



دانشکده مهندسی کشاورزی

گروه آب و خاک

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بررسی آزمایشگاهی تأثیر زبری‌های سینوسی موجدار بر مشخصات پرش هیدرولیکی در
شیب مثبت

دانشجو : هانیه زنگنه

استاد راهنما :

دکتر خلیل اژدری

اساتید مشاور :

دکتر صمد امامقلی‌زاده

مهندس اشکان آل‌بویه

بهمن ۹۴

تقدیم به :

ماحصل آموخته هایم را تقدیم می کنم به آنان که مهر آسمانی شان
آرام بخش آلام زمینی ام است
به استوارترین تکیه گاهم، دستان پرمهر پدرم
به عاشقانه ترین نگاه زندگیم، چشمان عاشق مادرم
که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره ای از
دریای بی کران مهربانیتان را سپاس نتوانم بگویم.
امروز هستی ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما
ره آوردی گران سنگ تر از این ارزان نداشتم تا به فاک پایتان نثار کنم،
باشد که حاصل تلاشم نسیم گونه غبار فستگیتان را بزدايد.

بوسه بر دستان پرمهرتان

تقدیر و قدردانی

با تشکر و سپاس،

از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر فلیح اژدری، که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛

از استاد صبور و با تقوا، جناب آقای دکتر صمد امامقلی زاده و نیز مهندس اشکان آل بویه، که زحمت مشاوره این رساله را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی رسید؛

و با تشکر خالصانه خدمت

پدر و مادر عزیزم و همه کسانی که به نوعی مرا در به انجام رساندن این مهم یاری نموده‌اند

باشد که این فردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

چکیده

حوضچه آرامش سازه‌ای است که برای اتلاف انرژی جریان در پایین دست سرریزها، تندآب‌ها و پایانه‌ها احداث می‌شود. معمولاً کف حوضچه‌ها افقی است اما گاهی برای صرفه‌جویی در هزینه خاکبرداری کف آن را شیب‌دار می‌سازند. در اکثر حوضچه‌های آرامش برای اتلاف انرژی از پرش هیدرولیکی استفاده می‌شود. پرش هیدرولیکی پدیده‌ای در علم هیدرولیک از نوع جریان متغیر سریع است که بیش‌تر در جریان‌های با سطح آزاد مثل جریان رودخانه‌ها و جریان خروجی از سرریزها و دریچه‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد. هنگامی که در بالادست یک کانال با سطح آزاد، جریان فوق بحرانی و در پایین دست آن، جریان زیر بحرانی وجود داشته‌باشد، در مقطعی میان این دو جریان، پرش هیدرولیکی رخ می‌دهد. این تبدیل به صورت ناگهانی و در فاصله‌ای کوتاه پدیدار می‌گردد و به دلیل ایجاد آشفتگی در سطح آب، با استهلاک انرژی زیادی همراه است. هدف از این تحقیق بررسی خصوصیات پرش هیدرولیکی در بسترهای دارای زبری نیم‌دایره‌ای در شیب مثبت می‌باشد. آزمایش‌ها روی فلومی دارای طول ۵ متر، عرض ۰/۰۹ متر و ارتفاع ۰/۳۴ متر، در ۳ شیب ۰، ۱ و ۲ درصد در محدوده عدد فرود (۲/۶ تا ۵/۲) با شیب موج ($\frac{S}{\lambda}$) در محدوده ۰ تا ۰/۷۵ با سه ارتفاع زبری (۰/۸۵، ۱ و ۱/۵ سانتیمتر) و با فاصله‌های بین زبری (S)، ۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ سانتیمتر انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد با به کارگیری بستر موج‌دار سینوسی در حوضچه آرامش، می‌توان شاهد کاهش، نسبت اعماق ثانویه به اولیه تقریباً به میزان ۵۰ درصد در بیشترین مقدار خود در حدود عدد فرود ۵/۲۲ و کاهش طول پرش هیدرولیکی به میزان ۷۲ درصد نسبت به پرش کلاسیک در این نوع از حوضچه‌ها بود. میزان اتلاف انرژی و کاهش عمق نسبی پرش در حوضچه‌های دارای زبری، به مراتب بیشتر از حوضچه‌های صاف بود. در شیب مثبت هم، همانند شیب صفر، طول پرش و اعماق مزدوج نسبت به بستر صاف در همین شیب دچار کاهش و استهلاک انرژی دچار افزایش شد. که این افزایش در دبی‌های کمتر بیشتر به چشم می‌خورد. افزایش فاصله بین زبری‌ها، نسبت به افزایش ارتفاع زبری‌ها، اثر قابل قبول‌تری بر کاهش طول پرش، طول

غلطاب و اعماق مزدوج و افزایش استهلاک انرژی داشت. این روند کاهشی در شیب‌های کمتر، محسوس -
تر از شیب‌های بیشتر بود.

کلمات کلیدی: ارتفاع زبری‌ها، فاصله بین زبری‌ها، پرش هیدرولیکی، شیب مثبت

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- " بررسی آزمایشگاهی تأثیر فاصله بین زبری‌های موجدار سینوسی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی "

هانیه زنگنه، خلیل اژدری، صمد امامقلی‌زاده، اشکان آل بویه، دهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، ۲۹ دی لغایت ۱ بهمن ۱۳۹۴، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- " بررسی آزمایشگاهی تأثیر زبری‌های موجدار سینوسی بر مشخصات پرش هیدرولیکی "

هانیه زنگنه، خلیل اژدری، صمد امامقلی‌زاده، سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری، ۲۰ و ۲۱ اسفند ۱۳۹۴، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تهران

فهرست مطالب

صفحه

عنوان مطالب

فصل اول : مقدمه و کلیات

۱-۱-۱	مقدمه.....	۲
۱-۱-۱-۱	نحوه تشکیل پرش هیدرولیکی.....	۳
۱-۱-۲	خواص و کاربرد پرش هیدرولیکی.....	۴
۱-۱-۳	حوضچه آرامش.....	۵
۱-۲	تاریخچه.....	۶
۱-۳	هدف از تحقیق حاضر و ضرورت انجام آن.....	۸
۱-۴	روش انجام تحقیق.....	۸
۱-۵	سازمان دهی فصل های پایان نامه.....	۹

فصل دوم : مروری بر تحقیقات پیشین

۲	بررسی منابع.....	۱۲
۱-۲	مقدمه.....	۱۲
۲-۲	مطالعات انجام شده در زمینه پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف.....	۱۲
۳-۲	مطالعات انجام شده در زمینه پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر.....	۱۲
۴-۲	مطالعات انجام شده در زمینه پرش هیدرولیکی بر روی بستر شیب دار و بدون زبری.....	۲۳
۵-۲	مطالعات انجام شده در زمینه پرش هیدرولیکی بر روی بستر شیب دار و زبر.....	۳۰
۶-۲	مطالعات انجام شده مختلف در زمینه پرش هیدرولیکی.....	۳۵

فصل سوم : مواد و روش ها

۱-۳	معرفی و تشریح جزئیات فلوم.....	۴۰
۲-۳	شرح آزمایش.....	۴۵
۱-۲-۳	روش انجام کار.....	۴۷
۲-۲-۳	شرح آزمایشات در بسترهای صاف با سه شیب صفر، ۰/۰۱ و ۰/۰۲.....	۴۸
۳-۲-۳	شرح آزمایشات در بسترهای زبر با سه شیب صفر، ۰/۰۱ و ۰/۰۲.....	۵۳

۳-۳- آنالیز ابعادی ۵۸

۳-۳-۱- تحلیل ابعادی پارامترهای مؤثر بر پرش هیدرولیکی در بسترهای موجدار سینوسی ۵۹

فصل چهارم: نتایج و بحث

۴-۱- بررسی تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر مشخصات پرش هیدرولیکی ۶۴

۴-۱-۱- تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر طول غلطاب در شیب صفر، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ ۶۴

۴-۱-۲- تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر تغییرات عمق ثانویه به اولیه در

شیب صفر، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ ۶۸

۴-۱-۳- تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر تغییرات طول نسبی پرش در

شیب صفر، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ ۷۲

۴-۱-۴- تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر اتلاف انرژی در شیب صفر و ۰/۰۲ ۷۵

۴-۱-۵- تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر تغییرات طول نسبی پرش در شیب صفر و ۰/۰۲ ۷۸

۴-۱-۶- تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر تغییرات کاهش عمق نسبی پرش در

شیب صفر و ۰/۰۲ ۸۰

۴-۲- بررسی تأثیر ارتفاع زبری‌ها بر مشخصات پرش هیدرولیکی ۸۳

۴-۲-۱- تأثیر ارتفاع زبری‌ها بر تغییرات طول غلطاب در شیب صفر و ۰/۰۱ ۸۳

۴-۲-۲- تأثیر ارتفاع زبری‌ها بر تغییرات نسبت عمق ثانویه به اولیه در شیب صفر و ۰/۰۲ ۸۵

۴-۲-۳- تأثیر ارتفاع زبری‌ها بر تغییرات طول نسبی در شیب صفر و ۰/۰۱ ۸۶

۴-۲-۴- تأثیر ارتفاع زبری‌ها بر اتلاف انرژی در شیب صفر و ۰/۰۲ ۸۸

۴-۲-۵- تأثیر ارتفاع زبری‌ها بر تغییرات طول نسبی در شیب صفر و ۰/۰۲ ۸۹

۴-۲-۶- تأثیر ارتفاع زبری‌ها در تغییرات کاهش عمق نسبی در شیب صفر و ۰/۰۱ ۹۰

۴-۳- بررسی پروفیل‌ها سطح آب، بامعد و بی‌بعد ۹۲

عنوان مطالب

صفحه

- ۹۲ تأثیر دبی بر پروفیل‌های سطح آب ۱-۳-۴
- ۹۲ تأثیر دبی بر پروفیل‌های سطح آب در بسترهای صاف، در شیب صفر و ۰/۰۲ ۱-۱-۳-۴
- ۹۴ تأثیر دبی بر شکل پروفیل‌های سطح آب در بسترهای زبر، در شیب صفر
با $S=0$ ۲-۱-۳-۴
- ۹۴ تأثیر دبی بر پروفیل‌های سطح آب در بسترهای زبر، در شیب صفر با $S=2$ سانتیمتر
در شیب ۰/۰۲ ۳-۱-۳-۴
- ۹۸ تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر پروفیل سطح آب ۲-۳-۴
- ۹۸ تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر پروفیل سطح آب در شیب صفر ۱-۲-۳-۴
- ۱۰۰ تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر پروفیل سطح آب در شیب ۰/۰۲ ۲-۲-۳-۴
- ۱۰۲ تأثیر ارتفاع زبری‌ها بر پروفیل سطح آب ۳-۳-۴
- ۱۰۲ تأثیر ارتفاع زبری‌ها بر پروفیل سطح آب در شیب صفر و ۰/۰۲ ۱-۳-۳-۴

فصل پنجم : نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- ۱۰۶ نتیجه‌گیری ۱-۵
- ۱۰۹ پیشنهادات ۲-۵
- ۱۱۰ منابع ۱۱۰

فهرست اشکال

عنوان اشکال

صفحه

فصل اول : مقدمه و هدف

- ۷ شمای کلی پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف ۱-۱

فصل دوم : مروری بر تحقیقات پیشین

- ۱-۲- نمای ساده از کانال با زبری‌های مکعبی ۱۴
- ۲-۲- نمای فلوم با زبری‌های نیم‌دایره بر روی شیب افقی ۱۵
- ۳-۲- نمای پرش در سطح شیب‌دار ۲۴
- ۴-۲- پرش در بستر با شیب معکوس ۲۵
- ۵-۲- نمای ساده پرش در شیب معکوس ۲۶
- ۶-۲- نمایش متغیرهای پرش نوع B ۲۸
- ۷-۲- طرح کلی کانال آزمایشگاهی ۲۹
- ۸-۲- نمای پرش در شیب معکوس با آبپایه ۳۰
- ۹-۲- طرح شماتیک مقطع عرضی مدل با بستر زیر ۳۴
- ۱۰-۲- آبپایه و زبری‌های نیم‌استوانه‌ای شکل با ارتفاع ۱/۵، ۲/۵ و ۵/۳ سانتیمتر و نمونه تشکیل
 پرش هیدرولیکی ۳۴
- ۱۱-۲- شمای ساده از پرش هیدرولیکی در بستر صاف ۳۶

فصل سوم : مواد و روش‌ها

- ۱-۳- پمپ ۴۰
- ۲-۳- منبع تغذیه یا مخزن ابتدایی فلوم ۴۱
- ۳-۳- لوله انتقال آب ۴۱
- ۴-۳- نمای ورود لوله انتقال آب به مخزن ابتدایی فلوم و دریچه کشویی ۴۲
- ۵-۳- دریچه قطاعی در انتهای فلوم ۴۳
- ۶-۳- مخزن خروجی ۴۳
- ۷-۳- سیستم تنظیم شیب فلوم ۴۴
- ۸-۳- نمایی از دبی‌سنج ۴۴

عنوان اشکال

صفحه

- ۹-۳ - نمای کلی از فلوم آزمایشگاهی ۴۵
- ۱۰-۳ - طرح شماتیک پرش هیدرولیکی در بستر زیر ۴۶
- ۱۱-۳ - نمای شماتیک فلوم ۴۷
- ۱۲-۳ - نمای فرورفتگی آب هنگام عبور از زیر دریچه کشویی ۴۹
- ۱۳-۳ - Pointcage یا عمق سنج فلوم ۴۹
- ۱۴-۳ - پرش هیدرولیکی در دبی $5 \text{ m}^3/\text{h}$ در شیب صفر بر روی بستر صاف ۵۰
- ۱۵-۳ - پرش هیدرولیکی با دبی $9/2 \text{ m}^3/\text{h}$ در بستر صاف و افقی ۵۱
- ۱۶-۳ - پرش هیدرولیکی در دبی $5 \text{ m}^3/\text{h}$ در شیب $0/02$ بر روی بستر صاف ۵۲
- ۱۷-۳ - پرش هیدرولیکی در دبی $9/2 \text{ m}^3/\text{h}$ در شیب $0/02$ بر روی بستر صاف ۵۲
- ۱۸-۳ - ابزار آزمایش ۵۳
- ۱۹-۳ - نمای قرارگیری زبری‌ها در سطح فلوم ۵۴
- ۲۰-۳ - پرش هیدرولیکی در دبی $9/2 \text{ m}^3/\text{h}$ در شیب صفر برای زبری دوم با فاصله بین زبری
۲ سانتیمتر ۵۶
- ۲۱-۳ - پرش هیدرولیکی در دبی $9/2 \text{ m}^3/\text{h}$ در شیب صفر برای زبری سوم بدون فاصله
بین زبری ۵۶
- ۲۲-۳ - پرش هیدرولیکی در دبی $9/2 \text{ m}^3/\text{h}$ در شیب $0/02$ برای زبری سوم با فاصله بین زبری
۲ سانتیمتر ۵۷
- ۲۳-۳ - حرکت چرخشی حباب‌های هوا در ناحیه‌ی بین زبری‌ها ۵۷
- ۲۴-۳ - تزریق پرمنگنات پتاسیم برای مشاهده‌ی حرکت چرخشی آب بین زبری‌ها ۵۸

فصل چهارم : نتایج و بحث

- ۱-۴- بررسی تغییرات طول نسبی غلطاب در برابر عدد فرود برای فواصل مختلف زبری با ارتفاع ۰/۸۵ سانتیمتر ۶۵
- ۲-۴- مقایسه شیبها برای زبری اول ۶۶
- ۳-۴- بررسی تغییرات طول نسبی غلطاب در برابر عدد فرود برای فواصل مختلف زبری با ارتفاع ۱/۵ سانتیمتر ۶۷
- ۴-۴- تغییرات عمق نسبی پرش هیدرولیکی در بسترهای زبر و صاف برای فواصل مختلف بین زبری با ارتفاع زبری ۰/۸۵ سانتیمتر ۶۹
- ۵-۴- تغییرات عمق نسبی پرش هیدرولیکی در بسترهای موجدار سینوسی و صاف به ازای اعداد فرود اولیه برای فواصل مختلف زبری با ارتفاع ۱/۵ سانتیمتر..... ۷۰
- ۶-۴- مقایسه شیبها در زبری سوم ۷۱
- ۷-۴- تغییرات طول نسبی پرش به ازای اعداد فرود اولیه بر روی بستر با ارتفاع زبری ۰/۸۵ سانتیمتر..... ۷۳
- ۸-۴- مقایسه شیبها در زبری اول ۷۳
- ۹-۴- تغییرات طول نسبی پرش بر روی بستر زبر با ارتفاع ۱/۵ سانتیمتر به ازای اعداد فرود اولیه ۷۵
- ۱۰-۴- تغییرات اتلاف انرژی نسبی بر روی بسترهای موجدار سینوسی با ارتفاع ۰/۸۵ سانتیمتر..... ۷۶
- ۱۱-۴- تغییرات اتلاف انرژی نسبی بر روی بسترهای موجدار سینوسی با ارتفاع ۱/۵ سانتیمتر..... ۷۷
- ۱۲-۴- تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی در بستر با ارتفاع ۰/۸۵ سانتیمتر در فواصل مختلف بین زبری ۷۹

- ۱۳-۴ - تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی در بستر با ارتفاع ۱/۵ سانتیمتر در فواصل مختلف
بین زبری ۸۰
- ۱۴-۴ - تغییرات مقدار کاهش عمق نسبی پرش هیدرولیکی برای زبری با ارتفاع
۰/۸۵ سانتیمتر..... ۸۱
- ۱۵-۴ - مقایسه شیب‌ها در کاهش عمق نسبی در برابر عدد فرود ۸۲
- ۱۶-۴ - تغییرات مقدار کاهش عمق نسبی پرش هیدرولیکی برای زبری با ارتفاع
۱/۵ سانتیمتر..... ۸۳
- ۱۷-۴ - بررسی تغییرات طول نسبی غلطاب در برابر عدد فرود برای ارتفاع‌های مختلف زبری ۸۴
- ۱۸-۴ - بررسی تغییرات عمق ثانویه به اولیه در برابر عدد فرود برای ارتفاع‌های مختلف زبری ... ۸۶
- ۱۹-۴ - تغییرات طول نسبی پرش بر روی بستر زبر با ارتفاع‌های مختلف به ازای اعداد
فرود اولیه..... ۸۷
- ۲۰-۴ - تغییرات اتلاف انرژی نسبی پرش روی بسترهای موجدار سینوسی با ارتفاع‌های
مختلف ۸۹
- ۲۱-۴ - تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی در بستر با ارتفاع‌های مختلف زبری ۹۰
- ۲۲-۴ - تغییرات مقدار کاهش عمق نسبی پرش هیدرولیکی برای زبری‌های با ارتفاع‌های
مختلف..... ۹۱
- ۲۳-۴ - پروفیل بابتد سطح آب در ۳ دبی مختلف در بستر صاف با شیب صفر ۹۲
- ۲۴-۴ - پروفیل بی‌بابتد سطح آب در ۳ دبی مختلف در بستر صاف با شیب صفر ۹۳
- ۲۵-۴ - پروفیل بابتد و بی‌بابتد سطح آب در ۳ دبی مختلف در بستر صاف با شیب ۰/۰۲ ۹۴
- ۲۶-۴ - پروفیل بابتد و بی‌بابتد سطح آب در ۳ دبی مختلف در بستر با زبری اول در
شیب صفر ۹۵

عنوان اشکال

صفحه

- ۲۷-۴ - پروفیل باعد و بی بعد سطح آب در ۳ دبی مختلف در بستر با زبری سوم در شیب صفر ۹۶
- ۲۸-۴ - پروفیل باعد و بی بعد سطح آب در ۳ دبی مختلف در بستر با زبری اول در شیب ۰/۰۲ ۹۷
- ۲۹-۴ - پروفیل باعد و بی بعد سطح آب در ۳ دبی مختلف در بستر با زبری سوم در شیب ۰/۰۲ ۹۸
- ۳۰-۴ - پروفیل باعد و بی بعد سطح آب در بستر با زبری اول در شیب صفر ۹۹
- ۳۱-۴ - پروفیل باعد و بی بعد سطح آب در بستر با زبری سوم در شیب صفر ۱۰۰
- ۳۲-۴ - پروفیل باعد و بی بعد سطح آب در بستر با زبری اول در شیب ۰/۰۲ ۱۰۱
- ۳۳-۴ - پروفیل باعد و بی بعد سطح آب در بستر با زبری سوم در شیب ۰/۰۲ ۱۰۲
- ۳۴-۴ - پروفیل باعد و بی بعد سطح آب در بسترهای زبری با ارتفاع متفاوت، در شیب صفر ۱۰۳
- ۳۵-۴ - پروفیل باعد و بی بعد سطح آب در بسترهای زبری با ارتفاع متفاوت، در شیب ۰/۰۲ ۱۰۶

فهرست جداول

عنوان جدول

صفحه

فصل اول : مقدمه و هدف

- ۱-۱ - مشخصات جریان قبل و بعد از پرش هیدرولیکی ۳

فصل سوم : مواد و روشها

- ۱-۳ - فاصله بین زبریها ۴۷
- ۲-۳ - برنامه کلی آزمایشها و محدوده متغیرهای وابسته ۴۷

عنوان جدول

صفحه

۳-۳- ابعاد پارامترهای مورد استفاده ۶۰

فصل چهارم : نتایج و بحث

۴-۱- روابط ارائه شده توسط محققین مختلف برای نسبت اعماق ثانویه به اولیه پرش روی

بسترهای موجدار ۷۱

علائم و اختصارات

$$L_r = \text{طول غلطاب (m)}$$

$$L_z = \text{طول پرش هیدرولیکی (m)}$$

$$y_1 = \text{عمق اولیه پرش (m)}$$

$$y_2 = \text{عمق ثانویه پرش (m)}$$

$$y = \text{عمق جریان (m)}$$

$$y_2^* = \text{عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کلاسیک (m)}$$

$$s = \text{فاصله بین زبری (m)}$$

$$t = \text{ارتفاع زبری (m)}$$

$$b = \text{عرض کانال (m)}$$

$$x = \text{فاصله از شروع پرش (m)}$$

$$Q = \text{دبی (m}^3/\text{s)}$$

$$D = \text{کاهش عمق نسبی (m)}$$

$$Fr_1 = \text{عدد فرود اولیه}$$

$$\Delta E = \text{اتلاف انرژی}$$

$$V_1 = \text{سرعت اولیه پرش (m/s)}$$

$$\theta = \text{شیب کف فلوم}$$

فصل اول

مقدمه و هدف

۱- کلیات

۱-۱- مقدمه

پرش هیدرولیکی^۱ موضوعی است، که در مهندسی هیدرولیک، به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. این پدیده بسیار جالب و فریب‌انگیزی است، که پس از تعریف اولیه آن، توسط لئوناردو داوینچی، فکر بسیاری از محققین را به خود مشغول کرده است. (۶) مهندس ایتالیایی (بیدون-۱۸۱۸) با اولین تحقیق آزمایشگاهی روی این پدیده مشهور شده است (۶). پس از آن، تلاش تحقیقاتی قابل ملاحظه‌ای برای مطالعه این موضوع صورت گرفته است. پرش هیدرولیکی موقعی اتفاق می‌افتد که، یک جریان فوق بحرانی^۲ به یک جریان زیر بحرانی^۳ با عمق کافی برسد. جریان فوق بحرانی جهش می‌یابد، تا به عمق ثانویه^۴ خود برسد. همزمان با این کار، آشفتگی‌های زیادی به صورت گرداب‌های شدید و جریان غلطابی معکوس ایجاد می‌شود. پرش هیدرولیکی کامل، متشکل از تغییر تندی در رقوم سطح آب بوده، که بخش اعظم آن دارای غلطاب^۵ معکوس خواهد بود. غلطاب باعث ورود مقدار قابل ملاحظه‌ای هوا شده و سطح آب دارای ظاهری سفید، کف‌آلود و آشفته می‌باشد. در چنین حالت و به تناسب شدت پرش، این آشفتگی‌ها به تدریج که به سمت انتهای پرش نزدیک می‌شویم، از شدت آن‌ها کاسته شده و متناسباً و به جهت تبدیل انرژی به گرما، انرژی آب نیز کاهش می‌یابد. علاوه بر آن، به جهت این آشفتگی و تلاطم^۶ و در اثر برخورد آب با هوا، مقداری هوا با آب و در قسمت‌های سطحی مخلوط شده، که به سمت پایین‌دست^۷ منتقل و نهایتاً به شکل حباب‌های هوا، رها می‌گردد. پرش هیدرولیکی در عین حال که ماندگار است، ولی در حول موقعیت متوسطی در راستای طولی جریان، نوسان نموده و سطح آب ناهموار خواهد بود.

¹ Hydraulic jump

² Supercritical

³ Subcritical

⁴ Tailwater

⁵ Roller

⁶ Turbulent

⁷ Downstream

۱-۱-۱- نحوه تشکیل پرش هیدرولیکی

در خصوص نحوه تشکیل پرش هیدرولیکی، ابتدا عکس العمل جریان‌های فوق‌بحرانی و زیربحرانی در کنترل‌ها را می‌توان به طور خلاصه و به شرح زیر بیان نمود:

۱- جریان زیر بحرانی توسط کنترل پایین‌دست و جریان فوق بحرانی توسط کنترل بالادست^۸ ایجاد می‌شود.

۲- یک کنترل، رابطه مشخصی بین عمق جریان و شدت جریان تثبیت می‌نماید. همچنین ممکن است، در فاصله معینی در پایین‌دست و بالادست کنترل، وضعیت جریان را ثابت نماید. در نتیجه در بالادست، جریان زیربحرانی و در پایین‌دست، جریان فوق‌بحرانی را ایجاد می‌کند.

۳- یک کنترل معمولاً هم در بالادست و هم در پایین‌دست، روی وضعیت جریان تأثیر می‌گذارد. مگر هنگامی که کنترل در انتهای کانال تعبیه شده باشد. (۱۱)

جدول ۱-۱- مشخصات جریان قبل و بعد از پرش هیدرولیکی

مشخصات جریان	قبل از پرش هیدرولیکی	بعد از پرش هیدرولیکی
سرعت جریان	فوق بحرانی	زیر بحرانی
عمق جریان	کم	زیاد
نوع جریان	آشفته	اندکی متلاطم

⁸ Upstream

۱-۱-۲- خواص و کاربرد پرش هیدرولیکی

پرش هیدرولیکی در کانال‌های باز دارای کاربردها و خواص فراوانی است که می‌تواند به صورت زیر خلاصه گردد:

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

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

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

۴- کاهش فشار بالا برنده در زیر سازه‌ها، با افزایش عمق آب در دامنه سازه،

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

۶- هوادهی جریان‌ها و کلرزدائی فاضلاب،

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

۸- مشخص نمودن شرایط جریان‌های خاص، نظیر وجود جریان فوق‌بحرانی یا وجود یک سطح مقطع کنترل، جهت ایستگاه‌های اندازه‌گیری کم‌خرج (۱۱).

۱-۱-۳- حوضچه آرامش

حوضچه آرامش^۹ یا حوضچه‌های جهش آبی قسمت کوتاهی از یک کانال کف‌سازی شده می‌باشد، که به صورت سازه‌ای خاص در انتهای سرریزها یا هر منبع دیگری که جریان فوق بحرانی ایجاد کند، ساخته می‌شود. هدف از ساختن این سازه‌ها، تشکیل پرش هیدرولیکی در داخل حوضچه می‌باشد، تا جریان فوق بحرانی قبل از رسیدن به قسمت‌های غیرکف‌سازی شده رودخانه، به جریان زیربحرانی تغییر حالت داده و از انرژی فوق‌العاده آن توسط بلوک‌های کف، کاسته و از خرابی‌های احتمالی جلوگیری گردد. شکل بلوک‌های کف حوضچه، تأثیر مهمی در طول پرش هیدرولیکی دارد و کاهش طول پرش به معنی کاهش طول حوضچه و در نهایت کاهش هزینه‌های ساخت می‌شود. پرش آبی در حوضچه‌های آرامش نقش مؤثری در استهلاک انرژی^{۱۰} جریان در پایاب سازه‌های آبی ایفا می‌کند. برای پوشش حوضچه، عیار بتن را زیاد می‌گیرند تا در اثر خوردگی مکانیکی و کاویتاسیون آسیب نبینند. در کف و دیواره حوضچه نباید بی‌نظمی وجود داشته باشد. اگر جنس بستر در پایین دست حوضچه سست باشد باید آن را خشکه‌چینی کرد. شرایط بستر حوضچه عامل مؤثری در کنترل جهش آبی، کاهش طول و عمق ثانویه جهش و افزایش افت انرژی بشمار می‌رود.

حوضچه‌های آرامش با بستر زبر، به حوضچه‌هایی اطلاق می‌شود که المان‌های زبری به صورت نوارهای موازی یکنواخت، عمود بر جهت جریان در کف حوضچه قرار گرفته باشند و از آنجا که مقاومت حوضچه آرامش در مقابل فرسایش و کاویتاسیون حائز اهمیت می‌باشد، بر اساس نظریه اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)، نوارهای زبری در داخل حوضچه باید به نحوی قرار گیرند که تاج آن‌ها هم‌سطح بستر بالادست بوده و نقش گودافتادگی را ایفا نمایند.

⁹ Stilling Basin

¹⁰ Energy Disipation

۱-۲-تاریخچه

پرش هیدرولیکی از پدیده‌های مهم در علم هیدرولیک بوده و در زمره جریان‌های متغیر سریع طبقه‌بندی می‌شود. این پدیده، امکان استهلاك انرژی اضافی آب را در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی نظیر سرریزها، تندآب‌ها، و دریچه‌ها فراهم می‌آورد. ساده‌ترین نوع پرش هیدرولیکی را، که در کانال-هایی با مقطع مستطیلی و کف افقی تشکیل می‌شود، پرش کلاسیک یا نوع A می‌نامند. پرش هیدرولیکی کلاسیک یا نوع A، بطور وسیع توسط پترکا (۱۹۸۳)،

راجاراتنام (۱۹۶۸)، هاگر و برمن (۱۹۹۲) و... مورد بررسی قرار گرفته است. براساس رابطه ارائه شده توسط بلانگر (۱۸۲۸)، y_2^* عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کلاسیک و y_1 به ازای عمق اولیه یا همان عمق فوق‌بحرانی در پنجه پرش و سرعت متوسط V_1 در این مقطع به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\frac{y_2^*}{y_1} = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1) \quad (۱-۱)$$

$$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}} \quad (۲-۱)$$

Fr_1 عدد فرود در مقطع بالادست پرش و g شتاب ثقل می‌باشد. قدرت و شدت پرش هیدرولیکی به

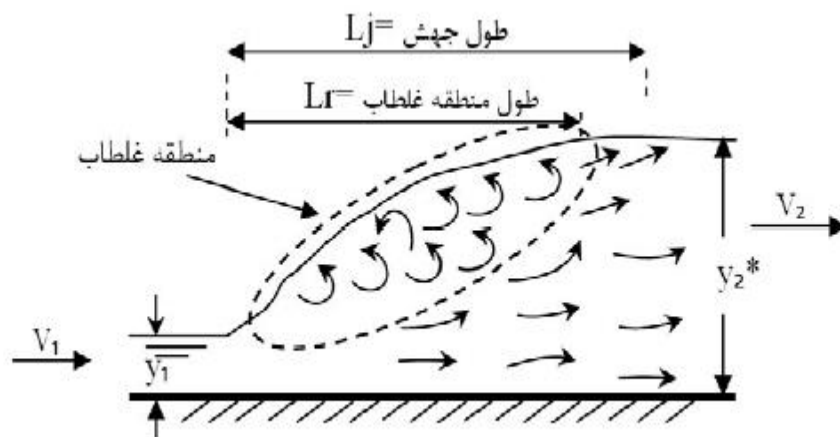
عدد فرود در مقطع ۱ (محل شروع پرش هیدرولیکی) بستگی دارد، که با افزایش آن نسبت $\frac{y_2^*}{y_1}$ و به

عبارتی دیگر $(y_2^* - y_1)$ افزایش می‌یابد. یکی از پارامترهای بسیار مهم در پرش هیدرولیکی، طول

پرش می‌باشد. در پرش‌های آبی عموماً دو طول مختلف مورد توجه قرار می‌گیرد. طول چرخش، L_r ،

که عبارت است از فاصله شروع پرش تا نقطه‌ای که سرعت جریان در سطح معکوس شده است و L_j ،

فاصله شروع پرش تا محلی که رقوم سطح آب تقریباً برابر با ارتفاع پایاب است (شکل ۱-۱).



شکل ۱-۱ شمای کلی پرفش هیدرولیکی بر روی بسترصاف

تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه تشکیل پرفش هیدرولیکی روی بسترهای زبر، انجام گرفته است. اما با توجه به گستردگی شرایط و پیچیدگی رفتار جریان در حالات مختلف لزوم تحقیقات بیشتر در این زمینه ضروری بنظر می‌رسد.

راجاراتنام (۱۹۶۸) اولین کسی بود که مطالعات سیستماتیک خود را در زمینه پرفش هیدرولیکی روی بسترهای زبر^{۱۱} انجام داد و $k = \frac{k_e}{y_1}$ را به عنوان عامل زبری معرفی نمود، که k_e ارتفاع معادل زبری و (y_1) پارامتر عمق جریان ورودی قبل از پرفش به بستر زبر می‌باشد. او همچنین بیان نمود که طول پرفش (L_z) و طول غلطاب (L_r) ، روی بسترهای زبر در مقایسه با بسترهای صاف، بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

پژوهش‌های دیگری از جمله هوگز و فلاک (۱۹۸۴)، هگر و برمن (۱۹۹۲)، اید و همکاران (۲۰۰۰)، ایزدجو و شفافی بجستان (۲۰۰۷)، توکیای (۲۰۰۵) و عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)، کاهش قابل توجه طول پرفش هیدرولیکی بر روی سطوح زبر را تأیید کردند.

¹¹ Roughness Beds

۳-۱- هدف از تحقیق حاضر و ضرورت انجام آن

حوضچه‌های آرامش در پایاب سازه‌های هیدرولیکی، محل مناسبی برای ایجاد، کنترل و مهار پرش هیدرولیکی^{۱۲} به شمار می‌آیند و بلوک‌های داخل حوضچه، باعث هدایت پرش به درون آن و استهلاک بخشی از انرژی جنبشی پرش هیدرولیکی و در نتیجه افزایش راندمان حوضچه‌های آرامش می‌شوند. در سال‌های اخیر، از المان‌های زبر در کف حوضچه‌ها استفاده شده و اثر زبری‌ها در افزایش کارایی حوضچه‌های آرامش و کاهش طول پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفته است. زبری کف می‌تواند به صورت سنگچین، موج‌های سینوسی، دوزنقه‌ای، مستطیلی و مثلثی یکپارچه در عرض آبراهه باشد. مطالعات انجام شده بر روی بستر حوضچه نشان می‌دهد که، استفاده از بسترهای با مانع و زبر، نیازمند آزمایش‌های بیشتری، برای تعیین مناسب‌ترین و اقتصادی‌ترین شکل مانع‌ها و زبری‌ها و ابعاد و فاصله آن‌ها می‌باشد. از این‌رو در این تحقیق بلوک‌های کف به صورت مانع‌های، که ایجاد زبری نمودند، انتخاب گردیده و اثر شکل‌ها و فاصله و ارتفاع آن‌ها بر روی مشخصات جهش آبی در محدوده اعداد فرود بین (۲/۶ تا ۵/۲) مورد بررسی قرار گرفته است، که نتایج آن در پژوهش حاضر مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در مطالعه حاضر به منظور کاهش طول و عمق مزدوج پرش هیدرولیکی و به تبع آن کاهش ابعاد حوضچه آرامش و نیز تأثیر آن روی کاهش طول و عمق مزدوج پرش هیدرولیکی و عدد فرود بررسی‌های لازم انجام شد.

۴-۱- روش انجام تحقیق

در این آزمایش به بررسی و تخمین طول پرش هیدرولیکی روی مجاری صاف و شیب‌دار با شیب مثبت به همراه زبری‌های سینوسی شکل پرداخته شد و نتایج حاصل از آن با نتایج آزمایشگاهی سایر محققین مقایسه گردید. آزمایش‌ها در سایت فلوم آزمایشگاهی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گرفته است. فلوم مورد استفاده برای آزمایش، شیب پذیر بوده و دارای طول ۳ متر، عرض ۰/۰۹ متر و ارتفاع ۰/۳۴ متر می‌باشد. در ابتدا ۱۸ آزمایش در ۳ شیب با مقدارهای ۰، ۱ و ۲ درصد بر روی بستر

¹² Control Of Hydraulic Jump

صاف (بدون زبری) با ۶ مقدار دبی آب و ۶ عدد فرود متفاوت انجام گرفت و طول پرش و مقدار عمق ثانویه اندازه‌گیری و ثبت شد. سپس ۲۷۰ آزمایش روی بسترهای زبر (دارای ناهمواری‌های نیم‌دایره‌ای) انجام شد. لوله‌های استفاده شده جهت زبری، دارای قطرهای ۱/۷، ۲ و ۳ سانتیمتر، بطوری‌که ارتفاع نیم‌دایره آن‌ها برابر ۰/۸۵، ۱ و ۱/۵ سانتیمتر بود. برای هر سایز لوله، ۵ بستر ساخته شد. در این بسترها بین لوله‌ها، فاصله‌هایی در نظر گرفته شد، که اندازه‌ی این فاصله‌ها، ۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ سانتیمتر بود. در کل ۱۵ بستر به همراه زبری فراهم آمد. در این سری از آزمایش‌ها، همانند بستر صاف، مقدار طول پرش و عمق ثانویه اندازه‌گیری و ثبت شد. روش انجام کار به این صورت بود که، باروشن شدن فلوم و تنظیم دبی دستگاه، با استفاده از دبی‌سنج تعبیه شده بر روی آن، آب بعد از عبور از مخزن ورودی، وارد فلوم شده و از زیر دریچه ابتدایی که دارای بازشدگی ثابت به مقدار ۲/۵ سانتیمتر است، عبور می‌کند و در همین حین دچار پرش هیدرولیکی می‌شود، که این پرش به فاصله ۱۰ سانتیمتری از دریچه ابتدایی رخ می‌دهد. با استفاده از دریچه قطاعی قرار گرفته در انتهای فلوم، محل شروع پرش تثبیت می‌شد. یک اهرم تنظیم شیب هم با صفحه‌ای مدرج، روی فلوم نصب شده، که شامل مقادیر شیب می‌باشد و در کنار آن قرار گرفته است. با چرخاندن اهرم شیب، فلوم روی شیب‌های مورد نظر، تنظیم می‌شود. در طول روند آزمایشات، مقدار عمق اولیه ثابت و برابر با ۱/۵ سانتیمتر بود و مقادیر طول پرش و عمق ثانویه با استفاده از خط‌کش برآورد گردید.

