا حدودی بهبود می یابد و زوایای واگرایی بیشتری نسبت به توصیه USBR قابل استفاده خواهد بود (نقل از نتلتون، ۱۹۸۳).

شکل ۲-۲ نمونه ای از این پدیده را برای  $Fr_1=5.02$  و  $y_1=5cm$  در زوایای واگرایی مختلف نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش زاویه واگرایی به تدریج این پدیده ظاهر می شود و با افزایش بیشتر زاویه واگرایی بر شدت آن افزوده می شود.

بنابراین به طور کلی پایداری پرش های واگرا ضعیف است و توصیه شده است که از ضمامم کنترل، نظیر آستانه ها یا بلوک های میانی جهت بهبود و تشبیت پرش در این گونه مقاطع استفاده شود.

نتایج حاصل از واگرایی دیواره های حوضچه آرامش عمدتاً شامل کاهش نسبت عمق ثانویه، افزایش افت انرژی نسبی، کاهش طول پرش و ناپایداری پرش بوده است.

<sup>24</sup> Berman and Hager

## ۲-۳- کنترل پرش هیدرولیکی توسط آبپایه (استفاده از موانع)

به منظور کاهش عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی و همچنین افزایش افت انرژی در پرش هیدرولیکی، می‌توان از یک آستانه در طول پرش یا از یک سری بلوک‌های بتنی استفاده کرد. آستانه‌ها به شکل‌های مختلفی نظیر آستانه‌های لبه تیز و آستانه‌های لبه پهن در حوضچه‌های آرامش به کار می‌روند. تاکنون تحقیقات زیادی در مورد کنترل پرش هیدرولیکی با استفاده از آستانه انتهایی در مقاطع مستطیلی مستقیم صورت گرفته است که در این بخش تنها به مرور تحقیقات انجام گرفته در زمینه آستانه‌های لبه تیز و لبه پهن پرداخته می‌شود.

لائوشی<sup>۲۵</sup> (۱۹۴۷) جهت مقایسه نتایج آزمایش‌های آستانه انتهایی لبه تیز بر روی پرش هیدرولیکی در یک کانال مستطیلی افقی با نتایج حاصل از حوضچه آرامش SAF تحقیقاتی انجام داد. آستانه‌ها از صفحات فولادی ۰/۲۵ اینچی به طول ۱۲ اینچ و ارتفاع متغیر از ۰/۵ تا ۵ اینچ ساخته شده بودند. نتایج عمق پایاب مورد نیاز برای پرش در یک حوضچه با آستانه انتهایی را در شکل‌هایی نشان داده‌اند. (نقل از بلازدل<sup>۲۶</sup>، ۱۹۴۷).

در منحنی‌های ایشان، می‌توان نشان داد که نسبت  $y_1/y_c$  تابعی از عدد فرود و معادل  $1/Fr_1^{1/3}$  است. همچنین افزایش ارتفاع آستانه یا افزایش نسبت  $y_1/y_c$  موجب کاهش نسبت عمق پایاب می‌شود. نسبت متغیر  $s/y_2$  پارامتر مرتبط کننده متغیرهای اصلی  $y_1/y_c$  و  $y_2^2/y_2$  است که این پارامتر در حوضچه SAF معادل ۰/۰۷ است. نتایج در دو حوضچه آرامش تطابق نزدیکی دارند، اگرچه ارتفاع آستانه مستطیلی برای یک مقدار مشخص عدد فرود می‌تواند نتایج متغیری ایجاد کند.

نتایج ایشان همچنین نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود اولیه، آستانه‌های بزرگتر از  $0.07y_2$  قابل استفاده می‌باشند. در آزمایش‌های SAF بهترین نتایج در  $Fr_1^2 = 40$  با  $s/y_2 = 0.15$  به دست آمدند.

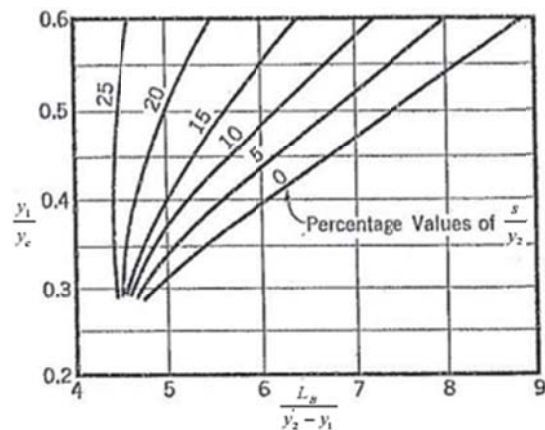
نسبت  $y_2^2/y_2$  در حوضچه آرامش مستطیلی برای این آستانه در حدود ۰/۹۷ است که بسیار بزرگتر از

<sup>25</sup> - Louis M. Laushey.

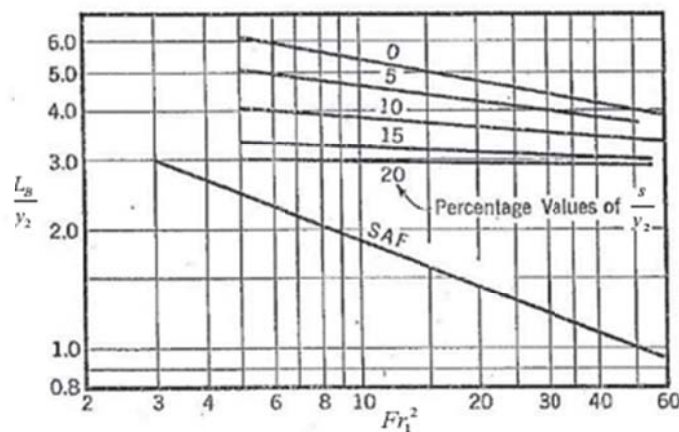
<sup>26</sup> Blaisdell



مقدار  $0/85$  توصیه شده برای حوضچه SAF می‌باشد. این اختلاف می‌تواند ناشی از اثر بلوک‌ها در اعداد فرود بالا باشد. این محقق نمودارهایی نیز برای طول حوضچه ارائه کرد. شکل ۲-۳ طول حوضچه را نسبت به ارتفاع پرش به صورت تابعی از  $y_1/y_c$  و  $s/y_2$  نشان می‌دهد. کاهش قابل ملاحظه طول حوضچه با افزایش ارتفاع آستانه مشهود می‌باشد (شکل ۲-۴). این شرایط خصوصا در اعداد فرود اولیه پایین صادق است و تقریبا  $50\%$  کاهش طول قابل حصول می‌باشد.



شکل ۲-۳- نسبت های طول پرش به ارتفاع پرش برای آستانه های انتهایی مستطیلی (نقل از بلایزدل، ۱۹۴۷)



شکل ۲-۴- مقایسه نسبت های  $L_B / y_2$  برای حوضچه SAF و حوضچه مستطیلی به همراه آستانه انتهایی (نقل از بلایزدل، ۱۹۴۷)

اولین مطالعات در زمینه کنترل پرش با یک آستانه ممتد توسط شگری<sup>۲۷</sup> (۱۹۷۵) انجام گرفت. وی روی موقعیت بهینه آستانه در حوضچه‌های آرامش مطالعه کرد و با انجام یک سری آزمایش نشان داد که عدد فرود در مقطع اولیه پرش  $Fr_1$ ، فاصله قرار گیری آستانه از پنجه  $L_s$  و ارتفاع نسبی آستانه  $S/y_1$  (ارتفاع آستانه و  $y_1$  عمق اولیه پرش است) و همچنین عمق آب در پایاب  $y^2$  در چگونگی شکل‌گیری جریان عبوری از روی آستانه موثرند (نقل از بیرامی و ایلاقی، ۱۳۸۴).

رند<sup>۲۸</sup> (۱۹۵۷) نشان داد که عدد فرود جریان ورودی  $Fr_1$ ، موقعیت نسبی آستانه  $\lambda_s = L_s / y_1$ ، ارتفاع نسبی آستانه  $S = s/y_1$  و نسبت عمق ثانویه  $Y = y_2/y_1$ ، بر جریان روی آستانه تاثیر دارند (نقل از جگر و لی، ۱۹۹۲). این محقق در سال ۱۹۶۵ با قرار دادن یک آستانه در مسیر جریان نشان داد که با افزایش ارتفاع آستانه  $s$  و کاهش  $L_s$ ، عمق آب در پایاب کاهش می‌یابد. در نتیجه دو کرانه تعریف کرد:  $L_{smax}$  که پرش کنترل شده‌ای مشابه پرش معمولی ارائه می‌کند و  $L_{smin}$  که پرش کنترل شده‌ای با ارتفاع بحرانی آستانه انتهایی  $s_c$  حاصل می‌کند. چنانچه  $L_s$  کمتر از  $L_{smin}$  یا  $s$  کوچکتر از  $s_c$  باشد، پرش از حوضچه خارج می‌شود. رند فاکتور  $J$  را به صورت زیر تعریف کرد:

$$J = \left( \frac{L_s}{y_1} - \frac{L_{smin}}{y_1} \right) / \left( \frac{L_{smax}}{y_1} - \frac{L_{smin}}{y_1} \right) \quad (۳۱-۲)$$

دو رابطه گرافیکی نیز ارائه شد که یکی از آنها  $L_s/y_1$  را برای محدوده کامل  $J$  به  $Fr_1$  مرتبط می‌کرد و دیگری  $s_c/y_1$  را برای محدوده  $2 < Fr_1 < 10$  به  $J$  مرتبط می‌کرد (نقل از جگر و لی، ۱۹۹۲).

این محقق همچنین در سال ۱۹۶۷ به مقایسه میزان افت انرژی روی آستانه های ممتد و دندان دار پرداخت و نتیجه گرفت که آستانه های ممتد نسبت به آستانه های دندان دار افت انرژی بیشتری را ایجاد می‌کنند (نقل از بیرامی و ایلاقی، ۱۳۸۴).

<sup>27</sup>- Shukry.

<sup>28</sup>- Rand.

کارکی<sup>۲۹</sup> (۱۹۶۷) تشکیل شدن و یا نشدن پرش در جریان عبوری از روی آستانه را براساس  $Fr_1$  و ارتفاع نسبی آستانه مورد بررسی قرار داد (نقل از بیرامی و ایلاقی، ۱۳۸۴).

تیاقی<sup>۳۰</sup> و همکاران (۱۹۷۸) نیروی روی آستانه را تعیین کردند. ضریب رانش  $C_D$  آنها وابسته به  $Y, S, \lambda_s, Fr_1$ ، شکل آستانه و عدد رینولدز ورودی  $Re_1$  بود. اثر پارامتر آخری مربوط به اثر مقیاس می باشد (نقل از جگر و لی، ۱۹۹۲). نارایانان و شیزاس<sup>۳۱</sup> (۱۹۸۰) در بررسی نیروی وارد بر آستانه از چهار آستانه به ارتفاع های معادل ۱، ۱/۵، ۲، ۳ برابر بازشدگی دریاچه کشویی استفاده کردند و بازشدگی دریاچه کشویی در حدود ۱۲/۷ میلیمتر حفظ می شد.

براساس مشاهدات آزمایشگاهی، حالت جریان گذرنده از روی آستانه به سه گروه تقسیم شد.

۱- ناحیه ۱: در این حالت جریان جت فوق بحرانی مستقیماً به آستانه برخورد می کند. جریان بدون شکل گیری پرش بین دریاچه و آستانه، به صورت پاششی در می آید عمق پائین دست هیچ اثری روی جریان بالادست آستانه ندارد.

۲- ناحیه ۲: در این حالت پرش شکل می گیرد و پنجه آن بین دریاچه و آستانه قرار دارد موقعیت پنجه به عمق پائین دست وابسته است. حدود بین ناحیه ۱ و ۲ به صورت تابعی از عدد فرود بالادست و نسبت عمق  $y_2/y_1$  برای مقادیر مختلف  $S/y_1$  در شکل ۲-۵ نشان داده شده است بالای خط ناحیه ۲ و پائین آن ناحیه ۱ است.

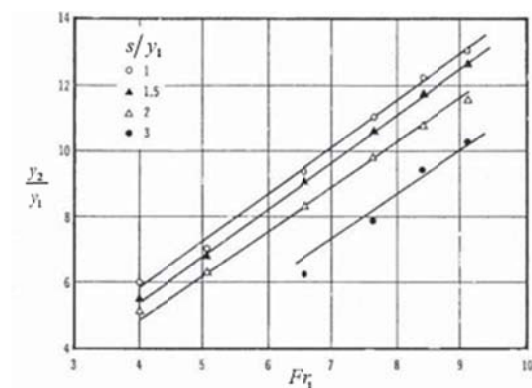
۳- ناحیه ۳: با افزایش عمق پائین دست، پنجه پرش به سمت بالا دست حرکت می کند تا به دریاچه برسد. در این حالت پرش مستغرق است.

در شکل ۲-۶ برای ناحیه ۲ نمودارهایی برای اعداد فرود مختلف ترسیم شده است.

<sup>29</sup>-karki

<sup>30</sup>-Tyagi

<sup>31</sup>-Narayanan and Schizas



شکل ۲-۵- نتایج آزمایشگاهی تبدیل از ناحیه ۱ به ناحیه ۲ (نارایانان و شیزاس، ۱۹۸۰)

این دو محقق نوسانات نیروی وارده بر آستانه قرار گرفته در پرش هیدرولیکی را نیز بررسی کردند. آنها نیروی وارد شده بر آستانه را مجموع دو نیروی متوسط زمانی و مولفه نوسانی نیرو در نظر گرفتند و پس از تحلیل ابعادی و انجام آزمایش هایی به نتایج زیر رسیدند.

۱- حداکثر شدت نوسانات نیروی وارد بر هر آستانه، درست زمانیکه پرش هیدرولیکی کنترل شده شروع به شکل گیری می کند رخ می دهد.

۲- برای آستانه های کوچکتر شدت نوسانات نیرو تحت تاثیر ضخامت نسبی لایه مرزی و عدد رینولدز قرار می گیرد.

۳- در استغراق بالا، شدت نوسانات نیرو در اصل به نسبت  $s/y_1$  بستگی دارد.

این دو محقق همچنین نیروی متوسط وارد بر آستانه را به صورت مستقیم بوسیله یک مبدل، اندازه گیری کردند که نتایج حاصل شده به شرح زیر بودند:

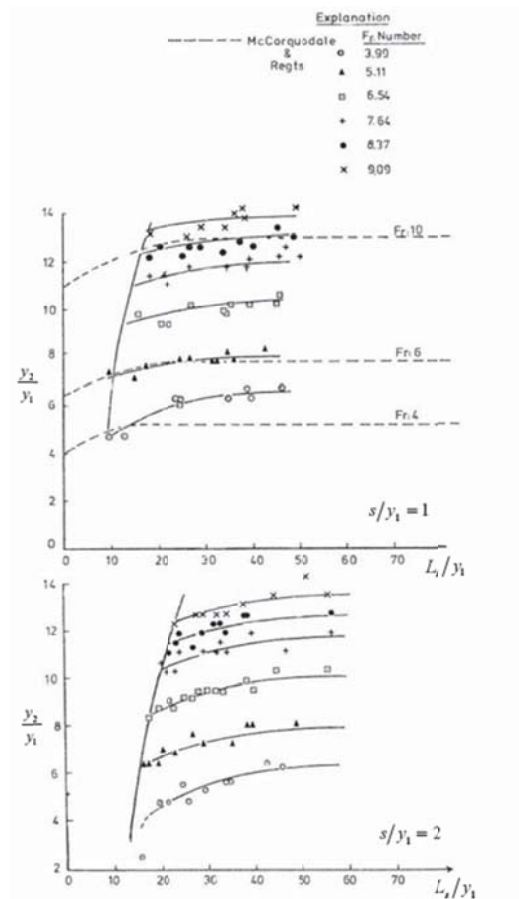
۱- حداکثر نیروی وارد بر آستانه زمانیکه فقط جریان ورودی به آستانه برخورد میکند رخ می دهد.

بسته به ارتفاع نسبی آستانه حداکثر ضریب دراگ بین  $0.3$  -  $0.45$  تغییر می کند.

۲- ضریب رانش زمانیکه پنجه پرش منطبق با موقعیت دریچه کشویی است به مقدار حداقلی می رسد.

با مستغرق شدن دریچه کشویی ضریب رانش به یک مقدار حدی می رسد.

۳- زمانیکه پنجه پرش بین دریچه و آستانه واقع می شود ضریب رانش به  $Fr_1, L_s/y_1$  بستگی دارد.



شکل ۲-۶- شرایط جریان ناحیه ۲ (نارایانان و شیزاس، ۱۹۸۰)

اوتسو<sup>۳۲</sup> (۱۹۸۱) شرایط جریان عبوری از روی آستانه عمودی را به سه دسته تقسیم نمود (نقل از اوتسو وهمکاران، ۱۹۹۱): ۱- پرش نوع اول که در آن وضعیت بالادست آستانه تحت تاثیر عمق پایاب است. ۲- پرش نوع دوم که وضعیت بالادست آستانه تحت تاثیر شرایط پائین دست نیست و ۳- برخورد آزاد جریان به آستانه وعدم تشکیل پرش در بالادست. (شکل ۲-۷)

در پرش نوع اول که فاصله پنجه پرش تا آستانه  $L_s$  بستگی به عمق پائین دست  $y_t$  دارد، برای عبارت  $Y$  برحسب  $Fr_1$  و  $S, Y^*, \lambda_j^*, \Lambda_s$  به صورت زیر

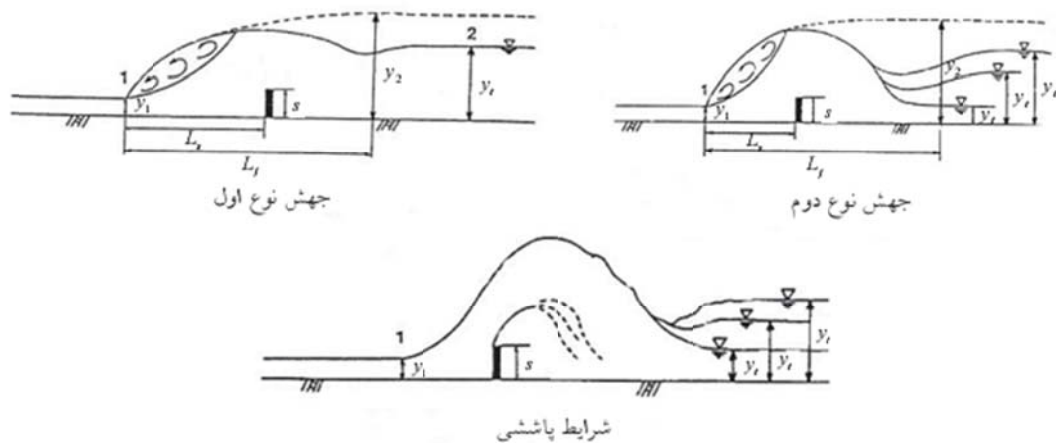
بدست آورد:

$$Y = Y^* \left[ 1 - 1.9Fr_1 \left[ \frac{s}{\lambda_j^* \Lambda_s} \right]^2 \right] \quad (32-2)$$

که در آن  $L_j^* = 5.5y_2^*$ ,  $y_2^* = \frac{y_1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1)$  است. طول حوضچه  $L_B$  برای این نوع

پرش بصورت زیر محاسبه می شود:

$$\log \left( \frac{L_B}{E_L} \right) = 1.72 - 1.71 \left( \frac{E_L}{E_1} \right) \quad (33-2)$$



شکل ۲-۷- شرایط مختلف جریان عبوری از روی آستانه (نقل از اوتسو وهمکاران، ۱۹۹۱)

و برای طول غلنده تحتانی  $L_R$  داریم:

$$\log \left( \frac{L_R + L_S}{E_L} \right) = 1.4 - 1.71 \left( \frac{E_L}{E_1} \right) \quad (34-2)$$

که  $L_R$  طول غلنده تحتانی پس از آستانه است. بنابراین نسبت  $L_B/(L_B+L_S)$  ثابت است. توجه

شود که اوتسو از یک آستانه لبه نازک استفاده کرد و انتهای غلنده تحتانی براساس توزیع سرعت ها بود.

برای پرش نوع دوم  $L_S$  مستقل از  $y_t$  است در این حالت ارتفاع آستانه مورد نیاز بوسیله رابطه زیر

محاسبه می شود:

$$\frac{s}{y_1} = -1.05(Fr_1 - 2) \left( 1 - \frac{L_S}{L_j} \right) + 1.08Fr_1 - 1.56 \quad \left( \frac{L_S}{L_j} \right) \min \leq \frac{L_S}{L_j} \leq 1 \quad (35-2)$$

حداقل ارتفاع آستانه مورد نیاز برای تشکیل پرش نوع دوم بوسیله رابطه زیر محاسبه می شود:

$$s_c/y_1 = 0.227Fr_1 + 0.349. \quad (36-2)$$

$$(37-2)(L_s/L_j)_{\min} = (0.1875Fr_1 - 0.182)/(Fr_1 - 2)$$

مرز بین پرش نوع اول و دوم بوسیله رابطه زیر مشخص می شود:

$$\frac{y_*}{y_1} = \frac{y_2}{y_1} - 1.9Fr_1(s/y_1)^2 / [1 + (0.951(s/y_1) - 1.03Fr_1 + 1.48)/(Fr_1 - 2)]^2 (5.5.)^2 (\frac{y_2}{y_1}) \quad (38-2)$$

و مرز بین پرش نوع اول و برخورد آزاد جریان به آستانه نیز بوسیله رابطه زیر تعیین می شود:

$$\frac{y_s}{y_1} = \frac{y_2}{y_1} \left[ 1 - 0.33Fr_1^{0.63} \left( \frac{s}{y_1} \right)^2 \right] \quad 1.0 \leq \frac{s}{y_1} \leq \frac{s_c}{y_1} \quad (39-2)$$

بنابراین شرایط جریان عبوری از روی آستانه بصورت شکل (۸-۲) قابل طبقه بندی می باشد.

اوتسو<sup>۳۳</sup> و همکاران (۱۹۹۱) جریان عبوری از روی آستانه را براساس طبقه بندی صورت گرفته توسط اوتسو (۱۹۸۱) در نظر گرفتند و به بررسی نیروی رانش اعمال شده بر آستانه پرداختند. نتایج بدست آمده برای نیروی رانش اعمال شده بر آستانه به صورت زیر بودند:

۱- برای پرش های نوع اول و دوم ( $L_s/L_j \leq 0.7$ ) و شرایط برخورد آزاد توزیع فشار دینامیکی

وارد بر سطح بالا دست آستانه یک الگوی S شکل به خود می گیرد و فشار دینامیکی در

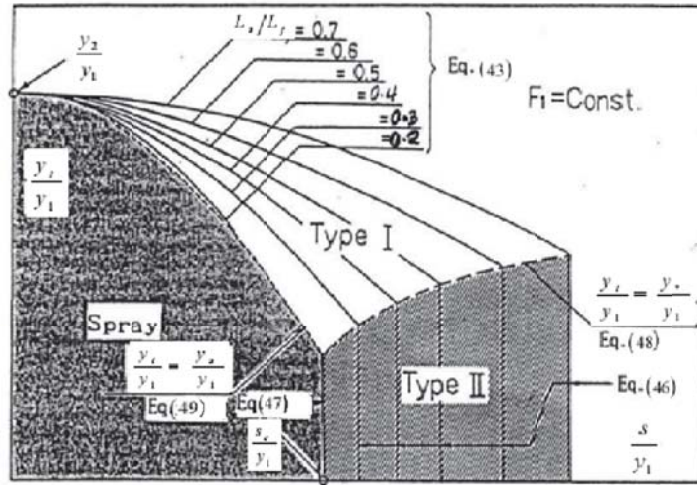
$y/s = 0.7 \sim 0.8$  به حداکثر و در  $y/s = 0.2 \sim 0.3$  به حداقل مقدار خودش می رسد این

به علت گردابه مثلی شکل گرفته بلافاصله قبل از آستانه است.

۲- بافرض خصوصیات شرایط روی آستانه فشار کل وارد بر سطح بالادست آستانه برای پرش های نوع

اول و دوم بوسیله معادله (۴۰-۲) بدست می آید و برای شرایط برخورد آزاد بوسیله معادله (۲-۲)

(۴۱) حاصل می شود.



شکل ۲-۸- طبقه بندی شرایط جریان عبوری از روی آستانه لبه نازک برای یک عدد فرود ثابت (اوتسو و همکاران، ۱۹۹۱)

$$C_{df} = p_f / (1/2 \rho v_1^2 s) = -0.575 \left( \frac{L_s}{L_j} \right) + 0.689 + 4.86 / Fr_1^2 \quad (40-2)$$

Type I jump:  $3.5 \leq Fr_1 \leq 9.5, L_s/L_j \leq 0.7 \sim 0.8, s/y_1 \geq 0.8$

Type II jump:  $3.5 \leq Fr_1 \leq 9.5, (L_s/L_j)_{min} \leq L_s/L_j \leq 0.7 \sim 0.8$

$$C_{df} = p_f / (1/2) \rho v_1^2 s = -0.575(0.1875 Fr_1 - 0.182) / (Fr_1 - 2) + 0.689 + 4.86 / Fr_1^2 \quad (41-2)$$

$$3.5 \leq Fr_1 \leq 8.5, 0.8 \leq s/y_1 < s_c/y_1$$

۳- نیروی رانش وارد بر آستانه برای پرش نوع اول می تواند از طریق معادله (۴۲-۲) برای پرش نوع دوم

از معادله (۴۳-۲) و برای شرایط برخورد آزاد از طریق معادله (۴۴-۲) بدست آید.

$$C_d = 0.71 - 0.85(L_s/L_j) \quad (42-2)$$

$$3.5 \leq Fr_1 \leq 9.5, s/y_1 \geq 1.0, L_s/L_j \leq 0.7 \sim 0.8$$

$$C_d = C_{df} - 0.3 Fr_1^{-2} (y_t/y_1)^{1.7} \quad (43-2)$$

$$3.5 \leq Fr_1 \leq 9.5, (L_s/L_j)_{min} \leq L_s/L_j \leq 0.7 \sim 0.8, y_t/y_1 \leq y_*/y_1$$

$$C_d = C_{df} - 0.1 Fr_1^{-2} (y_t/y_1)^{2.2} \quad (44-2)$$

$$3.5 \leq Fr_1 \leq 9.5, 0.8 \leq s/y_1, s_c/y_1 \leq y_t/y_1 \leq y_s/y_1$$



۴- در حالت شرایط عدم هوادهی پشت آستانه فشار وارد بر سطح پائین دست آستانه از فشار هیدرواستاتیک کمتر است و یک الگوی خطی مشاهده می شود.

جگر و لی<sup>۳۴</sup> (۱۹۹۲) اثر آستانه لبه نازک را بر روی پرش هیدرولیکی داخل یک کانال مستطیلی بررسی کردند. این دو محقق اثرات آستانه لبه نازک را بر روی پرش به شرح زیر معرفی کردند:

$$\text{- کاهش عمق ثانویه به اندازه } 0 < Y^* - Y = \Delta Y_s \text{ که } Y = \frac{y_2}{y_1} \text{ است.}$$

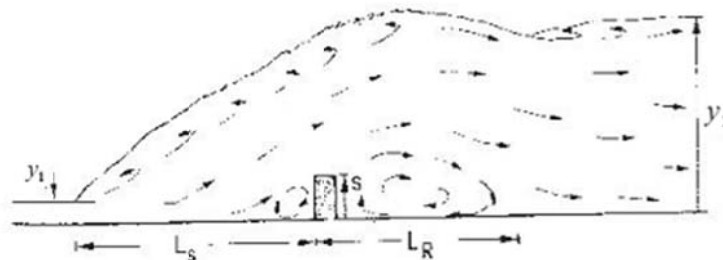
-افزایش راندمان پرش

-تغییر الگوی جریان بسته به شکل هندسی آستانه و موقعیتش

-تغییر طول مورد نیاز حوضچه  $L_B$  که پرش هیدرولیکی به طور کامل در آن واقع شده و شرایط پایاب مطلوب باقی می ماند.

علامت ستاره مربوط به پرش کلاسیک، یعنی پرش در یک کانال مستطیلی صاف بدون آستانه است.

شکل ۲-۹ نمادهای به کار رفته برای پرش مورد نظر در این مطالعه را نشان می دهد.



شکل ۲-۹- پرش هیدرولیکی کنترل شده بوسیله آستانه لبه نازک (جگر و لی، ۱۹۹۲)

در این مطالعه از آستانه هایی به ارتفاع های ۱۲/۵، ۲۵، ۳۸، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ میلیمتری استفاده شد. این دو محقق براساس فرضیات راجاراتنام (۱۹۶۷) و برترز<sup>۳۵</sup> (۱۹۸۷) و با توجه به جنبه های هیدرولیکی و فرسایشی پرش عبوری از روی آستانه لبه نازک را به پنج نوع A, B, B<sub>m</sub>, C و جریان موجی طبقه بندی کردند (شکل ۲-۱۰). پرش A عملاً مطابق با پرش کلاسیکی که آستانه در انتهای غلتنده سطحی

<sup>34</sup>-Hager and Li

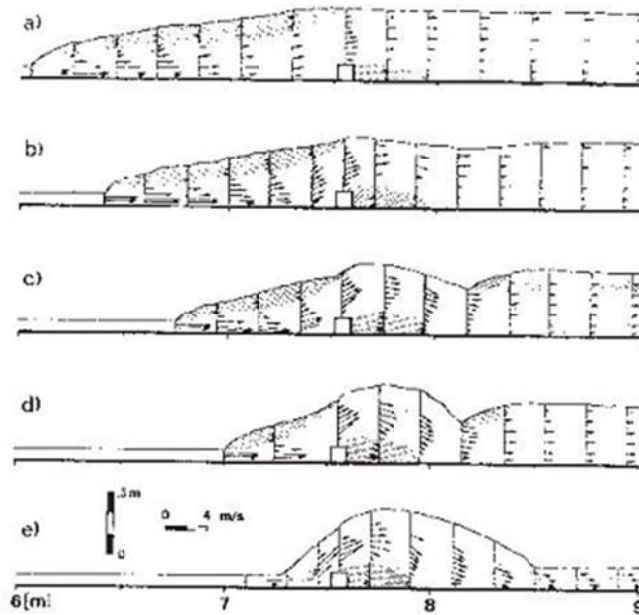
<sup>35</sup>Bretz

است، می باشد. بنابراین اثر آستانه ناچیز است و موجب انحراف جریان تحتانی بعد از انتهای غلتنده می شود. با کاهش پایاب، فاصله بین پنجه پرش و آستانه کاهش می یابد، اثر آستانه افزایش یافته و جریان تحتانی به سمت سطح آب منحرف می شود. موج ساکن کوچکی در پائین دست آستانه بوجود می آید. (شکل ۲-۱۴-b) با کاهش بیشتر پایاب پرشی تحت عنوان پرش  $B_m$  رخ می دهد که با غلتنده ثانویه سطحی در پائین دست آستانه توصیف می شود (شکل ۲-۱۴-c).

اگر باز هم پایاب کاهش یابد، پرش c ممکن است ایجاد شود که در آن غلتنده سطحی بالادست، به کلی رو به انحطاط می گذارد. موج راکد بالای آستانه دارای نوسان و رشد قابل ملاحظه پاشش است به علاوه شیرجه آشکار جریان پایاب رخ می دهد این نوع پرش برای استهلاک انرژی موثر نیست و فرسایش زیادی ایجاد می کند (شکل ۲-۱۴-d) با کاهش بیشتر پایاب جریان فوق بحرانی از روی آستانه عبور کرده و در پائین دست ادامه می یابد (شکل ۲-۱۴-e).

در این تحقیق فرض شد نسبت عمق ثانویه  $Y$  به عدد فرود اولیه  $Fr_1$ ، ارتفاع نسبی آستانه  $S=s/y_1$  و موقعیت نسبی آستانه  $\Lambda = L_s/L_r^*$  که  $L_r^*$  طول غلتنده از رابطه ۲-۴۶ محاسبه می شود بستگی دارد. اثر آستانه روی عمق ثانویه  $Y$  در مقایسه با  $Y^*$  به صورت زیر بیان شد:

$$Y = Y^* - \Delta Y_f - \Delta Y_s \quad (۲-۴۵)$$

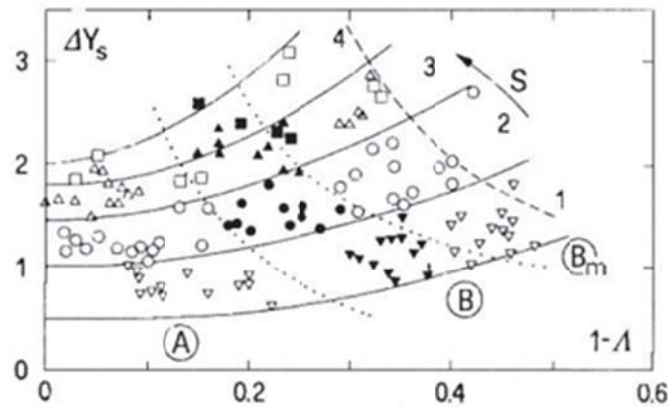


شکل ۲-۱۰- جریان کنترل شده توسط آستانه  $S=1.4$ ,  $Fr_1=5.23$  (جگر و لی، ۱۹۹۲)

که  $\Delta Y_f$  اثر اصطکاک دیواره است و با استفاده از روش جگر و برمن<sup>۳۶</sup> (۱۹۸۹) برای پرش هیدرولیکی

کلاسیک محاسبه می شود و  $\Delta Y_s$  اثر آستانه است. از طریق تجزیه و تحلیل داده های برتنز (۱۹۸۷)،  $\Delta Y_s$

به صورت شکل ۲-۱۱ حاصل شد.

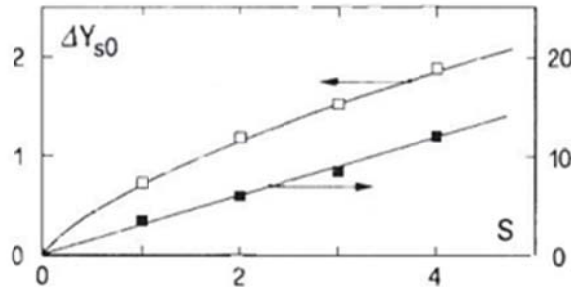


شکل ۲-۱۱- کاهش عمق ثانویه به واسطه وجود آستانه (جگر و لی، ۱۹۹۲)

جهت آنالیز داده ها از سهمی های به شکل  $\Delta Y_s = \Delta Y_{s0} + c(1 - \Lambda)^2$  استفاده شد. براساس

شکل ۱۲-۲ داریم:

$$\Delta Y_s = 0.7s^{0.7} + 3S(1 - \Lambda)^2 \quad \Lambda > 0.5 \quad (۴۶-۲)$$



شکل ۱۲-۲- ضرائب  $\Delta Y_s$  و  $c$  به صورت تابعی از  $S$  (جگر و لی، ۱۹۹۲)

شکل ۱۱-۲ نشان می دهد که نوع جریان مرتبط با موقعیت پنجه و ارتفاع آستانه است. ارتفاع مربوط

به مرز بین نوع جریان ها به صورت زیر قابل تقریب است:

$$S_L = [C_L(1 - \Lambda)]^{-2} \quad (۴۷-۲)$$

که در آن  $C_L=4$  برای تبدیل پرش  $A$  به  $B$  و  $C_L=2.5$  برای تبدیل پرش  $B$  به  $B_m$  است حد بالایی

وجود پرش  $B_m$  به صورت زیر است:

$$S_+ = 1/[9(1 - \Lambda)]^3 \quad (۴۸-۲)$$

طول حوضچه باید دست کم معادل فاصله بین پنجه پرش و انتهای غلتنده تحتانی باشد. طول نسبی

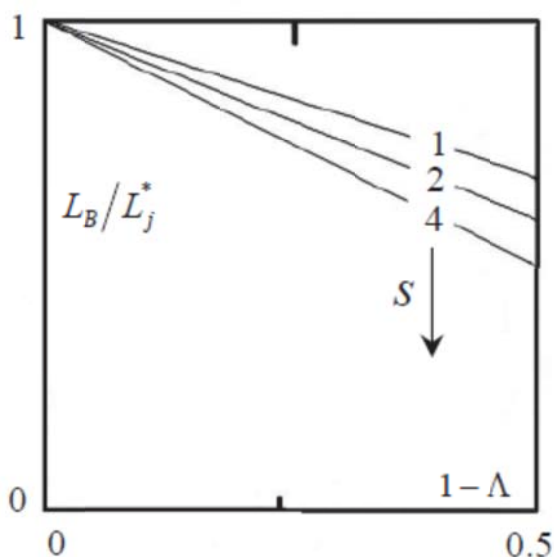
حوضچه  $\Lambda_B = L_B/L_r^*$  به صورت تابعی از موقعیت آستانه  $\Lambda$  و ارتفاع آستانه  $S$  به صورت زیر قابل

بیان است:

$$\Lambda_B = \frac{4}{3} [1 - 0.6S^{1.3}(1 - \Lambda)] \quad (۴۹-۲)$$

می توان  $L_j^* \cong 6y_2^*$ ,  $L_r^* \cong 4/5y_2^*$  در نظر گرفت ، در نتیجه با ساده کردن رابطه بالا  $L_B/L_j^*$  به صورت

تابعی از  $\Lambda$  و  $S$  در شکل ۲-۱۳ ترسیم می شود که نشان می دهد طول حوضچه با کاهش موقعیت نسبی آستانه و افزایش ارتفاع آستانه ، کاهش می یابد.



شکل ۲-۱۳- طول حوضچه به صورت تابعی از موقعیت نسبی و ارتفاع نسبی آستانه (جگر و لی، ۱۹۹۲)

همچنین در این تحقیق برای ارتفاع نسبی بهینه آستانه  $S_{opt}$  رابطه زیر ارائه شد:

$$S_{opt} = 1 + \frac{1}{200} Fr_1^{2.5} \quad (50-2)$$

آشور و دیباچه<sup>۳۷</sup> (۲۰۰۳) کنترل پرش هیدرولیکی بوسیله یک آستانه در داخل کانال U شکل را

بررسی کردند. آنها رابطه زیر را برای حداقل ارتفاع آستانه لبه پهن بدست آوردند:

$$2\left(\frac{S_e}{D}\right)_{\min} \approx \sqrt{q_0} = \left(\frac{5}{5}\right)h_1 \quad (51-2)$$

این دو محقق روابط زیر را به ترتیب به عنوان روابط حاکم بر کنترل پرش هیدرولیکی با استفاده از آستانه های لبه نازک و لبه پهن ارائه کردند.

<sup>37</sup>Achour and Debabeche

$$S_e = Y + \sigma_{2U} - \frac{3q^{2/3}}{2h_1} \quad (52-2)$$

$$S_m = Y - \frac{q^{2/3}}{y_1} \quad (53-2)$$

که در این روابط  $\sigma_{1U} = V_2^2 / 2gD$ ,  $\sigma_{2U} = \sigma_{1U} / h_1$ ,  $h_1 = y_1 / D$  می‌باشند.

