

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده کشاورزی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه های آبی

بررسی آزمایشگاهی آبشستگی پایین دست دریچه کشویی با بستر سینوسی

نگارنده: مرجان پیفلوش

اساتید راهنما

دکتر صمد امامقلی زاده

دکتر خلیل اژدری

اساتید مشاور

دکتر سید حسین حسینی

دکتر حسین میرزائی مقدم

اسفند ۱۳۹۷

شماره: ۰۵ ارک
تاریخ: ۳۹۸ / ۲ / ۲

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

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

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای مرجان یفلوش با شماره دانشجویی ۹۵۰۳۴۱۴ رشته مهندسی کشاورزی گرایش سازه‌های آبی تحت عنوان بررسی آزمایشگاهی آبستگي پایین دست درجه کشتویی با بستر سینوسی که در تاریخ ۱۳۹۷/۱۲/۲۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: عالی) مردود

نوع تحقیق: نظری عملی

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

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: آقای محمد علی عامریان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

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

۸ ۱ ۳

تقدیم:

باسپاس از سه وجود مقدس:

آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم...

موباشان سپید شد تا ما رو سفید شویم...

و عاشقانه سوختند تا گرما بخش وجود ما و روشنگر راهمان باشند...

پدرانمان

مادرانمان

استادانمان

مَشْکُر و قَدْر دَانِی

حال که به یاری خدای مهربان به مرحله‌ی نهایی رسیده‌ام بر خود لازم می‌دانم از تمامی کسانی که در تهیید پایان نامه حاضر از یاریشان بهره‌برده‌ام نهایت مَشْکُر را داشته باشم.

از اساتید محترم راهنا جناب دکتر امامعلی زاده و جناب دکتر اثری که، همواره در نهایت صبر و حوصله راهنمایم بودند کمال مَشْکُر را دارم.

از اساتید محترم مشاور جناب دکتر حسینی و جناب دکتر میرزائی مقدم که از راهنمایی‌های ارزشمندشان بهره‌بردم مَشْکُر می‌کنم.

از اساتید گرانقدرم سرکار خانم دکتر کنجی و جناب دکتر لقمندی که در تمامی مراحل تحصیل از دانش ارزشمندشان بهره‌بردم، از اینکه قبول زحمت فرموده و داوری این پایان نامه را بر عهده گرفتند و همچنین نماینده محترم تحصیلات تکمیلی جناب دکتر عباسپور مَشْکُر می‌کنم.

از جناب مهندس حسن گلجی کارشناس محترم آزمایشگاه آبیاری و هیدرولیک که در مراحل این پایان نامه راهنمای من بودند مَشْکُر می‌کنم.

از زحمات و لطف‌های بی‌دریغ دوستان و بھکلاسی‌هایم نهایت مَشْکُر را دارم چرا که بدون کمک ایشان طی کردن مراحل پایان نامه بسیار

دشوار بود.

و در نهایت از مهربانی، صبوری و زحمات خانواده‌ام که همواره در امر تحصیل مشوق من بوده‌اند بسیار مَشْکُر می‌کنم.

تعهد نامه

اینجانب مرجان پیفلوش دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی سازه های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی آزمایشگاهی آبستگي پايين دست دريچه كشويي با بستر سينوسي تحت راهنمائي دكتر صمد امامقلي زاده و دكتر خليل اژدري متعهد مي شوم.

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

بررسی آبشستگی بستر پایین دست سازه‌های هیدرولیکی با توجه به هزینه‌های تحمیلی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است به همین دلیل همواره مورد توجه محققین مختلف قرار داشته است و در سراسر جهان محققین به بررسی این پدیده و راهکارهای کنترل آن می‌پردازند. از جمله سازه‌های هیدرولیکی می‌توان به دریچه‌های کشویی اشاره کرد که آبشستگی پایین دست آن‌ها علاوه بر هزینه‌های مالی، مورفولوژی بستر را در پایین دست تغییر داده و مشکلاتی را در روند آبیگری در پایین دست موجب شده است. با توجه به نکات فوق در تحقیق حاضر به بررسی آزمایشگاهی ابعاد آبشستگی نظیر طول و ارتفاع قله در پایین دست دریچه کشویی پرداخته شده است. فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده دارای طول ۵ متر، عرض ۰/۰۹ متر، ارتفاع ۰/۳۴ متر و شیب‌پذیر بود. پارامترهای هندسی و هیدرولیکی در نظر گرفته شده در آزمایشات ۳ شیب (۰، ۰/۵ و ۱ درصد) با سه ارتفاع زبری (۰/۷۵، ۱/۵ و ۳ سانتیمتر)، فاصله زبری‌ها (۰، ۱/۵ و ۳ سانتیمتر) و ۴ دبی (۰/۵، ۱، ۲ مترمکعب بر ساعت) بودند. مطابق با نتایج به دست آمده تغییرات ابعاد آبشستگی در اوایل آزمایشات زیاد و به تدریج با نزدیک شدن به انتهای زمان آزمایش کاهش یافت. همچنین پروفیل طولی بی‌بعد آبشستگی افزایش یافت به‌طوری‌که برای یک بازشدگی ثابت با افزایش دبی جریان، طول آبشستگی افزایش یافت و هر چه بازشدگی دریچه بیشتر باشد شیب تغییرات طول در برابر دبی کمتر است. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش عدد فرود $\frac{L_s}{b}$ (نسبت طول آبشستگی به عرض فلوم) افزایش یافت که بهترین عملکرد در کاهش $\frac{L_s}{b}$ مربوط به اندازه‌ی زبری ۱/۵ سانتی‌متر بود که در حدود ۳۳٪ نسبت $\frac{L_s}{b}$ را کاهش داد. افزایش اندازه زبری‌ها نیز سبب افزایش عملکرد در کنترل $\frac{L_s}{b}$ شد، که برای زبری ۱/۵ سانتی‌متر در حدود ۷۵٪ نسبت $\frac{L_s}{b}$ را کاهش داد. همچنین با افزایش $\frac{w}{b}$ (نسبت بازشدگی به عرض فلوم) نیز نسبت $\frac{L_s}{b}$ کاهش یافت، که محدوده‌ی تغییرات آن برای زبری ۱/۵ سانتی‌متر در بازه‌ی ۱ تا ۵ قرار داشت. با افزایش شیب (S)، مقدار $\frac{L_s}{b}$ برای فاصله‌های مختلف زبری افزایش می‌یابد. همچنین

نتایج نشان می‌دهد، محدوده تغییرات $\frac{L_s}{b}$ در برابر S ، برای بازشدگی دریچه کمتر، حداقل بود. با افزایش $\frac{d}{b}$ برای بازشدگی‌های مختلف مقدار $\frac{L_s}{b}$ کاهش یافت. به‌طوریکه در ماکزیمم بازشدگی دریچه مقدار $\frac{L_s}{b}$ در حدود ۳۷ درصد نسبت به بستر صاف کاهش یافت. تغییرات $\frac{h_s}{b}$ (نسبت ارتفاع قله به عرض فلوم) نیز برای مدل‌های مختلف کم و در حدود ۰/۵ بود. با افزایش بازشدگی دریچه نوسانات آن کمتر و با کاهش بازشدگی، نوسانات بیشتر شد.

کلمات کلیدی: رسوب، دریچه‌کشویی، زبری استوانه‌ای، شیب کف، آبشستگی

فهرست مطالب

۱	فصل اول مقدمه و بیان مسئله
۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- بیان مسئله
۳	۳-۱- آبخستگی در پاییندست حوضچه آرامش
۴	۴-۱- هدف از تحقیق حاضر و ضرورت انجام آن
۵	۵-۱- سازماندهی فصلهای پایان نامه
۷	فصل دوم کلیات و پیشینه تحقیق
۸	۱-۲- مقدمه
۸	۲-۲- آبخستگی
۹	۳-۲- انواع آبخستگی
۱۰	۱-۳-۲- آبخستگی عمومی
۱۰	۲-۳-۲- آبخستگی ناشی از تنگشدگی مقطع
۱۱	۳-۳-۲- آبخستگی موضعی
۱۱	۴-۳-۲- آبخستگی استاتیکی و دینامیکی
۱۲	۴-۲- مکانیزم آبخستگی ناشی از جت‌های افقی مستغرق
۱۳	۵-۲- عوامل موثر بر آبخستگی پاییندست سازهای هیدرولیکی
۱۳	۶-۲- مراحل توسعه گودال آبخستگی
۱۴	۷-۲- دریاچه کشویی
۱۴	۱-۷-۲- انواع جریان در دریاچه کشویی
۱۵	۸-۲- مروری بر مطالعات انجام شده
۲۵	۹-۲- جمع بندی
۲۷	فصل سوم مواد و روشها
۲۸	۱-۳- مقدمه
۲۸	۲-۳- معرفی و تشریح جزئیات فلوم
۳۱	۳-۳- شرح آزمایش
۳۳	۴-۳- آنالیز ابعادی
۳۴	۱-۴-۳- تحلیل ابعادی پارامترهای موثر بر آبخستگی در بسترهای صاف (فاقد بستر زبر) و موجدار سینوسی
۳۵	۵-۳- روش انجام کار
۳۵	۱-۵-۳- پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشات
۳۷	فصل چهارم نتایج و بحث
۳۸	۱-۴- مقدمه
۳۸	۲-۴- مکانیسم آبخستگی
۳۸	۱-۲-۴- بستر صاف
۳۸	۲-۲-۴- بستر صاف و شیبدار
۳۹	۳-۲-۴- بستر زبر

۳۹	-----	۴-۲-۴- بستر زبر و شیبدار
۳۹	-----	۳-۴- بررسی تاثیر عدد فرود جریان (\overline{Fr})، db ، Db ، Wb و S بر روی پارامتر Lsb
۳۹	-----	۱-۳-۴- تاثیر \overline{Fr} بر روی پارامتر Lsb
۴۰	-----	۲-۳-۴- تاثیر Db بر روی پارامتر Lsb
۴۴	-----	۳-۳-۴- تاثیر db بر روی پارامتر Lsb
۴۸	-----	۴-۳-۴- بررسی تاثیر wb بر روی پارامتر Lsb
۵۱	-----	۵-۳-۴- بررسی تاثیر S بر روی پارامتر Lsb
۵۶	-----	۴-۴- بررسی تاثیر عدد فرود جریان (\overline{Fr})، db ، Db ، Wb و S بر روی پارامتر hsb
۵۶	-----	۱-۴-۴- بررسی تاثیر \overline{Fr} بر روی پارامتر hsb
۵۷	-----	۲-۴-۴- بررسی تاثیر Db بر روی پارامتر hsb
۶۱	-----	۳-۴-۴- بررسی تاثیر db بر روی پارامتر hsb
۶۴	-----	۴-۴-۴- بررسی تاثیر Wb بر روی پارامتر hsb
۶۷	-----	۵-۴-۴- بررسی تاثیر S بر روی پارامتر hsb
۷۳	-----	فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادها
۷۴	-----	۱-۵- نتیجه گیری
۷۹	-----	منابع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- انواع آبشستگیها (راهنمای روشهای محاسبه آبشستگی موضعی، ۱۳۸۶)-----۱۱
- شکل ۲-۲- مراحل توسعه حفره آبشستگی (نشریه شماره ۵۴۹)-----۱۳
- شکل ۱-۳- نمای کلی فلوم آزمایشگاهی-----۲۹
- شکل ۲-۳- نمای جانبی مخزن-دریچه و کف صلب-----۳۰
- شکل ۳-۳- مخزن انتهایی و خروجی-----۳۰
- شکل ۴-۳- دبی سنج فلوم-----۳۱
- شکل ۵-۳- طرح شماتیک آبشستگی در بستر زبر-----۳۳
- ۳-۳- نمای شماتیک فلوم-----۳۳
- شکل ۷-۳- عمق سنج-----۳۶
- شکل ۸-۳- نمای قرارگیری زبربها در سطح فلوم-----۳۶
- شکل ۱-۴- تغییرات Lsb در برابر عدد Fr ، برای بازشدگی در درجه‌های مختلف. الف) بستر صاف، شیب صفر، بازشدگی متغیر. ب) زبری به قطر $۱/۵$ سانتیمتر، شیب صفر، بازشدگی متغیر.-----۴۰
- شکل ۲-۴- تغییرات Lsb در برابر Db برای دبیهای مختلف. الف) بازشدگی در درجه ۱ سانتیمتر، شیب صفر، فاصله زبری صفر. ب) بازشدگی در درجه ۳ سانتیمتر، شیب صفر، فاصله زبری صفر-----۴۱
- شکل ۳-۴- تغییرات Lsb در برابر Db برای بازشدگیهای در درجه مختلف، دبی $۳/۵$ ، شیب $۰/۵$ ، فاصله زبری صفر.-----۴۲
- شکل ۴-۴- تغییرات Lsb در برابر Db برای شیبهای مختلف. الف) بازشدگی در درجه ۱ سانتیمتر، دبی $۳/۵$ ، فاصله زبری $۱/۵$. ب) بازشدگی در درجه ۳ سانتیمتر، دبی $۳/۵$ ، فاصله زبری $۱/۵$.-----۴۳
- شکل ۵-۴- تغییرات Lsb در برابر Db برای فاصلههای زبری مختلف. الف) بازشدگی در درجه ۱ سانتیمتر، دبی ۲، شیب ۱.-----۴۴
- ب) بازشدگی در درجه ۳ سانتیمتر، دبی ۲، شیب ۱.-----۴۴
- شکل ۶-۴- تغییرات Lsb در برابر db برای دبیهای مختلف. الف) بازشدگی در درجه ۱ سانتیمتر، قطر زبری ۳، شیب $۰/۵$. ب) بازشدگی در درجه ۳ سانتیمتر، قطر زبری ۳، شیب $۰/۵$.-----۴۵
- شکل ۷-۴- تغییرات Lsb در برابر db برای بازشدگیهای در درجه مختلف، دبی $۳/۵$ ، قطر زبری ۳، شیب ۱.-----۴۶
- شکل ۸-۴- تغییرات Lsb در برابر db برای شیبهای مختلف، بازشدگی در درجه ۱ سانتیمتر، دبی ۵، قطر زبری $۱/۵$.-----۴۷
- شکل ۹-۴- تغییرات Lsb در برابر db برای قطرهای زبری مختلف. الف) بازشدگی در درجه ۱ سانتیمتر، دبی ۵، شیب صفر. ب) بازشدگی در درجه ۳ سانتیمتر، دبی ۵، شیب صفر.-----۴۸
- شکل ۱۰-۴- تغییرات Lsb در برابر Wb برای دبیهای مختلف. الف) بستر صاف، ب) بستر به قطر $۱/۵$ -----۴۹
- شکل ۱۱-۴- تغییرات Lsb در برابر Wb برای فاصلههای زبری مختلف، قطر زبری $۰/۷۵$ ، دبی $۳/۵$ ، شیب صفر-----۵۰
- شکل ۱۲-۴- تغییرات Lsb در برابر Wb برای شیبهای مختلف، قطر زبری $۰/۷۵$ ، دبی $۳/۵$ ، فاصله زبری $۱/۵$.-----۵۰
- شکل ۱۴-۴- تغییرات Lsb در برابر S برای دبیهای مختلف. الف) بازشدگی در درجه ۱ سانتیمتر، قطر زبری ۳، فاصله زبری ۳. ب) بازشدگی در درجه ۳ سانتیمتر، قطر زبری ۳، فاصله زبری ۳.-----۵۲
- شکل ۱۵-۴- تغییرات Lsb در برابر S برای قطرهای زبری مختلف. الف) بازشدگی در درجه ۱ سانتیمتر، دبی ۵، فاصله زبری $۱/۵$. ب) بازشدگی در درجه ۳ سانتیمتر، دبی ۵، فاصله زبری $۱/۵$.-----۵۳
- شکل ۱۶-۴- تغییرات Lsb در برابر S برای بازشدگی در درجه مختلف، دبی ۲، قطر زبری $۰/۷۵$ ، فاصله زبری $۱/۵$.-----۵۴