۱-۵- سازمان‌دهی فصل‌های پایان‌نامه

فصل اول پایان‌نامه شامل مقدمه، تاریخچه، کاربردها و اهمیت موضوع، اهداف پایان‌نامه و شرح کلی فصول پایان‌نامه می‌باشد. فصل دوم به اصول حاکم بر جریان در بسترهای صاف و زبر و مروری بر تحقیقات پیشین اختصاص یافته است. فصل سوم به تشریح مواد و روش‌های مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها و نیز توضیح مختصری در مورد وسایل به کار برده شده در این پایان‌نامه پرداخته است. در فصل چهارم نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها ارائه و مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. در ضمن، فصل

پنجم به نتیجه‌گیری و پیشنهادات پرداخته شده است. در فصل پنجم ضمن ارائه نتایج به دست آمده به صورت کلی و خلاصه، پیشنهاداتی در رابطه با ادامه تحقیقات ارائه گردیده است.

فصل دوم

مروری بر تحقیقات

پیشین

۲- بررسی منابع

۲-۱- مقدمه

محققین زیادی به بررسی آزمایشگاهی مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی سطوح صاف پرداخته‌اند. همچنین تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه تشکیل پرش هیدرولیکی روی بسترهای زیر انجام گرفته است، اما با توجه به گستردگی شرایط و پیچیدگی رفتار جریان در حالات مختلف لزوم تحقیقات بیشتر در این زمینه ضروری بنظر می‌رسد.

در فصل حاضر ابتدا مروری بر بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده بر روی سطوح صاف صورت می‌گیرد و سپس به تفصیل به بیان مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در رابطه با پرش هیدرولیکی بر روی سطوح زیر پرداخته می‌شود.

۲-۲- مطالعات انجام شده در زمینه پرش هیدرولیکی بر روی بستر صاف

مهندس ایتالیایی بیدون در سال ۱۸۱۸ اولین تحقیق آزمایشگاهی را روی این پدیده انجام داد. پس از آن تلاش زیادی برای مطالعه این موضوع صورت گرفت. ساده‌ترین نوع پرش هیدرولیکی که در کانال‌های با مقطع مستطیلی و کف افقی ایجاد می‌گردد، پرش هیدرولیکی کلاسیک یا نوع A نامیده می‌شود. این نوع پرش به طور وسیعی توسط محققین مانند پترکا (۱۹۸۳) و هاگر و برمن (۱۹۹۲) در حوضچه‌های آرامش مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۳- مطالعات انجام شده در زمینه پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر

تاکنون پرش‌های هیدرولیکی بر روی بسترهای صاف بطور وسیع مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. ولی در خصوص پرش بر روی بسترهای زیر بجز کانال‌های با مانع‌هایی همانند پله‌ها و بلوک‌ها، مطالعات کمی صورت گرفته است. اگر زبری‌ها بطور یکنواخت بر روی سطح بستر پرش قرار گرفته باشند، پرش

ایجاد شده را پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر^{۱۳} گویند. این نوع پرش، شباهتهایی با پرش‌های اجباری^{۱۴} ایجاد شده بوسیله بلوک‌ها دارد، که در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

*راجاراتنام(۱۹۶۸)، اولین مطالعات سیستماتیک را درخصوص پرش‌های بر روی بستر زبر انجام داد. او نشان داد طول غلطابی (L_r) و طول پرش (L_j) بر روی بسترهای زبر به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. لذا از این موضوع این چنین به نظر می‌آید، که پرش‌های هیدرولیکی بر روی بسترهای زبر برتری قابل توجهی را نسبت به حالت کلاسیک دارا می‌باشند.

*لوت هوسر و شیلر (۱۹۷۵)، در زمینه جریان‌های ورودی روی بستر زبر مطالعاتی انجام دادند. آن‌ها بیان نمودند که، وجود زبری کف باعث تسریع در رشد لایه مرزی شده و برای ایجاد جریان‌های فوق-بحرانی توسعه یافته در پایین‌دست دریچه‌ها و سرریزها، حوضچه آرامش نیاز به طول کوتاه‌تری دارد.

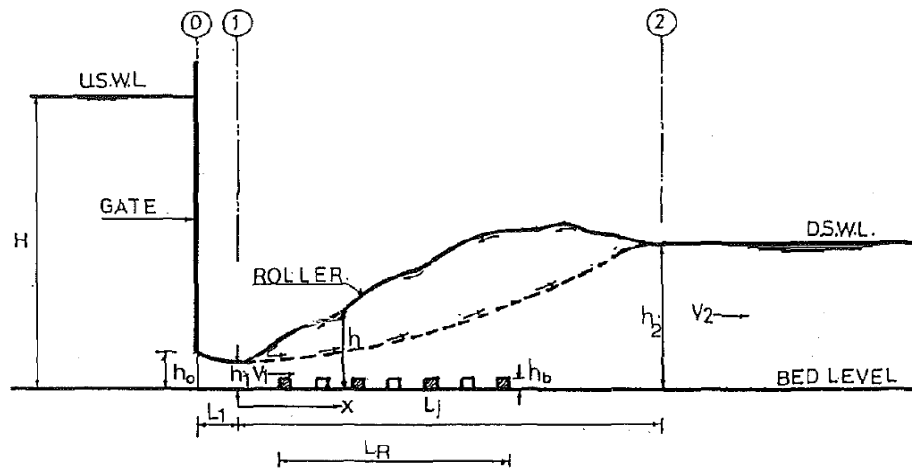
*هیوز و فلاک (۱۹۸۴)، بیان نمودند، ناهمواری‌های مرزی به طور قطع عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی را کاهش می‌دهد، که این کاهش تابعی از عدد فرود اولیه و میزان ناهمواری بستر است.

*محمد علی (۱۹۹۱)، با انجام یک سری آزمایشات بر روی بستر زبر شده با استفاده از المان‌های مکعبی نشان داد، که طول نسبی پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای زبر نسبت به حالت کلاسیک از $27/4$ تا $67/4$ درصد تغییر می‌کند. با کاهش طول نسبی پرش، نسبت $\frac{L_r}{y_1}$ کاهش می‌یابد. طول نسبی مؤثر از زبری‌ها $\frac{L_r}{y_1} = 28$ بدست آمده از یک کاهش قابل توجه در طول نسبی پرش $\frac{L_j}{y_1}$ می‌باشد. درصد کاهش طول پرش در بسترهای زبر با افزایش عدد فرود کاهش می‌یابد. این نتایج با نتایج USBR^{۱۵} برابر بود.

¹³ Hydraulic jump on a rough bed

¹⁴ Compulsory Jumps

¹⁵ United States Bureau of Reclamation

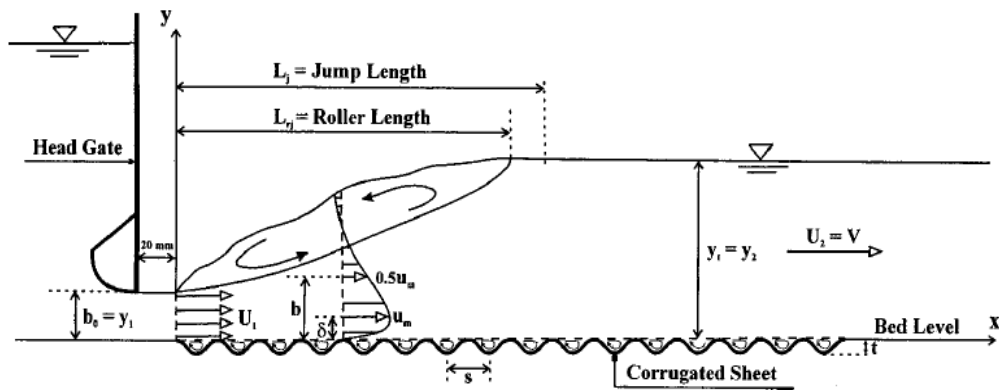


شکل ۱-۲ نمای ساده از کانال با زبری‌های مکعبی

*موریس (۱۹۹۵)، مفهوم زبری را مورد بررسی قرار داد. وی فرض کرد افت بار در جریان متلاطم روی بستر زبر بیشتر ناشی از جریان‌های گردابه‌ای می‌باشد. همچنین وی بیان نمود فاصله بین اجزای زبر می‌تواند بر تشکیل حرکت‌های گردابه‌ای تأثیرگذار باشد. چنانچه فاصله بین اجزای زبر زیاد باشد، گردابه‌ها به طور مستقل تشکیل می‌شوند و اگر فاصله خیلی نزدیک باشد، سطح زبر به مانند یک سطح صاف عمل می‌کند.

*آید و راجاراتنام (۲۰۰۲)، مطالعات آزمایشگاهی را در خصوص پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج انجام دادند. آزمایشات برای عدد فرود ۴ تا ۱۰ انجام شد و مقدار زبری نسبی $\frac{t}{y_1}$ که (t) ارتفاع موج‌ها و (y) عمق آب قبل از پرش می‌باشد، را بین ۰/۴۳ تا ۰/۵ مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که، عمق پایاب مورد نیاز جهت ایجاد پرش هیدرولیکی روی بستر موج کوچک‌تر از پرش هیدرولیکی کلاسیک (بستر صاف) است و طول پرش نیز تقریباً نصف طول پرش در کف‌های صاف است. تنش برشی بسترهای موجدار حدود ۱۰ برابر آن در بسترهای صاف برآورد شد، که دلیل آن اثر متقابل جریان فوق بحرانی و بسترهای موجدار بود. پروفیل سرعت محوری در مقاطع مختلف در پرش هیدرولیکی مشابه و تفاوت آن با پرش در روی سطوح صاف کم بود. سرعت ماکزیمم Um در هر مقطع

بر حسب U_1 (یا سرعت جریان فوق بحرانی) رابطه قابل قبولی با X (فاصله طولی بر حسب L ، فاصله ای که در آن $(U_m = \frac{1}{2} U_1)$) و این رابطه مشابه روابط مربوط به پرش روی بسترهای صاف بود. با این تفاوت که نسبت $\frac{L}{y_1}$ در روی بسترهای صاف خیلی کوچکتر از بسترهای زبر بدست آمده بود. مقدار D که پارامتر کاهش عمق نسبی می باشد، برابر با 0.25 برآورد شد.



شکل ۲-۲ نمای فلوم با زبری های نیمدایره بر روی شیب افقی

در زمینه تعیین عمق متناظر پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای زبر تحقیقات بسیار محدودی انجام شده است. راجاراتنام (۱۹۶۸) لوت هاووزر واشکیلر (۱۹۷۵)، گیل (۱۹۸۰)، هاگر (۱۹۸۲)، هاگر و فلک (۱۹۸۴) و راجاراتنام

(۲۰۰۲)، در این زمینه تحقیقاتی انجام داده اند که روابط مربوط بشرح ذیل توضیح داده می شود. *راجاراتنام (۱۹۶۸)، یک پارامتر جدید بنام پارامتر زبری نسبی (K) را تعریف نمود. که با توجه به دو پارامتر (Ke) ارتفاع معادل زبری و (y) عمق جریان ورودی در بالای زبری ها است. او با توجه به آزمایشات مختلف بر روی ۵ زبری مختلف با مقادیر زبری نسبی 0.2 تا 0.43 و اعداد فرود ۳ تا ۱۰ نشان داد که نسبت $\frac{y_2}{y_1}$ تابعی است از عدد فرود F و زبری نسبی و نتایج زیر حاصل گردید:

$$\frac{Ke}{y_1} = 0.3 = (0.21 \text{ تا } 0.31)$$

$$\frac{Ke}{y_1} \approx 0.03 \quad \text{برای} \quad J = \frac{y_2}{y_1} = 1.3 F_1 - 0.3 \quad (1-2)$$

برای زبری های $(0.051$ تا $0.115)$ $\frac{K_e}{y_1} = 0.08$

$$\frac{K_e}{y_1} \approx 0.08 \quad \text{برای} \quad J = \frac{y_2}{y_1} = 1.22 F_1 - 0.24 \quad (2-2)$$

برای زبری های $(0.165$ تا $0.425)$ $\frac{K_e}{y_1} = 0.29$

$$\frac{K_e}{y_1} \approx 0.29 \quad \text{برای} \quad J = \frac{y_2}{y_1} = 1.1 F_1 - 0.1 \quad (3-2)$$

و همچنین نشان داد که با افزایش مقدار زبری نسبی مقدار $\frac{y_2}{y_1}$ کاهش می یابد.

*توکای (۲۰۰۵)، اثرات بستر موجدار را بر روی پرش هیدرولیکی به صورت تجربی بررسی نمود. شیب موج $\frac{t}{s}$ (ارتفاع موج، s طول موج) برابر 0.1 ، 0.2 و 0.26 بوده و مطالعات در محدوده اعداد فرود 5 تا 12 انجام گرفت.

*دی و سارکر (۲۰۰۵)، مشخصات جریان آشفته را در پرش های مستغرق بر روی بسترهای موجدار مورد بررسی قرار دادند. هدف از آزمایش های آنها، برآورد توزیع عمودی مؤلفه های سرعت میانگین، شدت تلاطم و رینولدز^{۱۶} در فاصله های مختلف از بازشدگی دریچه و توزیع افقی تنش های برشی بستر بود. آزمایش های انجام شده برای پرش های مستغرق^{۱۷}، دارای فاکتور استغراق به مقدار 0.96 تا 1.85 و عدد فرود پرش بین 2.57 تا 4.87 بود. بسترهای زبر، دارای زبری های شنی به قطر 0.49 ، 0.8 ، 1.86 و 3 میلی متر بودند. نتایج حاصل از آزمایش های آنها به شرح زیر می باشد:

- ۱- کاهش میزان سرعت ماکزیمم موضعی ناشی از افزایش زبری بستر بود.
- ۲- ضخامت لایه داخلی در سرعت افقی و افزایش شدت توزیع متلاطم، ناشی از افزایش زبری بستر بود.

¹⁶ Reynolds

¹⁷ Suggested Jumps

۳- میزان کاهش ضریب رینولدز ماکزیمم و افزایش تلاطم‌های افقی و عمودی در بسترهای زبر، کمتر از مقدار آن در بسترهای صاف بود.

۴- نسبت‌های تلاطم افقی موضعی ماکزیمم دارای شدتی برابر ۰/۷۵ می‌باشند.

۵- نقاط صفر در توزیع تنش رینولدز در بسترهای زبر همانند آن‌ها در بسترهای صاف بود.

۶- ضریب رینولدز در نیم عرض در بسترهای زبر خیلی کمتر از بسترهای صاف بود.

*پالمو و همکاران (۲۰۰۷)، تحقیقات آزمایشگاه خود را در کانالی با بسترهای زبر هم‌جنس و غیرهم‌جنس، انجام دادند و پارامترهای عمق ثانویه، طول غلطاب، طول پرش و سرعت جریان را در ۲۰۰ آزمایش اندازه‌گیری و مقایسه کردند. نتایج بدست آمده نشان داد که، در بسترهای زبر، ضریب تصحیح، فقط به نسبت زبری و نسبت اعماق مزدوج وابسته نیست، بلکه به پارامتر غیریکنواختی بستر رسوبی هم، بستگی دارد. همچنین طول پرش و اندازه عمق ثانویه نسبت به بستر صاف، کاهش قابل ملاحظه‌ای داشت.

*کارولو و فرو (۲۰۰۷)، خصوصیات پرش هیدرولیکی را بر روی بستری با زبری طبیعی در محدوده اعداد فرود ۴ تا ۱۲ بررسی کردند و نتیجه گرفتند که نسبت اعماق مزدوج در شرایط مشخص جریان، با افزایش اندازه زبری ها کاهش می‌یابد.

ایزدجو و شفافی بجستان (۲۰۰۷)، مشخصات پرش هیدرولیکی را بر روی بسترهایی با زبری‌های نواری ذوزنقه‌ای بررسی کردند. محدوده اعداد فرود بین ۴ تا ۱۲ با ۶ مقدار نسبت زبری بود. آن‌ها گزارش کردند که، نسبت های $\frac{t}{y_1}$ و $\frac{s}{y_1}$ تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی عمق ثانویه ندارند. نتایج مطالعات نشان داد، که طول بی‌بعد $\frac{L_j}{y_2^}$ پرش برابر ۳ و متوسط مقادیر D برابر با ۰/۲ می‌باشد. همچنین در بسترهای زبر، اعماق ثانویه ۲۰٪ و طول پرش‌های هیدرولیکی ۵۰٪ نسبت به بستر صاف، کاهش داشت. این کاهش طول و عمق ثانویه پرش، بیانگر کاهش مقرون به صرفه طول حوضچه آرامش

بود. طول غلطاب پرش، به فاصله و اندازه زبری‌ها بستگی داشت. همچنین مقدار تنش برشی، که تابعی از عدد فرود می‌باشد، در بسترهای زبر در مقایسه با بستر صاف، تا ۱۰ برابر افزایش یافته بود.

*اید (۲۰۰۷)، از سه بستر موجدار سینوسی، دوزنقه‌ای و منشوری استفاده کرد و نتیجه گرفت که زبری نسبی $\frac{t}{y_1}$ و شکل موج‌ها، تأثیر چندانی بر روی نسبت اعماق مزدوج ندارند. همچنین نسبت $\frac{y_2}{y_1}$ تقریباً ۸۰ درصد عدد فرود جریان فوق‌بحرانی ورودی می‌باشد. با توجه به اینکه تاج زبری‌ها هم‌سطح بستر بالادست می‌باشد، موج‌ها شبیه گودال عمل کرده و تغییر ارتفاع آن‌ها تأثیر زیادی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی ندارد. اید میزان عدد بی‌بعد D را حدود ۰/۴ بدست آورد و نشان داد که، ضریب نیروی برشی بر روی بسترهای زبر، ۱۵ برابر بستر صاف می‌باشد.

*شفاعی بجستان و نیسی (۲۰۰۹)، با جایگذاری بلوک‌های لوزی شکل در حوضچه آرامش به بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که، طول پرش در مقایسه با حوضچه‌های USBR و SAF کمتر است. در این بررسی، کاهش عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی در محدوده اعداد فرود ۴/۵ تا ۱۲ به ترتیب در حدود ۲۶٪ و ۴۰٪ گزارش شد.

*گوهری و فرهودی (۲۰۰۹)، خصوصیات پرش هیدرولیکی را بر روی بسترهایی با زبری‌های نواری مستطیلی در محدوده اعداد فرود ۳ تا 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 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.

*السبایه و شبایک (۲۰۱۰)، مطالعه آزمایشگاهی خود را در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۷/۵ روی ۵ بستر موجدار شامل موج‌های سینوسی، مثلثی، دوزنقه‌ای روی دو شیب متفاوت انجام دادند. نتایج آن‌ها بیانگر کاهش قابل توجه طول و عمق ثانویه پرش روی بستر موجدار در مقایسه با پرش روی بستر صاف بود.

*ایزدجو و همکاران (۱۳۸۳)، مشخصات پرش هیدرولیکی روی بسترهای موجدار دوزنقه‌ای شکل را مطالعه کردند. مطالعات بر روی چهار بستر موجدار دوزنقه‌ای شکل در بازه عدد فرود ۴ تا ۱۲ و مقادیر $\frac{t}{y_1}$ در بازه ۰/۳۷۱ تا ۱/۷۳۳ و $\frac{s}{y_1}$ در بازه ۰/۹۷۱ تا ۸/۳۳۳ انجام گرفت. نتایج نشان داد که موجدار بودن بستر در استهلاک انرژی و کاهش هزینه‌های حوضچه آرامش تأثیر قابل توجهی دارد.

*الله دادی و همکاران (۱۳۸۸)، تأثیر عرض و ارتفاع زبری بر طول غلطاب پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش، در دانشگاه شهید چمران اهواز، مورد بررسی قرار دادند. برای این امر از سه ارتفاع (۰/۱، ۳/۲۰ سانتیمتر) و سه عرض (۱/۶۰، ۳/۲۰ و ۴/۸۰ سانتیمتر) و ترکیب آن‌ها استفاده شده است. در هر مورد خصوصیات اصلی پرش شامل عمق ثانویه پرش، عمق اولیه پرش، طول گرداب پرش و... به دقت اندازه‌گیری و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

مقایسه نتایج، با زبری بستر و بدون زبری بستر نشان می‌دهد که زبری‌ها می‌توانند مقدار قابل ملاحظه‌ای طول غلطاب پرش هیدرولیکی را کاهش می‌دهند.

نتایج حاصل از آزمایشات آن‌ها نشان داد که:

۱- برای یک زبری با ارتفاع و عرض ثابت با افزایش عدد فرود نسبت $\frac{L_r}{y_1}$ افزایش می‌یابد (البته این افزایش محسوس نیست و می‌توان تقریباً ثابت در نظر گرفت).

۲- برای یک عدد فرود و یک ارتفاع ثابت با افزایش عرض زبری نسبت $\frac{L_r}{y_1}$ کاهش می‌یابد.

۳- برای یک عدد فرود و یک عرض ثابت با افزایش ارتفاع نسبت $\frac{L_r}{y_1}$ کاهش می‌یابد.

*عباسپور و همکاران (۱۳۸۸)، به بررسی تجربی پرش هیدرولیکی در محدوده وسیع‌تری نسبت به سایر محققان دیگر پرداختند. آن‌ها شش نوع بستر موجدار با شیب موج‌های مختلف را در دانشگاه تبریز مورد مطالعه قرار دادند. شیب موج‌ها در محدوده ۰/۲۸۶ تا ۰/۶۲۵ و عدد فرود در محدوده ۳/۸ تا ۸/۶ قرار داشت. تأثیر ارتفاع و طول موج بستر موجدار بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در اعداد فرود مختلف با تحلیل موقعیت سطح آب، پروفیل سرعت، تنش برشی بستر و استهلاک انرژی بررسی شد.

پرش هیدرولیکی با اعداد فرود مختلف بر روی بسترهای موجدار ایجاد و مشخصات پرش برای ۱۰۰ آزمون اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که، عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای موجدار نسبت به بستر صاف در شرایط هیدرولیکی یکسان، کوچک‌تر است. بررسی پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده در مقاطع مختلف پرش هیدرولیکی، نشان داد که این پروفیل‌ها مشابه بوده و با پروفیل جت آب بر روی بستر صاف متفاوت می‌باشند. همچنین مقدار ضخامت لایه مرزی بی‌بعد بر روی بستر موجدار برابر ۰/۵۷ بدست آمد، که با ضخامت لایه مرزی در بستر صاف برابر ۰/۱۶ مقایسه گردید. بررسی و مقایسه نیروی برشی و ضریب تنش برشی نشان داد که تنش برشی در بستر موجدار حداقل ۱۰ برابر بستر صاف است. نتایج این تحقیق با تأیید نتایج محققان قبلی نشان می‌دهد، که از بسترهای موجدار برای استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش با کارایی بهتر می‌توان استفاده نمود.

*غزالی و همکاران (۱۳۸۹)، آزمایشاتی را بر روی پرش هیدرولیکی روی شش نوع بستر موجدار مثلثی در فلومی با مقطع مستطیلی در دانشگاه شهرکرد، انجام دادند. نتایج نشان داد که عمق پایاب و طول پرش روی بسترهای موجدار مثلثی نسبت به بستر صاف، در شرایط هیدرولیکی یکسان، به ترتیب ۲۵ و ۵۴/۷ درصد کوچک‌تر است. دلیل اصلی کاهش عمق پایاب و طول پرش هیدرولیکی در پرش روی بسترهای زبر، افزایش تنش برشی بستر است که از رابطه مومنتم تعیین می‌شود. بررسی و مقایسه ضریب تنش برشی نشان داد که، تنش برشی در بستر زبر به طور متوسط ۸/۵ برابر بستر صاف است. همچنین درمقایسه با پرش هیدرولیکی کلاسیک روی بستر صاف، نتایج نشان می‌دهد که زبری‌ها می‌توانند طول غلطاب پرش را به طور میانگین در حدود ۵۷/۶۱ درصد کاهش دهند. نتایج این تحقیق انطباق با نتایج محققان قبلی داشت و نشان داد که از بسترهای با زبری‌های مثلثی برای استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش با کارایی بهتر می‌توان استفاده کرد. مقایسه نسبت اعماق مزدوج برای پرش هیدرولیکی روی بستر با زبری‌های مثلثی و سایر بسترهای زبر بیانگر تأثیر بیشتر این زبری‌ها در کاهش نسبت اعماق مزدوج در مقایسه با تحقیقات توکیای (۲۰۰۵) روی بستر

سینوسی، ایزدجو و شفاعی بجستان (۲۰۰۷) روی بستر دوزنقه‌ای و عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) روی بستر سینوسی و توافقی بالا با نتایج اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) روی زبری‌های سینوسی و شفاعی بجستان و نیسی (۲۰۰۹) روی زبری‌های لوزی شکل است.

راور و همکاران (۱۳۹۰)، بررسی تاثیر بلوک‌های دوزنقه‌ای قائم را بر مشخصات پرش هیدرولیکی مدنظر قرار دادند. آزمایشات در دانشگاه سمنان و در مجموع ۱۲۶ آزمایش با دبی‌های مختلف بر روی بستر زبر با نوارهای دوزنقه‌ای قائم، تحت تأثیر جریان با عدد فرود بین ۴ تا ۱۳/۷ با دو عمق اولیه ۱/۵۵ و ۱/۱۸ انجام شد. عمق ثانویه، طول پرش هیدرولیکی و اتلاف انرژی در پرش بر روی بستر زبر نسبت به بستر صاف به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافتند. مشاهدات بیانگر آن بود که افزایش ارتفاع و فاصله بین زبری‌ها، باعث کاهش طول پرش و منطقه غلطاب و افزایش تنش برشی بستر می‌شود. زبری‌ها به عنوان فرورفتگی‌هایی در کف بستر عمل کرده، مجموعه‌ای از جریان‌های گردابی را ایجاد می‌کنند و تنش برشی رینولدز در کف را افزایش می‌دهند. مقادیر حداکثر و میانگین پارامتر D (کاهش عمق نسبی پرش) به ترتیب ۰/۲۲ و ۰/۱۳ برآورد شد. طول بی بعد پرش آبی $\frac{L_j}{y_2^}$ مستقل از عدد فرود است و دارای مقدار ثابت تقریبی ۳/۵ بود. (y_2^* عمق ثانویه در پرش کلاسیک). در کل، طول پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر نسبت به بستر صاف، کاهشی بین ۲۲ و ۶۰ درصد داشت و با افزایش F_{r1} میزان کاهش طول پرش بیشتر می‌شد. همچنین افزایش ارتفاع و فاصله بین زبری‌ها باعث کاهش طول نسبی پرش هیدرولیکی می‌گشت. حداکثر این کاهش در حدود ۲۵ درصد بود. طول نسبی منطقه غلطاب با افزایش ارتفاع و فاصله بین زبری‌ها، حداکثر تا ۳۷ درصد کاهش یافت و افزایش عدد فرود این روند را شدت داد. مقادیر R_L (اختلاف انرژی) در بسترهای زبر بزرگتر از بسترهای صاف بود و این اختلاف با افزایش F_{r1} شدت می‌یافت. حداکثر افت انرژی در بستر زبر در حدود ۸۴ درصد بدست آمد و افزایش افت انرژی نسبت به بستر صاف حداکثر ۹ درصد بیشتر بود. مقدار E (ضریب تنش برشی بستر) در پرش هیدرولیکی بر روی بسترهایی با زبری دوزنقه‌ای قائم حداکثر ۹/۵ برابر

بیشتر از بسترساف شد. همچنین با افزایش فاصله و ارتفاع زبری‌ها میزان تنش برشی نیز افزایش یافت، که این روند با افزایش عدد فرود شدت پیدا می‌کرد.

افزایش مقادیر بی‌بعد نسبت فاصله به ارتفاع زبری‌ها ($\frac{S}{t}$) باعث کاهش ناچیز عمق ثانویه و طول جهش و منطقه غلطاب و افزایش تنش برشی کف می‌شد. بنابراین از بین مقادیر $\frac{S}{t}$ بررسی شده در این تحقیق، مقدار $\frac{S}{t} = 2$ بعنوان نسبت بهینه برای ابعاد زبری‌ها انتخاب شد که بیشترین اثر را در خصوصیات جهش آبی دارا بود.

*بذیع زادگان و همکاران (۱۳۹۰)، مشخصات پرش هیدرولیکی را در حوضچه‌های آرامش کانال‌های آبیاری با بستر موجدار را، در دانشگاه فردوسی مشهد، بررسی کردند. در این پژوهش تعداد ۴۵ آزمایش انجام گرفت، که محدوده اعداد فرود آن بین $\frac{4}{6}$ تا $\frac{12}{26}$ بوده و همچنین بازه تغییرات شیب موج بستر ($\frac{t}{S}$) در محدوده $0/167$ تا $0/75$ انتخاب گردید. متوسط کاهش عمق نسبی پرش (D') برابر $0/15$ می‌باشد، که بیانگر این است که متوسط کاهش عمق ثانویه روی بسترهای موجدار سینوسی در حدود ۱۵ درصد نسبت به بستر صاف است. کاهش طول پرش هیدرولیکی روی بسترهای موجدار نسبت به بستر صاف در حدود ۳۵ درصد بود.

به ازای عدد فرود یکسان، اتلاف انرژی در بسترهای موجدار سینوسی در عدد فرود ۱۲، حدوداً ۵ درصد بیشتر از بستر صاف برآورد شد. با افزایش عدد فرود، میزان ضریب نیروی برشی نسبت به بستر صاف افزایش یافت، که می‌توان دلیل آن را افزایش نیروی برشی بستر، به خاطر تشکیل جریان‌های گردابه‌ای در داخل موج‌های بستر دانست.

*بهمنش و همکاران (۱۳۹۱)، تأثیر زبری دایره‌ای شکل را بر روی طول غلطاب در پرش هیدرولیکی در دانشگاه تبریز، مورد بررسی قرار دادند. بررسی‌ها نشان دادند که، کاهش طول غلطاب عمدتاً به فضای ایجاد شده بین زبری‌ها که در آن جریان گردابی شکل می‌گیرد، بستگی داشته است. در آزمایشاتی که، ارتفاع زبری ثابت بوده، بررسی فاصله بین زبری‌ها نشان داد که، با افزایش فاصله بین زبری‌ها، مقادیر

$\frac{L_r}{y_1}$ حداکثر تا ۶۱ درصد کاهش یافته و همچنین در آزمایشاتی که در آن‌ها فاصله بین زبری‌ها یکسان و ارتفاع متفاوت می‌باشد، نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع زبری‌ها طول غلطاب تا ۳۲ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین تأثیر فاصله بر کاهش طول غلطاب نسبت به ارتفاع زبری بیشتر است و افزایش عدد فرود این روند را شدت می‌دهد.

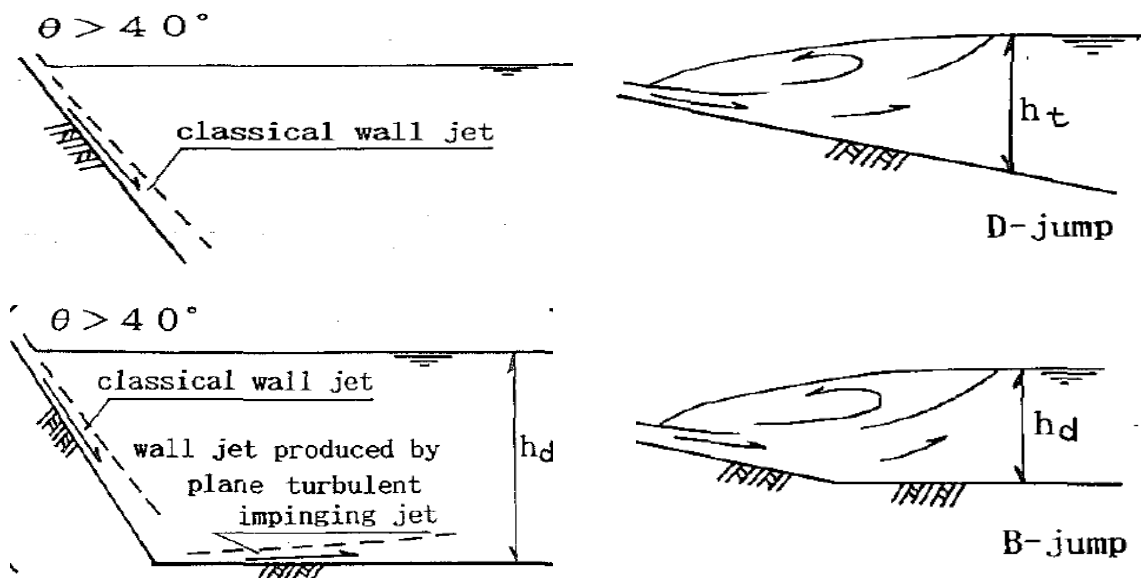
۲-۴- مطالعات انجام شده در زمینه پرش هیدرولیکی بر روی بستر شیبدار و بدون زبری

*آتسیو و یاسودا (۱۹۹۱)، خصوصیات پرش هیدرولیکی را در سطوح شیبدار مثبت^{۱۸}، مورد آزمایش و تحقیق قرار دادند. آزمایشات در شیب 0° و 60° ، با اعداد فرود اولیه ۴ تا ۱۴، انجام شد. نتایج به صورت ذیل می‌باشد:

۱- در کانال شیبدار یکنواخت، زمانی که $19^\circ < \theta < 0^\circ$ بود، پرش نوع D بوقوع پیوست و اثر سطح غلطاب بر کاهش سرعت خیلی زیاد بود. مقدار U_m در زمانی که $\theta > 40^\circ$ ، دارای کاهش یکنواختی بود.

۲- با مقایسه کانال شیبدار و قسمت افقی کانال، وقتی پرش نوع B شکل گرفت، دیده شد که اثر سطح غلطاب بر کاهش سرعت چشمگیر بوده است. در زمانی که $\theta > 40^\circ$ ، U_m کاهش یکنواخت در قسمت دیواره‌ی پرش کلاسیک داشت و $\frac{h_d}{d_2} > 3$. مقدار U_m در قسمت افقی کانال خیلی کمتر از مقدار همین پارامتر در قسمت شیبدار و متلاطم بود.

¹⁸ Positive Sloping

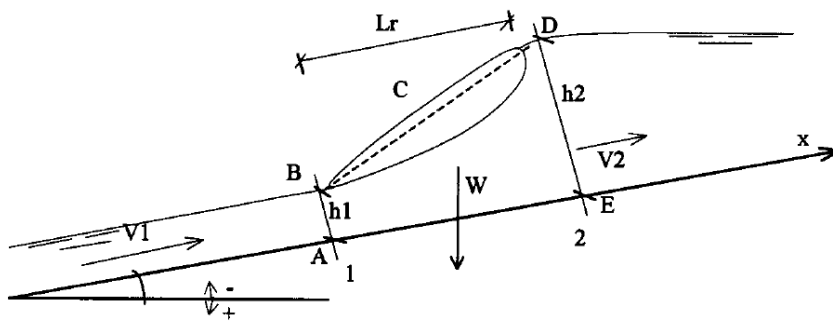


شکل ۲-۳ نمای پرش در سطح شیبدار

*مکورکدائه و موحامد (۱۹۹۴)، پرش هیدرولیکی را در شیب معکوس^{۱۹} با محدوده اعداد فرود بین ۲ تا ۹ مورد آزمایش قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که طول پرش معکوس و اعماق مزدوج در هر محدوده، خیلی کمتر از مقدار معادل آن‌ها در پرش افقی بود. عمق ثانویه در پرش معکوس به دلیل شیبدارشدن، کاهش می‌یابد. اتلاف انرژی در پرش با شیب معکوس، خیلی بیشتر از مقدار آن در پرش افقی بود.

*پراگینلی و پاگلیارا، تأثیر شیب منفی (۱۰، -۱۵، -۲۰ درصد) را بر روی نسبت کاهش عمق بررسی کردند. نتایج حاکی از این بودند که، پرش هیدرولیکی در شیب منفی یا معکوس، نسبت اعماق مزدوج کمتری نسبت به مقادیر معادل آن‌ها در پرش کلاسیک بر روی بستر افقی داشت. این نوع از پرش نسبت به پرش کلاسیک پراکندگی بیشتری را نشان می‌داد و همین پراکندگی و شیب منفی، باعث بی‌ثباتی آن می‌شد. همچنین مقدار ضریب K (زبری نسبی) به عنوان جزئی ضروری در وزن کنترل، مستقل از مقدار عدد فرود و مقدار شیب بود.