این دو محقق برای مقایسه روابط (52-2) و (53-2) مطالعه ای با احتساب  $\sigma_{1U} = 0$  انجام دادند و نتیجه گرفتند که برای کنترل پرش هیدرولیکی در شرایط یکسان در داخل مقطع U شکل، ارتفاع آستانه لبه نازک بزرگتر از ارتفاع آستانه لبه پهن است ( $S_m > S_e$ )

بیرامی و ایلاقی (1384) کنترل پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش افقی سرریز اوجی استاندارد را با استفاده از یک یا دو آستانه ممتد مورد بررسی قرار دادند. برای این امر از پنج دیواره با ارتفاع های مختلف و ترکیبی از آنها استفاده شد. در این ترکیب از آستانه های به ضخامت 20 میلیمتر و ارتفاع های 2/5، 5، 10، 20، 30 میلیمتری استفاده شد که در فاصله 350 و 650 میلیمتر از پنجه پرش قرار داده می‌شدند. برای محاسبه نیروی عکس العمل از طرف آستانه بر آب، فرض شد که فشار وارد بر سطح بالادست آستانه معادل ضریبی از از فشار استاتیکی عمق ثانویه پرش کلاسیک است و فشار وارد بر سطح پایین دست آستانه ضریبی از فشار استاتیکی عمق ثانویه پرش هیدرولیکی موجود می‌باشد. سپس با فرض اینکه ضریب K حاصل از فشار در بالادست و پائین دست با یکدیگر برابرند و صرف نظر کردن از نیروی اصطکاک خارجی، با ساده کردن معادله اندازه حرکت در جهت افق، به رابطه زیر رسیدند:

$$Y = \frac{y_2}{y_1} = \left[ 1 - 2k \frac{s}{y_1} (Y^* - Y) + 2Fr_1^2 \left( 1 - \frac{1}{Y} \right) \right]^{1/2} \quad (54-2)$$

که در آن  $Y^* = y_2^* / y_1$  عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کلاسیک و S در حالت یک آستانه معادل ارتفاع آستانه و در حالت دو آستانه معادل ارتفاع آستانه دوم است.

در حالت یک آستانه ممتد، با استفاده از روش تحلیل ابعادی باکینگهام معادله تجربی زیر برای  $k$  حاصل شد:

$$k = 0.823 \left(\frac{S_1}{y_2}\right)^{-0.9899} \left(\frac{L_{s1}}{y_1}\right)^{-0.0279} (Fr_1)^{0.139} \quad (55-2)$$

که در آن  $L_{s1}$  فاصله قرار گیری آستانه اول نسبت به پنجه پرش می باشد. که در حالت دو آستانه ممتد، مشاهده شد که چنانچه آستانه دوم کوتاهتر از آستانه اول باشد، اثر کاهندگی آستانه دوم بر  $Y$  محسوس نیست. در حالیکه اگر آستانه دوم بلندتر باشد، اختلاف  $Y$  نسبت به پرش کلاسیک افزایش می یابد رابطه حاصل شده برای  $K$  با استفاده از روش تحلیل ابعادی باکینگهام در حالت دو آستانه ممتد که آستانه دوم بلندتر از آستانه اول است، به صورت زیر می باشد:

$$k = 3.44 \left(\frac{S_2}{y_2}\right)^{-0.99515} (Fr_1)^{0.0415} \left(\frac{L_{s2}}{\Delta L_2}\right)^{-1.7} \left(\frac{S_1}{y_1}\right)^{0.00385}; (R^2 = 0.9996) \quad (56-2)$$

در این رابطه  $L_{s2}$  فاصله قرارگیری آستانه دوم از پنجه پرش و فاصله بین دو آستانه است. با استفاده از معادلات (54-2)، (55-2)، (56-2) و حل معادلات مربوط به هر حالت از طریق سعی و خطا، می توان عمق ثانویه پرش را بدست آورد.

این دو محقق طول گرداب پرش هیدرولیکی را نیز مورد بررسی قرار دادند و برای حالت یک آستانه روابط زیر را ارائه کردند:

$$\frac{L_r}{y_1} = \alpha \exp(\beta Fr_1) \quad (57-2)$$

$$\alpha = 2.3861 \left(\frac{S_1}{L_{s1}}\right)^{-0.3543} \quad (58-2)$$

$$\beta = 0.034 \ln\left(\frac{S_1}{L_{s1}}\right) + 0.2687; (0.003446 \leq \frac{S_1}{L_{s1}} \leq 0.014286) \quad (59-2)$$

$$\beta = -5597.1 \left( \frac{s_1}{L_{s1}} \right)^4 + 1272.9 \left( \frac{s_1}{L_{s1}} \right)^3 - 107.66 \left( \frac{s_1}{L_{s1}} \right) + 0.1439; (0.015385 \leq \frac{s_1}{L_{s1}} \leq 0.085714) \quad (۶۰-۲)$$

که  $L_r$  طول گرداب پرش است. برای حالت دو آستانه ممتد، روابط زیر را برای طول گرداب پرش ارائه کردند:

$$\ln \left( \frac{L_r}{Y_1} \right) / (\tanh(E_2)) = 0.0616 \exp \left( \frac{7.289 \tanh(E_L)}{E_1} \right); \left( \frac{s_1}{L_{s1}} < 0.014 \right) \quad (۶۱-۲)$$

$$\ln \left( \frac{L_r}{y_1} \right) / (\tanh(E_2)) = 0.0553 \exp \left( \frac{7.575 \tanh(E_L)}{E_1} \right); \left( \frac{s_1}{L_{s1}} \geq 0.043 \right) \quad (۶۲-۲)$$

برخی از نتایج حاصله در این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

۱- با افزایش ارتفاع آستانه و کاهش فاصله قرارگیری آن از پنجه پرش، عمق ثانویه کاهش می‌یابد.  
 ۲- آستانه با ارتفاع نسبی  $s_1 / L_{s1} \leq 0.014$ ، تغییر محسوسی را در میزان عمق ثانویه و افت انرژی نسبت به پرش کلاسیک ایجاد نمی‌کند.

۳- به نظر می‌رسد که در محدوده  $s_1 / L_{s1} \leq 0.046$ ، اغتشاش در حوضچه آرامش بسیار زیاد نبوده و عمق ثانویه کاهش یافته و افت انرژی افزایش می‌یابد و حوضچه آرامش با طول مناسب قابل طراحی است.

۴- در محدوده  $Fr_1 > 10$  و در فاصله  $s_1 / L_{s1} \geq 0.038$  آستانه خارج از محدوده طول گرداب پرش کلاسیک قرار می‌گیرد که اثر آن در تغییر عمق ثانویه پرش، افت انرژی و طول گرداب پرش باید به طور جداگانه مورد تحقیق قرار گیرد.

۵- برای آستانه اول با ارتفاع نسبی  $s_1 / L_{s1} < 0.014$  و آستانه دوم با ارتفاع نسبی  $s_1 / L_{s2} < 0.015$  طول گرداب پرش از نوع گرداب سطحی است و طول گرداب پرش نسبت به پرش کلاسیک کاهش می‌یابد.



۶- قرارگیری استانه با ارتفاع نسبی  $s_1/L_{s2} \geq 0.015$  بعد از آستانه با ارتفاع نسبی

$s_1/L_{s1} \leq 0/014$  باعث کاهش عمق ثانویه می‌شود ولی طول گرداب را افزایش می‌دهد.

۷- اگر ارتفاع نسبی آستانه اول  $s_1/L_{s1} \geq 0.028$  باشد، ارتفاع آستانه دوم اثر چندانی با عمق ثانویه

و طول گرداب ندارد.

۸- به ازای  $s_1/L_{s1} \geq 0.015$  و  $s_1/L_{s2} \geq 0.028$  سطح آب در حوضچه آرامش دارای اغتشاش شدیدی

است که بهتر است از این ارتفاعهای نسبی آستانه برای طراحی استفاده نشود.

دیب‌بچه و آشور (۲۰۰۷) اثر آستانه را بر روی پرش هیدرولیکی در یک کانال مثلثی بررسی کردند.

در این پژوهش اثر آستانه های لبه نازک و لبه پهن روی نسبت عمق های ثانویه مشاهده و به

صورت کمی درآمد. این دو محقق از طریق آنالیز داده های آزمایشگاهی و برای  $1/6 \leq Fr_1 \leq 11$

رابطه زیر را برای نسبت عمق های ثانویه ارائه کردند:

$$Y = 1 + \alpha \ln \left[ \frac{(Fr_1 + 4)}{5} \right] \quad (۶۳-۲)$$

که در آن ثابت  $\alpha$  مقادیر زیر را دارد:  $\alpha = 3.96$  برای پرش هیدرولیکی کنترل شده توسط آستانه

لبه نازک،  $\alpha = 3.78$  برای پرش هیدرولیکی کنترل شده توسط آستانه لبه پهن،  $\alpha = 3.33$  برای

پرش  $B_m$  با آستانه لبه پهن.

همچنین رابطه زیر را نیز برای نسبت عمق های ثانویه بر حسب ارتفاع نسبی آستانه بدست

آوردند:

$$Y = 1 + \beta S \quad (۶۴-۲)$$

که برای پرش کنترل شده توسط آستانه لبه نازک  $\beta = 0.96$ ، برای پرش کنترل شده بوسیله

آستانه لبه پهن  $\beta = 1.02$  و برای پرش  $B_m$  با آستانه لبه پهن  $\beta = 0.82$  می‌باشد.

ارتفاع نسبی مورد نیاز آستانه از روی معادلات (۶۳-۲) و (۶۴-۲) به صورت زیر نتیجه شد :

$$S = \gamma \ln \left[ \frac{(Fr_1 + 4)}{5} \right] \quad (۶۵-۲)$$

که  $\gamma = 4.13$  برای پرش کنترل شده توسط آستانه لبه نازک،  $\gamma = 3.71$  برای پرش کنترل شده بوسیله آستانه لبه پهن و  $\gamma = 4.06$  برای پرش  $B_m$  با آستانه لبه پهن می‌باشد.

آنها برای طول نسبی حوضچه رابطه زیر را ارائه کردند:

$$S + Fr_1^{0.4} = \alpha \lambda + b \quad \lambda \geq 4 \quad (۶۶-۲)$$

که در آن  $\lambda = \frac{L_B}{y_1}$  طول نسبی حوضچه و  $a$  و  $b$  ضرایب ثابتی هستند که در جدول ۱-۲ مقادیر آنها نشان داده شده است.

جدول ۱-۲- مقادیر ثابت های  $b, a$  در معادله (۶۶-۲)

#### پرش کنترل شده

پرش $B_m$	آستانه لبه پهن	آستانه لبه نازک	
۰/۱۶۱	۰/۱۲۵	۰/۱۲۷	A
۱/۰	۱/۴۱	۱/۲۷۸	B

امید و همکاران (۲۰۱۰) پرش هیدرولیکی اجباری که با استفاده از آبپایه انتهایی تولید شده را مورد بررسی قرار داده و مشاهده نمودند زمانی که عمق پایاب کمتر از عمق ثانویه یک پرش پایدار است، جریان فوق بحرانی به سمت پایین دست حرکت خواهد کرد. در چنین موقعیت‌هایی، آبپایه‌ای که به درستی طراحی شده باشد می‌تواند شکل و موقعیت پرش را تغییر دهد. ایشان نتیجه گرفتند کار اصلی یک آبپایه انتهایی در حوضچه آرامش و اگر پایدارسازی موقعیت پرش و بهبود شرایط آن به منظور جلوگیری از گسترش پرش به سمت مناطق محافظت نشده پایین دست است. همچنین آبپایه انتهایی باعث کاهش طول پرش می‌گردد.

نتایج حاصل از بکارگیری موانع در حوضچه آرامش عمدتاً شامل افزایش راندمان پرش، کاهش طول پرش، ارائه روابطی به منظور برآورد نیروی رانش اعمال شده بر آستانه، محاسبه طول گرداب پرش و محاسبه نسبت عمق ثانویه بوده است.

## ۲-۴- اثر شیب کف حوضچه بر پرش

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

همچنین در گذشته مطالعات وسیعی بر روی پرش‌های شکل گرفته در شیب‌های مثبت و منفی انجام شده و توسط کیندسواتر<sup>۳۸</sup> در سال ۱۹۴۴ و راجاراتنام<sup>۳۹</sup> در سال ۱۹۶۶ به انواع پرش‌های نوع A, B, C, D, E و F طبقه بندی شده است. از جمله محققینی که در این زمینه مطالعاتی داشته‌اند می‌توان به پترکا و برادلی<sup>۴۰</sup> (۱۹۵۷)، هاگر<sup>۴۱</sup> (۱۹۸۸)، هاگر و اکواگوشی<sup>۴۲</sup> (۱۹۹۰)، اوتسو و یاسودا<sup>۴۳</sup> (۱۹۹۱)، مک کورکودال و محمد<sup>۴۴</sup> (۱۹۹۴) اشاره نمود (نقل از بیرامی و چمنی، ۲۰۱۰).

در خصوص پرش هیدرولیکی روی شیب معکوس، راس<sup>۴۵</sup> و همکاران (۱۹۳۸) نتیجه گیری نمودند که کنترل آن غیرممکن است واستیونس<sup>۴۶</sup> (۱۹۴۴) و مک کورکودال و محمد (۱۹۹۴) پرش‌هایی روی شیب‌های معکوس ایجاد نمودند. در سال ۱۳۶۹ بررسی‌هایی توسط ابریشمی و صانعی انجام شد که با استفاده از نتایج تجربی و تحلیلهای مربوطه نشان داده شد که امکان ایجاد پرش هیدرولیکی پایدار بر

---

<sup>38</sup> Kindsvater

<sup>39</sup> Rajaratnam

<sup>40</sup> Bradley, Peterka

<sup>41</sup> Hager

<sup>42</sup> akwagoshi, Hager

<sup>43</sup> Ohtsu, Yasuda

<sup>44</sup> MacCorquadal, Mohamed

<sup>45,46</sup> Rouse

<sup>46</sup> Stevens

روی شیب‌های منفی وجود دارد و این پایداری تابعی است حداقل از عدد فرود اولیه، عمق پایاب و طول حوضچه به گونه‌ای که در صورت ثابت بودن سایر شرایط و برای هر شیب معکوس مشخص، چنانچه  $Fr_1$  از یک مقدار معین کمتر باشد، پرش آبی پایدار تشکیل نخواهد گردید. کاهش طول پرش و عمق ثانویه در اثر افزایش شیب معکوس از دیگر نتایج این تحقیقات است که شرایط اقتصادی بهتر را در این‌گونه شیب‌ها برای کنترل پرش و جلوگیری از خرابیهای احتمالی معین می‌سازد (نقل از بیرامی و چمنی، ۲۰۱۰).

بیرامی و چمنی در سال ۲۰۰۷، نوع جدیدی از پرش را معرفی نمودند که به B-F مشهور است و در آن نشان دادند که شروع پرش در شیب مثبت شکل می‌گیرد و انتهای پرش روی شیب معکوس قرار می‌گیرد. همچنین بیرامی و چمنی در سال ۲۰۱۰ طول پرش و افت انرژی تنوع زیادی از پرش‌های هیدرولیکی را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که طول پرش در پرش‌های نوع B (شیب مثبت) بزرگتر و در پرش‌های نوع F (شیب منفی) کوچکتر از پرش کلاسیک نوع A بوده است و طول پرش در پرش نوع B-F کوتاهتر از پرش نوع B به دست آمده است. داده‌های آزمایشگاهی ایشان نشان داد که افت انرژی پرش کلاسیک بزرگتر از هر نوع پرش شکل گرفته در شیب‌های مثبت و منفی است. در شیب‌های معکوس تندتر، افت انرژی مختصری کمتر از شیب‌های معکوس متوسط است. همچنین نتایج ایشان نشان داد که طول پرش در پرش‌های نوع B بزرگتر و در پرش‌های نوع F کوچکتر از پرش کلاسیک بوده است. طول پرش در پرش نوع B-F کوتاهتر از پرش نوع B به دست آمد. به طور کلی، طول پرش نسبی تابعی از اعداد فرود جریان ورودی و خروجی، نسبت عمق ثانویه و شیب کف کانال است (بیرامی و چمنی، ۲۰۱۰).

در این تحقیق به عنوان یک حالت عمومی، پرشی که روی شیب مثبت آغاز می‌شود و روی شیب منفی پایان می‌یابد (پرش B-F) در نظر گرفته شد (شکل ۲-۱۴). با توجه به صفحه مبنا، هد کلی H در هر مقطعی در حجم کنترل بین مقاطع ۱ و ۲ را به صورت زیر نوشت:

$$H = z + d \cos \theta + \frac{\alpha Q^2}{2gAr^2} \quad (۶۷-۲)$$

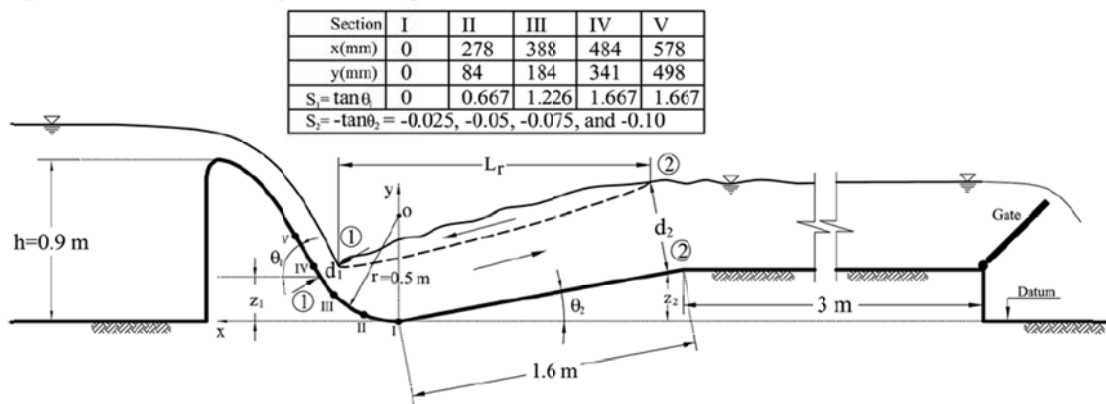
که  $z$  فاصله عمودی کف کانال از مبدا (تراز بستر) است،  $d$  عمق جریان عمود بر بستر،  $\theta$  زاویه شیب کف،  $a$  ضریب انرژی،  $Q$  دبی جریان،  $g$  شتاب ثقل و  $A_r$  سطح مقطع عرضی است. با مشتق گیری از معادله فوق نسبت به محور  $x$  در جهت افقی، تعریف شیب کف کانال به صورت  $S = -dz/dx$  و شیب خط انرژی به صورت  $SF = -dH/dx$ ، معادله زیر به دست آمد:

$$\frac{d}{dx}(d \cos \theta) = \frac{S-SF}{1-\frac{\alpha Q^2}{gA_r^2 D \cos \theta}} = \frac{S-SF}{1-Fr^2} \quad (۶۸-۲)$$

معادله فوق مشابه معادله دینامیک جریان متغیر مکانی با افزایش دبی است که بر مبنای معادله مومنوم است و  $dQ/dx = 0$  (چاو<sup>۴۷</sup> ۱۹۵۹).

با فرض  $d(d \cos \theta)/dx = \Delta(d \cos \theta)/\Delta x$  معادله به صورت زیر درمی آید:

$$\frac{d_2 \cos \theta_2 - d_1 \cos \theta_1}{\Delta x} = \frac{SF-S}{Fr^2-1} \quad (۶۹-۲)$$



شکل ۲-۱۴- طرح شماتیک حالت عمومی پرش (بیرامی و چمنی، ۲۰۱۰)

اگر  $\Delta x = L_r$  طول پرش باشد،  $D_t = d_2 \cos \theta_2 / (d_1 \cos \theta_1)$  نسبت عمق ثانویه و  $L_{rr} =$

طول نسبی پرش باشد، معادله فوق به شکل زیر تبدیل می گردد:

$$\frac{D_t-1}{L_{rr}} = \frac{SF-S}{Fr^2-1} \quad (۷۰-۲)$$

یا به صورت زیر:

$$SF = \frac{(D_t-1)(Fr^2-1)}{L_{rr}} + S \quad (۷۱-۲)$$

اگر SF شیب خط انرژی در ورودی جریان یا در پایان پرش باشد، شیب خط انرژی متوسط را می‌توان به صورت در نظر گرفت که زیرنویس‌های ۱ و ۲ به مقاطع ۱ و ۲ شکل ۲-۱۴ اشاره می‌کند.

$$\overline{SF} = 0.5 \left[ \frac{(D_t-1)(Fr_1^2+Fr_2^2-2)}{L_{rr}} + S_1 + S_2 \right] \quad (۷۲-۲)$$

$$L_{rr} = \frac{L_r}{\theta_1 \cos \theta_1} = \frac{(D_t-1)(Fr_1^2+Fr_2^2-2)}{2\overline{SF}-(S_1+S_2)} \quad (۷۳-۲)$$

معادله فوق نشان می‌دهد که طول نسبی پرش تناسب مستقیم با نسبت عمق ثانویه  $D_t$ ، عدد فرود جریان ورودی  $Fr_1$ ، عدد فرود در انتهای پرش  $Fr_2$  و شیب‌های  $S_1$  و  $S_2$  کف کانال دارد. با افزایش شیب مثبت  $S_1$  در پنجه پرش، مقدار  $L_{rr}$  افزایش می‌یابد. اگر مقدار  $S_2$  منفی باشد، مقدار  $L_{rr}$  در نتیجه افزایش  $S_2$  کاهش می‌یابد.

اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۴) پرش هیدرولیکی معکوس در حوضچه آرامش واگرای تدریجی با سطح مقطع مستطیلی را به صورت آزمایشگاهی و تئوریک مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که افزایش شیب بستر و افزایش زاویه واگرایی دیواره حوضچه باعث کاهش عمق ثانویه و طول نسبی پرش و افزایش افت انرژی نسبی در مقایسه با پرش هیدرولیکی کلاسیک می‌گردد. برای به دست آوردن معادله تئوریک پرش هیدرولیکی واگرای تدریجی روی شیب معکوس معادله پیوستگی، مومنوم و انرژی را همراه با فرضیات زیر به کار بردند:

- خطوط جریان شعاعی هستند.
- توزیع فشار در سطوح حجم کنترل هیدرواستاتیک می‌باشد.
- جریان آرام است.
- نیروی اصطکاک از مرزهای جامد قابل صرفنظر است.

- شکل پروفیل سطح پرش سهمی فرض گردید.

معادله مومنتوم بین مقاطع ۱ و ۲ در شکل ۲-۱۵ را به صورت زیر نوشتند:

$$F_x = F_{sx} + F_{Bx} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho u dV + \int_{cs} \rho u \vec{V} d\vec{A} \quad (74-2)$$

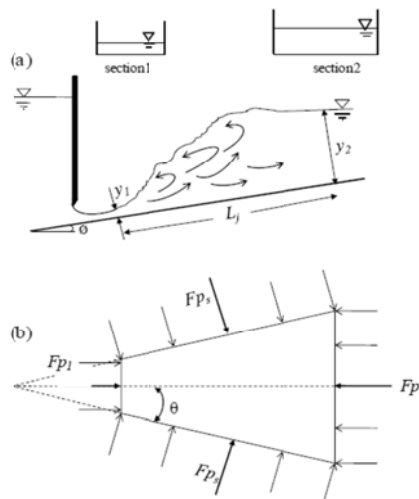
$$F_x = F_{P1x} + F_{P2x} + F_{Psx} + F_{Bx} = \int_{cs} \rho u \vec{V} d\vec{A} \quad (75-2)$$

نیروهای فشار هیدرواستاتیک به صورت زیر محاسبه گردید:

$$F_{P1x} = \int_0^{y_1} P dA = \int_0^{y_1} \gamma \cos \Phi y b_1 dy = \frac{1}{2} \gamma y_1^2 b_1 \cos \Phi \quad (76-2)$$

$$F_{P2x} = \int_0^{y_2} P dA = \int_0^{y_2} \gamma \cos \Phi y b_2 dy = \frac{1}{2} \gamma y_2^2 b_2 \cos \Phi \quad (77-2)$$

که در آن  $g$  وزن مخصوص آب،  $y$  عمق آب عمود بر سطح،  $b$  عرض کف،  $\Phi$  زاویه شیب کف نسبت به خط افق است و زیرنویس ۱ و ۲ به ترتیب به مقاطع بالادست و پایین دست پرش در جهت  $x$  اشاره دارد.



شکل ۲-۱۵- طرح شماتیک پرش هیدرولیکی در کانال واگرا با شیب معکوس (اسماعیلی و همکاران، ۲۰۱۴)

معادله پروفیل سطح آب به صورت زیر است:

$$\frac{y_x - y_1}{y_2 - y_1} = - \left( \frac{x}{L_j} \right)^2 + 2 \left( \frac{x}{L_j} \right) \quad (78-2)$$

نیروی وزن با انتگرال گیری از حجم کنترل به صورت زیر به دست آمد:

$$F_{Bx} = \left[ \gamma b_1 \int_0^{L_j} \int_0^y dy dx + 2\gamma \int_0^{L_j(b_2-b_1)} \int_0^{x/2L_j} \int_0^y dy dz dx \right] \sin \phi \quad (79-2)$$

$$F_{Bx} = \gamma L_j b_1 \left( \frac{1}{3} y_1 + \frac{2}{3} y_2 \right) \sin \phi + \gamma (b_2 - b_1) L_j \left( \frac{1}{12} y_1 + \frac{5}{12} y_2 \right) \sin \phi \quad (80-2)$$

نیروی کلی وارد بر دیواره‌های واگرای پرش در جهت x به صورت زیر است:

$$F_{P_{sx}} = 2F_{Ps} \sin \theta \quad (81-2)$$

$$F_{Ps} = \gamma \int_0^{L_{js}} \frac{y^2}{2} dx = \frac{\gamma}{2} \int_0^{L_{js}} \left[ 2 \left( \frac{x}{L_j} \right) - \left( \frac{x}{L_j} \right)^2 \right] (y_2 - y_1) + y_1 \Big]^2 dx \quad (82-2)$$

$$F_{Ps} = \gamma L_{js} \left( \frac{1}{2} y_1^2 + \frac{4}{15} (y_2 - y_1)^2 + \frac{2}{3} y_1 (y_2 - y_1) \right) = \gamma L_{js} \left( \frac{1}{5} y_1^2 + \frac{8}{15} y_2^2 - \frac{4}{15} y_1 y_2 \right) \quad (83-2)$$

که در آن  $L_{js} = L_j / \cos \theta$  می‌باشد. با جایگذاری در معادله مومنتوم، معادله زیر به دست می‌آید:

$$Y^3 K_1 + Y^2 K_2 + Y K_3 - 2Fr_1^2 = 0 \quad (84-2)$$

$$K_1 = \left( \frac{16L_j \tan \theta}{15b_1 \cos \phi} B - B^2 \right) \quad \text{که در آن:}$$

$$K_2 = \left( \frac{8L_j \tan \theta}{15b_1 \cos \phi} B - \frac{L_j \tan \theta}{y_1} \left( \frac{5}{6} B^2 + \frac{1}{2} B \right) \right) \quad (85-2)$$

$$K_3 = \left( B + \frac{2L_j \tan \theta}{5b_1 \cos \phi} B - \frac{L_j \tan \theta}{y_1} \left( \frac{1}{6} B^2 + \frac{1}{2} B \right) + 2BFr_1^2 \right) \quad (86-2)$$

$$B = \frac{b_2}{b_1}, Y = y_2/y_1 \quad (87-2)$$

معادله فوق معادله عمومی برای نسبت عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در کانال واگرای روی شیب معکوس است.

افت انرژی در پرش هیدرولیکی واگرای از معادلات پیوستگی و انرژی مخصوص به صورت زیر محاسبه گردید:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \left( y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left( y_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right) \quad (88-2)$$

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} = \frac{\left( y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left( y_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right)}{\left( y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right)} \quad (89-2)$$

$\Delta E$  و  $\frac{\Delta E}{E_1}$  به ترتیب افت انرژی و افت انرژی نسبی هستند.



با به کارگیری آنالیز ابعادی، مدل‌های رگرسیونی زیر را برای محاسبه نسبت عمق ثانویه و طول پرش ارائه دادند:

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.309 (S + 1)^{3.4542} (\theta + 1)^{-0.1197} (Fr_1^{0.5175}) \left(\frac{L_j}{y_1}\right)^{0.5444} + 1.4396 \quad (90-2)$$

$$\frac{L_j}{y_1} = 2.9607(S + 1)^{3.7214} (\theta + 1)^{-0.0774} (Fr_1^{1.4997}) \quad (91-2)$$

نتایج حاصل از شیب معکوس کف حوضچه آرامش عمدتاً شامل کاهش طول و ناپایداری پرش بوده است.

## ۲-۵- تاثیر به کارگیری موانع میانی

ایجاد زبری در بستر نیز از جمله تکنیک‌هایی است که جهت افزایش افت انرژی به کار رفته است. ویلیام سی حافظ<sup>۴۸</sup> و جی ارنست فلاک<sup>۴۹</sup> در سال ۱۹۸۴ مشخصه‌های پرش هیدرولیکی در بستر صاف و بسترهایی با زبری مصنوعی بین ۰ الی ۰/۹ را اندازه‌گیری نمودند و نشان دادند که زبری مرز، عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی را کاهش می‌دهد. محمدعلی (۱۹۹۱) در تحقیقات خود نشان داد که طول پرش هیدرولیکی بطور قابل ملاحظه‌ای با استفاده از زبری‌های مکعبی کاهش می‌یابد. الوبایدی و همکاران (۱۹۹۹) به بررسی آزمایشگاهی اثر اندازه نسبی و انحناهای بلوک‌های دارای انحنا در وجه بالادست بر اتلاف انرژی و کنترل پرش هیدرولیکی پرداخته‌اند و نتیجه گرفته‌اند بلوک‌های دارای انحنا عموماً در کاهش انرژی جنبشی پایین‌دست نسبت به بلوک‌های بدون انحنا مؤثرترند و باعث کاهش پتانسیل فرسایش پایین‌دست کانال می‌گردد. اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) به بررسی پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار برای محدوده‌ای از اعداد فرود بین ۴ الی ۱۰ پرداختند و مشاهده کردند که عمق ثانویه پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار کوچکتر از بستر صاف است و توضیح دادند که دلیل کاهش عمق ثانویه پرش، زیاد شدن تنش برشی بستر است که در بستر زبر در حدود ۱۰ برابر بستر صاف می‌باشد. طول پرش نیز در بستر موج‌دار نصف بستر صاف بدست آمد.

<sup>48</sup> William C. Hghes

<sup>49</sup> J.Ernest Flack

فرانچسکو گیسپه کارولو<sup>۵۰</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۷ ضمن بررسی آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی روی سطوح زبر افقی کاربرد بعضی روابط تجربی جهت تخمین طول پرش را مورد بررسی قرار داد. ایزدجو و شفافی بجستان (۲۰۰۷) با انجام ۴۲ آزمایش روی ۶ نوع بستر با زبری‌های ذوزنقه‌ای شکل در محدوده عدد فرود ۴ تا ۱۲ نشان دادند که تحت تأثیر زبری‌های با مقطع ذوزنقه‌ای، طول پرش ۵۰ درصد و عمق مزدوج پرش، ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. گوهری و فرهودی (۲۰۰۹) خصوصیات پرش هیدرولیکی را بر روی بسترهایی با زبری‌های نواری مستطیلی در محدوده اعداد فرود ۳ الی ۱۰ مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده کردند که عمق ثانویه پرش بر روی سطوح زبر در مقایسه با سطوح صاف کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد و این کاهش با افزایش فاصله بین زبری‌ها، شدت می‌یابد. همچنین پی بردند تغییر ارتفاع زبری‌ها اثر چندانی بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی ندارد. آنها نتیجه گرفتند که ضریب تنش برشی کف نیز بر روی بسترهای زبر به مراتب بیشتر از بسترهای صاف و در حدود ۹ برابر می‌باشد. شفافی بجستان و نیسی (۲۰۰۹) با انجام ۴۸ آزمایش در محدوده اعداد فرود بین ۴/۹ تا ۱۲/۴ روی مدل فیزیکی حوضچه آرامش با زبری‌های لوزی شکل مشاهده کردند که این زبری‌ها می‌توانند طول حوضچه را ۴۱ درصد و طول غلتاب را ۳۴ درصد کاهش دهند که در مقایسه با حوضچه‌های USBR و SAF طول پرش کمتر است. همچنین به طور متوسط ۲۴/۲ درصد کاهش در عمق مزدوج پرش حاصل می‌شود. نصر اصفهانی و شفافی (۲۰۱۲) اثر سطح زیر (بلوک‌ها) بر مشخصه‌های پرش هیدرولیکی در یک پایین افتادگی ناگهانی (پله منفی) را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی ایشان نشان داد که زبری سطح حوضچه آرامش می‌تواند طول پرش را تا میزان ۴۰ درصد کاهش دهد.

نتلتون و مک کورکودال (۱۹۸۹) اثر بلوک‌های میانی روی مشخصه‌های پرش هیدرولیکی واگرا را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها معادلات و منحنی‌های مختلفی برای طراحی اولیه حوضچه آرامش با انبساط تدریجی با بلوک‌های میانی پیشنهاد داده‌اند. پارامترهای طراحی مفروض در این تحقیق نسبت عمق

---

<sup>50</sup> Francesco Giuseppe Carollo

ثانویه،  $y_0$ ، طول پرش،  $L$ ، میانگین پروفیل سطح آب، دامنه موج سطحی و زاویه واگرایی مجاز  $\theta$  می‌باشد. این پارامترها به عنوان تابعی از عمق اولیه،  $y_1$ ، سرعت اولیه،  $V_1$ ، فاصله بلوکها از ابتدای پرش،  $x_b$ ، ارتفاع بلوکها،  $h_b$ ، فاصله شعاعی از ابتدای پرش،  $r_1$  و فاصله شعاعی تا انتهای پرش،  $r_2$  تعیین گردید.

$$x_{bo} = x_b/y_1, r_0 = r_2/r_1, Fr_1 = Q / (2\theta r_1 y_1 \sqrt{g y_1}), y_0 = y_2/y_1$$

و  $h_{bo} = h_b/y_1$  برای تعمیم دادن داده‌های پرش هیدرولیکی به کار رفته است:

از آنجایی که اثرات اصطکاک در مقایسه با اثرات هیدروستاتیک یا تشکیل درگ ناچیز بود، عدد رینولدز نادیده گرفته شده است. شکل استاندارد بلوکهای USBR به کار رفته است. انسداد عرضی کلی بلوکها برابر نصف عرض کمان حوضچه در محل بلوکها بوده است. نسبت ارتفاع به عرض به طول کف به طول تاج ۱: ۰/۸۳: ۱/۳۳: ۰/۳۳ بوده است. در بیشتر آزمایش‌ها بلوکها یک برآمدگی جریان یا قله<sup>۵۱</sup> ایجاد می‌کردند که با پایین افتادگی جریان در سطح آب همراه بود. انتهای پرش بعد از اولین پایین افتادگی (پشت قله جریان ناشی از بلوکها) جایی که سطح آب از  $y_1 + 0.95(y_2 - y_1)$  بیشتر می‌شد در نظر گرفته شد. دو پارامتر اصلاح شده تعریف گردید. اولین پارامتر موقعیت نسبی بلوکها نامگذاری شد  $R_{PB}$  و توسط رابطه زیر تعریف گردید:

$$R_{PB} = (r_2 - r_b) / (r_2 - r_1) = (r_0 - r_{bo}) / (r_0 - 1) \quad (۹۲-۲)$$

که از مقدار صفر وقتی که بلوکها در انتهای پرش قرار دارند تا مقدار یک وقتی که در ابتدای پرش قرار دارند تغییر می‌کند. پارامتر دوم انسداد نسبی بلوکها نامگذاری شد  $R_{BB}$  و توسط رابطه زیر تعریف گردید:

<sup>51</sup> hump

$$R_{BB} = \frac{h_b}{y_1 + (r_b - r_1) \left[ \frac{(y_2 - y_1)}{(r_2 - r_1)} \right]} \quad (93-2)$$

$$R_{BB} = \frac{h_{bo}}{1 + (y_o - 1) \left[ \frac{(r_{bo} - 1)}{(r_o - 1)} \right]} \quad (94-2)$$

که در آن  $r_{bo} = r_b / r_1$  است. این پارامتر مشابه  $h_{bo}$  است، با این تفاوت که  $h_b$  با فرض توسعه خطی از ابتدا تا انتهای پرش، بر میانگین عمق آب در محل بلوکها تقسیم شده است.

طول پرش بی بعد  $D_{JL}$  به صورت رابطه زیر تعریف گردید:

$$D_{JL} = (r_2 - r_1) / y_2 \quad (95-2)$$

رابطه طول پرش آزاد توسط خلیفه و مک کورکودال (۱۹۷۹) به صورت زیر ارائه گردیده است (نقل از نتلتون و مک کورکودال، ۱۹۸۹):

$$D_{JLfree} = 4.7 - 4.2 / Fr_1 \quad 1.2 < r_o < 1.85 \text{ و } 1.5 < Fr_1 < 9 \quad (96-2)$$

خلیفه متوجه شد که  $D_{JL}$  در مقادیر کمتر  $Fr_1$  کاهش می‌یابد. هرچند در حالت پرش اجباری  $D_{JL}$  در اعداد فرود ۳ الی ۹ تقریباً ثابت باقی می‌ماند. ایشان نتیجه گرفتند که اگر بلوکها در نیمه‌ی پایین دست حوضچه قرار داشته باشند، طول نسبی پرش در حوضچه آرامش شعاعی با بلوک ممکن است بزرگتر از پرش شعاعی آزاد باشد. علت این مساله که طول پرش با قرار دادن بلوکها به سمت انتهای پرش افزایش می‌یابد این بوده که بلوکها باعث منعکس شدن جت پایینی شده و باعث ایجاد یک موج سطحی می‌شوند که طول پرش تعریف شده توسط این محققین را افزایش داده است.

نسبت عمق ثانویه  $y_o$  با نسبت عمق ثانویه آزاد تجربی ارائه شده توسط خلیفه و مک کورکودال (۱۹۷۹) مرتبط گردید:

$$y_{ofree} = 0.3r_o + 0.65Fr_1 \left( 1 + 1/r_o \right) \quad (97-2)$$

و معادله زیر توسط ایشان ارائه گردید:

$$y_o = y_{ofree} (1 + R_{PB} Fr_1)^{-0.09571} \quad (98-2)$$

که این معادله تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد و خطای احتمالی معادله فوق در حدود  $0.4Iy_1$  است.

رنگا راجو و همکاران<sup>52</sup> (۱۹۸۰) به تحلیل جریان عبوری از بلوکهای میانی و آبپایه انتهایی پرداختند و روابطی برای محاسبه نیروی درگ اعمال شده بر بلوکهای میانی و آبپایه انتهایی ارائه دادند. ایشان با به کارگیری معادله مومنوم بین مقاطع ۱ و ۲ شکل ۲۰-۲ روابط زیر را ارائه نمودند:

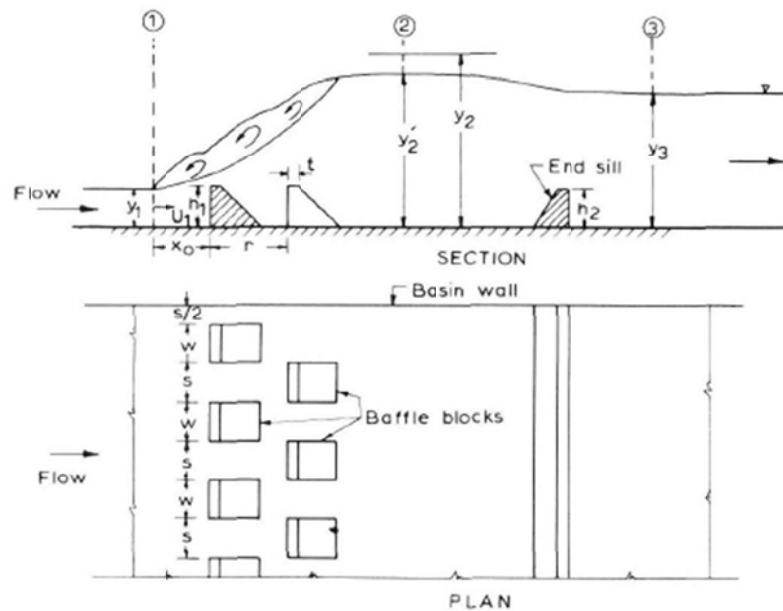
$$\frac{F_{B1}}{F_2} = \left( \frac{y_1}{y_2} \right)^2 \left[ 1 + 2(Fr_1)^2 - 2(Fr_1)^2 \left( \frac{y_1}{y_2} \right) \right] - 1 \quad (99-2)$$

که در آن  $F_{B1}$  نیروی درگ وارد بر بلوکهای میانی در واحد عرض کانال و  $F_2 = \frac{1}{2} \gamma y_2^2$  می باشد.

$$\frac{F_{B2}}{F_3} = \left( \frac{y_2}{y_3} \right) - 1 - 2 \left[ (Fr_3)^2 \left( 1 - \frac{y_3}{y_2} \right) \right] \quad (100-2)$$

که در آن نیروی درگ وارد بر آستانه انتهایی در واحد عرض کانال و  $F_3 = \frac{1}{2} \gamma y_3^2$  می باشد.  $y_3$  در شکل ۱۶-۲ نشان داده شده اند.