- شکل ۴-۱۷- تغییرات Lsb در برابر S برای فاصله زبری مختلف. الف) بازشدگی دریچه ۱سانتیمتر، دبی ۵، قطر زبری ۱/۵ ----- ۵۵
- ب) بازشدگی دریچه ۳سانتیمتر، دبی ۵، قطر زبری ۱/۵. ----- ۵۵
- شکل ۴-۱۸- تغییرات hsb در برابر Fr ، برای بازشدگیهای مختلف. الف) قطر زبری ۱/۵، شیب صفر، بازشدگی دریچه متغیر. ب) قطر زبری ۳، شیب صفر، بازشدگی دریچه متغیر. ----- ۵۶
- شکل ۴-۱۹- تغییرات hsb در برابر Db برای دبیهای مختلف. الف) بازشدگی دریچه ۱سانتیمتر. ----- ۵۷
- ب) بازشدگی دریچه ۳سانتیمتر. ----- ۵۷
- شکل ۴-۲۰- تغییرات hsb در برابر Db برای بازشدگیهای دریچه‌ی مختلف، دبی ۲، شیب ۰/۵، فاصله صفر. ----- ۵۸
- شکل ۴-۲۱- تغییرات hsb در برابر Db برای شیبهای مختلف. الف) بازشدگی دریچه ۱سانتیمتر، دبی ۲، فاصله زبری ۳. ----- ۵۹
- ب) بازشدگی دریچه ۳سانتیمتر، دبی ۲، فاصله زبری ۳. ----- ۵۹
- شکل ۴-۲۲- تغییرات hsb در برابر Db برای فاصله زبری مختلف. الف) بازشدگی دریچه ۱سانتیمتر، دبی ۶/۵، شیب ۱. ----- ۶۰
- ب) بازشدگی دریچه ۳سانتیمتر، دبی ۶/۵، شیب ۱. ----- ۶۰
- شکل ۴-۲۳- تغییرات hsb در برابر db برای فاصله زبری مختلف. الف) بازشدگی دریچه ۱سانتیمتر، قطر زبری ۳، شیب ۱. ب) بازشدگی دریچه ۳سانتیمتر، قطر زبری ۳، شیب ۱. ----- ۶۱
- شکل ۴-۲۴- تغییرات hsb در برابر db برای بازشدگیهای مختلف، دبی ۵، قطر زبری ۳، شیب ۱. ----- ۶۲
- شکل ۴-۲۵- تغییرات hsb در برابر db برای شیبهای مختلف. الف) بازشدگی دریچه ۱سانتیمتر، قطر زبری ۰/۷۵، دبی ۲. ب) بازشدگی دریچه ۳سانتیمتر، قطر زبری ۰/۷۵، دبی ۲. ----- ۶۳
- شکل ۴-۲۶- تغییرات hsb در برابر db برای قطرهای زبری مختلف، بازشدگی دریچه ۳سانتیمتر، دبی ۶/۵، شیب ۰/۵. ----- ۶۴
- شکل ۴-۲۷- تغییرات در hsb برابر Wb برای اعداد فرود مختلف. الف) بستر کاذب صاف. ب) زبری به قطر ۱/۵. ----- ۶۵
- شکل ۴-۲۸- تغییرات hsb در برابر Wb برای فاصله زبری مختلف، دبی ۲، قطر زبری ۱/۵، شیب ۱. ----- ۶۶
- شکل ۴-۲۹- تغییرات hsb در برابر Wb برای شیبهای مختلف، دبی ۳/۵، قطر زبری ۰/۷۵، فاصله زبری ۱/۵. ----- ۶۶
- شکل ۴-۳۰- تغییرات hsb در برابر Wb برای قطر زبری مختلف، دبی ۶/۵، فاصله صفر، شیب ۱. ----- ۶۷
- شکل ۴-۳۱- تغییرات hsb در برابر S برای اعداد فرود مختلف. الف) بازشدگی دریچه ۱سانتیمتر، قطر زبری ۳، فاصله زبری ۳. ب) بازشدگی دریچه ۳سانتیمتر، قطر زبری ۳، فاصله زبری ۳. ----- ۶۸
- شکل ۴-۳۲- تغییرات hsb در برابر S برای فاصله زبری مختلف. الف) بازشدگی دریچه ۱سانتیمتر، دبی ۵، قطر زبری ۱/۵. ب) بازشدگی دریچه ۳سانتیمتر، دبی ۵، قطر زبری ۱/۵. ----- ۶۹
- شکل ۴-۳۳- تغییرات hsb در برابر S برای بازشدگیهای مختلف، قطر زبری ۰/۷۵، دبی ۲، فاصله زبری ۳. ----- ۷۰
- شکل (۴-۳۴) تغییرات hsb در برابر S برای قطر زبری مختلف. الف) بازشدگی دریچه ۱سانتیمتر، دبی ۳/۵، فاصله زبری ۱/۵. ب) بازشدگی دریچه ۳سانتیمتر، دبی ۳/۵، فاصله زبری ۱/۵. ----- ۷۱

فهرست جدول

جدول ۳-۱- مشخصات برنامه کلی آزمایش ها و محدوده متغیرهای وابسته-----۳۲

فصل اول

مقدمه و بیان مسئله

آبشستگی^۱ بستر یکی از عمده ترین مشکلات سازه‌هایی از قبیل حوضچه‌های آرامش^۲، دریچه‌های کشویی^۳ و سرریزها است که علاوه بر تاثیر مستقیم بر پایداری سازه، ممکن است باعث تغییر در مشخصات جریان و در نتیجه تغییر در پارامترهای طراحی سازه شود. به همین دلیل، پیش‌بینی شکل و ابعاد حفره آبشستگی در پایین‌دست این سازه‌ها از گذشته تا به امروز مورد توجه محققین بوده است و به دلیل پیچیدگی این موضوع، اکثر محققین آنرا به صورت آزمایشگاهی بررسی کرده‌اند. در هر حال با وجود تمام تحقیقات مهمی که تاکنون در زمینه آبشستگی موضعی حاصل گردیده است، هنوز هم شواهد بسیاری از آبشستگی‌های گسترده در پایاب حوضچه‌های آرامش، دریچه‌های کشویی، سرریزها، آبشکن‌ها، کالورت‌ها و مجاورت پایه‌های پل وجود دارد که می‌تواند پایداری این سازه‌ها را با مشکل جدی مواجه کند. زمانی که تنش برشی جریان آب عبوری از آبراهه از میزان بحرانی شروع حرکت ذرات بستر بیشتر شود پدیده آبشستگی اتفاق می‌افتد. تحقیقات نشان داده است که عوامل بسیار زیادی بر آبشستگی در پایین‌دست حوضچه‌های آرامش تاثیرگذار هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به چسبنده یا غیرچسبنده بودن خاک، اندازه‌ی ذرات رسوب و قطر دانه‌بندی اشاره کرد.

۱-۲- بیان مسئله

آبشستگی پدیده‌ای است که به دلیل ناکافی بودن استهلاک انرژی^۴ و تشکیل جریان‌های گردابی^۵ در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی نظیر حوضچه‌های آرامش به وجود می‌آید. برآورد عمق آبشستگی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی یکی از مهمترین مسائل مربوط به سازه‌های هیدرولیکی و هیدرولیک رسوب است. برای این منظور شناسایی پدیده آبشستگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است

¹ Scour

² Stilling Basin

³ Sluice Gate

⁴ Energy Disipation

⁵ Vortex flow

(حمیدی فر و همکاران، ۱۳۸۹).

از انواع آبشستگی، آبشستگی موضعی می‌باشد که در محل‌هایی که شدت جریان‌های درهم به طور موضعی افزایش یابد ایجاد می‌شود. از جمله این محل‌ها پایین دست دریچه‌های کشویی است که در صورت عدم کنترل آن پایداری سازه به خطر افتاده، مورفولوژی بستر تغییر کرده و مشکلاتی در روند آبرگیری بوجود خواهد آمد. راهکارهای مختلفی جهت کنترل آن اندیشیده شده است که از آن می‌توان به افزایش عمق پی، حفاظت بستر و کاهش قدرت تخریبی جریان از طریق زبر نمودن بستر می‌باشد. در این تحقیق هدف بررسی کارایی زبری‌های دایره‌ای در کنترل ابعاد آبشستگی پایین دست دریچه‌های کشویی می‌باشد.

۱-۳- آبشستگی در پایین دست حوضچه آرامش

حوضچه آرامش، عبارتست از قسمت کوتاهی از یک کانال کف‌سازی شده که در انتهای یک سرریز یا هر منبع تولیدکننده جریان فوق بحرانی^۱ قرار می‌گیرد و هدف از طراحی آن این است که پرش هیدرولیکی در داخل آن اتفاق افتد و جریان به حالت زیر بحرانی^۲ درآمده و بر روی مصالح فرسایش-پذیر پایین دست منتقل شود. متغیرهای مهم در طراحی حوضچه آرامش عبارتند از عرض حوضچه، طول حوضچه، ارتفاع دیواره‌ها و رقوم بستر حوضچه. عرض حوضچه یک متغیر بسیار مهم می‌باشد زیرا ابعاد پرش هیدرولیکی تابع آن است. به طور کلی اصولاً اگر عرض حوضچه بیشتر باشد، عمل حوضچه از نظر هیدرولیکی بهتر خواهد بود زیرا دبی در واحد عرض کمتر خواهد شد و اندازه قدرت گردابه‌های ایجاد شده پس از پرش کمتر خواهد بود. از انواع حوضچه آرامش، حوضچه آرامش با بستر زبر است که المان‌های زبر به صورت نوارهای موازی و یکنواخت، عمود بر جهت جریان در کف حوضچه قرار گرفته باشند و از آنجا که مقاومت حوضچه آرامش در مقابل فرسایش و کاویتاسیون حائز

¹ Supercritical

² Subcritical

اهمیت می باشد، بر اثر نظریه اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)، نوارهای زبری در داخل حوضچه باید به نحوی قرار گیرند که تاج آن ها هم سطح بستر بالادست بوده و نقش گودافتادگی را ایفا نمایند.

آبشستگی موضعی پایین دست حوضچه های آرامش پدیده ای است که به دلیل وجود سرعت محلی بیشتر از سرعت آستانه حرکت به وجود می آید. بر اثر این پدیده اختلاف ارتفاعی بین کف بتنی حوضچه و بستر رودخانه به وجود می آید. با استفاده از زبری کف می توان این پدیده را تا حدودی کنترل کرد.

۱-۴- هدف از تحقیق حاضر و ضرورت انجام آن

تاکنون تحقیقات زیادی به منظور تخمین عمق آبشستگی صورت گرفته و روابط زیادی بدست آمده است ولی پیچیدگی مسئله و دخالت عوامل مختلف در این پدیده و مشکلات ناشی از بروز آن سبب شده است که تحقیقات در این زمینه ادامه داشته باشد.

هدف از این تحقیق بررسی آزمایشگاهی آبشستگی پایین دست دریچه کشویی تحت شرایط هندسی و هیدرولیکی مختلف از قبیل بستر شیب دار با شیب مثبت^۱، زبری های سینوسی^۲، بازشدگی دریچه^۳ و دبی جریان^۴ می باشد. برای نیل به این هدف اصلی، اهداف زیر دنبال خواهد شد.

➤ بررسی و تخمین میزان ابعاد آبشستگی (طول و ارتفاع قله) پایین دست در شیب صفر به

همراه زبری های نیم دایره ای

➤ بررسی تاثیر استفاده از زبری های کف در کاهش ابعاد آبشستگی

➤ بررسی تاثیر شیب مثبت کف در میزان آبشستگی

¹ Positive Sloping

² Sinusoid roughness

³ Gate opening

⁴ Discharge flow

۱-۵- سازمان دهی فصل‌های پایان نامه

فصل اول پایان نامه شامل مقدمه، تاریخچه، کاربردها و اهمیت موضوع، اهداف پایان نامه و شرح کلی فصول کلی پایان نامه 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 پایان نامه پرداخته است. در فصل چهارم نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها ارائه و مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. در فصل پنجم ضمن ارائه نتایج به دست آمده به صورت کلی و خلاصه، پیشنهاداتی در رابطه با ادامه تحقیقات ارائه گردید.

فصل دوم

کلیات و پیشینه تحقیق

برای آنکه بتوان تحلیل درستی از پدیده آبشستگی داشت و راهکارهای مناسبی جهت کنترل آن اتخاذ کرد، بایستی با این پدیده و عوامل موثر بر آن آشنا شد. به همین منظور در این فصل به معرفی پدیده آبشستگی و پارامترهای موثر بر آن پرداخته شده است.

بسترهای طبیعی در اثر عبور جریان آب فرسایش می‌یابند. به فرسایش موضعی که در اثر جریان آب یا به وسیله سازه‌های آبی ایجاد می‌شود آبشستگی گفته می‌شود. جریان در محل وقوع فرسایش (آبشستگی) یک فرآیند دو فاز (آب و رسوب) می‌باشد. بنابراین آبشستگی حاصل از متغیرهای متعددی از قبیل پارامترهای جریان، مشخصات بستر آبرفتی، زمان و هندسه آبراهه می‌باشد. دانشمندان برای مطالعه این پدیده از راه‌های مختلفی از جمله روش نظری، روش نیرو، روش تحلیل ابعادی و مشاهدات صحرایی استفاده کردند، که مناسب‌ترین روش مطالعه این گونه پدیده روش تحلیل ابعادی به همراه یک مدل فیزیکی و مشاهدات صحرایی می‌تواند باشد (فرهودی، ۱۹۷۹).

همچنین با توجه به اینکه یکی از عوامل موفقیت هر طرح جدید پژوهشی، کسب اطلاعات کافی از تحقیقات و مطالعات قبلی در آن زمینه و بررسی نقاط قوت و ضعف آن‌ها است. به این منظور پس از بیان مبانی نظری پدیده آبشستگی، خلاصه‌ای از نتایج پژوهش‌هایی که تاکنون در این زمینه انجام شده، ارائه می‌شود.