¹⁹ Negative Sloping

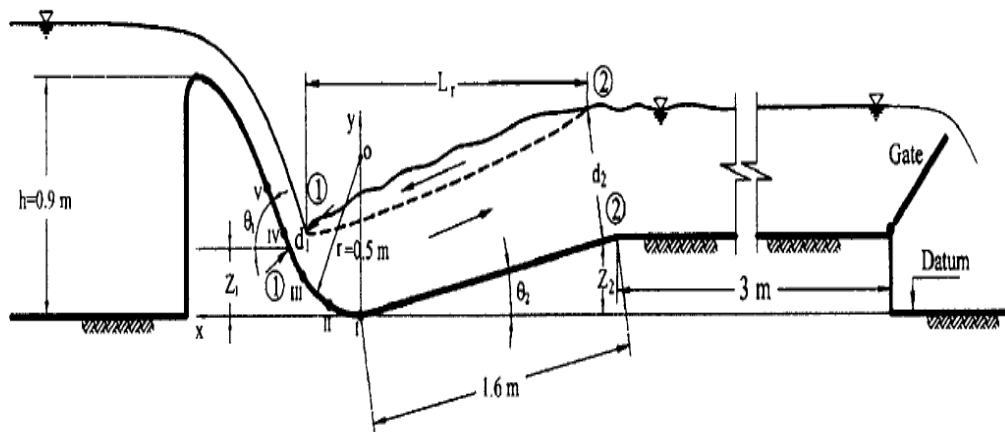


شکل ۲-۴ پرش در بستر با شیب معکوس

* گونال و نارایانان (۱۹۹۷)، خصوصیات پرش هیدرولیکی را روی سطوح شیبدار، تحقیق کردند. شیب کانال ۰/۰۵ و ۰/۱ و محدوده‌ی عدد فرود بین ۴/۵ تا ۷ بود. پروفیل سرعت در این اعداد فرود، مقادیر مشابهی داشت. نتایج نشان داد که، مقادیر بدست آمده از تخمین طول غلطاب، به روش مشاهده دیداری، ۱/۶ برابر بیشتر از مقدار آن در پروفیل سرعت میانگین بود. برای یک عدد فرود خاص، مقدار آن به عدد رینولدز، پروفیل سرعت بالادست و عمق و عرض نسبی در کانال، بستگی داشت. بیشترین مقدار تنش برشی در یک قسمت از پرش هیدرولیکی، تابعی از حداکثر نسبت میانگین سرعت به میانگین سرعت معکوس جریان بود. صرف نظر از شیب کانال، شکل منحنی آن، به صورت یک منحنی ریزشی دیده شد.

* نگام (۲۰۰۳) تجزیه و تحلیل‌های پرش هیدرولیکی را به صورت آزمایشگاهی، در خط لوله بسته مستطیلی، در دو شیب مثبت و منفی، انجام داد. نتایج حاکی از این بودند که، عدد فرود اولیه در شیب صفر، تأثیر زیادی بر نسبت عمق ثانویه بر مقدار D دارد، درحالی که در نسبت مقدار عمق اولیه بر D، تأثیر کمی را نشان می‌داد. نسبت عمق پرش، با افزایش شیب و عدد فرود، افزایش می‌یافت. مقدارهای بدست آمده از عمق ثانویه‌ی پرش در شیب کف منفی، نسبت به مقادیر آن‌ها در شیب مثبت، کمتر بود. در شیب صفر، مقدارهای آن‌ها، بین مقادیر شیب مثبت و منفی قرار گرفته بود.

* بیرامی و چمنی (۲۰۰۶)، نسبت اعماق مزدوج را در بسترهایی با شیب‌های معکوس (۰، ۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱) مورد بررسی قرار دادند. در پایین‌دست جریان یک خاکریز ساخته شده بود. پرش‌های هیدرولیکی در کمترین مقدار عدد فرود، دارای همبستگی بودند. نتایج نشان داد، از آنجایی که نیروی پرش از اهمیت زیادی برخوردار است، در جهت عکس جریان، سطح آب و سطح غلطاب به صورت موجی و ناپایدار بودند. پرش هیدرولیکی در شیب منفی تقریباً غیرقابل کنترل می‌باشد. همچنین نسبت عمق مزدوج در شیب منفی، نسبت به بستر صاف کاهش می‌یابد. حال آنکه همین نسبت در شیب مثبت، دارای افزایش است.



شکل ۲-۵ نمای ساده پرش در شیب معکوس

با در نظر نگرفتن نیروی برشی در معادله مومنتم، نسبت عمق مزدوج، برای همه نوع پرش، در همه آزمایشات بزرگ‌تر می‌شود و این نشان می‌دهد که در مقادیر بالای عدد فرود، $\frac{d_1}{b}$ ، $\frac{l_r}{d_1 \cos \theta_1}$ و زبری نسبی و اختلاف بین مقادیر تئوری و آزمایشگاهی نسبت عمق مزدوج، می‌تواند جالب توجه باشد. شیب معکوس باعث کاهش $D_t = \frac{y_2}{y_1}$ می‌شود. هرچه شیب منفی تر شود، کاهش D_t بیشتر می‌شود. در

بیشترین مقدار F_r ، مقدار D_t در تمام شیب‌های معکوس افزایش پیدا می‌کند. در شیب مثبت، مقدار D_t افزایش می‌یابد.

* بون و همکاران (۲۰۰۸)، در مطالعه از پرش هیدرولیکی تک بعدی، به صورت جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی، انجام دادند. پرش دارای سرعتی نرمال و ثابت بود. نتایج نشان می‌داد، که در کانال باریک شیب‌دار با جریان آشفته، ارتفاع پروفیل سرعت در مقایسه با جریان ورقه‌ای، در بالادست پرش، به صورت خطی افزایش می‌یابد.

* شفافی و نیسی (۲۰۰۹)، پرش هیدرولیکی را در بسترهای موج‌دار در حوضچه آرامش، مورد آزمایش قرار دادند. محدوده عدد فرود $4/5$ تا 12 بود. نتایج حاکی از آن بود که در بسترهای موج‌دار، ضریب نیروی برشی نسبت به بستر صاف، افزایش می‌یابد، که در نتیجه با کم شدن طول پرش و عمق ثانویه همراه شده بود. این امر در کاهش طول حوضچه از لحاظ اقتصادی، تا حدود 40% کمک شایانی می‌کرد. عمق ثانویه تا حدود 26% و طول پرش تا حدود 41% کاهش یافته بود.

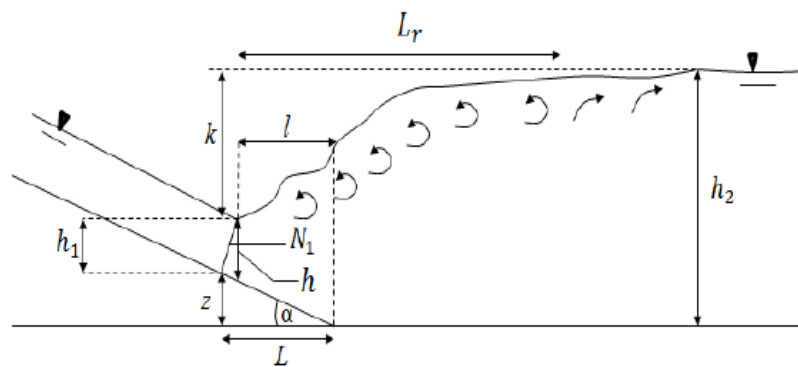
* بختی و هازب (۲۰۱۰)، پرش هیدرولیکی را در دو شیب $\pm 5\%$ مورد آزمایش قرار داده و با یکدیگر مقایسه کردند. طول پرش‌ها در شیب منفی خیلی کمتر از شیب مثبت بود. در نتیجه تأثیر شیب منفی بر کاهش طول حوضچه، خیلی بیشتر از تأثیر شیب مثبت بر آن بود.

* شکریان و بجستان (۱۳۹۲)، نسبت عمق‌های مزدوج پرش نوع B را بر روی بستر صاف، در دانشگاه چمران برآورد کردند. با استفاده از تئوری باکینگهام و نظریه خود-تشابهی ناقص و به کار بردن متغیر K اختلاف تراز سطح بالادست و پائین‌دست پرش، که برای اولین بار استفاده شده است، رابطه بدون بعدی شامل پارامترهای بدون بعد M (معرف موقعیت پرش بر روی سطح شیب‌دار) و N (بجای F_r - 1) بدست آمد. مزیت استفاده از متغیر K این است که رابطه به شیب تندآب وابسته نیست. نتایج نشان داد که این رابطه برای کلیه شیب‌های تندآب صادق بوده و عدم قطعیت آن در محدوده ± 15

درصد می‌باشد. رابطه به دست آمده بر خلاف تمامی روابط موجود، مستقل از شیب و عدد فرود و فقط وابسته به ابعاد هندسی پرش می‌باشد.

$$M = \frac{e}{h_1} = \frac{h_2 - k}{h_1} \quad (۴-۲)$$

$$N = \frac{k}{h_2} = 1 - \frac{z + h_1}{h_2} \quad (۵-۲)$$

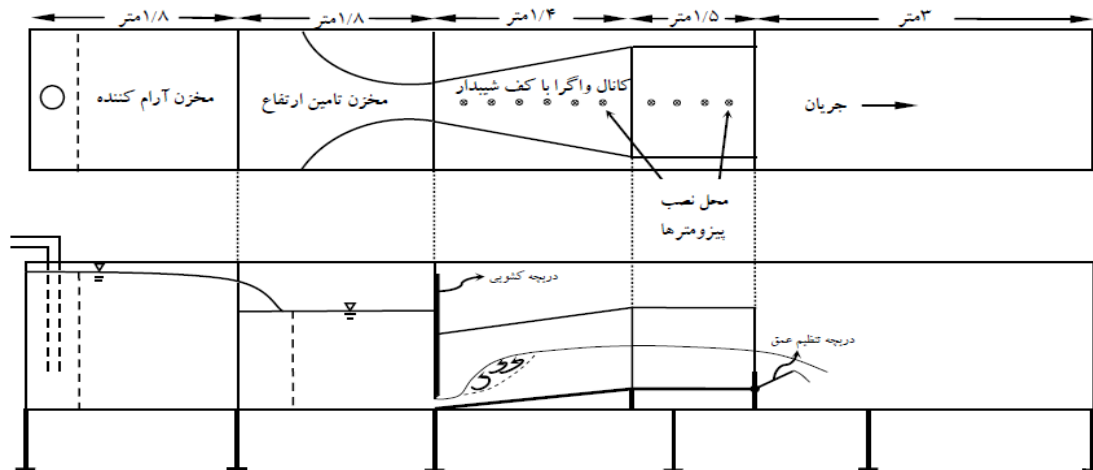


شکل ۲-۶ نمایش متغیرهای پرش نوع B

*ورکی و همکاران (۱۳۹۰)، مطالعات آزمایشگاهی بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی واگرا با شیب کف معکوس، در دانشگاه سمنان، انجام دادند. آن‌ها تأثیر تغییرات توأم شیب معکوس کف (صفر، ۲/۲۷-، ۱/۴-، ۵/۶۱- و ۸- درصد) و واگرایی دیواره‌های حوضچه آرامش (صفر، ۳، ۵، ۷ و ۱۰ درجه) را بر وضعیت و مشخصات پرش هیدرولیکی مورد مطالعه قراردادند و پارامترهای اصلی جهش شامل نسبت عمق ثانویه، طول نسبی پرش و افت نسبی را انرژی اندازه‌گیری کردند. در مجموع ۱۵۲ آزمایش با اعداد فرود اولیه ۲/۵ تا ۹ صورت گرفت. بررسی نتایج نشان داد که، حوضچه‌های آرامش واگرا با شیب کف معکوس علاوه بر مزیت عدم نیاز به سازه تبدیل در ابتدا و انتها، از نظر مشخصات و عملکرد پرش نیز به دلیل کاهش نسبت عمق ثانویه، کاهش طول نسبی پرش و افزایش افت نسبی انرژی، وضع مطلوبتری نسبت به پرش در حوضچه‌های کلاسیک داشته و می‌توانند گزینه خوبی برای جایگزینی آن‌ها باشند. علاوه بر نتیجه‌گیری کلی فوق، نتایج زیر نیز از تحقیق حاضر بدست آمده است:

الف) در هر زاویه واگرایی، با افزایش شیب کف معکوس، نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش کاهش و افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که، بطور متوسط افزایش شیب کف معکوس از صفر به ۸ درصد باعث می‌گردد که نسبت عمق ثانویه ۴۷ درصد و طول نسبی پرش ۳۵ درصد کاهش و افت نسبی انرژی ۲۰ درصد افزایش در مقایسه با پرش کلاسیک داشته باشد.

ب) در هر شیب کف معکوس، افزایش زاویه واگرایی از صفر به ۱۰ درجه منجر به کاهش ۵۱ و ۳۸ درصد به ترتیب در نسبت عمق ثانویه و طول نسبی پرش و افزایش ۲۳ درصد در افت نسبی انرژی در مقایسه با مشخصات پرش کلاسیک شده است.



شکل ۲-۷ طرح کلی کانال آزمایشگاهی

*شجاعیان و همکاران (۱۳۸۹)، در دانشگاه تبریز به بررسی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا با شیب معکوس پرداختند. نتایج بدست آمده نشان داد که واگرایی و شیب معکوس کانال، نسبت اعماق مزدوج و طول پرش را کاهش می‌دهد. همچنین واگرایی باعث افزایش افت نسبی انرژی پرش نیز می‌گردد. اما در کانال با شیب معکوس تغییر محسوسی در افت نسبی پرش، نسبت به حالت کف افقی مشاهده نشد. بنابراین نقش واگرایی در افزایش افت نسبی انرژی پرش بیشتر از شیب معکوس است. نتایج هم چنین نشان داد که کاهش ۳۷/۲۲ درصد نسبت اعماق مزدوج و ۶۱ درصد

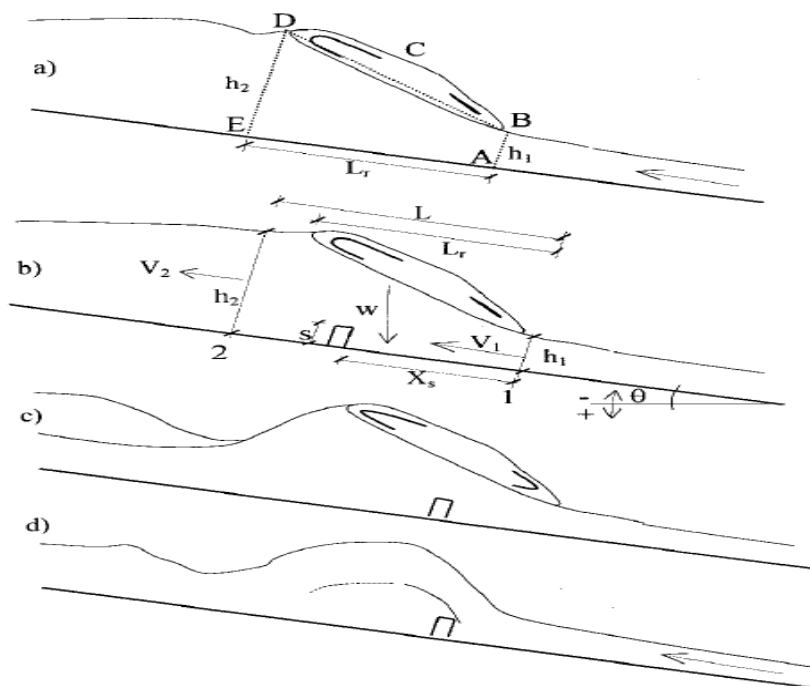
طول پرش و هم چنین افزایش ۵۴ درصد افت انرژی پرش هیدرولیکی درمقایسه با پرش کلاسیک مشهود بوده است. بنابراین از مقاطع واگرا با شیب معکوس، برای استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرام‌کننده جریان می‌توان استفاده نمود.

۲-۵- مطالعات انجام شده در زمینه پرش هیدرولیکی بر روی بستر شیبدار و زبر

*پاگلیارا و پراگینلی (۱۹۹۸)، خصوصیات پرش هیدرولیکی را بر روی شیب منفی با آبپایه، بررسی کردند. بسترها دارای شیب‌های ۵-، ۱۰-، ۱۵- و ۲۰- و آبپایه‌هایی به ارتفاع ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ متر و عرض ۰/۱ متر بودند. محدوده اعداد فرود بین ۴ تا ۱۲ لحاظ شده بود. پرش هیدرولیکی بر روی آبپایه کنترل شده، در شیب منفی، شکلی از یک جریان مختلط است. نتایج بدست آمده بدین صورت بودند که:

۱- طول پرش نسبت به حالت افقی، در شیب معکوس با آبپایه، دارای کاهش بود.

۲- نسبت $\frac{L_r}{h_1}$ با افزایش شیب، کاهش بیشتری داشت.



شکل ۲-۸ نمای پرش در شیب معکوس با آبپایه

*اسماعیلی و ابریشمی (۱۳۸۰)، تأثیر توأم پله و شیب معکوس بر روی پرش هیدرولیکی را بررسی کردند. بر اساس نتایج آزمایشگاهی که در آن پله‌ها به صورت مثبت و منفی در مسیر پرش بر روی شیب‌های ۰/۵، ۱، ۱/۳ و ۲ درصد قرار گرفته، وجود پله مثبت و منفی در شیب معکوس نقش مهمی در ایجاد پرش پایدار، که از جمله مسائل حساس و قابل تأمل در شیب‌های معکوس است، داشته و باعث کاهش بیشتر طول پرش هیدرولیکی و عمق ثانویه می‌گردد و پله منفی در جهت پایداری و ایجاد پرش تثبیت شده به طور قابل ملاحظه‌ای مؤثر می‌باشد.

*فتحی مقدم و پارس‌ی (۱۳۸۹)، اثر موقعیت پرش هیدرولیکی بر تغییرات سرعت در حوضچه‌های آرامش تیپ ۲ و میزان دبی بر نوسانات سرعت جریان را به صورت آزمایشگاهی در دانشگاه چمران اهواز، مورد بررسی قرار دادند. آزمایشات در ۴ دبی به مقدار ۲۲۱/۷، ۳۵۵/۸، ۴۵۰ و ۵۹۲/۹ لیتر بر ثانیه بر متر انجام شد. نتایج بدین شرح بود که، با افزایش دبی مقادیر سرعت در ابتدای حوضچه، به علت برخورد آب با نقاط ابتدایی حوضچه، افزایش چشمگیری داشت. نوسانات سرعت جریان در مقاطع متناظر با پیژومترهای ۴۰ تا ۴۴ یعنی در ابتدای حوضچه در کلیه دبی‌ها به دلیل تشکیل پرش

هیدرولیکی و برخورد متناوب جریان در این ناحیه دارای مقادیر بالایی بود. به طوری که با افزایش جریان بر شدت نوسانات در این ناحیه افزوده می‌گردید. سرعت جریان با حرکت پرش از حالت اول تشکیل پرش هیدرولیکی تا حالت دوم تشکیل پرش هیدرولیکی، افزایش داشت ولی بعد از این حالت تا حالت سوم تشکیل پرش هیدرولیکی کاهش می‌یافت. بیشترین مقدار سرعت جریان در ابتدای حوضچه و در حالت دوم تشکیل پرش هیدرولیکی و کمترین مقدار آن در مقاطع انتهایی حوضچه و قبل از خروج آب از حوضچه بود. در حالت دوم تشکیل پرش هیدرولیکی یعنی تشکیل پرش روی بلوک‌های پای تندآب، تلاطم جریان، کمترین میزان خود را داشت. میزان استهلاک انرژی در حالت دوم تشکیل پرش بیشترین مقدار خود را داشت، که این موضوع در هر چهار دبی مورد آزمایش، مشاهده شد و میتوان نتیجه گرفت که بهترین پرش هیدرولیکی در حالت دوم، یعنی تشکیل پرش روی شوت بلوک‌ها می‌باشد.

همچنین با اندازه‌گیری مقادیر سرعت جریان در مقاطع مختلف کف حوضچه و مقایسه آن‌ها مشاهده شد که بیشترین مقدار سرعت و استهلاک انرژی در دبی $355/8$ لیتر بر ثانیه بر متر و موقعیت پرش هیدرولیکی روی شوت بلوک‌ها می‌باشد که سرعت جریان بعد از پرش تقریباً با کاهش ۹۳ درصدی نسبت به سرعت اولیه پرش مواجه می‌شود.

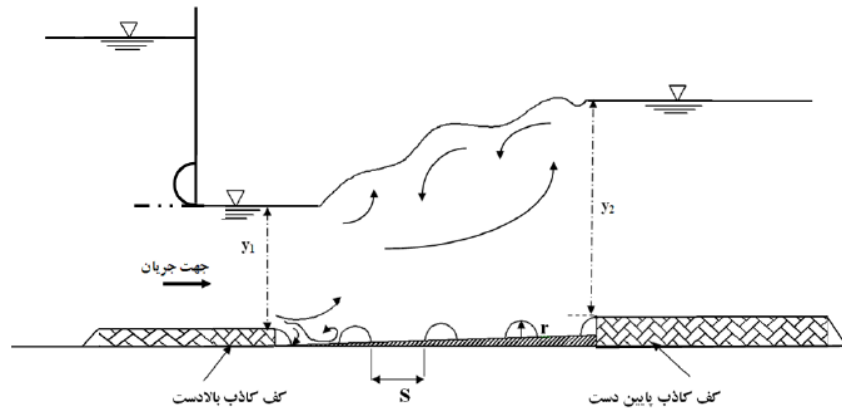
*نیک‌مهر و تاب بردبار (۱۳۹۰)، پرش هیدرولیکی را در دو حالت بستر صاف و زبر روی چهار شیب معکوس بررسی کردند. نتایج نشان دادند که عمق ثانویه و طول پرش بر روی بستر صاف بیشتر از بستر زبر، با شیب و عدد فرود یکسان بوده و اتلاف انرژی بیشتری در بستر زبر نسبت به بستر صاف ایجاد می‌شود.

*علیخانی و همکاران (۲۰۱۰)، آزمایشات مربوط به پرش هیدرولیکی را در حوضچه آرامش با آستانه انتهایی انجام دادند. آزمایش‌ها در مدلی به مقیاس $\frac{1}{30}$ و دارای یک سرریز، حوضچه آرامش و یک آستانه انتهایی بود. هدف از انجام آزمایشات، تأثیر ارتفاع و فاصله آبپایه‌ها از هم، در کم شدن طول پرش و طول حوضچه و کاهش هزینه ساخت حوضچه بود. آزمایشات در محدوده اعداد فرود ۴ تا ۱۲ انجام شده

بودند. نسبت پرش تشکیل شده در حوضچه دارای آبپایه، به پرش آزاد، کاهش بالایی ۳۰٪ در طول حوضچه آرامش داشته است.

*دستورانی و نصرآبادی(۱۳۹۰)، اثر چهار ضریب زبری بستر را بر مشخصات پرش هیدرولیکی روی سه شیب معکوس در محدوده اعداد فرود ۳ تا ۶ بررسی نمودند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد، که با افزایش شیب معکوس نسبت عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد و افزایش زبری کف کانال به دلیل افزایش تنش برشی، باعث تشدید تأثیر شیب معکوس روی طول پرش می‌شود.

*پارسامهر و همکاران(۱۳۹۲)، تأثیر آبپایه و زبری‌های مصنوعی روی شیب معکوس بر خصوصیات پرش هیدرولیکی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بستر زبر با زبری‌های نیمه استوانه‌ای شکل و آبپایه مستطیلی بر روی دو بستر با شیب معکوس ۱ و ۱/۵ درصد و بستر افقی مورد بررسی قرار گرفت. در مجموع ۳۳۸ آزمایش در محدوده اعداد فرود اولیه ۴/۶ تا ۷/۴ انجام گرفت. نتایج نشان داد طول پرش هیدرولیکی در شیب معکوس ۱/۵ درصد بر روی آبپایه بطور متوسط ۴۶ درصد و در حالت پرش بر روی بستر زبر بطور متوسط ۴۹ درصد کاهش می‌یابد. همچنین عمق ثانویه پرش هیدرولیکی در شیب معکوس ۱/۵٪، بر روی آبپایه، حداکثر ۲۴/۴ درصد و بر روی بستر زبر، حداکثر ۴۴ درصد نسبت به پرش کلاسیک کاهش یافت. بنابراین در مواقعی که تثبیت پرش با کاهش طول آن مدنظر باشد، بکارگیری یک آبپایه پیوسته روی شیب معکوس دارای نتیجه مطلوب و مقرون به صرفه خواهد بود.



شکل ۲-۹ طرح شماتیک مقطع عرضی مدل بستر زبر



شکل ۲-۱۰ آبپایه و زبری‌های نیم استوانه‌ای شکل با ارتفاع ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ سانتیمتر و نمونه‌ای از تشکیل پرش هیدرولیکی

*پورعبدالله و همکاران (۱۳۹۳)، تأثیر زبری در شیب‌های معکوس بر عمق ثانویه و نرخ استهلاک انرژی پرش هیدرولیکی را آزمایش کردند. برای انجام این مطالعه ۱۴۴ آزمایش در محدوده اعداد فرود ۴/۹ تا ۷/۸ انجام شد. نتایج نشان داد که مقادیر عمق نسبی پرش در یک حوضچه آرامش با شیب کف منفی و زبر، نسبت به حالت افقی کاهش پیدا می‌کند. با افزایش شیب معکوس و اندازه زبری‌ها، این کاهش بیشتر شده است. به طوری که بیشترین کاهش مربوط به زبری ۱۰ میلی متر و شیب منفی ۲٪ می‌باشد. متوسط کاهش نسبت اعماق نسبی در محدوده آزمایشات انجام شده در این تحقیق ۳۱/۱۵٪ می‌باشد. هرچه درصد شیب و میزان زبری افزایش یابد، درصد کاهش D_2 (عمق ثانویه پرش)

افزایش می‌یابد. هم‌چنین مقدار افت انرژی نسبی در حالت‌های مختلف شیب و زبری، بیشتر از حالت کلاسیک بود. با افزایش شیب و اندازه زبری، مقدار افت انرژی نسبی نیز افزایش یافت. که به طور متوسط ۲۱٪ بیشتر از حالت کلاسیک بود.

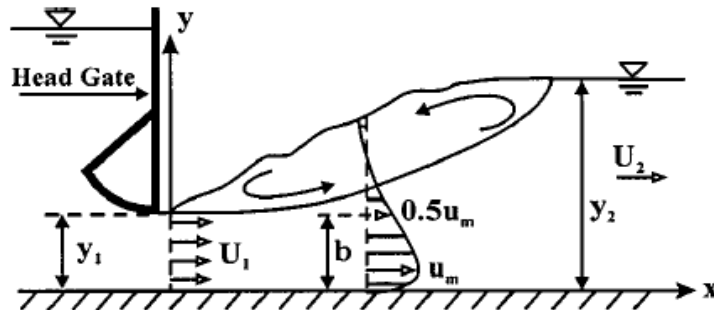
۲-۶- مطالعات انجام شده مختلف در زمینه پرش هیدرولیکی

* راجاراتنام و همکاران (۱۹۹۹)، آزمایشات مربوط به سرعت و آشفتگی پرش هیدرولیکی را در سه شیب ۰/۵۵٪، ۱/۱۴٪ و ۲/۵۵٪، با دبی‌های ۳۰ تا ۲۰۰ لیتر بر ثانیه، بر روی کالورت‌های زبرشده با دانه‌های شنی، انجام دادند. لوله‌ها دارای قطری برابر با ۰/۶۲۲ متر بودند. ضریب زبری مانینگ به دست آمده از آزمایشات برابر با ۰/۰۲۳ و سرعت در قسمت‌های مرزی لوله‌ها نسبتاً کوچک بود. نتیجه به دست آمده بدین شرح بود که، برای دو شیب ۰/۱۴٪ و ۱/۴۲٪، مناسبترین سایز لوله، قطری برابر با ۴/۲۷ متر باید داشته باشد.

* چانسون و براتبرگ (۲۰۰۰)، تحقیقات آزمایشگاهی خود را در رابطه با جریان برشی هوا-آب در پرش هیدرولیکی انجام دادند. آزمایشات در یک کانال افقی با شرایط یکنواخت صورت گرفت. توزیع جمع-شدگی هوا، سرعت میانگین آب-هوا و فرکانس حباب‌ها در آزمایشات ثبت شد و نتایج نشان دادند که حرکت هوا در لایه برشی وجود دارد. از تلاطم آب-هوا در ناحیه برشی، یک شکل مثلثی با حداکثر مقدار، برداشته شد، که در آن پروفیل فرکانس حباب‌ها نشان داده شده بود. در این بخش، حجم هوا به ۱۰۰٪ افزایش پیدا کرد (در سطح آزاد) و پروفیل فرکانس حباب‌ها، تابع یک گرایش متفاوت بود که به ساختار جریان آب-هوای مختلف و ترکیب اندازه حباب‌ها مربوط می‌شد. هم‌چنین در ناحیه برشی، بین هوادهی جریان و دبی پرش‌های پرسرعت، یک رابطه سهمی‌وار دیده می‌شد.

* راجاراتنام و همکاران (۲۰۰۳)، ساختار پرش‌های متلاطم را در اعداد فرود کم، بین ۲ تا ۲/۵ و ۳/۳۲، بررسی کردند. برای بدست آوردن سرعت آنی، از یک کاوشگر کوچک ADV استفاده شده بود. نتایج تحقیقات آن‌ها بیانگر این بود که، حداکثر انرژی جنبشی متلاطم در هر قسمت از پرش، کاهش خطی

دارد و به تدریج در خارج از ناحیه انتقالی به یک مقدار ثابت که در حدود ۳٪ از انرژی جنبشی جریان فوق بحرانی و یکنواخت در جلوی پرش می‌باشد، می‌رسید. اندازه گرداب‌های کوچک از ۰/۰۴ میلیمتر در پرش، تا ۰/۱۵ میلیمتر در انتهای ناحیه انتقالی می‌رسید. شدت طیف افقی و عمودی سرعت‌ها نشان داد که، فرکانس غالب در محدوده ۰ تا ۴ هرتز در پرش برای هر جزء از سرعت قرار داشت. همچنین در پایین‌دست پرش، فرکانس غالب بین ۰ تا ۱ هرتز برای سرعت افقی و ۰ تا ۲ هرتز برای سرعت عمودی برآورد شده بود.



شکل ۲-۱۱ شمای ساده از پرش هیدرولیکی در سطح صاف

*چانسون و مورزن (۲۰۰۹)، نوسان سطح آزاد در پرش هیدرولیکی را در محدوده‌ی اعداد فرود ۳/۱ تا ۸/۵ با فرکانس ۱ تا ۴ هرتز، بررسی کردند. در یک پرش هیدرولیکی گردابه‌های بزرگی در زیر سطح آزاد تشکیل می‌شدند که این گردابه‌ها در لایه برشی، گسترش بیشتری داشتند. اثر متقابل بزرگ مقیاسی با سطح آزاد آب، یک مجموعه دو فازی از جریان را می‌ساخت، که شامل محدوده وسیعی از آب-هوا می‌شد. در تصویری از نیمرخ آب مشاهده شد که کمترین نقطه اوج نوسان سطح آزاد آب، مربوط به کمترین مقدار عدد فرود، و عمده فرکانس‌ها در پایین‌دست جریان بود. بیشترین فرکانس نوسان در پنجه پرش برای فرود کمتر از ۵/۳ و برای اعداد فرود بیشتر از ۵/۳، مقدارها برابر بودند. آنالیزهای طیفی

نشان داده شده از محدوده فرکانس‌های کمتر از ۵ هرتز در هر موقعیت از پایین دست پنجه، با هم برابر بودند.

*کاشفی‌پور و توزنده‌جانی(۱۳۹۰)، بررسی تغییرات افت انرژی سرریز و طول پرش هیدرولیکی در اثر تلاقی خطوط جریان بر روی بدنه‌ی سرریز اوجی در دانشگاه چمران اهواز انجام دادند. نتایج نشان داد جریان ترکیبی با جت ۴۵ درجه بیشترین تأثیر را بر کاهش طول پرش و کاهش عدد فرود دارد و جریان ترکیبی با جت ۹۰ و ۴۵ درجه بیشترین تأثیر را بر کاهش عمق ثانویه پرش دارد. با افزایش مقدار دبی کل، میزان کاهش طول پرش، بیشتر کاهش می‌یابد، همچنین با افزایش عدد فرود نیز میزان کاهش طول پرش کمتر می‌شود. هر چه نسبت دبی عبوری از مجرای تحتانی بیشتر باشد، میزان کاهش طول پرش افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش میزان دبی کل درصد دبی عبوری از شکاف دچار کاهش می‌شود.

فصل سوم

مواد و روش‌ها

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- معرفی و تشریح جزئیات فلوم

آزمایشات مربوط به پرش هیدرولیکی در یک فلوم آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه شاهرود، انجام گرفت.

فلوم آزمایشگاهی دارای طول، عرض و ارتفاع به ترتیب $۰/۳۴ * ۰/۰۹ * ۵$ متر می‌باشد. این فلوم دارای پایه‌های فلزی و دیواره‌هایی از جنس پلاکسی گلاس بود و در ابتدای آن، مخزنی وجود داشت که آب را توسط پمپ و لوله‌های تعبیه شده در آن، به داخل فلوم منتقل می‌کرد. شکل ۳-۱، پمپ انتقال آب فلوم را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱ پمپ



شکل ۲-۳ منبع تغذیه یا مخزن ابتدایی فلوم

لوله انتقال آب از یک سر به مخزن بزرگ ابتدایی و از یک سر به مخزن کوچک و ورودی فلوم متصل می‌باشد، که آب را از مخزن بزرگ به مخزن ورودی هدایت می‌کند. آب پس از گذر از مخزن ورودی، وارد فلوم می‌شود.



شکل ۳-۳ لوله انتقال آب

یک دریچه کشویی با بازشدگی ثابت و برابر $2/5$ سانتیمتر در ابتدای فلوم قرار داده شد. دلیل انتخاب این اندازه از بازشدگی این است که اگر مقدار بازشدگی کمتر از $2/5$ سانتیمتر باشد، در دبی‌های زیاد، فشار آب و تجمع آب پشت دریچه کشویی باعث بالا آمدن سطح آب و سرریز شدن آن از مخزن ورودی فلوم می‌شود. در لبه بالایی مخزن ورودی سنسوری قرار داشت که به محض تماس با آب، سریعاً به دستگاه، فرمان خاموش شدن را می‌داد. لذا در دبی‌های زیاد، اگر بازشدگی دریچه ابتدایی کمتر از $2/5$ سانتیمتر باشد، باعث خاموش شدن دستگاه می‌شود و اگر اندازه بازشدگی دریچه ابتدایی بیشتر از این مقدار باشد، در دبی‌های کم‌تر، پرشی تشکیل نمی‌شود.



شکل ۳-۴ نمای ورود لوله انتقال آب به مخزن ابتدایی فلوم و دریچه کشویی

در انتهای فلوم نیز دریچه‌ای قطاعی به منظور کنترل و تثبیت محل دقیق پرش و تعیین عمق ثانویه قرار داده شد.



شکل ۳-۵ دریچه قطاعی در انتهای فلوم

در انتهای فلوم یک مخزن کوچک و خروجی قرار دارد که آب را توسط لوله خروجی به داخل مخزن بزرگ و اصلی وارد می‌کند.



شکل ۳-۶ مخزن انتهایی و خروجی

به منظور تعیین و تنظیم دبی عبوری از فلوم آزمایشگاهی، از دبی‌سنج نصب شده بر روی فلوم استفاده گردید.

فلوم مذکور شیب‌پذیر بوده، لذا پس از کالیبره کردن شیب‌های موردنظر، مقادیر آنها بر روی اشل تنظیم شیب علامت‌گذاری گردید.



شکل ۳-۷ سیستم تنظیم شیب فلوم



(ب)

(الف)

شکل ۳-۸ نمایی از دبی سنج

روش انجام آزمایش به این شرح است که در ابتدا دستگاه را روی شیب‌های مختلف ثابت کرده، سپس با روشن شدن دستگاه فلوم، پمپ آب شروع به مکش آب از مخزن اصلی به داخل فلوم می‌کند. با استفاده از دبی‌سنج، دبی مورد نظر را تنظیم کرده و مطابق با دبی و فشار موجود، آب وارد فلوم می‌شود،

که پس از گذر از دریچه کشویی، به دلیل فوق‌بحرانی بودن جریان، پرش هیدرولیکی ایجاد می‌شود. به کمک دریچه قطاعی محل پرش هیدرولیکی در داخل فلوم تنظیم می‌شود.



شکل ۳-۹ نمای کلی از فلوم آزمایشگاهی

۳-۲- شرح آزمایش

آزمایشات تحقیق حاضر، در سه شیب کف فلوم (صفر، ۰/۰۱ و ۰/۰۲)، ۶ دبی (۴/۶، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹/۲ مترمکعب بر ساعت) و در محدوده اعداد فرود ۲/۶۶ تا ۵/۲۶ انجام شد. پرش‌های ایجاد شده از نوع ضعیف و نوسانی بودند. همچنین از ۳ ارتفاع مختلف زبری (t) (زبری اول = لوله به قطر ۱/۷ سانتیمتر، زبری دوم = لوله به قطر ۲ سانتیمتر و زبری سوم = لوله به قطر ۳ سانتیمتر) استفاده و برای هر کدام از زبری‌ها، ۵ بستر ساخته شد، که در آن‌ها فاصله بین زبری‌ها (s) متفاوت بود.