<sup>52</sup> Ranga Raju et al.



شکل ۲-۱۶- طرح شماتیک بلوکهای میانی و آبپایه انتهایی (رنگا راجو و همکاران ۱۹۸۰)

دستورانی و نصرآبادی (۱۳۹۰) اثر توام زبری بستر و شیب معکوس کانال‌های مستطیلی را بر مشخصات پرش هیدرولیکی بررسی کردند. آزمایش‌ها در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۶، شیب‌های معکوس ۰، ۰/۰۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ و چهار ضریب زبری ۰/۰۱۱۴، ۰/۰۱۴۵، ۰/۰۱۷۲ و ۰/۰۱۹۱ صورت گرفته است. نتایج نشان داد که با افزایش شیب معکوس نسبت اعماق مزدوج و طول پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد و افزایش زبری کف کانال به دلیل افزایش تنش برشی، باعث تشدید تاثیر شیب معکوس روی طول پرش می‌شود. پارسامهر و همکارانش (۱۳۹۲) به بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بستر زیر با زبری‌های نیم استوانه‌ای شکل و آبپایه‌ی مستطیلی بر روی دو بستر با شیب معکوس ۱ و ۱/۵ درصد و بستر افقی پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیدند که طول پرش هیدرولیکی در شیب معکوس ۱/۵ درصد با وجود آبپایه به‌طور متوسط ۴۶ درصد و در حالت پرش بر روی بستر زیر به‌طور متوسط ۴۹ درصد کاهش می‌یابد. همچنین عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در شیب معکوس ۱/۵ درصد با وجود آبپایه حداکثر ۲۴/۴ درصد و بر روی بستر زیر حداکثر ۴۴ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش یافت.

ترکیبی از به کارگیری شیب معکوس و زبری بستر نیز توسط سامان نیکمهر و علی تابع بردار در سال ۲۰۱۰ مورد بررسی قرار گرفت و نشان دادند که نسبت عمق ثانویه و طول پرش روی سطوح صاف برای اعداد فرود و شیب‌های مشابه بیشتر و افت انرژی کمتر از سطح زبر بوده است (نیکمهر، ۲۰۱۰). خلاصه ای از کاربرد تکنیکهای ذکر شده به صورت تنها و ترکیبی در جدول شماره ۴ آمده است. نتایج حاصل از به کارگیری موانع میانی در حوضچه آرامش عمدتاً کاهش قابل توجه نسبت عمق ثانویه و کاهش طول پرش و در نتیجه کاهش طول حوضچه بوده است.

جدول ۲-۲: سوابق تحقیق در خصوص خصوصیات هیدرولیکی پرش هیدرولیکی

نام محقق	سال	زبری	شیب کف معکوس	شیب دیواره در پلان	استفاده از آبپایه	نتیجه
بیرامی-چمنی	۲۰۱۰		✓			کاهش اتلاف انرژی، کاهش طول پرش
William C. Hughes	۱۹۸۴	✓				کاهش طول پرش
Francesco Giuseppe	۲۰۰۷	✓				بررسی کاربرد بعضی روابط تجربی
سامان نیکمهر-علی تابع بردار	۲۰۱۰	✓	✓			افزایش اتلاف انرژی کاهش طول پرش
S. A. Ead	۲۰۰۲	✓				افزایش اتلاف انرژی کاهش طول پرش
Iwao Ohtsu	۱۹۹۱		✓			پیشنهاد معادلات کاربردی برای طول پرش
J. A. Mccorquodale	۱۹۹۴		✓			ارائه تئوری جهت تعیین طول پرش
M. H. Omid	۲۰۱۰			✓	✓	کاهش طول پرش
Jen-Yan Chen	۲۰۱۳			✓		افزایش اتلاف انرژی
Willi H. Hager	۱۹۹۱		✓		✓	اطلاعاتی جهت طراحی حوضچه آرامش در کف شیبدار



## ۲-۶- بررسی عددی در زمینه تحقیق

نرم افزار Flow3D توانایی شبیه سازی عددی الگوی جریان و رسوب در اطراف سازه های هیدرولیکی مختلف را دارا می باشد و شامل مدل های فیزیکی مختلف می باشد که عبارتند از: آب های کم عمق، کاویتاسیون، آشفتگی، آبخستگی، کشش سطحی، پوشش متخلخل ذرات و ... . از این مدل ها در زمینه های ریخته گری مواد، مهندسی فرآیند، طراحی تزریق های مرکب، تولیدات مصرفی، هیدرولیک مهندسی محیط زیست، هوافضا، علوم دریایی، نفت، گاز و ... استفاده می شود. این نرم افزار از روش حجم سیال<sup>۵۳</sup> برای حل معادله های حاکم بر جریان در شبکه بندی منظم قایم<sup>۵۴</sup> استفاده می کند. شکل معادلات گسسته در این روش مانند معادله های گسسته در روش تفاضل محدود بوده و بر این اساس نرم افزار Flow 3D از روش های دقت مرتبه اول و دوم در حل معادله ها استفاده می کند. این نرم افزار قابلیت به کارگیری ۶ مدل آشفتگی طول اختلاط پرندتل<sup>۵۵</sup>، تک معادله ای، دو معادله ای  $k-\omega$ ،  $k-\epsilon$  و RNG و مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ<sup>۵۶</sup> (LES) را دارد. در جدول ۲-۳، ویژگی های نرم افزار به اختصار نمایش داده شده است.

جدول ۲-۳- معرفی نرم افزار Flow3D

نام نرم افزار	Flow3D
زمینه کاری	یک نرم افزار قوی در زمینه CFD می باشد. این نرم افزار برای کمک به تحقیق در زمینه رفتار دینامیکی مایعات و گازها در موارد کاربردی وسیع طراحی شده است.
قوانین بنیادی	جرم، مومنتوم و بقاء انرژی
	پایه های پل- هوادهی در پرش هیدرولیکی- سرریز

<sup>53</sup> Volume of Fluid

<sup>54</sup> Orthogonal

<sup>55</sup> Prandtl mixing length model

<sup>56</sup> Large eddy simulation

کاربردهای <i>Flow3D</i> در زمینه مهندسی آب	دایره‌ای- هوادهی در سرریزها- شکست سد- پارشال فلوم- آبشستگی- جریان بر روی یک پلکان <sup>۵۷</sup> - جریان‌های با عمق کم- جریان در کانال‌های کنترل پرش هیدرولیکی- موج‌های کم‌ارتفاع <sup>۵۸</sup> - دریچه‌های کشویی- جریان سرریز
سطح آزاد	حداصل بین گاز و مایع همان سطح آزاد است. در <i>Flow3D</i> سطح آزاد با تکنیک حجم سیال <sup>۵۹</sup> مدل می‌شود. روش حجم سیال شامل سه جزء است: نمایش موقعیت سطح- شبکه‌بندی- شرایط مرزی سطح
تکنیک محاسبات	<i>Finite Difference – Finite Volume</i>
سیستم‌های مختصات	معادلات دیفرانسیلی که باید حل شود در قالب مختصات کارتیزین $(x,y,z)$ نوشته می‌شود. برای مختصات استوانه‌ای $(z,\theta,r)$ مختصات $x$ به صورت شعاعی و مختصات $y$ به صورت مختصات زاویه‌ای
مدل‌های آشفتگی	در <i>Flow3D</i> پنج مدل آشفتگی ارائه شده است: طول اختلاط پرانتل <sup>۶۰</sup> ، یک معادله <sup>۶۱</sup> ، دو معادله $k-\varepsilon$ <sup>۶۲</sup> ، مدل‌های $k-\varepsilon$ RNG <sup>۶۳</sup> ، مدل $k-\omega$ و مدل شبیه‌سازی بزرگ <sup>۶۴</sup>
مدل‌سازی	1-General 2-Physics 3-Fluids 4-Meshing & Geometry 5-Boundaries 6-Initial 7-Output 8-Numerics
General	زمان اتمام <sup>۶۵</sup> - تعداد سیالات - حالت جریان <sup>۶۶</sup> (که شامل حالت تراکم‌پذیر یا تراکم‌ناپذیر است).
Physics	شامل بخش‌هایی نظیر ویسکوزیته که شامل حالت‌های سیال ویسکوز و غیرویسکوز است، شتاب ثقل زمین <sup>۶۷</sup> ، که در

<sup>57</sup> - Step

<sup>58</sup> - Shoding Wave

<sup>59</sup> - Volume of Fluid

<sup>60</sup> - Prandtl mixing length

<sup>61</sup> - One-equation turbulent energy model

<sup>62</sup> - Two equation  $(k-\varepsilon)$  model

<sup>63</sup> - Renormalized group model(RNG)

<sup>64</sup> - Large Eddy Simulation Models

<sup>65</sup> - Finish Time

<sup>66</sup> - Flow Mode

<sup>67</sup> - Gravity

---

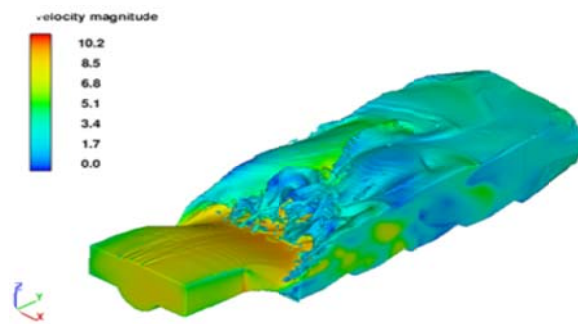
جهت قائم مختصات<sup>۶۸</sup> برابر ۹/۸۱- وارد می‌شود، کشش سطحی<sup>۶۹</sup>، حفره‌زدایی<sup>۷۰</sup>، آب‌شستگی رسوب<sup>۷۱</sup> و ...

---

Fluids  
ویسکوزیته<sup>۷۲</sup>، جرم حجمی<sup>۷۳</sup>، تراکم‌پذیری<sup>۷۴</sup>، مشخصات گرمایی<sup>۷۵</sup> و آحاد<sup>۷۶</sup>

---

از جمله توانایی‌های مدل Flow3D می‌توان به شبیه‌سازی با نمایش شکل مدل اشاره نمود که در شکل ۱۷-۲ نمونه‌ای از آن نمایش داده شده است:



شکل ۱۷-۲ مدل‌سازی پرش هیدرولیکی

نرم‌افزار FLOW-3D حل عددی معادلات ناویراستوکس را با استفاده از روش تفاضل محدود (و یا حجم محدود) انجام می‌دهد. مناطقی که جریان در آن وجود دارد توسط شبکه‌های مستطیلی ثابت شده‌اند. هر سلول با مقدار متوسط متغیرهای محلی در ارتباط است و همه متغیرها به جز سرعت در مراکز سلول‌ها ارائه شده‌اند. سرعت برای هر سلول در جلوی آن داده شده است (آرایش شبکه متناوب). بسیاری از عبارات در معادلات به صورت صریح حل می‌شوند. در این فرآیند طرح محاسبات ساده و کارآمدی برای بسیاری از اهداف در نظر گرفته شده است، اما نیاز به استفاده از بازه‌های زمانی

---

<sup>68</sup> - Z-Direction

<sup>69</sup> - Surface Tension

<sup>70</sup> - Cavitation

<sup>71</sup> - Sediment Scour

<sup>72</sup> - Viscosity

<sup>73</sup> - Density

<sup>74</sup> - Compressibility

<sup>75</sup> - Thermal properties

<sup>76</sup> - Units name

محدود برای حفظ نتایج محاسباتی با ثبات و دقیق وجود دارد.

دینامیک سیالاتی محاسباتی<sup>۷۷</sup>، روشی برای شبیه‌سازی جریان است که در آن معادله‌های استاندارد جریان مانند معادله‌های ناویه-استوکس و معادله پیوستگی قابل حل برای تمام فضای محاسبه‌ها می‌باشد. فرم کلی معادله پیوستگی به صورت شکل زیر بیان می‌شود:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (۲)$$

(۱۰۱)

در آن VF ضریب حجم آزاد به سمت جریان و مقدار R که در رابطه بالا ضریب مربوط به مختصات به صورت کارتیزین و یا استوانه‌ای می‌باشد. اولین عبارت در سمت راست معادله پیوستگی مربوط به انتشار تلاطم بوده و به صورت زیر قابل تعریف می‌باشد:

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x}(v_\rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x}) + R \frac{\partial}{\partial y}(v_\rho A_y \frac{\partial \rho}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(v_\rho A_z \frac{\partial \rho}{\partial z}) + \xi \frac{\rho v_\rho A_x}{x} \quad (۲)$$

(۱۰۲)

عبارت دوم در سمت راست رابطه ۲-۱۰۰ بیانگر منشا دانسیته است که برای مدل‌سازی تزریق توده مواد اهمیت دارد:

$$\frac{V_F}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u A_x}{\partial x} + R \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} + \xi \frac{u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (۲)$$

(۱۰۳)

همچنین فرم کلی معادله‌های حرکت (مومنوم) در حالت سه بعدی به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y u v}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \left( R \frac{\partial P}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \quad (۲)$$

(۱۰۴)

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s)$$

که در رابطه‌های بالا،  $G_x$ ،  $G_y$  و  $G_z$  مربوط به شتاب حجمی می‌باشند. پارامترهای  $f_x$ ،  $f_y$  و  $f_z$

<sup>77</sup> Computational Fluid Dynamic

شتاب‌های ناشی از جریان‌های لزج بوده و  $b_x$ ،  $b_y$  و  $b_z$  نیز شامل روابط مربوط به افت در محیط‌های متخلخل هستند.

در ادامه برخی از کارهای انجام شده با این نرم‌افزار بیان می‌شود:

گونزالز و بومباردلی<sup>۷۸</sup> (۲۰۰۵)، در یک شبیه‌سازی عددی با استفاده از Flow3D به بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی سطح صاف در دو حالت شبکه‌بندی ریز و شبکه‌بندی درشت بصورت دوبعدی و سه‌بعدی پرداختند.

صباغ یزدی و همکارانش (۲۰۰۷)، در یک مدل سه‌بعدی به ارزیابی مدل‌های تلاطمی  $k-\epsilon$  و RNG  $k-\epsilon$  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. مقایسه نتایج نشان داد که نرم‌افزار قادر به پیش‌بینی توزیع عمقی سرعت در پرش هیدرولیکی است و همچنین در این آزمون مدل آشفتگی RNG در مقایسه با  $k-\epsilon$  نتایج مناسبتری را ارائه کرده است.

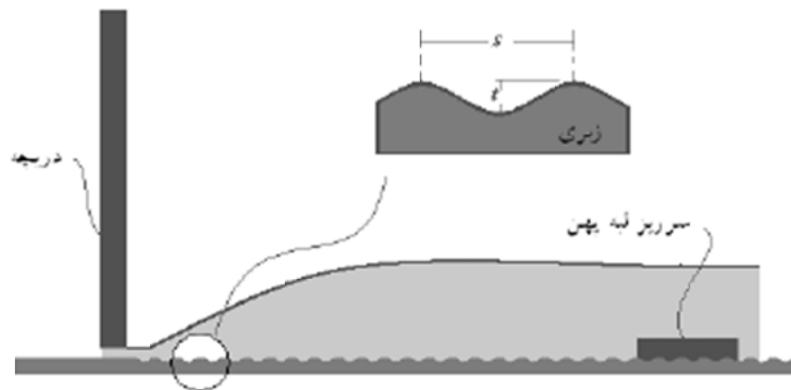
کاهه و دهقانی (۱۳۹۲)، مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$  و RNG  $k-\epsilon$  را جهت تخمین پروفیل‌های سرعت در پرش هیدرولیکی بر روی سطوح موج‌دار مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. نتایج، توانایی مدل RNG  $k-\epsilon$  در تخمین عمق ثانویه، طول پرش و توزیع سرعت را به خوبی نشان داد. ضریب تنش برشی برآورد شده توسط مدل عددی به نتایج بدست آمده از بررسی‌های آزمایشگاهی بسیار نزدیک بوده و به طور متوسط ۸ برابر مقدار آن در پرش هیدرولیکی بر روی سطوح صاف برآورد شد. با توجه به نتایج بدست آمده، مدل آشفتگی RNG  $k-\epsilon$  در مقایسه با مدل  $k-\epsilon$  در مدل‌سازی پرش هیدرولیکی بر روی سطوح موج‌دار از دقت بالایی برخوردار است.

ایشان برای شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی روی سطح‌های موج‌دار، ابتدا با استفاده از نرم افزار اتوكد یک صفحه موج‌دار سینوسی با طول موج  $s=68$  میلیمتر و ارتفاع برآمدگی  $t=13$  میلیمتر ایجاد

---

<sup>78</sup> - Gonzales & Bombardelli

نمودند (شکل ۲- ۱۸). در مدل‌سازی برآمدگی‌ها طوری بر روی بستر قرار گرفتند که رقوم تاج برآمدگی‌ها هم ارتفاع با کف کانال اصلی باشد. جریان فوق بحرانی با استفاده از یک دریچه در ابتدای کانال مدل‌سازی شده ایجاد گردید.

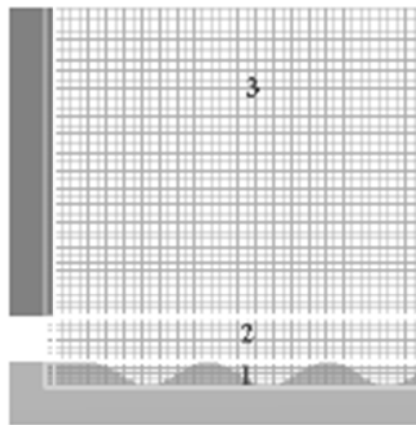


شکل ۲- ۱۸- مدل شبیه‌سازی شده از بستر موج و اجزای آن ( کاهه و دهقانی ۱۳۹۱)

در شبیه‌سازی عددی به منظور ایجاد پرش هیدرولیکی پایدار یک سرریز لبه پهن در انتهای صفحه موج‌دار نصب گردید و ارتفاع مناسب آن در هر آزمایش و برای شرایط مختلف ورودی جریان با چندین بار تکرار تعیین شد. به طور کلی ۸ آزمایش عددی از پرش هیدرولیکی به صورت دو بعدی در شرایط مختلف اعداد فرود بر روی این صفحه موج شبیه‌سازی شد و نتایج به دست آمده با نتایج و رابطه‌های تجربی ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف مورد مقایسه قرار گرفت. یکی از مهمترین نکاتی که باید در شبیه‌سازی عددی مورد توجه و رعایت قرار داد، شبکه بندی مناسب برای حل دقیق معادله‌های حاکم است. برای این منظور ابعاد شبکه ایجاد شده در راستای عمق جریان در ۳ قسمت تعریف گردید: ۱- فضایی که برآمدگی‌های بستر را در بر می‌گیرد، ۲- فضایی که جت ورودی را در بر می‌گیرد و ۳- بخشی که پرش هیدرولیکی و جریان گردابی ناشی از آن در این فضا قرار می‌گیرد (شکل ۲- ۱۹). شرایط مرزی مورد استفاده در مدل و محدوده آن در شکل ۲- ۲۰ ارائه گردیده است، به طوری که مرز بالادست به صورت سرعت ثابت، مرز پایین دست به صورت خروجی، مرز در بستر به صورت دیواره و مرز سطح آب به صورت تقارن انتخاب شده است. شرایط اولیه در شبیه‌سازی عددی بسته به موقعیت

و بر اساس زمان اجرای مدل در هر یک از شبیه‌سازی‌ها متفاوت و به صورت عمق آب اولیه و ثابت در شبکه جریان ایجاد شده انتخاب گردید.

در همه آزمایش‌های عددی صورت گرفته توسط کاهه و دهقانی ابعاد شبکه طوری تعیین شده که پارامترهای کنترل شبکه مانند حداکثر نسبت ابعاد شبکه<sup>۷۹</sup> در راستای طولی و عمقی و ضریب نسبت ابعاد شبکه<sup>۸۰</sup> در راستاهای مختلف و در مجاورت یکدیگر مناسب انتخاب شده باشد. برای نتایج دقیق و موثر، مقدار هریک از دو پارامتر بالا باید به عدد ۱ نزدیک بوده و مقدار نسبت ابعاد شبکه در مجاور یکدیگر از ۱/۲۵ و همچنین نسبت ابعاد شبکه در راستاهای مختلف از ۳ نباید بیشتر باشد. نکته دیگری که در شبیه‌سازی‌های عددی بسیار مهم است زمان اجرای مدل تا رسیدن به یک مقدار مناسب از نظر همگرایی خطای ناشی از حل عددی و پایداری و ماندگاری جریان است که برای این منظور در همه آزمایش‌های شبیه‌سازی شده زمان اجرای مدل بین ۱۲۰-۱۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد.



شکل ۲-۱۹-طبقه بندی ارتفاعی از شبکه مورد مطالعه (کاهه و دهقانی ۱۳۹۲)

<sup>79</sup> Maximum Aspect Ratio

<sup>80</sup> Maximum Adjacent Cell Size Ratio



شکل ۲-۲۰- شرایط مرزی مورد استفاده در مدلسازی (کاهه و دهقانی ۱۳۹۲)

کاستیلو و همکاران (۲۰۱۴) پرفش هیدرولیکی آزاد و مستغرق را در یک کانال مستطیلی به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. عمق آب، طول پرفش هیدرولیکی و پروفیل‌های سرعت در مدل عددی را با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند. مدل‌سازی عددی را توسط انسیس، اپن فوم و فلوتری دی و با انتخاب مدل‌های آشفتگی دو معادله ای  $k-\epsilon$  و  $k-\omega$  انجام داده‌اند. ایشان اظهار داشتند مدل  $k-\epsilon$  پیش‌بینی دقیقی از ناحیه جریان مجدد<sup>۸۱</sup> در نیمه دوم پرفش نداشته و مدل  $k-\omega$  تطابق بهتری از نتایج در این ناحیه به دست می‌دهد.

گویزین و همکاران<sup>۸۲</sup> (۲۰۰۳) مدلسازی لایه مرزی در شرایط موج ترکیبی و جدایی جریان آشفته و اثرات تاخیر فاز را در حالت یک بعدی قائم انجام دادند. ایشان مدل انتقالی  $k-w$  جدیدی برای شرایط جدایی جریان آشفته تحت گرادیان فشار معکوس معرفی کردند و ثابت‌های انتقالی و آشفتگی در رابطه اولیه مدل انتقال  $k-w$  ویلکاکس را تغییر دادند. تغییر ضرایب با مقایسه با محاسبات DNS یک جریان نوسانی خالص در یک کف صاف در رژیم انتقالی آشفته - لایه‌ای پیشنهاد گردید ( $Re=7.7 \times 10^5$ ). سپس مدل جدید با مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی جنسن و همکاران<sup>۸۳</sup> (۱۹۸۱) برای اعداد رینولدز بین  $3.3 \times 10^4$  الی  $6 \times 10^6$  صحت سنجی گردید.

<sup>81</sup> Recirculation

<sup>82</sup> Guizien et al.

<sup>83</sup> Jensen et al.



قرنجیک و قدری<sup>84</sup> (۱۹۹۱) معادلات بوسینسک جریان غير آرام یک بعدی متغیر سریع را به صورت عددی انتگرال گیری کردند تا جریان‌های فوق بحرانی، زیر بحرانی و تشکیل پرش هیدرولیکی در یک کانال مستطیلی با شیب کف کم را شبیه‌سازی کنند. بدین منظور مدل‌های تفاضل محدود صریح مک کورمک (دقت مرتبه دو مکانی و زمانی) و دو - چهار (دقت مرتبه دو مکانی و مرتبه چهار زمانی) برای حل معادلات حاکم با شرایط انتهایی خاص تا رسیدن به شرایط پایدار به کار گرفتند. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان داد که تطابق خوبی در مدل مرتبه چهار تفاضل محدود مشاهده می‌شود در صورتیکه مدل مرتبه دو نمی‌تواند به دقت محل تشکیل پرش را پیش‌بینی کند. شبیه‌سازی ایشان نشان داد ترم بوسینسک اثر ناچیزی بر تعیین محل پرش هیدرولیکی دارد.

با توجه به نتایج مطلوب به دست آمده از مدلسازی عددی توسط محققین، و با هدف پیش‌بینی نتایج در شیب و واگرایی‌هایی که آزمایش‌ها در آن مقادیر انجام نشده، مدلسازی عددی سه بعدی چندین مدل آزمایشگاهی انجام خواهد شد و نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

همانگونه که ملاحظه گردید تا کنون تکنیک‌های متعددی جهت افزایش افت انرژی، کاهش طول و عمق ثانویه در پرش هیدرولیکی به کار رفته است. ترکیبی از این تکنیک‌ها در سال‌های اخیر در جهت بهینه نمودن طرح حوضچه آرامش بسیار مورد توجه محققین بوده است. با توجه به نتایج قابل قبول استفاده از موانع، واگرایی جریان، شیب معکوس در افزایش اتلاف انرژی، کاهش طول پرش و عمق ثانویه، در مطالعه حاضر، پرش هیدرولیکی واگرای معکوس با به کارگیری بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است و اثر میزان واگرایی دیواره‌های کانال، شیب کف معکوس و چیدمان متفاوت بلوک‌های میانی بر مشخصه‌های پرش هیدرولیکی بررسی گردید.

---

<sup>84</sup> Gharanjik and Ghaudhry



## فصل ۳

### مواد و روشها

## ۳-۱ مقدمه

از آنجایی که اساس این پژوهش مطالعه آزمایشگاهی است، به منظور بررسی شرایط و خصوصیات پرش هیدرولیکی واگرا در حوضچه با شیب کف معکوس و به کارگیری بلوک‌های اتلاف کننده انرژی، یک مدل آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. مشخصات اجزاء این مدل که در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان احداث گردید، در بخشهای مختلف این فصل تشریح خواهد شد.

هدف از ساخت مدل آزمایشگاهی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت، به شرح زیر می‌باشد:

- بررسی عملی خصوصیات پرش هیدرولیکی واگرا در حوضچه با شیب کف معکوس و به کارگیری بلوک‌های اتلاف کننده انرژی
- بررسی روند تغییرات پارامترهای مهم پرش که شامل نسبت عمق ثانویه، افت نسبی انرژی و طول نسبی پرش می‌باشد با تغییر در مشخصات مقطع، جهت و محل قرارگیری بلوک‌ها
- ارزیابی نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی به دست آمده از نرم افزار Flow3D
- بررسی صحت فرضیات به کار رفته در مدلسازی عددی

## ۳-۲ تجهیزات آزمایشگاهی

با توجه به اهداف مورد نظر در انجام آزمایش‌ها، مدل آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. آزمایش‌ها در یک فلوم مستطیلی با دیواره‌های شفاف پلکسی گلاس قائم به طول ۱۵ متر، عرض کف ۱ متر، عمق ۸۵ سانتیمتر و دریچه کشویی لبه تیز با بازشدگی ثابت ۳ سانتیمتر در بالا دست کانال انجام شد. آب از مخزن زیر فلوم آزمایشگاه پمپاژ گردیده و توسط لوله‌ای با شیر کنترل به مخزن تامین کننده ارتفاع و سپس مخزن آرام کننده هدایت شده و از طریق یک تبدیل جریان وارد فلوم می‌گردید. جریان خروجی از فلوم وارد مخزن پایین دست می‌گردید و توسط لوله‌هایی مجدداً وارد پمپ می‌گردید. حوضچه آرامش بلافاصله بعد از دریچه کشویی بالادست قرار داشت. طرح و شمای فلوم آزمایشگاهی

در شکل‌های (۱-۳) و (۲-۳) آورده شده است. در شکل (۳-۳) نمایی از ایستگاه پمپاژ مورد استفاده

مشاهده می‌گردد. اجزای مدل ساخته شده و تجهیزات مرتبط با آن عبارتند از:

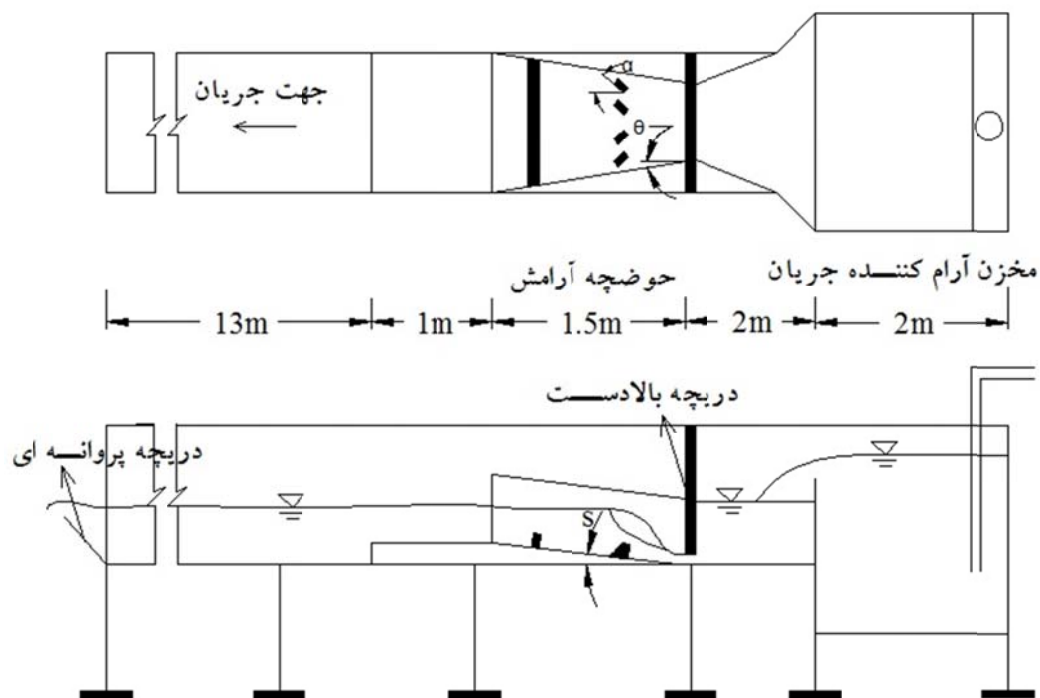
- مخزن آرام کننده جریان و مخزن تامین ارتفاع

- حوضچه آرامش و کانال پایین دست

- سیستم‌های اندازه‌گیری

- سیستم کنترل پرش هیدرولیکی

در ادامه به نحوه طراحی و بکارگیری اجزای یادشده می‌پردازیم.



شکل ۱-۳ نمایی شماتیک از کانال آزمایشگاهی و مدل حوضچه آرامش



شکل ۲-۳ نمای کلی از مدل آزمایشگاهی



شکل ۳-۳: ایستگاه پمپاژ

### ۳-۲-۱- مخزن اولیه بالادست و مخزن تامین ارتفاع

به منظور آرام کردن جریان ورودی به مدل آزمایشگاهی، مخزن آرام کننده اولیه با ابعاد ۱ متر عرض، ۱ متر طول و ۸۵ سانتیمتر ارتفاع در نظر گرفته شد (شکل ۳-۴). جریان آب ورودی به مدل توسط لوله‌های سیستم آزمایشگاه برداشت شده و مجدداً وارد مخزن اولیه می‌شود. جریان خروجی از پمپ ابتدا وارد مخزن تامین ارتفاع شده، پس از عبور از یک صفحه مشبک وارد مخزن آرام کننده می‌شود. این صفحه مشبک برای آرام کردن جریان ورودی قبل از رسیدن به دریچه کشویی بالادست، بلافاصله بعد از مخزن تامین ارتفاع، به ابعاد ۱ متر عرض و ۸۵ سانتیمتر ارتفاع که در آن سوراخ‌هایی به قطر ۱ سانتیمتر قرار گرفته بود. هدف از ساخت این مخزن، تامین ارتفاع استاتیک آب جهت تشکیل پرش با عدد فرود اولیه مورد نظر بود. با توجه به حداکثر عدد فرود و عمق اولیه مورد انتظار، انرژی جریان محاسبه و ارتفاع مخزن بررسی گردید که بتواند انرژی اولیه مورد نیاز را برای شرایط یاد شده داشته باشد. خلاصه‌ای از محاسبات صورت گرفته برای بررسی ارتفاع مخزن به شرح زیر است.

با توجه به اهداف مورد نظر در انجام آزمایش‌ها، حداکثر عمق اولیه برای محدوده پرش‌های هیدرولیکی مورد نظر ۲/۲ سانتیمتر و حداکثر عدد فرود اولیه ۸/۵ در نظر گرفته شد. همچنین برای تعیین مشخصات مقطع جریان جهت محاسبه مساحت آن، حداکثر عرض کف ۴۸ سانتیمتر تعیین گردید. بنابراین با توجه به مقادیر یاد شده، مشخصات مخزن تامین ارتفاع به صورت زیر بررسی گردید.

$$A = y \times b_1 = 2.2 \times 48 = 105.6 \text{ cm}^2$$

$$T = b_1 = 48 \text{ cm}$$

از آنجاییکه  $Fr_1^2 = \frac{Q^2 T}{A^3 g}$  می‌باشد، مقدار دبی جریان برای حداکثر عدد فرود که برابر ۸/۵ بود برابر خواهد شد با:

$$Q = \sqrt{\frac{A^3 g Fr_1^2}{T}} = \sqrt{\frac{0.01056^3 \times 9.81 \times 8.5^2}{0.48}} = 0.00417 \text{ m}^3/\text{s}$$

با توجه به معادله انرژی مخصوص، میزان حداکثر انرژی مخصوص اولیه برای شرایط یاد شده برابر خواهد شد با:

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2} = 0.022 + \frac{0.0417^2}{2 \times 9.81 \times 0.01056^2} = 0.82 \text{ m}$$

با توجه به میزان ارتفاع آزاد لازم برای جریان، ارتفاع کل مخزن ۱/۵ متر برای رسیدن به مقادیر ذکر شده مناسب بود.



شکل ۳-۴: مخزن آرام کننده جریان

در انتهای مخزن آرام کننده جریان با نصب دریچه کشویی، شرایط ایجاد ارتفاع اولیه فراهم گردید. از آنجا که حداکثر عمق اولیه قابل انتظار برابر ۲/۲ سانتیمتر بود، با در نظر گرفتن ضریب انقباض ۰/۶۰۶ میزان بازشدگی دریچه ۳ سانتیمتر تعیین شد.

### ۳-۲-۲- حوضچه آرامش واگرا و کانال پایین دست

حوضچه آرامشی که در این تحقیق طراحی و ساخته شد، به صورت یک کانال واگرا با شیب کف معکوس به همراه بلوک‌های اتلاف کننده انرژی و آبپایه انتهایی بود. دیواره‌ها از جنس تفلون و پلکسی



گلاس و کف از جنس فلز و بلوک‌ها از جنس تفلون ساخته شد. مراحل طراحی حوضچه و اجزای آن در زیر تشریح گردیده است.

### ۳-۲-۲-۱- تعیین طول حوضچه آرامش

برای محاسبه طول حوضچه آرامش، با استفاده از روابطی که برای طول نسبی پرش هیدرولیکی در مقطع واگرا ارائه گردیده است (اسماعیلی ۲۰۱۴)، برای حداکثر عمق و عدد فرود اولیه که مقادیر آنها در قسمت‌های قبل آورده شد، طول حوضچه آرامش محاسبه گردید. خلاصه‌ای از محاسبات مربوط به طول حوضچه آرامش به شرح زیر است:

$$\frac{L_j}{y_1} = 2.9607 (S + 1)^{3.7214} (\theta + 1)^{-0.0774} (Fr_1^{1.4997})$$

$$L_j = 144 \text{ cm}$$

بنابراین طول پرش قابل انتظار در حوضچه آرامش برابر ۱۴۴ سانتیمتر می‌باشد. از آنجایی که با استناد به نتایجی که از تحقیقات مربوط به تاثیر واگرایی، شیب کف معکوس و بلوک‌های اتلاف کننده انرژی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی بدست آمده است، این عوامل موجب کاهش طول پرش می‌شود، لذا طول حوضچه آرامش در نهایت ۱/۵ متر انتخاب گردید.

### ۳-۲-۲-۲- تعیین عرض و عمق حوضچه آرامش

برای طراحی حوضچه آرامش عرض کف اولیه حوضچه ۴۸ سانتیمتر تعیین شد. سپس با توجه به حداکثر عدد فرود و عمق اولیه مورد انتظار که در قسمت مربوط به بررسی مخزن تامین ارتفاع به آن اشاره گردید، عمق ثانویه حوضچه آرامش از معادله نسبت عمق ثانویه برای مقطع واگرا با شیب کف معکوس (معادله ۲-۹۰) محاسبه گردید. در نهایت با اضافه کردن ارتفاع آزاد به عمق ثانویه محاسبه شده، عمق کل حوضچه محاسبه گردید. خلاصه‌ای از محاسبات مربوط به عمق حوضچه آرامش به شرح زیر می‌باشد.

$$y_1 = 2.2 \text{ cm}$$

$$Fr_1 = 8.5$$

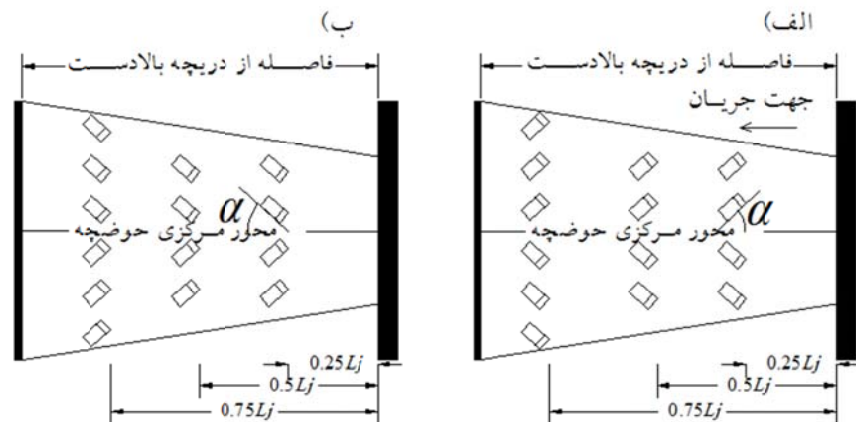
$$\frac{y_2}{y_1} = 0.309 (S + 1)^{3.4542} (\theta + 1)^{-0.1197} (Fr_1^{0.5175}) (L_j/y_1)^{0.5444} + 1.4396$$

$$y_2 = 20.08 \text{ cm}$$

عمق حوضچه ۵۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد.