۲-۲ - آبشستگی

آبشستگی به فرسایش قسمتی از بستر یک آبراهه یا اطراف سازه احداث شده که در اثر سرعت بالای جریان به وجود می‌آید گفته می‌شود. عامل آبشستگی تنش بیش از حد تحمل مصالح است که از طرف آب به آن‌ها وارد می‌شود (شفاعی بجستان، ۱۳۸۵)

یکی از مناطق مستعد وقوع آبشستگی پایین دست سازه‌های هیدرولیکی نظیر سدها می‌باشد. عبور جریان از روی سرریزها اگرچه با اتلاف انرژی همراه است اما مقداری انرژی مستهلک نشده باقی می‌ماند که در پایین دست رودخانه، آبشستگی ایجاد می‌کند. پدیده آبشستگی به وجود آمده می‌تواند به روش‌های زیر برای سدها و سازه‌های هیدرولیکی ایجاد خطر کند:

- به خطر انداختن پایداری قسمتی یا کل سازه از طریق تخریب سازه‌ای یا افزایش نیروی زه.
- تهدید پایداری شیب‌های سواحل و کف رودخانه در پایین دست سدها و سایر سازه‌های هیدرولیکی.
- به وجود آمدن تپه‌هایی از مواد فرسایش یافته که در بالا بردن پایاب و عملکرد تخیله کننده‌ها مؤثر است. این امر باعث کاهش انرژی دریافتی توسط توربین‌ها نیز می‌شود.
- تغییر مورفولوژی رودخانه و مشکلات ایجاد شده برای آبگیرها در قسمت پایین دست

۲-۳- انواع آبشستگی

بروسرز و رادکیوی^۱ (۱۹۹۱) بر اساس بررسی‌های انجام شده، آبشستگی را به صورت زیر تقسیم‌بندی کردند:

- آبشستگی از نظر علت به وجود آمدن آن، که شامل آبشستگی عمومی، آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی مقطع و آبشستگی موضعی است. از مجموع این سه آبشستگی، عمق آبشستگی کل به دست می‌آید.
- آبشستگی از نظر وضعیت حمل رسوب، که شامل آبشستگی در حالت آب زلال^۲ و آبشستگی در حالت آب حاوی رسوب^۳ است.

^۱ Breusers and raud kivi

^۲ Clear_ Water Scour

^۳ Live_ Bed Scour

➤ آبشستگی از نظر وضعیت ذرات رسوب در حفره آبشستگی شامل آبشستگی استاتیکی^۱ و دینامیکی^۲ می‌شود.

۲-۳-۱- آبشستگی عمومی

این نوع آبشستگی زمانی رخ می‌دهد که جریان در بازه‌ای از رودخانه قادر باشد ذرات بستر را در طول مسیر جابجا و با خود حمل کند که باعث کاهش تراز بستر رودخانه در همان بازه می‌شود.

آبشستگی عمومی شامل موارد زیر می‌شود (کوتیاری و همکاران^۳، ۱۹۹۲).

➤ پایین افتادگی تراز رودخانه

➤ مهاجرت جانبی رودخانه (جابجایی رودخانه در پلان)

➤ آبشستگی در قوس رودخانه‌ها و پیچانرودها

➤ آبشستگی در محل اتصال رودخانه‌ها و انشعابات

پدیده‌های فوق به‌طور مستقیم به مشخصات حوضه آبریز و شکل رودخانه وابسته‌اند (معاونت برنامه-ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، ۱۳۹۰).

۲-۳-۲- آبشستگی ناشی از تنگ شدگی مقطع

این نوع آبشستگی در محل‌هایی رخ می‌دهد که سرعت جریان به علت کاهش سطح مقطع جریان در این ناحیه تحت تاثیر وجود یک سازه، افزایش و توان فرساینده‌گی جریان افزایش می‌یابد که منجر به کنده شدن مواد بستر مجاور سازه خواهد شد. قابل ذکر است که فرسایش تا وقتی ادامه دارد که سطح مقطع عبور جریان به اندازه کافی افزایش یابد (شفاعی بجستان، ۱۳۸۷).

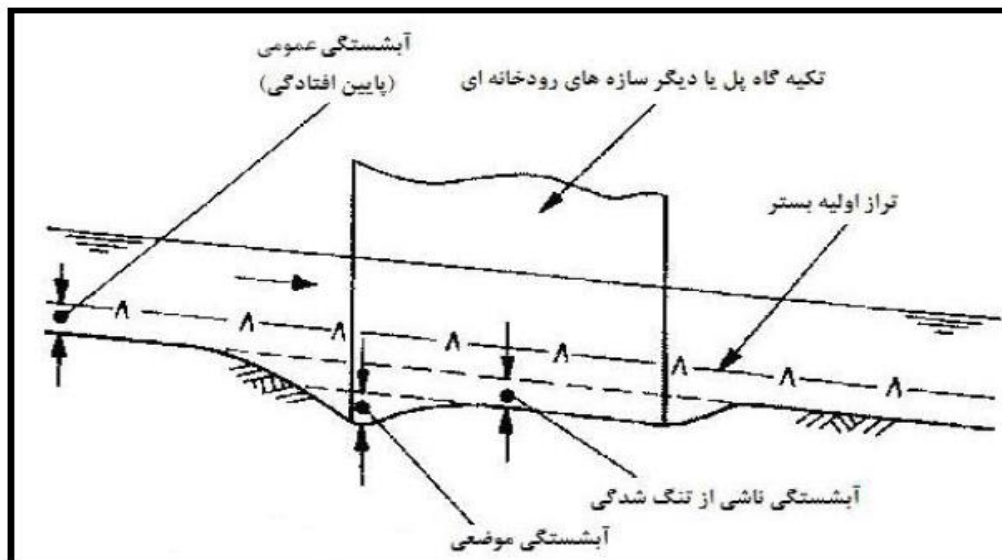
¹ Static scour

² Dynamic Resilience

³ Kothyari et al

۲-۳-۳- آبشستگی موضعی

این نوع آبشستگی در نتیجه برخورد جریان با مانع می‌باشد که موجب شتاب گرفتن جریان و ایجاد گردابه‌هایی در جریان می‌شود که رسوبات را از اطراف این موانع دور می‌کنند. شکل (۱-۲) انواع آبشستگی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲- انواع آبشستگی‌ها (راهنمای روش‌های محاسبه آبشستگی موضعی، ۱۳۸۶)

فرسایش موضعی با توجه به ظرفیت جریان در انتقال رسوب بستر رودخانه به دو حالت فرسایش آب زلال و فرسایش بستر متحرک تقسیم می‌شود (خلیلی شایان، ۱۳۹۲). در آبشستگی آب زلال انتقال رسوب از بالادست به سمت پایین‌دست وجود ندارد، اما در آبشستگی بستر فعال ذرات رسوب از قسمت بالادست به سمت پایین‌دست جابجا می‌شوند، به همین علت عمق آبشستگی در حالت آب زلال با توجه به عدم جایگزینی ذرات داخل حفره، نسبت به آب زلال بیشتر است.

۲-۳-۴- آبشستگی استاتیکی و دینامیکی

اندازه‌گیری عمق حفره آبشستگی بعد از وقوع سیلاب می‌تواند گمراه کننده باشد. زیرا حداکثر عمق آبشستگی معمولاً در زمان حداکثر سیلاب اتفاق می‌افتد و در خلال فروکش نمودن سیلاب قسمتی از

حفره آبشستگی ممکن است پر شود. کاهش عمق آبشستگی ممکن است در اثر ته‌نشینی مصالح معلق شده در حفره آبشستگی یا ریزش شیب‌های دیواره حفره آبشستگی اتفاق افتد. در تحقیقات آزمایشگاهی معمولاً دو نوع آبشستگی در نظر گرفته می‌شود که با عناوین آبشستگی استاتیکی و آبشستگی دینامیکی نامیده می‌شوند. معمولاً عمق آبشستگی استاتیکی را عمق حفره در پایان آزمایش در نظر می‌گیرند که پس از ته‌نشینی احتمالی ذرات در حفره آبشستگی به‌جای می‌ماند و عمق آبشستگی دینامیکی، عمقی است که در هنگام انجام آزمایش و قبل از ته‌نشینی رسوبات در حفره آبشستگی وجود دارد (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۹۰).

۲-۴- مکانیزم آبشستگی ناشی از جت‌های افقی مستغرق

جریان به صورت یک جت افقی از زیر دریچه خارج شده و با عبور از بستر صلب بخشی از انرژی جنبشی آن کاسته می‌شود. همچنین ممکن است در اثر وقوع پرش هیدرولیکی^۱ آزاد یا مستغرق اتلاف انرژی جنبشی جریان به صورت گرما اتفاق بیفتد. جریان عبوری از کف صلب (کف‌بند یا سنگچین) حفاظت شده به بستر فرسایش‌پذیر می‌رسد که سبب جدایی خطوط جریان و تشکیل گردابه‌ها در آن ناحیه می‌شود. نتیجه آن معلق شدن ذرات رسوبی و انتقال آن به پایین‌دست و تشکیل آبشستگی می‌باشد (ناصری، ۱۳۷۵). با وقوع آبشستگی به تدریج تراز بستر در پایین‌دست سازه پایین افتاده و رسوبات جابجا شده از این قسمت در قسمت پایین‌دست بر روی هم انباشته شده، تشکیل قله آبشستگی را می‌دهند. با گذشت زمان و پایین رفتن تراز بستر اگر عمق رسوبات کم باشد آبشستگی به پی رسیده و خطرات جدی بر پایداری سازه به دنبال خواهد داشت. همچنین در قسمت پایین‌دست نیز در صورتی که رسوبی از بالادست به آن قسمت منتقل نشود، رفته رفته ارتفاع قله کاهش خواهد یافت.

^۱ Hydraulic jump

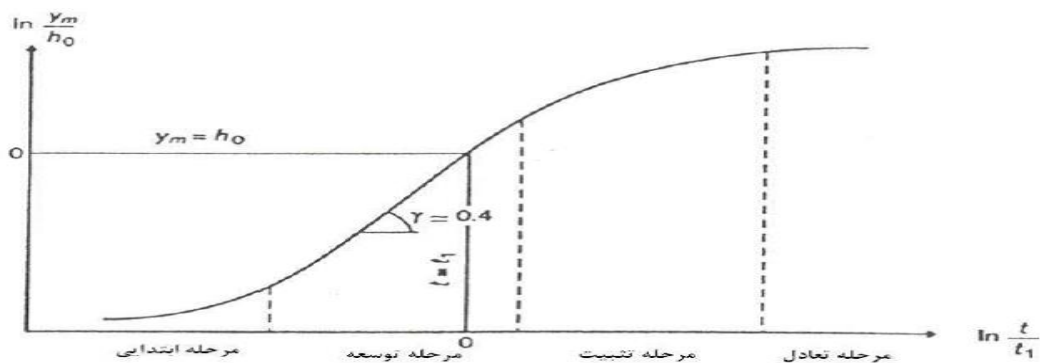
۲-۵- عوامل موثر بر آبشستگی پایین دست سازهای هیدرولیکی

آبشستگی در پایین دست سازهای هیدرولیکی تابع خواص مواد بستر (رسوبات و مشخصات هندسی آنها) مشخصات سیال و هیدرولیکی جریان است. از آن جمله می‌توان D_{50} ذرات، چگالی ذرات، مشخصات جریان (دبی و سرعت جریان)، مشخصات هندسی شکل سطح مقطع، موقعیت سطح مقطع، شیب آبراهه، چگالی سیال و خصوصیات هندسی سازه هیدرولیکی را نام برد.

۲-۶- مراحل توسعه گودال آبشستگی

بر اساس مطالعاتی که توسط محققینی نظیر بروسرز (۱۹۶۶)، دیتز (۱۹۶۹) و زنک (۱۹۷۸) انجام گرفته است، پدیده آبشستگی به‌طور کلی دارای چهار مرحله زیر می‌باشد (بروسرز و رادکیوی، ۱۹۹۱).

- مرحله ابتدایی^۱
- مرحله توسعه^۲
- مرحله تثبیت^۳
- مرحله تعادل^۴



شکل ۲-۲- مراحل توسعه حفره آبشستگی (نشریه شماره ۵۴۹).

¹ Initial Phase
² Development Phase
³ Stabilization Phase
⁴ Equilibrium Phase

مرحله اول ظرفیت آبخستگی بالایی دارد و حفره آبخستگی در این مرحله آغاز می‌شود. در مرحله دوم عمق و ابعاد حفره آبخستگی گسترش می‌یابد. در مرحله سوم روند تغییرات نیمرخ بستر کاهش می‌یابد. در این مرحله، دیواره پایین دست حفره آبخستگی دستخوش تغییرات محسوسی می‌شود. در مرحله چهارم که مرحله تعادل است، تنها حرکت ذرات ممکن است درون حفره آبخستگی صورت گیرد به طوری که ذراتی که حرکت غلطشی دارند از درون حفره آبخستگی خارج نمی‌شوند. در این مرحله، با توجه به شرایط جریان، ممکن است حتی جابجایی ذرات نیز متوقف شود هر کدام از مراحل آبخستگی در شکل (۲-۲) نشان داده شده است (بروسرز، ۱۹۶۶).

۲-۷- دریاچه کشویی

دریاچه‌های کشویی یکی از کاربردی‌ترین سازه‌های هیدرولیکی می‌باشند که برای تنظیم سطح آب و تخلیه رسوبات در بندهای انحرافی و تامین سطح آب مناسب در کانال‌های آبرسانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. دریاچه‌ها در سدهای انحرافی و شبکه‌های آبیاری و زهکشی کاربرد فراوان دارند. همچنین برای تخلیه آب مازاد کانال‌ها، مخازن و پشت سدها به کار می‌روند. تشکیل جهش هیدرولیکی به عنوان پدیده‌ای متداول بلافاصله در پایین دست دریاچه‌ها همراه با تلاطم شدید است. در نتیجه نرخ حرکت رسوب و فرسایش به صورت موضعی در پایین دست این سازه‌ها افزایش می‌یابد که منجر به پایین رفتن موضعی بستر نسبت به تراز عمومی بستر آبراهه می‌گردد (خلیلی شایان، ۱۳۹۲).

۲-۷-۱- انواع جریان در دریاچه کشویی

با توجه به نوع جریان خروجی از دریاچه‌ها، سه حالت زیر را می‌توان در نظر گرفت:

- دریاچه کشویی با جریان خروجی آزاد
- دریاچه کشویی با جریان خروجی مستغرق
- دریاچه کشویی با جریان خروجی آزاد در ابتدای لوله

به منظور پیشگیری از آبشستگی گسترده ناشی از جریان پرسرعت خروجی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی مانند دریچه‌های کشویی، معمولاً از یک کف‌بند صلب استفاده می‌شود. اگر چه وجود کف-بند تا حد زیادی منجر به حفاظت بستر می‌گردد، اما به علت مستهلک نشدن کامل انرژی مازاد جریان، در انتهای کف‌بند آبشستگی موضعی اتفاق می‌افتد که شکل و ابعاد حفره آبشستگی تشکیل شده بایستی در طراحی‌ها پیش‌بینی گردد (حمیدی‌فر و همکاران، ۱۳۸۹). در این تحقیق آبشستگی پایین دست کف صلب قرار گرفته بعد از دریچه کشویی با جریان خروجی آزاد بررسی می‌شود.