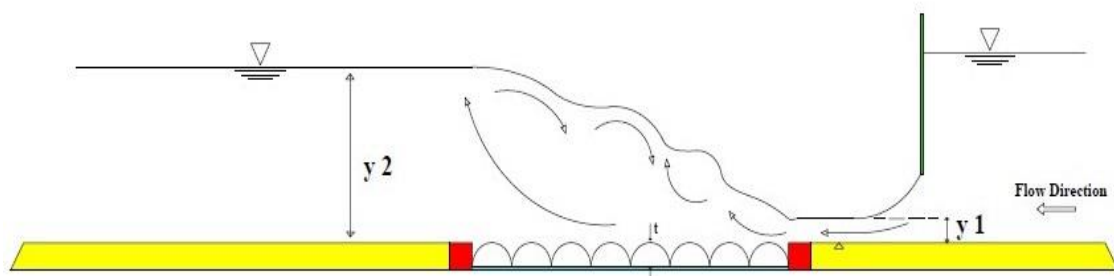
جدول ۳-۱ فاصله بین زبری‌ها

شماره بسترها	S(cm)
۱	۰
۲	۰/۵
۳	۱
۴	۱/۵
۵	۲

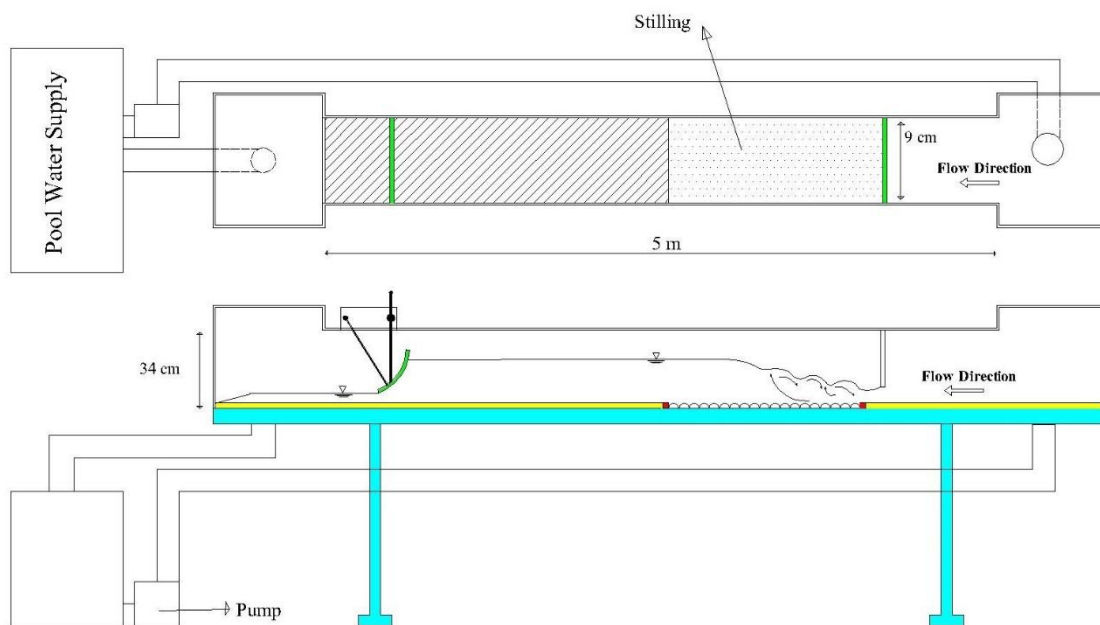
جدول ۳-۲ برنامه کلی آزمایش‌ها و محدوده متغیرهای وابسته

تعداد آزمایش	مشخصات بستر			محدوده متغیرهای پرش		مشخصات کلی فلوم			
	t (cm)	S (cm)	شیب کف Θ	جنس بستر	عدد فرود	دبی (m ³ /h)	طول عرض ارتفاع (cm)	طول ارتفاع (cm)	طول (m)
۲۷۰	۰/۸۵-۱/۵	۰-۲	۰-۰/۰۲	شیشه	۲/۲۶-۵/۶۶	۴/۶-۹/۲	۳۴	۹	۵

در کل ۱۸ آزمایش بر روی بسترهای صاف، و ۲۷۰ آزمایش بر روی بسترهای زبر انجام گرفت. در تمامی آزمایشات، طول پرش، طول غلطاب و عمق ثانویه اندازه‌گیری شد، همچنین در تمامی مراحل، تصویربرداری با دوربین صورت پذیرفت.



شکل ۳-۱۰ طرح شماتیک پرش هیدرولیکی در بستر زبر



شکل ۳-۱۱ نمای شماتیک فلوم

۳-۲-۱- روش انجام کار

قبل از انجام آزمایشات، باید از صحت و کارکرد درست سیستم فلوم اطمینان حاصل می‌شود. در ابتدا، شیب دستگاه با کمک شیرفلکه مربوط به تنظیم شیب، روی شیب صفر یا افقی قرار گرفت. دریچه ابتدایی با کمی فاصله از مخزن ورودی فلوم، نصب و مقدار بازشدگی آن روی $2/5$ سانتیمتر تنظیم شد. سپس دستگاه روشن گردید و آب وارد فلوم شد. با ورود آب، دریچه قطاعی در حالت بسته قرار گرفت و زمانی که آب تا یک مقدار دلخواه بالا آمد، دریچه کشویی بسته و دستگاه خاموش شد. با اندازه‌گیری عمق آب در قسمت‌های مختلف و برابری مقادارها با هم، از تنظیم بودن شیب دستگاه اطمینان حاصل شد. سپس فلوم روی تنظیمات اولیه قرار داده شد. آب پس از گذر از دریچه کشویی، دچار پرش می‌شود، که این پرش در دبی‌های مختلف دارای طول متفاوتی می‌باشد. با استفاده از دریچه قطاعی که در انتهای فلوم در نزدیکی مخزن خروجی قرار داشت، به منظور جلوگیری از تأثیر اثر انقباض ناشی از دریچه بر

جریان خروجی اندازه گیری عمق اولیه به فاصله تقریبی ۱۰ سانتیمتر بعد از دریچه صورت گرفت. در دبی‌های دیگر هم آزمایشات انجام شدند. بعد از آن فلوم روی شیب ۰/۰۱ و ۰/۰۲ تنظیم و آزمایشات تکرار شد. پس از اطمینان از صحت دستگاه و کارکرد آن، انجام آزمایشات به صورت دقیق و اصولی انجام گرفت.

۳-۲-۲- شرح آزمایشات در بسترهای صاف با سه شیب صفر، ۰/۰۱ و ۰/۰۲

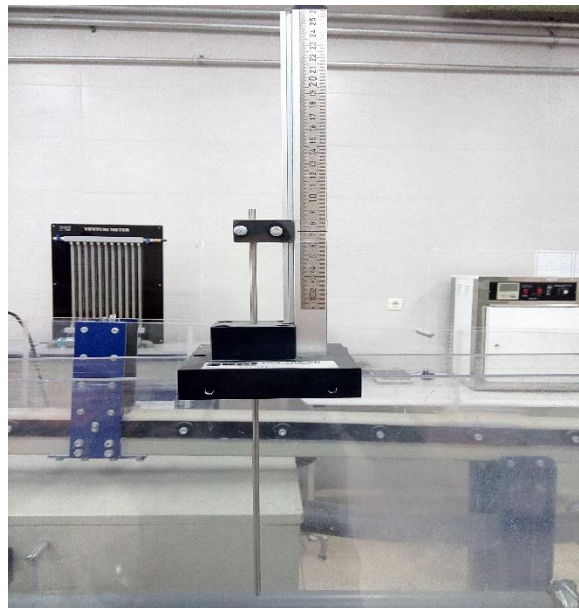
ابتدا تمامی آزمایشات برای ۶ دبی، بر روی ۳ شیب صفر، ۰/۰۱ و ۰/۰۲، بر روی بستر صاف و بدون زبری به عنوان آزمایشات شاهد انجام داده شد. در کل ۱۸ آزمایش بر روی بسترهای صاف انجام گرفت. انجام آزمایشات بدین شرح بود:

با کمک اهرم مربوط به تنظیم شیب فلوم، شیب دستگاه روی صفر قرار گرفت. پس از روشن کردن دستگاه، پیچ گردان دبی‌سنج چرخانده و نشانگر دبی‌سنج روی دبی حداقل (۴/۶ مترمکعب بر ساعت) تنظیم شد. این مقدار دبی فرودی برابر با ۲/۶۶ دارد که مقدار آن با استفاده از رابطه عدد فرود، $F_r = \frac{v}{\sqrt{gy}}$ محاسبه گردید. مقدار سرعت اولیه v_1 و سرعت ثانویه v_2 هم با استفاده از فرمول $v = \gamma * b$ (عمق جریان در مقطع مورد نظر و b عرض فلوم) به دست آمد. با روشن شدن فلوم پمپ شروع به کار کرد و آب از مخزن بزرگ ابتدایی، وارد لوله هدایت کننده به سمت ورودی فلوم شد. با ورود آب به داخل فلوم و گذر از زیر دریچه کشویی، پدیده پرش هیدرولیکی به وقوع پیوست. به دلیل سرعت کم جریان آب (دبی کم)، پرش دارای طول کمی بود. بازشدگی دریچه روی ۲/۵ سانتیمتر ثابت شده و آب با گذر از زیر آن، با کمی فرورفتگی وارد فلوم می‌شد. این فرورفتگی ۱ سانتیمتر از عمق آب ورودی از زیر دریچه را کم می‌کرد. یعنی مقدار عمق اولیه γ_1 (فاصله‌ی سطح آب تا کف فلوم) به دلیل ثابت بودن بازشدگی در تمامی آزمایشات، برابر با ۱/۵ سانتیمتر برآورد شد.



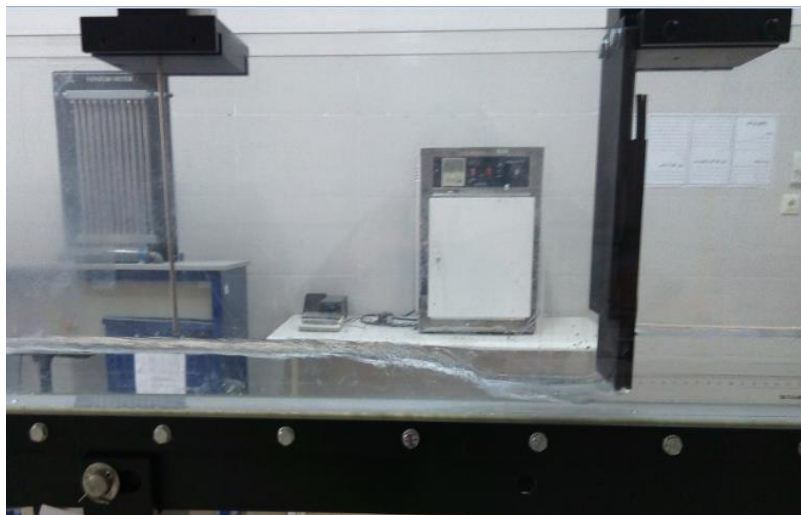
شکل ۳-۱۲ نمای فرورفتگی آب هنگام عبور از زیر دریچه کشویی

مقادیر عمق اولیه و ثانویه با استفاده از Pointcage یا عمق سنج فلوم و مقدار طول پرش با استفاده از خط کش طلقی بدست آمد. به طوری که طول پرش از ابتدای شروع پرش یعنی از پنجه پرش تا جایی که حباب‌های هوا به حداقل مقدار خود برسند و آب از تلاطم بیفتد و تقریباً ساکن و آرام شود، در نظر گرفته شد. این قسمت جایی است که عمق آن برابر با عمق ثانویه Y_2 (فاصله‌ی سطح آب تا کف فلوم) می‌باشد.



شکل ۳-۱۳ Pointcage یا عمق سنج فلوم

برای اندازه‌گیری طول غلطاب، در محدوده بعد از پرش، بر روی سطح آب و در جهت حرکت آب، روبانی قرار داده شد. در قسمتی از انتهای پرش، حرکت توده‌های هوا که به صورت ساعتگرد در حال چرخش بودند، باعث می‌شد که قسمتی از روبان به سمت عقب یعنی خلاف جهت آب برگردد. از نقطه شروع پرش تا این قسمت از پرش، به عنوان طول غلطاب در نظر گرفته شد. با کمک دریچه قطاعی انتهایی، محل شروع پرش در فاصله ۱۰ سانتیمتری دریچه کشویی تثبیت شد. در مرحله بعد، دبی سنج روی عدد ۵ که نشان‌دهنده دبی ۵ مترمکعب بر ساعت می‌باشد، قرار گرفت و طول پرش، عمق ثانویه و طول غلطاب، به همان صورت قبل اندازه‌گیری شد.

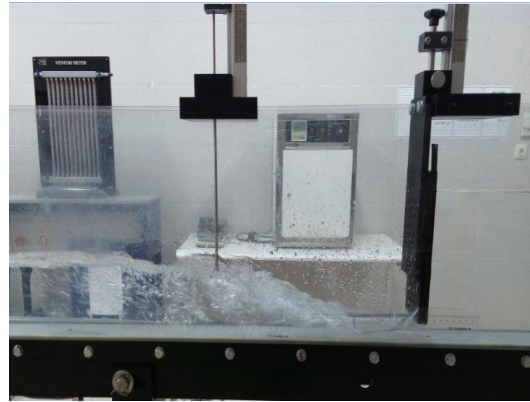


شکل ۳-۱۴ پرش هیدرولیکی در دبی $5 \text{ m}^3/\text{h}$ در شیب صفر بر روی بسترساف

مراحل آزمایش در دبی ۶، ۷، ۸ و $9/2$ مترمکعب بر ساعت انجام داده شد. در دبی‌های بیشتر مقدار حباب‌های هوای داخل غلطاب خیلی بیشتر از دبی‌های کم و حالت چرخشی آن به صورت ساعتگرد بود.



(ب)



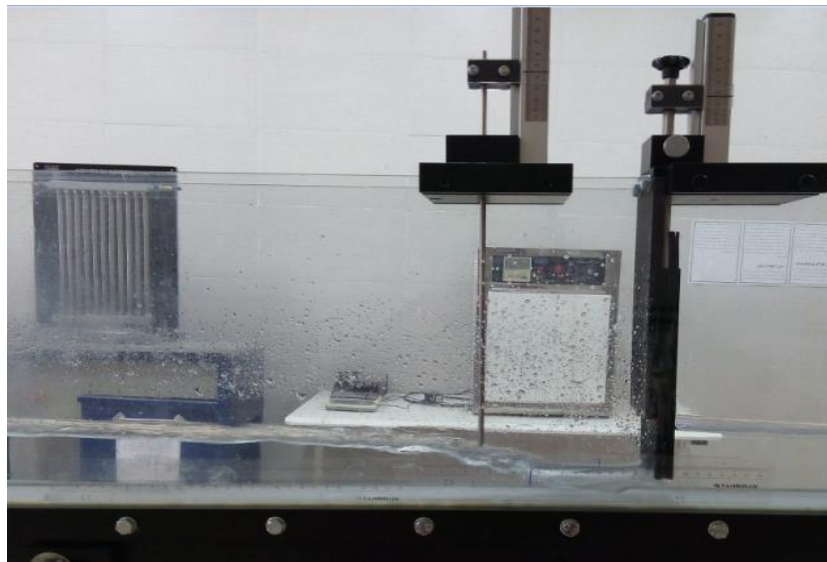
(الف)

شکل ۳-۱۵ پرش هیدرولیکی با دبی $9/2 \text{ m}^3/\text{h}$ در بستر صاف و افقی

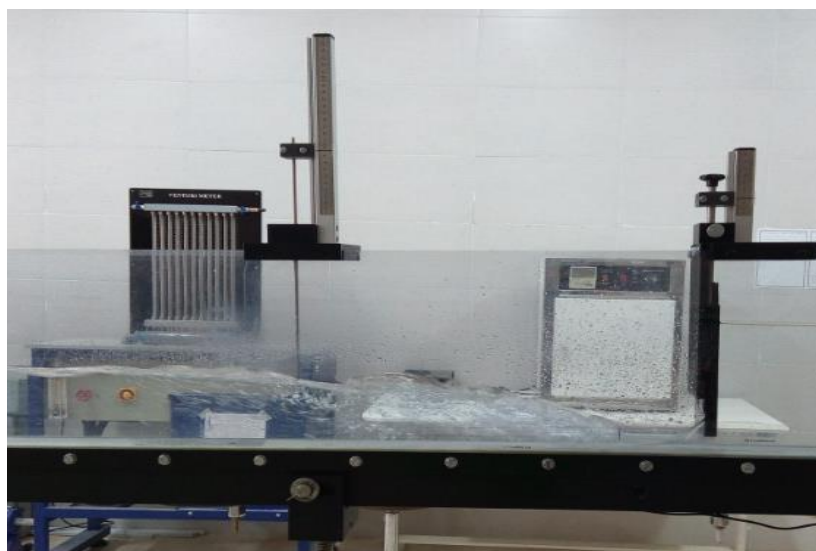
زمانی که آزمایشات مربوط به ۶ دبی در بستر صاف با شیب افقی به پایان رسید، فلوم را روی شیب ۰/۰۱ گذاشته و آزمایشات بر روی این شیب تکرار گردید. در شیب مثبت مقدار طول پرش، طول غلطاب و عمق ثانویه به مراتب بیشتر از مقدارشان در شیب افقی بود. زیرا در شیب مثبت به دلیل حرکت رو به جلوی آب در جهت شیب، نیروی وزن آب $w \sin \theta$ نیز دخیل می‌باشد و آب را به سمت جلو هل می‌دهد. در شیب مثبت پرش‌های با دبی کم به سختی ایجاد می‌شد. در این مقدار شیب هم، مقادیر پارامترهای موردنظر در ۶ دبی اندازه‌گیری شدند. با تمام شدن آزمایشات روی شیب ۰/۰۱، شیب فلوم روی ۰/۰۲ تنظیم شد و کلیه مراحل آزمایشی در ۶ دبی بر روی این شیب هم صورت گرفت و تمامی پارامترهای مورد بررسی، برآورد شدند. این آزمایشات به عنوان شاهد، برای آزمایشات بسترهای زبر مورد توجه قرار گرفت.

علاوه بر آزمایشات انجام شده، آزمایشات و اندازه‌گیری‌های مربوط به ترسیم پروفیل سطح آب نیز انجام شد. برای ترسیم پروفیل سطح آب به دو مقدار X و Y نیاز می‌باشد. مقدار X از فاصله ۵ سانتیمتری قبل از پرش تا ۵ سانتیمتری بعد از آن در نظر گرفته شد. مقدار ΔX ، ۲ سانتیمتر در نظر گرفته شد. مقدار Y هم، ارتفاع سطح آب تا کف فلوم در X موردنظر بود. با قراردادن مقادیر X در محور X ها و قرار

دادن y در محور y ها، پروفیل سطح آب ترسیم شد، که منحنی‌ها حالت صعودی داشتند تا اینکه در نقطه‌ای به یک مقدار ثابت می‌رسیدند و روند ثابتی را درپیش می‌گرفتند.



شکل ۳-۱۶ پرش هیدرولیکی در دبی $5 \text{ m}^3/\text{h}$ در شیب 0.2% بر روی بسترت صاف



شکل ۳-۱۷ پرش هیدرولیکی در دبی $9/2 \text{ m}^3/\text{h}$ در شیب 0.2% بر روی بسترت صاف

۳-۲-۳- شرح آزمایشات در بسترهای زبر با سه شیب صفر، ۰/۰۱ و ۰/۰۲

برای کاهش طول پرش و عمق ثانویه، تدابیری اندیشیده شد، که از جمله تعبیه زبری‌های نیم‌دایره در ابعاد و فاصله‌های مختلف در کف فلوم بود. جنس این زبری‌ها پلاستیکی و معروف به لوله‌های برقی و در اندازه‌ی قطرهای ۱/۷، ۲ و ۳ سانتیمتر می‌باشند. برای ایجاد بسترهای زبر کف فلوم به اندازه ابعاد طولی و عرضی فلوم، شیشه تهیه و زبری‌ها به وسیله چسب آکواریوم به کف فلوم چسبانده شدند. شیشه‌ها تا اندازه‌ای بالا آورده شد که سطح آن‌ها، هم سطح با قله زبری‌ها باشد. در فاصله‌های نیم متری در کف فلوم از قطعات ضدآب مکعبی از جنس فومیزه، به ارتفاع و طول ۲ سانتیمتر در کف عرضی فلوم، عمود بر جهت آب چسبانده شد. سپس شیشه‌ها روی این قطعات قرار گرفت و برای استحکام بیشتر و ثابت ماندن در کف فلوم، شیشه‌ها و قطعات چوبی با چسب آکواریوم به یکدیگر متصل شدند.



شکل ۳-۱۸ ابزار آزمایش

از ابتدای ورودی فلوم تا طول ۵۰ سانتیمتر (یعنی تا ۱۰ سانتیمتر بعد از دریچه‌ی کشویی) کف فلوم با استفاده از قطعات فومیزه بالا آورده شد. بعد از آن، تا فاصله یک متری، یعنی جایی که محل قرارگیری

زبری‌ها بود، در کف فلوم فقط شیشه گذاشته شد. به این جهت که قله‌ی زبری‌ها کاملاً هم‌سطح با سطوحی شود که زبری در آن‌جا وجود ندارد. بنابراین فاصله یک متری که مکان قرارگیری زبری‌ها می‌باشد، پایین‌تر از سطوحی است که زبری در آن‌جا موجود نمی‌باشد. بلافاصله بعد از این سطح، قطعه فومیزه قرار داده و روی آن شیشه چسبانده و کف فلوم تا انتها بالا آورده شد.



شکل ۳-۱۹ نمای قرارگیری زبری‌ها در سطح فلوم

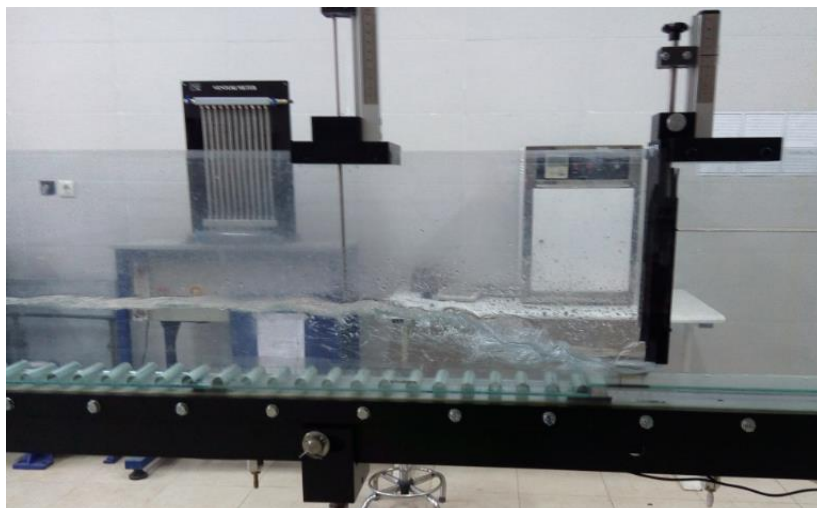
آزمایش اول بر روی زبری با قطر لوله $1/7$ سانتیمتر انجام گرفت. لوله‌ها را در طول‌های ۹ سانتیمتری قطعه قطعه و با کاتر هر لوله از وسط به دو قسمت تقسیم گردید. به طوری که زبری‌ها به صورت نیم‌دایره در کف فلوم و عمود بر جهت جریان قرار گیرند. بعد از برش لوله‌ها، آن‌ها روی سطح مخصوصشان در کف فلوم بدون فاصله و در کنار هم قرار گرفتند. زمانی که کار چسباندن لوله‌ها به اتمام رسید، به مدت ۲۴ ساعت جهت خشک شدن چسب‌ها و آماده شدن بستر برای شروع آزمایش، به بستر استراحت داده شد. بعد از گذشت این زمان و تکمیل بستر، با اطمینان از خشک بودن چسب‌ها، فلوم روی شیب صفر قرار داده و دستگاه روشن شد. دبی سنج روی دبی حداقل تنظیم و آب با فشار و سرعتی متناسب با دبی موردنظر وارد فلوم شد. پس از گذر آب از زیر دریچه کشویی در قسمتی که زبری‌ها شروع شده بودند، یعنی ۱۰ سانتیمتری بعد از دریچه کشویی، پرش هیدرولیکی تشکیل گردید. مقدار طول پرش و عمق ثانویه با استفاده از خط‌کش و Pointcage برآورد شد. همچنین آزمایشات مربوط به پروفیل سطح آب هم بر روی بستر زبر انجام گرفت، که در آن مقدار y ارتفاع سطح آب تا قله زبری‌ها بود. پس از انجام

این اعمال، دبی سنج به ترتیب روی دبی‌های ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹/۲ مترمکعب بر ساعت قرار گرفت و آزمایشات و اندازه‌گیری‌های مربوطه برای سایر دبی‌ها انجام شد.

با نگاهی بر مقادیر بدست آمده در بستر زبر و بستر صاف و با مقایسه آن‌ها، کاهش طول پرش و عمق ثانویه محسوس بود. سپس دستگاه را روی شیب ۰/۰۱ و ۰/۰۲ تنظیم و کلیه آزمایشات انجام شده، روی این دو شیب نیز انجام گرفت.

بعد از اتمام آزمایشات، اقدام به ساخت بستر دوم گردید. زبری‌ها از کف کانال برداشته شده، سپس با فاصله‌ی نیم سانتیمتری در کنار یکدیگر قرار گرفته و در کف شیشه‌ای چسبانده شدند. مجدداً تمامی آزمایشات در ۶ دبی و سه شیب بر روی این بستر انجام شد. نتایج بدست آمده کاهش طول پرش و طول غلطاب و عمق ثانویه بیشتری را نسبت به حالت قبل را نشان داد. بعد از آن بستر سوم، چهارم و پنجم نیز ساخته شد و کلیه آزمایشات بر روی آن‌ها اعمال گردید. در این آزمایشات ارتفاع زبری‌ها ثابت و فاصله بین زبری‌ها متغیر بود، که هرچه این فاصله بیشتر می‌شد، گردابه‌هایی در این ناحیه تولید شده که حضور بیشتر و قوی‌تر این گردابه‌ها دلیل اصلی کاهش انرژی آب، طول پرش، طول غلطاب و عمق ثانویه بودند.

پس از اتمام آزمایشات فوق، لوله دوم در کف فلوم قرار داده شد تا تأثیر ارتفاع زبری را در فرضیه کاهش طول پرش و عمق ثانویه بررسی شود. لوله دوم هم همانند لوله اول در طول‌های ۹ سانتیمتری (برابر با عرض فلوم) قطعه قطعه و از وسط به دو نیم تقسیم شدند. برای لوله دوم (زبری دوم به قطر ۲ سانتی‌متر) هم ۵ بستر در نظر گرفته شد، که در آن‌ها فاصله بین زبری‌ها صفر، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ سانتیمتر بود. تمامی آزمایشات مشابه حالت قبلی (بسترهای زبری اول) بر روی بسترهای زبری دوم نیز انجام شد.

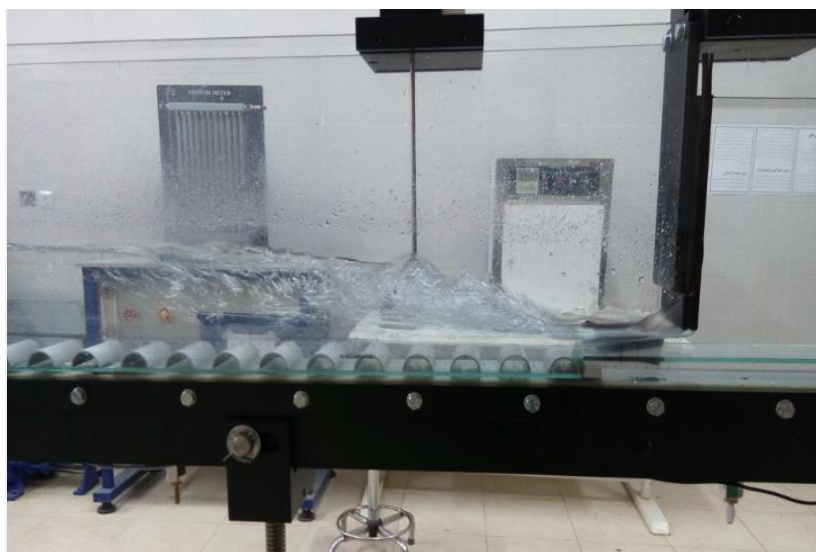


شکل ۳-۲۰ پرش هیدرولیکی در دبی $9/2 \text{ m}^3/\text{h}$ در شیب صفر برای زبری دوم با فاصله بین زبری ۲ سانتیمتر

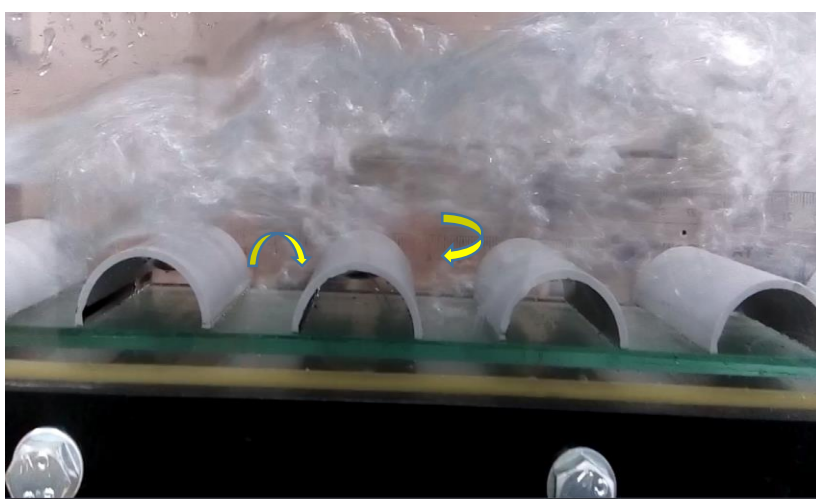
بعد از آن لوله سوم (زبری به قطر ۳ سانتیمتر) نیز به قطعات ۹ سانتیمتری بریده شده و در کف فلوم قرار گرفتند. بسترهای دو لوله قبلی برای لوله‌ی سوم نیز ساخته شد. ۵ بستر با سه شیب که در هر کدام تمامی آزمایشات دقیقاً "مشابه آزمایشات قبلی تکرار گردیدند.



شکل ۳-۲۱ پرش هیدرولیکی در دبی $9/2 \text{ m}^3/\text{h}$ در شیب صفر برای زبری سوم بدون فاصله بین زبری



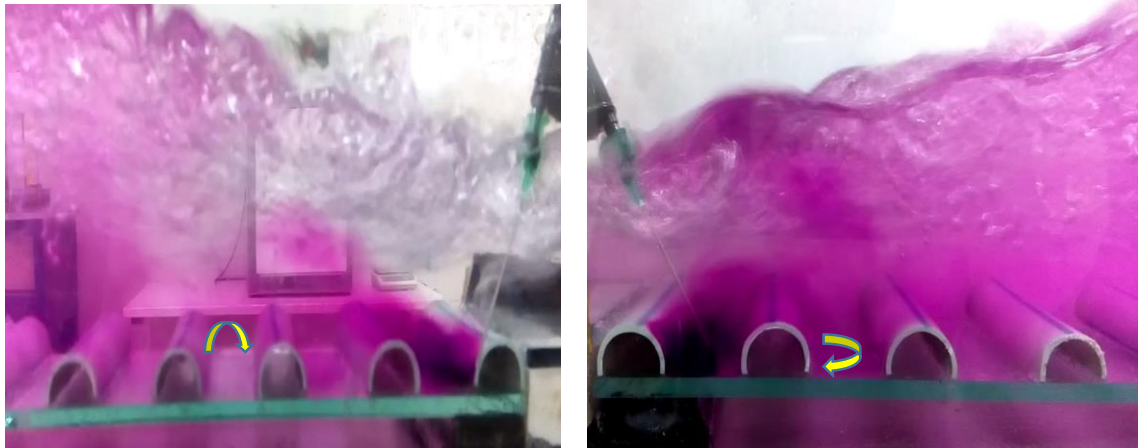
شکل ۲۲-۳ پرش هیدرولیکی در دبی $9/2 \text{ m}^3/\text{h}$ در شیب $0/02$ برای زبری سوم با فاصله بین زبری ۲ سانتیمتر



شکل ۲۳-۳ حرکت چرخشی حباب‌های هوا در ناحیه بین زبری‌ها

همچنین برای مشاهده بهتر حرکت چرخشی آب و توده‌های هوا در ناحیه بین زبری‌ها، از پودر پرمنگنات پتاسیم استفاده شد. بدین صورت که مقداری از پودر را در کمی آب حل کرده و سپس این محلول که رنگی بنفش دارد، با سرنگ در ناحیه بین زبری‌ها تزریق شد. محلول رنگی با ورود به داخل آب، همگام

با حباب‌های هوا و حرکت آب پیش رفت و حرکت چرخشی حباب‌های هوا در بین زبری‌ها، به وضوح مشاهده گردید.



شکل ۳-۲۴ تزریق پرمنگنات پتاسیم برای مشاهده‌ی حرکت چرخشی آب بین زبری‌ها

۳-۳- آنالیز ابعادی

روابط حاکم بر بسیاری از پدیده‌های هیدرولیکی را نمی‌توان مستقیماً از قوانین حاکم بر حرکت سیالات و تئوری‌های موجود، نظیر قوانین بقای جرم، انرژی و مومنتم به دست آورد. در چنین مواردی سعی می‌شود، تا برای استخراج روابط ریاضی حاکم بر چنین پدیده‌هایی، ابتدا کلیه متغیرهای لازم که در به وجود آوردن آن پدیده نقش دارند، مشخص گردند. در واقع هدف از روش آنالیز ابعادی، پیدا نمودن رابطه‌ای بین کمیت‌های فیزیکی در یک پدیده طبیعی می‌باشد. با استفاده از آنالیز ابعادی می‌توان در بسیاری از حالت‌ها، رابطه پیچیده‌ای را تجزیه و تحلیل نمود و بین متغیرهای مختلف آن پدیده، روابط صحیحی را ایجاد نمود که رابطه به دست آمده معمولاً "ساده‌تر و منطبق با شرایط فیزیکی می‌باشد.

نکته مهم در مورد رابطه موردنظر این است که، رابطه مذکور باید معنی‌دار، دارای کاربرد ساده و قابل استفاده در هر سیستم آحاد باشد. تحلیل ابعادی بر این اصل استوار است که، در یک رابطه صحیح

فیزیکی، هرگاه کمیت‌های مختلفی که در طرفین رابطه وجود دارند، بر حسب پارامترهای اصلی دستگاه یكاهای آحادی نوشته شوند، در هر دو طرف تجانس و تشابه كامل برقرار باشد. پارامترهای اصلی دستگاه مختلف شامل طول، جرم و زمان می‌باشد و بدین ترتیب در طرفین يك رابطه‌ی صحیح فیزیکی، بایستی نمای پارامترها یکسان باشد.

۳-۳-۱- تحلیل ابعادی پارامترهای مؤثر بر پرش هیدرولیکی در بسترهای موجدار سینوسی

عوامل مؤثر بر پرش هیدرولیکی در بسترهای موجدار سینوسی عبارت است از :

الف - خصوصیات مربوط به شرایط هیدرولیکی جریان شامل :

۱- عمق جریان (V_1)

۲- سرعت جریان (v_1)

ب - خصوصیات مربوط به ویژگی‌های سیال شامل :

۱- جرم مخصوص آب (ρ)

۲- گرانیوی دینامیک آب (μ)

۳- شتاب ثقل (g)

ج - خصوصیات هندسی زبری‌های سینوسی شامل :

۱- ارتفاع زبری (t)

۲- فاصله‌ی بین زبری‌ها (s)

۳- شیب کف فلوم (θ)

سه متغیر تکراری انتخاب می‌شود. این سه متغیر عبارتند از: y_1 ، v_1 و ρ . با توجه به روش باکینگهام، در تحلیل ابعادی و تعداد پارامترها، بایستی $(N-3)$ یعنی ۵ پارامتر اصلی بی‌بعد جهت بررسی استخراج گردد:

جدول ۳-۳ ابعاد پارامترهای مورد استفاده

شماره پارامتر	پارامتر	بعد پارامتر	پارامتر تکرارشونده
۱	y_1	L	*
۲	v_1	LT^{-1}	*
۳	ρ	$FL^{-4}T^2$	*
۴	μ	$FL^{-2}T^1$	
۵	g	LT^{-2}	
۶	t	L	
۷	S	L	
۸	Θ	-	

بنابراین می‌توان نوشت: $f(\rho, g, v, y_1, t, s, \Theta, \mu) = 0$

اعداد بی‌بعد با توجه به روش باکینگهام به شرح زیر قابل ارائه است:

$$(1) \pi_1 = v\rho y_1 g = (LT^{-1})^a (ML^{-3})^b (L)^c LT^{-2}$$

$$\pi_1 = L^{a-3b+c+1} M^b T^{b-a-2}$$

$$b = 0 \rightarrow M^0$$

$$b - a = 2 \rightarrow a = -2$$

$$a - 3b + c + 1 = 0 \rightarrow c = 1$$

$$\pi_1 = v^{-2} \rho^0 y_1^1 g = \frac{gy}{v^2}$$

$$(2) \pi_2 = v \rho y_1 t = (LT^{-1})^a (ML^{-3})^b (L)^c L$$

$$\pi_2 = L^{a-3b+c+1} M^b T^{-a}$$

$$a = 0 \quad c = -1$$

$$b = 0$$

$$\pi_2 = v^0 \rho^0 y_1^{-1} t = \frac{t}{y_1}$$

$$(3) \pi_3 = v \rho y_1 s = (LT^{-1})^a (ML^{-3})^b (L)^c L$$

$$\pi_3 = L^{a-3b+c+1} M^b T^{-a}$$

$$a = 0 \quad c = -1$$

$$b = 0$$

$$\pi_3 = v^0 \rho^0 y_1^{-1} s = \frac{s}{y_1}$$

$$(4) \pi_4 = v \rho y_1 \mu = (LT^{-1})^a (ML^{-3})^b (L)^c ML^{-1} T^{-1}$$

$$\pi_4 = L^{a-3b+c-1} M^{b+1} T^{-a-1}$$

$$b + 1 = 0 \rightarrow b = -1$$

$$-a - 1 = 0 \rightarrow a = -1$$

$$c = -3$$

$$(5) \pi_4 = v^{-1} \rho^{-1} y_1^{-3} \mu = \frac{\mu}{v \rho y^3}$$

$$\pi_5 = v \rho y_1 \theta \rightarrow \pi_5 = \theta$$

بنابراین در پارامترهای اصلی داریم :

$$f\left(F_r, Re, \frac{t}{y_1}, \frac{s}{y_1}, \theta\right) = 0$$

در این تحقیق چون رژیم جریان درهم می‌باشد، از تأثیر رینولدز صرف نظر می‌کنیم.