### ۳-۲-۲-۳- بلوک‌های اتلاف کننده انرژی و آبپایه انتهایی

بلوک‌های میانی<sup>۸۵</sup> و آبپایه انتهایی<sup>۸۶</sup> بر مبنای ابعاد استاندارد حوضچه آرامش تیپ USBR III طراحی و داخل حوضچه نصب گردید. در این تحقیق بلوک‌های میانی در دو وضعیت واگرا و همگرا نسبت به محور مرکزی کانال قرار داده شد و در هر وضعیت ۸ زاویه استقرار ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ در هر آزمایش ابتدا بلوک‌های میانی در وضعیت واگرا یا همگرا، در زاویه و فاصله‌ی مشخص از دریچه‌ی بالادست نصب گردید (شکل ۳-۶). سپس آبپایه انتهایی با محاسبه‌ی تئوری طول پرش از گرافهای USBR در محل انتهای پرش حوضچه نصب گردید. بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی از جنس پلاستیک تفلون می‌باشد.



شکل ۳-۵- آرایش بلوک‌های میانی در حوضچه آرامش واگرا و قرارگیری آنها در فواصل  $0.25 L_j$ ,  $0.5 L_j$ ,  $0.75 L_j$  (الف) آرایش همگرا (ب) آرایش واگرا

<sup>85</sup> Baffles

<sup>86</sup> End sill



شکل ۳-۶: بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی بکار رفته در آزمایش

### ۳-۲-۲-۴- کف کاذب

شیب کف معکوس با استفاده از ورق گالوانیزه به طول ۱/۵ متر، عرض ۱ متر و ضخامت ۲ میلیمتر تامین شد. با استفاده از پایه‌هایی با ارتفاع قابل تنظیم، شیب‌های معکوس مختلف توسط این کف کاذب اجرا گردید (شکل ۳-۷). همانطور که قبلاً ذکر شد طول کف کاذب بر اساس این نکته انتخاب شد که پرس هیدرولیکی در شرایط مختلف هیدرولیکی درون حوضچه قرار گیرد.



شکل ۳-۷: نمای کف کاذب قابل تنظیم برای شیب‌های مختلف

### ۳-۲-۲-۵- دیواره‌های واگرا

دیواره‌های واگرا در زوایای ۳، ۵ و ۹ درجه در فلوم قرار گرفته و با چسب‌های مخصوص تثبیت و آب‌بندی گردید. به دلیل عکسبرداری از پروفیل پرش یکی از دیواره‌ها از جنس پلکسی گلاس ساخته شد (شکل ۳-۸).



شکل ۳-۸: نمای کلی کف معکوس و دیواره واگرا

### ۳-۲-۳- سیستم‌های اندازه‌گیری

در انجام آزمایش‌های مختلفی که بر روی مدل آزمایشگاهی صورت گرفت، از وسایل مختلفی جهت اندازه‌گیری دبی جریان، نیمرخ پرش، طول پرش و غلطاب و غیره استفاده گردید که در ادامه به شرح آنها می‌پردازیم.

#### ۳-۲-۳-۱- اندازه‌گیری دبی جریان

دبی ورودی توسط یک فلومتر آلتراسونیک با دقت اندازه‌گیری  $\pm 2\%$  اندازه‌گیری گردید. این دستگاه شامل ۲ بخش اصلی سنسور و نمایشگر می‌باشد که در دو مدل یکپارچه و جدا از هم ارائه می‌شود. اصول کارکرد این دستگاه الکترومغناطیسی براساس ولتاژ القاء شده در سنسورهای دستگاه است که با دبی جریان مرتبط شده است. در شکل (۳-۹) نحوه نشان دادن دبی جریان در کانال را نشان می‌دهد.

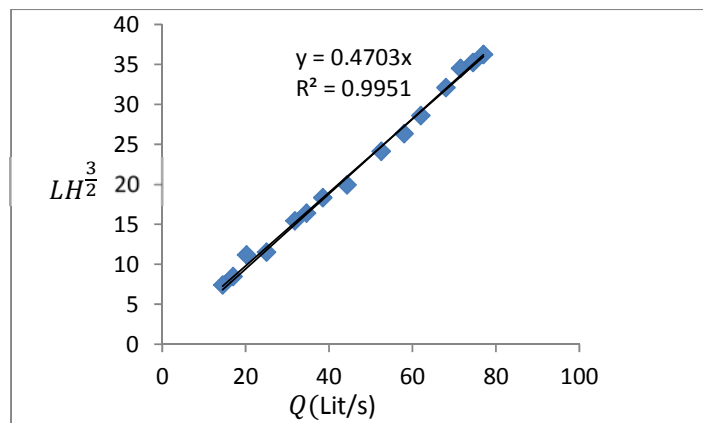


شکل ۳-۹: دستگاه دبی سنج آلتراسونیک

لازم بذکر است دبی سنج با سرریز مستطیلی لبه تیز انتهای فلوم، کالیبره شده است. این سرریز که فلزی بود در انتهای کانال بعد از دریچه‌ی پروانه ای قرار داشت. برای قرائت ارتفاع جریان عبوری از روی سرریز، از یک پیزومتر استفاده می‌شد. به منظور کالیبراسیون سرریز و تعیین ضریب دبی جریان  $(C_D)$ ، از مخزن موجود در پایین دست استفاده شد. بعد از واسنجی مخزن و تعیین منحنی دبی-اشل واسنجی سرریز صورت گرفت. مراحل کار واسنجی سرریز به شرح زیر می‌باشد.

- با روشن کردن پمپ جریان در کانال برقرار شده و اجازه داده شد تا ارتفاع جریان در روی سرریز و پشت مخزن تامین ارتفاع ثابت گردد.
- بعد از اطمینان از تثبیت ارتفاع آب در روی سرریز و مخزن تامین ارتفاع، در بازه‌های زمانی مشخص، مقدار حجم جریان ورودی به مخزن پایین دست برای ارتفاع سرریز مورد نظر، اندازه‌گیری شد. برای تعیین ضریب دبی جریان، با برازش بهترین خط بر داده‌های آزمایشگاهی مربوط به دبی-اشل (شکل ۳-۱۰) رابطه زیر بدست آمد.

$$Q = 0.4703 LH^{3/2}$$



شکل ۳-۱۰- منحنی واسنجی سرریز پایین دست

### ۳-۲-۲- برداشت نیمرخ و طول پرش

به منظور برداشت عمق جریان در طول پرش، از یک عمق سنج دیجیتال با دقت  $\pm 0.1$  میلیمتر که بر روی سیستم ریلی موجود بر روی حوضچه آرامش قرار داشت، استفاده شد (۳-۱۱). همچنین نیمرخ پرش هیدرولیکی با تصاویر ثبت شده از رقوم سطح آب و پردازش تصویر ثبت گردید. برای قرائت طول پرش در آزمایش‌ها، از طریق متر نواری نصب شده بر روی بدنه فلوم با دقت  $\pm 1$  میلیمتر، طول پرش و طول غلتاب اندازه‌گیری گردید (۳-۱۲).



شکل ۳-۱۱: عمق سنج دیجیتالی





شکل ۳-۱۲: متر نصب شده برای اندازه‌گیری طول پرش

### ۳-۲-۴- سیستم کنترل پرش هیدرولیکی

برای کنترل پرش هیدرولیکی روشهای مختلفی وجود دارد که به تعدادی از آنها در فصل دوم اشاره گردید. در این تحقیق برای کنترل پرش هیدرولیکی در مدل آزمایشگاهی، یک دریچه در انتهای فلوم نصب گردید. دریچه‌ی کشویی بالادست امکان ایجاد پرش را فراهم می‌کند و دریچه پروانه‌ای پایین دست پرش را در ابتدای حوضچه بلافاصله پس از دریچه کشویی بالادست تثبیت می‌کند (۳-۱۳).



شکل ۳-۱۳: دریچه پروانه‌ای انتهای فلوم

### ۳-۳- روش انجام آزمایش‌ها

همانطوری که تا کنون گفته شد، هدف از انجام این تحقیق بررسی آزمایشگاهی مشخصات پرش هیدرولیکی واگرا در حوضچه آرامش با شیب کف معکوس با به کارگیری بلوک‌های اتلاف کننده انرژی بود. آزمایش‌های اولیه در حوضچه مستطیلی و افقی (پرش کلاسیک) و بدون مانع نیز به عنوان یک شاهد در نظر گرفته شد. سپس با توجه به اهداف یاد شده که در بخش مقدمه به آن اشاره شد، آزمایش‌هایی برای شیب‌های جانبی، واگرایی و چیدمان بلوک مختلف صورت گرفت. در انجام هر آزمایش مراحل زیر طی گردید.

#### ۳-۳-۱- تنظیم شیب کف معکوس و زاویه واگرایی

قبل از انجام هر آزمایش ابتدا کف کاذب برای رسیدن به شیب کف معکوس مورد نظر قرار داده می‌شد. سپس دیواره‌های حوضچه آرامش برای زاویه واگرایی مورد نظر تنظیم می‌گردید. نحوه کار بدین صورت بود که با داشتن عرض اولیه و طول حوضچه، برای زاویه واگرایی مورد نظر، عرض حوضچه در انتها محاسبه گردیده، سپس دیواره‌ها به گونه‌ای قرار می‌گرفتند که عرض محاسبه شده را تامین کند. بعد از تنظیم دیواره‌های حوضچه برای زاویه واگرایی مورد نظر، حوضچه به طور کامل توسط چسب‌های مخصوص شیشه اتومبیل آب بندی می‌گردید.

#### ۳-۳-۲- نحوه استقرار بلوک‌ها و آبپایه انتهایی

در این تحقیق از بلوک میانی و آبپایه انتهایی برای افزایش راندمان پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش استفاده گردید. بلوک‌های میانی در دو وضعیت واگرا و همگرا نسبت به محور مرکزی کانال قرار داده شد و در هر وضعیت ۸ زاویه استقرار ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ درجه برای بلوک‌ها در نظر گرفته شد. در هر آزمایش ابتدا بلوک‌های میانی در وضعیت واگرا یا همگرا، در زاویه و فاصله‌ی مشخص از دریچه‌ی بالادست نصب گردید. سپس آبپایه انتهایی با محاسبه‌ی تئوری طول پرش از گرافهای USBR در محل انتهایی پرش حوضچه USBRIII نصب گردید.



### ۳-۳-۳- تنظیم دبی جریان

بعد از آماده شدن تنظیمات حوضچه و اطمینان از آب بندی آن، با راه اندازی پمپ، جریان وارد مدل می‌گردید. سپس با قرائت فلومتر، دبی جریان برای تامین عدد فرود مورد نظر تنظیم می‌گردید.

### ۳-۳-۴- تثبیت موقعیت پرش هیدرولیکی

پس از برقراری دبی مورد نظر و اطمینان از تثبیت جریان در فلوم، از طریق باز و بسته کردن دریچه پروانه‌ای انتهای فلوم، پیشانی پرش طوری تنظیم می‌گردید که حداقل فاصله نسبت به ابتدای حوضچه که به عنوان نقطه مبنا انتخاب گردیده بود را دارا باشد.

### ۳-۳-۵- قرائت‌های صورت گرفته در هر آزمایش

در هر آزمایش بعد از طی شدن مراحل فوق، نیمرخ طولی پرش از شروع تا انتها توسط عمق‌سنج برداشت شده و همچنین عکسبرداری از پروفیل نیز صورت گرفته، سپس فاصله پیشانی و انتهای پرش از نقطه مبنا طول پرش و طول غلتاب قرائت می‌گردید. از آنجا که معیارهای مختلفی برای تعیین طول پرش وجود دارد، در این تحقیق طول پرش از شروع، تا جایی که میزان نوسانات سطح آب در آنجا به حداقل رسیده و آشفتگی و تلاطم سطح آب در آنجا ناچیز بود، در نظر گرفته شد. طول پرش سخت-ترین پارامتر برای اندازه‌گیری بوده است. در بسیاری از آزمایش‌ها بلوک‌ها یک قله در جریان ایجاد می‌کردند که با یک فرورفتگی پس از آن همراه بود. انتهای پرش در این موارد، بعد از اولین فرورفتگی در نظر گرفته می‌شد.

### ۳-۴- طبقه بندی آزمایش‌ها

با بررسی‌های صورت گرفته برای انتخاب شیب‌های کف معکوس و زوایای واگرایی قابل تنظیم برای انجام آزمایش‌ها، گزینه‌های زیر انتخاب گردید.

- برای بررسی تاثیر شیب کف معکوس بر خصوصیات پرش هیدرولیکی، شیب های ۰، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد انتخاب گردید. این شیب ها در محدوده‌ای انتخاب گردیده که عدد فرود اولیه جریان در محدوده‌ی حداکثر ۹ باشد.
- برای بررسی تاثیر زاویه واگرایی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی، با توجه به عرض حوضچه آرامش که حداکثر زاویه واگرایی را محدود می‌کند، زوایای واگرایی ۳، ۵ و ۹ درجه انتخاب گردید. حداکثر زاویه ۹ درجه با بررسی نتایج تحقیقات سایر مولفین و به دلیل محدود شدن حداکثر زاویه واگرایی در رابطه (۲-۳۰) انتخاب گردید.
- به منظور بررسی تاثیر به کارگیری بلوک‌های میانی و همچنین تاثیر زاویه و محل قرارگیری این بلوک‌ها بر خصوصیات پرش هیدرولیکی واگرا، بلوک‌ها در دو وضعیت واگرا و همگرا نسبت به محور مرکزی حوضچه و در زوایای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درجه و در فواصل  $0.25 Lz$ ،  $0.5 Lz$  و  $0.75 Lz$  قرار داده شد.
- به منظور مقایسه عملکرد پرش هیدرولیکی واگرا با شیب کف معکوس و به کارگیری بلوک‌های میانی با پرش در مقاطع مستطیلی، گزینه پرش هیدرولیکی مستقیم درمقطع مستطیلی نیز در نظر گرفته شد.

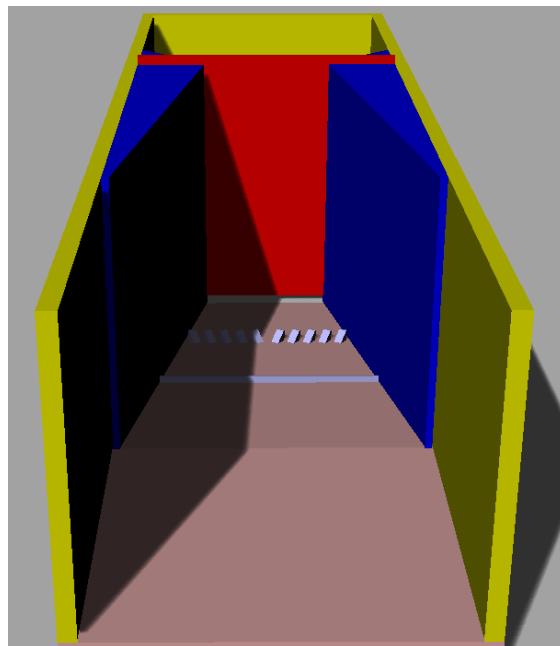
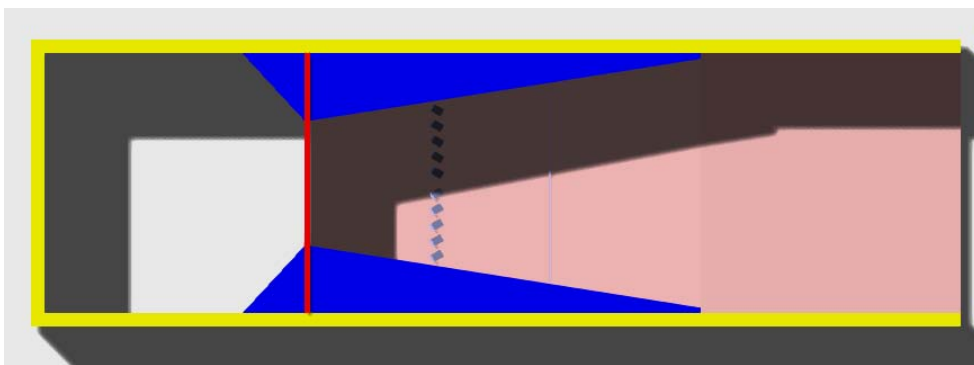
### ۳-۵- مدل‌سازی عددی مدل آزمایشگاهی با استفاده از نرم افزار Flow3D

نرم‌افزار Flow3D یک نرم‌افزار قوی در زمینه CFD می‌باشد که تولید، توسعه و پشتیبانی آن توسط Flow Science, Inc است و یک مدل مناسب برای حل مسائل پیچیده دینامیک سیالات بوده و قادر است دامنه وسیعی از جریان سیالات را مدل کند. این مدل برای شبیه‌سازی جریان‌های سطح آزاد سه‌بعدی غیرماندگار با هندسه پیچیده کاربرد فراوانی دارد. نرم‌افزار Flow3D، برای مسائل یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی طراحی شده است. در حالت ماندگار، نتایج در زمان بسیار کمی حاصل می‌شود زیرا برنامه بر روی قوانین بنیادی جرم، مومنتوم و بقاء انرژی پایه‌گذاری شده است تا این موارد برای

مراحل مختلف جریان در هر زمینه‌ای بکار برده شوند. این نرم‌افزار یک شبکه آسان از اجزاء مستطیلی را استفاده می‌کند.

### ۳-۵-۱- تعریف هندسه

برای تهیه هندسه سه بعدی مدل آزمایشگاهی به طور هم زمان از نرم‌افزارهای AutoCAD و Rhinoceros استفاده شد. نحوه ساخت مدل بدین صورت انجام گرفت که در ابتدا هندسه دوبعدی، مدل در AutoCAD ساخته و در محل مورد نظر جانمایی شد و سپس به منظور انجام عملیات سه بعدی سازی مدل از نرم افزار Rhinoceros استفاده شد (شکل ۳-۱۵).

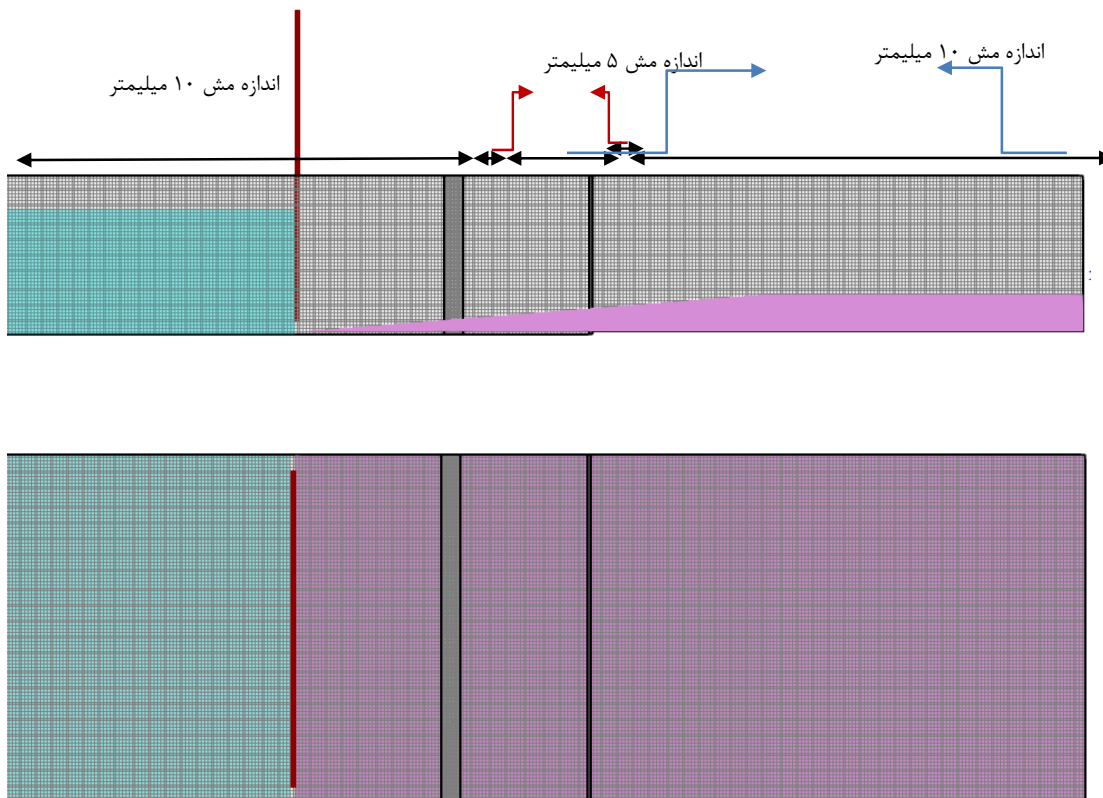


شکل ۳-۱۵- هندسه ترسیم شده در نرم افزار

در مدل‌سازی عددی انجام گرفته شده طول کانال با شیب معکوس 2/5 متر در پایین‌دست دریاچه بوده و علاوه بر آن 1 متر از کانال بالادست دریاچه در مدل عددی آورده شده است. اندازه شبکه مش در طول 1/5 متر تا قبل از بلوک‌ها، برابر 10 میلی‌متر، در محل قرارگیری بلوک‌ها 5 میلی‌متر، از بعد از قرارگیری بلوک‌ها تا محل آب پایه اندازه شبکه مش 10 میلی‌متر، در محل قرارگیری آب پایه همانند محل قرارگیری بلوک‌ها جهت مدل‌سازی دقیق شکل هندسی آنها و فاصله بین آنها معادل 5 میلی‌متر در نظر گرفته شد.

علت استفاده از این نوع مش‌بندی در بالادست این است که تغییرات اندازه مش‌ها به تدریج صورت گیرد و همچنین نسبت اندازه شبکه بلوک‌ها از مقدار مجاز 3 (پیشنهادشده توسط نرم‌افزار) برای شبکه‌های مجاور بیشتر نشود. استقلال مش در سه مرحله با تغییر اندازه مش بررسی گردید. استفاده از مش 5 میلی‌متر برای کل مدل، مدت‌زمان اجرای برنامه را به شدت افزایش داده و نیز استفاده از شبکه 10 میلی‌متر، دقت محاسبات روی کف معکوس را به شدت کاهش می‌دهد، در تحقیق حاضر جهت مدل‌سازی بلوک‌ها، آب پایه و کانال آن از شبکه‌بندی چند بلوکی استفاده شده است (شکل 3-16). در این شبکه، به منظور دربرگرفتن لایه مرزی و رسیدن به دقت مناسب، فاصله اولین نقطه شبکه از کف کانال در محل شروع پرش 10 میلی‌متر در نظر گرفته شد. در خصوص ناپایداری ایجادشده، نرم‌افزار قابلیت آن را دارد که با تغییر گام زمانی به میزان لازم شرایط پایداری را تا حد قابل قبولی، در حل معادلات برقرار کند.

تعداد کل مش در این مدل‌سازی سه بعدی، 2232340 عدد و مشخصات سیستم کامپیوتر مورد استفاده Cpu Cor i7, 4Gh, 6 mg cache, Ram 16, Hard 1Tr بوده است. مدت زمان لازم برای همگرا شدن جواب به طور میانگین 12 ساعت بوده است.



شکل ۳-۱۶- نحوه مش بندی مدل عددی

### ۳-۵-۲- تعریف هندسه مدل

مدل ساخته شده در نرم‌افزار از سه جزء کانال بالادست، کف معکوس و کانال پایین‌دست به منظور ایجاد انطباق مناسب شرایط آزمایشگاهی و مدل عددی تشکیل شده است.

آب، سیال جریان یافته در کانال است که دارای تمامی خواص فیزیکی آن در دمای ۲۰ درجه سلسیوس می‌باشد. در مدل‌سازی، شتاب گرانش  $(m/s^2)$   $9/81$ ، فشار اتمسفر  $Pa$   $1/013 \times 10^5$  و دمای محیط ۲۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است.

جدول ۳-۲- خواص فیزیکی آب در دمای ۲۰ درجه سلسیوس

کشش سطحی (KN/)	زاویه تماس	لزجت ( $KN.s/m^2$ )	چگالی ( $Kg/m^3$ )
(m)	۹۰°	۰/۰۰۱	۱۰۰۰

### ۳-۵-۳- انتخاب گام زمانی

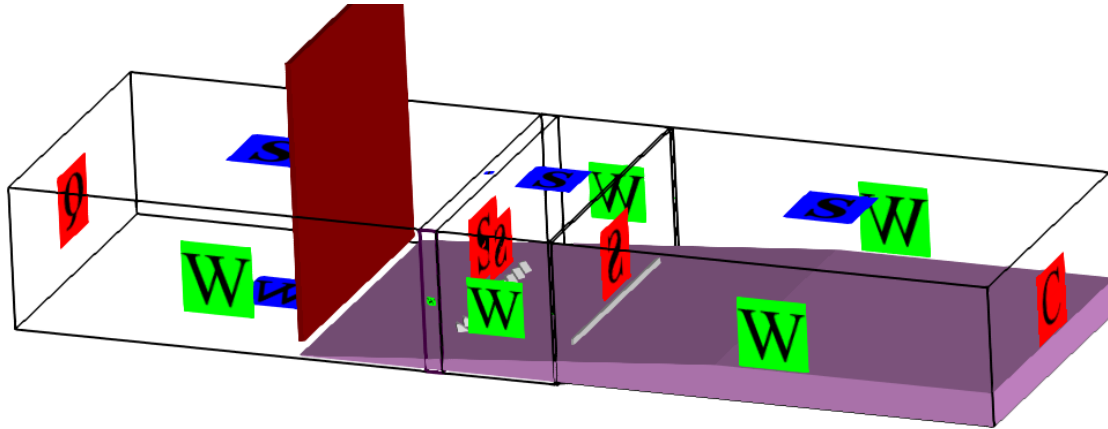
محدودیت‌های مختلفی در اندازه گام زمانی در FLOW-3D وجود دارد که برای جلوگیری از ناپایداری حل عددی در محاسبات باید بر آنها نظارت شود. اگر گام زمانی به طور خودکار در داده‌های ورودی انتخاب شود، نرم‌افزار یک گام زمانی را به صورتی که شرایط پایداری نقض نشود در نظر می‌گیرد و پارامترهایی نظیر فشار و دما را برای گام مورد نظر محاسبه و با مقدار شاخص مقایسه می‌کند به طوری که اختلاف قابل توجهی با این مقادیر شاخص نداشته باشد. انتخاب گام زمانی به طور خودکار توسط نرم‌افزار انجام شد.

با توجه به توضیحات داده شده مقدار گام زمانی توسط نرم‌افزار تعیین شد بدین صورت که نرم‌افزار گام زمانی را بر اساس  $1/100$  زمان پایان عملیات اجرا انتخاب می‌کند. زمان اتمام هر اجرا با توجه به اینکه باید جواب نهایی آن به ثبات برسد (که در این اجراها میزان دبی منحرف شده ثابت باقی بماند)، برای هر اجرا به طور متوسط ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد. بدین ترتیب گام زمانی  $0/2$  ثانیه توسط نرم‌افزار انتخاب گردید. اما برای اینکه از نتایج کار اطمینان حاصل شود گام زمانی کوچک‌تر هم برای یک آزمایش در نظر گرفته شد که در نهایت تغییری محسوس در جواب نهایی حاصل نشد و فقط زمان اجرا افزایش پیدا کرد.

### ۳-۵-۴- ایجاد شرایط مرزی

شرایط مرزی مدل در ورودی کانال و پشت دریچه جریان با دبی و عمق معلوم (Q)، در کنارهای مرز صلب (W)، در انتهای کانال به صورت Continue (ادامه‌دار) و همچنین در مرز بالا به منظور مدل سازی سطح آزاد شرایط متقارن (S) تعریف شده است. در محل تغییر شبکه مش شرایط مرزی به

صورت Symmetry به منظور انتقال داده ها از یک شبکه مش به یک شبکه مش دیگر با اندازه متفاوت استفاده شده است.



شکل ۳-۱۷- نمایش شرایط مرزی مدل

### ۳-۵-۶- مدل انتقال آشفتگی

در فلوتری دی، ۶ مدل آشفتگی طول اختلاط پرنده<sup>۸۷</sup>، تک معادله‌ای، دو معادله‌ای  $k-\varepsilon$ ،  $k-\omega$  و RNG و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ<sup>۸۸</sup> (LES) وجود دارد. در شرایط جریان مشخص، علی‌الخصوص نزدیک مرز دیوار و جریانهای با گرادیان فشار بالا مانند جت‌ها، مدل  $k-\omega$  ارجحیت دارد. در مدل‌سازی اولیه با در نظر گرفتن ۳ معادله مختلف آشفتگی  $k-\varepsilon$ ،  $k-\omega$  و LES مدل‌ها اجرا شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید، تا بهترین و مشابه‌ترین نتایج نسبت به کار آزمایشگاهی مبنای مدل‌سازی‌های بعدی در این زمینه قرار گیرد. نتایج نشان داد بهترین مدل که کمترین اغتشاشات در سطح آب و نزدیکترین جواب‌ها را نسبت به نتایج مدل آزمایشگاهی دارد مدل  $k-\omega$  می‌باشد.

متغیر  $\omega = \varepsilon/k$  دیمانسیون  $1/\text{زمان}$  دارد.  $k-\omega$  به صورت رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$\frac{\partial K_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial K_T}{\partial x} + vA_y \frac{\partial K_T}{\partial y} + wA_z \frac{\partial K_T}{\partial z} \right\} = P_T + G_T + Diff_{K_T} - \beta^* k\omega \quad (۱-۳)$$

<sup>87</sup> Prandtl mixing length model

<sup>88</sup> Large eddy simulation

که در این معادله  $\beta^* = \beta_0^* f_{\beta^*}$  و  $\beta_0^* = 0,09$  است.

$$\chi_k \geq 0 \text{ زمانیکه } f_{\beta^*} = \frac{1+680\chi_k^2}{400\chi_k^2} \text{ و } \chi_k \leq 0 \text{ زمانیکه } f_{\beta^*} = 1$$

$$\chi_k \equiv \frac{1}{\omega^3} \left( \frac{\partial K_T}{\partial x} \frac{\partial \omega_T}{\partial x} + \frac{\partial K_T}{\partial y} \frac{\partial \omega_T}{\partial y} + \frac{\partial K_T}{\partial z} \frac{\partial \omega_T}{\partial z} \right) \quad (۲-۳)$$

پارامتر RMTKE که توسط کاربر تعریف می‌شود و ضریب تشدید ویسکوزیته است که برای محاسبه ضریب انتشار آشفته‌گی به کار می‌رود (به طور پیش فرض ۱ است). در اینجا ۰/۵ است.

برای انتقال  $\omega$  داریم:

$$\frac{\partial \omega_T}{\partial t} + \frac{1}{v_F} \left\{ u A_x \frac{\partial \omega_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \omega_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \omega_T}{\partial z} \right\} = \alpha \frac{\omega_T}{K_T} (P_T + CDIS3.G_T) + Diff_{\omega} - \beta \omega_T^2$$

(۳-۳)

$$f_{\beta} = \frac{1+70\chi_{\omega}}{1+80\chi_{\omega}} \text{ و } \beta_0 = 9/125 \text{ با } \beta = \beta_0 f_{\beta} \text{ و } RMDTKE = 1/2, \alpha = 13/25 \text{ که در آن}$$

می‌باشد.

و همچنین:

$$\chi_{\omega} \equiv \left| \frac{\Omega_{ij} \Omega_{jk} S_{ki}}{(\beta_0^* \omega)^3} \right| \quad (۴-۳)$$

$\Omega_{ij}$  و  $S_{ki}$  به ترتیب تانسورهای نرخ کرنش میانگین و چرخش میانگین می‌باشند. در مدل  $k-\omega$ ،

$$\varepsilon = \beta^* \omega k \text{ و } \nu_T = k/\omega \text{ می‌باشند.}$$

هدف اصلی هر یک از مدل‌های آشفته‌گی، ایجاد مکانیسمی برای تخمین اثر نوسانات آشفته بر مقادیر متوسط جریان است. این اثر معمولاً با ترم‌های انتشار اضافی در معادلات جرم میانگین، مومنتوم و انتقال انرژی بیان می‌شود. از آنجایی که آشفته‌گی، انتشار مومنتوم را افزایش می‌دهد، بنابراین ویسکوزیته را به طرز چشمگیری افزایش می‌دهد. هر جا که ضریب ویسکوزیته دینامیک در معادلات ظاهر می‌شود، به صورت مجموع ویسکوزیته آشفته و مولکولی در نظر گرفته می‌شود.

$$\mu = \rho(\nu + \nu_T) \quad (۵-۳)$$

این مساله همیشه صحیح نیست، اما تقریب خوبی برای سطوح بالای آشفته‌گی، یعنی زمانیکه



ویسکوزیته آشفستگی بسیار بزرگتر از مقدار مولکولی است، می‌باشد.

### ۳-۶- تئوری پرش‌های هیدرولیکی واگرا با شیب معکوس و بلوکهای میانی

در این بخش، با بکارگیری معادلات مومنوم و انرژی و تعریف نیروهای وارد بر حجم کنترل انتخابی و ساده سازی معادلات، سعی گردیده رابطه‌ای نیمه تحلیلی برای حوضچه آرامش واگرای معکوس با بلوکهای میانی و آبپایه انتهایی استخراج گردد.

برای تحلیل و تعیین روابط مربوط به پرش هیدرولیکی نرمال در مقاطع مختلف، از اصول پیوستگی، انرژی و مومنوم، با بکاربردن فرضیات ساده شونده نظیر ناچیز در نظر گرفتن نیروهای وزن، اصطکاک و مقاومت ناشی از هوا استفاده می‌گردد. آنچه که روابط مربوط به پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرا را با پرش نرمال متفاوت و پیچیده‌تر می‌سازد، وجود نیروهای جانبی در اثر واگرایی دیواره‌ها که خود تابعی از طول پرش است، می‌باشد. بنابراین، شناخت نیمرخ طولی سطح آب در پرش، برای محاسبه این جزء نیرو ضروری می‌باشد. در این بخش نحوه استخراج معادلات مربوط به نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی برای پرش هیدرولیکی واگرای معکوس ارائه گردیده است.

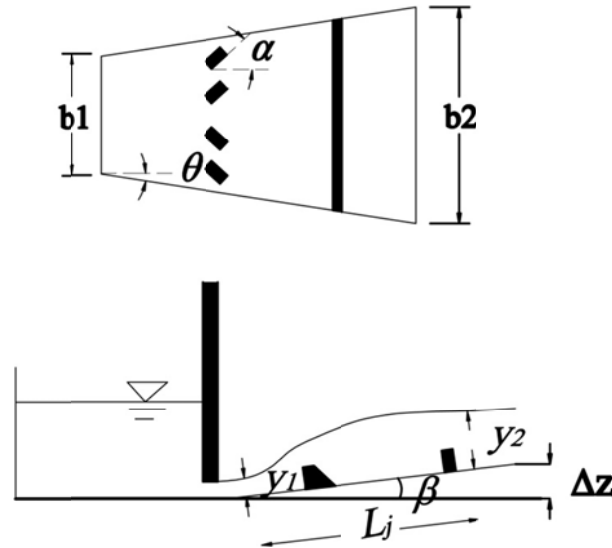
### ۳-۶-۱- تحلیل ابعادی

پارامترهای موثر بر خصوصیات پرش هیدرولیکی واگرای معکوس با بلوکهای میانی را می‌توان بصورت تابع زیر بیان نمود:

$$f(y_1, y_2, L_j, b_1, b_2, V_1, v, g, \rho, L, \Delta z, \alpha, \theta) = 0 \quad (6-3)$$

که در این رابطه  $y_1$  و  $y_2$  اعماق اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی می‌باشند،  $b_2 = b_1 + 2L_j \tan \theta$  عرض حوضچه آرامش در انتهای پرش،  $\theta$  زاویه واگرایی دیواره‌ها،  $b_1$  عرض حوضچه در پهنه‌ی پرش،  $\alpha$  زاویه قرارگیری بلوک‌ها،  $V_1$  سرعت اولیه،  $v$  ویسکوزیته،  $g$  شتاب ثقل،  $\rho$  جرم مخصوص،  $L$  طول حوضچه‌ی معکوس،  $\Delta z$  میزان بالآمدگی در انتهای حوضچه،  $L_j$  طول پرش هیدرولیکی از محل حداقل عمق در

پنجه‌ی پرش تا جایکه اغتشاشات سطحی جریان به حداقل می‌رسید. پارامترهای رابطه (۳-۶) در شکل (۳-۱۸) نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۸- نمایش پارامترهای پرش هیدرولیکی در کانال واگرا با شیب معکوس و بکارگیری بلوکهای میانی و آستانه انتهایی

با به کارگیری تئوری پی باکینگهام و انجام آنالیز ابعادی، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$f\left(F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}}, R_1 = \frac{V_1 y_1}{v}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{b_1}{y_1}, \frac{b_2}{y_1}, \frac{L}{y_1}, \frac{\Delta z}{y_1}, \alpha, \theta\right) = 0 \quad (7-3)$$

از تقسیم  $b_2/b_1$ ,  $b_1/y_1$  و  $b_2/y_1$  به دست می‌آید که تاثیر دیواره‌های واگرا را نشان می‌دهد و  $L$  نیز تاثیر شیب کف معکوس را شامل می‌شود. لذا به جای این پارامترها، به ترتیب پارامترهای بی‌بعد  $\theta$  و  $\beta$  مورد استفاده قرار گرفت:

$$f\left(\frac{y_2}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \alpha, \theta, \beta, R_1, F_1\right) = 0 \quad (8-3)$$

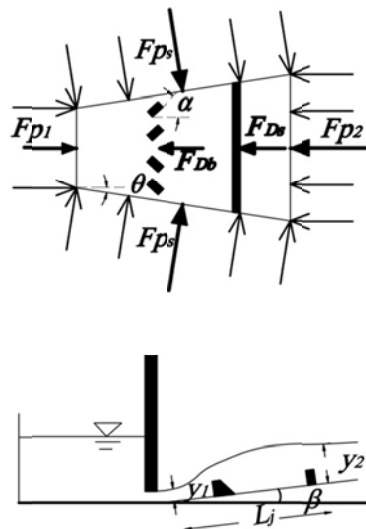
که در این رابطه  $R_1$  و  $F_1$  عدد فرود اولیه و عدد رینولدز جریان می‌باشند. عدد رینولدز در عمق بالادست جریان برای همه آزمایش‌ها بیشتر از  $2 \times 10^5$  بوده، لذا جریان در این اعداد رینولدز کاملاً آشفته بوده و اثر ویسکوزیته قابل صرف‌نظر می‌باشد. بنابراین معادله فوق به شکل زیر در خواهد آمد:

$$f\left(\frac{y_2}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \alpha, \theta, \beta, F_1\right) = 0 \quad (9-3)$$

### ۳-۶-۲- نسبت عمق ثانویه در پرش هیدرولیکی واگرا با شیب معکوس و بلوکهای میانی

در این تحقیق از فرضیات زیر به منظور استخراج رابطه نسبت عمق ثانویه برای پرش هیدرولیکی واگرای معکوس استفاده گردیده است.

- خطوط جریان شعاعی هستند.
- توزیع فشار در سطوح حجم کنترل هیدرواستاتیک می باشد.
- جریان دائمی است.
- نیروی اصطکاک از مرزهای جامد قابل صرفنظر است.
- شکل پروفیل سطح پرش سهمی فرض گردید.