۲-۸- مروری بر مطالعات انجام شده

آنچه که در این بخش مدنظر قرار گرفته مروری بر تحقیقات انجام شده قبلی در زمینه آبشستگی موضعی مصالح غیرچسبنده تحت شرایط مختلف جریان می‌باشد. در برخی از موارد جریان آب از سازه‌های هیدرولیکی به صورت جت منتشر می‌شود. سرعت آب در جت‌ها معمولاً آنقدر زیاد است که به فرسایش کف منجر می‌شود و حفره بزرگی در جلوی سازه به وجود می‌آید. آبشستگی ناشی از جت-ها به انواع مختلف تقسیم‌بندی می‌شود که می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود.

(۱) آبشستگی در اثر جت افقی (جت دیواره‌ای)^۱

(۲) آبشستگی در اثر جت‌های قائم^۲

(۳) آبشستگی در اثر جت‌های زاویه دار^۳

پدیده آبشستگی موضعی ناشی از جت‌ها موضوع تحقیقات تعداد زیادی از محققین بوده است که اکثر این افراد به دلیل پیچیدگی‌های خاص مسئله آن را به صورت آزمایشگاهی و تجربی بررسی کرده‌اند.

لارسن^۱(۱۹۵۲)، جزء نخستین کسانی می‌باشد که روی آبشستگی موضعیناشی از جت افقی کار کرده‌اند. ایشان آبشستگی ناشی از جت دیواره‌ای^۲ بر روی بستر متحرک^۳ را با سه نوع مواد بستر و

^۱ Wall jet

^۲ Vertical jet

^۳ Angled jet

چندین سرعت مختلف جت مورد آزمایش قرار دادند. وی از آزمایش‌های خود نتیجه گرفت که شکل پروفیل‌های حفره آبشستگی در تمام حالات مشابه می‌باشند بنابراین با استفاده از پارامتر طول X_D (فاصله افقی از خروجی جت تا تاج تجمع رسوبات) منحنی بدون بعدی برای پروفیل آبشستگی به دست آورد.

بروسرز (۱۹۶۶)، تاثیر آشفتگی روی بار بستر در مقیاس زمانی را مورد بررسی قرار داد. وی با تحقیقاتی که انجام داد نتیجه گرفت که انتقال رسوب در گودال آبشستگی وابسته است به تفاوت بین سرعت ماکزیمم ایجاد شده و سرعت بحرانی، سرعت ماکزیمم تابعی از سرعت متوسط و شدت آشفتگی نسبی در انتهای بستر محافظت شده می‌باشد. نسبت بین متوسط انحراف معیار استاندارد سرعت لحظه‌ای در عمق (σ_{II}) و متوسط میانگین سرعت لحظه‌ای در عمق (u) شدت آشفتگی نسبی تعریف می‌شود.

والنتین^۴ (۱۹۶۷)، در مطالعاتش آبشستگی موضعی ناشی از جت افقی را مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار داد و یک رابطه تجربی برای تخمین عمق حفره آبشستگی پیشنهاد داد. کارهای او بیشتر در زمینه ارتباط عمق ماکزیمم آبشستگی با شرایط اولیه جریان می‌باشد. او آبشستگی ناشی از جت افقی را مورد بررسی قرار داد. تحقیقات او در جائیکه آبشستگی در زمان کوتاهی اتفاق می‌افتد، کاربرد دارد. بعنوان مثال می‌توان به آبشستگی هنگام پیک سیلاب اشاره کرد که در این حالت زمان پارامتر خوبی جهت بررسی پدیده آبشستگی نمی‌باشد.

¹ Laursen

² Wall jet

³ Live_Bed Scour

⁴ Valentin

راجاراتنام^۱ (۱۹۸۳، ۱۹۸۱، ۱۹۷۷)، چندین مقاله درباره آبشستگی ناشی از جت‌های دو بعدی بر روی بسترهای فرسایش‌پذیر ارائه کردند. نتایج بدست آمده از تحقیقات ایشان حاکی از تشابه پروفیل طولی آبشستگی و تغییرات لگاریتمی عمق آبشستگی نسبت به زمان بود.

راف و همکاران (۱۹۸۲) تحقیقاتی در زمینه ابعاد حفره آبشستگی انجام دادند. نتایج به دست آمده از یک سری از روابط تجربی عمق، عرض، طول و حجم آبشستگی به‌عنوان تابعی از قطر مجرای آبی، دبی و همچنین دانه‌بندی بیان شد.

ابت و همکاران (۱۹۸۴) تحقیقاتی به‌منظور برآورد ابعاد آبشستگی انجام دادند. نتایج ایشان نشان داد که عدد فرود پایین‌دست کالورت عامل مؤثری می‌باشد. همچنین ابعاد حفره آبشستگی به‌شدت تخلیه و قطر متوسط دانه‌ها وابسته است و روابطی برای تعیین ابعاد حفره آبشستگی برای انواع مواد بستر تعیین شد.

حسن و نارایانان^۲ (۱۹۸۵)، به بررسی نرخ آبشستگی در اثر جت آب خروجی از بازشدگی دریچه کشویی در پایین‌دست یک کف‌بند صلب^۳ پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که طول کف‌بند یک پارامتر بسیار مهم در مشخصات حفره آبشستگی است و باعث پراکندگی داده‌ها در پروفیل بی‌بعد حفره برای طول‌های مختلف کف‌بند می‌شود.

مسن^۴ (۱۹۸۵)، بررسی‌هایی را در مورد آبشستگی ناشی از جت پایین‌دست سدها و همچنین تحقیقات انجام شده توسط سایر محققین انجام داد و بر اساس این تحقیقات روابط به دست آمده برای تعیین حداکثر عمق آبشستگی را به پنج گروه تقسیم‌بندی کرد. بر اساس مطالعات میسن روابطی که از شدت جریان، ارتفاع ریزش و اندازه ذرات در پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی استفاده می‌کنند به قدر کافی دقت دارند و وارد کردن پارامترهای دیگر، تأثیر قابل توجهی ندارد.

^۱ Rajaratnam

^۲ Hassan Narayanan

^۳ Rigid scarf

^۴ Mason

نیک حسن و همکاران^۱ (۱۹۸۵)، آبشستگی ناشی از جت دو بعدی خروجی از زیر دریچه را در دو حالت با کفبند و بدون کفبند مطالعه کردند. آن‌ها اثرات اندازه ذرات، میزان بازشدگی دریچه، سرعت جت ورودی و طول کفبند را بر آبشستگی بررسی کردند. ایشان همچنین نتیجه گرفتند که پروفیل-های آبشستگی در زمان‌های مختلف مشابه بوده و در نهایت یک روش نیمه تجربی برای حداکثر عمق آبشستگی پیشنهاد کردند.

فرهودی و اسمیت^۲ (۱۹۸۲، ۱۹۸۵)، تاثیر زمان بر نرخ آبشستگی ناشی از جت افقی مستغرق و همچنین تغییرات طولی در پایین دست پرش هیدرولیکی را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که بین میزان آبشستگی و مشخصات هندسی حفره رابطه‌ایی معین و قابل تعریفی برقرار است.

ایماز^۳ (۱۹۸۸)، تحقیقاتی بر روی آبشستگی ناشی از جریان آب در مواقعی که جریان از روی سرریز یا دریچه تنها عبور می‌کند، انجام داد. نتایج تحقیق ایشان نشان می‌دهد که آبشستگی در پای سازه‌های ترکیبی سرریز-دریچه خیلی کمتر از زمانی است که تنها جریان از زیر دریچه می‌باشد. همچنین عمق آبشستگی بستگی زیادی به مقدار دبی جریان دارد.

چاتارجی و همکاران^۴ (۱۹۹۴)، پدیده آبشستگی و انتقال رسوب ناشی از جت مستغرق در پایین دست دریچه‌های کشویی را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که پروفیل‌های بی‌بعد آبشستگی مستقل از زمان و وابسته به اندازه ذرات رسوبی هستند.

صانعی (۱۳۸۶)، تحقیقات خود در زمینه آبشستگی موضعی در پایین دست سرریز ریزشی آزاد انجام داد. وی طبق نتایج خود چنین بیان کرد که برای کنترل پدیده آبشستگی بهتر است که به جای مستهلک کردن انرژی اضافی آب در پایین دست آبشارهای قائم در بستر صلب از یک محیط سیاله

¹ Nik Hassan et al

² Farhoudi and Smith

³ Uyumaz

⁴ Chatterjee et al

برای کاهش انرژی استفاده شود. به عبارتی دیگر یک حفره مصنوعی آبشستگی در پایین دست سازه احداث کرده تا همانند عمل لاشه‌چینی و حتی بهتر از آن بستر آبرفتی را حفاظت کند. اما باید توجه کرد که تاثیر این حفره مصنوعی در پایداری و گرا دیان خروجی جریان زیر سازه‌ای کنترل گردد.

هافمن^۱ (۱۹۹۷)، با استفاده از مدل آزمایشگاهی، رابطه تجربی ارائه کردند که در آن با بکار بردن قانون دوم نیوتن رابطه نیمه تحلیلی برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی ارائه نمود. که در آن با داشتن ضخامت لایه آب، سرعت خروجی از زیر دریچه و سرعت جریان در پایین دست حفره آبشستگی، حداکثر عمق آبشستگی محاسبه می‌شود.

کلز و همکاران^۲ (۲۰۰۱)، اثر اندازه رسوبات را بر آبشستگی پایین دست دریچه کشویی مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که عمق و مساحت ناحیه آبشستگی به میزان زیادی به اندازه رسوبات بستر بستگی دارد به گونه‌ای که با کاهش اندازه رسوبات بستر آبشستگی افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده نمودند که میزان آبشستگی در شرایط هیدرولیکی یکسان در رسوبات بستر با دانه‌بندی غیر یکنواخت در مقایسه با رسوبات بستر با دانه‌بندی یکنواخت بیشتر می‌باشد.

لیم و یو (۲۰۰۲)، پدیده آبشستگی پس از یک دریچه کشویی در پایین دست کفبند را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با انجام چندین آزمایش و نیز جمع‌آوری یافته‌های محققین پیشین نتیجه گرفتند که عمق آبشستگی در لبه کفبند تقریباً $0/44$ برابر حداکثر آبشستگی می‌باشد.

گاودی و ماریون^۳ (۲۰۰۳)، حداکثر عمق آبشستگی نسبت به زمان در پایین دست کفبند را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که عمق حفره آبشستگی در زمانی کوتاه گسترش پیدا کرده و این مقدار بسیار نزدیک به عمق حفره در زمان تعادل است.

^۱ Hoffmans

^۲ Kells et al

^۳ Gaudio and marion

درگاهی^۱ (۲۰۰۳)، به بررسی توسعه حفره آبشستگی در انتهای کفبند واقع در پایین دست یک سرریز پرداختند. وی هیچ گونه تشابهی بین پروفیل های حفره آبشستگی در انتهای کفبند بعد از یک سرریز مشاهده نکرد. همچنین نتایج آزمایش های وی، نشان دهنده عدم تقارن در عرض حفره آبشستگی بود.

دی و سرکار^۲ (۲۰۰۶)، نتایج آزمایش های آبشستگی بر اثر جت افقی مستغرق خروجی از یک دریچه کشویی را در بسترهای رسوبی یکنواخت و غیریکنواخت در پایین دست کفبند با طول های مختلف، ارائه کردند و به این نتیجه رسیدند که تغییرات زمانی عمق آبشستگی به صورت رابطه نمایی است. این محققان همچنین مشاهده کردند که در مقادیر زیاد اعداد فرود ذره، عمق تعادلی گودال آبشستگی مستقل از عدد فرود ذره است.

ادیوس و اسکورتینو^۳ (۲۰۰۶)، به مطالعه عددی و آزمایشگاهی آبشستگی ناشی از جت متلاطم افقی پرداختند. اندازه گیری سرعت توسط آن ها نشان داد که ساختار جریان بر روی کفبند، مشابه توزیع سرعت یک جت دیواره ای است. درحالی که بلافاصله بعد از کفبند توزیع سرعت به جت آزاد تغییر می یابد. همچنین با افزایش دبی جریان، انطباق بین نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی افزایش می یافت، زیرا در دبی های بالا، پروفیل آبشستگی به وضعیت دو بعدی نزدیکتر می شد.

شفاعی بجستان (۱۳۸۵)، به بررسی و تعیین حداکثر عمق آبشستگی پایین دست سرریز پلکانی در شرایط جریان ریزشی پرداخت و روابطی را برای حداکثر عمق آبشستگی پایین دست سرریز پلکانی بر اساس زاویه سرریز و تعداد پله ها ارائه دادند. در رابطه با اثر تغییرات دانه بندی به این نتیجه رسیدند که در شرایط هیدرولیکی مشابه با افزایش قطر متوسط رسوبات حداکثر عمق آبشستگی کاهش می یابد.

مفتخری (۱۳۸۸)، به بررسی آزمایشگاهی تاثیر غیریکنواختی رسوب بر آبشستگی موضعی با وجود

¹ Dargahi

² Dey and Sarkar

³ Adduce and Sciortino

صفحات قائم مدفون پرداخت. نتایج آزمایش‌های وی نشان می‌دهد که استفاده از صفحات مدفون به عنوان تقویت کننده بستر فرسایش‌پذیر در صورتی که با جانمایی مناسب مورد استفاده قرار گیرند می‌توان اثر مثبتی بر کنترل آبشستگی داشته باشد.

بالاچاندرا و کلس^۱ (۱۹۹۷)، به بررسی پدیده آبشستگی ناشی از جت خروجی در پایین دست دریچه کشویی با مدنظر قرار دادن طول کوتاه کفبند پرداختند. ایشان به این نتیجه رسیدند که فرآیند توسعه حفره آبشستگی دو مرحله حفر کردن، که به دلیل تشکیل جت نزدیک بستر با فرسایش بستر همراه است و پر کردن، که جت به سمت سطح منحرف می‌شود و با پر شدن بخشی از حفره آبشستگی همراه می‌باشد، تقسیم می‌شود.

علی حسینی و همکاران (۱۳۸۷)، به بررسی تشابه هندسی پروفیل‌های آبشستگی پایین دست جت افقی مستغرق با استفاده از مدل آزمایشگاهی پرداختند. پس از بررسی پارامترهای مختلف مانند میزان بازشدگی دریچه کشویی، دبی و سرعت جت افقی، عمق پایاب، قطردانه‌بندی ذرات رسوبی و زمان، انطباق خوبی بین منحنی‌های بی‌بعد مشاهده کردند که بیان‌گر این است، پروفیل‌های آبشستگی شبیه هم بوده و در حالت بی‌بعد مستقل از تمامی پارامترها و عوامل ذکر شده می‌باشد.