بنابراین رابطه‌ی کلی شامل ۴ پارامتر بی‌بعد به صورت زیر می‌باشد :

$$f\left(F_r, \frac{t}{y_1}, \frac{s}{y_1}, \theta\right) = 0$$

با کمک اعمال ریاضی بر روی پارامترها در نهایت رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\frac{y_2}{y_1} = f\left(F_r, \frac{t}{y_1}, \frac{s}{y_1}, \theta\right) \quad (1-3)$$

فصل چہارم

نتایج و بحث

۴- نتایج و بحث

در این فصل نتایج حاصل از تحقیق آمده است. مطالب این فصل براساس ماهیت تحقیق در ۳ بخش اصلی ارائه شده که هر بخش با توجه به پارامترهای مختلف مورد آزمایش، از زیربخش‌های مختلف تشکیل شده است. پارامترهای فاصله زبری‌ها (S)، ارتفاع زبری‌ها (t)، شیب‌های مختلف کف فلوم (۰، ۰/۰۱، ۰/۰۲) و پروفیل سطح آب، مورد بررسی قرار گرفت.

۴-۱- بررسی تأثیر فاصله بین زبری‌ها، بر مشخصات پرش هیدرولیکی

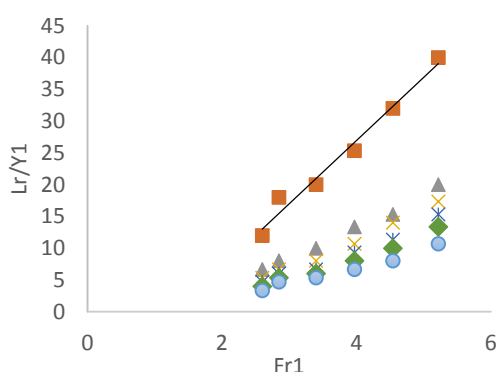
۴-۱-۱- تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر طول غلطاب در شیب صفر و ۰/۰۱ و ۰/۰۲

شکل ۴-۱ الف، تأثیر فاصله بین زبری‌ها را در شیب صفر نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، با افزایش فاصله از صفر تا ۲ سانتیمتر، مقدار $\frac{L_r}{y_1}$ کاهش و با افزایش عدد فرود، افزایش می‌یابد. به طوریکه در $S = 0$ حداکثر مقدار آن ۱۵/۳۳ و حداقل مقدار آن برابر با ۴، در صورتی که در $S = 2$ سانتیمتر، حداکثر مقدار آن ۷/۳۳ و حداقل آن ۲/۶۶ می‌باشد. در واقع با افزایش فاصله از ۰ تا ۲ سانتیمتر، نسبت $\frac{L_r}{y_1}$ ، ۵۲/۱۸ درصد کاهش یافت. دلیل این موضوع این است که با افزایش فاصله بین زبری‌ها پرش هیدرولیکی سریع‌تر اتفاق افتاده که نتیجه آن کاهش طول پرش و نهایتاً کاهش طول غلطاب می‌باشد.

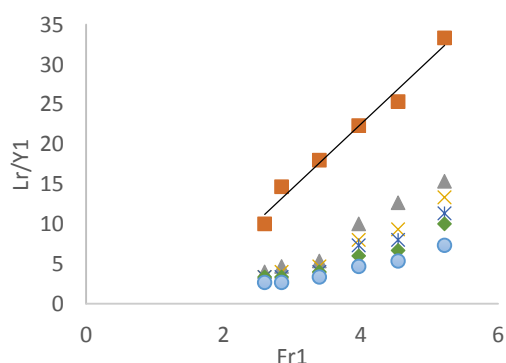
در مقایسه بین سطح صاف و زبر با $S = 0$ در زبری اول (لوله با قطر ۱/۷ سانتیمتر) نسبت $\frac{L_r}{y_1}$ در حداکثر فرود، از ۳۳/۳۳ به ۱۵/۳۳ و در $S = 2$ سانتیمتر، به ۸ می‌رسد. به عبارتی در فاصله‌ی صفر حدوداً ۲ برابر و در فاصله‌ی ۲ سانتیمتر، حدوداً ۴ برابر کاهش نسبت $\frac{L_r}{y_1}$ را نسبت به بستر صاف، نشان می‌دهد.

شکل ۴-۱، نتایج مربوط به تغییرات $\frac{L_r}{y_1}$ در مقابل عدد فرود اولیه پرش را برای شیب ۲ درصد نشان می‌دهد. نتایج مربوط به این حالت روند مشابه با شیب صفر داشت، با این تفاوت که با افزایش شیب کف عمق ثانویه مربوط به پرش دیرتر اتفاق افتاده که سبب افزایش طول پرش و طول غلطاب شد. در این شیب برای $S = 0$ حداکثر و حداقل مقدار $\frac{L_r}{y_1}$ به ترتیب ۲۰ و ۶/۶۶ و برای $S = 2$ سانتیمتر، حداکثر این مقدار ۱۰/۶۶ و حداقل آن ۳/۳۳ بود. مقایسه این دو نمودار نشان داد که در دبی حداکثر برای بستر زبر با افزایش فاصله، نسبت $\frac{L_r}{y_1}$ ، ۴۶/۷ درصد کاهش یافت و در دبی حداقل مقدار آن ۵۰ درصد بود. در حالی که نسبت به بستر صاف در دبی حداکثر و حداقل مقدار کاهش به ترتیب ۷۳/۳۵ و ۷۲/۲۵ درصد بود.

■ سطح صاف ▲ S=0 ✕ S=0.5 cm * S=1cm ◆ S=1.5cm ● S=2cm



θ=۰/۰۲ (ب)

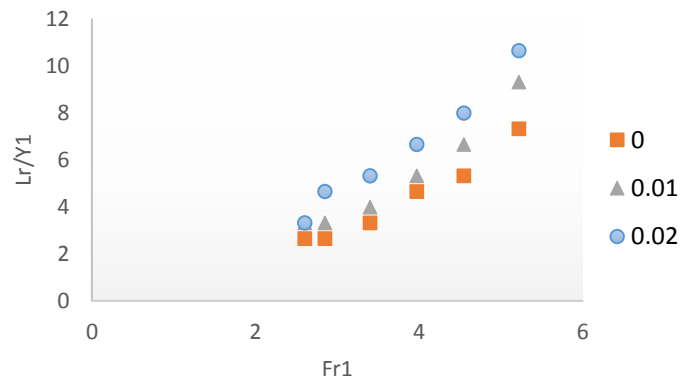


θ=۰ (الف)

شکل ۴-۱ بررسی تغییرات طول نسبی غلطاب در برابر عدد فرود برای فواصل مختلف زبری با ارتفاع ۰/۸۵ سانتیمتر

شکل ۴-۲ تغییرات نسبت $\frac{L_r}{y_1}$ را در شیب‌های مختلف در زبری اول نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست، با افزایش شیب کف، مقدار نسبت $\frac{L_r}{y_1}$ افزایش می‌یابد. به طوریکه در حداکثر فرود و در شیب

صفر مقدار آن از ۷ به ۱۱ در شیب ۰/۰۲ رسیده است و دلیل آن نیروی وزن آب می‌باشد که در شیب‌های مثبت باعث تشکیل دیرتر عمق ثانویه و افزایش طول پرش و طول غلطاب می‌شود.



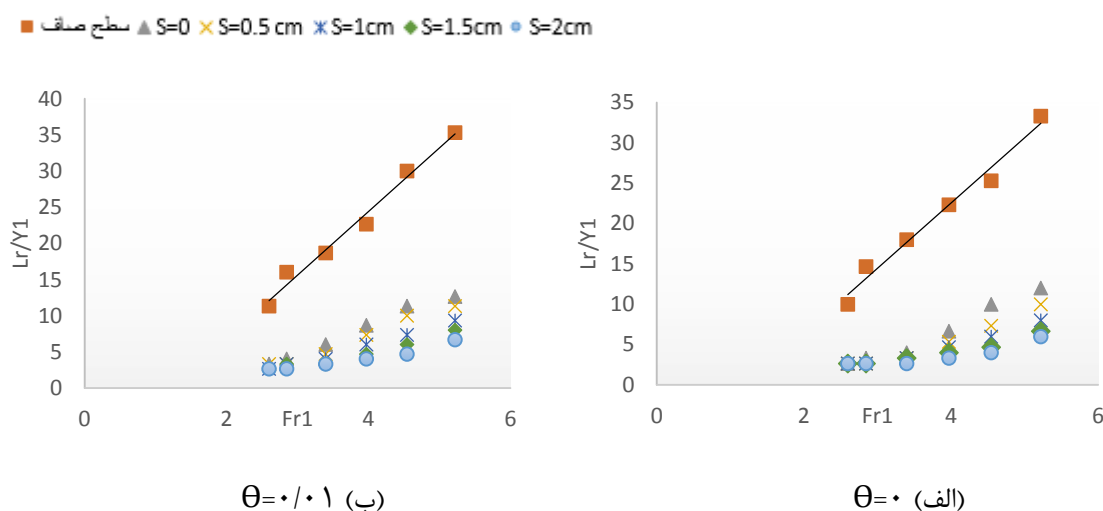
شکل ۴-۲ مقایسه درصدهای مختلف شیب برای زبری اول

شکل ۴-۳ الف، بیانگر تأثیر فاصله بین زبری‌ها را در شیب صفر برای زبری سوم (لوله به قطر ۳ سانتیمتر) نشان می‌باشد. همانطور که مشخص است، افزایش فاصله بین زبری‌ها از صفر تا ۲ سانتیمتر، کاهش مقدار $\frac{L_r}{y_1}$ و با افزایش عدد فرود، افزایش مقدار $\frac{L_r}{y_1}$ را به همراه داشت. به طوری که اگر بین زبری‌ها فاصله‌ای نباشد ($S = 0$)، حداکثر مقدار آن ۱۲ و حداقل مقدار آن برابر با ۲/۶۶، در صورتی که در $S = 2$ سانتیمتری، حداکثر مقدار آن ۶ و حداقل آن ۲/۶۶ می‌باشد. در واقع با افزایش فاصله بین زبری‌ها از ۰ تا ۲ سانتیمتر، نسبت $\frac{L_r}{y_1}$ ، ۵۰ درصد کاهش یافت، که در مقایسه با بستر صاف، طول غلطاب در حداکثر فرود با $S = 0$ برابر با ۶۴ درصد و در $S = 2$ سانتیمتر، برابر با ۸۲ درصد کاهش داشت. دلیل این موضوع سریع‌تر اتفاق افتادن پرش هیدرولیکی، در نتیجه‌ی افزایش فاصله بین زبری‌ها می‌باشد، که نتیجه آن کاهش طول پرش و طول غلطاب بود. مقدار این کاهش در تحقیقات راور و همکاران (۱۳) در بستر دوزنقه‌ای نسبت به بستر صاف، در حداقل فرود برابر با ۳۹ درصد بود.

شکل ۴-۳ ب، نتایج مربوط به تغییرات $\frac{L_r}{y_1}$ در مقابل عدد فرود اولیه پرش را برای شیب ۱ درصد نشان می‌دهد. نتایج مربوط به این حالت همانند نتایج با شیب صفر بود. با این تفاوت که با افزایش شیب کف،

عمق ثانویه مربوط به پرش دیرتر اتفاق افتاده که موجب افزایش طول پرش و طول غلطاب شد. در این شیب برای $S = 0$ حداکثر و حداقل مقدار $\frac{L_r}{y_1}$ به ترتیب $12/66$ و $3/33$ و برای $S = 2$ سانتیمتر، حداکثر این مقدار $6/66$ و حداقل آن $2/66$ بود. از مقایسه این دو نمودار چنین برآمد، که در دبی حداکثر برای بستر زبر با افزایش فاصله، نسبت $\frac{L_r}{y_1}$ $47/4$ درصد و برای دبی حداقل $20/12$ درصد کاهش یافت. این در صورتی است که نسبت به بستر صاف در دبی حداکثر نسبت به بستر زبر بدون فاصله، کاهش $64/16$ درصد و نسبت به بستر زبر با $S = 2$ سانتیمتر، مقدار کاهش 81 درصد بود. این کاهش متأثر از شرایط هیدرودینامیکی جریان در ناحیه بین زبری‌هاست که امکان بوجود آمدن جریان‌های چرخشی را در ناحیه فراهم آورده است و اثرات آن به صورت کاهش فشار و افزایش حباب‌های اختلاط آب و هوا بروز می‌نماید.

همچنین با مقایسه زبری اول و سوم می‌توان به این نتیجه رسید، که تأثیر فاصله بین زبری‌ها اثر بیشتری نسبت به تأثیر ارتفاع زبری بر روی کاهش نسبت $\frac{L_r}{y_1}$ دارد.



شکل ۴-۳ بررسی تغییرات طول نسبی غلطاب در برابر عدد فرود برای فواصل مختلف زبری با ارتفاع $1/5$ سانتیمتر

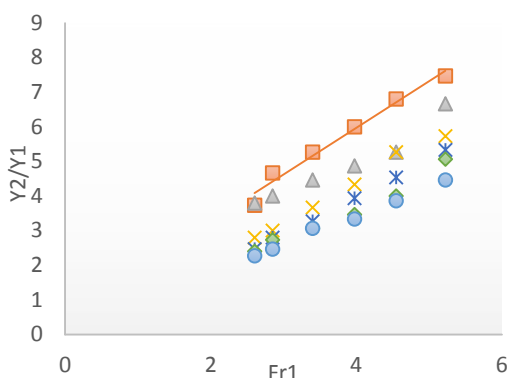
۴-۱-۲- تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر تغییرات نسبت عمق ثانویه به اولیه در شیب صفر و ۰/۰۱

و ۰/۰۲

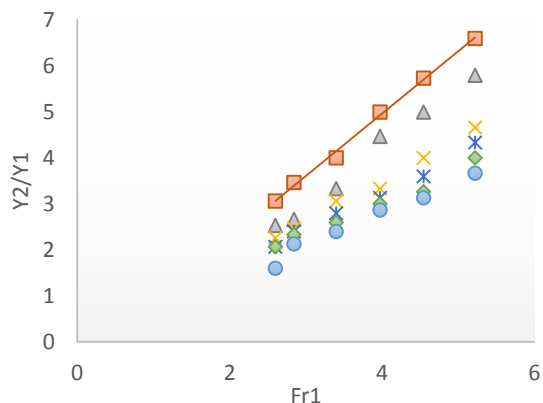
نسبت عمق ثانویه به اولیه تابعی از عدد فرود اولیه پرش و نسبت شیب موج $\frac{S}{t}$ می‌باشد. نتایج اغلب محققین نشان می‌دهد، تأثیر شیب موج بر نسبت اعماق ثانویه به اولیه ناچیز بوده و لذا میتوان از آن صرف نظر نمود. شکل ۴-۴ الف، تأثیر فاصله بین زبری‌ها را در شیب صفر، بر روی نسبت $\frac{y_2}{y_1}$ در زبری اول، نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود، مقادیر تأثیر شیب موج در تمامی پرش‌ها به صورت تقریباً یکسان می‌باشد. این مسئله ناشی از آن است که تاج موج‌ها هم‌تراز با کف کانال بالادست بوده و بستر موجدار سینوسی به صورت حفره عمل می‌نماید. برای بررسی‌های بیشتر به صورت جداگانه هر کدام از بسترها با هم مقایسه شد. همانطور که پیداست، با افزایش فاصله از صفر تا ۲ سانتیمتر، مقدار $\frac{y_2}{y_1}$ کاهش و با افزایش عدد فرود، افزایش می‌یابد. به طوریکه اگر $S = 0$ باشد، حداکثر مقدار آن ۵/۸ و حداقل مقدار آن برابر با ۲/۵۳، و در $S = 2$ سانتیمتری، حداکثر مقدار آن ۳/۶ و حداقل آن ۱/۶ می‌باشد. در حقیقت با افزایش فاصله از ۰ تا ۲ سانتیمتر، نسبت $\frac{y_2}{y_1}$ ، ۳۶/۸۹ درصد در حداکثر فرود و ۳۶/۷۵ درصد در حداقل عدد فرود کاهش یافت. همچنین با افزایش فاصله از ۰ تا ۲ سانتیمتر، میزان کاهش $\frac{y_2}{y_1}$ ، ۵۰ درصد نسبت به بستر صاف بود.

شکل ۴-۴ ب، تغییرات نسبت $\frac{y_2}{y_1}$ در مقابل عدد فرود اولیه پرش را برای شیب ۲ درصد نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده مشابه با شیب صفر بود. تنها تفاوت موجود، افزایش اندازه طول پرش نسبت به بستر صاف، به دلیل افزایش شیب کف بود. مقایسه نمودار نشان داد که در دبی حداکثر برای بستر زبر با افزایش فاصله، نسبت $\frac{y_2}{y_1}$ ، ۳۳ درصد کاهش یافت و در دبی حداقل مقدار کاهش ۱۴ درصد بود. در حالی که در حداکثر مقدار فرود در بستر زبر با فاصله صفر نسبت به بستر صاف در همین شیب، نسبت $\frac{y_2}{y_1}$ ، ۱۰/۷۲ درصد و در فاصله ۲ سانتیمتری، ۴۰/۲۱ درصد کاهش داشت.

■ سطح صاف ▲ S=0 ✕ S=0.5 cm ✖ S=1cm ◆ S=1.5cm ● S=2cm



θ=۰/۰۲ (ب)



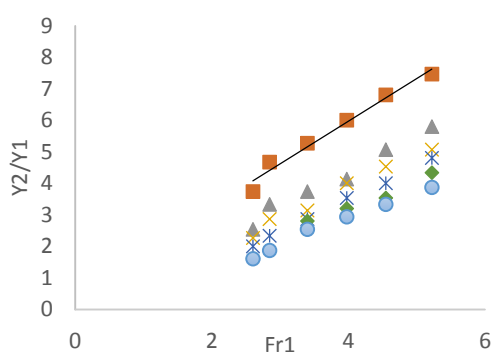
θ=۰ (الف)

شکل ۴-۴ تغییرات عمق نسبی پرش هیدرولیکی در بسترهای زبر و صاف برای فواصل مختلف بین زبری بارتفاع زبری ۰/۸۵ سانتیمتر

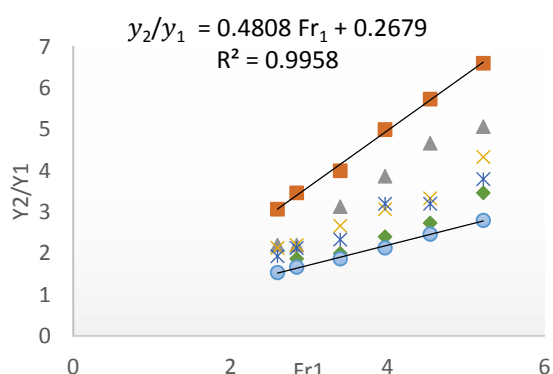
شکل ۴-۵ الف، نشانگر تأثیر فاصله بین زبری ها را در شیب صفر بر روی نسبت $\frac{y_2}{y_1}$ برای زبری سوم، می‌باشد. همانطور که دیده می‌شود، افزایش فاصله بین زبری‌ها از صفر تا ۲ سانتیمتر، سبب کاهش مقدار $\frac{y_2}{y_1}$ کاهش و افزایش عدد فرود، سبب افزایش آن می‌شود. به طوریکه در $S = 0$ حداکثر مقدار آن ۵ و حداقل مقدار آن برابر با ۲/۲، در صورتی که در $S = 2$ سانتیمتری، حداکثر مقدار آن ۲/۸ و حداقل آن ۱/۵۳ می‌باشد. در واقع با افزایش فاصله از ۰ تا ۲ سانتیمتر، نسبت $\frac{y_2}{y_1}$ در حداکثر و حداقل فرود ۴۴ درصد و ۳۰/۴۵ درصد کاهش داشت. نسبت $\frac{y_2}{y_1}$ در بسترهای زبر در مقایسه با بستر صاف، در حداکثر و حداقل فرود، به ترتیب ۵۷/۵۷ درصد و ۵۰ درصد کاهش یافت. دلیل آن، افزایش فاصله بین زبری ها است که باعث می‌شود، پرش هیدرولیکی سریع‌تر اتفاق افتاده و همین عامل سبب کوچکتر شدن مقدار عمق ثانویه y_2 می‌شود، که نتیجه آن به کاهش طول پرش و نهایتاً کاهش طول غلطاب می‌انجامد. به طور متوسط کاهش نسبت اعماق مزدوج در این تحقیق نسبت به بستر صاف، در حداکثر فرود، ۵۰ درصد می‌باشد. مقدار این کاهش در تحقیقات بلانگر (۲۲)، ۲۲ درصد، بدیع‌زادگان و همکاران (۱)، ۷/۱۵ درصد و عباسپور و همکاران (۱۴)، ۵ درصد در حداقل فرود نسبت به بستر صاف بود.

شکل ۴-۵، نتایج مربوط به تغییرات $\frac{y_2}{y_1}$ در مقابل عدد فرود اولیه پرش را برای شیب ۲ درصد نشان می‌دهد. نتایج مربوط به این شیب مشابه با شیب صفر بود. اما به دلیل افزایش شیب کف، پرش سریع‌تر و عمق ثانویه آن دیرتر اتفاق افتاد، که سبب افزایش طول پرش و طول غلطاب شد. مقایسه نمودارها در فواصل مختلف نشان داد که در دبی حداکثر برای بستر زبر با افزایش فاصله، نسبت $\frac{y_2}{y_1}$ ۳۳/۴ درصد کاهش یافت و در دبی حداقل مقدار آن ۴۰/۵ درصد بود. در حالی که مقدار کاهش نسبت $\frac{y_2}{y_1}$ در بسترهای زبر نسبت به بستر صاف، در دبی حداکثر و حداقل مقدار کاهش به ترتیب ۴۰/۲۱ و ۳۹/۴۱ درصد بود

■ سطح صاف ▲ S=0 ✕ S=0.5 cm * S=1cm ◆ S=1.5cm ● S=2cm



θ=۰/۰۲ (ب)

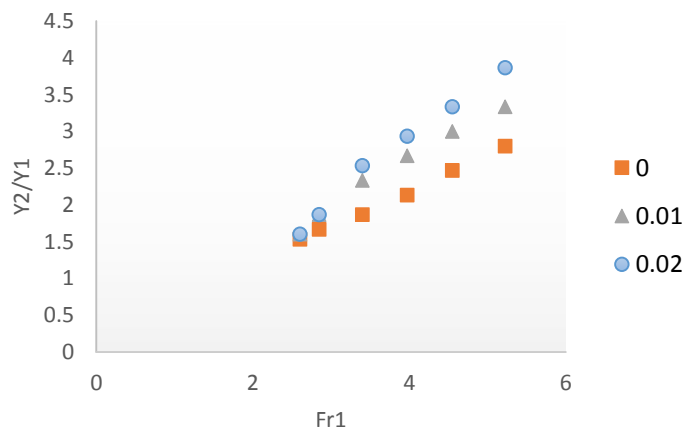


θ=۰ (الف)

شکل ۴-۵ تغییرات عمق نسبی پرش هیدرولیکی در بسترهای موج دار سینوسی و صاف به ازای اعداد فرود اولیه برای فواصل مختلف زبری با ارتفاع زبری ۱/۵ سانتیمتر

شکل ۴-۶ افزایش نسبت $\frac{y_2}{y_1}$ را با افزایش مقادیر شیب کف در زبری سوم نشان می‌دهد. با افزایش شیب مثبت، نیروی وزن آب عامل مهمی در افزایش طول پرش و عمق ثانویه دارد. به طوریکه مقدار نسبت

در شیب صفر و حداکثر فرود، از ۲/۸ به ۳/۸ در شیب ۰/۰۲ افزایش یافته است.



شکل ۴-۶ مقایسه درصد‌های مختلف شیب در زبری سوم

جدول ۴-۱ نشان دهنده روابطی است که محققین مختلف برای نسبت عمق ثانویه به اولیه پرش در بسترهای موجدار با شیب صفر ارائه دادند. همچنین رابطه موردنظر در این پژوهش نیز، ارائه گردیده است. افزایش فاصله بین زبری‌ها، ضریب همبستگی و یکنواختی بهتری را در شکل پرش و نسبت $\frac{y_2}{y_1}$ باعث می‌شود.

جدول ۴-۱ روابط ارائه شده توسط محققین مختلف برای نسبت اعماق ثانویه به اولیه پرش روی بسترهای موجدار

رابطه ارائه شده	R ²	نام پژوهشگر
$y_2/y_1 = Fr_1$	۰/۹۹	راجاراتنام
$y_2/y_1 = 1.1146Fr_1$	۰/۹۱	عباسپور و همکاران
$y_2/y_1 = 1.1223Fr_1 + 0.0365$	۰/۹۳۷۶	توکیای
$*y_2/y_1 = 0.4808 Fr_1 + 0.2679$	۰/۹۹۵۸	این پژوهش

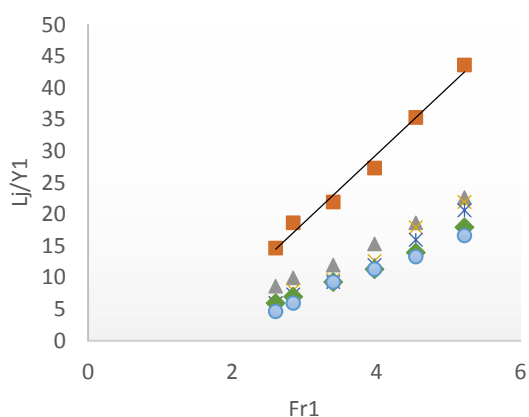
* معادله $\frac{y_2}{y_1}$ در این پژوهش، مربوط به زبری سوم در شیب صفر با حداکثر فاصله بین زبری می‌باشد.

۴-۱-۳- تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر تغییرات طول نسبی در شیب صفر و ۰/۰۱ و ۰/۰۲

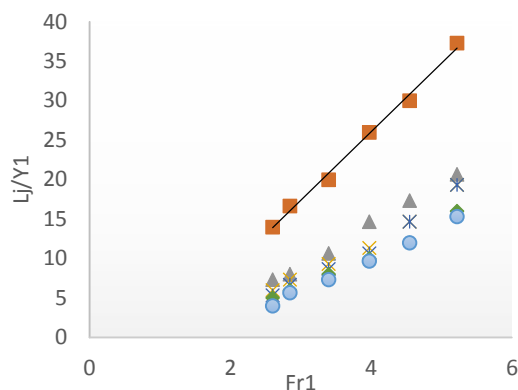
شکل ۴-۷ الف، مربوط به تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر روی تغییرات نسبت $\frac{L_j}{y_1}$ می‌باشد. افزایش فاصله بین زبری‌ها از صفر تا ۲ سانتیمتر، باعث کاهش مقدار $\frac{L_j}{y_1}$ و افزایش عدد فرود، باعث افزایش آن می‌شود. در $S = 0$ حداکثر مقدار آن ۲۰/۶۶ و حداقل مقدار آن برابر با ۷/۳۳، در صورتی که در $S = 2$ سانتیمتری، حداکثر مقدار آن ۱۵/۳۳ و حداقل آن ۴ می‌باشد. در واقع با افزایش فاصله از ۰ تا ۲ سانتیمتر، نسبت $\frac{L_j}{y_1}$ ، ۲۵/۸ درصد کاهش یافت. افزایش فاصله از ۰ تا ۲ سانتیمتر، میزان $\frac{L_j}{y_1}$ را تا ۵۸/۹ درصد در حداکثر دبی نسبت به بستر صاف کاهش داد. این کاهش نسبت $\frac{L_j}{y_1}$ بدان دلیل است که با افزایش فاصله بین زبری‌ها پرش هیدرولیکی سریع‌تر اتفاق افتاده و بوجود آمدن جریان‌های چرخشی در ناحیه بین زبری‌ها و اتلاف انرژی است که باعث کوتاه شدن طول پرش هیدرولیکی و نهایتاً کاهش طول غلطاب می‌شود.

شکل ۴-۷ ب، نتایج مربوط به تغییرات $\frac{L_j}{y_1}$ در مقابل عدد فرود اولیه پرش را برای شیب ۱ درصد نشان می‌دهد. نتایج همانند روند نتایج با شیب صفر بود. تنها به دلیل افزایش شیب کف عمق ثانویه مربوط به پرش دیرتر اتفاق افتاده، که سبب افزایش طول پرش و طول غلطاب شد. با مقایسه نمودارها می‌توان به این نتیجه رسید، که در دبی حداکثر برای بستر زبر با افزایش فاصله، نسبت $\frac{L_j}{y_1}$ ، ۲۴/۲۷ درصد کاهش یافت و در دبی حداقل مقدار کاهش آن ۴۶ درصد بود. در حالی که مقدار کاهش نسبت $\frac{L_j}{y_1}$ در بسترهای زبر نسبت به بستر صاف در همین شیب، در دبی حداکثر و حداقل مقدار کاهش به ترتیب ۶۲ و ۶۸ درصد بود. همانطور که پیداست، در شیب بیشتر از صفر، در دبی‌های کمتر، به دلیل تلاطم کمتر حباب‌های هوا، زبری‌ها نقش بهتری را در کاهش میزان $\frac{L_j}{y_1}$ ایفا می‌کنند.

■ سطح صاف ▲ S=0 ✕ S=0.5 cm ✖ S=1cm ◆ S=1.5cm ● S=2cm



θ=۰/۰۱ (ب)



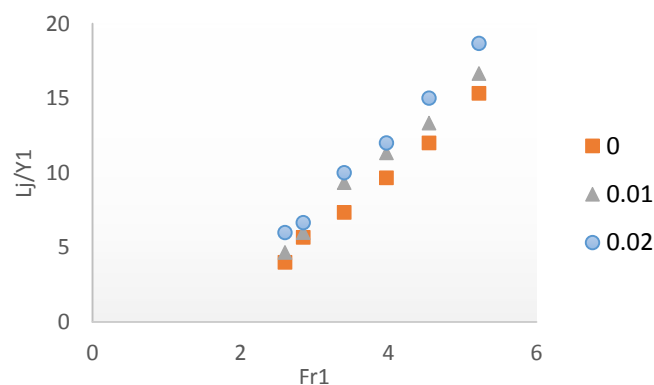
θ=۰ (الف)

شکل ۴-۷ تغییرات طول نسبی پرش به ازای اعداد فرود اولیه بر روی بستر زیر بار ارتفاع ۰/۸۵ سانتیمتر

شکل ۴-۸ تأثیر مقدار شیب کف را بر مقدار نسبت $\frac{L_j}{y_1}$ در زبری اول نشان می‌دهد. مشخص است که با

افزایش شیب کف فلوم، مقدار $\frac{L_j}{y_1}$ افزایش می‌یابد. در این رخداد، نیروی وزن آب در جهت شیب عامل

اصلی افزایش طول پرش می‌باشد.

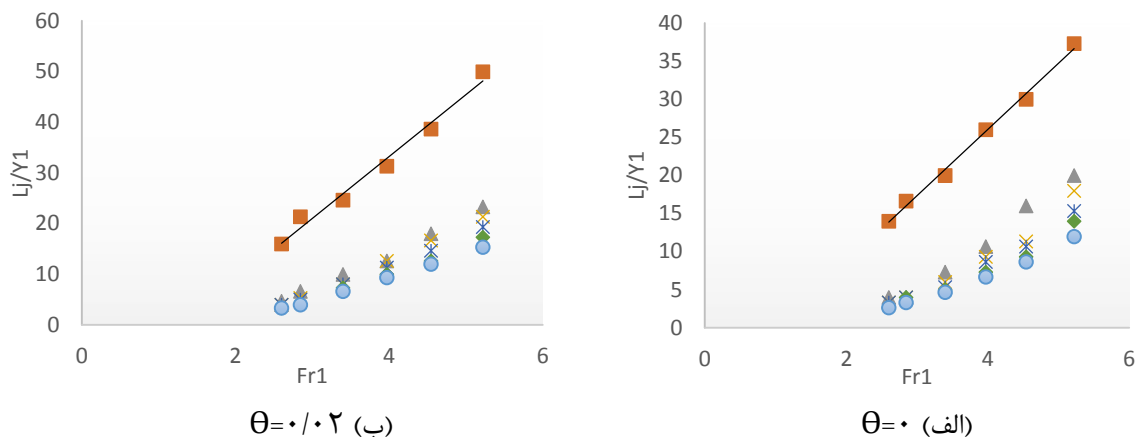


شکل ۴-۸ مقایسه درصد‌های مختلف شیب در زبری اول

شکل ۴-۹ الف، تأثیر فاصله بین زبری‌ها را در شیب صفر برای زبری سوم، نشان می‌دهد. همانطور که از شکل برمی‌آید، با افزایش فاصله بین زبری‌ها از صفر تا ۲ سانتیمتر، مقدار $\frac{L_j}{y_1}$ کاهش و با افزایش عدد فرود، افزایش می‌یابد. به طوریکه در $S = 0$ حداکثر مقدار آن ۲۰ و حداقل مقدار آن برابر با ۴، در صورتی که در $S = 2$ سانتیمتری، حداکثر مقدار آن ۱۲ و حداقل آن ۲/۶۶ می‌باشد. در واقع با افزایش فاصله از ۰ تا ۲ سانتیمتر، نسبت $\frac{L_j}{y_1}$ ، ۴۰ درصد کاهش یافت. همچنین این مقدار کاهش در مقایسه با بستر صاف، در دبی حداکثر و حداقل به ترتیب ۶۷/۸۵ و ۸۱ درصد رسید. به این دلیل که افزایش فاصله بین زبری‌ها باعث سریع‌تر رخ دادن پرش هیدرولیکی و در نتیجه کاهش طول پرش و طول غلطاب می‌شود.

شکل ۴-۹ ب، نتایج مربوط به تغییرات $\frac{L_j}{y_1}$ در مقابل عدد فرود اولیه پرش را برای شیب ۲ درصد نشان می‌دهد. با افزایش شیب کف عمق ثانویه مربوط به پرش دیرتر اتفاق افتاده که سبب افزایش طول پرش و طول غلطاب شد. نتایج بدست آمده از مقایسه‌ی نمودارها بدین صورت بود که در دبی حداکثر برای بستر زیر با افزایش فاصله، نسبت $\frac{L_j}{y_1}$ ، ۳۴/۲۹ درصد کاهش یافت و در دبی حداقل مقدار کاهش آن به ۲۸/۵ درصد رسید. مقدار کاهش نسبت $\frac{L_j}{y_1}$ در بسترهای زیر نسبت به بستر صاف در همین شیب، در دبی حداکثر و حداقل مقدار کاهش به ترتیب ۶۹/۳۴ و ۷۹ درصد بود. دلیل کاهش کمتر در دبی حداکثر نسبت به دبی حداقل این است که، به دلیل سرعت زیاد آب در شیب ۰/۰۲، زبری‌ها همانند بستر صاف عمل می‌کنند.