شکل ۳-۱۹- طرح شماتیک پرش هیدرولیکی در کانال واگرا با شیب معکوس و بکارگیری بلوکهای میانی و آستانه انتهایی

برای بررسی نسبت عمق ثانویه در پرش هیدرولیکی واگرا، حجم کنترلی مطابق با شکل (۳-۱۹) را در نظر می‌گیریم. با توجه به این شکل، نیروهای موثر بر حجم کنترلی انتخابی، عبارتند از  $F_{P1}$ .

$$F_{PS} \text{ و } F_{P2}$$

معادله مومنوم بین مقاطع ۱ و ۲ در شکل ۳-۱۹ در راستای شیب کف معکوس به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$F_x = F_{psx} + F_{px} + F_{wx} + F_{Ds} + F_{Db} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} up dV + \int_{cs} up \vec{V} d\vec{A} \quad (۳-۱۰)$$

$$F_x = F_{psx} + F_{P1x} + F_{P2x} + F_{wx} + F_{Ds} + F_{Db} = \int_{cs} up \vec{V} d\vec{A} \quad (۳-۱۱)$$

نیروهای فشار هیدرواستاتیک به صورت زیر محاسبه گردید:

$$F_{P1x} = \int_0^{y_1} PdA = \int_0^{y_1} \gamma \cos \beta y b_1 dy = \frac{1}{2} \gamma y_1^2 b_1 \cos \beta \quad (۳-۱۲)$$

$$F_{P2x} = \int_0^{y_2} PdA = \int_0^{y_2} \gamma \cos \beta y b_2 dy = \frac{1}{2} \gamma y_2^2 b_2 \cos \beta \quad (۳-۱۳)$$

که در آن  $g$  وزن مخصوص آب،  $y$  عمق آب عمود بر سطح،  $b$  عرض کف،  $\beta$  زاویه شیب کف نسبت به خط افق است و زیرنویس ۱ و ۲ به ترتیب به مقاطع بالادست و پایین دست پرش در جهت  $x$  اشاره دارد.

یکی از تفاوت‌های اساسی در استخراج روابط تئوری پرش هیدرولیکی واگرایی معکوس با پرش‌های مستقیم، وجود نیروهای جانبی در معادله اندازه حرکت برای مقاطع قبل و بعد از پرش می‌باشد. برای محاسبه این جزء نیرو شناخت نوع معادله نیمرخ سطح آب ضروری می‌باشد. امید و همکاران (۲۰۱۰) و اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۴) پروفیل بیضی را در محاسبات تحلیلی برای پرش در نظر گرفتند و نتایج خوبی به دست آوردند لذا در این تحقیق نیز برای محاسبه نیروی جانبی به منظور استخراج رابطه تئوری نسبت عمق ثانویه، معادله بیضی برای نیمرخ سطح آب در طول پرش در نظر گرفته شده است. بنابراین معادله پروفیل سطح آب به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{y_x - y_1}{y_2 - y_1} = - \left( \frac{x}{L_j} \right)^2 + 2 \left( \frac{x}{L_j} \right) \quad (۳-۱۴)$$

نیروی وزن با انتگرال گیری از حجم کنترل به صورت زیر به دست آمد:

$$F_{wx} = \left[ \gamma b_1 \int_0^{L_j} \int_0^y dy dx + 2\gamma \int_0^{L_j(b_2-b_1)} \int_0^{x/2L_j} \int_0^y dy dz dx \right] \sin \theta \quad (15-3)$$

$$F_{wx} = \gamma L_j b_1 \left( \frac{1}{3} y_1 + \frac{2}{3} y_2 \right) \sin \theta + \gamma (b_2 - b_1) L_j \left( \frac{1}{12} y_1 + \frac{5}{12} y_2 \right) \sin \theta \quad (16-3)$$

نیروی کلی وارد بر دیواره‌های واگرای پرش در جهت x به صورت زیر است:

$$F_{P_{sx}} = 2F_{Ps} \sin \theta \quad (17-3)$$

$$F_{Ps} = \gamma \int_0^{L_{js}} \frac{y^2}{2} dx = \frac{\gamma}{2} \int_0^{L_{js}} \left[ 2 \left( \frac{x}{L_j} \right) - \left( \frac{x}{L_j} \right)^2 \right] (y_2 - y_1) + y_1 \right]^2 dx \quad (18-3)$$

$$F_{Ps} = \gamma L_{js} \left( \frac{1}{2} y_1^2 + \frac{4}{15} (y_2 - y_1)^2 + \frac{2}{3} y_1 (y_2 - y_1) \right) = \gamma L_{js} \left( \frac{1}{5} y_1^2 + \frac{8}{15} y_2^2 - \frac{4}{15} y_1 y_2 \right) \quad (19-3)$$

که در آن  $L_{js} = L_j / \cos \theta$  می‌باشد. نیرویی که بلوک‌ها ( $F_{DB}$ ) به جریان وارد می‌کنند از روابط رنگا راجو و همکاران<sup>۸۹</sup> (۱۹۸۰) به دست می‌آید:

$$\frac{F_{DB}}{F_2} = \left( \frac{y_1}{y_2} \right)^2 \left[ 1 + 2(Fr_1)^2 - 2(Fr_1)^2 \left( \frac{y_1}{y_2} \right) \right] - 1 \quad (20-3)$$

که در آن  $F_{DB}$  نیروی درگ وارد بر بلوکهای میانی در واحد عرض کانال و  $F_2 = \frac{1}{2} \gamma y_2^2$  می‌باشد.

نیرویی که آستانه ( $F_{Ds}$ ) به جریان وارد می‌کند از روابط اوتسو و همکاران (۱۹۹۱) محاسبه گردیده است:

$$F_{Ds} = \int C_{Ds} P_{Ds} dA = \int C_{Ds} \frac{\rho v^2}{2} dA = \int_0^h C_{Ds} \frac{\rho v^2}{2} b_2 dy = C_{Ds} \frac{\rho v^2}{2} b_2 h \quad (21-3)$$

با جایگذاری در معادله مومنوم، معادله زیر به دست می‌آید:

$$Y^3 K_1 + Y^2 K_2 + Y K_3 - 2Fr_1^2 = 0 \quad (22-3)$$

<sup>89</sup> Ranga Raju et al.

که در آن:

$$K_1 = \left( -\frac{B^2}{2} + \frac{16BL_j \tan \theta}{15b_1 \cos \beta} \right) \quad (23-3)$$

$$K_2 = \left( \frac{8BL_j \tan \theta}{15b_1 \cos \beta} - \frac{L_j \tan \beta \left( \frac{5B^2}{12} + \frac{B}{4} \right)}{y_1} \right) \quad (24-3)$$

$$K_3 =$$

$$\left( \frac{B}{2} - \frac{2BL_j \tan \theta}{5b_1 \cos \beta} + Fr_1^2 \left( 2B \tan \beta - \frac{B^2 C_{Dsh}}{2 \cos \beta y_1} \right) - \frac{BL_j \tan \beta}{4y_1} - \frac{B^2 L_j \tan \beta}{12y_1} - \frac{(B+B^2) \cos \alpha Fr_1^2 \left( 1 - \frac{y_1}{y_2} \right)}{2 \cos \beta} + (B+B^2) \left( -\frac{\cos \alpha}{4 \cos \beta} - \frac{y_2^2}{4 \cos \beta y_1^2} \right) \right) \quad (25-3)$$

$$B = \frac{b_2}{b_1}, Y = y_2/y_1 \quad (26-3)$$

معادله فوق معادله عمومی برای نسبت عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در کانال واگرا روی شیب معکوس با بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی است.

### ۳-۶-۳- افت انرژی در پرش هیدرولیکی واگرا با شیب معکوس و بلوکهای میانی

افت انرژی در پرش هیدرولیکی واگرای معکوس با نوشتن رابطه انرژی مخصوص برای مقاطع قبل و بعد از پرش به صورت زیر محاسبه گردید:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \left( y_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} \right) - \left( y_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} \right) = y_1 - y_2 + \frac{Q^2}{2g} \left[ \frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right] \quad (27-3)$$

از آنجاییکه  $Fr_1^2 = \frac{Q^2 T}{A^3 g}$  می‌باشد، با جایگذاری در رابطه فوق خواهیم داشت:

$$\Delta E = y_1 - y_2 + \frac{Fr_1^2 A^3}{2T} \left[ \frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right] \quad (28-3)$$

$$\Delta E = y_1 - y_2 + \frac{Fr_1^2 D_1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right] \quad (29-3)$$

معادله فوق رابطه کلی محاسبه افت انرژی در پرش هیدرولیکی واگرا برای هر مقطع دلخواه می‌باشد که با داشتن مشخصات جریان در مقاطع قبل و بعد از پرش، می‌توان افت انرژی در پرش هیدرولیکی را محاسبه کرد.

افت انرژی نسبی عبارت است از نسبت افت انرژی  $\Delta E$  به انرژی اولیه  $E_1$ ، بنابراین رابطه کلی محاسبه

افت انرژی در پرش‌های هیدرولیکی واگرای معکوس برای هر مقطع دلخواه به صورت زیر خواهد بود:

$$R_L = \frac{E_L}{E_1} = \frac{y_1 - y_2 + \frac{Fr_1^2 D_1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right]}{y_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2}} \quad (30-3)$$





# فصل ۴

## نتایج و بحث

#### ۴-۱- مقدمه

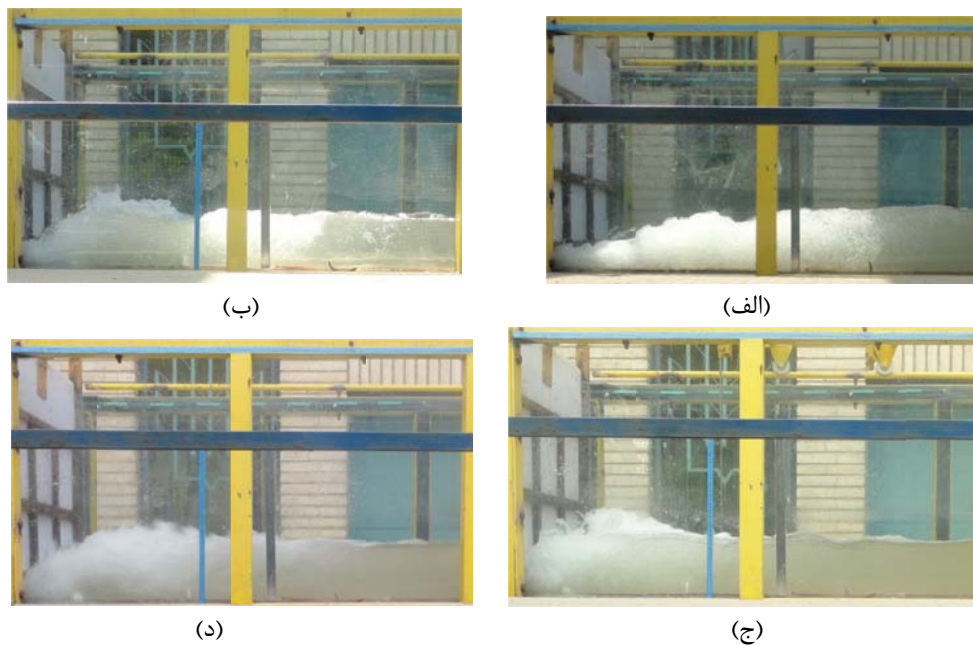
با توجه به اهداف مورد نظر در این تحقیق که شامل بررسی آزمایشگاهی خصوصیات پرش هیدرولیکی واگرا در مقاطع مستطیلی با شیب معکوس و به کارگیری بلوک های اتلاف کننده انرژی، بررسی روند تغییرات پارامترهای مهم پرش (نسبت عمق ثانویه، افت انرژی نسبی و طول نسبی پرش)، ارزیابی نتایج حاصل از مدل کامپیوتری و آزمایشگاهی است، مجموعه آزمایش‌ها مطابق توضیحات فصل چهارم طراحی و برنامه‌ریزی گردید و پس از انجام آزمایش‌های متعدد، دیتاهای مورد نیاز برداشت گردید و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در این فصل ضمن ارائه نتایج آزمایشگاهی، مقایسه آنها با نتایج حاصل از مدلسازی عددی و همچنین نتایج به دست آمده از مدل نیمه تحلیلی انجام می‌شود.

#### ۴-۲- مشاهدات آزمایشگاهی

در فصل سوم به مواردی از مشاهدات ارائه شده توسط سایر محققین در مورد خصوصیات پرش هیدرولیکی واگرا اشاره شد که از جمله آنها می‌توان به وجود گردابه‌های طولی در امتداد پرش، مورب بودن پیشانی پرش، تلاطم جریان و حرکات گردابه‌ای شدید در سطح حوضچه آرامش اشاره کرد. در مجموعه آزمایش‌ها انجام گرفته در این تحقیق، مشاهدات آزمایشگاهی صورت گرفته در مورد خصوصیات پرش هیدرولیکی معکوس را می‌توان به صورت زیر دسته بندی کرد:

- در کانال مستطیلی، آزمایش‌ها در وضعیت پرش کلاسیک (آزاد)، حوضچه استاندارد USBR III و چیدمان واگرای بلوکها انجام گردید (شکل ۴-۱). همانگونه که در این شکل ملاحظه گردید بهترین نتایج کاهش طول پرش هیدرولیکی در زاویه بلوک ۳۰ درجه به دست آمده است. با افزایش بیشتر زاویه بلوک، یک قله در جریان ایجاد گردیده و طول پرش افزایش یافت. البته در همه‌ی موارد به کارگیری بلوک، شکل و پروفیل طولی پرش هیدرولیکی تا حدی متفاوت از پرش هیدرولیکی آزاد (بدون بکارگیری بلوک و آبپایه) بوده است.

- در کانال واگرای معکوس، آزمایش ها در وضعیت پرش بدون بلوک (آزاد)، با بلوک استاندارد USBR III و چیدمان همگرای بلوکها انجام گردید (شکل ۴-۲). همانگونه که در این شکل ملاحظه گردید بهترین نتایج کاهش طول پرش هیدرولیکی در زاویه بلوک ۳۰ درجه به دست آمده است. با افزایش بیشتر زاویه بلوک، اغتشاش شدیدی در جریان ایجاد گردیده و طول پرش افزایش یافت. البته در همهی موارد به کارگیری بلوک، شکل و پروفیل طولی پرش هیدرولیکی تا حدی متفاوت از پرش هیدرولیکی آزاد (بدون بکارگیری بلوک و آبپایه) بوده است.



شکل ۴-۱- مقایسه پروفیل‌های سطح آب در کانال مستطیلی الف) پرش کلاسیک (آزاد)، ب) پرش در حوضچه استاندارد USBR III، ج) پرش در چیدمان واگرای بلوک زاویه ۳۰ درجه و د) پرش در چیدمان واگرای بلوک زاویه ۷۰ درجه

- با افزایش زاویه واگرایی و در اعداد فرود اولیه بالا، گردابه‌های طولی در امتداد یکی از دیواره‌ها مشاهده شد. همچنین مشاهدات صورت گرفته نشان داد که با افزایش شیب کف معکوس، شدت تلاطم و سرعت گردابه‌ها در سطح حوضچه کاهش می‌یابد.

- پیشانی پرش در پرش واگرا حالت مورب و مثلثی شکل داشته و در اعداد فرود بالا یک قسمت از پیشانی پرش جلوتر از پیشانی مقابل تشکیل می‌گردید، همانطور که در فصل سوم اشاره گردید، این وضعیت برای پیشانی پرش، از خصوصیات پرش واگرا می‌باشد که به مواردی از گزارش‌های ارائه شده توسط محققین در این زمینه در فصل دوم اشاره شد، در ادامه نمونه‌ای از پیشانی پرش واگرا در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.
- پایداری پرش واگرای معکوس در مقایسه با پرش مستقیم علی‌الخصوص در اعداد فرود بالا به دشواری صورت می‌گرفت، در کلیه آزمایش‌های صورت گرفته، با مانور دریچه‌ها امکان تشکیل پرش در ابتدای کانال واگرای معکوس وجود داشت لیکن تثبیت پرش با تنظیم پیوسته دریچه پروانه‌ای پایین دست انجام می‌گرفت، استفاده از بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی در حوضچه آرامش واگرای معکوس پایداری و تثبیت نمودن پرش را بهبود بخشید.



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴-۲- مقایسه پروفیل‌های سطح آب در کانال واگرای معکوس الف) پرش (آزاد)، ب) پرش در حوضچه با بلوک استاندارد USBR III، ج) پرش در چیدمان همگرای بلوک زاویه ۳۰ درجه و د) پرش در چیدمان همگرای بلوک زاویه ۷۰ درجه



شکل ۴-۳- پیشانی پرش واگرای معکوس

- با افزایش زاویه واگرایی، جریان دوپایا در حوضچه آرامش واگرای معکوس تشکیل گردید و جت آب از یک دیواره حوضچه جدا شده و به دیواره مقابل وارد شد، در فصل دوم به مواردی از گزارش‌های ارائه شده توسط محققین در خصوص این مساله در حوضچه‌های واگرا اشاره گردید (اسکات مونکریف<sup>۹۰</sup> (۱۹۷۴)، مک کورکودال<sup>۹۱</sup> (۱۹۸۰) و میلوچ<sup>۹۲</sup> و همکاران (۱۹۷۹)، با افزایش عدد فرود اولیه، غیریکنواختی و نامتقارن بودن جریان تشدید گردید، در تفسیر جریان دوپایا مشاهده گردیده می‌توان گفت پرش هیدرولیکی مانند یک تقویت کننده جریان عمل کرده و باعث شده عدم تقارن جزئی جریان ورودی به میزان قابل ملاحظه‌ای تشدید گردد (شکل ۴-۴).

<sup>90</sup> - Scott-Moncrieff.

<sup>91</sup> - Mc Corquodale.

<sup>92</sup> - Meloche.



شکل ۴-۴- جریان دوپایا در پرش واگرایی معکوس

### ۴-۳- نتایج آزمایشگاهی

در این قسمت نتایج مربوط به قرائت‌های آزمایشگاهی و نیز محاسبات صورت گرفته بر روی آنها برای هر وضعیت از شیب جانبی و زاویه واگرایی و وضعیت استقرار بلوک‌ها، در جدول مجزا که شامل جداول اندازه‌گیری و جداول تجزیه و تحلیل بودند، ثبت گردید.

در جدول ۴-۱ محدوده پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها نمایش داده شده است و در جداول ۴-۲ الی ۴-۵ پارامترهای محاسبه شده برخی از داده‌ها، با توجه به معیارهای مهم در ارزیابی و مقایسه پرش‌های هیدرولیکی که در فصل دوم به آنها اشاره شد، تنظیم گردیدند. پارامترهای ثبت شده در این جداول به ترتیب عبارتند از:

$Q$  دبی جریان،  $y_1$  عمق اولیه پرش،  $A_1$  مساحت مقطع اولیه پرش،  $Fr_1$  عدد فرود اولیه جریان،  $y_2$  عمق ثانویه پرش،  $A_2$  مساحت مقطع ثانویه پرش،  $Fr_2$  عدد فرود ثانویه جریان،  $L_j$  طول پرش،  $y_{2t}$  و  $y_{2n}$  عمق ثانویه تئوری و عددی،  $E_1$  انرژی مخصوص در مقطع اولیه پرش،  $E_2$ ،  $E_{2t}$  و  $E_{2n}$  انرژی-

های مخصوص تجربی، تئوری و عددی در مقطع ثانویه پرش و  $\%R_L$ ،  $\%R_{Lt}$  و  $\%R_{Ln}$  درصدهای افت نسبی انرژی تجربی، تئوری و عددی بین مقاطع اولیه و ثانویه پرش.

جدول ۴-۱- محدوده پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها.

پارامتر	واحد	حداقل	حداکثر
$y_1$ عمق اولیه	Mm	20	23
$y_2$ عمق ثانویه	Mm	88.81	210.57
$Fr_1$ عدد فرود جریان ورودی	Dimensionless	4.44	8.56
$L_j$ طول پرش	Cm	29	119
$Q$ دبی جریان	Lit/ s	39	81.5
$\alpha$ زاویه استقرار بلوک‌ها نسبت به محور کانال	Degree	0	80

جدول ۴-۲- قرائت‌های انجام گرفته مربوط به پرش هیدرولیکی مستقیم (پرش کلاسیک)

شماره آزمایش	$Q$ (Lit/s)	$y_1$ (cm)	$Fr_1$	$y_2$ (cm)	$Fr_2$	$L_j$ (cm)
۱	۳۹,۳	۲	۴,۴	۸,۸	۰,۵	۵۴,۸
۲	۴۶	۲	۵,۲	۱۱,۵	۰,۴	۶۶,۲
۳	۵۰,۵	۲,۱	۵,۳	۱۱,۴	۰,۴	۶۰,۹
۴	۵۰,۶	۲	۵,۷	۱۲,۶	۰,۴	۶۵,۹
۵	۶۳,۵	۲,۲	۶,۲	۱۶,۱	۰,۳	۸۸
۶	۶۶,۳	۲,۲	۶,۵	۱۶,۲	۰,۳	۹۱,۵
۷	۶۶,۹	۲,۱	۷	۱۶	۰,۳	۹۱
۸	۷۰,۶	۲,۱	۷,۴	۱۷,۶	۰,۳	۱۰۱,۹
۹	۷۸,۱	۲,۱	۸,۲	۲۱,۳	۰,۳	۱۱۳,۹
۱۰	۸۱,۵	۲,۱	۸,۵	۲۲,۵	۰,۲	۱۲۷,۳



جدول ۴-۳- محاسبات صورت گرفته مربوط به پرش هیدرولیکی مستقیم (پرش کلاسیک)

$y_{2n}(cm)$	$E_1(cm)$	$E_2(cm)$	$E_{2n}(cm)$	$\%R_L$	$\%R_{Ln}$	$y_2/y_1$	$y_{2n}/y_1$	$L_j/y_1$
۱۰,۰۵	۹,۸۲	۲۱,۶۸	۱۰,۱	۵۴,۷	۵۳,۴۱	۴,۴۲	۵,۲۵	۲۷,۳۸
۱۲,۳	۱۲,۳۲	۲۶,۵۶	۱۲,۳۵	۹۵,۰۳	۵۳,۵	۵,۴۷	۵,۸۶	۳۱,۵
۱۲,۳	۱۲,۴	۳۴,۴۹	۱۲,۳۵	۶۴,۰۵	۶۴,۱۹	۵,۷۱	۶,۱۵	۳۰,۴۷
۱۲,۸	۱۳,۴۲	۳۴,۶۲	۱۲,۸۵	۶۱,۲۴	۶۲,۸۸	۶,۳۱	۶,۴	۳۲,۶۹
۱۶	۱۶,۸۹	۴۴,۶۶	۱۶,۰۵	۶۲,۱۸	۶۴,۰۶	۷,۳۳	۷,۲۷	۴۰
۱۵,۵	۱۷,۰۵	۴۸,۴۹	۱۵,۵۵	۶۴,۸۴	۶۷,۹۳	۷,۳۵	۷,۰۴	۴۱,۵۹
۱۴,۹	۱۶,۸۹	۵۳,۸۳	۱۴,۹۵	۶۸,۶۲	۷۲,۲۳	۸,۰۲	۷,۰۹	۴۵,۶
۱۶,۸	۱۸,۴۲	۵۹,۷۱	۱۶,۸۵	۶۹,۱۵	۷۱,۷۸	۸,۷۹	۸	۵۰,۹۸
۲۰,۰۲	۲۱,۸۸	۶۶,۴۳	۲۰,۰۷	۶۷,۰۶	۶۹,۷۹	۹,۶۹	۹,۱	۵۱,۸
۲۱,۲	۲۳,۱۷	۷۲,۱۵	۲۱,۲۵	۶۷,۸۹	۷۰,۵۵	۱۰,۲۴	۹,۶۴	۵۷,۸۵

جدول ۴-۴- قرائت‌های انجام گرفته مربوط به پرش هیدرولیکی واگرایی معکوس - بلوک همگرا با زاویه ۲۰ درجه - زاویه واگرایی ۳ درجه - شیب کف معکوس ۲/۵ درصد

شماره آزمایش	$Q(Lit/s)$	$y_1(cm)$	$Fr_1$	$y_2(cm)$	$Fr_2$	$L_j(cm)$
۱	27.45	2.1	6	9.87	0.28	62.2
۲	30.42	2.1	6.65	11.40	0.25	69.2
۳	32.03	2.1	7	12.01	0.25	77.6
۴	34.08	2.1	7.45	13.06	0.23	84.9
۵	41.21	2.2	8.4	16.08	0.20	109.9

جدول ۴-۵- محاسبات صورت گرفته مربوط به پرش هیدرولیکی واگرایی معکوس - بلوک همگرا با زاویه ۲۰ درجه - زاویه واگرایی ۳ درجه - شیب کف معکوس ۲/۵ درصد

$y_{2n}(cm)$	$E_1(cm)$	$E_2(cm)$	$E_{2n}(cm)$	$\%R_L$	$\%R_{Ln}$	$y_2/y_1$	$y_{2n}/y_1$	$L_j/y_1$
11.07	39.90	11.58	11.17	70.97	71.99	4.7	5.27	29.64
12.50	48.53	12.98	12.59	73.26	74.06	5.43	5.95	32.94
13.11	53.55	13.58	13.19	74.63	75.37	5.72	6.24	36.94
13.66	60.38	14.57	13.73	75.87	77.26	6.22	6.51	40.44
16.28	79.82	17.53	16.34	78.03	79.53	7.31	7.40	49.94

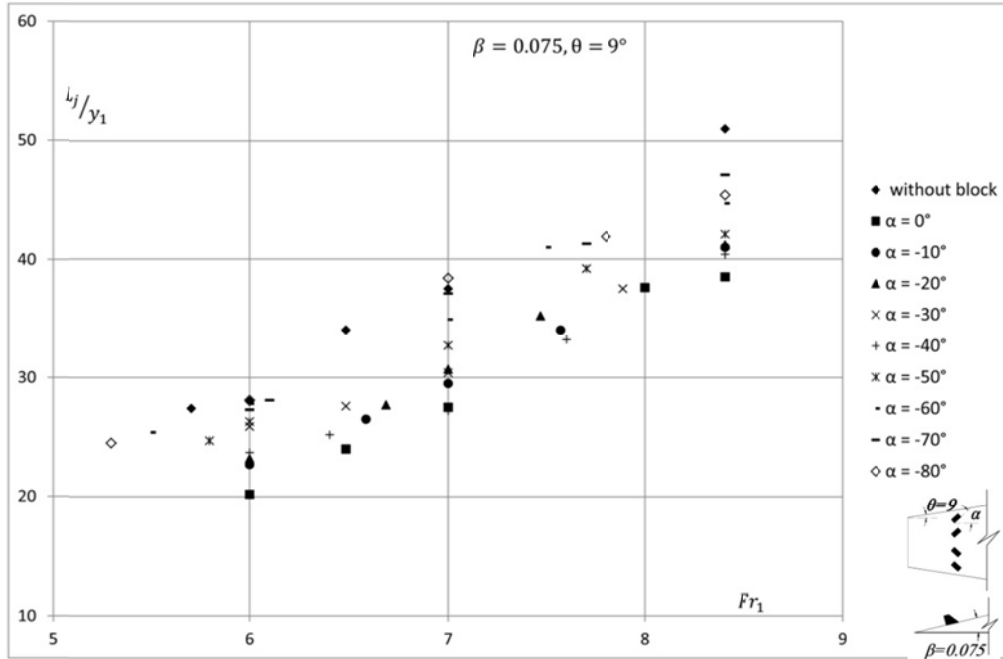
جداول ۴-۲ الی ۴-۵ مربوط به تعدادی از قرائت‌ها و محاسبات انجام گرفته‌ی پرش هیدرولیکی مستطیلی و واگرای معکوس در زوایای مختلف قرارگیری بلوک در وضعیت واگرا ارائه گردیده است.

#### ۴-۴- مقایسه چیدمان‌های واگرا و همگرای بلوک‌ها

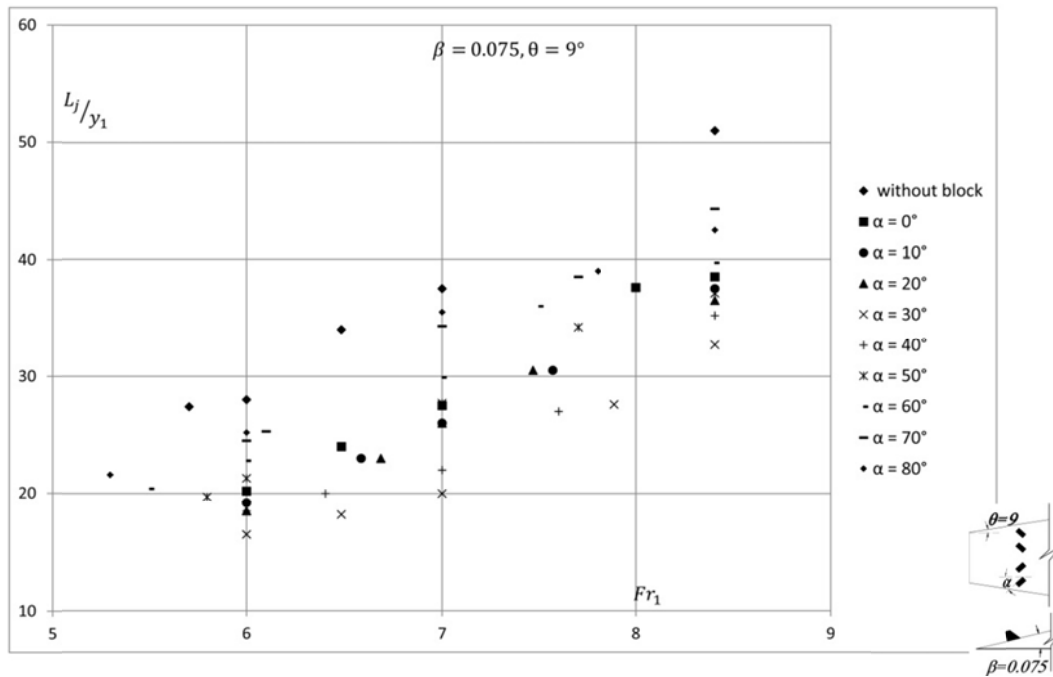
همانگونه که در فصل چهارم اشاره گردید، در این تحقیق به منظور مطالعه خصوصیات پرش هیدرولیکی واگرا و بررسی تاثیر توام شیب معکوس کف، زاویه واگرایی و به کارگیری بلوک‌های اتلاف کننده انرژی بر خصوصیات و عملکرد پرش، آزمایش‌ها برای مقاطع مستطیلی با شیب کف معکوس ۰، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ و زوایای واگرایی ۳، ۵، ۹ و صفر درجه (مستقیم) و با قرار دادن بلوک‌های اتلاف کننده انرژی انجام شد. بلوک‌های میانی در دو وضعیت واگرا و همگرا و به صورت متقارن نسبت به محور مرکزی کانال و در فواصل مختلف نسبت به دریچه‌ی بالادست قرار داده شد  $(\alpha = 0 - 80^\circ)$ .

در این قسمت ابتدا مقایسه‌ای بین دو وضعیت استقرار بلوک (همگرا و واگرا) ارائه گردیده است. شکل-های ۴-۵ و ۴-۶، تغییرات طول نسبی و عمق ثانویه در مقابل عدد فرود در این دو وضعیت در حوضچه واگرای معکوس را نشان می‌دهد. داده‌های مربوط به وضعیت بدون بلوک نیز به منظور مقایسه بهتر نتایج ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حوضچه واگرا با افزایش عدد فرود، طول نسبی پرش و نسبت عمق ثانویه افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد بکارگیری بلوک‌ها در وضعیت همگرا منجر به کاهش طول پرش نسبی و نسبت عمق ثانویه پرش می‌گردد. در وضعیت همگرای بلوک‌ها، فشار زیاد در مقابل بلوک‌ها و فشار کم در پشت آنها باعث ایجاد جریان ثانویه می‌گردد که باعث افت انرژی در حوضچه آرامش می‌گردد. بهترین نتایج کاهش طول نسبی پرش و نسبت عمق ثانویه پرش در زاویه بلوک ۳۰ درجه به دست آمده است. در این زاویه استقرار بلوک، طول نسبی پرش و نسبت عمق ثانویه به ترتیب به میزان ۲۰ و ۱۴ درصد کاهش یافت. در مقابل، به کارگیری بلوک‌ها در وضعیت واگرا منجر به افزایش طول نسبی پرش و نسبت عمق ثانویه در مقایسه با وضعیت

بدون بلوک می‌گردد. بنابراین در حوضچه آرامش واگرای معکوس، چیدمان همگرای بلوک‌ها برای انجام آزمایش‌ها انتخاب گردید.

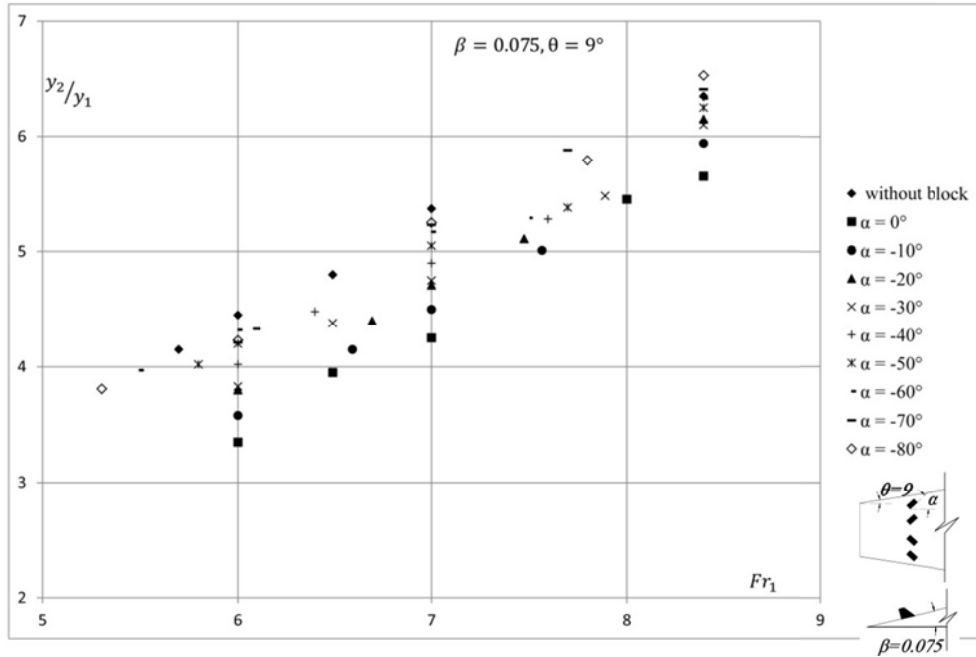


(الف)

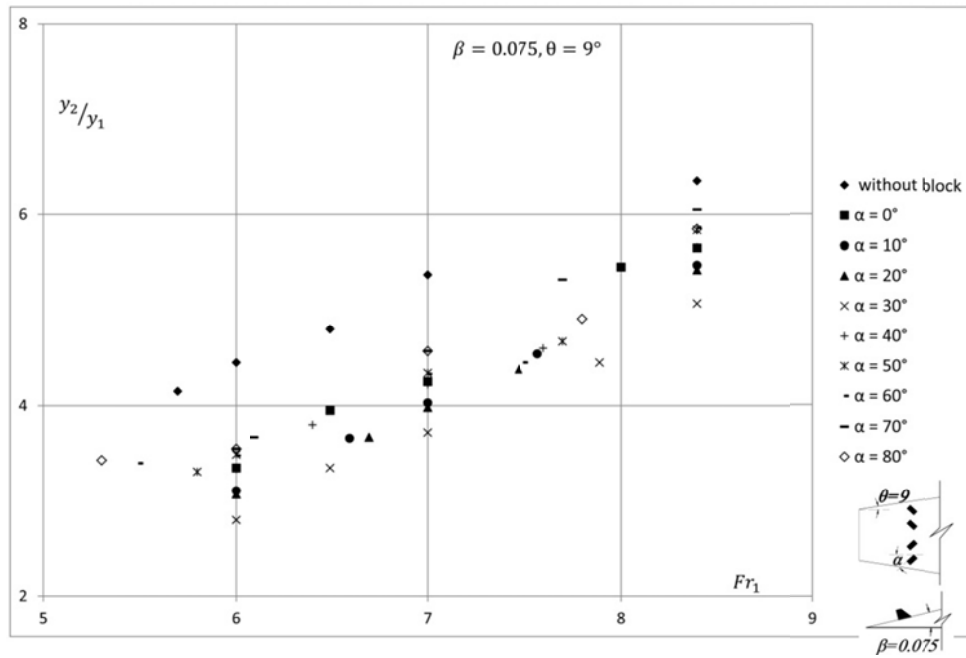


(ب)

شکل ۴-۵- تغییرات طول نسبی پرش در مقابل عدد فرود در زاویه واگرایی ۹ درجه و شیب معکوس ۰/۷۵ (الف) چیدمان واگرا (ب) چیدمان همگرا



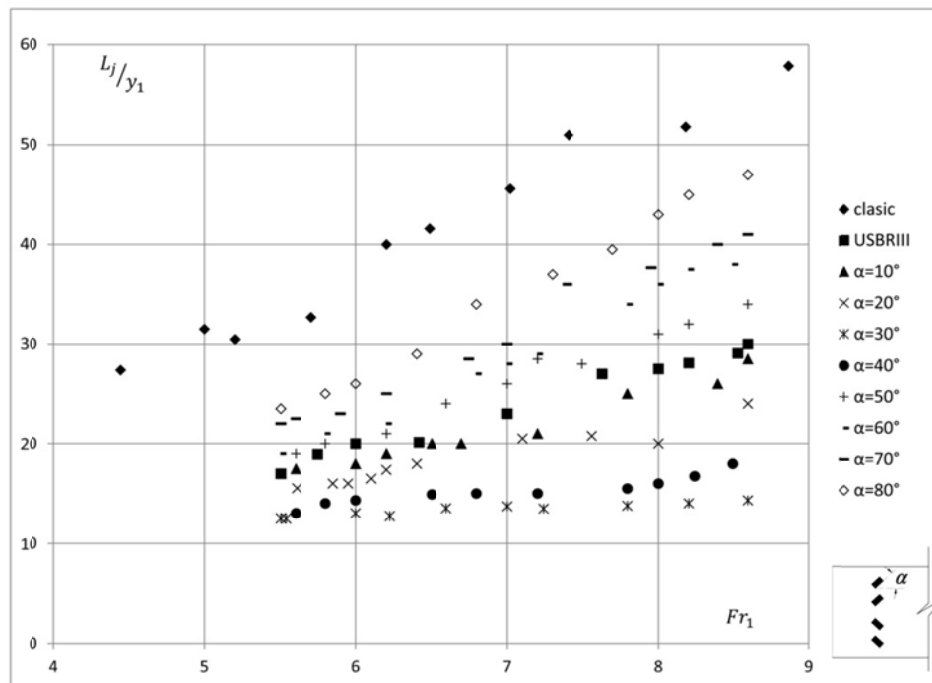
(الف)



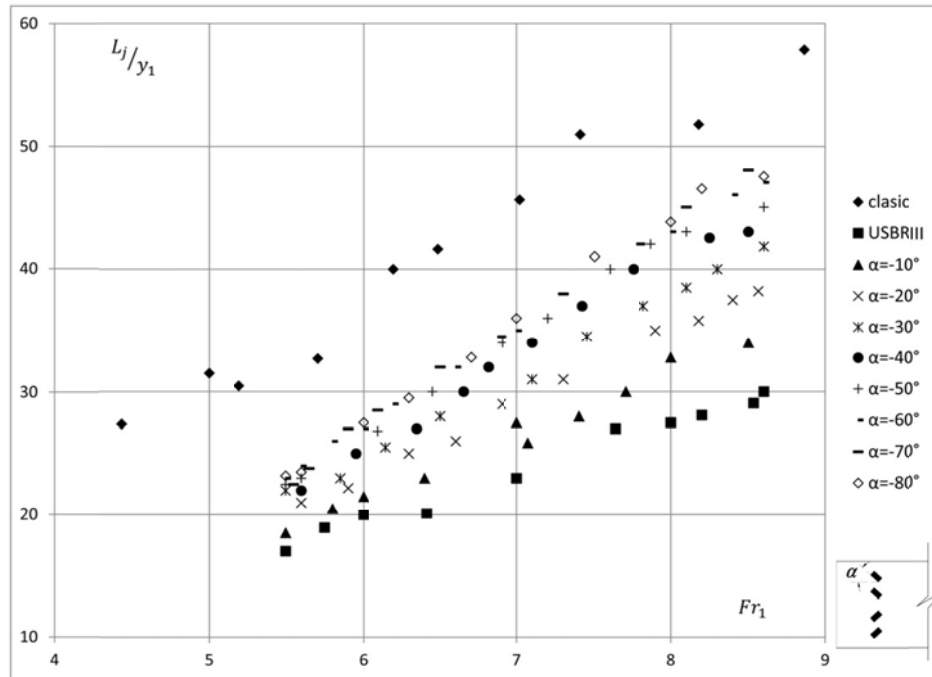
(ب)

شکل ۴-۶- تغییرات نسبت عمق ثانویه پرش در مقابل عدد فرود در زاویه واگرایی ۹ درجه و شیب معکوس ۰/۷۵ (الف)  
چیدمان واگرا (ب) چیدمان همگرا

شکل‌های ۷-۴ و ۸-۴، تغییرات طول نسبی و عمق ثانویه در مقابل عدد فرود در این دو وضعیت در حوضچه مستطیلی را نشان می‌دهد. در حوضچه آرامش مستطیلی نتایج مربوط به نحوه چیدمان بلوک‌ها دقیقاً عکس حالت واگرا به دست آمده است. بدین معنی که وضعیت واگرا منجر به کاهش طول نسبی پرش و نسبت عمق ثانویه گردیده و زاویه ۳۰ درجه بهترین نتایج کاهش را نشان داده است. در این زاویه استقرار بلوک، طول نسبی پرش و نسبت عمق ثانویه به ترتیب به میزان ۴۰ و ۱۰ درصد کاهش یافت. در حالیکه وضعیت همگرا منجر به افزایش طول پرش نسبی و نسبت عمق ثانویه در مقایسه با وضعیت بدون بلوک می‌گردد. در شکل‌ها  $\beta$  شیب کف معکوس،  $\theta$  زاویه واگرایی و  $\alpha$  زاویه استقرار بلوک را نشان می‌دهد. وضعیت استقرار بلوک همگرا با زوایای مثبت و واگرا با زوایای منفی مشخص شده است. با توجه به نتایج به دست آمده در حوضچه آرامش مستطیلی، چیدمان واگرایی بلوک‌ها برای انجام آزمایش‌ها انتخاب گردید.