دی و سرکار (۲۰۰۸)، به بررسی تئوری و آزمایشگاهی میدان جریان در جهش هیدرولیکی مستغرق شده روی کانال‌های مستطیلی افقی با بستر صاف و زبر پرداختند. نتایج آزمایش‌های این محققین نشان داد که نرخ کاهش سرعت جت انتشار یافته از زیر دریچه با افزایش ارتفاع زبری‌ها افزایش می‌یابد و همچنین تنش برشی بستر با افزایش فاصله از دریچه کاهش و با افزایش زبری افزایش می‌یابد. ضخامت لایه درونی توزیع سرعت افقی و توزیع شدت تلاطم نیز با افزایش زبری بستر افزایش می‌یابد.

¹ Balachandra and Kells

جمال و همکاران^۱ (۲۰۰۹)، به منظور کاهش پارامترهای آبشستگی در پایین‌دست دریاچه‌ها از یک دیوار هدایتی در کف حوضچه استفاده کرده‌اند. نتایج حاصل از تحقیقات ایشان نشان داد که با افزایش عدد فرود عمق آبشستگی افزایش می‌یابد.

دهقانی و بشیری (۲۰۰۹)، به بررسی آزمایشگاهی حداکثر عمق آبشستگی سرریز تنها، دریاچه تنها و سازه ترکیبی سرریز-دریاچه بدون انقباض پرداختند. نکته جالبی که در کار آزمایشگاهی ایشان دیده شده است رفتار نوسانی روند فرسایش و رسوب گذاری به صورت پر و خالی شدن حفره آبشستگی است. بررسی‌های ایشان نشان داد که حداکثر عمق آبشستگی پایین‌دست سازه‌های ترکیبی سرریز-دریاچه خیلی کمتر از زمانی است که جریان تنها از روی سرریز عبور می‌کند.

شهابی و همکاران (۲۰۱۰)، به بررسی آزمایشگاهی مشخصات حفره آبشستگی در پایین‌دست سرریز و دریاچه ترکیبی پرداختند. نتایج این بررسی آزمایشگاهی نشان داد که عمق آبشستگی پایین‌دست سازه ترکیبی سرریز-دریاچه کم‌تر از عمق آبشستگی پایین‌دست سرریز می‌باشد. همچنین مشخصه‌های حفره آبشستگی، با افزایش عدد فرود، افزایش می‌یابد و در ارتفاع ریزش ثابت برای جت عبوری از روی آن، با افزایش بازشدگی دریاچه، حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد.

تونا و امیراغلو (۲۰۱۰)، تأثیر عمق پایاب بر محل آبشستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی را مورد بررسی قرار داده‌اند و بر اساس آزمایش‌های خود به این نتیجه رسیدند که با افزایش عمق پایاب حداکثر عمق آبشستگی کاهش پیدا کرده و محل آبشستگی از سرریز دورتر می‌شود.

حمیدی فر و همکاران (۱۳۸۹)، به بررسی آبشستگی موضعی پایین‌دست دریاچه کشویی پرداختند. طبق نتایج بدست آمده بیان کردند که اگر چه وجود کف‌بند تا حد زیادی منجر به حفاظت بستر می‌گردد، اما به علت مستهلک نشدن کامل انرژی مازاد جریان در انتهای کف‌بند آبشستگی موضعی اتفاق

¹ Gamal et al

می‌افتد که شکل و ابعاد حفره آبشستگی تشکیل شده بایستی در طراحی پیش بینی گردد.

حمیدی‌فر و امید (۱۳۸۹)، پروفیل آبشستگی پایین‌دست دریچه کشویی در رسوبات چسبنده در پایین‌دست کفبند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق نشان داد که پروفیل آبشستگی در عرض حفره یکنواخت نبوده و میزان آبشستگی در نزدیکی دیواره‌ها بیشتر است.

مهبودی و همکاران (۱۳۸۹)، به مطالعه آزمایشگاهی کنترل آبشستگی ناشی از جت افقی مستغرق با استفاده از سنگچین پرداختند. نتایج نشان داد که میزان آبشستگی در آزمایشاتی که طول‌های مختلف سنگچین در آن‌ها اجرا شده است، به میزان قابل توجهی نسبت به آزمایشاتی که بستر آن‌ها بدون محافظ می‌باشد کاهش می‌یابد. همچنین طراحی و اجرای روش سنگچین، می‌تواند تا ۱۰۰ درصد آبشستگی را کاهش دهد.

تونا و امیراغلو^۱ (۲۰۱۳)، پروفیل‌های آبشستگی در پایاب سرریزهای پلکانی را برای ۳ نوع رژیم جریان مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد که در نوع رژیم جریان ریزشی بیشینه عمق آبشستگی نسبت به رژیم جریان غیر ریزشی کمتر بود. ایشان به این نتیجه رسیدند که افزایش عدد فرود جریان باعث افزایش عمق آبشستگی خواهد شد. همچنین بر اساس پروفیل‌های عرضی برداشت شده، الگوی آبشستگی متقارن نیست و بیشینه عمق آبشستگی در چپ و راست خط طولی مرکزی اتفاق می‌افتد. نورعلیزاده و همکاران (۱۳۹۲)، به بررسی آزمایشگاهی شبیه‌سازی عملکرد دریچه در حداکثر عمق آبشستگی پایین‌دست و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی پرداختند. بررسی نتایج حاصل از دریچه نشان می‌دهد که حداکثر عمق آبشستگی با دبی رابطه مستقیم دارد. همچنین عدد فرود با نسبت حداکثر عمق آبشستگی به عمق جریان در بالادسترابطه مستقیم دارد و در دبی ثابت با افزایش بازشدگی دریچه حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد.

امین‌پور و همکاران (۱۳۹۳)، در یک شرایط آزمایشگاهی معین، مقایسه‌ای بین آبشستگی در حضور

¹ Tuna and emiroghlu

سرریز پلکانی^۱ با آبشستگی در حضور سرریز اوجی^۲ انجام دادند. نتایج بدست آمده نشان داد که وجود سرریز پلکانی بین ۴۳/۵۶ و ۷۴/۸۲ درصد باعث استهلاک انرژی^۳ می شود که این امر، به جهت کاهش ابعاد حفره آبشستگی، ایمنی بیشتر سازه سرریز پلکانی را نسبت به سرریز اوجی تحت شرایط مشابه توجیه می کند.

رفیعی و همکاران (۲۰۱۴)، اثر عمق پایاب بر حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست سرریزهای پلکانی را مورد مطالعه قرار دادند و بیان داشتند که حداکثر عمق آبشستگی به عمق پایاب وابسته است و با کاهش عمق پایاب، عمق آبشستگی افزایش می یابد.

اکبری و همکاران (۱۳۹۳)، به مطالعه آزمایشگاهی چگونگی تأثیر تغییرات دبی و عمق پایاب بر آبشستگی ناشی از جت خروجی از سرریز جامی شکل پرداخت و یک رابطه تجربی برای بیشترین عمق آبشستگی ارائه داد.

افضلی و همکاران (۱۳۹۵)، به بررسی تأثیر زاویه واگرایی و میزان بازشدگی دریچه در تعیین میزان آبشستگی در پایین دست حوضچه آرامش پرداختند. آن ها نتیجه گرفتند که با افزایش میزان بازشدگی دریچه کشویی یا کاهش عدد فرود جریان در زیر دریچه از میزان آبشستگی در پایین دست پرش هیدرولیکی ایجاد شده کاسته می شود. با افزایش عمق آب پایین دست که با کاهش عدد فرود جریان همراه است از میزان فرسایش در پایین دست حوضچه آرامش کاسته می شود. با افزایش زاویه واگرایی دیواره های جانبی حوضچه آرامش واگرا، با وجود عدد فرود ثابت برای جریان روی مصالح فرسایش پذیر از میزان فرسایش در پایین دست حوضچه های آرامش کاسته می شود.

شهسواری و همکاران (۱۳۹۷)، اثر زبری های موضعی در عمق های مختلف و فواصل متفاوت و با ضخامت ثابت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که این زبری ها در کاهش عمق آبشستگی و

¹ Stepped spillway

² ogge spillway

³ Energy Disipation

همچنین تاخیر در روند آبستگی موثر بوده است. به طوری که وجود یک مقدار بهینه برای فاصله بین زبری‌ها سبب افزایش عملکرد زبری‌ها شده است. همچنین در بهینه‌ترین فاصله بین زبری‌ها هر چه عمق زبری افزایش یابد موجب کاهش بیشتر عمق آبستگی و تاخیر بیشتر در روند آن خواهد شد.

کاظم‌پور لاکساری و همکاران (۱۳۹۷)، به مطالعه آزمایشگاهی آبستگی پایین‌دست سریزهای پلکانی-کنگره‌ای پرداختند. آزمایش‌ها برای شرایط مختلف دبی، هندسه کنگره‌ها و اعماق پایاب صورت گرفت. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد در شیب کارگذاری پلکان‌ها ۱:۱ در بهترین حالت هندسه کنگره‌ها، عمق حداکثر آبستگی به طور متوسط نسبت به حالت بدون کنگره در دو عمق پایاب کاهش می‌یابد.

۲-۹- جمع‌بندی

بررسی منابع نشان می‌دهد تا به حال تحقیقی در زمینه ابعاد آبستگی نظیر طول و ارتفاع قله در پایین‌دست دریچه کشویی با وجود زبری بستر انجام نشده است، لذا در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی آبستگی پایین‌دست دریچه کشویی با بستر سینوسی پرداخته شده است.

فصل سوم

مواد و روش‌ها

۳-۱- مقدمه

اثر متقابل عوامل هیدرولیکی و رسوبی، فرآیند آبشستگی را پیچیده تر کرده و به نظر می‌رسد بررسی این عوامل به کمک مدل‌های عددی و محاسباتی به آسانی امکان پذیر نمی‌باشد. بنابراین هر گونه پیشرفت در امور مهندسی باید براساس تحقیقات آزمایشگاهی و داده‌های بدست آمده از هر دو زمینه آزمایشگاهی و صحرایی باشد. از آنجا که برداشت‌های صحرایی در هر فصلی امکان پذیر نمی‌باشد و دشواری‌های خاص خود را دارد، امروزه مطالعات آزمایشگاهی گسترش بیشتری پیدا کرده است. مطالعات آزمایشگاهی نه تنها به فهم بهتر موضوع جهت بررسی اثر پارامترها و تغییرهای مختلف بر روی آبشستگی کمک می‌کند بلکه می‌تواند معیاری برای کنترل و بررسی مطالعات و روابط بدست آمده در این زمینه باشد.

در این فصل به معرفی جزئیات تجهیزات آزمایشگاهی و بستر رسوبی پایین دست دریچه پرداخته و در ادامه درباره روش انجام آزمایش‌ها و چگونگی برداشت داده‌ها بحث شده است و در انتها نیز تحلیل ابعادی پارامترهای موثر در آبشستگی ارائه شده است.

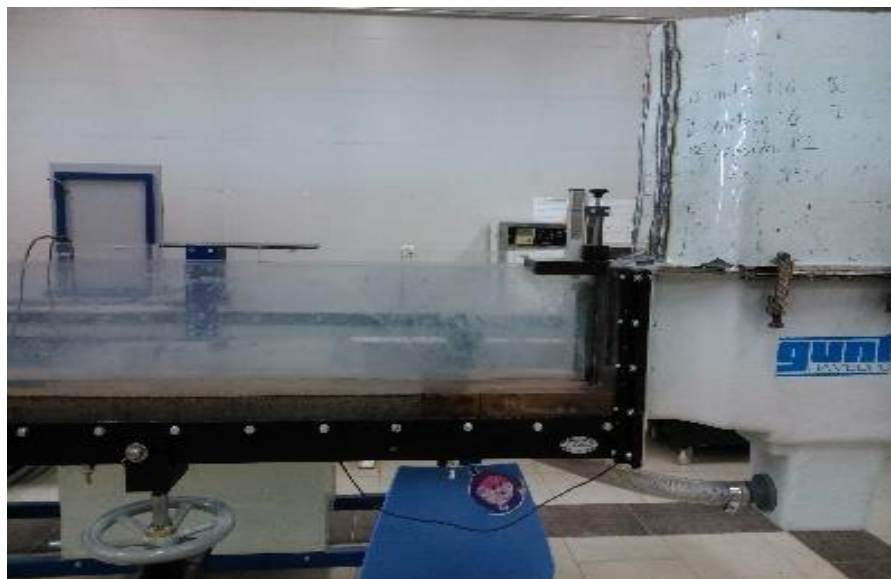
۳-۲- معرفی و تشریح جزئیات فلوم

آزمایش‌های مربوطه در یک فلوم آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود، انجام گرفت. فلوم آزمایشگاهی دارای طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۵، ۰/۰۹ و ۰/۳۴ متر و شیب پذیر 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، که شکل ۳-۱، نمای کلی فلوم آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱- نمای کلی فلوم آزمایشگاهی

لوله‌های انتقال آب از یک سر به مخزن بزرگ انتهایی و از یک سر به مخزن کوچک ورودی فلوم متصل می‌باشد، که آب را از مخزن آب بزرگ به مخزن ورودی هدایت می‌کند. آب پس از گذر از مخزن ورودی، وارد فلوم می‌شود. یک دریچه کشویی به منظور تنظیم جریان در ابتدای فلوم قرار داده شده است. در داخل مخزن ورودی سنسوری قرار داشت که به محض تماس با آب، سریعاً به دستگاه، فرمان خاموش شدن را می‌داد و از ریزش جریان از لبه مخزن ورودی جلوگیری می‌کرد. در دبی‌های زیاد، اگر بازشدگی دریچه ابتدایی کمتر از ۳ سانتیمتر باشد، دستگاه خاموش می‌شود و اگر اندازه بازشدگی دریچه ابتدایی بیشتر از این مقدار باشد، در دبی‌های کمتر، آبشستگی تشکیل نمی‌شود.