■ سطح صاف ▲ S=0 ✕ S=0.5 cm ✖ S=1cm ◆ S=1.5cm ● S=2cm



شکل ۴-۹ تغییرات طول نسبی پرش بر روی بستر زبر با ارتفاع ۱/۵ سانتیمتر به ازای اعداد فرود اولیه

۴-۱-۴- تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر اتلاف انرژی در شیب صفر و ۰/۰۱

شکل ۴-۱۰ الف، نشان‌دهنده تأثیر فاصله بین زبری‌ها در شیب صفر برای زبری اول می‌باشد. همانطور

که مشخص است با افزایش فاصله از صفر تا ۲ سانتیمتر و با افزایش عدد فرود مقدار $\frac{\Delta E}{E_1}$ ، افزایش

می‌یابد. اگر $S = 0$ ، حداکثر مقدار $\frac{\Delta E}{E_1}$ ، ۰/۵۷ و حداقل مقدار آن برابر با ۰/۳، در صورتی که در $S = 2$

سانتیمتری، حداکثر مقدار آن ۰/۶۷ و حداقل آن ۰/۳۳ می‌باشد. به طور کلی با افزایش فاصله از ۰ تا ۲

سانتیمتر، نسبت $\frac{\Delta E}{E_1}$ ، ۱۷/۵ درصد و نسبت به بستر صاف ۳۰/۷۶ درصد افزایش پیدا کرد. زیرا با افزایش

فاصله بین زبری‌ها، گردابه‌هایی که بین زبری‌ها ایجاد می‌شود، باعث افزایش تلاطم و استهلاک انرژی

شده و سبب می‌شود پرش هیدرولیکی سریع‌تر اتفاق افتاده که نتیجه آن کاهش طول پرش و نهایتاً

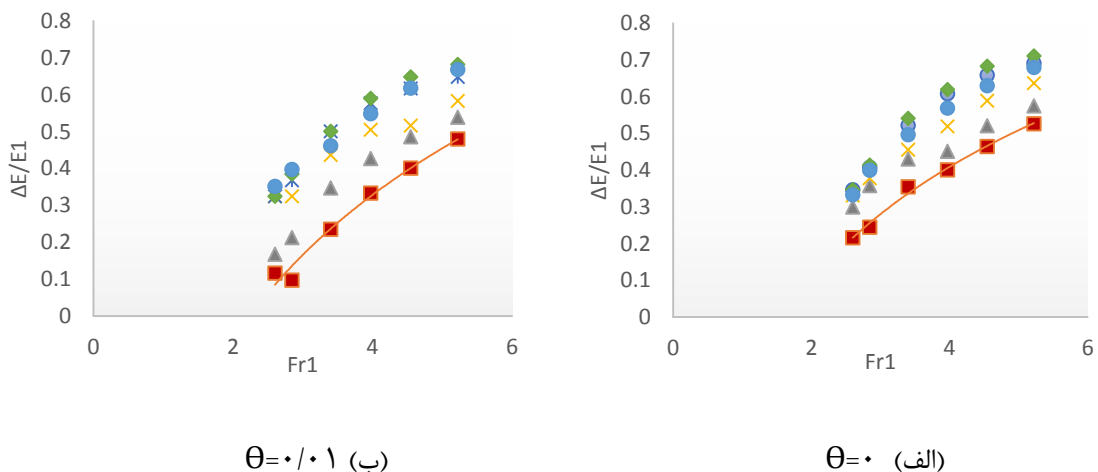
افزایش میزان نسبت $\frac{\Delta E}{E_1}$ می‌باشد.

شکل ۴-۱۰ ب، نتایج مربوط به تغییرات $\frac{\Delta E}{E_1}$ در مقابل عدد فرود اولیه پرش را برای شیب ۱ درصد نشان

می‌دهد. نتایج حاکی از آن بود که روندی مشابه با شیب صفر داشت. با این تفاوت که با افزایش شیب

کف عمق ثانویه مربوط به پرش دیرتر اتفاق افتاده که سبب افزایش طول پرش و طول غلطاب شد. بررسی نمودارها نشان داد که، در دبی حداکثر برای بستر زبر با افزایش فاصله، نسبت $\frac{\Delta E}{E_1}$ ، ۲۵ درصد افزایش یافت و در دبی حداقل مقدار آن ۱۱۸ درصد بود. در حالی که مقدار افزایش نسبت $\frac{\Delta E}{E_1}$ در بسترهای زبر نسبت به بستر صاف، در دبی حداکثر و حداقل مقدار افزایش به ترتیب ۳۸ و ۲۱۸ درصد بود. در شیب زیاد، در دبی‌های حداکثر، سطح زبر همانند سطح صاف عمل می‌کند و باعث افزایش کمتر اتلاف انرژی می‌شود.

■ سطح صاف ▲ S=0 × S=0.5 cm * S=1cm ◆ S=1.5cm ● S=2cm



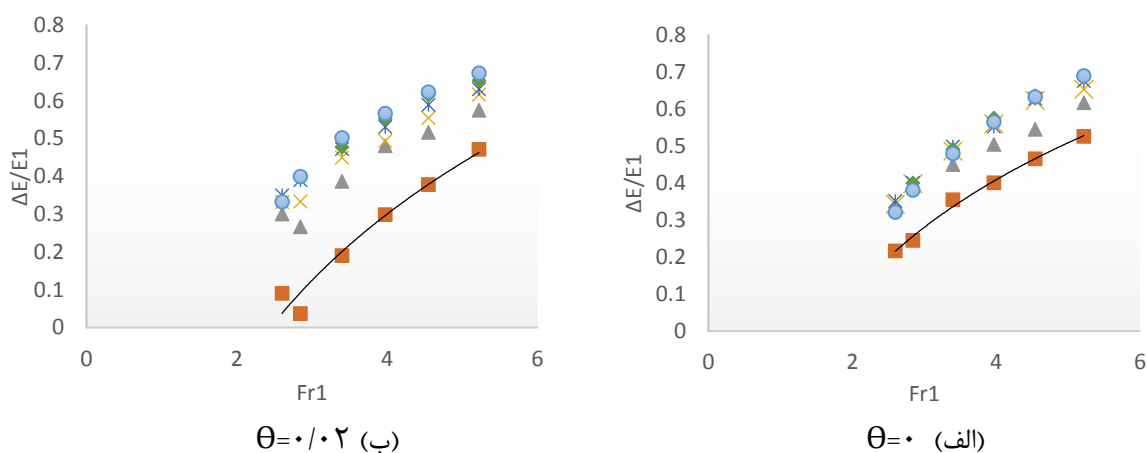
شکل ۴-۱۰ تغییرات اتلاف انرژی نسبی پرش روی بسترهای موج دار سینوسی با ارتفاع ۰/۸۵ سانتیمتر

شکل ۴-۱۱ الف، تأثیر فاصله بین زبری‌ها را در شیب صفر برای زبری سوم نشان می‌دهد. مشخص است که افزایش فاصله از صفر تا ۲ سانتیمتر و همچنین افزایش عدد فرود، مقدار $\frac{\Delta E}{E_1}$ را افزایش می‌دهد. به طوریکه در $S = 0$ حداکثر مقدار آن ۰/۶۱ و حداقل مقدار آن برابر با ۰/۳۳، و در $S = 2$ سانتیمتری، حداکثر مقدار آن ۰/۶۸ و حداقل آن ۰/۳۳ می‌باشد. افزایش فاصله، افزایش ۱۱/۵ درصدی $\frac{\Delta E}{E_1}$ را باعث شد. به دلیل اینکه با افزایش فاصله بین زبری‌ها تشکیل پرش هیدرولیکی را تسریع می‌کند، که نتیجه

آن کاهش طول پرش و نهایتاً افزایش استهلاک انرژی می‌باشد. مقدار نسبت $\frac{\Delta E}{E_1}$ در بسترهای زبر نسبت به بستر صاف، در دبی حداکثر و حداقل به ترتیب $30/7$ و 23 درصد افزایش داشت.

شکل ۴-۱۱، نتایج مربوط به تغییرات $\frac{\Delta E}{E_1}$ در مقابل عدد فرود اولیه پرش را برای شیب 2 درصد نشان می‌دهد. نتایج شبیه به شیب صفر بود. افزایش شیب کف، باعث به تعویق افتادن عمق ثانویه مربوط به پرش و سبب افزایش طول پرش و طول غلطاب شد. نتایج بدین صورت بود که، در دبی حداکثر با افزایش فاصله بین زبری‌ها، نسبت $\frac{\Delta E}{E_1}$ ، افزایش $17/5$ درصدی و در دبی حداقل افزایش 10 درصدی داشت. در حالی که مقدار افزایش نسبت $\frac{\Delta E}{E_1}$ در بسترهای زبر نسبت به بستر صاف، در دبی حداکثر و حداقل، به ترتیب $42/55$ و 266 درصد بود. به دلیل سرعت زیاد آب در دبی حداکثر و وجود تلاطم‌های زیاد حباب‌های هوا در شیب زیاد، زبری‌ها نقش کمتری در افزایش استهلاک انرژی دارند و همانند بستر صاف و بدون زبری عمل می‌کنند. کوزانی و همکاران (۱۷)، مقدار افزایش افت را در بسترهای زبر با شیب کف منفی برابر با 18 درصد محاسبه کردند.

■ سطح صاف ▲ S=0 ✕ S=0.5 cm ✖ S=1cm ◆ S=1.5cm ● S=2cm



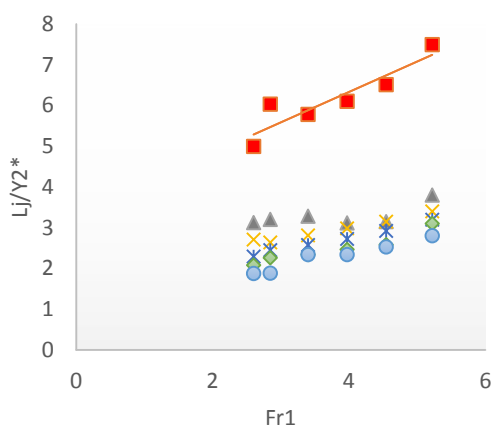
شکل ۴-۱۱ تغییرات اتلاف انرژی نسبی پرش روی بسترهای موج دار سینوسی با ارتفاع $1/5$ سانتیمتر

۴-۱-۵- تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر تغییرات طول نسبی در شیب صفر، ۰/۰۱ و ۰/۰۲

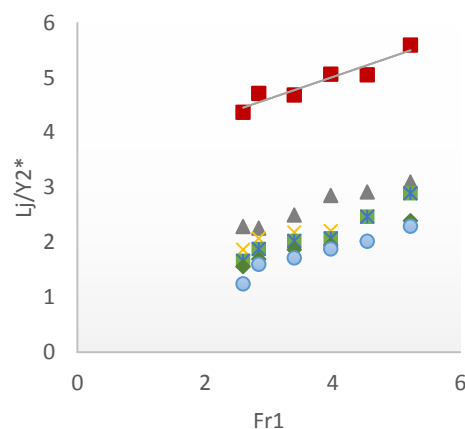
تأثیر فاصله بین زبری‌ها را بر روی تغییرات نسبت $\frac{L_j}{y_2^*}$ در زبری اول (لوله به ارتفاع ۰/۸۵ سانتیمتر) در شکل ۴-۱۲ الف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که، با افزایش فاصله از صفر تا ۲ سانتیمتر در بین زبری‌ها، مقدار $\frac{L_j}{y_2^*}$ کاهش و با افزایش عدد فرود، افزایش می‌یابد. در $S = 0$ حداکثر مقدار آن ۳/۱ و حداقل مقدار آن برابر با ۲/۲ در صورتی که در $S = 2$ سانتیمتری، حداکثر مقدار آن ۲/۳ و حداقل آن ۱/۲۵ می‌باشد. در حقیقت با افزایش فاصله از ۰ تا ۲ سانتیمتر، سبب کاهش ۲۵/۸ درصدی نسبت $\frac{L_j}{y_2^*}$ ، در بسترهای زبر و کاهش ۵۸/۹ درصدی نسبت به بستر صاف، در حداکثر دبی داشت. دلیل کاهش نسبت $\frac{L_j}{y_2^*}$ ، افزایش فاصله بین زبری‌ها است که پرش هیدرولیکی را وادار به رخ دادن سریع‌تر می‌کند و حضور جریان‌های چرخشی در ناحیه‌ی بین زبری‌ها و اتلاف انرژی، کاهش طول پرش را به همراه دارد.

شکل ۴-۱۲ ب، نتایج مربوط به تغییرات $\frac{L_j}{y_2^*}$ در مقابل عدد فرود اولیه پرش را برای شیب ۲ درصد نشان می‌دهد. افزایش شیب کف سبب افزایش طول پرش شد. بررسی نمودارها نشان داد با افزایش S در بیشترین مقدار فرود در بستر زبر، نسبت $\frac{L_j}{y_2^*}$ ، دارای کاهش ۲۶/۳۱ درصد و در کمترین مقدار فرود، مقدار کاهش آن ۴۰/۱۶ درصد بود. در حالی که مقدار کاهش نسبت $\frac{L_j}{y_2^*}$ ، در بسترهای زبر نسبت به بستر صاف، در دبی حداکثر و حداقل مقدار افزایش به ترتیب ۶۲/۶۶ و ۶۲ درصد بود. زبری‌ها در فرود کمتر، نقش کارآمدتری در کاهش طول پرش در بسترهای شیب‌دار دارند. زیرا در فرودهای بیشتر، به دلیل اینکه ارتفاع زبری‌ها کم است، سرعت زیاد آب، مانع از ایفای نقش درست آن‌ها در کاهش طول پرش می‌کند.

■ سطح صاف ▲ S=0 ✕ S=0.5 cm ✖ S=1cm ◆ S=1.5cm ● S=2cm



Θ=۰/۰۲ (ب)



Θ=۰ (الف)

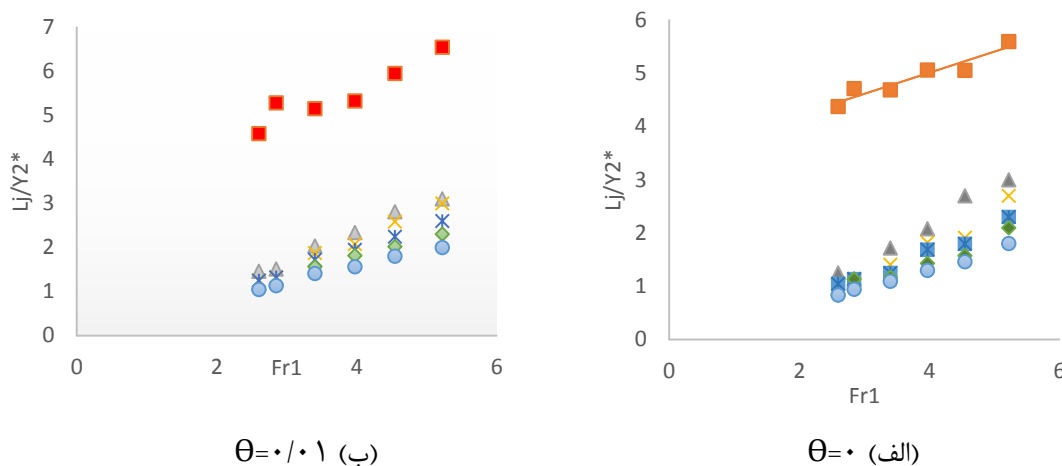
شکل ۴-۱۲ تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی در بستر با ارتفاع ۰/۸۵ سانتیمتر در فواصل مختلف بین زبری

شکل ۴-۱۳ الف، تأثیر فاصله بین زبری‌ها را در شیب صفر برای زبری سوم، نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با افزایش فاصله بین زبری‌ها از صفر تا ۲ سانتیمتر، مقدار $\frac{Lj}{y_2^*}$ کاهش و با افزایش عدد فرود، افزایش می‌یابد. به طوریکه در $S = 0$ حداکثر مقدار آن ۳ و حداقل مقدار آن برابر با ۱/۲۵، در صورتی که در $S = 2$ سانتیمتری، حداکثر مقدار آن ۱/۸ و حداقل آن ۰/۸۳ می‌باشد. در واقع افزایش فاصله از ۰ تا ۲ سانتیمتر، کاهش ۴۰ درصدی نسبت $\frac{Lj}{y_2^*}$ ، را منجر می‌شود. این مقدار کاهش نسبت $\frac{Lj}{y_2^*}$ در بسترهای زیر نسبت به بستر صاف، در دبی حداکثر ۶۸ درصد بود. حضور گردابه‌های چرخشی در بین زبری‌ها، عامل اصلی کاهش طول پرش هیدرولیکی می‌باشد.

شکل ۴-۱۳ ب، نتایج مربوط به تغییرات $\frac{Lj}{y_2^*}$ در مقابل عدد فرود اولیه پرش را برای شیب ۱ درصد نشان می‌دهد. نتایج مربوط به این حالت روند مشابه با شیب صفر داشت، تنها تفاوت موجود، افزایش شیب کف بود که افزایش طول پرش را منجر شد. مقایسه نمودارهای حداقل و حداکثر فاصله بین زبری‌ها

نشان داد که در دبی حداکثر، افزایش فاصله، نسبت $\frac{L_j}{y_2^*}$ را، $\frac{33}{33}$ درصد و در دبی حداقل، $\frac{28}{27}$ درصد کاهش داده است. در حالی که نسبت به بستر صاف در دبی حداکثر و حداقل مقدار کاهش به ترتیب $\frac{69}{4}$ و 80 درصد بود. طول نسبی پرش هیدرولیکی $\frac{L_j}{y_2^*}$ در بسترهای موجدار در بررسی‌های اید و راجاراتنام (۲۸) در حدود ۳، توکیای (۵۱) در حدود ۴، عباسپور (۱۴) برابر با ۳ و در تحقیق حاضر برابر با ۲، برآورد شد.

■ سطح صاف ▲ S=0 × S=0.5 cm * S=1cm ◆ S=1.5cm ● S=2cm



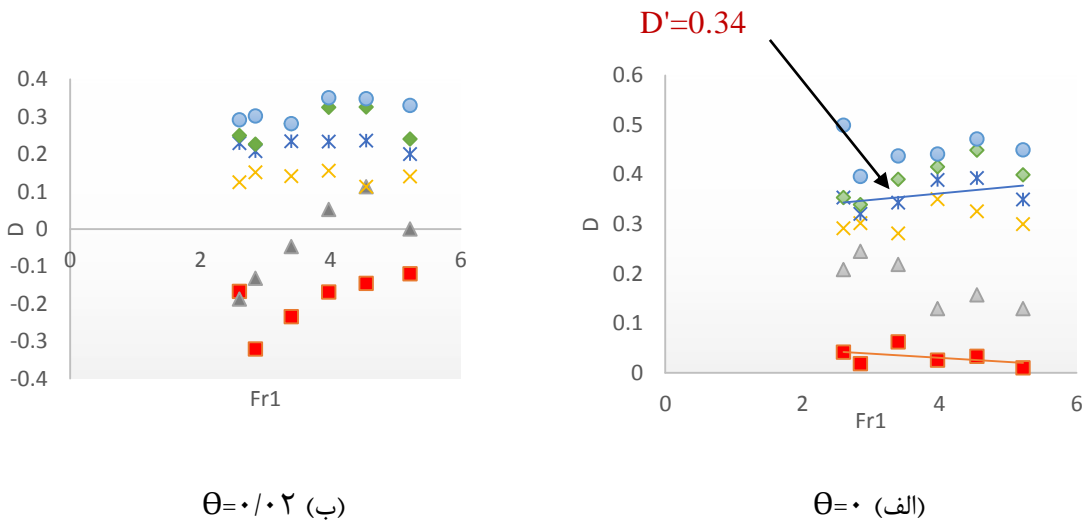
شکل ۴-۱۳ تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی در بستر با ارتفاع ۱/۵ سانتیمتر در فواصل مختلف بین زبری

۴-۱-۶- تأثیر فاصله بین زبری‌ها در تغییرات کاهش عمق نسبی در شیب صفر و ۰/۰۲

شکل ۴-۱۴ الف، تأثیر فاصله بین زبری‌ها را بر روی تغییرات نسبت D در زبری اول (لوله به ارتفاع ۰/۸۵ سانتیمتر) بیان می‌کند. با توجه به شکل، مقدار این پارامتر با افزایش عدد فرود به صورت نوسانی و با شیب ملایم، دچار افزایش و کاهش می‌شود. نکته دیگری هم که در شکل پیداست، این است که با افزایش مقدار فاصله بین زبری‌ها، مقدار کاهش عمق نسبی، افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه در معادله کاهش عمق نسبی، مقدار y_2^* به ازای اعداد فرود ثابت، مقداری ثابت دارد، با افزایش عدد فرود مقدار

y_2 برای یک فاصله ثابت کاهش یافته که نتیجه آن، افزایش نسبت کاهش عمق نسبی می‌باشد. در حداکثر مقدار عدد فرود، اگر $S = 0$ باشد، مقدار نسبت D نسبت به بستر صاف حدود ۱۲ برابر و در $S =$ سانتیمتری، ۴۴ برابر افزایش دارد. مقدار میانگینی که برای D برآورد شد، برابر با ۰/۳۴ می‌باشد. شکل ۴-۱۴، نتایج مربوط به تغییرات D در مقابل عدد فرود اولیه پرش را برای شیب ۲ درصد نشان می‌دهد. افزایش شیب کف، تشکیل عمق ثانویه مربوط به پرش را به تعویق انداخت و سبب افزایش طول پرش و طول غلطاب شد. مقایسه نمودارها نشان داد، که در دبی حداکثر برای بستر زبر با افزایش فاصله، نسبت D ، ۳۳ برابر افزایش یافت و در دبی حداقل مقدار آن ۸۳/۳۳ درصد بود و نسبت به بستر صاف در دبی حداکثر و حداقل مقدار افزایش به ترتیب ۱۷۵ و ۸۱/۲۵ درصد بود.

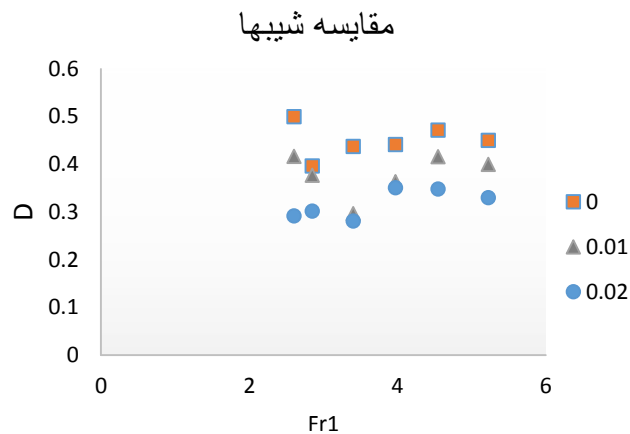
■ سطح صاف ▲ S=0 × S=0.5 cm * S=1cm ◆ S=1.5cm ● S=2cm



شکل ۴-۱۴ تغییرات مقدار کاهش عمق نسبی پرش هیدرولیکی برای زبری با ارتفاع ۰/۸۵ سانتیمتر

شکل ۴-۱۵ تغییرات مقدار پارامتر کاهش عمق نسبی را با افزایش شیب کف فلوم نشان می‌دهد. با افزایش شیب، مقدار y_2 افزایش می‌یابد و با توجه به اینکه مقدار y_2^* به ازای اعداد فرود ثابت، عددی

ثابت است، با قرارگیری در فرمول مربوط به پارامتر کاهش عمق نسبی، مقدار کاهش پارامتر موردنظر را به همراه داشت.

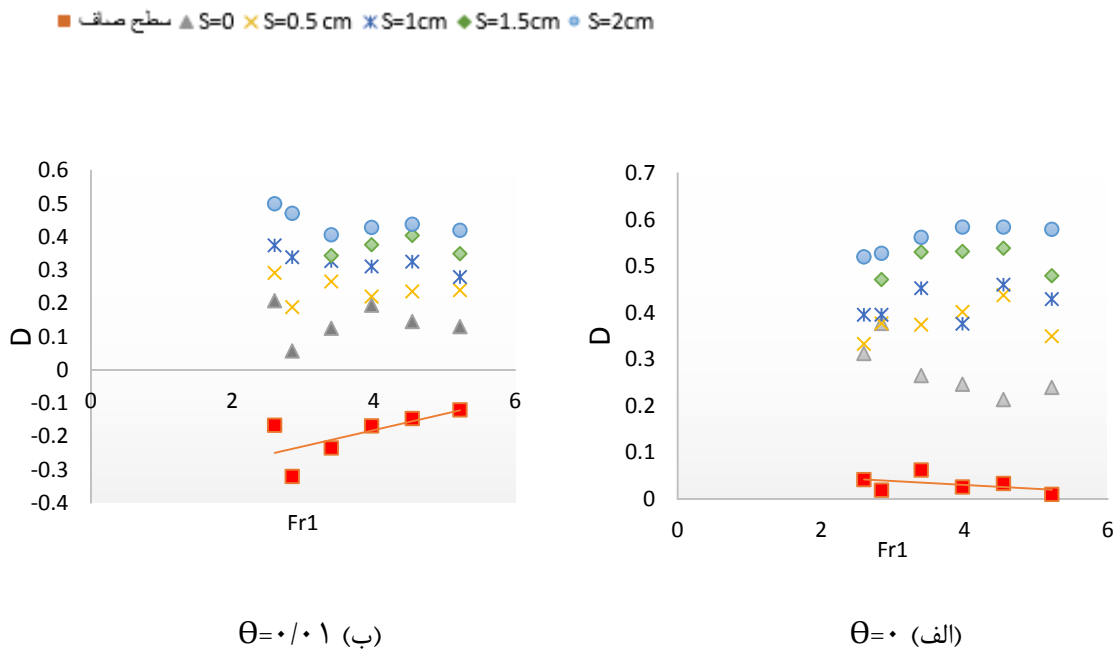


شکل ۴-۱۵ مقایسه درصد‌های مختلف شیب، در کاهش عمق نسبی در برابر عدد فرود

تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر روی تغییرات نسبت D در زبری سوم (لوله به ارتفاع $1/5$ سانتیمتر) در شکل ۴-۱۶ الف نشان داده شده است. تغییرات نوسانی مقدار پارامتر D با افزایش عدد فرود کاملاً محرز می‌باشد. افزایش مقدار فاصله بین زبری‌ها، باعث افزایش مقدار کاهش عمق نسبی شد. با توجه به اینکه در معادله کاهش عمق نسبی، مقدار y_2^* به ازای اعداد فرود ثابت، مقداری ثابت دارد، با افزایش عدد فرود مقدار y_2 برای یک فاصله ثابت کاهش یافته که نتیجه آن، افزایش نسبت کاهش عمق نسبی می‌باشد. در حداکثر مقدار عدد فرود، اگر $S = 0$ باشد، مقدار نسبت D نسبت به بستر صاف حدود ۲۳ برابر و در $S = 2$ سانتیمتری، ۵۸ برابر افزایش داشت.

شکل ۴-۱۶ ب، نتایج مربوط به تغییرات D در مقابل عدد فرود اولیه پرش را برای شیب ۱ درصد نشان می‌دهد. نتایج مربوط به این شیب حالت بینابین دو شیب صفر و شیب $0/02$ بود. با افزایش شیب کف، تشکیل عمق ثانویه مربوط به پرش به تأخیر انداخت که سبب افزایش طول پرش و طول غلطاب نسبت به شیب صفر شد. از مقایسه نمودارها چنین برآمد که در دبی حداکثر برای بستر زبر با افزایش فاصله،

نسبت D ، ۲۴۶ درصد افزایش یافت و در دبی حداقل مقدار آن ۱۵۰ درصد بود. در حالی که برای بستر صاف در دبی حداکثر و حداقل مقدار افزایش به ترتیب ۲۵۰ و ۲۱۲ درصد بود.



شکل ۴-۱۶ تغییرات مقدار کاهش عمق نسبی پرش هیدرولیکی برای زبری با ارتفاع ۱/۵ سانتیمتر

۲-۴- بررسی تأثیر ارتفاع زبری‌ها، بر مشخصات پرش هیدرولیکی

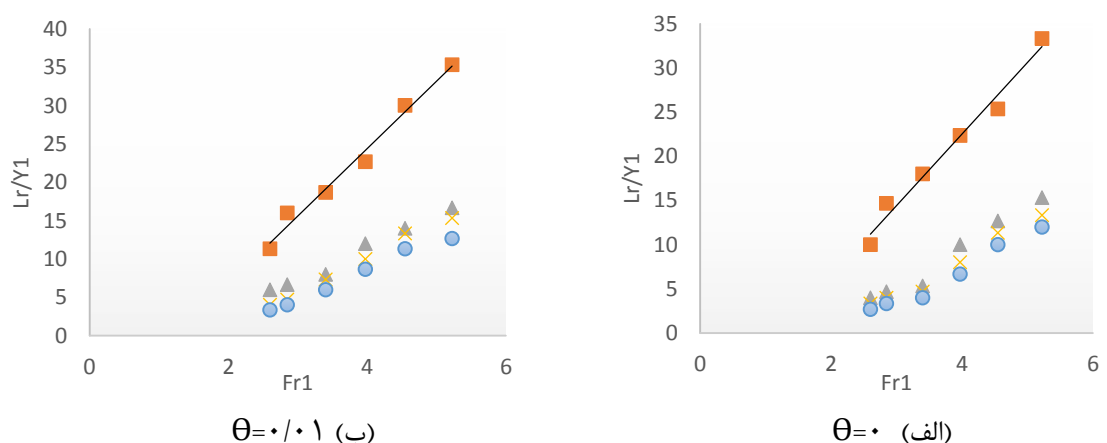
۲-۴-۱- تأثیر ارتفاع زبری‌ها بر تغییرات طول غلطاب در شیب صفر و ۰/۰۱

شکل ۴-۱۷ الف، تأثیر ارتفاع زبری‌ها (t) را در شیب صفر بر تغییرات $\frac{L_r}{y_1}$ نشان می‌دهد. مشخص است که افزایش ارتفاع زبری‌ها، کاهش مقدار $\frac{L_r}{y_1}$ ، افزایش عدد فرود، افزایش مقدار $\frac{L_r}{y_1}$ را باعث می‌شود. در زبری اول (ارتفاع لوله $t=0.85$ سانتیمتر) در $S = 0$ ، حداکثر مقدار آن ۱۵/۳۳ و حداقل مقدار آن برابر با ۴، در صورتی که در زبری سوم (ارتفاع لوله $t=1.5$ سانتیمتر)، حداکثر مقدار آن ۱۲ و حداقل آن ۲/۶۶ می‌باشد. در واقع با افزایش ارتفاع زبری‌ها از ۰/۸۵ تا ۱/۵ سانتیمتر، نسبت $\frac{L_r}{y_1}$ در حداکثر دبی ۲۱/۷۲ درصد کاهش یافت.

این مقدار کاهش در زبری اول، در حداکثر فرود اولیه نسبت به بستر صاف، برابر با ۵۰ درصد و در زبری سوم ۶۴ درصد کاهش $\frac{L_r}{y_1}$ بود. به دلیل افزایش ارتفاع زبری‌ها پرش هیدرولیکی سریع‌تر اتفاق افتاده است. زیرا مرتفع‌ترین مانع، نقش بیشتری در کاهش طول پرش دارد. الله دادی (۴)، مقدار این کاهش را نسبت به بستر صاف، در بیشترین مقدار عدد فرود، ۲۳/۳۳ درصد برآورد کرد.

نتایج مربوط به تغییرات $\frac{L_r}{y_1}$ در مقابل عدد فرود اولیه پرش را برای شیب ۱ درصد در شکل ۴-۱۷ ب محرز است. در این شیب با توجه به افزایش شیب کف، عمق ثانویه پرش دیرتر رخ داده که سبب افزایش طول پرش و طول غلطاب شده است. با بررسی نمودارها چنین استنباط می‌شود که در دبی حداکثر برای بستر زبر با افزایش ارتفاع زبری‌ها، نسبت $\frac{L_r}{y_1}$ ، ۲۴ درصد کاهش یافت و در دبی حداقل این کاهش ۴۴ درصد بود. در بسترهای زبر، نسبت به بستر صاف در حداکثر ارتفاع زبری، در دبی حداکثر و حداقل مقدار $\frac{L_r}{y_1}$ به ترتیب کاهشی برابر با ۶۴/۱۶ و ۷۰ درصد داشت.

■ بستر صاف ▲ t=0.85 cm ✕ t=1 cm ● t=1.5 cm



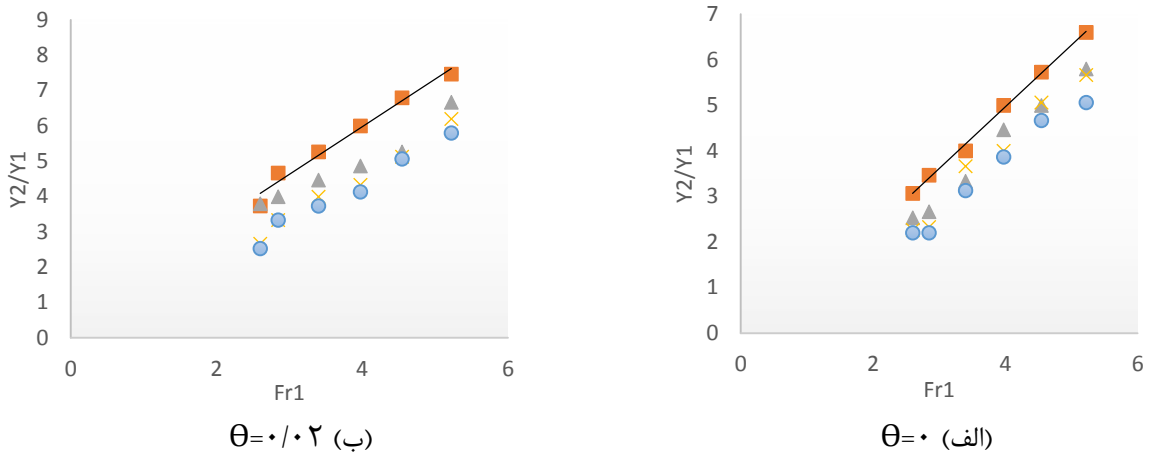
شکل ۴-۱۷ بررسی تغییرات طول نسبی غلطاب در برابر عدد فرود برای ارتفاع‌های مختلف زبری

۴-۲-۲- تأثیر ارتفاع زبری بر تغییرات نسبت عمق ثانویه به اولیه در شیب صفر و ۰/۰۲

شکل ۴-۱۸ الف، تأثیر ارتفاع زبری‌ها را در شیب صفر بر تغییرات $\frac{y_2}{y_1}$ نشان می‌دهد. افزایش ارتفاع زبری‌ها، اثر کاهش بر مقدار $\frac{y_2}{y_1}$ و افزایش عدد فرود، اثر افزایشی بر آن داشت. به طوریکه در زبری اول ($t=0/85$ سانتیمتر) اگر $S = 0$ باشد، افزایش ارتفاع زبری‌ها از ۰/۸۵ تا ۱/۵ سانتیمتر، کاهش ۱۳/۸ درصدی نسبت $\frac{y_2}{y_1}$ را در حداکثر دبی دربردارد. همچنین در زبری اول، در حداکثر فرود اولیه نسبت به بستر صاف، نسبت $\frac{y_2}{y_1}$ کاهش برابر با ۱۲/۱۲ درصد و در زبری سوم ۲۴/۲۴ درصد کاهش $\frac{y_2}{y_1}$ دیده می‌شود.

شکل ۴-۱۸ ب، نتایج مربوط به تغییرات $\frac{y_2}{y_1}$ در مقابل عدد فرود اولیه پرش را برای شیب ۲ درصد نشان می‌باشد. از آنجا که با افزایش شیب کف نیروی ناشی از وزن آب به عنوان نیروی حجمی وارد بر توده جهش هیدرولیکی افزایش می‌یابد، بنابراین سهم عمق ثانویه برای ایجاد نیروی فشاری و هیدرودینامیک جهت برابری با نیروهای ناشی از عمق اولیه جهش کاهش خواهد یافت و افزایش طول پرش را شامل می‌شود. مقایسه نمودارها نشان داد که در دبی حداکثر در بستر زبر با افزایش ارتفاع زبری‌ها، نسبت $\frac{y_2}{y_1}$ ، ۲۵/۵ درصد کاهش و در دبی حداقل، ۱۲/۱۲ درصد کاهش یافت. در حالی که در بسترهای زبر، نسبت به بستر صاف در دبی حداکثر و حداقل مقدار کاهش به ترتیب ۲۲/۶۶ و ۱۶ درصد بود.

■ بستر صاف ▲ t=0.85 cm ✕ t=1 cm ● t=1.5 cm



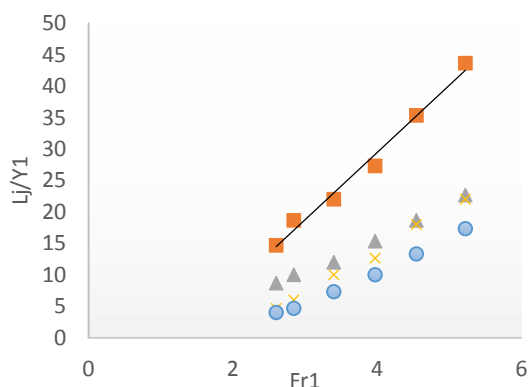
شکل ۴-۱۸ بررسی تغییرات عمق ثانویه به اولیه در برابر عدد فرود برای ارتفاع‌های مختلف زبری

۴-۲-۳- تأثیر ارتفاع زبری‌ها بر تغییرات طول نسبی در شیب صفر و ۰/۰۱

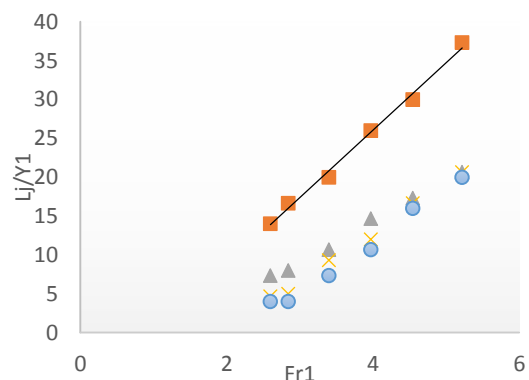
تغییرات $\frac{L_j}{y_1}$ تحت تأثیر ارتفاع زبری‌ها در شکل ۴-۱۹ الف در شیب صفر نشان داده شده است. دیده می‌شود که، با افزایش ارتفاع زبری‌ها، مقدار $\frac{L_j}{y_1}$ روند کاهشی و با افزایش عدد فرود، روند افزایشی دارد. به طوریکه در زبری اول ($t=0.85$ سانتیمتر) با $S = 0$ ، حداکثر مقدار آن $20/6$ ، در صورتی که در زبری سوم ($t=1/5$ سانتیمتر)، حداکثر مقدار آن 14 می‌باشد. در حقیقت، افزایش ارتفاع زبری‌ها از 0.85 تا $1/5$ سانتیمتر، نسبت $\frac{L_j}{y_1}$ در حداکثر دبی 30 درصد کاهش می‌دهد. در زبری اول، کاهش $44/8$ درصدی و در زبری سوم کاهش $62/5$ درصدی نسبت $\frac{L_j}{y_1}$ در بیشترین مقدار عدد فرود در مقایسه با بستر صاف دیده می‌شود. دلیل این کاهش بدین شرح است که، با افزایش ارتفاع زبری‌ها، گردابه‌هایی در مسیر جریان تولید می‌شود که باعث استهلاک بیشتر انرژی آب، رخ دادن سریع‌تر پرش و کوتاه شدن بیشتر طول پرش می‌شود.