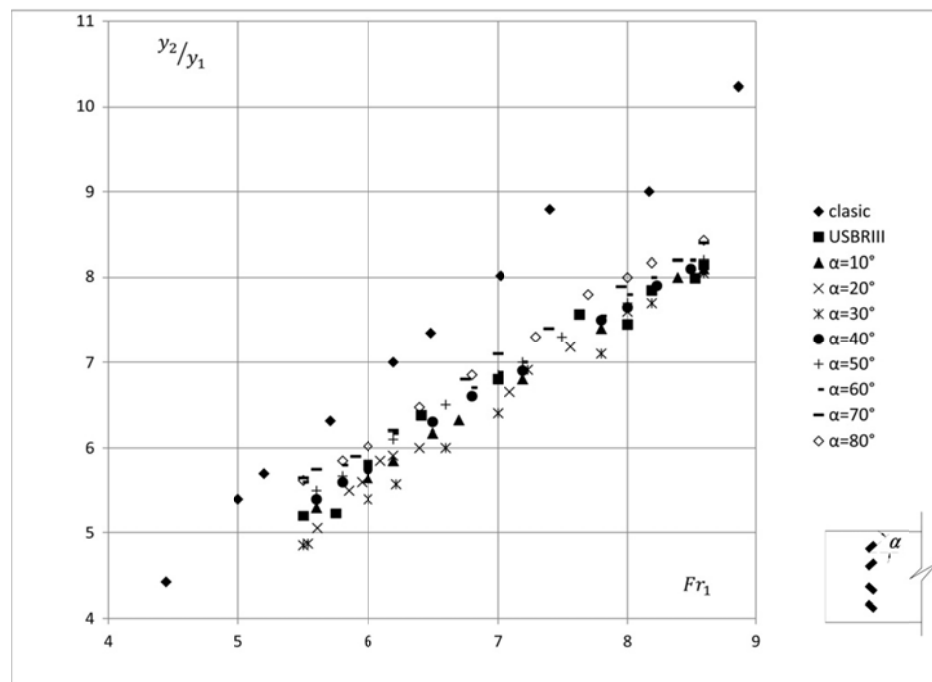


(الف)

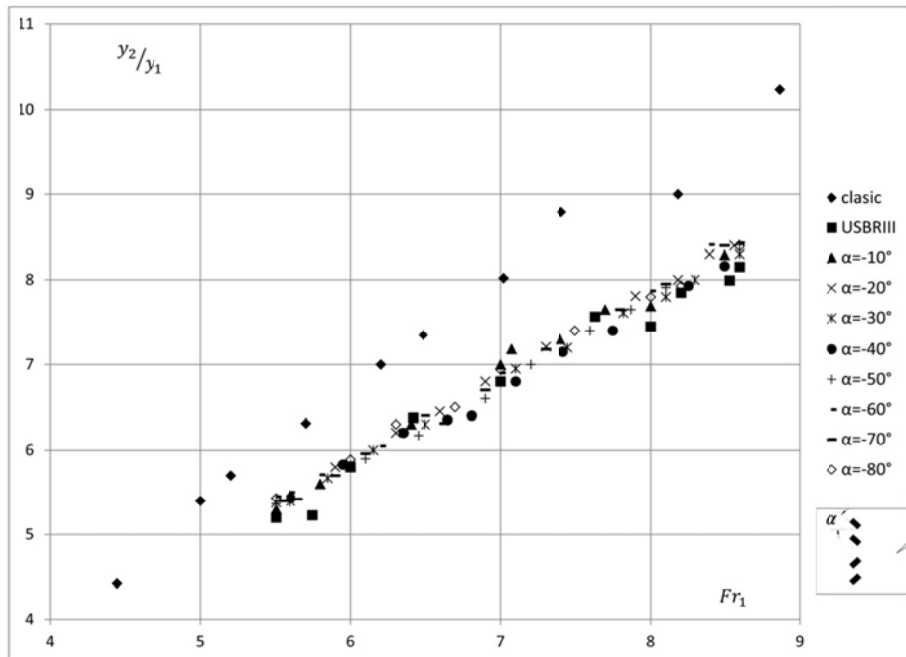


(ب)

شکل ۴-۷- تغییرات طول نسبی پرش در مقابل عدد فرود در مقطع مستطیلی الف) چیدمان بلوک واگرا ب) چیدمان بلوک همگرا



(الف)



(ب)

شکل ۴-۸- تغییرات نسبت عمق ثانویه در مقابل عدد فرود در مقطع مستطیلی الف) چیدمان بلوک واگرا ب) چیدمان بلوک همگرا

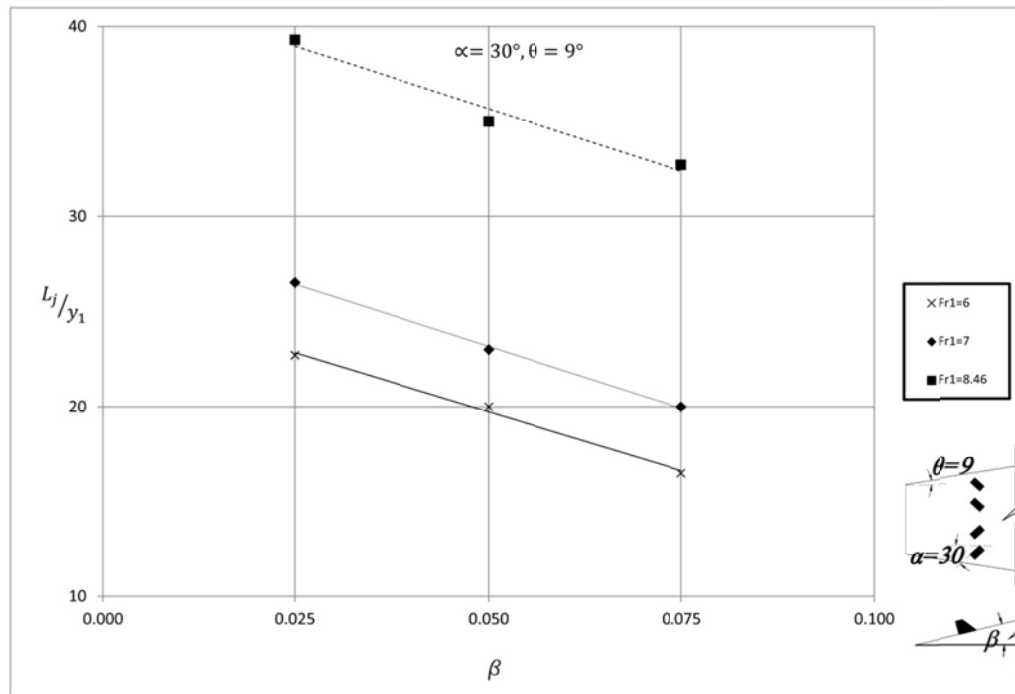
#### ۴-۵- بررسی تاثیر پارامترهای بی‌بعد بر مشخصه‌های هیدرولیکی پرش

همانطور که در فصل سوم در قسمت آنالیز ابعادی ذکر گردید پارامترهای موثر بر نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش،  $Fr_1$  عدد فرود اولیه جریان،  $\alpha$  زاویه استقرار بلوک،  $\theta$  زاویه واگرایی دیواره‌ها و  $\beta$  شیب کف معکوس می‌باشد. در این قسمت تاثیر این پارامترهای بی‌بعد بر طول نسبی و نسبت عمق ثانویه پرش در شکلهای ۴-۹ الی ۴-۱۴ بررسی گردیده است.

#### الف) طول نسبی پرش

شکل ۴-۹ تاثیر شیب کف معکوس بر طول نسبی پرش در زاویه واگرایی ۹ درجه و زاویه استقرار بلوک ۳۰ درجه را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل نشان داده شده، در این زاویه واگرایی، با افزایش شیب کف معکوس به میزان ۷/۵ درصد، طول نسبی پرش ۱۸ درصد کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش طول نسبی پرش در شیب کف ۷/۵ درصد بوده است. اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۴) نیز کاهش

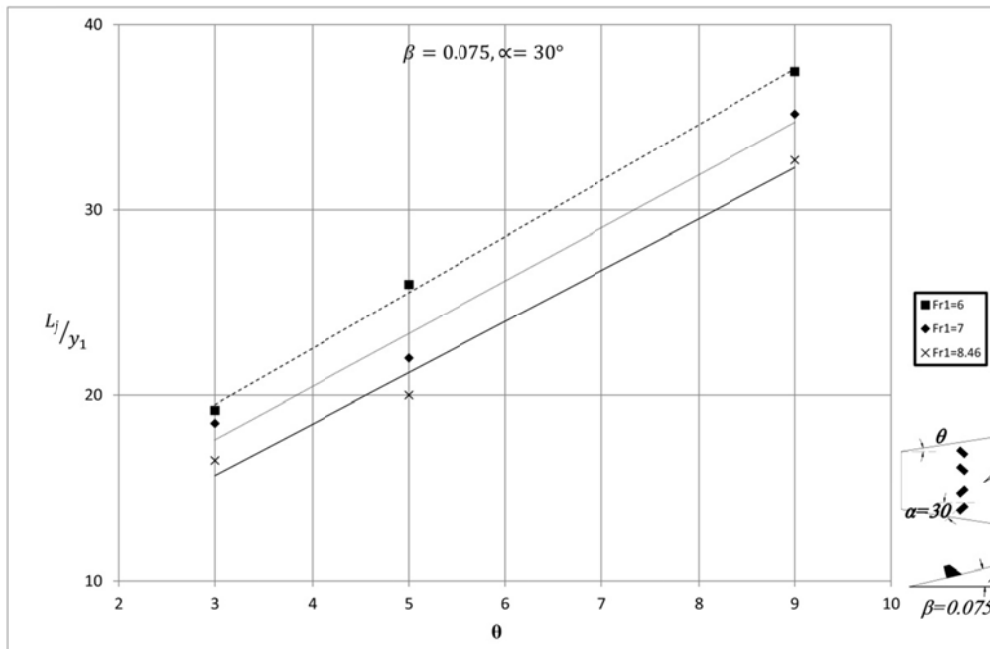
عمق ثانویه و طول نسبی پرش در اثر افزایش شیب بستر را گزارش کرده بودند و در بیشترین شیب کف معکوس یعنی ۱۰ درصد بیشترین کاهش طول نسبی پرش را مشاهده نموده بودند.



شکل ۴-۹- تاثیر شیب کف معکوس بر طول نسبی پرش در زاویه واگرایی ۹ درجه و زاویه استقرار بلوک ۳۰ درجه

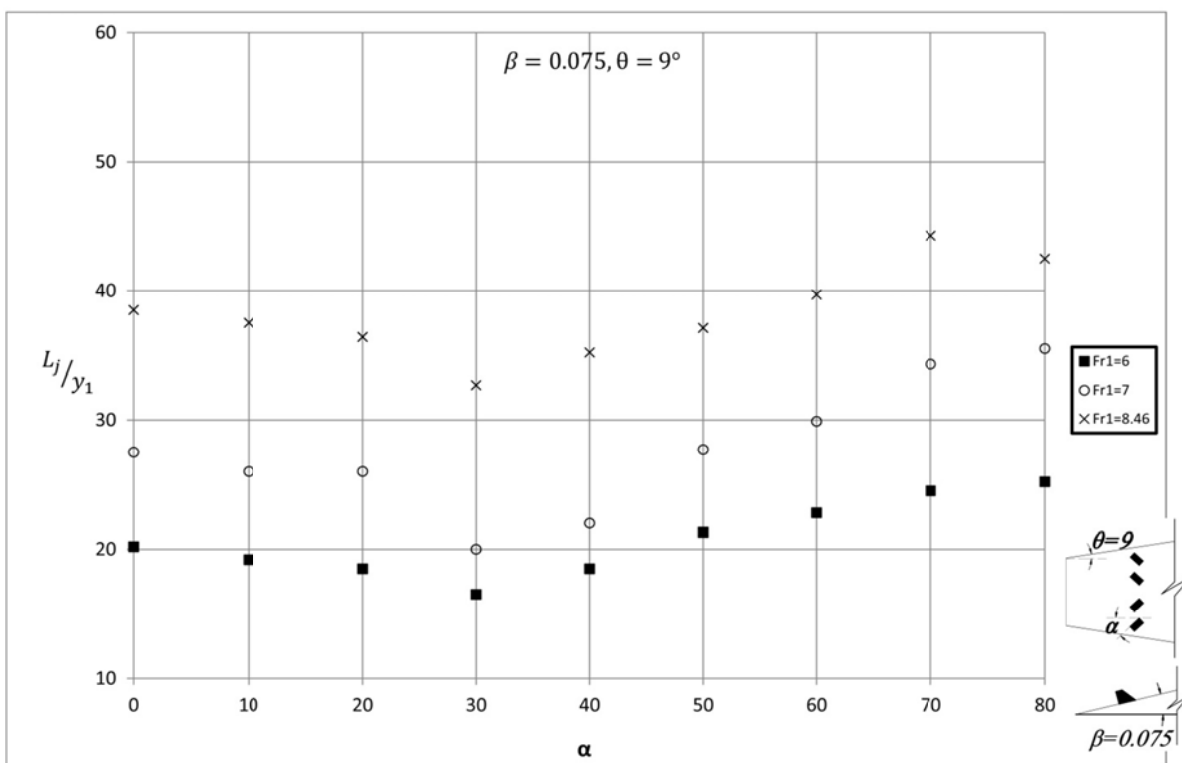
شکل ۴-۱۰- تاثیر زاویه واگرایی بر طول نسبی پرش در شیب کف معکوس ۷/۵ درصد را در زاویه استقرار بلوک ۳۰ درجه نشان می‌دهد. در این شکل افزایش زاویه واگرایی دیواره‌های حوضچه به میزان ۹ درجه، باعث کاهش طول نسبی پرش به میزان ۲۳ درصد می‌گردد. بیشترین کاهش طول نسبی پرش در زاویه واگرایی ۹ درجه بوده است. با افزایش زاویه واگرایی، عرض مقطع جریان در عمق ثانویه افزایش یافته لذا عمق جریان برای تامین نیروی هیدروستاتیک و دینامیک لازم جهت برابری با نیروهای مربوط به عمق اولیه پرش کاهش می‌یابد. لذا منطقی به نظر می‌رسد که با افزایش زاویه واگرایی، عمق جریان و به تبع آن طول نسبی پرش کاهش یابد. نتلتون و مک کورکودال (۱۹۸۳) نیز کاهش طول نسبی پرش در اثر افزایش زاویه واگرایی را گزارش نموده‌اند.





شکل ۴-۱۰- تاثیر زاویه واگرایی بر طول پرش نسبی در شیب کف ۷/۵ درصد و زاویه استقرار بلوک ۳۰ درجه

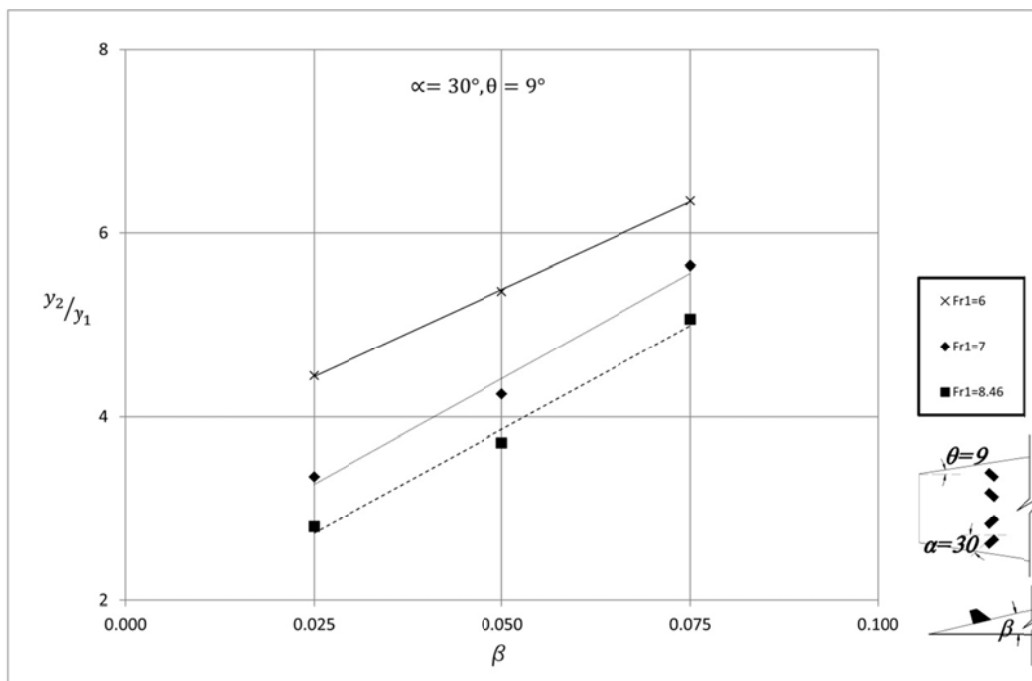
همانطور که در شکل‌های ۴-۹ و ۴-۱۰ ملاحظه گردید ترکیب بیشترین شیب کف معکوس و بیشترین زاویه واگرایی منجر به حصول کمترین طول نسبی پرش گردیده است. لذا در شکل ۴-۱۱ تاثیر وجود بلوک بر طول نسبی پرش در زاویه واگرایی ۹ درجه و شیب کف معکوس ۷/۵ درصد بررسی گردیده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌گردد با بکارگیری بلوک در زاویه استقرار ۳۰ درجه در حوضچه آرامش واگرای معکوس طول نسبی پرش به میزان ۲۰ درصد کاهش می‌دهد.



شکل ۴-۱۱- تاثیر زاویه استقرار بلوکها بر طول پرش نسبی در زاویه واگرایی ۹ درجه و شیب کف ۷/۵ درصد

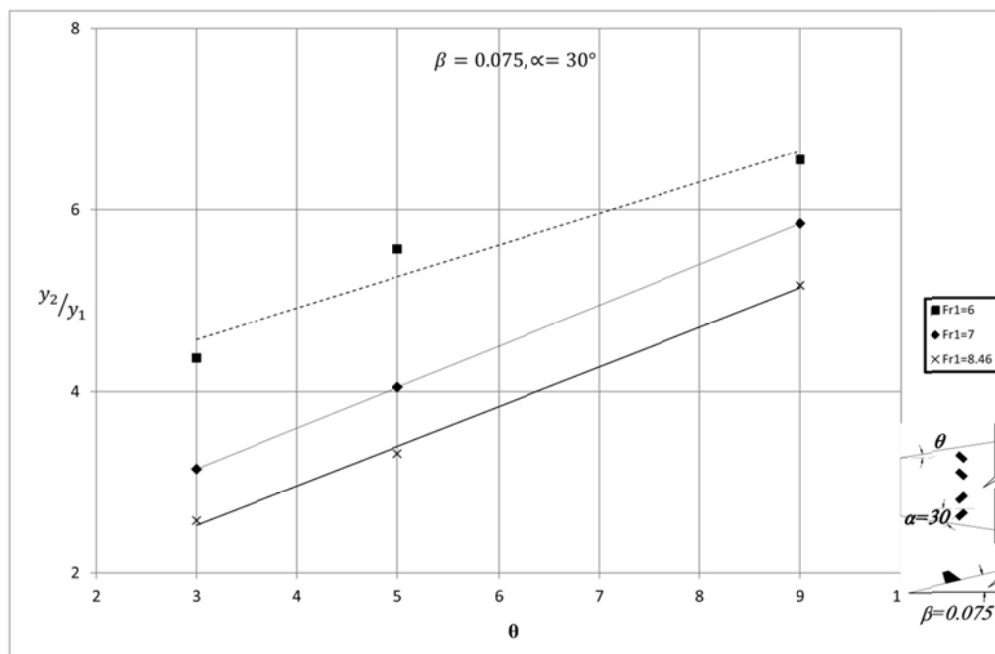
### (ب) نسبت عمق ثانویه

شکل ۴-۱۲ تاثیر شیب کف معکوس بر نسبت عمق ثانویه در زاویه واگرایی ۹ درجه را با وجود بلوک در زاویه استقرار ۳۰ درجه نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل نشان داده شده، در هر زاویه واگرایی، با افزایش شیب کف معکوس به میزان ۷/۵ درصد، نسبت عمق ثانویه پرش ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش نسبت عمق ثانویه در شیب کف ۷/۵ درصد بوده است. بیرامی و چمنی (۲۰۱۰) نیز کاهش نسبت عمق ثانویه پرش در اثر افزایش شیب کف معکوس را گزارش نموده‌اند.



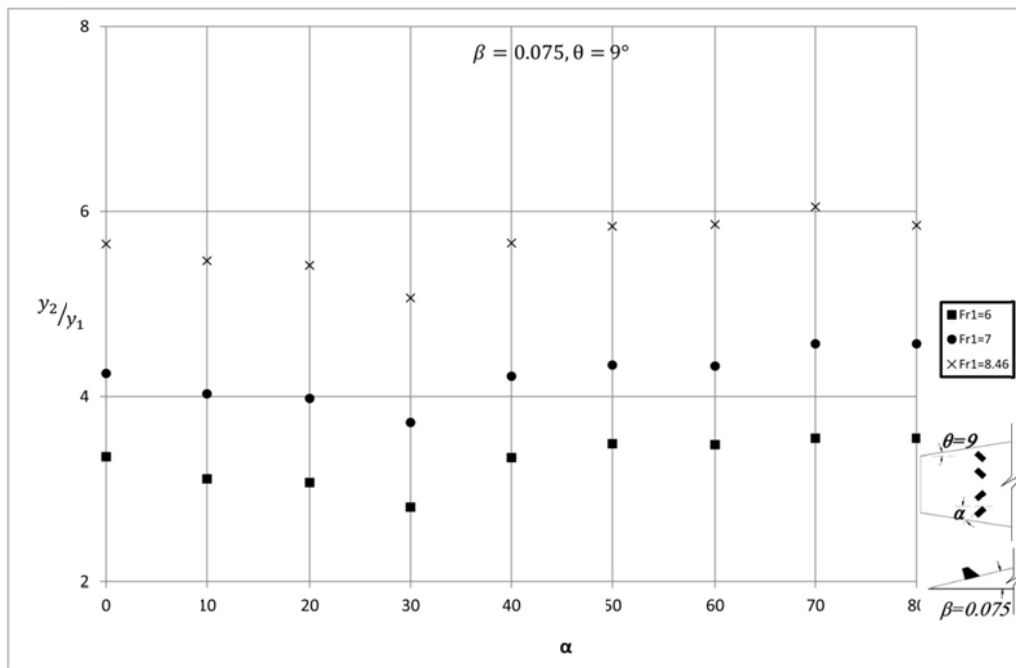
شکل ۴-۱۲- تاثیر شیب کف معکوس بر عمق ثانویه نسبی در زاویه واگرایی ۹ درجه و زاویه استقرار بلوک ۳۰ درجه

شکل ۴-۱۳- تاثیر زاویه واگرایی بر نسبت عمق ثانویه پرش در شیب کف معکوس ۷/۵ درصد را با وجود بلوک در زاویه استقرار ۳۰ درجه نشان می‌دهد. در این شکل افزایش زاویه واگرایی دیواره‌های حوضچه به میزان ۹ درجه، باعث کاهش نسبت عمق ثانویه پرش به میزان ۲۰ درصد می‌گردد. بیشترین کاهش نسبت عمق ثانویه پرش در زاویه واگرایی ۹ درجه بوده است. کلسیوس و احمد (۱۹۶۹) نیز کاهش نسبت عمق ثانویه پرش در اثر افزایش زاویه واگرایی را گزارش نموده‌اند.



شکل ۴-۱۳- تاثیر زاویه واگرایی بر عمق ثانویه نسبی در شیب کف ۷/۵ درصد و زاویه استقرار بلوک ۳۰ درجه

همانطور که در شکل‌های ۴-۱۲ و ۴-۱۳ ملاحظه گردید ترکیب بیشترین شیب کف معکوس و بیشترین زاویه واگرایی کمترین نسبت عمق ثانویه پرش را نتیجه داد. لذا در شکل ۴-۱۴ تاثیر وجود بلوک با زوایای استقرار مختلف بر نسبت عمق ثانویه پرش در زاویه واگرایی ۹ درجه و شیب کف معکوس ۷/۵ درصد بررسی گردیده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌گردد بکارگیری بلوک در زاویه استقرار ۳۰ درجه در حوضچه آرامش واگرای معکوس نسبت عمق ثانویه پرش را به میزان ۱۴ درصد کاهش می‌دهد.



شکل ۴-۱۴- تاثیر زاویه استقرار بلوک‌ها بر عمق ثانویه نسبی در زاویه واگرایی ۹ درجه و شیب کف ۷/۵ درصد

نتایج زیر از شکل‌های ۴-۹ الی ۴-۱۴ به دست آمده است:

- در شکل‌های ۴-۹ الی ۴-۱۴ با افزایش عدد فرود اولیه، عمق ثانویه و طول نسبی پرش افزایش می‌یابد.
- در شکل‌های ۴-۹ و ۴-۱۲ در هر زاویه واگرایی، با افزایش شیب کف معکوس به میزان ۷/۵ درصد، عمق ثانویه و طول نسبی پرش به ترتیب ۳۰ درصد و ۱۸ درصد کاهش می‌یابد. نتلتون و مک کورکودال (۱۹۸۹)، اربهابهیراما و ابلا (۱۹۷۱) و برمن و جگر (۱۹۹۰) نیز کاهش نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش در اثر افزایش زاویه واگرایی را گزارش نموده‌اند.
- در شکل‌های ۴-۱۰ و ۴-۱۳ افزایش زاویه واگرایی دیواره‌های حوضچه به میزان ۹ درجه، باعث کاهش نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش به میزان ۲۰ و ۲۳ درصد می‌گردد. اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۴) نیز کاهش عمق ثانویه و طول نسبی پرش در اثر افزایش شیب بستر و افزایش زاویه واگرایی را گزارش کرده بودند.

- بهترین زاویه همگرایی بلوک در حوضچه واگرا (زاویه بلوک با محور مرکزی حوضچه) ۳۰ درجه به دست آمده است که نسبت عمق ثانویه و طول پرش را به ترتیب در شکل‌های ۴-۱۱ و ۴-۱۴، ۱۴ درصد و ۲۰ درصد کاهش داده است. افزایش بیشتر زاویه همگرایی بلوک منجر به افزایش نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش گردیده است.

#### ۴-۶- روابط برازشی نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش

به منظور توسعه یک مدل ساده برای برآورد نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش، از داده‌های نسبت عمق ثانویه، عدد فرود، طول نسبی پرش، شیب کف معکوس، زاویه واگرایی و زاویه استقرار بلوک به عنوان پارامترهای مستقل و وابسته استفاده شد. در توسعه مدل از ۱۰۰ سری داده آزمایشگاهی برای مقطع مستطیلی و ۴۵۰ سری داده آزمایشگاهی برای مقطع واگرای معکوس مورد استفاده قرار گرفت. از آنجایی که در تجزیه و تحلیل آماری، آزمون‌های فرض بر پایه نرمال بودن داده‌ها می‌باشد و غیر نرمال بودن آنها این آزمون‌ها را غیرمعتبر می‌سازد، لذا نخستین گام در تجزیه و تحلیل آماری، نرمال کردن داده‌ها است. آزمون نرمال بودن داده‌ها توسط نرم افزار SPSS برای همه داده‌ها و مجموعه‌ای از ترکیبات آنها انجام شد. از میان پارامترهای یادشده به عنوان متغیرهای مستقل و وابسته، تنها شیب کف معکوس، زاویه واگرایی و زاویه استقرار بلوک‌ها از توزیع نرمال تبعیت نکردند. برای نرمال کردن پارامترهای یاد شده، با بکارگیری ترکیبات مختلف از آنها، شرط نرمال بودن برای آنها برقرار گردید. به هنگام برقراری رگرسیون غیرخطی، چنانچه بین متغیرهای مستقل رابطه خطی قوی مشاهده شود، همراستایی چندگانه بوجود می‌آید. اگرچه نبود همراستایی از فرض‌های زیربنایی رگرسیون نیست، لیکن به دلیل مشکلاتی که در تفسیر و برآورد متغیرهای وابسته ایجاد می‌کند، باید از بکاربردن آن خودداری نمود. آزمون همراستایی برای ایجاد معادله رگرسیون چند متغیره برای برآورد پارامترهای یادشده در مقطع مستطیلی، نشان داد که تنها میان عدد فرود اولیه و نسبت عمق ثانویه همراستایی وجود دارد. بنابراین برای اشتقاق معادلات، نسبت عمق ثانویه از مجموعه متغیرهای مستقل حذف

گردید. همچنین آزمون همراستایی برای ایجاد معادله رگرسیون چند متغیره برای برآورد پارامترهای یادشده در مقطع واگرای معکوس، نشان داد که تنها میان عدد فرود اولیه و نسبت عمق ثانویه همراستایی وجود دارد. بنابراین برای اشتقاق معادلات، نسبت عمق ثانویه از مجموعه متغیرهای مستقل حذف گردید. در نهایت معادلات به دست آمده برای برآورد عمق ثانویه و طول نسبی پرش در مقاطع مستطیلی و واگرای معکوس به شرح زیر به دست آمد:

برای مقاطع مستطیلی:

$$\frac{y_2}{y_1} = 1.933 (\alpha + 1)^{-0.006} (Fr_1^{0.573}) (L_j/y_1)^{0.143} - 2.302 \quad (1-4)$$

$$R^2 = 0.96$$

$$\frac{L_j}{y_1} = 2.992 (\alpha + 1)^{-0.034} (Fr_1^{1.189}) \quad (2-4)$$

$$R^2 = 0.89$$

برای مقاطع واگرای معکوس:

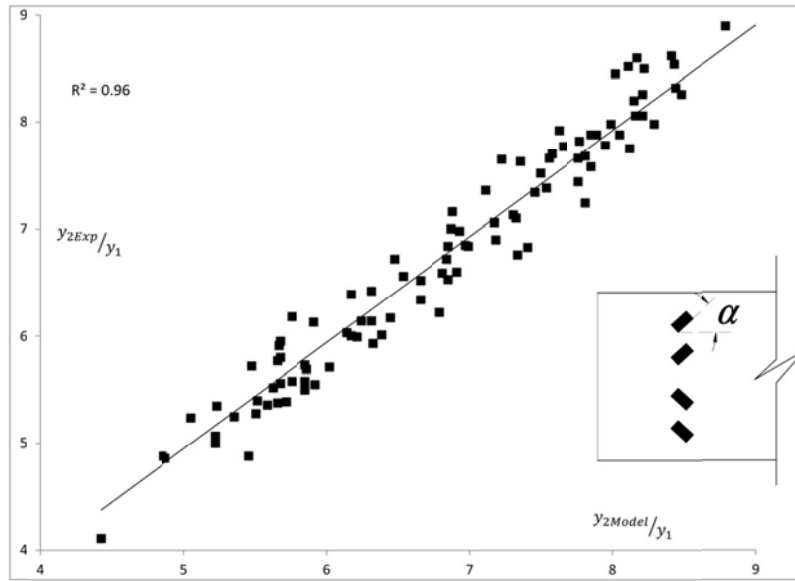
$$\frac{y_2}{y_1} = 0.268 (\beta + 1)^{-4.508} (\theta + 1)^{0.031} (\alpha + 1)^{0.002} (Fr_1^{0.62}) (L_j/y_1)^{0.492} + 0.838 \quad (3-4)$$

$$R^2 = 0.96$$

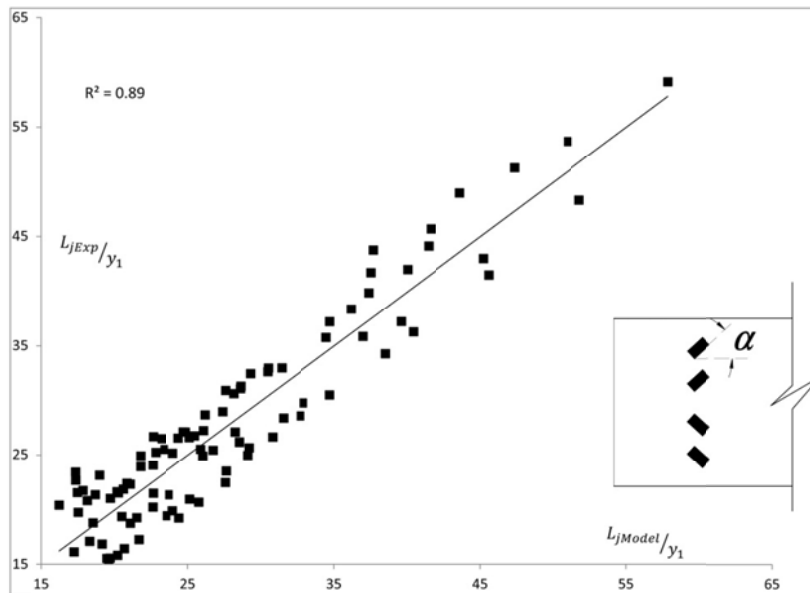
$$\frac{L_j}{y_1} = 2.697 (\beta + 1)^{-4.571} (\theta + 1)^{-0.097} (\alpha + 1)^{-0.023} (Fr_1^{1.537}) \quad (4-4)$$

$$R^2 = 0.82$$

در شکل (۴-۱۵) عملکرد مدل برازشی برای برآورد نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش مقاطع مستطیلی نشان داده شده است. همچنین در شکل (۴-۱۶) عملکرد مدل بر پارامترهای یاد شده در زاویه بلوک ۳۰ درجه در مقطع مستطیلی نشان داده شده است.



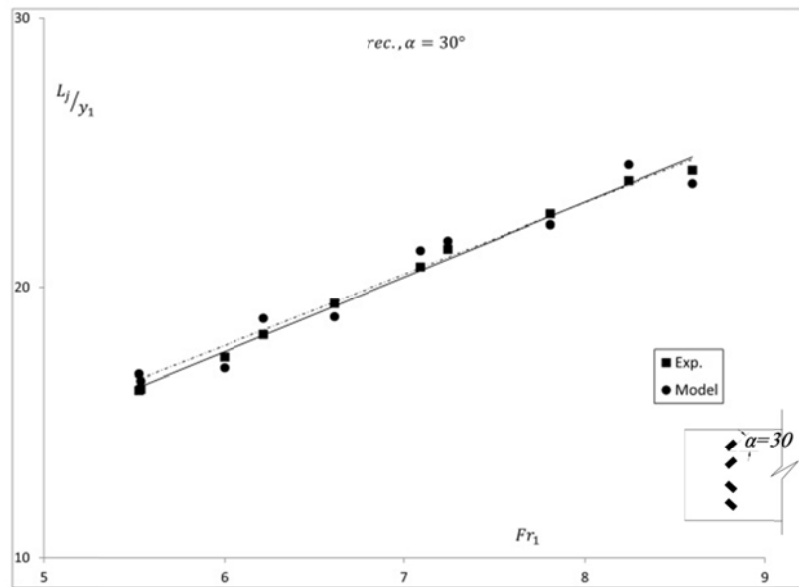
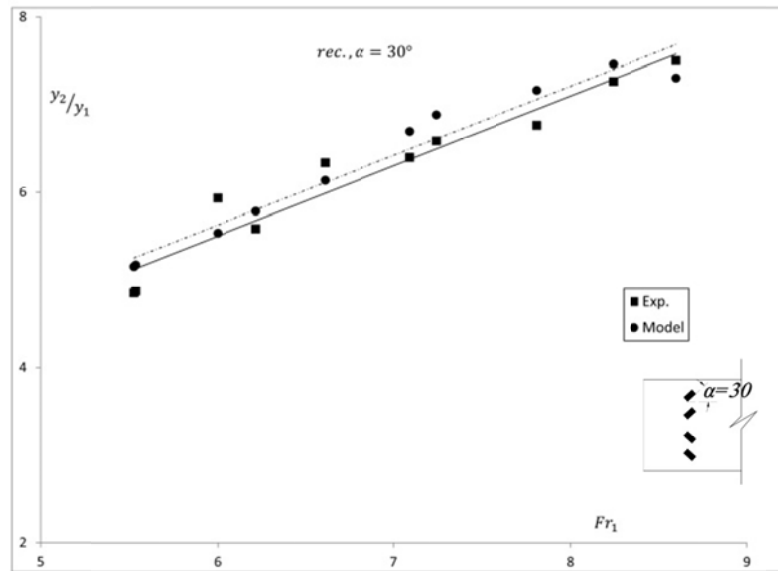
(الف)



(ب)

شکل ۴-۱۵- ارزیابی عملکرد مدل برآورد نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش در مقاطع مستطیلی

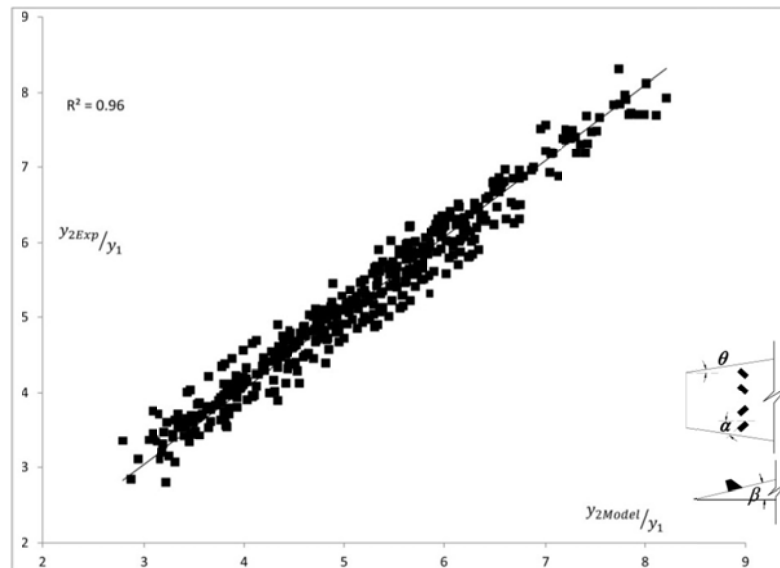




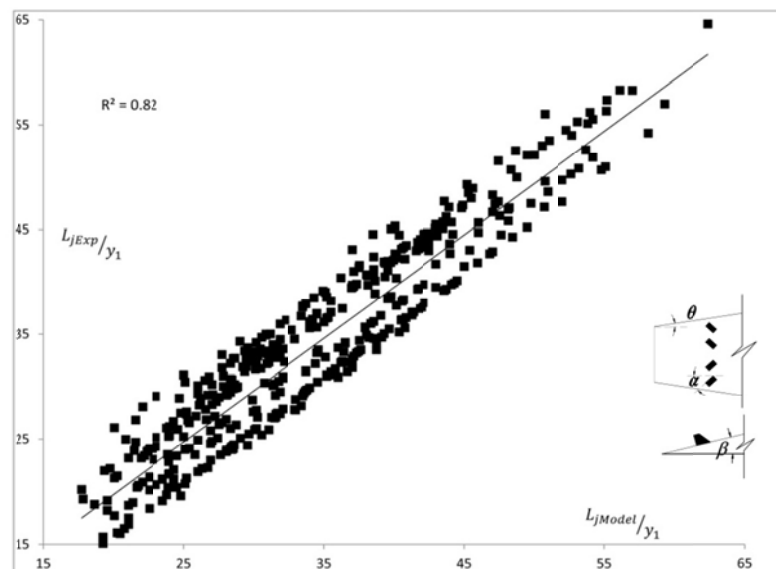
شکل ۴-۱۶- مقایسه نتایج مدل رگرسیونی نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش در مقطع مستطیلی در زاویه بلوک ۳۰ درجه با نتایج آزمایشگاهی

همانطور که در شکل‌های فوق مشخص است، مطابقت نزدیکی بین مقادیر برآورد شده توسط مدل و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد که نشان دهنده دقت بالای مدل در برآورد پارامترهای یادشده می‌باشد.