شکل ۳-۲- نمای جانبی مخزن-دریچه و کف صلب



شکل ۳-۳- مخزن انتهایی و خروجی

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



شکل ۳-۴- دبی سنج فلوم

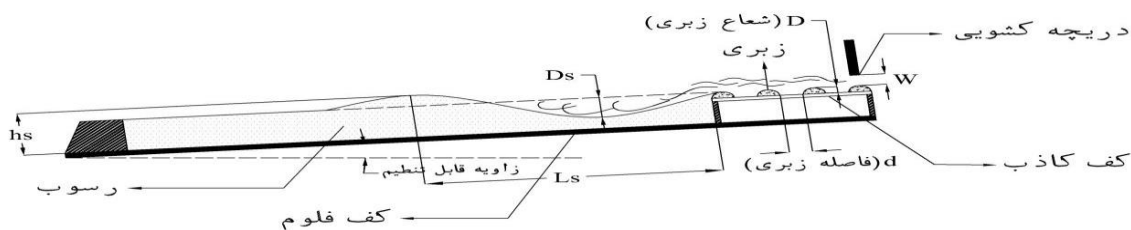
۳-۳- شرح آزمایش

آزمایشات حاضر، در ۳ شیب کف (۰، ۰/۵ و ۱ درصد) و ۴ دبی (۲، ۳/۵، ۵ و ۶/۵ مترمکعب بر ساعت) و ۳ بازشدگی دریچه ابتدایی (۱، ۲ و ۳ سانتیمتر) بر روی بسترهای با کف کاذب صاف و کف کاذب زبر به طول و ارتفاع ۳۳ و ۴/۵ سانتیمتر انجام شد. همچنین از ۳ ارتفاع مختلف زبری (زبری اول = لوله‌ای به قطر ۱/۵ سانتیمتر، زبری دوم = لوله‌ای به قطر ۳ سانتیمتر و زبری سوم = لوله‌ای به قطر ۶ سانتیمتر) استفاده و برای هر کدام از زبری‌ها ۳ بستر ساخته شد، که در آن‌ها فاصله بین زبری (d) متفاوت بود. در پایان هر آزمایش، مقدار آبشستگی در هر نقطه توسط یک عمق‌سنج با دقت ۰/۱ میلیمتر اندازه‌گیری شد. پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مورد بررسی در آزمایشات در جدول ۳-۱ ارائه شده است.

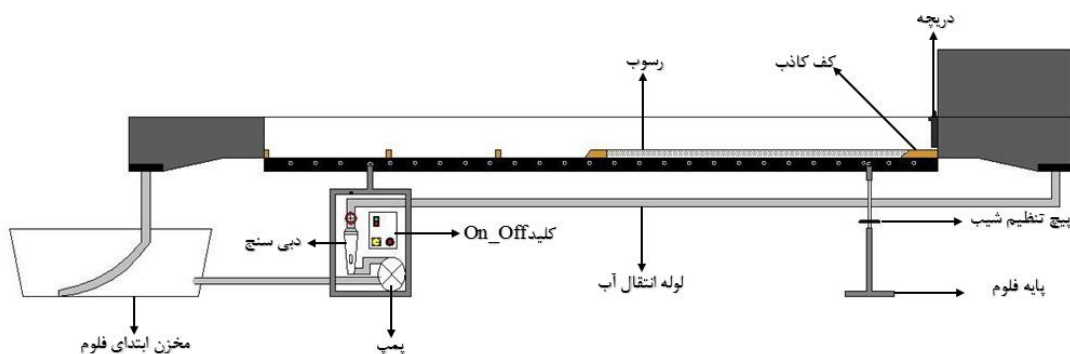
جدول ۳-۱- مشخصات برنامه کلی آزمایش ها و محدوده متغیرهای وابسته

توضیحات	پارامترها
۲، ۳/۵، ۵، ۶/۵	$q \left(\frac{m_3}{h} \right)$
۰، ۰/۵، ۱	$S (\%)$
۰، ۱/۵، ۳	$d (cm)$
۰/۷۵، ۱/۵، ۳	$D (cm)$
۱، ۲، ۳	$W(cm)$
۰/۸۵	$d_{50} (mm)$

که در آن Q دبی جریان، S شیب کف، d فاصله زبری ها، D ارتفاع زبری، w ارتفاع بازشدگی دریچه و d_{50} اندازه متوسط ذرات می باشد. در کل ۳۶ آزمایش روی بستر صاف، و ۳۲۴ آزمایش بر روی بسترهای زبر انجام گرفت. در تمامی آزمایش ها طول آبشستگی، عمق آبشستگی و ارتفاع قله در شرایط مختلف و مدت زمان ۱ ساعت اندازه گیری شد. شکل ۳-۵ و ۳-۶ پارامترهای مورد بررسی در آزمایشات و طرح شماتیک مدل آزمایشگاهی را نشان می دهد.



شکل ۳-۵- طرح شماتیک آبشستگی در بستر زبر



۳-۶- نمای شماتیک فلوم

۳-۴- 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 ممنتوم به دست آورد. در چنین مواردی سعی می‌شود، تا برای استخراج روابط ریاضی حاکم بر چنین پدیده‌هایی، از آنالیز ابعادی کمک گرفته شود. در واقع هدف از روش آنالیز ابعادی، پیدا بودن 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 رابطه‌ی به دست

آمده معمولاً ساده، منطبق با شرایط فیزیکی و قابل استفاده در هر سیستم آحادی 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 یکاهای آحاد نوشته شوند، در هر دو طرف تشابه کامل برقرار باشد. پارامترهای اصلی دستگاه مختلف شامل طول، جرم و زمان می‌باشد و بدین ترتیب در طرفین یک رابطه‌ی صحیح فیزیکی، بایستی نمای پارامترها یکسان باشد.

۳-۴-۱- تحلیل ابعادی پارامترهای مؤثر بر آبشستگی در بسترهای صاف (فاقد بستر زبر) و موجدار سینوسی

پارامترهای مؤثر بر روی فرآیند آبشستگی (طول و ارتفاع قله) را می‌توان به صورت معادله ۱ مشخص کرد:

$$L_s = f(\rho, g, \mu, Q, d, D, d_{50}, S, w, b) \quad (1)$$

که در آن L_s طول آبشستگی، h_s ارتفاع قله آبشستگی، ρ چگالی آب، g شتاب ثقل، μ لزجت دینامیکی، Q دبی جریان، d فاصله زبری‌ها، D ارتفاع زبری، d_{50} اندازه متوسط ذرات، S شیب کف، w ارتفاع بازشدگی دریاچه و b عرض فلووم می‌باشد.

با استفاده از روش π باکینگهام و انجام آنالیز ابعادی نهایتاً می‌توان پارامترهای بدون بعد زیر را ارائه داد:

$$\frac{L_s}{b} = f(Fr, Re, \frac{d}{b}, \frac{D}{b}, \frac{d_{50}}{b}, \frac{W}{b}, S) \quad (2)$$

با توجه به تلاطم جریان می‌توان از عدد رینولدز Re صرف نظر کرد. از آنجایی که در آزمایش‌ها d_{50} و D ثابت بودند در نهایت معادله ۲ به صورت معادله ۳ خواهد شد:

$$\frac{L_s}{b} = f\left(Fr, \frac{D}{b}, \frac{w}{b}, \frac{d}{b}, S\right) \quad (3)$$

به طور مشابه برای $\frac{h_s}{b}$ ، پس از تعیین پارامترهای بدون بعد و ساده سازی رابطه ۴ به دست

آمد:

$$\frac{h_s}{b} = f\left(Fr, \frac{D}{b}, \frac{w}{b}, \frac{d}{b}, s\right) \quad (۴)$$

۳-۵- روش انجام کار

قبل از انجام آزمایش‌ها، باید از صحت و کارکرد درست سیستم فلوم اطمینان حاصل می‌شد. در ابتدا، شیب دستگاه با کمک شیر فلکه مربوط به تنظیم شیب، روی شیب صفر یا افقی قرار گرفت و دریچه ورودی کاملاً باز شد. کف کاذب از داخل مخزن ورودی تا فاصله ۳۰ سانتیمتری پایین دست دریچه ادامه داشت. بستر رسوبی دارای طول ۲۱۷ سانتیمتر با ارتفاع ۴/۵ سانتیمتر در سه لایه کوبیده شد و در قسمت انتهایی آن یک قطعه چوب به عنوان تله گیر قرار گرفت. سپس سطح رسوبات پوشانیده شده، دستگاه روشن گردید و آب وارد فلوم شد، هنگام ورود آب مقداری صبر گردید که جریان آب به حالت ماندگار دربیاید، سپس دریچه کشویی ابتدایی را به آرامی در ارتفاع مورد نظر تنظیم شد. با تنظیم ارتفاع دریچه ورودی پوشش روی سطح رسوبات را برداشته و در واقع آزمایشات شروع می‌شد.

۳-۵-۱- پارامترهای اندازه گیری شده در آزمایشات

➤ عمق آبشستگی و ارتفاع قله، که برای اندازه گیری آن‌ها از عمق سنج^۱ با دقت ۱/۰ میلی‌متر

استفاده شد (شکل ۳-۷).

➤ طول آبشستگی نیز با استفاده از خط‌کش در طرفین بستر متحرک از انتهای کف کاذب

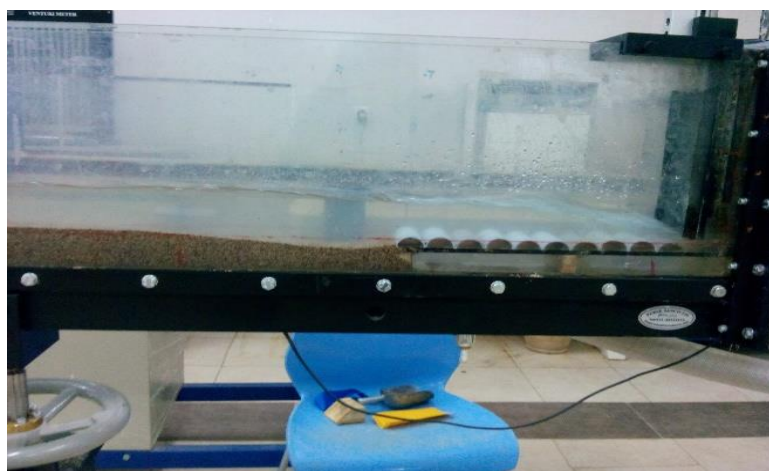
اندازه گیری شد.

^۱ pointgauge



شکل ۳-۷- عمق سنج

زبری استفاده شده در آزمایش‌ها از جنس لوله پولیکا با قطرهای مختلف بود (شکل ۳-۸).



شکل ۳-۸- نمای قرارگیری زبری‌ها در سطح فلوم

فصل چہارم

نتایج و بحث

در این فصل از پایان‌نامه نتایج آزمایش‌های انجام شده و بحث مربوط به آن‌ها ارائه شده است. نتایج آزمایشگاهی را می‌توان به سه بخش مکانیسم آبستگی، تاثیر پارامترهای بدون بعد بر روی $\frac{L_s}{b}$ (نسبت طول آبستگی به عرض فلوم) و تاثیر پارامترهای بدون بعد بر روی $\frac{h_s}{b}$ (نسبت ارتفاع قله به عرض فلوم) تقسیم‌بندی کرد، که در هر بخش تاثیر هر یک از پارامترها در قالب شکل بررسی شده و بحث مربوط به آن نیز ارائه شده است.

۴-۲- مکانیسم آبستگی

۴-۲-۱- بستر صاف

با شروع آزمایش آب از زیر دریچه به صورت یک جت افقی عبور کرده و پس از برخورد با کف رسوبی با توجه به انرژی زیاد جریان، رسوبات از بستر جدا شده و به صورت معلق توسط جریان عبوری به سمت پایین دست منتقل می‌شود. با ادامه فرآیند حفره آبستگی ایجاد شده که سبب ایجاد گردابه‌هایی در آن منطقه شده است که علاوه بر انرژی جریان، گردابه‌ها نیز در انتقال رسوب تاثیر می‌گذارند.

۴-۲-۲- بستر صاف و شیب‌دار

با ورود آب به داخل فلوم و گذر از زیر دریچه کشویی آب از روی کف کاذب عبور کرده و هنگام رسیدن به رسوبات با توجه به سرعت زیاد جریان رسوبات از بستر جدا شده و پدیده آبستگی به وقوع پیوست. شیب‌دار شدن کف علاوه بر افزایش سرعت که سبب افزایش تنش برشی می‌شود گردابه‌های قوی‌تر نسبت بستر بدون شیب در حفره آبستگی ایجاد می‌کند که باعث حرکت بیشتر رسوبات به سمت پایین دست و توسعه‌ی بیشتر حفره‌ی آبستگی خواهد شد.

۴-۲-۳- بستر زبر

در این تحقیق برای کاهش طول و عمق آبشستگی، زبری‌های نیم دایره در ابعاد و فاصله‌های مختلف در کف فلوم تعبیه شد. با شروع آزمایش و گذر آب از زیر دریچه کشویی و عبور آب از روی بستر زبر قدرت جریان و گردابه‌های ناشی از آن کاهش یافته که نتیجه آن کاهش ابعاد آبشستگی در قسمت پایین دست کف کاذب بود. با عبور جریان از روی بستر زبر بخشی از جریان در فواصل بین زبری‌ها محصور شده که کاهش سرعت جریان را به دنبال داشته و نتیجه آن کاهش قدرت گردابه‌ها در داخل حفره است.

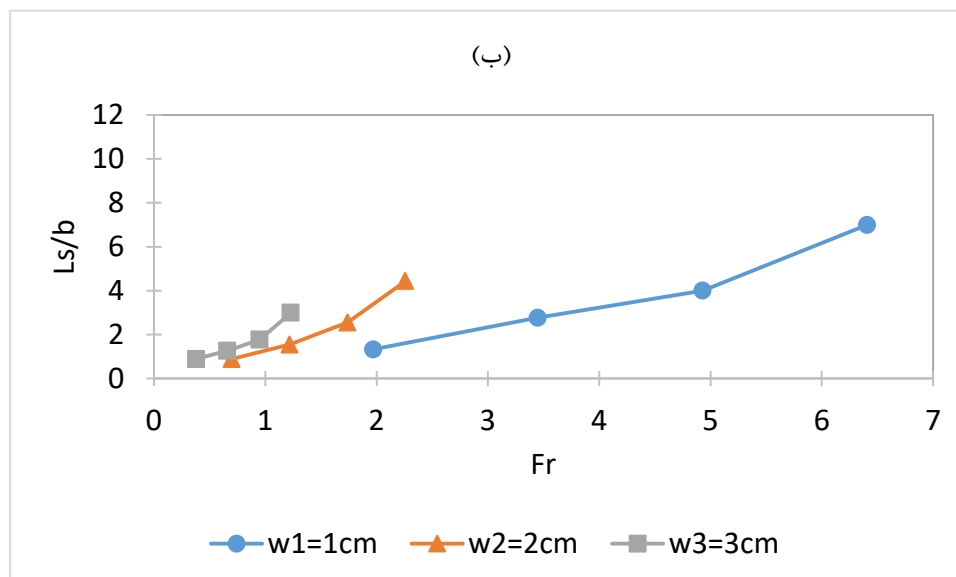
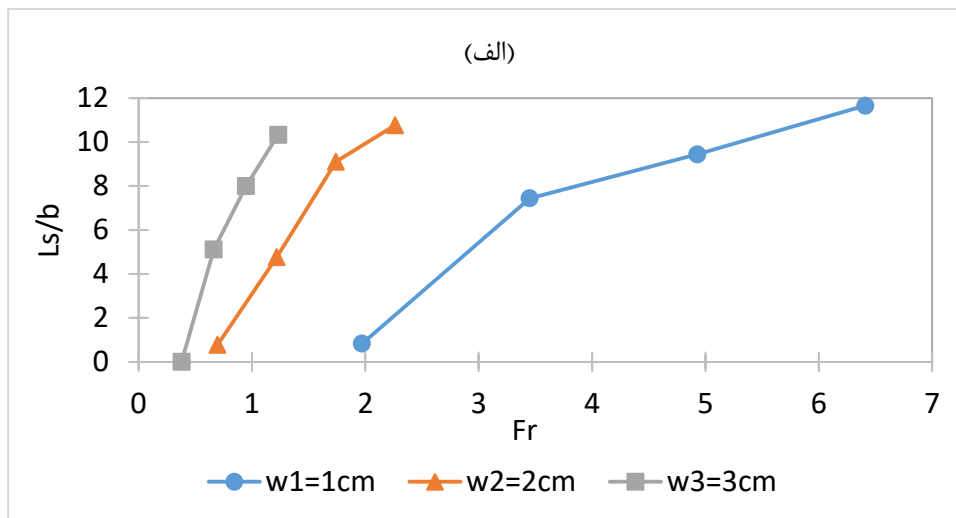
۴-۲-۴- بستر زبر و شیب‌دار

در این حالت از طرفی شیب‌دار شدن بستر، افزایش سرعت جریان را به دنبال دارد و از طرفی زبری‌های بستر منجر به کاهش سرعت و فرآیند آبشستگی می‌شود.