شکل ۴-۱۹، نتایج مربوط به تغییرات $\frac{L_j}{y_1}$ در مقابل عدد فرود اولیه پرش را برای شیب ۱ درصد نشان می‌دهد. نتایج مربوط به این حالت روند مشابه با شیب صفر داشت. تأثیری که شیب کف در پرش هیدرولیکی داشت، افزایش طول پرش و طول غلطاب بود. با بررسی نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که در دبی حداکثر برای بستر زبر با افزایش ارتفاع زبری‌ها، نسبت $\frac{L_j}{y_1}$ ۲۳/۵ درصد کاهش یافت و در دبی حداقل مقدار آن ۵۴ درصد بود. در حالی که در بسترهای زبر، نسبت به بستر صاف در دبی حداکثر و حداقل مقدار کاهش به ترتیب ۶۰ و ۷۲ درصد بود. گردابه‌های موجود در مسیر جریان، در شیب مثبت هم، همان اثر کاهشی مشابه با شیب صفر را در نسبت $\frac{L_j}{y_1}$ می‌گذارد.

■ بستر صاف ▲ t=0.85 cm ✕ t=1 cm ● t=1.5 cm



(ب) $\theta = 0.1$



(الف) $\theta = 0$

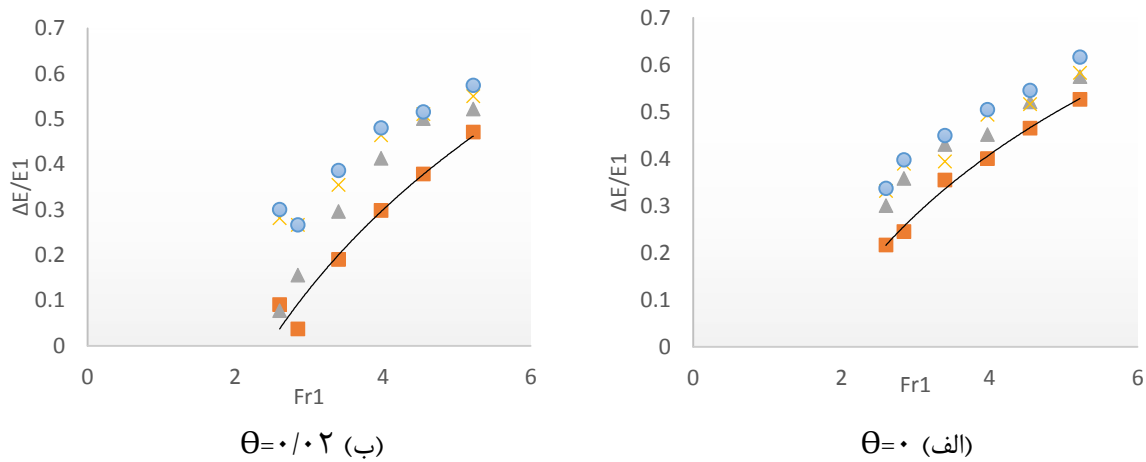
شکل ۴-۱۹ تغییرات طول نسبی پرش بر روی بستر زبر با ارتفاع‌های مختلف به ازای اعداد فرود اولیه

۴-۲-۴- تأثیر ارتفاع زبری‌ها بر اتلاف انرژی در شیب صفر و ۰/۰۲

شکل ۴-۲۰ الف، تأثیر ارتفاع زبری‌ها را در شیب صفر بر تغییرات $\frac{\Delta E}{E_1}$ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع زبری‌ها و افزایش عدد فرود، مقدار $\frac{\Delta E}{E_1}$ افزایش می‌یابد. به طوریکه در زبری اول ($t=0/85$ سانتیمتر) در $S = 0$ ، در بیشترین مقدار عدد فرود، $0/57$ و در کمترین مقدار عدد فرود، مقدار آن برابر با $0/3$ ، در صورتی که در زبری سوم ($t=1/5$ سانتیمتر)، به ترتیب $0/61$ و $0/3$ می‌باشد. در حقیقت، با افزایش ارتفاع زبری‌ها از $0/85$ تا $1/5$ سانتیمتر، نسبت $\frac{\Delta E}{E_1}$ در حداکثر دبی ۷ درصد افزایش یافت. همچنین در زبری اول، در حداکثر فرود اولیه نسبت به بستر صاف، نسبت $\frac{\Delta E}{E_1}$ افزایشی برابر با $9/6$ درصد و در زبری سوم $17/3$ درصد افزایش $\frac{\Delta E}{E_1}$ دیده می‌شود. دلیل این کاهش بدین شرح است که، با افزایش ارتفاع زبری‌ها، گردابه‌های به وجود آمده در قسمت زبر کانال باعث استهلاک بیشتر انرژی آب، تلاطم بیشتر، رخ دادن سریع‌تر پرش و کوتاه شدن بیشتر طول پرش می‌شود.

شکل ۴-۲۰ ب، نتایج مربوط به تغییرات $\frac{\Delta E}{E_1}$ در مقابل عدد فرود اولیه پرش را در شیب ۲ درصد نشان می‌دهد. افزایش شیب کف، تأثیر خود را در دیرتر تشکیل شدن عمق ثانویه مربوط به پرش و افزایش طول پرش و طول غلطاب نشان داد. نتایج بدین شرح است که، در دبی حداکثر در بستر زبر با افزایش ارتفاع زبری‌ها، نسبت $\frac{\Delta E}{E_1}$ $9/6$ درصد افزایش یافت و در دبی حداقل مقدار آن ۴ برابر بود. در حالی که در بسترهای زبر، نسبت به بستر صاف در دبی حداکثر و حداقل مقدار افزایش به ترتیب $21/27$ و 233 درصد بود. دلیل اتلاف بیشتر انرژی در دبی کم این است که، به دلیل سرعت کم، حرکت پرتابی و رو به جلوی آب و همچنین تلاطم حباب‌های هوا کمتر است. به همین علت، زبری‌ها عملکرد بهتری در افزایش اتلاف انرژی دارند. به عبارتی بین شیب و استهلاک انرژی، نسبت عکس برقرار است.

■ بستر صاف ▲ t=0.85 cm ✕ t=1 cm ● t=1.5 cm



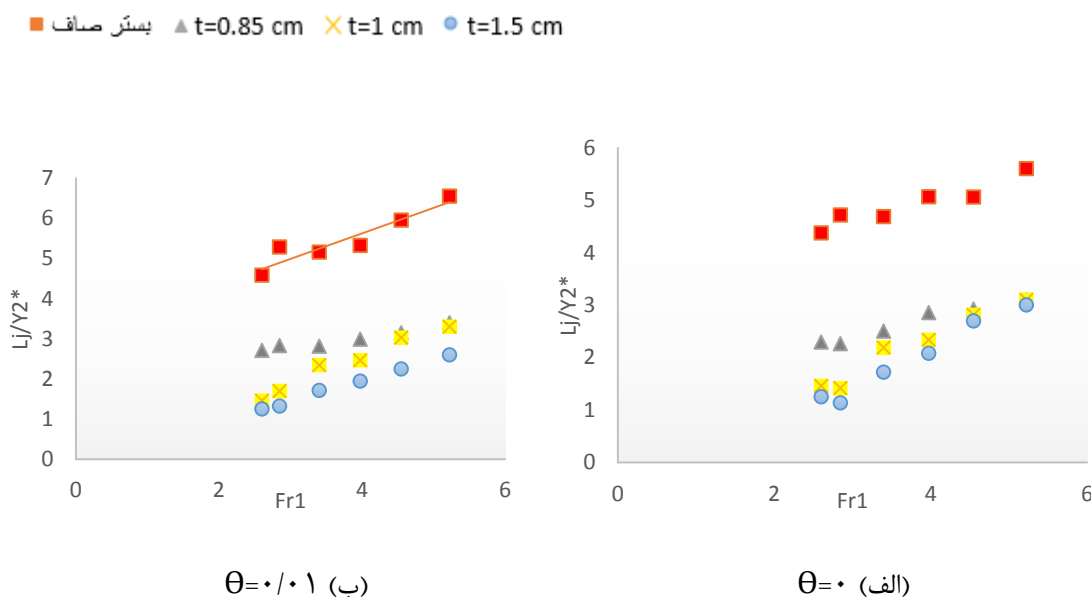
شکل ۴-۲۰ تغییرات اتلاف انرژی نسبی پرش روی بسترهای موج دار سینوسی با ارتفاعهای مختلف

۴-۲-۵- تأثیر ارتفاع زبریها بر تغییرات طول نسبی در شیب صفر و ۰/۰۱

شکل ۴-۲۱ الف، مربوط به تغییرات $\frac{L_j}{y_2^*}$ ، متأثر از ارتفاع زبریها در شیب صفر می باشد. همانطور که پیدا است با افزایش ارتفاع زبریها، کاهش مقدار $\frac{L_j}{y_2^*}$ و افزایش عدد فرود، افزایش آن را به دنبال دارد. به طوریکه در زبری اول ($t=0/85$ سانتیمتر) اگر $S = 0$ باشد، حداکثر مقدار آن $3/1$ ، و در زبری سوم ($t=1/5$ سانتیمتر)، حداکثر مقدار آن $1/8$ می باشد. در واقع با افزایش ارتفاع زبریها از $0/85$ تا $1/5$ سانتیمتر، نسبت $\frac{L_j}{y_2^*}$ در حداکثر دبی ۴۲ درصد کاهش یافت.

این کاهش در زبری اول، در حداکثر فرود اولیه نسبت به بستر صاف، برابر با ۵۰ درصد و در زبری سوم برابر با ۶۴ درصد بود. دلیل این موضوع این است که با افزایش ارتفاع زبریها به رخداد پرش هیدرولیکی سرعت می بخشد و مانع از افزایش طول پرش می شود.

شکل ۴-۲۱ ب، نتایج مربوط به تغییرات $\frac{L_j}{y_2^*}$ در مقابل عدد فرود اولیه پرش را برای شیب ۱ درصد نشان می‌دهد. افزایش شیب کف، افزایش طول پرش را به همراه داشت که همین عامل باعث تشکیل عمق ثانویه در فاصله دورتری از شروع پرش شد. نتایج به دست آمده بدین صورت بود، که در دبی حداکثر برای بستر زبر با افزایش ارتفاع زبری‌ها، نسبت $\frac{L_j}{y_2^*}$ ، ۲۴ درصد کاهش یافت و در دبی حداقل مقدار آن ۵۳ درصد بود. در حالی که در بسترهای زبر، نسبت به بستر صاف در دبی حداکثر و حداقل مقدار کاهش به ترتیب ۶۰ و ۷۲ درصد بود. در دبی حداکثر تفاوت کمتری در کاهش طول نسبی پرش مشاهده شد. به دلیل سرعت و تلاطم زیاد حباب‌های آب در شیب مثبت، زبری‌ها همانند بست صاف عمل می‌کنند.



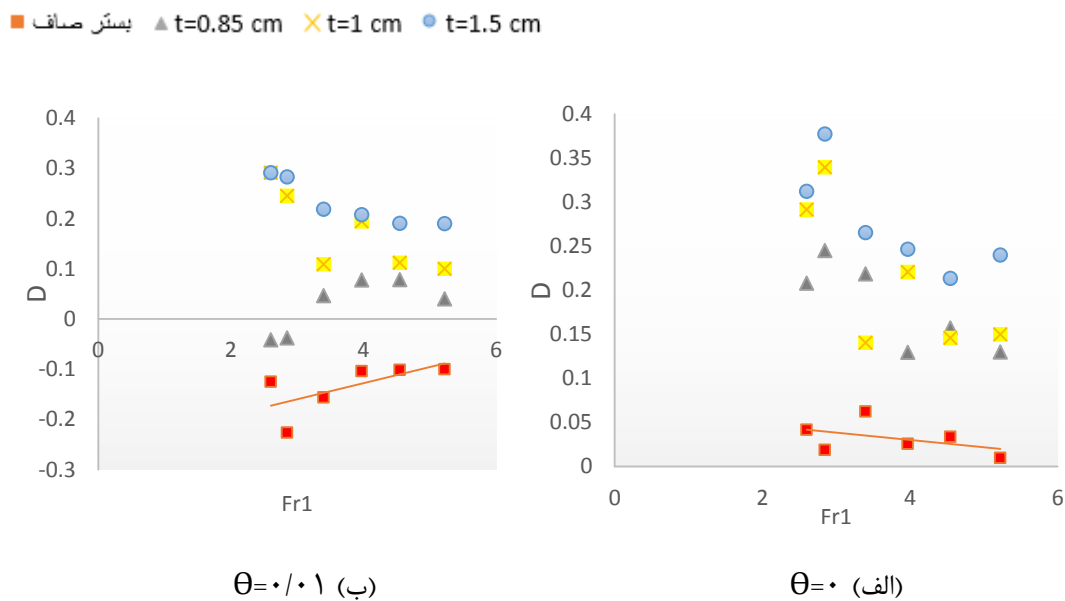
شکل ۴-۲۱ تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی در بستر با ارتفاع‌های مختلف زبری

۴-۲-۶- تأثیر ارتفاع زبری‌ها در تغییرات کاهش عمق نسبی در شیب صفر و ۰/۰۱

شکل ۴-۲۲ الف، نشان‌دهنده تغییرات پارامتر کاهش عمق نسبی D تحت تأثیر افزایش ارتفاع زبری‌ها در برابر عدد فرود اولیه، در شیب صفر و $S = 0$ می‌باشد. در شکل، روند نوسانی مقدار D در مقابل عدد فرود کاملاً محسوس است. همچنین با افزایش ارتفاع زبری‌ها، مقدار این پارامتر رو به افزایش می‌باشد.

با زیادتر شدن ارتفاع زبری‌ها، در مقدار D ، افزایش $45/8$ درصدی در حداکثر عدد فرود حاصل شد. در مقایسه با بستر صاف هم، این کاهش در حداکثر عدد فرود به 95 درصد رسید، که افزایش قابل توجهی بود. ثابت بودن مقدار γ_2^* به ازای اعداد فرود یکسان است که با قرارگیری در معادله کاهش عمق نسبی، باعث افزایش مقدار D می‌شود. اید و راجاراتنام (۲۸) مقدار متوسط D را $0/25$ برآورد کردند و در این تحقیق، مقدار متوسط آن $0/23$ بدست آمد.

شکل ۴-۲۲، نتایج مربوط به تغییرات D در مقابل عدد فرود اولیه پرش را برای شیب 1 درصد نشان می‌دهد. در این شیب هم روند نتایج همانند شیب صفر و به صورت نوسانی و با شیب ملایم می‌باشد. تنها تفاوت موجود، افزایش طول پرش می‌باشد که به دلیل حضور نیروی حجمی آب در جهت شیب است. با افزایش ارتفاع زبری‌ها، مقدار افزایش عمق نسبی در حداکثر فرود اولیه، 375 برابر و در مقایسه با بستر صاف در همین شیب، 47 درصد بود.



شکل ۴-۲۲ تغییرات مقدار کاهش عمق نسبی پرش هیدرولیکی برای زبری با ارتفاع‌های مختلف

۳-۴- بررسی پروفیل‌های سطح آب، بابت و بی بعد

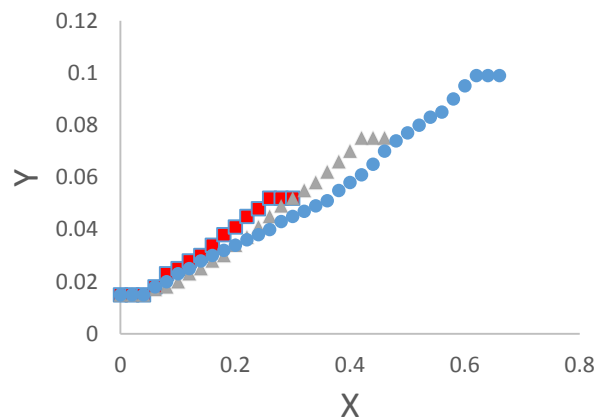
۱-۳-۴- تأثیر دبی بر پروفیل‌های سطح آب

۱-۱-۳-۴- تأثیر دبی بر پروفیل سطح آب در بستر صاف با شیب صفر و ۰/۰۲

پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی برای تعیین محل و میزان عمق اولیه y_1 ، عمق ثانویه y_2 و طول پرش هیدرولیکی L_j استفاده می‌گردد. در شکل‌های بی بعد شده، نسبت $\frac{y-y_1}{y_2-y_1}$ در مقابل $\frac{x}{L_j}$ رسم شده است، که در آن y عمق جریان در هر مقدار x ، و x فاصله از ۵ سانتیمتری قبل از پرش تا ۵ سانتیمتری بعد از پرش می‌باشد. نمودارها به صورتی هستند که تمام آزمایش‌ها را می‌توان با یک منحنی میانگین تعریف نمود.

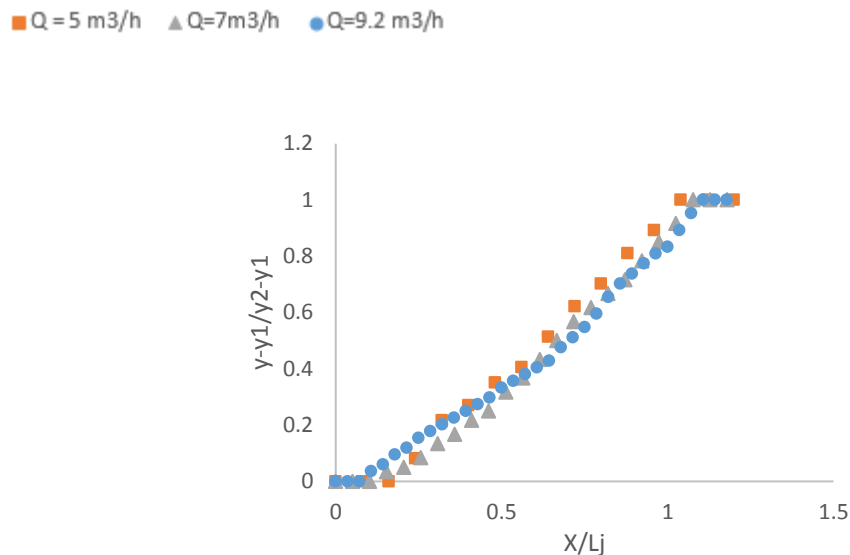
شکل ۲۳-۴ نشان‌دهنده پروفیل بابت سطح آب در بستر صاف و بدون شیب با ۳ دبی به مقدارهای ۵، ۷ و ۹/۲ مترمکعب بر ساعت می‌باشد. همانطور که مشخص است، در تمامی دبی‌ها، پروفیل سطح آب یک روند مشابه را دارد و در دبی‌های بیشتر، طول پرش بیشتر و عمق ثانویه دیرتر تشکیل شده و نمودار از طول و سطح بیشتری برخوردار است.

■ Q=5 m³/h ▲ Q=7m³/h ● Q=9.2 m³/h



شکل ۲۳-۴ پروفیل بابت سطح آب در ۳ دبی مختلف در بستر صاف با شیب صفر

شکل ۴-۲۴ بیانگر پروفیل بی‌بعد سطح آب در سطح صاف با شیب صفر و با سه دبی ۵، ۷ و ۹/۲ مترمکعب بر ساعت می‌باشد. نمودارهای بی‌بعد شده از روند بهتری برخوردارند و می‌توان با یک منحنی میانگین، پروفیل جهش آب را برای تمام آزمایشات بیان نمود.

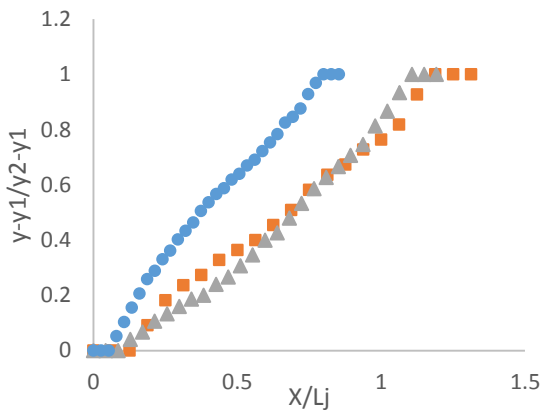


شکل ۴-۲۴ پروفیل بی‌بعد سطح آب در ۳ دبی مختلف در بستر صاف با شیب صفر

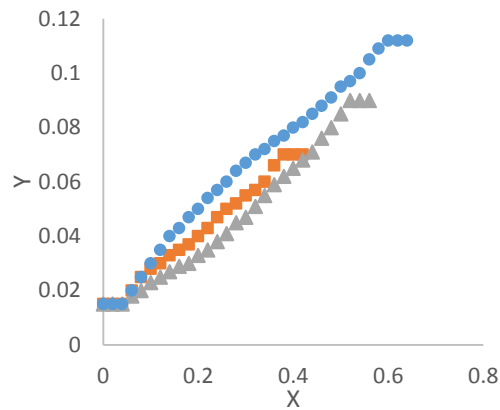
شکل ۴-۲۵ الف، پروفیل بابت سطح آب را در بستر صاف و با شیب ۲ درصد و در سه مقدار دبی ۵، ۷ و ۹/۲ مترمکعب بر ساعت نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده، شبیه به نتایج در شیب صفر بود. همانطور که در شکل دیده می‌شود، با افزایش دبی و همچنین با افزایش شیب کف فلوم، طول پرش افزایش یافته و منجر به تشکیل عمق ثانویه در فاصله دورتری از شروع پرش شد.

شکل ۴-۲۵ ب، پروفیل بی‌بعد شده سطح آب در بستر صاف با شیب ۰/۰۲ در سه دبی فوق است. منحنی‌ها روندی یکسان و نسبت به بستر با شیب صفر، طول موج بیشتری دارند. منحنی‌های بی‌بعد، پراکندگی بهتری نسبت به منحنی‌های بابت را شامل می‌شوند.

■ Q=5 m³/h ▲ Q=7m³/h ● Q=9.2 m³/h



(ب)



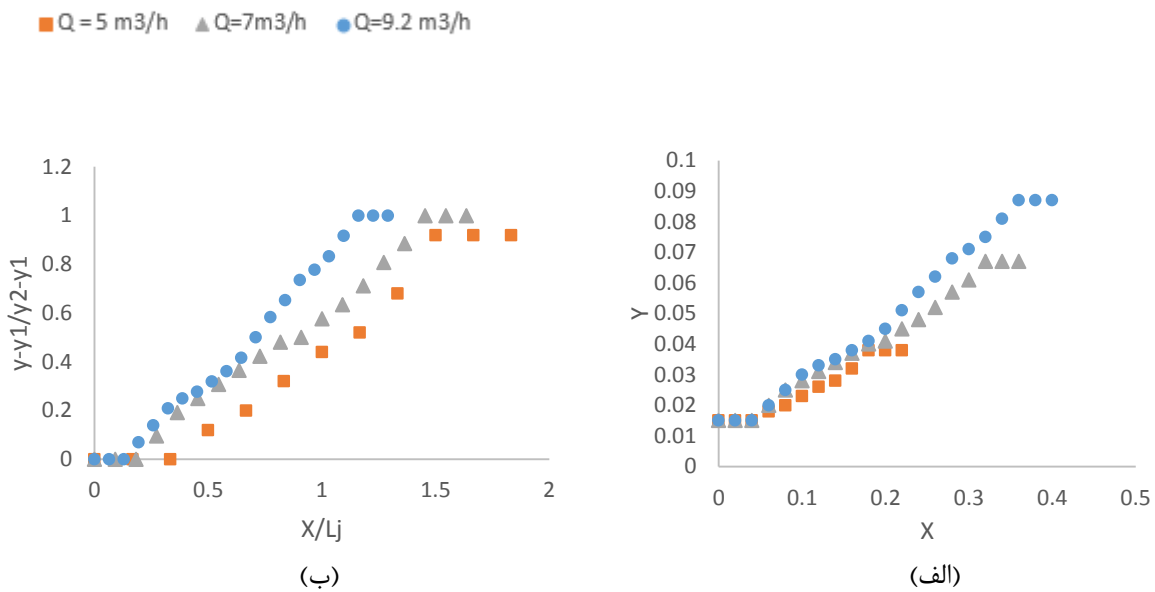
(الف)

شکل ۴-۲۵ پروفیل بابعده(الف) و بی‌بعده(ب) سطح آب در ۳ دبی مختلف در بستر صاف با شیب ۰/۰۲

۴-۳-۱-۲- تأثیر دبی بر شکل پروفیل سطح آب در بسترهای زبر با $S=0$ و شیب صفر

شکل ۴-۲۶ الف، پروفیل بابعده سطح آب را برای زبری اول (لوله با قطر ۱/۷ سانتیمتر) در شیب صفر و $S=0$ و برای سه دبی ۵، ۷ و ۹/۲ مترمکعب بر ساعت را نشانگر می‌باشد. ملاحظه می‌شود که با افزایش دبی، طول پرش و به تبع آن طول پروفیل سطح آب افزایش یافته است. همچنین با افزایش فاصله از ۵ سانتیمتری پرش، روند پروفیل حالت صعودی دارد تا زمانی که به یک مقدار ثابت می‌رسد. هر سه منحنی، حالتی مشابه دارند و هرکدام به تنهایی می‌تواند حالت جریان را بازگو کند.

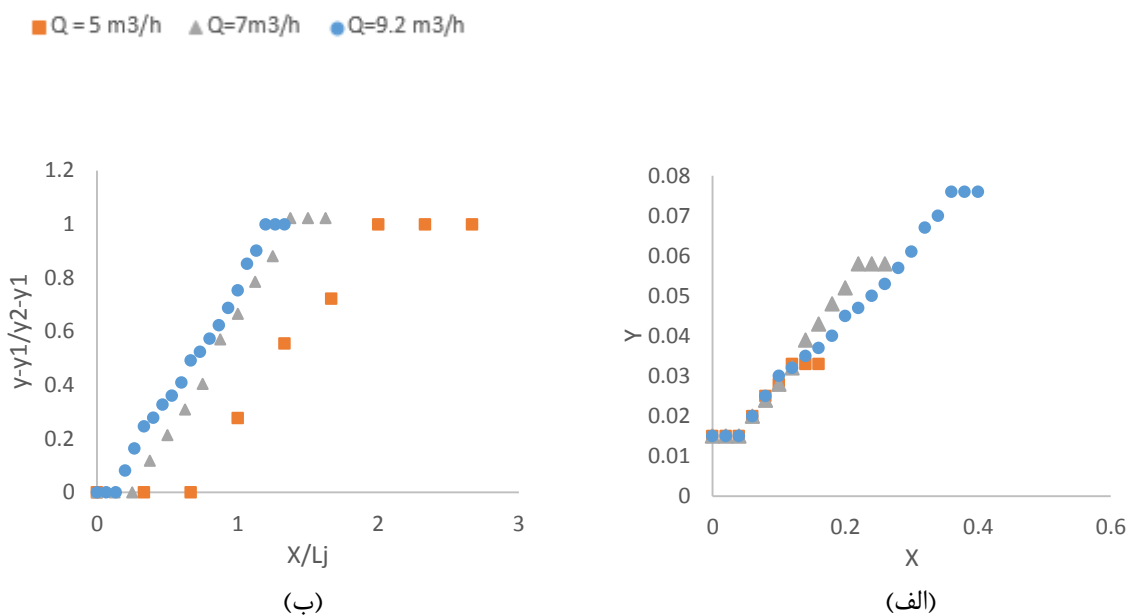
شکل ۴-۲۶ ب، نمودار بی‌بعده شده سطح آب در حالت قبلی است. در این شکل هم تمامی منحنی‌ها روندی مشابه و صعودی دارند تا زمانی که به مقداری ثابت می‌رسند. در نمودارهای بی‌بعده پراکندگی داده بصورت قابل قبول تری می‌باشد. همچنین هر نمودار معرف حالت جریان است.



شکل ۴-۲۶ پروفیل بابت (الف) و بی بعد (ب) سطح آب در ۳ دبی مختلف در بستر با زبری اول در شیب صفر

شکل ۴-۲۷ الف، مشخص کننده پروفیل بابت سطح آب برای زبری سوم (لوله با قطر ۳ سانتیمتر) در شیب صفر و $S=0$ ، برای سه دبی ۵، ۷ و $9/2$ مترمکعب بر ساعت می باشد. منحنی ها روندی مشابه با منحنی های زبری اول در شکل ۴-۲۶ الف دارند، با این تفاوت که از سطح و طول پایین تری برخوردار هستند. به این دلیل که با افزایش ارتفاع زبری ها، پرش سریع تر اتفاق افتاده و طول پرش و طول غلطاب کاهش پیدا کرده است.

شکل ۴-۲۷ ب، پروفیل بی بعد شده حالت قبلی است. در این حالت هم پراکندگی داده ها به خوبی به نمایش درآمده و منحنی ها روندی خوب و یکسان دارند که می توانند جریان را تعریف کنند.



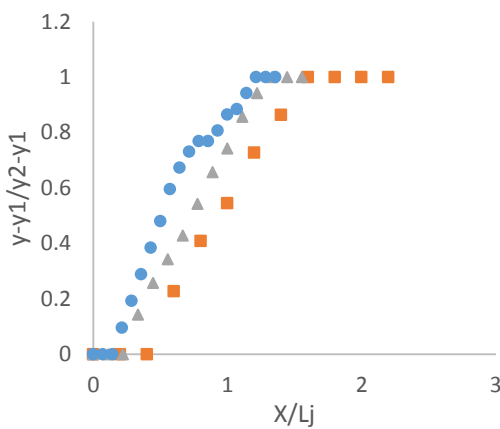
شکل ۴-۲۷ پروفیل بابعدها (الف) و بیبعدها (ب) سطح آب در ۳ دبی مختلف در بستر با زبری سوم در شیب صفر

۴-۳-۱-۳- تأثیر دبی بر پروفیل سطح آب در بسترهای زبر، با $S=2$ سانتیمتر و شیب 0.02

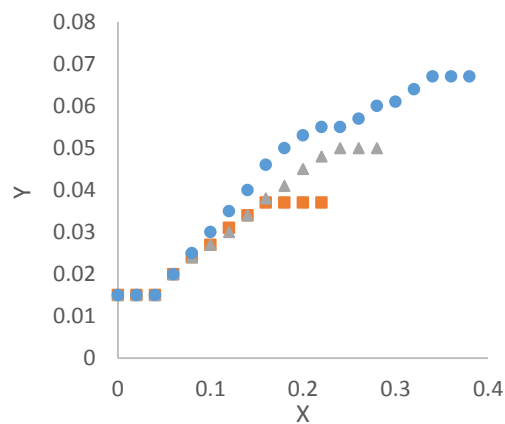
شکل ۴-۲۸ الف، نمودار بابعدها پروفیل سطح آب را برای حالت اول زبری، در شیب 0.02 کانال، زمانی که فاصله بین زبریها ۲ سانتیمتر بوده است و برای سه دبی ۵، ۷ و $9/2$ مترمکعب بر ساعت نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است، با افزایش فاصله از ۵ سانتیمتری پرش منحنیها حالت صعودی به خود گرفته‌اند، که نشان‌دهنده وقوع پرش آب می‌باشد. همه منحنیها در یک روند قرار دارند و نسبت به شیب صفر، دارای طول و عمق بیشتری هستند. زیرا نیروی وزن آب باعث کشیده شدن طول پرش در جهت شیب می‌شود. اما در این حالت هم هرکدام به تنهایی می‌تواند رژیم جریان را تعریف کند.

شکل ۴-۲۸ ب، نمودار بیبعدها شده پروفیل سطح آب در حالت قبل است، که پراکندگی و روندی مشابه و قابل قبول را نشان می‌دهد.

■ Q=5 m³/h ▲ Q=7m³/h ● Q=9.2 m³/h



(ب)

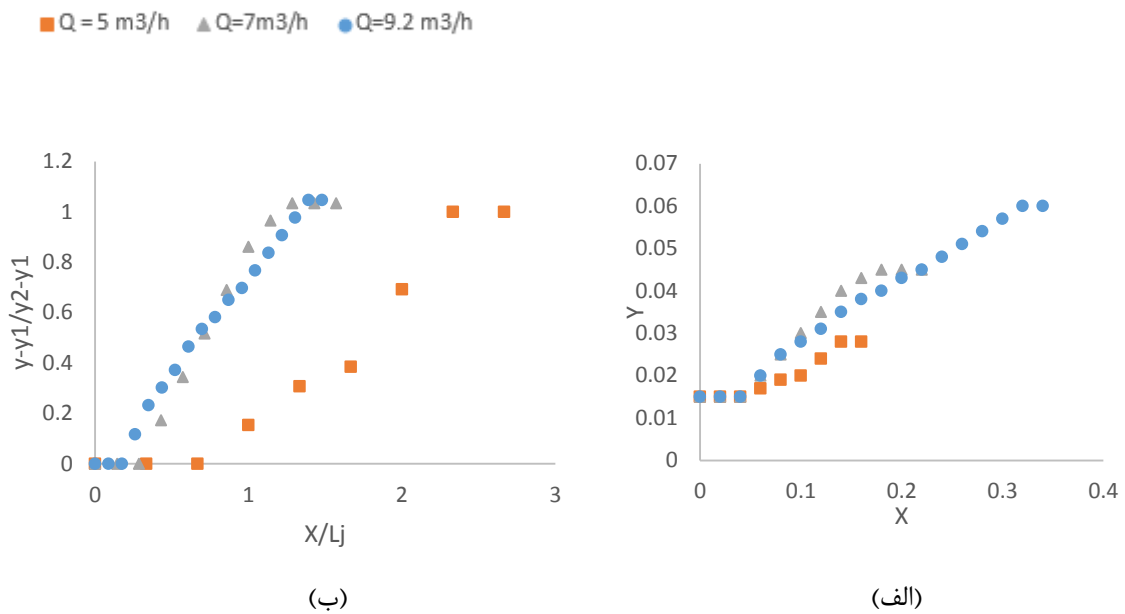


(الف)

شکل ۴-۲۸ پروفیل بابعده (الف) و بی‌بعده (ب) سطح آب در ۳ دبی مختلف در بستر با زبری اول در شیب ۰/۰۲

شکل ۴-۲۹ الف، نمودار بابعده پروفیل سطح آب در شیب ۲ درصد برای زبری سوم (لوله با قطر ۳ سانتیمتر) در سه دبی ۵، ۷ و ۹/۲ مترمکعب بر ساعت در $S=2$ سانتیمتر می‌باشد. شواهد حاکی از آن است که با افزایش دبی، طول پرش و طول منحنی‌ها افزایش یافته، که باعث شده است عمق ثانویه در فاصله دورتری از شروع پرش بدست آید. منحنی‌ها در هر سه مقدار دبی، یک روند و همپوشانی دارند. نتایج مربوط به این حالت روند مشابه با شیب صفر داشت با این تفاوت که با افزایش شیب کف عمق ثانویه مربوط به پرش دیرتر اتفاق افتاده که همین امر طول پرش و طول غلطاب را افزایش داده است. اما نسبت به زبری حالت اول از X و y کمتری برخوردارند. زیرا به دلیل افزایش ارتفاع زبری‌ها، پرش سریع‌تر اتفاق افتاده و طول پرش به دلیل وجود جریان‌های چرخشی، کوتاه شده است.