در شکل (۱۷-۴) عملکرد مدل برازشی برای برآورد نسبت عمق ثانویه و طول نسبی مقاطع واگرایی معکوس نشان داده شده است. همچنین در شکل (۱۸-۴) عملکرد مدل بر پارامترهای یاد شده در در زاویه واگرایی ۹ درجه، شیب معکوس ۷/۵ درصد و زاویه بلوک ۳۰ درجه نشان داده شده است.

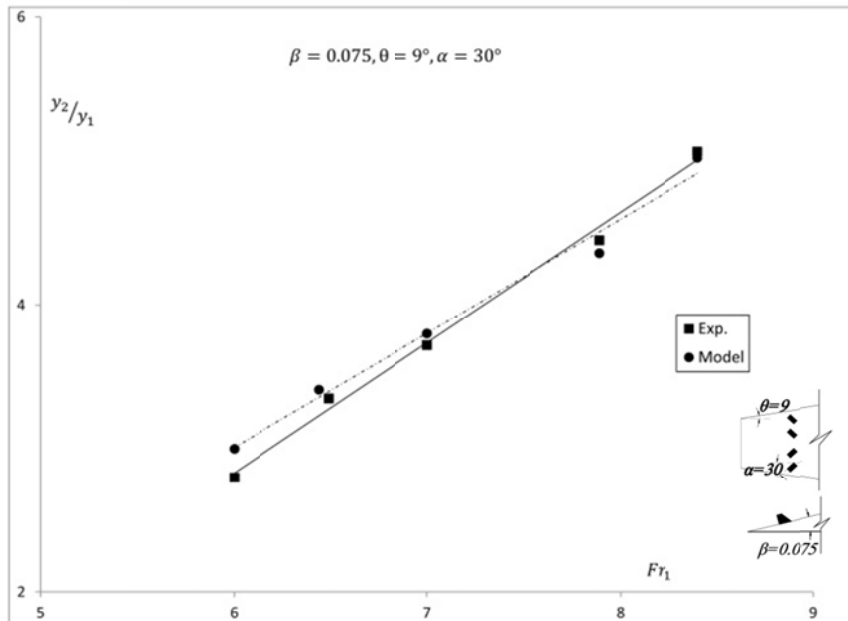


(الف)

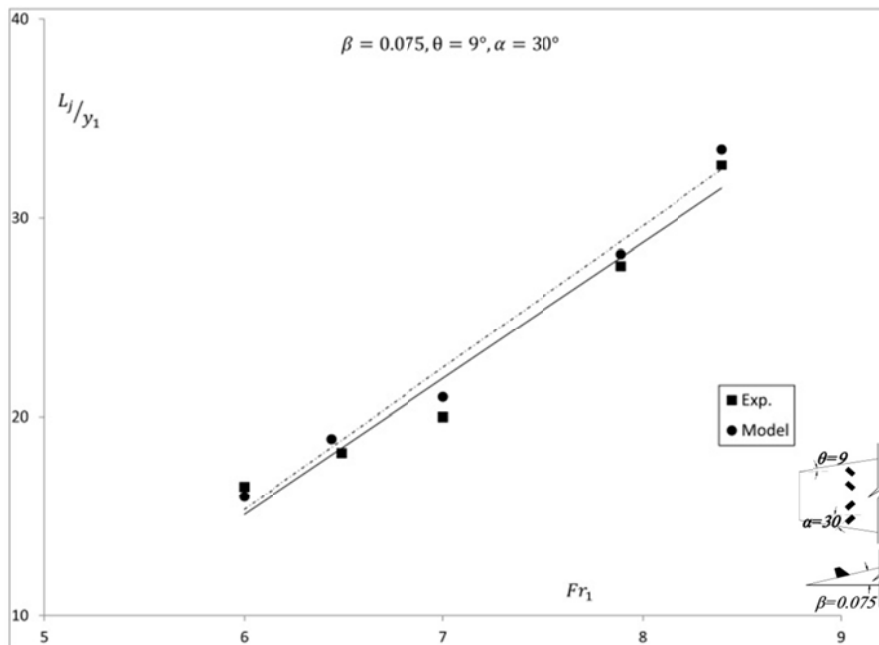


(ب)

شکل ۱۷-۴- ارزیابی عملکرد مدل برآورد نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش واگرایی معکوس



(الف)



(ب)

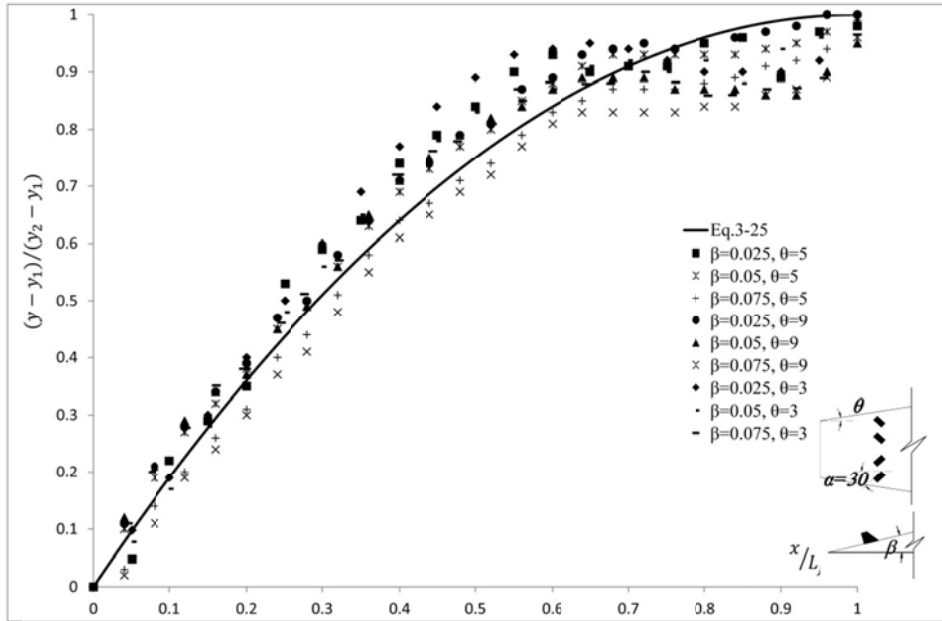
شکل ۴-۱۸- مقایسه نتایج مدل رگرسیونی نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش واگرای معکوس در زاویه واگرایی ۹ درجه، شیب معکوس ۷/۵ درصد و زاویه بلوک ۳۰ درجه با نتایج آزمایشگاهی

همانطور که در شکل‌های فوق مشخص است، مطابقت نزدیکی بین مقادیر برآورد شده توسط مدل و داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد که نشان دهنده دقت بالای مدل در برآورد پارامترهای یادشده می‌باشد.

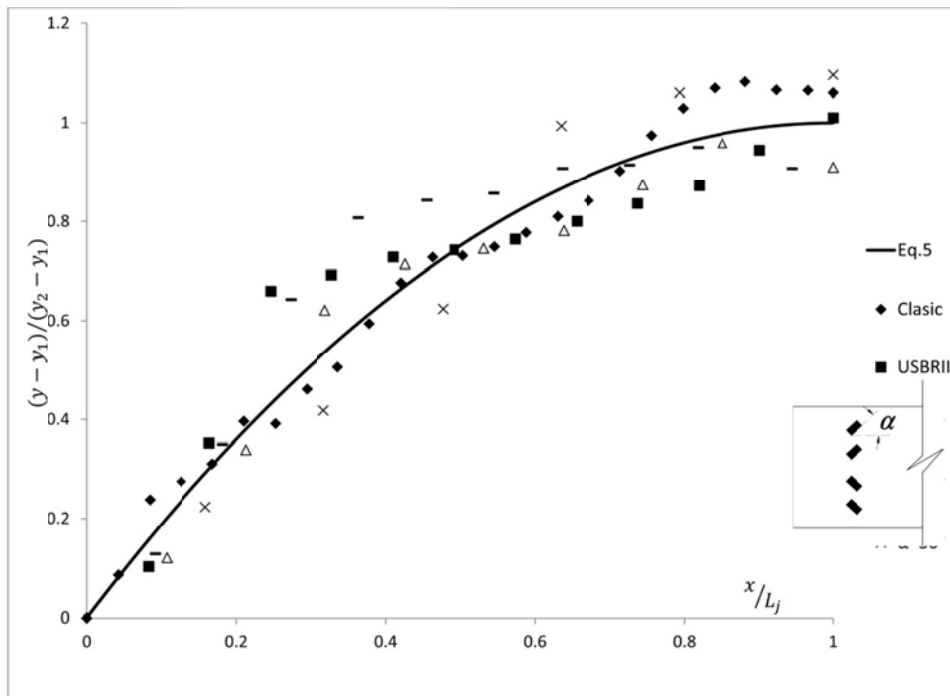
#### ۴-۷- نتایج تئوری و آزمایشگاهی نیمرخ پرش واگرای معکوس

همانطور که در فصل سوم (مبانی تئوری پرش) اشاره شد، یکی از تفاوت‌های اساسی در استخراج روابط تئوری پرش هیدرولیکی واگرای معکوس با پرش‌های مستقیم، وجود نیروهای جانبی در معادله اندازه حرکت برای مقاطع قبل و بعد از پرش می‌باشد. برای محاسبه این جزء نیرو شناخت نوع معادله نیمرخ سطح آب ضروری می‌باشد. از آنجاییکه در این تحقیق برای محاسبه نیروی جانبی به منظور استخراج رابطه تئوری نسبت عمق ثانویه، معادله بیضی برای نیمرخ سطح آب در طول پرش در نظر گرفته شده است. لذا جهت بررسی صحت این فرضیه، در کلیه آزمایش‌ها نیمرخ طولی پرش برداشت شد. سپس برای تمام نیمرخ‌های آزمایشگاهی، منحنی تئوری (منحنی بیضی) ترسیم گردیده است و در کنار داده‌های آزمایشگاهی نمایش داده شد. نمونه‌ای از این منحنی برای نیمرخ پرش در مقطع مستطیلی با زوایای واگرایی و شیب کف مختلف و زاویه بلوک ۳۰ درجه در شکل (۴-۱۹) آورده شده است. در این شکل، خط ممتد مربوط به منحنی تئوری و نقاط، داده‌های آزمایشگاهی می‌باشند.

همانطور که در شکل (۴-۱۹) مشخص است، مطابقت نزدیکی بین منحنی‌های تئوری و داده‌های آزمایشگاهی نیمرخ پرش در مقاطع واگرای معکوس وجود دارد که صحت فرضیه بکار گرفته شده در محاسبه نیروی جانبی در معادله اندازه حرکت برای مقاطع قبل و بعد از پرش را تایید می‌کند.



شکل ۴-۱۹- مقایسه منحنی تئوری و آزمایشگاهی نیمرخ پرش در مقاطع واگرای معکوس



شکل ۴-۲۰- مقایسه منحنی تئوری و آزمایشگاهی نیمرخ پرش در مقاطع مستطیلی با بلوک واگرا در زوایای مختلف

در شکل (۴-۲۰) پروفیل پرش در مقطع مستطیلی و برای زوایای مختلف بلوک تا ۳۰ درجه در وضعیت استقرار واگرا ترسیم گردیده است. همانطور که در این شکل مشخص است، در زاویه

واگرایی بلوک کمتر از ۳۰ درجه تطابق نزدیکی بین منحنی‌های تئوری و داده‌های آزمایشگاهی نیمرخ پرش در مقطع مستطیلی وجود دارد. اما در زوایای واگرایی بیش از ۳۰ درجه پروفیل از وضعیت تئوری فاصله گرفته و اختلاف قابل ملاحظه‌ای در نتایج تئوری و آزمایشگاهی وجود خواهد داشت.

#### ۴-۸- بررسی مدل نیمه تحلیلی نسبت عمق ثانویه

در فصل سوم، نحوه استخراج روابط تئوری پرش هیدرولیکی واگرای معکوس با بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی تشریح گردید. از آنجاییکه به منظور استخراج روابط تئوری از فرضیات ساده شونده‌ای استفاده گردید، لذا جهت ارزیابی صحت روابط تئوری و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی، نخست مقادیر نسبت عمق ثانویه آزمایشگاهی محاسبه گردید. از آنجاییکه در رابطه نسبت عمق ثانویه مربوط به پرش‌های هیدرولیکی واگرا (معادله ۳-۳۳)، طول پرش از پارامترهای وردی محسوب می‌شود، لذا برای محاسبه مقادیر تئوری از رابطه رگرسیونی طول پرش متناظر با آنها استفاده شده است. پس از قراردادن روابط رگرسیونی در رابطه به دست آمده از فصل سوم، با استفاد از Mathematica روابط به صورت زیر ساده سازی گردید.  $\gamma_2$  عمق آب بلافاصله پس از بلوک‌ها و  $C_{DS}$  ضریب درگ آبپایه انتهایی نیز از طریق رابطه رگرسیونی داده‌های آزمایشگاهی از روابط (۴-۵) و (۴-۶) قابل محاسبه است:

$$\gamma_2 = 3h + 0.13 \quad (۴-۵)$$

$$C_{DS} = 0.71 - 0.85(L_j/L_{j0}) \quad (۴-۶)$$

$$Y^3 K_1 + Y^2 K_2 + Y K_3 - 2Fr_1^2 = 0 \quad (۴-۷)$$

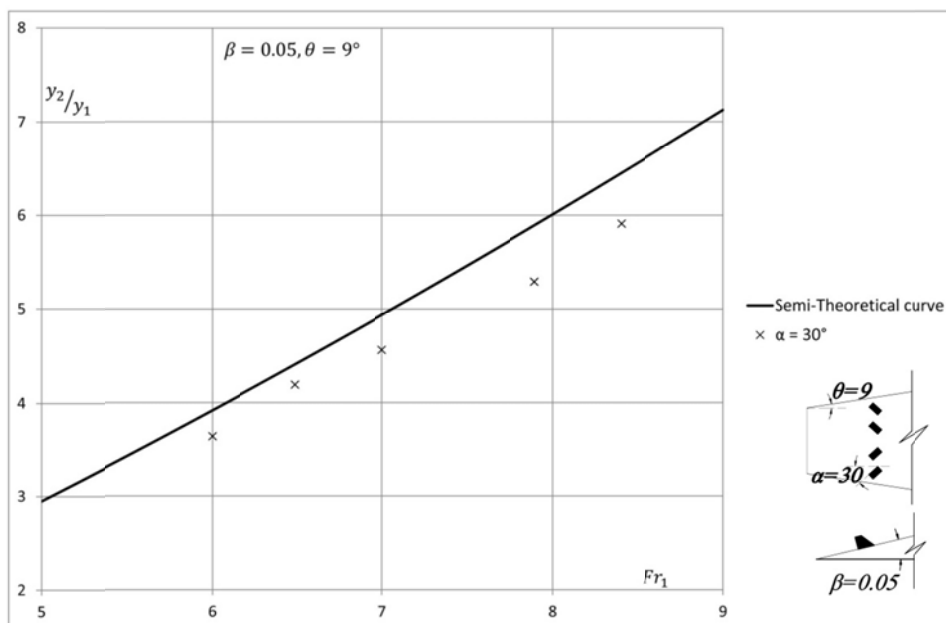
که در آن:

$$K_1 = \frac{2.8768By_1 \sec(\beta)(Fr_1)^{1.537} \tan(\theta)}{(\alpha+1)^{0.023}(\beta+1)^{4.571}b_1(\theta+1)^{0.097}} - \frac{B^2}{2}$$

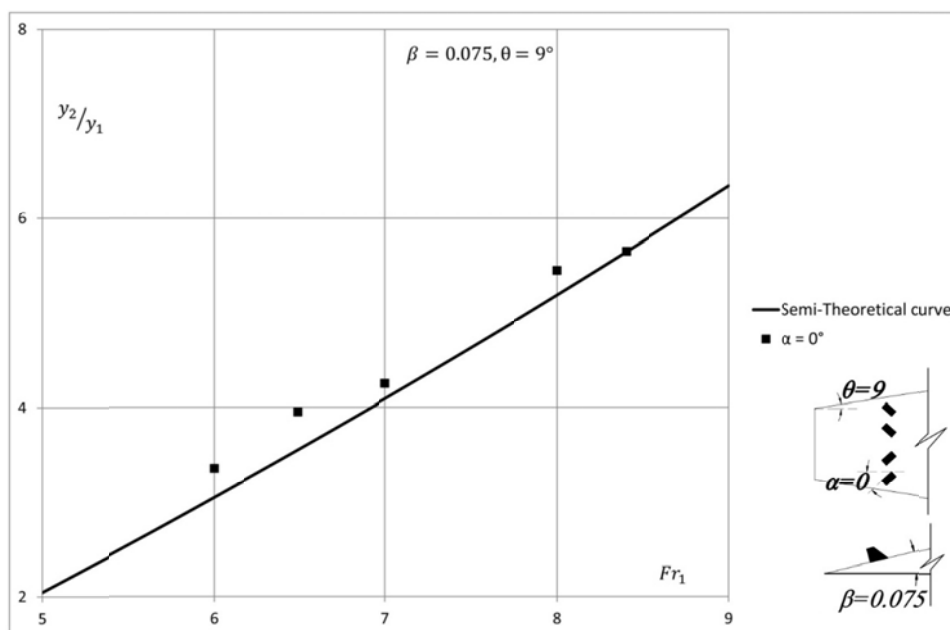
$$K_2 = \frac{B(Fr_1)^{1.537}(b_1(-1.12375B - 0.67425)\tan(\beta) + 1.4384y_1 \sec(\beta)\tan(\theta))}{(\alpha+1)^{0.023}(\beta+1)^{4.571}b_1(\theta+1)^{0.097}}$$

$$K_3 = \frac{1}{2}B \left( \begin{array}{l} -\frac{2.1576y_1 \sec(\beta)(Fr_1)^{1.537} \tan(\theta)}{(\alpha+1)^{0.023}(\beta+1)^{4.571}b_1(\theta+1)^{0.097}} + \frac{\sec(\beta)(Fr_1)^2(4y_1 \sin(\beta) - BhC_{DS})}{y_1} \\ -\frac{0.4495B \tan(\beta)(Fr_1)^{1.537}}{(\alpha+1)^{0.023}(\beta+1)^{4.571}(\theta+1)^{0.097}} - (B+1)\cos(\alpha)\sec(\beta)Fr_1^2 \left(1 - \frac{y_1}{3h+0.13}\right) \\ \frac{0.5(B+1)\sec(\beta)(h(9.h+0.78) + y_1^2 \cos(\alpha) + 0.0169)}{y_1^2} \\ -\frac{1.3485 \tan(\beta)(Fr_1)^{1.537}}{(\alpha+1)^{0.023}(\beta+1)^{4.571}(\theta+1)^{0.097}} + 1 \end{array} \right)$$

بعد از محاسبه کلیه مقادیر تئوری، به منظور ارزیابی و مقایسه روابط تئوری با مقادیر آزمایشگاهی پارامترهای یاد شده، منحنی‌های تئوری و داده‌های آزمایشگاهی در مقابل اعداد فرود اولیه ترسیم گردیدند. منحنی‌های ترسیم شده برای مقاطع واگرای معکوس در شکل‌های (۴-۲۱) الی (۴-۲۲) آورده شده است. در این شکلها خطوط ممتد مربوط به روابط نیمه تحلیلی نسبت عمق ثانویه و درصد افت نسبی انرژی و نقاط، مربوطه به داده‌های آزمایشگاهی می‌باشند.

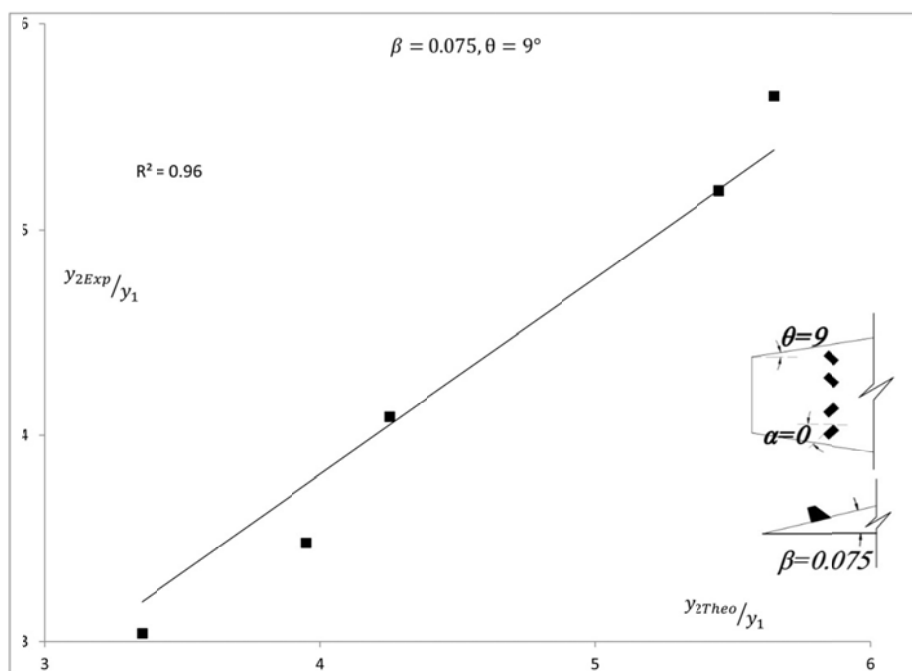


شکل ۴-۲۱- مقایسه نتایج نیمه تحلیلی و آزمایشگاهی پرش واگرای معکوس در مقطع با زاویه واگرایی ۹ درجه، شیب کف معکوس ۵ درصد و زاویه استقرار بلوک ۳۰ درجه



شکل ۴-۲۲- مقایسه نتایج نیمه تحلیلی و آزمایشگاهی پرش واگرای معکوس در مقطع با زاویه واگرایی ۹ درجه، شیب کف معکوس ۷/۵ درصد و زاویه استقرار بلوک صفر درجه





شکل ۴-۲۳- ارزیابی عملکرد مدل نیمه تحلیلی برآورد نسبت عمق ثانویه پرش واگرایی معکوس در مقطع با زاویه واگرایی ۹ درجه، شیب کف معکوس ۷/۵ درصد و زاویه استقرار بلوک صفر درجه

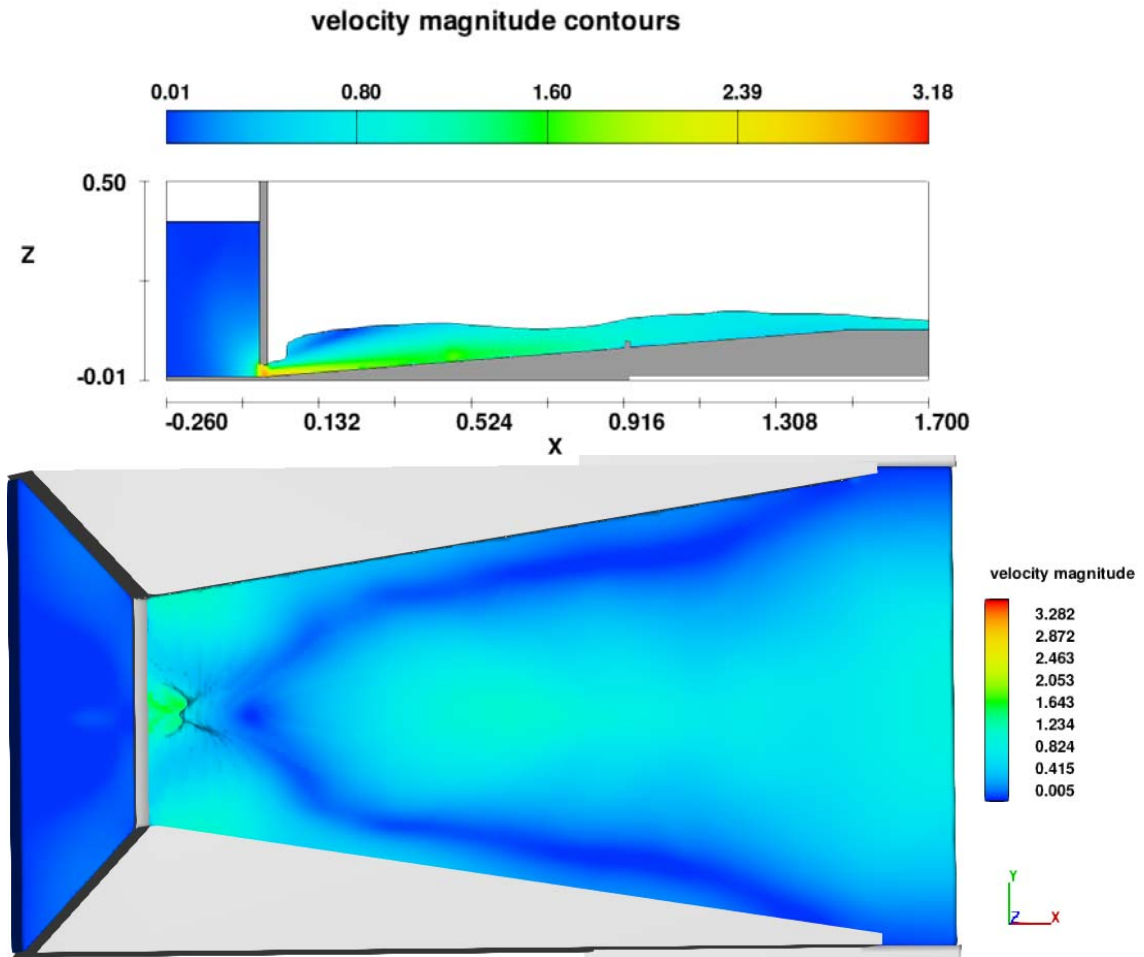
همانطور که در شکل‌های (۴-۲۱) الی (۴-۲۲) مشخص است، مطابقت نزدیکی بین منحنی‌های تئوری و داده‌های تجربی نسبت عمق ثانویه و افت نسبی انرژی در این مقاطع وجود دارد که بیانگر صحت روابط تئوری و فرضیات بکار رفته در استخراج آنها می‌باشد. درصد نسبی خطا در شکل (۴-۱۲) ۹ درصد بوده است.

در شکل ۴-۲۳ عملکرد مدل نیمه تحلیلی برآورد نسبت عمق ثانویه پرش واگرایی معکوس در مقطع با زاویه واگرایی ۹ درجه، شیب کف معکوس ۷/۵ درصد و زاویه استقرار بلوک صفر درجه مورد بررسی قرار گرفته و همانطور که ملاحظه می‌گردد همبستگی بالایی بین نتایج نیمه تحلیلی و آزمایشگاهی وجود دارد.

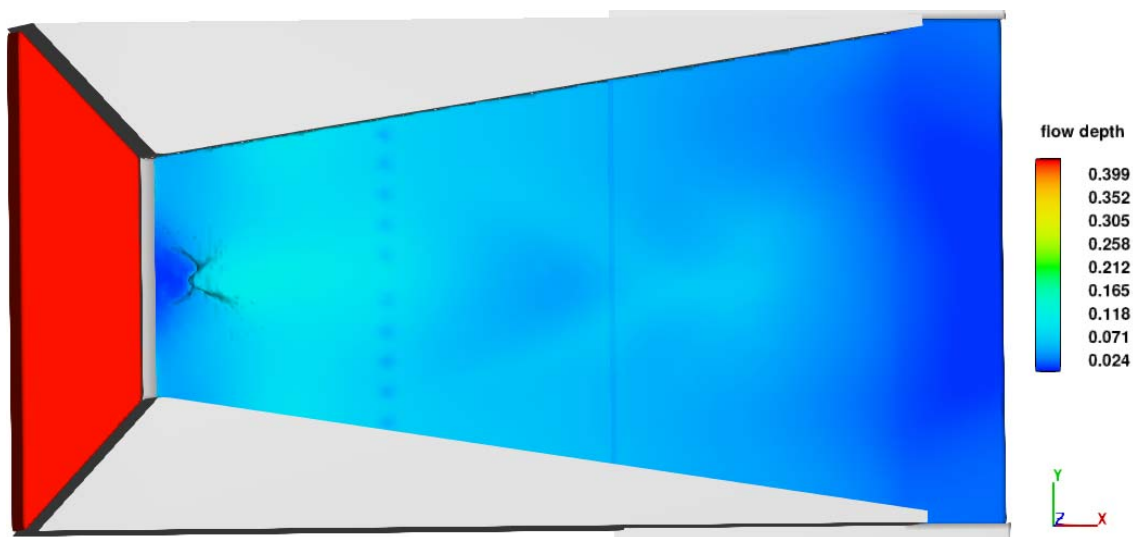
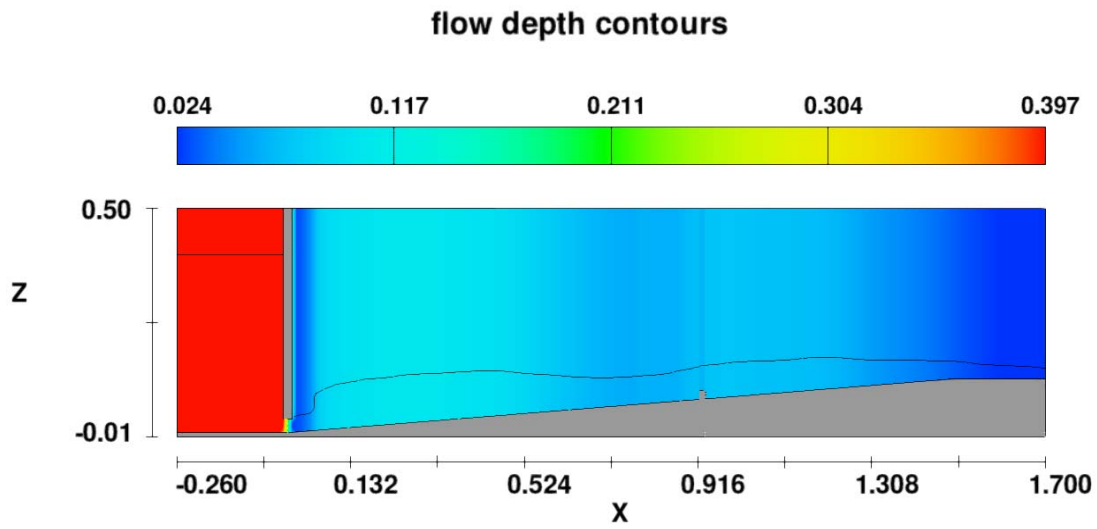
#### ۴-۹- نتایج به دست آمده از مدلسازی عددی

یک نمونه از نتایج گرافیکی به دست آمده از مدلسازی عددی برای حوضچه واگرایی معکوس در

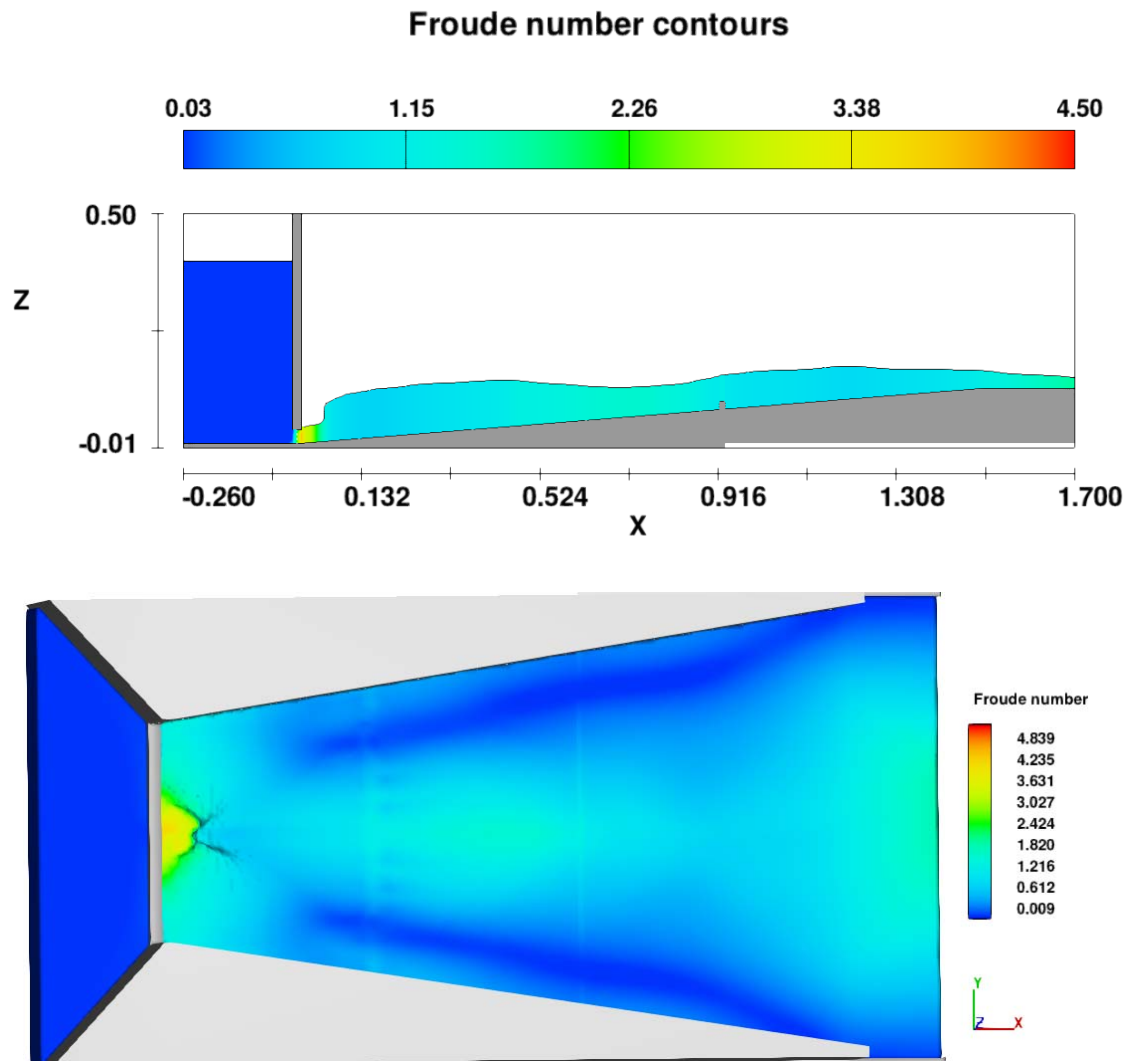
مقطع با زاویه واگرایی ۹ درجه، شیب کف معکوس ۷/۵ درصد و زاویه استقرار بلوک ۳۰ درجه به صورت شکل‌های ۴-۲۴ الی ۴-۲۶ نمایش داده شده است. واحد فاصله و عمق متر و واحد سرعت متر بر ثانیه است.