۴-۳- بررسی تاثیر عدد فرود جریان (Fr)، $\frac{d}{b}$ ، $\frac{D}{b}$ و $\frac{W}{b}$ بر روی پارامتر $\frac{L_s}{b}$

۴-۳-۱- تاثیر Fr بر روی پارامتر $\frac{L_s}{b}$

همان‌طور که در شکل (۴-۱) مشخص است برای بازشدگی‌های مختلف ($w_1=1\text{cm}$, $w_2=2\text{cm}$, $w_3=3\text{cm}$) با افزایش عدد فرود طول آبشستگی افزایش یافت. همچنین با اعمال زبری و نرخ تغییرات $\frac{L_s}{b}$ کاهش یافت. برای زبری‌های مختلف بهترین عملکرد مربوط به زبری $1/5$ سانتی‌متر بود. به طوری که $\frac{L_s}{b}$ در حدود 33% نسبت به بستر صاف برای بالاترین مقدار عدد فرود کاهش یافت. در این شرایط $\frac{L_s}{b}$ برای بازشدگی ۳ سانتی‌متر از ۳ به ۱۰ رسید. برای تمام زبری‌ها، با افزایش میزان بازشدگی، بیشترین مقدار $\frac{L_s}{b}$ در اعداد فرود پایین‌تر اتفاق افتاد.



شکل ۴-۱- تغییرات $\frac{L_s}{b}$ در برابر عدد Fr ، برای بازشدگی دریچه‌ی مختلف (الف) بسترساف، شیب صفر، بازشدگی متغیر.

(ب) زبری به قطر ۱/۵ سانتیمتر، شیب صفر، بازشدگی متغیر.

۴-۳-۲- تاثیر $\frac{D}{b}$ بر روی پارامتر $\frac{L_s}{b}$

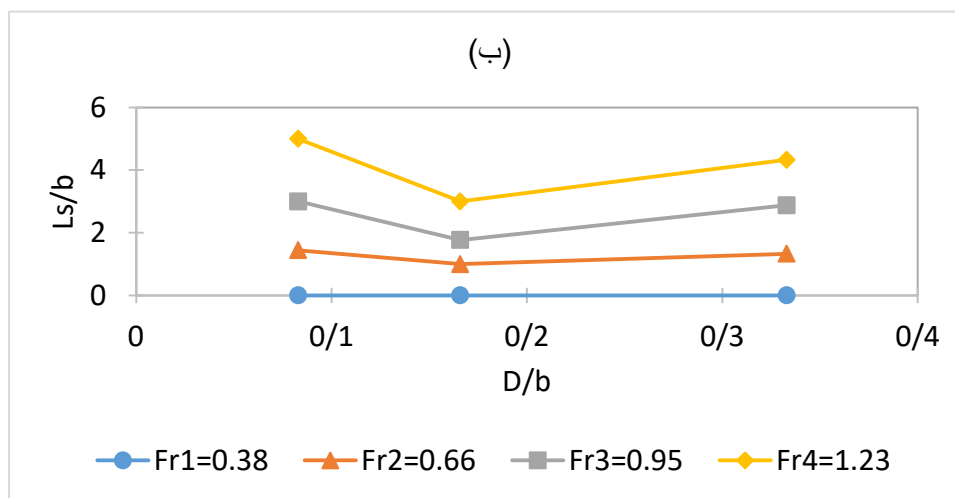
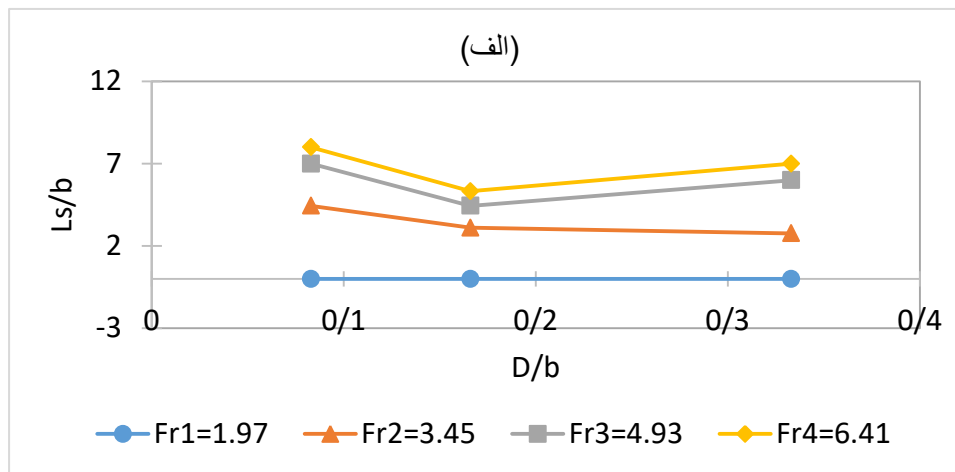
همان‌طور که در شکل (۴-۲) مشخص است با افزایش قطر زبری $(\frac{D}{b})$ ، برای اعداد فرود مختلف نسبت

$\frac{L_s}{b}$ کاهش یافت، به‌طوری‌که بهترین عملکرد نیز مربوط به نسبت $\frac{D}{b}$ برابر ۰/۱۶۶ بود. البته با کاهش

دبی جریان، مقدار آن نیز کاهش یافت. به طوریکه برای بازشدگی دریچه‌ی ۳ سانتیمتر و فرود ۱/۲۳

نسبت $\frac{L_s}{b}$ در حدود ۱۳/۴ درصد و برای بازشدگی ۱ سانتیمتر و فرود ۶/۴۱ نسبت $\frac{L_s}{b}$ در حدود ۱۲/۵

درصد نسبت به حالت قطر زبری صفر کاهش یافت.



شکل ۴-۲- تغییرات $\frac{L_s}{b}$ در برابر $\frac{D}{b}$ برای دبی‌های مختلف. (الف) بازشدگی دریچه ۱ سانتیمتر، شیب صفر، فاصله زبری

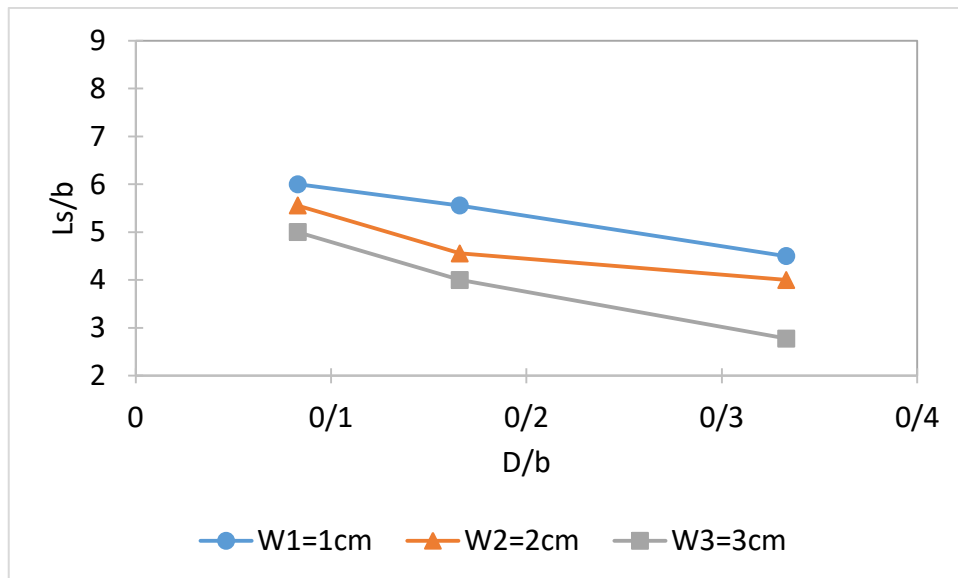
صفر. (ب) بازشدگی دریچه ۳ سانتیمتر، شیب صفر، فاصله زبری صفر

شکل (۳-۴) تاثیر ارتفاع زبری را در شیب ۰/۵ درصد برای بازشدگی‌های مختلف نشان می‌دهد.

بهترین عملکرد مربوط به نسبت $\frac{D}{b}$ برابر ۰/۳۳۳ بود. برای ماکزیمم بازشدگی دریچه (W3)، نسبت $\frac{L_s}{b}$

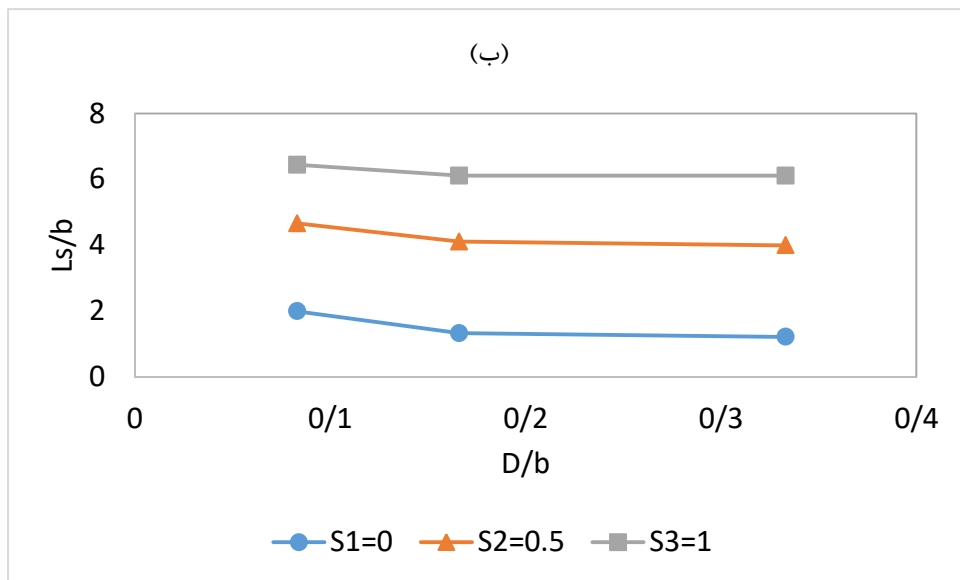
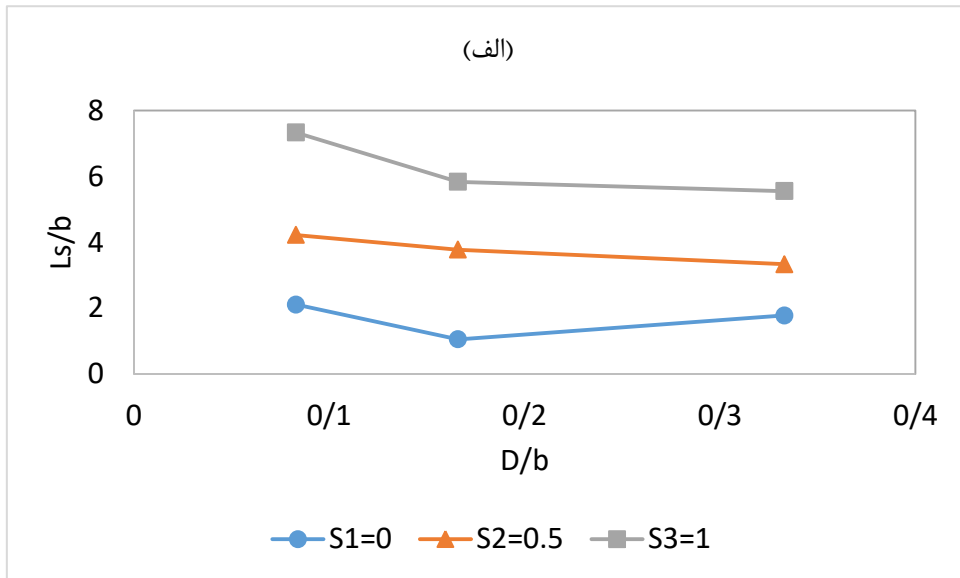
از ۵ تا ۲/۷ در حدود ۴۶ درصد کاهش نشان داد. همچنین با افزایش بازشدگی طول آبشستگی کاهش

یافت، زیرا هرچه بازشدگی دریاچه افزایش یابد سرعت جریان کمتر شده، از انرژی مخرب جریان کاسته شده و منجر به کاهش طول آبشستگی خواهد شد.



شکل ۴-۳- تغییرات $\frac{L_s}{b}$ در برابر $\frac{D}{b}$ برای بازشدگی‌های دریاچه مختلف، دبی ۳/۵، شیب ۰/۵، فاصله زبری صفر.