شکل ۴-۲۹ ب، نمودار بی‌بعده شده حالت قبل است که پروفیل سطح آب را در روندی مشابه، برای سه دبی نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۹ پروفیل باعد(الف) و بی بعد(ب) سطح آب در ۳ دبی مختلف در بستر با زبری سوم در شیب ۰/۰۲

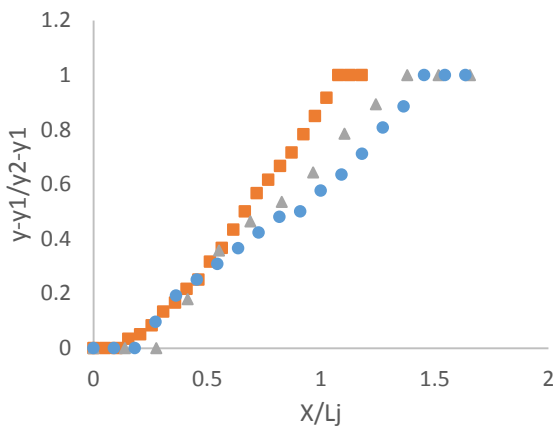
۴-۳-۲- تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر پروفیل سطح آب

۴-۱-۲-۱- تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر پروفیل سطح آب در شیب صفر

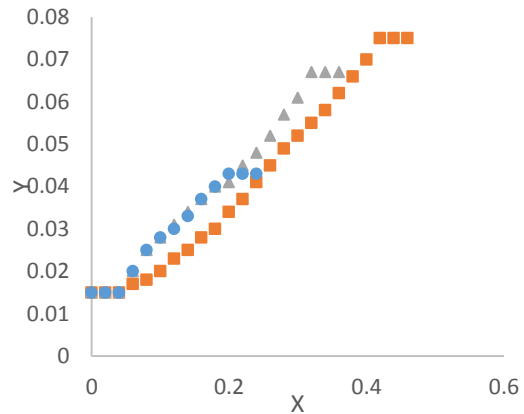
شکل ۴-۳۰ الف و ب، نشان‌دهنده تأثیر فاصله بین زبری‌ها در شیب صفر بر نمودار باعد و بی بعد پروفیل سطح آب، برای زبری اول می‌باشد. همانطور که مشخص است، با افزایش فاصله بین زبری‌ها، سطح پروفیل کاهش می‌یابد. به صورتی که حداکثر مقدار X در $S=0$ ، $0/36$ متر و در $S=2$ سانتیمتری، برابر با $0/24$ متر می‌باشد. در واقع با افزایش فاصله از ۰ تا ۲ سانتیمتر، سطح پروفیل آب ۳۳ درصد کاهش یافته است. همچنین نسبت به بسترساف، در سطح پروفیل آب ۴۸ درصد کاهش دیده می‌شود. دلیل این موضوع این است که با افزایش فاصله بین زبری‌ها، گردابه‌های تشکیل شده در بین فواصل زبری، باعث سریع‌تر اتفاق افتادن پرش هیدرولیکی می‌شود که نتیجه آن، کاهش طول پرش و نهایتاً کاهش طول غلطاب و سطح پروفیل می‌باشد.

$$\theta = 0, Q = 7 \text{ m}^3/\text{h}$$

■ بسترساف ▲ S=0 ● S=2 cm



(ب)



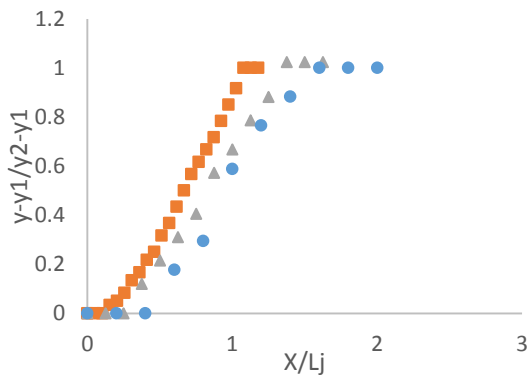
(الف)

شکل ۴-۳۰ پروفیل بابعده(الف) و بیبعده(ب) سطح آب در بستر با زبری اول در شیب صفر

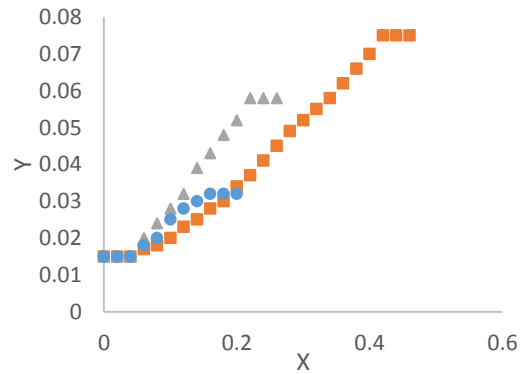
شکل ۴-۳۱ الف و ب، بیان کننده تأثیر فاصله بین زبری‌ها در شیب صفر بر نمودار بابعده و بیبعده پروفیل سطح آب، برای زبری سوم می‌باشد. در شکل مشخص است، که با افزایش فاصله بین زبری‌ها، سطح پروفیل کاهش می‌یابد. به صورتی که حداکثر مقدار X در $S=0$ ، $0/26$ متر و در $S=2$ سانتیمتری، برابر با $0/2$ متر می‌باشد. با افزایش فاصله از 0 تا 2 سانتیمتر، سطح پروفیل آب $44/82$ درصد کاهش یافته، که این مقدار کاهش، نسبت به زبری اول، شکل ۴-۳۰، در همین حالات، 2 برابر بیشتر است. همچنین نسبت به بسترساف در سطح پروفیل آب $57/33$ درصد کاهش دیده می‌شود. در این حالت هم مشابه زبری اول، با افزایش فاصله بین زبری‌ها طول پرش کاهش یافته و به تبع آن پروفیل سطح آب هم نسبت به سطح صاف با کاهش مواجه شده است. به دلیل حضور گردابه‌های چرخشی در فواصل بین زبری، پرش هیدرولیکی مجبور به رخداد سریع‌تر شده، که نتیجه آن کاهش طول پرش و نهایتاً کاهش طول غلطاب و سطح پروفیل آب، می‌باشد.

$$\theta = 0, Q = 7 \text{ m}^3/\text{h}$$

■ بستری صاف ▲ S=0 ● S=2 cm



(ب)



(الف)

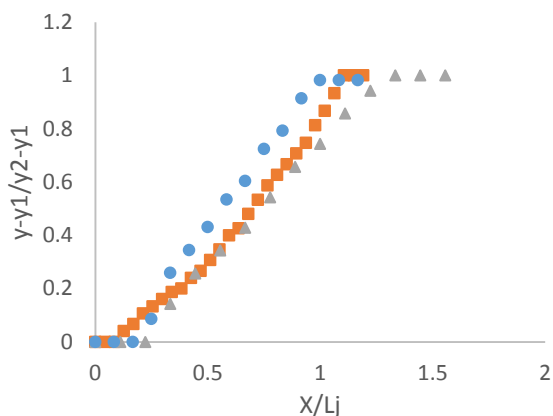
شکل ۴-۳۱ پروفیل بایعد (الف) و بی‌بعد (ب) سطح آب در بستر با زبری سوم در شیب صفر

۴-۳-۲-۲- تأثیر فاصله بین زبری‌ها در شکل پروفیل سطح آب در شیب ۰/۰۲

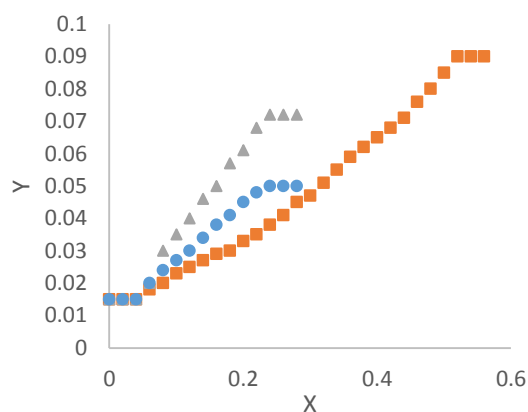
شکل ۴-۳۲ الف و ب، نتایج مربوط به تغییرات پروفیل سطح آب را برای زبری اول در شیب ۲ درصد به صورت بایعد و بی‌بعد نشان می‌دهد. نتایج مربوط به این حالت روند مشابه با شیب صفر داشت، با این تفاوت که با افزایش شیب کف عمق ثانویه مربوط به پرش دیرتر اتفاق افتاده که سبب افزایش طول پرش و طول منحنی پروفیل سطح آب شد. در این شیب برای $S=0$ ، حداکثر مقدار X برابر با $0/28$ متر و برای $S=2$ سانتیمتر، حداکثر این مقدار $0/22$ متر بود. مقایسه این دو نمودار نشان داد که در بستر زبر با شیب مثبت، همانند بستر صاف، با افزایش فاصله بین زبری‌ها، سطح پروفیل آب، کاهش دارد، که این کاهش برابر با ۸ درصد و در مقایسه با بستر صاف در همین شیب، مقدار کاهش سطح پروفیل برابر با ۵۰ درصد بود.

$$\Theta = 0.02, Q=7 \text{ m}^3/\text{h}$$

■ بستری صاف ▲ S=0 ● S=2 cm



(ب)



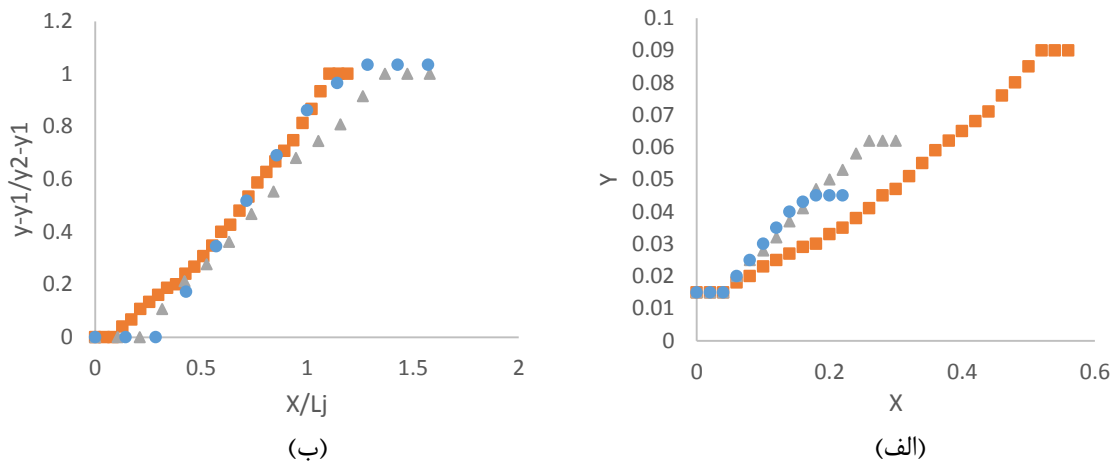
(الف)

شکل ۴-۳۲ پروفیل بابعدها (الف) و بی‌بعدها (ب) سطح آب در بستر با زبری اول در شیب ۰/۰۲.

شکل ۴-۳۳، نتایج مربوط به تغییرات پروفیل سطح آب را برای زبری سوم در شیب ۲ درصد می‌باشد. نتایج همانند نتایج با شیب صفر است، فقط افزایش شیب کف، تشکیل عمق ثانویه مربوط به پرش را به تعویق انداخت که سبب افزایش طول پرش و طول منحنی پروفیل شد. در این شیب برای $S=0$ ، حداکثر مقدار X ، ۰/۳ متر و برای $S=2$ سانتیمتر، حداکثر این مقدار ۰/۲۲ متر بود. از مقایسه دو نمودار برمی‌آید، که در بستر زبر با افزایش فاصله، سطح پروفیل آب، ۲۶/۷ درصد کاهش یافت. در حالی که در مقایسه با بستر صاف، دارای ۵۰ درصد کاهش سطح پروفیل بود.

$$\Theta = 0.02, Q=7 \text{ m}^3/\text{h}$$

■ بسترسف ▲ S=0 ● S=2 cm



شکل ۴-۳۳ پروفیل بابعده(الف) و بیبعده(ب) سطح آب در بستر با زبری سوم در شیب ۰/۰۲

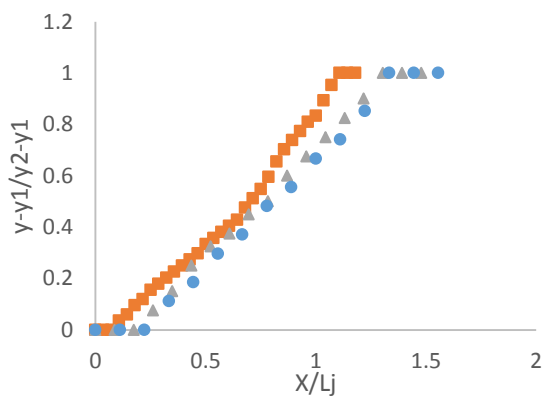
۴-۳-۳- تأثیر ارتفاع زبری بر پروفیل سطح آب

۴-۳-۳-۱- تأثیر ارتفاع زبری بر پروفیل سطح آب در شیب صفر و ۰/۰۲

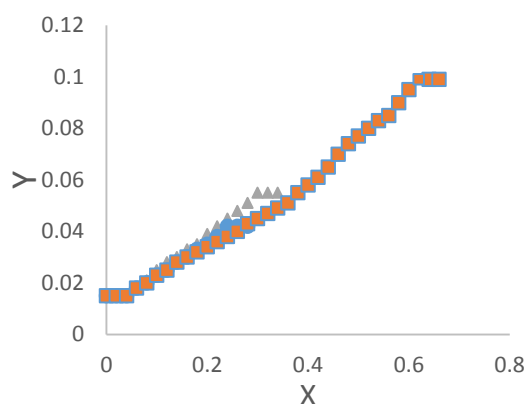
شکل ۴-۳۴، نتایج مربوط به تغییرات پروفیل سطح آب را برای مقادیر مختلف ارتفاع زبری‌ها در شیب صفر نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، با افزایش ارتفاع زبری‌ها، سطح پروفیل کاهش می‌یابد. در این شیب برای ارتفاع زبری $t=0/85$ سانتیمتر، حداکثر مقدار X برابر با $0/32$ متر و برای $t=1/5$ سانتیمتر، حداکثر این مقدار $0/26$ متر بود. مقایسه نمودارها نشان داد که در بستر زبر با افزایش ارتفاع زبری‌ها، سطح پروفیل آب، ۱۹ درصد کاهش یافت. در حالی که برای بستر صاف در مقایسه با بستر زبر، ۶۶ درصد کاهش سطح پروفیل را به همراه داشت. دلیل این موضوع این است که با افزایش ارتفاع زبری‌ها، آب پس از برخورد به زبری‌ها، مجبور به تشکیل پرش هیدرولیکی سریع‌تری می‌شود، که نتیجه آن کاهش طول پرش و نهایتاً کاهش سطح منحنی بود.

$\Theta=0, S=2\text{cm}, Q=9.2\text{ m}^3/\text{h}$

▲ $t=0.85\text{ cm}$ ● $t=1.5\text{ cm}$ ■ بستر صاف



(ب)



(الف)

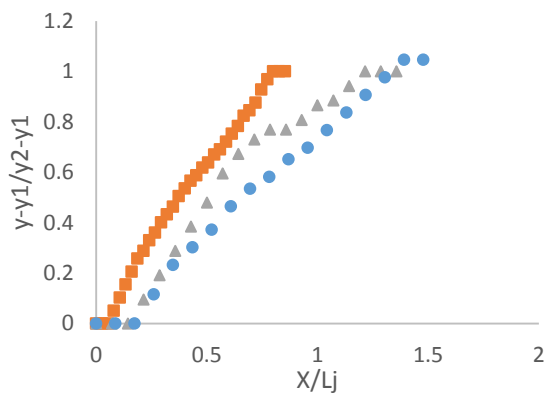
شکل ۴-۳۴ پروفیل بابعدها (الف) و بی‌بعدها (ب) سطح آب در بسترهای زبر با ارتفاع متفاوت در شیب صفر

شکل ۴-۳۵، نتایج مربوط به تغییرات پروفیل سطح آب با افزایش ارتفاع زبری‌ها در شیب ۲ درصد می‌باشد. در این حالت هم نتایجی شبیه به نتایج شیب صفر برآورد شد. تنها تفاوت آن، افزایش شیب کف بود که منجر به تشکیل دیر هنگام پرش و عمق ثانویه مربوط به آن شد. در این شیب برای $t=0.85$ سانتیمتر، حداکثر مقدار X ، 0.38 متر و برای $t=1.5$ سانتیمتر، حداکثر این مقدار 0.34 متر بود. مقایسه این دو نمودار نشان داد، که در بستر زبر با افزایش ارتفاع زبری، سطح پروفیل آب، ۱۱ درصد کاهش یافت. در حالی که این مقدار کاهش سطح پروفیل آب، نسبت به بستر صاف، به ۳۰ درصد رسید.

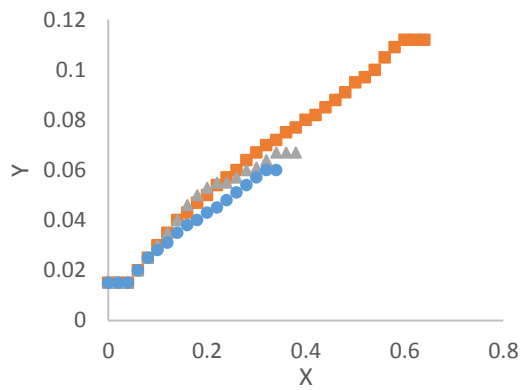
تمامی منحنی‌ها چه در پروفیل بابعدها و چه در پروفیل بی‌بعدها، روندی مشابه دارند و هر یک به تنهایی شکل جریان را نشان می‌دهند.

$\Theta=0.02$, $S=2$ cm , $Q=9.2$ m³/h

بستر صاف \triangle $t=0.85$ cm \bullet $t=1.5$ cm



(ب)



(الف)

شکل ۳۵-۴ پروفیل بابعدها (الف) و بی‌بعدها (ب) سطح آب در بسترهای زیر با ارتفاع متفاوت در شیب ۰/۰۲

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر به بررسی آزمایشگاهی تأثیر زبری‌های موجدار سینوسی در پرش هیدرولیکی در حالات مختلف پرداخت و آزمایش‌های عملی آن در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه شاهرود به انجام رسید. در این تحقیق سه موضوع اصلی دنبال گردید که عبارت بودند از: تأثیر فاصله بین زبری‌ها بر مشخصات پرش هیدرولیکی، تأثیر ارتفاع زبری‌ها بر مشخصات پرش هیدرولیکی، تأثیر شیب مثبت بر مشخصات پرش هیدرولیکی.

اهم نتایج حاصل از این پژوهش به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

۱- با افزایش فاصله بین زبری‌ها، مقدار پارامتر $\frac{Lr}{y_1}$ کاهش یافت. این کاهش در حداکثر فرود اولیه به ۵۲ درصد و نسبت به بستر صاف به ۰/۷۵ درصد رسید. همچنین افزایش فاصله بین زبری‌ها، کاهش نسبت $\frac{y_2}{y_1}$ را تا ۳۷ درصد و در مقایسه با بستر صاف تا ۵۰ درصد باعث شد.

۲- مقدار نسبت $\frac{Lj}{y_1}$ با افزایش فاصله بین زبری‌ها در بیشترین مقدار فرود، ۲۶ درصد و نسبت به بستر صاف ۵۹ درصد کاهش یافت. مقدار نسبت $\frac{Lj}{y_2^*}$ در برابر افزایش فاصله، روندی کاهشی تا ۷۲ درصد نسبت به بستر صاف داشت.

۳- تأثیر افزایش فاصله بین زبری‌ها بر مقدار D ، افزایش ۵۹ درصدی و نسبت به بستر صاف، ۴۰ برابر برآورد شد. همچنین افزایش فاصله بین زبری‌ها، مقدار نسبت $\frac{\Delta E}{E_1}$ ، ۱۷/۵ درصد و در مقایسه با بستر صاف ۲۹ درصد افزایش داد.

۴- افزایش ارتفاع زبری‌ها در بسترهای زبر، در حداکثر فرود، کاهش ۲۲ درصدی و نسبت به بستر صاف کاهش ۶۴ درصدی را به همراه داشت. نسبت اعماق ثانویه به اولیه $\frac{y_2}{y_1}$ در بسترهای زبر، تحت تأثیر افزایش ارتفاع زبری‌ها با کاهش ۱۴ درصد روبرو شد که در مقایسه با بستر صاف ۲۴ درصد بود.

۵- مقدار نسبت $\frac{L_j}{y_1}$ و $\frac{L_j}{y_2^*}$ با افزایش ارتفاع زبری‌ها، روندی کاهشی داشتند. بطوریکه نسبت به بستر صاف حدود ۶۰ درصد با کاهش مواجه شدند.

۶- استهلاک انرژی $\frac{\Delta E}{E_1}$ در بیشترین ارتفاع زبری، بیشترین میزان خود را تا ۳۱ درصد نسبت به بستر صاف داشت. مقدار نسبت پارامتر کاهش عمق نسبی D ، با افزایش ارتفاع زبری‌ها، در بیشترین مقدار عدد فرود، ۲۹ درصد و نسبت به بستر صاف ۵۷ برابر افزایش یافت.

۷- در شیب ۰/۰۱، مقدار $\frac{L_r}{y_1}$ ، تحت تأثیر افزایش فاصله به میزان ۴۷ درصد کاهش یافت. مقدار نسبت $\frac{y_2}{y_1}$ در شیب ۰/۰۲ و در حداکثر عدد فرود و فاصله بین زبری‌ها، به میزان ۴۰ درصد در برابر بستر صاف در همین شیب، دچار کاهش شد.

۸- با افزایش فاصله بین زبری‌ها، در شیب ۰/۰۱، مقدار نسبت طول نسبی $\frac{L_j}{y_1}$ در حداکثر فرود و فاصله بین زبری‌ها، ۲۵ درصد و نسبت به بستر صاف ۶۲ درصد کاهش داشت. همچنین پارامتر $\frac{L_j}{y_2^*}$ در شیب ۰/۰۱ نسبت به افزایش فاصله بین زبری‌ها، کاهش ۳۴ درصدی یافت.

۹- در شیب ۰/۰۱، پارامترهای $\frac{\Delta E}{E_1}$ و D در برابر افزایش فاصله بین زبری‌ها افزایش یافتند. این افزایش، نسبت به بستر صاف برای $\frac{\Delta E}{E_1}$ و D ، به ترتیب ۴۳ درصد و ۲۵۰ درصد بود.

۱۰- افزایش ارتفاع زبری‌ها، کاهش مقدار $\frac{L_r}{y_1}$ را در شیب ۰/۰۱ به میزان ۶۴ درصد داشت. همچنین تأثیر افزایش ارتفاع زبری‌ها بر روی $\frac{y_2}{y_1}$ ، در شیب ۰/۰۲، کاهش ۲۳ درصدی نسبت به بستر صاف بود.

۱۱- مقادیر $\frac{L_j}{y_1}$ و $\frac{L_j}{y_2^*}$ تحت تأثیر افزایش ارتفاع در شیب ۰/۰۲، به ترتیب با کاهش ۶۰ درصدی و ۶۲ درصدی مواجه شدند.

۱۲- مقدار نسبت $\frac{\Delta E}{E_1}$ در شیب ۰/۰۲ با افزایش ارتفاع زبری‌ها در حداکثر فرود، افزایشی برابر با ۴۳ درصد نسبت به بستر صاف داشت و پارامتر کاهش عمق نسبی D با افزایش ارتفاع زبری‌ها در شیب ۰/۰۱، ۴۷ درصد در برابر بستر صاف کاهش داشت.

۵-۲- پیشنهادات

۱- در شیب مثبت هم، همانند شیب صفر، زبری‌های بستر، اثر کاهشی و افزایشی مطلوبی بر پارامترهای مؤثر در جریان دارند. اما در شیب‌های کمتر، نتیجه بهتری نسبت به شیب‌های بیشتر، حاصل می‌گردد. لذا، فعالیت در بسترهای با شیب کم، مقرون به صرفه‌تر می‌باشد و فعالیت در بسترهای با شیب زیاد، پیشنهاد نمی‌شود.

۲- در صورت فعالیت در شیب‌های زیاد، ترجیحاً از فواصل و ارتفاع بزرگتری برای زبری‌ها، در دبی‌های بالا، استفاده شود.

۳- تحقیقات گسترده‌تری در زمینه تأثیرات انواع زبری‌ها (سینوسی، مثلثی، مستطیلی، مکعبی و دوزنقه) بر مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی بستر با شیب مثبت به صورت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری انجام گیرد.

۴- محدوده وسیع‌تری از دبی و شیب کف در انجام آزمایشات به کار گرفته شود.

منابع

- ۱- اسماعیلی.ک، بدیع زادگان.ر، فغفورمغربی.م ، صانعی.م. (۱۳۹۰). "مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش کانال‌های آبیاری با بستر موجدار" نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) جلد ۲۵، شماره ۳، ص ۶۷۶-۶۸۷
- ۲- اسماعیلی.ک، ابریشمی. ج. (۱۳۸۰). تعیین ارتباط بین عمق‌های قبل و بعد از پرش و ارتفاع پله به منظور کنترل پرش هیدرولیکی روی حوضچه‌های با شیب معکوس و با پله مثبت یا منفی. کنفرانس بین‌المللی سازه‌های هیدرولیکی مهندسی عمران ، ۱۲ و ۱۳ اردیبهشت ، دانشگاه شهید باهنر کرمان
- ۳- یزدجو. ف. (۱۳۸۳). تأثیر موج بودن بستر روی طول پرش و نوسانات زیرفشار در حوضچه‌های آرامش از نوع پرش هیدرولیکی. پایان نامه دکترای سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۴- الله دادی.ک، کاظمیان‌زاده.الف، شفاعی بجستان.م، پارسی.الف، رویوران.م.م. (۱۳۸۸). "بررسی آزمایشگاهی تاثیر عرض و ارتفاع زبری بر طول غلطاب پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش". هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه تهران
- ۵- الله دادی.ک، کاظمیان‌زاده.الف، شفاعی بجستان.م. (۱۳۸۷)، "بررسی آزمایشگاهی تأثیر ارتفاع زبری بر نسبت اعماق مزدوج و طول غلطاب پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش". سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران. دانشگاه تبریز
- ۶- ایلخانی پور، ر. ۱۳۸۷. بررسی عملکرد مدل ایلخانی پور برای سدهای انحرافی در حالت پنجه ی شیب دار. دومین همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی، در دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۷- بهمنش.ج ، رضایی.ح ، تجلی.م.ع. (۱۳۹۱) " بررسی آزمایشگاهی تأثیر زبری دایره‌ای شکل بر روی طول غلطاب در پرش هیدرولیکی". یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه ارومیه
- ۸- پارسامهرپ، فرسادی‌زاده.د، حسین‌زاده دلیر.ع. (۱۳۹۲) "تأثیر آبپایه و زبری‌های مصنوعی روی شیب معکوس بر خصوصیات پرش هیدرولیکی". نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). جلد ۲۷، شماره ۳، مرداد-شهریور، صفحه ۵۹۱-۵۸۱
- ۹- پورعبدالله.ن ، هنرت ، فتاحی نافچی.ر. (۱۳۹۳) "تأثیر زبری در شیب های معکوس بر عمق ثانویه و نرخ استهلاك انرژی پرش هیدرولیکی" مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک/ سال هجدهم/ شماره شصت و هفتم/ بهار

۱۰- تونزنده جانی، م. کاشفی پور. س. م. (۱۳۹۰)، "بررسی تغییرات افت انرژی سرریز و طول پرش هیدرولیکی در اثر تلاقی خطوط جریان بر روی بدنه سرریز اوجی". فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال دوم. شماره هشتم. تابستان.

۱۱- حسینی، م. و ج. ابریشمی. ۱۳۸۴. هیدرولیک کانال های باز. انتشارات دانشگاه امام رضا، چاپ نهم، ۶۱۳ صفحه

۱۲- دستورانی. م، نصرآبادی. م. (۱۳۹۰). اثر زبری بستر بر مشخصات جهش هیدرولیکی روی شیب معکوس. مجله پژوهش آب ایران، ۹۱-۱۰۰

۱۳- راورز، فرهودی. ج.، نژندعلی. ع. (۱۳۹۰) "بررسی تاثیر بلوک های ذوزنقه ای قائم بر مشخصات پرش هیدرولیکی". ششمین کنگره ملی مهندسی عمران. ۶ و ۷ اردیبهشت، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۱۴- شجاعیان، ز. حسین زاده دلیر. ع.، فرسادی زاده. د.، سلماسی. ف. (۱۳۸۹)، "بررسی ویژگی های پرش هیدرولیکی مستطیلی واگرا با شیب معکوس". نشریه دانش آب و خاک/ جلد ۳، شماره ۲۱. دانشگاه تبریز

۱۵- شکرپان. م، شفاعی بجستان. م. (۱۳۹۱)، "برآورد نسبت عمق های مزدوج پرش نوع B بر روی بستر صاف".

۱۶- عباسپور. الف، حسین زاده دلیر. ع.، فرسادی زاده. د.، صدرالدینی. ع. الف. (۱۳۸۸) "تأثیر بستر موجدار سینوسی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی"، مجله دانش آب و خاک/ جلد ۱۹ شماره ۱

۱۷- غزالی. م.، صمدی بروجنی. ح.، قربانی. ب.، فتاحی نافچی. ر. (۱۳۸۹) "تأثیر بستر موجدار مثلثی بر مشخصات پرش هیدرولیکی". الف/ ۱۰، مجله پژوهش آب ایران، ۴ (۷): ۱۰۴-۹۵

۱۸- فتحی مقدم. م.، پارسا. الف. (۱۳۸۹)، "بررسی آزمایشگاهی اثر موقعیت پرش هیدرولیکی بر تغییرات سرعت در حوضچه های آرامش تیپ ۲". خوزستان، ایران.

۱۹- کاسی کوزانی. الف، اسمعیلی ورکی. م.، فرهودی. ج. (۱۳۹۰)، "مطالعه آزمایشگاهی مشخصات جهش هیدرولیکی واگرا با شیب کف معکوس". ششمین کنگره ملی مهندسی عمران. سمنان، ایران.

۲۰- نژندعلی. ع.، اسماعیلی. ک.، فرهودی. ج.، راورز. (۱۳۹۰) "تأثیر زبری های یکپارچه مثلثی بر مشخصات پرش هیدرولیکی، نشریه آبیاری و زهکشی ایران"، شماره ۲، جلد ۵، ص ۲۴۱-۲۳۴

21. Alikhani. A, Behrozi-Rad. R and Fathi-Moghadam. M. (2010) "Hydraulic jump in stilling basin with vertical end sill" International Journal of Physical Sciences Vol. 5 (1), pp. 025-029. Ahwaz, Iran.

22. Azim, A., Negam, M. (2003). "analysis and formulation of hydraulic jumps in sloping rectangular closed conduits". seventh international water technology conference egypt 1-3 april 2003.
23. Akhti, S. And Hazzab, A. (2010). " comparative analysis of the positive and negative steps in a forced hydraulic jump". Jordan Journal of civil engineering.
24. Belanger, J.B. (1828). "essai Sur la Solution Numérique de Quelques Problèmes Relatifs au Mouvement Permanent des Eaux Courantes ". Carilian-Goeury, Paris, France (in French).
25. Beirami, M.K and Chamani, M. (2006). "hydraulic jumps in sloping channel: sequent depth ratio". journal of hydraulic engineering, vol.133, NO.10 october 2006. ©ASCE, ISSN.
26. Bonn, D, and Anderson, A, and Bohr, T (2008). "hydraulic jumps in channel". danmark
27. Carollo, F.G. and Ferro, V. 2007. "Hydraulic jumps on rough beds". J. Hydraul. Eng. 133(9): 989-999
28. Chanson, H and Brattberg, T (2000). "experimental study of the air-water flow in a hydraulic jump". intl j of multiphase flow, vol.26, no.4, pp. australia.
29. Dey, S, and Sarkar, A. (2005), "characteristics of turbulent flow in submerged jumps on rough beds". Journal of engineering mechanics, vol.134, NO.1, january 1, 2008 ©ASCE. Indian.
30. Ead, S.A, and Rajaratnam, N (2002), " hydraulic jumps on corrugated beds". journal of hydraulic engineering, vol.128, NO.7, july 1, 2002. ©ASCE, ISSN. canada.
31. Ead, S.A, and Rajaratnam, N, Fellow , Katopodis, C And Ade, F. (1994). "turbulent open-channel flow in circular corrugated culverts". journal of hydraulic engineering, VOL.126, NO.10, october, 2000. ©ASCE, ISSN.
32. Ead, S. A. (2007). "Effect of bed corrugations on the characteristics of a hydraulic jump." Final Research Report No. 14/427, King Saud University, College of Engineering, Research Center.
33. Elsebaie, I. H. and Shabayek, S.H. (2010). "Formation of hydraulic jumps on corrugated beds". Civil & Environ. Eng. IJCEE-IJENS. 10(1): 40-50.

34. Gohar. 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, August 9-14.
35. Gunal.M and Narayanan.R.(1997).“hydraulic jumps in sloping channels”. journal of hydraulic engineering, vol.122,no.8 august,1996.©ASCE,ISSN.
36. Hager, W.H., and Berman (1992) , “Energy dissipators and hydraulic jump”, Kluwer academic Publishers
37. Hughes.C and Flack.J (1984), “hydraulic jump properties over a rough bed”. of the journal of hydraulic engineering, vol.110,no.12, 1755-1771. desember, 1984.©asce,issn. colorado, boulder, colo.
- 38.Izadjoo.F, and Shafaii Bejestan.M.(2007).“corrugated bed hydraulic jump stilling basin”. journal of issn . asian network for scientific information. ahwaz,iran.
39. Leutheusser H.J, and Schiller E.J. (1975).” Hydraulic jump in a rough channel, Water Power and Dam Construction”. 186-191.
- 40.Liu.M,and Rajaratnam.N,and Zhu.D.Z.(2003),“turbulence structure of hydraulic jumps of low froude numbers”. journal of hydraulic engineering,VOL.130.NO.6,june 1,2004.©ASCE,ISSN.
- 41.Mccorquodale.J.A,and mohamed.M.S.(1994).“hydraulic jumps advers slope”.journal of hydraulic reserch, 32:1,119-130.canada
- 42.Murzyn.F,and Chanson.H.(2009).“free-surface fluctuations in hydraulic jumps : experimental observations”. Report No. CH63/07, Division of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, July, 2009.116paustralia
- 43.Mohamed Ali.H.S. (1991), “ effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jump”. journal of hydraulic engineering, vol.117 no.1, januory,1991.©asce,issn. japan.
- 44.Morris.H.M. (1995). “A new concept of flow in rough conduits Transaction’. American society of Civil Engineers, 120:373-398.
- 45.Nikmehr.S, and Tabebordbar.A. (2009). “Hydraulic jumps on adverse slope in two cases of rough and smooth bed”. Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, ISSN, 2(1): 19-22.

46. Ohtsu, I. and Yasuda, Y. (1991). "hydraulic jumps in sloping channels". *Journal of hydraulic engineering*, vol.117, no.7 July, 1991. ©ASCE, ISSN.
47. Pagliara, S., and Lotti, I., and Palermo, M. (2007). "hydraulic jump on rough bed of stream rehabilitation structures". *Journal of hydro-environment research*, Italy.
48. Pagliara, S. and Proginelli, A. (1998). "limiting and sili-controlled adverse-slope hydraulic jump". *hydraulic jumps in sloping channels*. of the *Journal of Hydraulic Engineering*. 126, NO.11, November 2000. ©ASCE, ISSN.
49. Peruginelli, A., and Pagliara, S., "adverse slope hydraulic jump : sequent depth". Dipartimento di Ingegneria Edile, Idraulica e del Territorio Università di Pisa. Via Gabba, 22 - 56126 Pisa Italy.
50. Peterka, A. J. (1983), "Hydraulic design of stilling basins and energy dissipaters, Engineering Monograph", No. 25, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Seventh Printing.
51. Rajaratna, N. (1968). "Hydraulic jump on rough bed", *transaction of the engineering institute of Canada*, 11(2): 1-8.
52. Shafai Bejestan, M., and Neisi, K. (2009). "a new roughened hydraulic jump stilling basin". *asian journal of applied sciences* 2. ISSN. Malaysia.
53. Tokyay, N.D. (2005). "Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps". In: *impacts of global climate change conference*, EWRI, May, Anchorage, Alaska, USA, 408-416

Abstract

Stilling basin is a construction for energy wasting of the flow at downstream of overflows, rapids and terminals. Usually they have horizontal floor but sometimes it is inclined for more economy in floor excavation costs. Hydraulic jumps are used in stilling basins for energy wasting. Hydraulic jump is a phenomenon in hydraulic science with quick variant flow which is discussed mostly considered in any flows with free level like rivers and overflows and valves. Hydraulic jump occurs when there is a channel with free level at upstream and also ultra-critical flow at its downstream and a subcritical flow in a distance between both flows. It is a sudden change with short distance which may cause further disorders at water flow and also lots of energy dissipation. The real goal of this research is to find out any properties of hydraulic jump at the beds with semi-circle roughs in positive slope. All tests were made on a flume with a length of 5m, width 0.09 m, height 0.34m in three slopes of 0, 1 and 2 percent and Froud numerical scope of 2.6-5.2 and wave slope of (s/t) in limitation of 0 to 0.75 and rough height of (0.85cm, 1cm and 1.5cm) and inter-rough distance (s) of 0, 0.5, 1, 1.5 and 2cm. According to the results, in case of applying a sinus wave bed in stilling basin, it is possible to reduce secondary depth rate to primary one for about %50 at highest rate and about 5.22 of Froud number and also a reduction in the length of hydraulic jump up to %72 against classic jump in this type of basins. There is higher rates of energy wastes and reduction of estimated depth of jumps in rough basins than smooth ones. Like zero slope, we had a reduction in jump length and double depth in positive slope than smooth one with an increase in energy dissipation. The mentioned increase was higher in lower debis. Any increase in relevant distance of roughs in comparison with increasing the height of which had an acceptable effect on reducing the jump length, rolling length and double depth and also increasing of energy dissipation. Such a reduction process in lower slopes was more obvious than higher slopes.

Key words: Height of roughs, Distance of roughs, Hydraulic jump, Positive slope



Shahrood University of Technology

Faculty of Agriculture Engineering

Department of Water and Soil

**Investigation Laboratorial Influence Corrugated
Sinusoidal Roughnesses On Specifications Hydraulic
Jump In Positive Slope**

Hanieh Zangeneh

Supervisor:

Dr.Khalil Azhdari

Advisors:

Dr.Samad Emamgholizadeh

Ashkan Alebouyeh

February 2016