شکل ۴-۲۴- توزیع سرعت متوسط در مدل عددی



شکل ۴-۲۵- میزان عمق جریان در مدل عددی



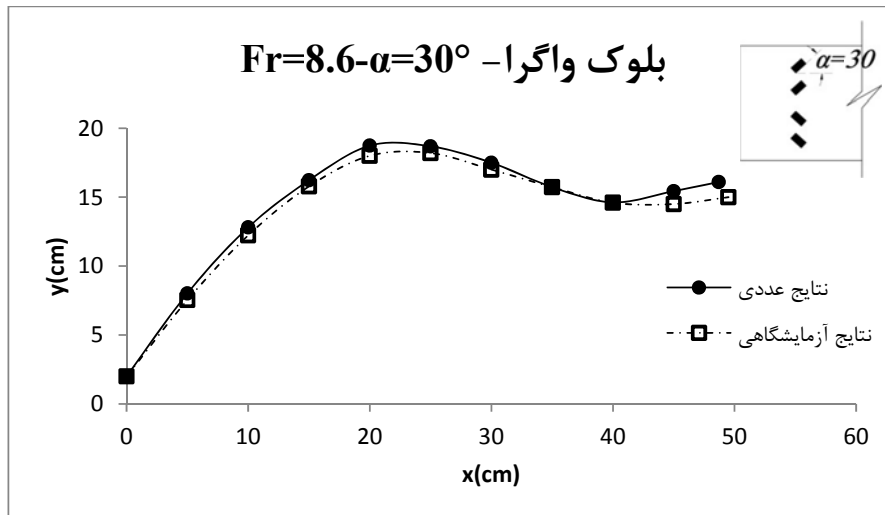
شکل ۴-۲۶- توزیع عدد فرود در مدل عددی

#### ۴-۱۰- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی نیمرخ طولی پرش

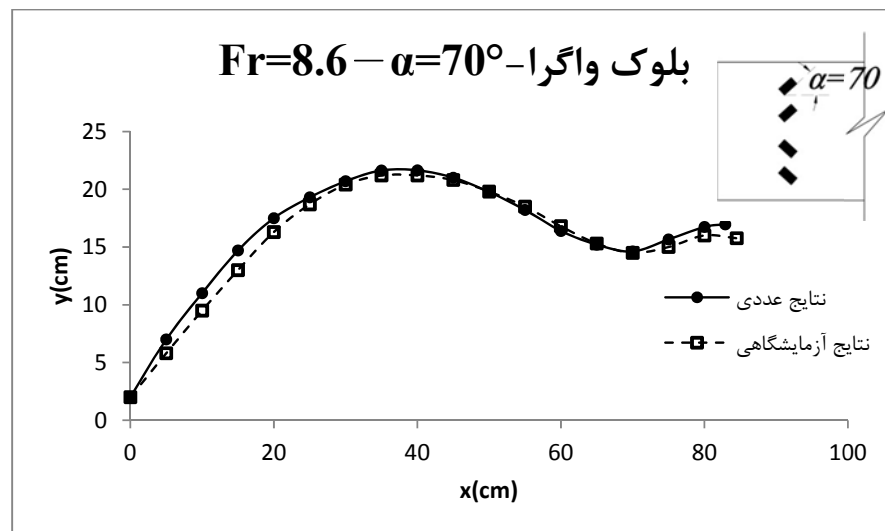
همانطور که در فصل چهارم اشاره شد بهترین مدل که کمترین اغتشاشات در سطح آب و نزدیکترین جواب ها را نسبت به نتایج مدل آزمایشگاهی نشان داد مدل  $k-\omega$  بوده است، و مدلسازی عددی بر مبنای انتخاب مدل آشفتگی  $k-\omega$  انجام شده است. از آنجایی که در این تحقیق مقایسه پارامترهای مهم پرش به صورت عددی و آزمایشگاهی مد نظر بود، لذا جهت بررسی صحت نتایج عددی، در کلیه آزمایش‌ها نیمرخ طولی پرش برداشت گردید، سپس برای

تمام نیمرخ‌های آزمایشگاهی، منحنی عددی ترسیم گردیده و در کنار داده‌های آزمایشگاهی

نمایش داده شد



(الف)



(ب)

شکل ۴-۲۷- مقایسه منحنی‌های تئوری و آزمایشگاهی نیمرخ پرش در مقاطع مستطیلی

. نمونه‌هایی از این منحنی‌ها برای نیمرخ پرش در مقطع مستطیلی با زوایای مختلف بلوک در

شکل (۴-۲۷) آورده شده است. در این شکل، خطوط منقطع مربوط به منحنی عددی و خطوط

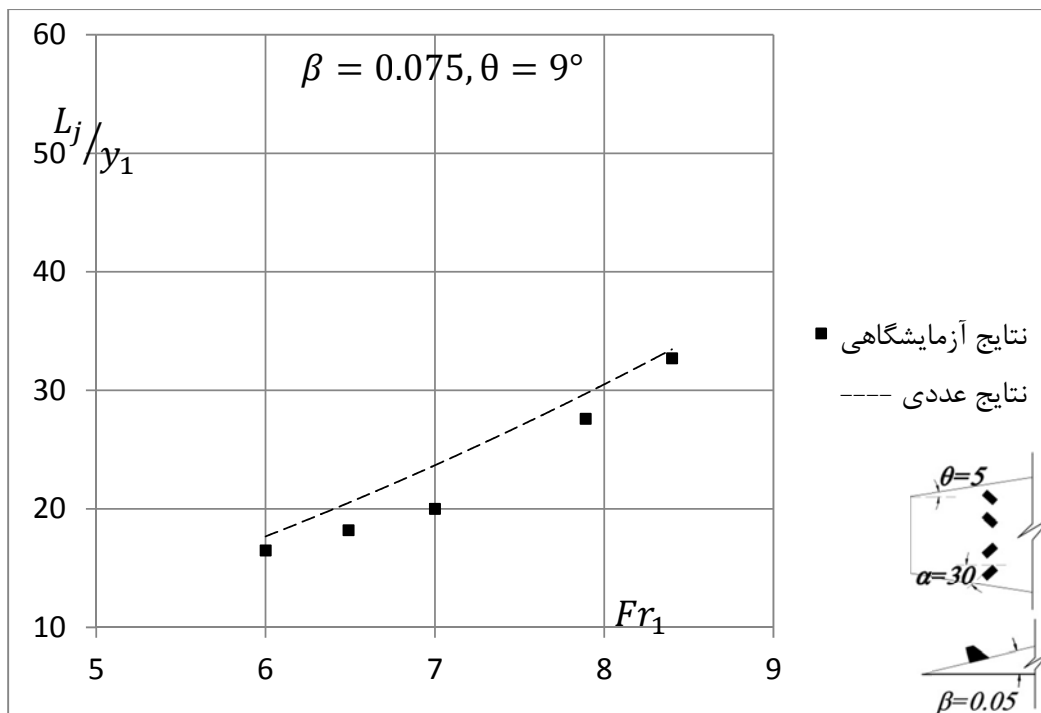
ممتد مربوط به داده‌های آزمایشگاهی می‌باشند. همچنین  $\alpha$  نشان دهنده زاویه استقرار بلوک

است.

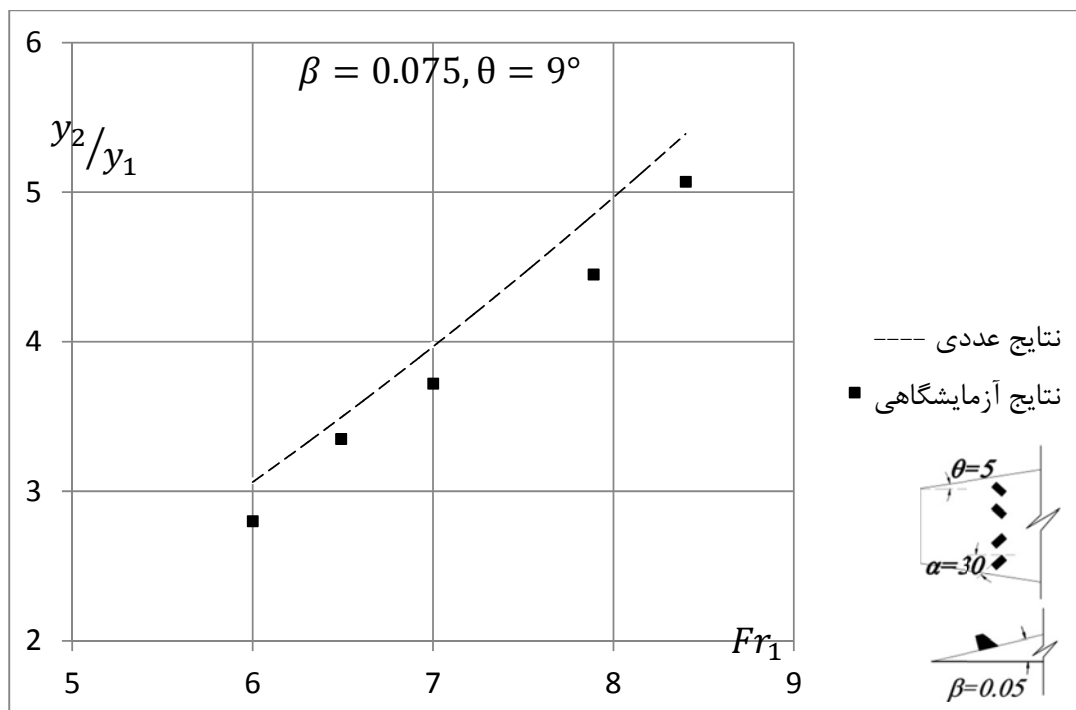
همانطور که در شکل (۴-۲۷) مشخص است، مطابقت نزدیکی بین منحنی‌های عددی و داده‌های تجربی نیمرخ پرش در مقاطع مستطیلی وجود دارد که صحت فرضیات و مناسب بودن مدل آشفنگی بکار گرفته شده در مدلسازی عددی را تایید می‌کند.

#### ۴-۱۱- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی نسبت عمق ثانویه

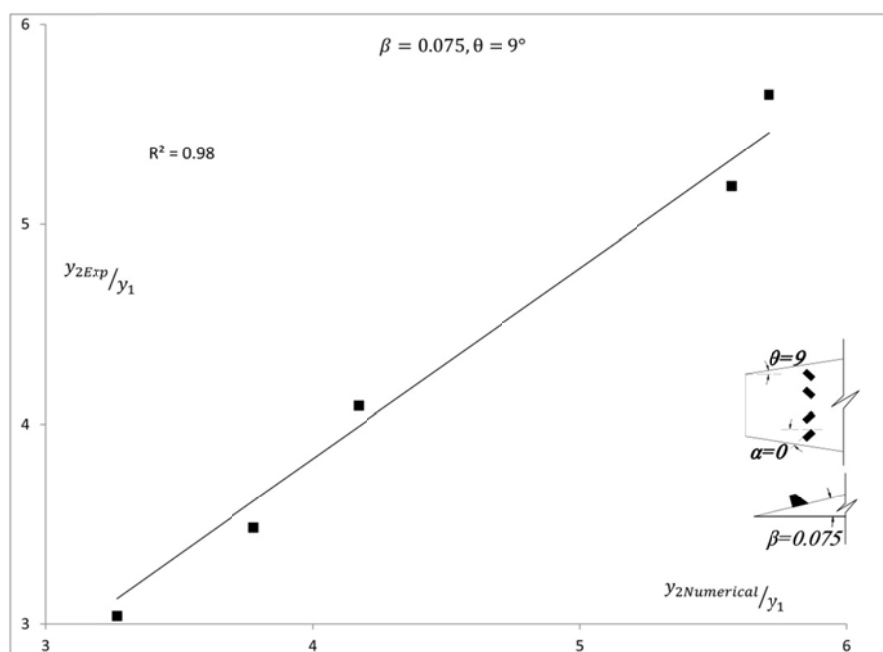
در فصل چهارم، نحوه مدلسازی عددی حوضچه‌ی واگرای معکوس با بلوک در زوایای مختلف تشریح گردید، از آنجاییکه به منظور مدلسازی عددی از فرضیات ساده شونده‌ای استفاده گردید، لذا جهت ارزیابی صحت مدلسازی عددی و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی، منحنی‌های عددی و داده‌های آزمایشگاهی مربوط به پارامترهای طول پرش و نسبت عمق ثانویه در مقابل اعداد فرود اولیه ترسیم گردیدند. منحنی‌های ترسیم شده برای مقاطع واگرا در شکل‌های ۴-۲۸ تا ۴-۲۹ آورده شده است. در این شکل، خطوط منقطع مربوط به روابط عددی نسبت عمق ثانویه  $y_2/y_1$  و طول پرش نسبی  $L_j/y_1$  و خطوط ممتد مربوط به داده‌های آزمایشگاهی می‌باشند. نتایج در زاویه استقرار ۳۰ درجه در وضعیت همگرا ارائه شده است.



شکل ۴-۲۸- مقایسه طول نسبی پرش مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی پرش در مقطع واگرا



شکل ۴-۲۹- مقایسه نسبت عمق ثانویه پرش مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی پرش در مقطع واگرا



شکل ۴-۳۰- ارزیابی عملکرد مدل عددی نسبت عمق ثانویه پرش واگرای معکوس در مقطع با زاویه واگرایی ۹ درجه، شیب کف معکوس ۷/۵ درصد و زاویه استقرار بلوک صفر درجه

همانطور که در شکل‌های (۴-۲۸) و (۴-۲۹) مشخص است، مطابقت نزدیکی بین منحنی‌های عددی و داده‌های تجربی نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش در مقاطع مستطیلی وجود دارد که صحت فرضیات و مناسب بودن مدل آشفتگی بکار گرفته شده در مدلسازی عددی را تایید می‌کند.

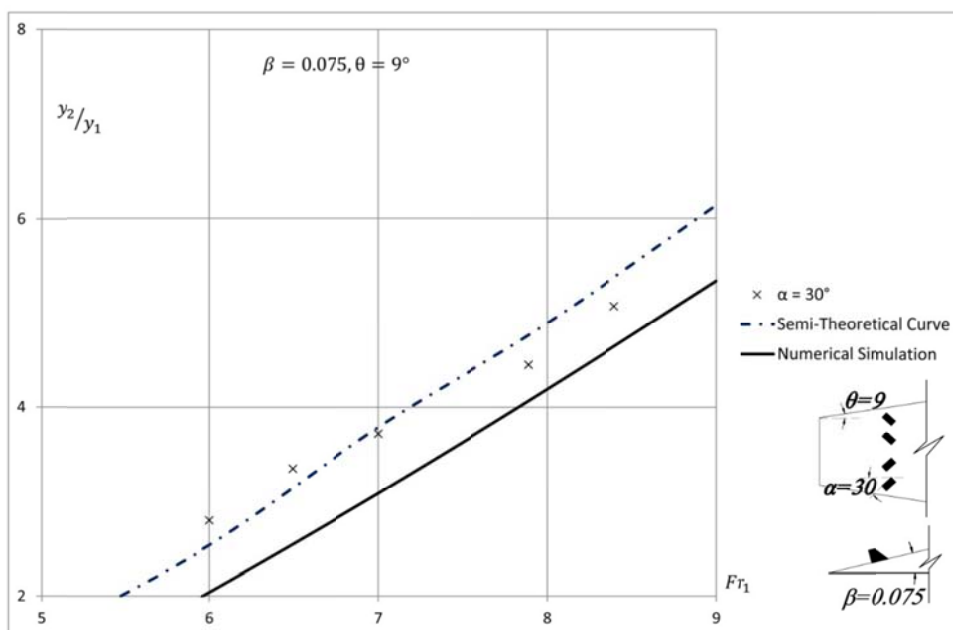
در شکل ۴-۳۰ عملکرد مدل عددی نسبت عمق ثانویه پرش واگرای معکوس در مقطع با زاویه واگرایی ۹ درجه، شیب کف معکوس ۷/۵ درصد و زاویه استقرار بلوک صفر درجه مورد بررسی قرار گرفته و همانطور که ملاحظه می‌گردد همبستگی بالایی بین نتایج نیمه تحلیلی و آزمایشگاهی وجود دارد.

#### ۴-۱۱- مقایسه کلی نتایج آزمایشگاهی، عددی و نیمه تحلیلی

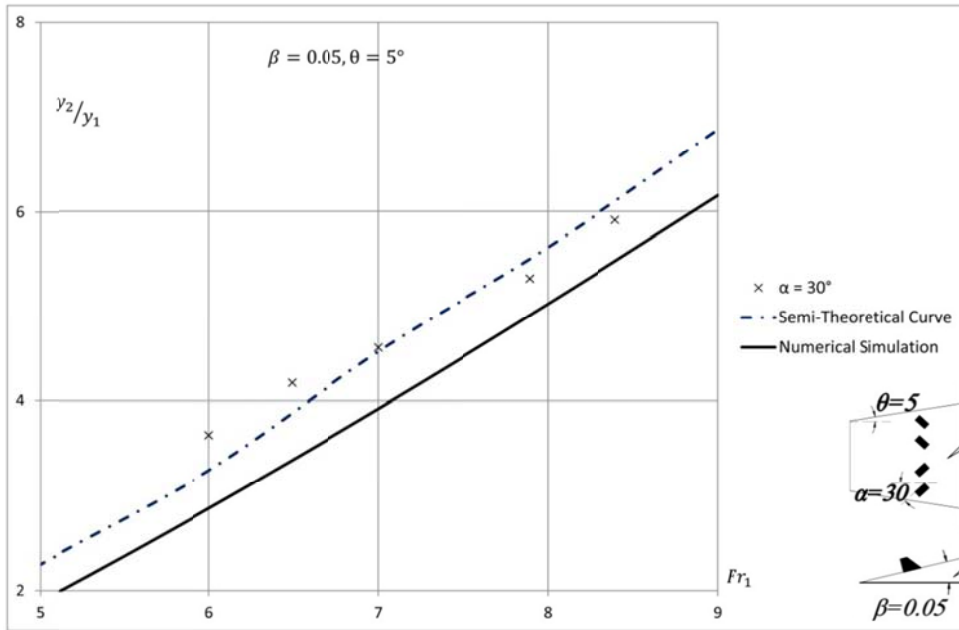
همانگونه که قبلاً ذکر گردید در این تحقیق حوضچه آرامش واگرای معکوس با به کارگیری بلوک‌های میانی به صورت آزمایشگاهی، عددی و نیمه تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. در مجموعه‌ی



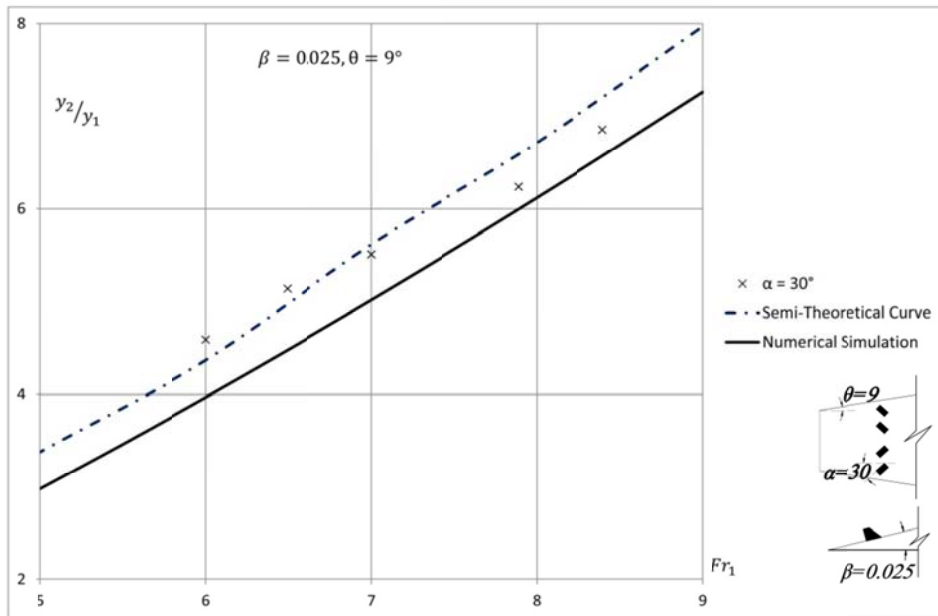
آزمایشگاهی با تغییر زاویه قرارگیری بلوک‌ها، زاویه واگرایی و شیب کف معکوس، تاثیر این پارامترها بر مشخصه‌های پرش به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌سازی عددی سه بعدی هندسه-ی خاص پژوهش حاضر نیز با هدف انتخاب بهترین مدل آسفتگی و پیش بینی نتایج هندسه‌هایی که مدل‌سازی آنها انجام نشده صورت گرفت. همچنین رابطه‌ای نیمه‌تحلیلی جهت برآورد نسبت عمق ثانویه پرش ارائه گردیده تا نتایج آزمایشگاهی با این رابطه مقایسه گردد. در این بخش مقایسه کلی سه روش در قالب نمودار ۴-۳۱ ارائه گردیده است. همانطور که در این شکل مشخص است، تطابق نزدیکی بین منحنی عددی، رابطه نیمه تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد که صحت فرضیات به کار رفته در مدل‌سازی عددی و ارائه رابطه نیمه تحلیلی را تایید می‌کند. در این شکل‌ها حداکثر خطای نسبی نتایج عددی ۸ درصد و نتایج نیمه تحلیلی ۵ درصد محاسبه گردید.



شکل ۴-۳۱- مقایسه نتایج عددی، نیمه تحلیلی و آزمایشگاهی پرش واگرای معکوس در مقطع با زاویه واگرایی ۹ درجه، شیب کف معکوس ۷/۵ درصد و زاویه استقرار بلوک ۳۰ درجه



شکل ۴-۳۲- مقایسه نتایج عددی، نیمه تحلیلی و آزمایشگاهی پرش واگرای معکوس در مقطع با زاویه واگرایی ۵ درجه، شیب کف معکوس ۵ درصد و زاویه استقرار بلوک ۳۰ درجه



شکل ۴-۳۳- مقایسه نتایج عددی، نیمه تحلیلی و آزمایشگاهی پرش واگرای معکوس در مقطع با زاویه واگرایی ۵ درجه، شیب کف معکوس ۵ درصد و زاویه استقرار بلوک ۳۰ درجه

# فصل ۵

## نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۵-۱- مقدمه

تا کنون تکنیکهای متعددی جهت افزایش افت انرژی، کاهش طول و عمق ثانویه در پرش هیدرولیکی به کار رفته است. ترکیبی از این تکنیک ها در سالهای اخیر در جهت بهینه نمودن طرح حوضچه آرامش بسیار مورد توجه محققین بوده است. با توجه به نتایج قابل قبول استفاده از موانع، واگرایی جریان، شیب معکوس در افزایش اتلاف انرژی، کاهش طول پرش و عمق ثانویه، در مطالعه حاضر، پرش هیدرولیکی واگرایی معکوس با به کارگیری بلوکهای میانی و آبپایه انتهایی به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است و اثر میزان واگرایی دیواره‌های کانال، شیب کف معکوس و چیدمان متفاوت بلوکهای میانی بر مشخصه‌های پرش هیدرولیکی بررسی گردید.

از آنجایی که اساس پژوهش حاضر مطالعه آزمایشگاهی است، به منظور بررسی شرایط و خصوصیات پرش هیدرولیکی واگرا در حوضچه با شیب کف معکوس و به کارگیری بلوکهای اتلاف کننده انرژی، یک مدل آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد و روند تغییر پارامترهای مهم پرش با تغییر شرایط مدل بررسی گردید. پارامترهای مهم پرش که شامل نسبت عمق ثانویه، افت نسبی انرژی و طول نسبی پرش می‌باشد با تغییر در مشخصات مقطع (زاویه واگرایی و شیب کف معکوس)، جهت و محل قرارگیری بلوکها اندازه‌گیری گردید. در هر آزمایش ابتدا هندسه‌ی مدل آماده گردید و بعد از اطمینان از آب بندی آن، با راه اندازی پمپ، جریان وارد مدل می‌گردید. سپس با قرائت فلومتر، دبی جریان برای تامین عدد فرود مورد نظر تنظیم می‌گردید. پس از برقراری دبی مورد نظر و اطمینان از تثبیت جریان در فلوم، از طریق باز و بسته کردن دریچه پروانه‌ای انتهای فلوم، پیشانی پرش طوری تنظیم می‌گردید که حداقل فاصله نسبت به ابتدای حوضچه که به عنوان نقطه مبنا انتخاب گردیده بود را دارا باشد. در هر آزمایش بعد از طی شدن مراحل فوق، نیمرخ طولی پرش از شروع تا انتها توسط عمق‌سنج برداشت شده و همچنین عکسبرداری از پروفیل نیز صورت گرفته، سپس فاصله پیشانی و انتهای پرش از نقطه مبنا طول پرش و طول غلتاب قرائت می‌گردید. مدلسازی عددی نیز در نرم افزار

Flow3D با تعریف هندسه مدل، شرایط مرزی و انتخاب مدل آشفتگی انجام شد و در نهایت نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی به دست آمده مقایسه گردید. همچنین رابطه‌ای تحلیلی جهت برآورد پارامترهای مهم پرش ارائه گردیده تا نتایج آزمایشگاهی با این رابطه مقایسه گردد.

#### ۵-۲- نتایج تحقیقی حاضر

- در این پژوهش، اثر بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی بر پرش هیدرولیکی واگرای معکوس به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به شرح زیر ارائه گردید:
- به کارگیری بلوک در پرش هیدرولیکی واگرای معکوس منجر به پایدارسازی پرش و بهبود وضعیت دوپایایی جریان گردیده است.
  - به کارگیری بلوک‌های میانی در وضعیت واگرا در حوضچه مستطیلی و در وضعیت همگرا در حوضچه‌ی واگرا، باعث بهبود مشخصه‌های پرش هیدرولیکی گردیده است.
  - طول بی‌بعد حوضچه آرامش واگرای معکوس با بلوک به میزان قابل ملاحظه‌ای کمتر از حوضچه بدون بلوک به دست آمده است.
  - نسبت عمق ثانویه در حوضچه آرامش واگرای معکوس در وضعیت پرش اجباری (با بکارگیری بلوک) به میزان جزیی کمتر از حوضچه آزاد (بدون بلوک) به دست آمده است.
  - بهترین زاویه واگرایی بلوک در حوضچه مستطیلی و زاویه همگرایی بلوک در حوضچه واگرا (زاویه بلوک با محور مرکزی حوضچه) ۳۰ درجه به دست آمده است که طول پرش و نسبت عمق ثانویه را به ترتیب ۳۵ درصد و ۱۶ درصد به طور میانگین کاهش داده است.
  - قرار دادن بلوک‌ها در فاصله  $0,5 L_j$  در حوضچه واگرای معکوس بهینه ترین پروفیل پرش را نشان داده است. با نزدیک کردن بلوک‌ها به ابتدای پرش، قله‌ی بزرگی در پروفیل ایجاد شده و آشفتگی جریان را افزایش داده و منجر به افزایش طول پرش می‌گردد. همچنین در صورتیکه بلوک‌ها به انتهای پرش نزدیک گردند اغتشاش در سطح جریان افزایش یافته و عمق ثانویه و طول پرش افزایش می‌یابد.

- مطابقت خوبی بین نتایج آزمایشگاهی نیمرخ‌های طولی پرش و منحنی‌های مبتنی بر فرضیات مدلسازی عددی مشاهده گردید که صحت فرضیات به کار رفته در مدلسازی را تایید می‌کند.
- در کلیه آزمایش‌ها، بین مقادیر عددی و نتایج آزمایشگاهی مربوط به نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش همسبستگی بالایی وجود داشت.
- معادله‌ای تحلیلی برای نسبت عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در کانال واگرا روی شیب معکوس با بلوک‌های میانی و آبپایه انتهایی ارائه گردید.

### ۳-۵- پیشنهادات برای تحقیقات آینده

- بلوک‌های میانی در چیدمان شعاعی در حوضچه آرامش واگرای معکوس قرار داده شوند.
- در بخش مروری بر تحقیقات گذشته برای مقاطع واگرا ملاحظه شد که مطالعات کمی در مورد اثر به کارگیری بلوک‌های میانی بر مشخصه‌های پرش در حوضچه واگرا انجام گرفته است. اگرچه در تحقیق حاضر به دلیل محدودیت زمانی بلوک‌های میانی تنها در دو چیدمان واگرا و همگرا بررسی شد، اما لازم است چیدمان شعاعی بلوک‌ها به دلیل تطابق خوب با توزیع جریان در حوضچه واگرا نیز بررسی گردد.
- اثر ارتفاع بلوک بر پارامترهای پرش بررسی گردد.
- در بخش آنالیز ابعادی اشاره شد یکی از پارامترهای موثر بر مشخصه‌های پرش ارتفاع بلوک است. در پژوهش حاضر به دلیل گستردگی آزمایش‌ها ارتفاع بلوک ثابت در نظر گرفته شد. پیشنهاد می‌شود با تغییر ارتفاع بلوک و تکرار آزمایش‌ها، تاثیر آن مورد بررسی قرار گیرد.
- مشخصه‌های پرش در مقطع واگرای دوزنقه‌ای با بلوک‌های میانی بررسی گردد.

از جمله روش‌های کاهش هزینه احداث حوضچه‌های آرامش، تغییر شکل مقطع و پلان حوضچه در جهت هم‌آهنگی با مقاطع بالادست و پایین دست، بدون استفاده از سازه‌های تبدیل می‌باشد. از طرفی، هرگونه تغییر در هندسه حوضچه، شرایط ایجاد پرش و خصوصیات هیدرولیکی آن را تحت

تاثیر قرار می دهد. در آزمایشهای تحقیق حاضر مقطع کانال مستطیلی در نظر گرفته شد. پیشنهاد

میگردد اثر مقطع ذوزنقه‌ای نیز بر مشخصه‌های پرش بررسی گردد.

- چیدمان بلوک در دو یا سه ردیف بکارگیری گردد.

با توجه به اثر مطلوب به کارگیری بلوک‌ها، پیشنهاد می گردد بلوک در چندین ردیف در چیدمان‌های

متفاوت به کارگیری شود و چیدمان بهتر انتخاب گردد.

## فهرست علائم

$y_1$	عمق اولیه پرش هیدرولیکی
$y_2$	عمق ثانویه پرش هیدرولیکی
$b_1$	عرض حوضچه در پنجه پرش
$b_2$	عرض حوضچه در انتهای پرش
$\theta$	زاویه واگرایی دیوارها
$\alpha$	زاویه قرارگیری بلوکها
$V_1$	سرعت اولیه جریان
$\nu$	ویسکوزیته
$g$	شتاب ثقل
$\rho$	جرم مخصوص
$\Delta z$	میزان بالآمدگی در انتهای حوضچه
$L_j$	طول پرش هیدرولیکی
$Fr_1$	عدد فرود اولیه جریان



## لیست مراجع:

- بیرامی، م. ک. و ایلاقی حسینی، م. (۱۳۸۴). " کنترل پرش هیدرولیکی با یک یا دو دیوار ممتد در حوضچه آرامش افقی " مجله علمی - پژوهشی استقلال، شماره ۱، ص ۷۳-۱۱۹
- پارسامهر، پ. فرسادی زاده، د. و حسین زاده دلیر، ع. ۱۳۹۲. تاثیر آبپایه و زبری های مصنوعی روی شیب معکوس بر خصوصیات پرش هیدرولیکی. نشریه آب و خاک. ۲۷ (۳): ۵۹۱-۵۸۱.
- حسینی، م. ابریشمی، ج. ۱۳۸۴. هیدرولیک کانال های باز. انتشارات دانشگاه امام رضا، چاپ نهم، ۶۱۳ ص.
- دستورانی م. و نصرآبادی م. 1390. اثر زبری بستر بر مشخصات پرش هیدرولیکی روی شیب معکوس. مجله پژوهش آب ایران، ۵(۹) ۹۱-۱۰۰.
- راور، ز. فرهودی، ج. و نژدعلی، ع. ۱۳۹۱. تاثیر بستر زبر دوزنقه ای قائم بر خصوصیات پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی. نشریه آب و خاک. ۲۶ (۱): ۹۴-۸۵.
- کاهه م، دهقانی ا. ۱۳۹۲. شبیه سازی عددی پرش هیدرولیکی بر روی سطوح موجدار. نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک. ۲۰(۵). ۴۱-۶۰.
- نژدعلی، ع. اسماعیلی، ک. فرهودی، ج. و راور، ز. ۱۳۹۰. تاثیر یکپارچه مثلثی بر مشخصات پرش هیدرولیکی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۲ (۲۵): ۲۳۴-۲۴۱
- Abrishami J., and Saneie M. 1994. Hydraulic jump in adverse basin slopes. Int. Journal of Water Research Engineering 2(1): 51-63.
- Achour, B. and Debabeche, M. 2003. Control of hydraulic jump by sill in a U-shaped channel. Journal of Hydraulic Research. 41(1): 97-103.
- Arbhabhira, A. and Abela, A. (1971). "Hydraulic jump within gradually expanding channel", Journal of Hydraulic Division, 97(1), 31-42.
- Beirami, M.K. and Chamani, M.R. 2006. Hyrdraulic jump in sloping channels: sequent depth ratio. Journal of Hydrologic Engineering. 132(10): 1061-1068.

Beirami, M.K. and Chamani, M.R. 2010. Hyrdaulic jump in sloping channels: roller length and energy loss. *Can. J. Civ. Eng.* 37(9): 535-543.

Blaisdell, F. W. (1947). "Development and hydraulic design, Saint Anthony Falls stilling basin", *Transaction of American Society of Civil Engineering*, Vol. 113, 483-561

Bremen, R. and Hager, W.H. (1990). "Ressauts hydrauliques les canauxavec elargissement", *XXII Convego di Idraulica e Costruzioni Idraliche-Cosenza*, 171-182.

Castillo, L. G., Carrillo, J. M., Garcia, J. T. and Rodriguez, A. V. 2014. Numerical simulation and laboratory measurement in hydraulic jumps. 11th international conference on hydro informatics, New York city, USA.

Chow. V. T. 1959. *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill, Ltd., New York.

Debabeche, M. and Achour, B. 2007. Effect of sill in the Hydraulic jump in a triangular channel. *Journal of Hydraulic Research* 45(1): 135-139.

Ead, S.A., and Rajaratnam, N. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *J. Hydraulic Eng. ASCE*,128:7. 656-663.

Eloubaidy, A.F., Al-Baidhani, J.H., and Ghazali, A.H. 1999. Dissipation of Hydraulic Energy by Curved Baffle Blocks *J. Sci and Technol.* 7(1). 69-77.

Esmaeili varaki, M, Kasi, A, Farhoodi, J, and Sen, D. 2014. HYDRAULIC JUMP IN A DIVERGING CHANNEL WITH AN ADVERSE SLOPE. *Iranian J. of Sci and Tec.* 38: 111-121

Francesco Giuseppe Carollo, Vito Ferro and Vincenzo Pamplone. 2007. 'Hydraulic Jumps on Rough Beds', *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*.

Gharangik, A. and Ghaudhry M.H. 1991. Numerical Simulation of Hydraulic Jump. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE.117(9). 1195-1211.

Gohari, A., and Farhoudi, J. 2009. The characteristics of hydraulic jump on rough bed stilling basins.33rd IAHR Congress, *Water Engineering for a Sustainable Environment*, Vancouver, British Columbia.

González, A.E., and Bombardelli, F.A. 2005. Two-phase-flow theoretical and numerical models for hydraulic jumps including air entrainment. *Proc. 31<sup>st</sup> Biennia/JAHR Congress*, Seoul, Korea, B.H. Jun, S.I. Lee, I. W. Seo and G. W. Choi, Editors (CD-ROM).

Guizien, K., Janssen, M.D., and Vittori, G. 2003. 1DV bottom boundary layer modeling under combined wave and current: Turbulent separation and phase lag effect. *Journal of Geophysical Research*, 108(1), 1-15.

Hager, W. H. (1985).“Hydraulic jump in non-prismatic rectangular channels”, *Journal of Hydraulic Research*, 23(1), 21-34.

Hager, W. H. 1992. *Energy dissipaters and Hydraulic jump*. Water science and technology library, Kluwer Academic Publishers. 151-174.

Hager, W. H. and Li, D. (1992). “Sill- controlled energy dissipator”, *Journal of Hydraulic Research*, 30(2) , 165-181

Hughes W. C. and Flack J. E. (1984). “Hydraulic jump properties over a rough bed”, *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*. 110:1755-1771.

Izadjoo, F., and Shafai-Bajestan, M. 2007. Corrugated Bed Hydraulic Jump Stilling Basin. *J. Appl. Sci.* 7: 8. 1164-1169.

Khalifa, A. M. and McCorquodale J. A. 1992. Simulation of the radial hydraulic jump. *J. Hydraulic. Research*. 30(2) 149-163.

Lawson, J. D. and Phillips, B. C. 1983. Circular hydraulic jump. *J. Hydraulic. Eng.* 109(4) 505-518

McCorquodale J. and Mohamed A.M.S. 1994. Hydraulic jump on adverse slopes. *J. Hydraulic. Res.* 31(1): 119–130.

Mohamad Ali, H. S. 1991. Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic. *J. Hydraulic Eng. ASCE*, 117: 83-93

Narayanan, R. and Schizas, L.S. (1980b). “Force on sill of forced jump”, *J. Hydraulic Division*, 106(HY7), 1159-1172.

Nasr Esfahani, M.J., and Shafai-Bajestan, M. 2012. Effect of Roughness Height on the Length of B-jump at an Abrupt Drop *Internasional Research J. Applied Sci.* 3: 5. 2757-2762.

Nettleton, P. C. and McCorquodale, J. A. 1989. Radial flow stilling basins with baffle blocks. *Can. J. Civ. Eng.* (16) 489-497.

Nikmehr S., and Tabebordbar A. 2009. Hydraulic jumps on adverse slope in two cases of rough and smooth bed. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, ISSN, 2(1): 19-22.

Ohtsu, I. Yasuda, Y. and Yamanaka, Y. (1991). “Drag on vertical sill of forced jump”, *Journal of Hydraulic Research*, 29(1), 29-47.

Omid, M. H., Gord-Noshahri, A. and Kouchakzade, S. 2010. Sill-controlled hydraulic jump in a gradually expanding channel, *J. of Water Management, ICE*,163(10) 515-522.

Peterka, A. J. 1983. Hydraulic design of stilling basin and energy dissipators. *Eng. Monograph No. 25*, U.S. Bureau of Reclamation, 225p.

Ranga Raju, K.G., Kitaal, M.K., Verma, M.S., and Ganeshan, V.R. 1980. Analysis of flow over baffle blocks and end sill. *Journal of Hydraulic Research*, 18(3), 227-241.

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.

Shafai-Bajestan, M., and Neisi, K. 2009. A New Roughened Bed Hydraulic Jump Stilling Basin. *J. Applied Sci.* 2: 436-445.

U.S.B.R., (1964) "Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators".

## **Abstract**

Stilling basins have been used as an energy dissipater downstream of hydraulic structures. Dimensions of the stilling basins depends on hydraulic jump characteristics. Accordingly researchers have made effort to improve characteristics of hydraulic jump by making some changes in the place of hydraulic jump occurrence and have therefore saved lots of money. Greater head loss, smaller length of hydraulic jump and depth ratio are major parameters in designing best stilling basin. Hitherto many procedures have been used to increase head loss, decrease length and depth ratio in hydraulic jump. Researchers have used several procedures simultaneously to improve design of stilling basin in recent years. According to good result of using blocks, diverging flow and adverse slope in increasing head loss, decreasing jump length and depth ratio, diverging hydraulic jump with an adverse slope using baffle blocks and end sill was investigated experimentally, analytically and numerically in this research. The effects of divergence of walls, adverse slope and different arrangement of baffle blocks on hydraulic jump characteristics were also evaluated.

The measurements were performed for rectangular stilling basin with different bed slopes (0-0.025-0.05-0.075) and different diverging angle (3-5-9) degree and using baffle blocks. In this study, baffle blocks were installed symmetric relative to the central axis of the basin in two arrangements of convergence angle of ( $\alpha=0$  to  $80^\circ$ ) and divergence angle of ( $\alpha=0$  to  $-80^\circ$ ). Discharge and Froude numbers considered to vary from 39 to 81.7 lit/s and 4.44 to 8.56 respectively. The results showed that using blocks in a converging arrangement in diverging stilling basin, led to decrease of hydraulic jump and depth ratio. The most effective convergence angle of the blocks was found to be  $30^\circ$ . It was also found that baffle blocks could considerably improve the depth ratio and jump length (compared with an adverse diverging basin without blocks).

In convergence angle of  $30^\circ$  for blocks, reduction of the length and depth ratio of hydraulic jump were up to 35% and 16% respectively. The results related to block arrangement in rectangular stilling basin were in contrary to the results in diverging stilling basin. This means that diverging arrangement of blocks led to decrease in relative length of jump and depth ratio and the best result achieved in angle of  $30^\circ$ . In convergence angle of  $30^\circ$  for blocks, reduction of the length and depth ratio of hydraulic jump were up to 40% and 10% respectively. In contrast using baffle blocks in a

converged arrangement led to increasing relative length of hydraulic jump and sequent depth ratio.

A semi- theoretical equation for depth ratio of hydraulic jump in diverging basin with an adverse slope and baffle blocks and an end sill was developed and had a good agreement with experimental results. Also there were good agreement between experimental and numerical results of profiles jump. This agreement proved that the assumptions made in numerical simulation were chosen correctly.

Key words: Diverging stilling basin, adverse bed slope, characteristics of hydraulic jump, Baffleblocks, Placement angle



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Civil Engineering**

PhD Dissertation in Civil Engineering-Hydraulic Engineering

**Study of Hydraulic Jump Characteristics in Sloping Stilling  
Basins with Diverging Sections and Using Baffle Blocks**

By: Zahra Eshkou

Supervisors:

Dr Ahmad Ahmadi

Dr Amir Ahmad Dehghani

January 2019