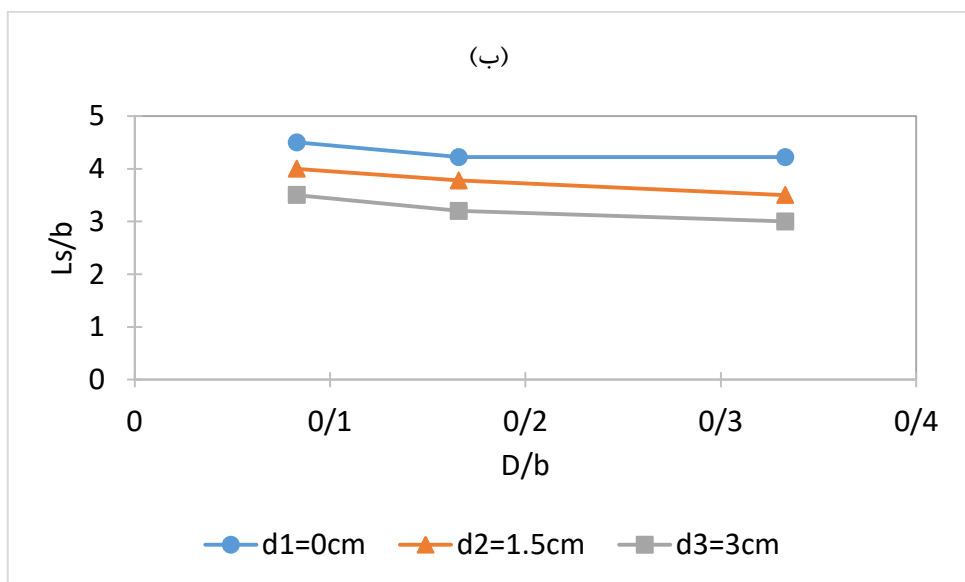
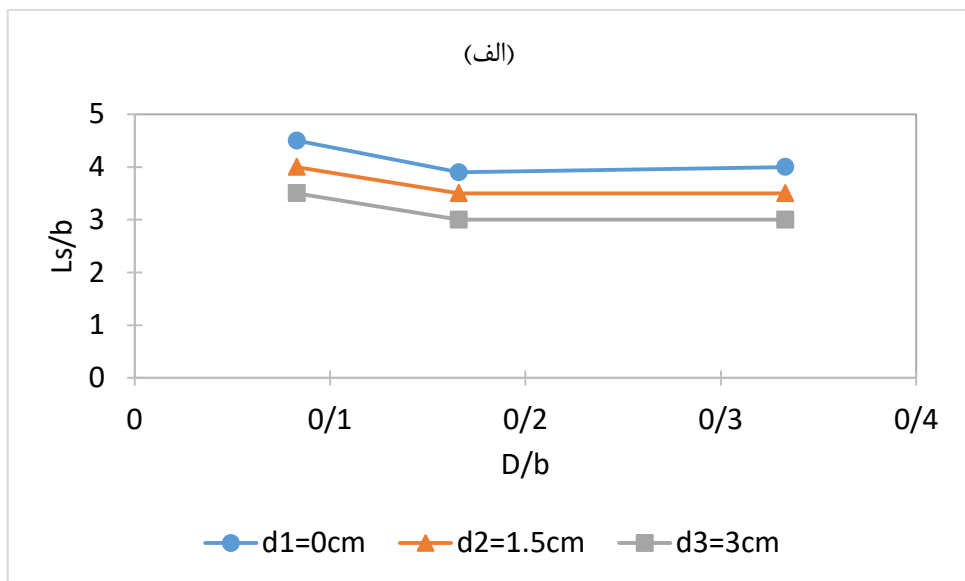
در شکل (۴-۴) برای یک فاصله زبری ثابت با افزایش $\frac{D}{b}$ (قطر زبری)، برای شیب‌های مختلف کاهش یافت. برای بازشدگی دریاچه ۳ سانتیمتر مقدار $\frac{L_s}{b}$ برای ماکزیمم مقدار $\frac{D}{b}$ برای شیب‌های مختلف مقدار آن ۸۰ درصد کاهش و برای بازشدگی دریاچه ۱ سانتیمتر مقدار آن ۶۸ درصد کاهش یافت. برای یک شیب ثابت محدوده تغییرات $\frac{L_s}{b}$ از روی شکل برای بازشدگی ۱ و ۳ سانتیمتر برای شیب S_1 حداقل بود.



شکل ۴-۴- تغییرات $\frac{L_s}{b}$ در برابر $\frac{D}{b}$ برای شیب‌های مختلف. (الف) بازشدگی دریاچه ۱ سانتیمتر، دبی $\frac{3}{5}$ ، فاصله زبری $\frac{1}{5}$.

(ب) بازشدگی دریاچه ۳ سانتیمتر، دبی $\frac{3}{5}$ ، فاصله زبری $\frac{1}{5}$.

با توجه به شکل (۴-۵) با افزایش نسبت $\frac{D}{b}$ برای فواصل زبری مختلف مقدار $\frac{L_s}{b}$ کاهش یافت. به-
 طوریکه برای یک فاصله زبری ثابت ($d1$) مقدار $\frac{L_s}{b}$ از روی شکل برای بازشدگی دریاچه ۱ سانتیمتر
 در حدود ۱۱ درصد و برای بازشدگی دریاچه ۳ سانتیمتر در حدود ۶/۶ درصد کاهش یافت. برای
 بازشدگی‌های مختلف مقدار $\frac{L_s}{b}$ با افزایش $\frac{D}{b}$ به یک مقدار ثابت در حدود ۴، میل کرد.



شکل ۴-۵- تغییرات $\frac{L_s}{b}$ در برابر $\frac{D}{b}$ برای فاصله‌های زبری مختلف. (الف) بازشدگی دریاچه ۱ سانتیمتر، دبی ۲، شیب ۱.

(ب) بازشدگی دریاچه ۳ سانتیمتر، دبی ۲، شیب ۱.

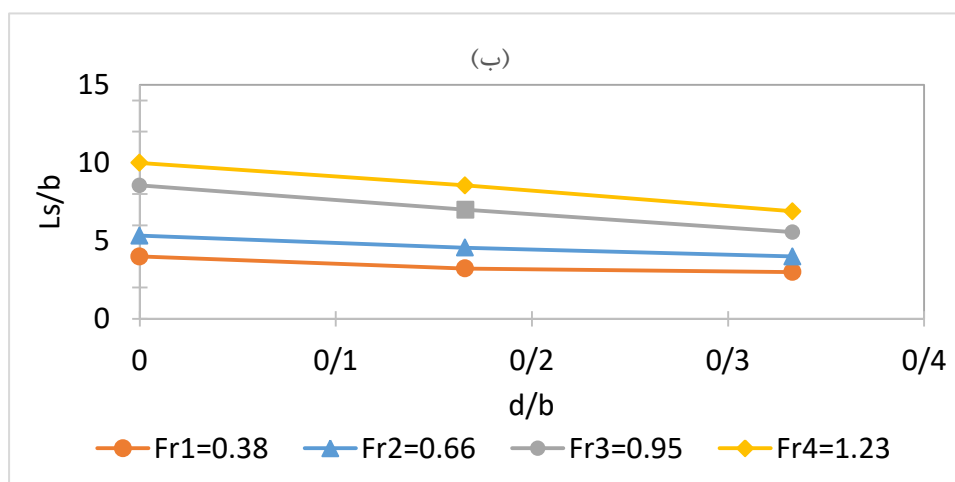
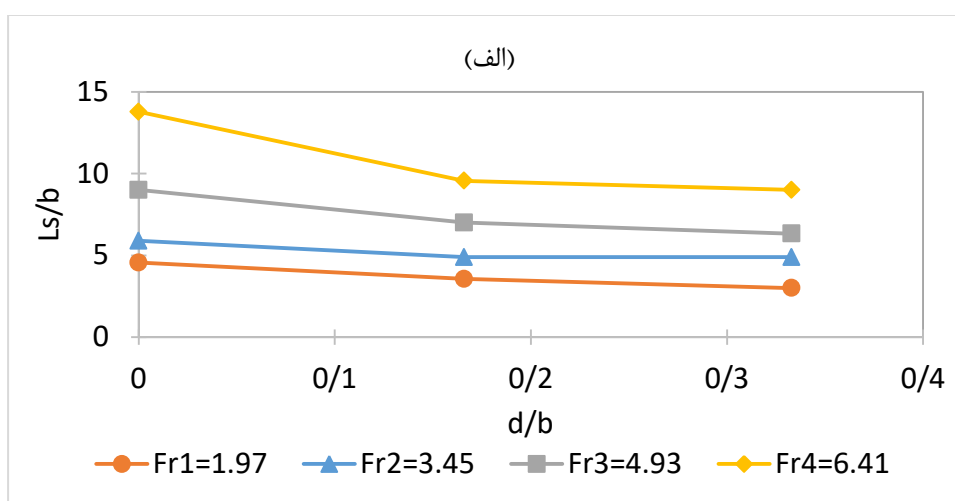
۴-۳-۳- تاثیر $\frac{d}{b}$ بر روی پارامتر $\frac{L_s}{b}$

همان‌طوری که در شکل (۴-۶) مشخص است با افزایش فاصله زبری ($\frac{d}{b}$) برای بازشدگی‌های دریاچه

مختلف، نسبت $\frac{L_s}{b}$ کاهش یافت. بهترین عملکرد مربوط به نسبت $\frac{d}{b}$ برابر 0.333 سانتی‌متر بود. برای

بازشدگی دریاچه ۳ سانتی‌متر و ماکزیمم دبی، نسبت $\frac{L_s}{b}$ در حدود ۳۱ درصد و برای بازشدگی ۱

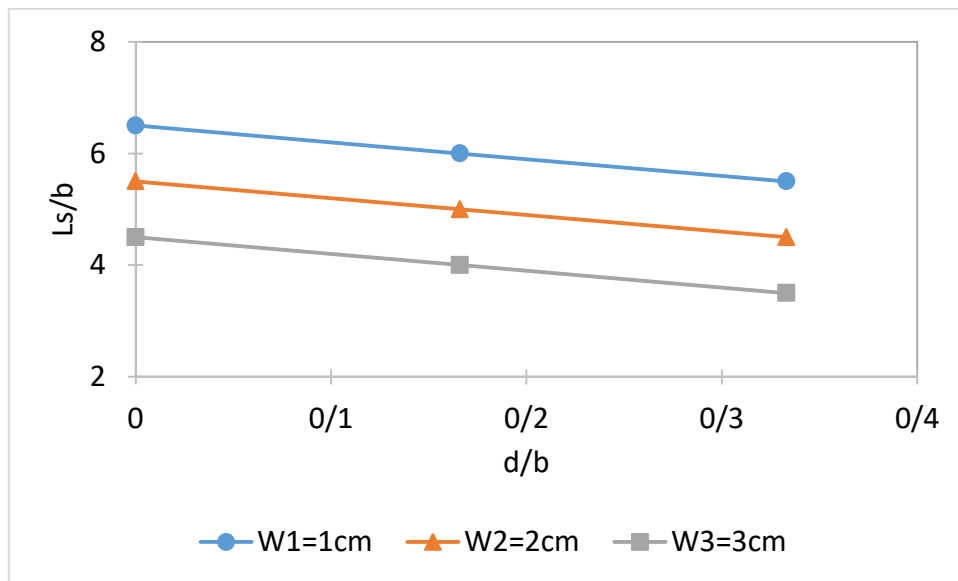
سانتی‌متر، نسبت $\frac{L_s}{b}$ در حدود ۳۵ درصد نسبت به فاصله زبری صفر کاهش یافت. البته با کاهش دبی جریان مقدار $\frac{L_s}{b}$ کاهش یافته، چرا که با کاهش دبی جریان از مقدار قدرت جریان فرساینده کاسته شده، با توجه به زبری کف نتیجه آن کاهش ابعاد آبشستگی است. همانطور که در نتایج مشخص است هر چه بازشدگی دریاچه کمتر یا به عبارتی تلاطم جریان ورودی بیشتر باشد، با افزایش فاصله زبری بخشی از جریان در فاصله بین زبری‌ها قرار گرفته، انرژی جریان مستهلک خواهد شد که نتیجه آن کاهش طول آبشستگی خواهد بود.



شکل ۴-۶- تغییرات $\frac{L_s}{b}$ در برابر $\frac{d}{b}$ برای دبی‌های مختلف. الف) بازشدگی دریاچه ۱ سانتیمتر، قطر زبری ۳، شیب ۰/۵.

ب) بازشدگی دریاچه ۳ سانتیمتر، قطر زبری ۳، شیب ۰/۵.

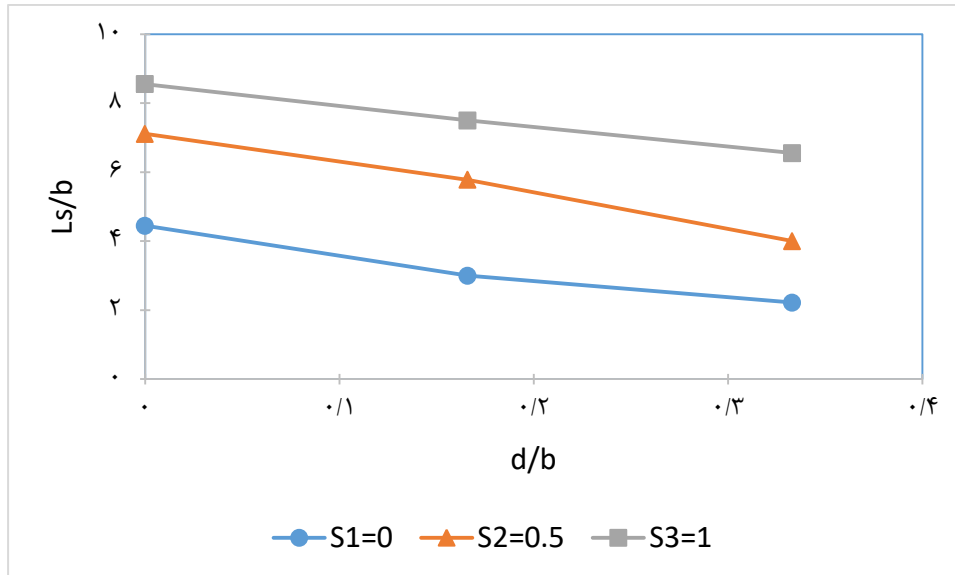
شکل (۷-۴) تاثیر بازشدگی دریچه را برای فاصله‌زبری‌های مختلف در شیب ۱ درصد نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است برای بازشدگی‌های مختلف با افزایش $\frac{d}{b}$ ، مقدار $\frac{L_s}{b}$ کاهش یافت، به‌طوریکه در ماکزیمم بازشدگی دریچه مقدار $\frac{L_s}{b}$ برای بستر زبر از $\frac{4}{5}$ به $\frac{3}{5}$ در حدود ۲۲ درصد نسبت به فاصله زبری صفر کاهش نشان داد.



شکل ۷-۴- تغییرات $\frac{L_s}{b}$ در برابر $\frac{d}{b}$ برای بازشدگی‌های دریچه مختلف، دبی $\frac{3}{5}$ ، قطر زبری ۳، شیب ۱.

شکل (۸-۴) تغییرات $\frac{d}{b}$ را در برابر $\frac{L_s}{b}$ برای شیب‌های مختلف نشان می‌دهد. برای یک $\frac{d}{b}$ ثابت با افزایش شیب فلوم طول آبستگی افزایش می‌یابد، دلیل این امر را می‌توان افزایش سرعت و توان فرسایشی جریان دانست. همچنین نتایج نشان می‌دهد برای یک شیب کف ثابت با افزایش $\frac{d}{b}$ ، مقدار $\frac{L_s}{b}$ کاهش یافت که برای شیب S1 مقدار آن از تقریباً $\frac{4}{4}$ به $\frac{2}{2}$ رسید. همچنین برای شیب‌های مختلف بهترین عملکرد مربوط به بازشدگی دریچه ۳ سانتیمتر می‌باشد که برای فاصله زبری $\frac{1}{5}$ مقدار آن ۷۱ درصد و در بازشدگی دریچه ۱ مقدار آن ۶۰ درصد نسبت به فاصله زبری صفر کاهش یافت، که هرچه بازشدگی دریچه در شیب‌های بالا بیشتر باشد میزان طول آبستگی کاهش می‌یابد.

که علت آن کاهش قدرت فرسایشی جریان و گردابه‌های ناشی از آن با توجه به کاهش عدد فرود و فاصله‌ی زبری‌ها است.

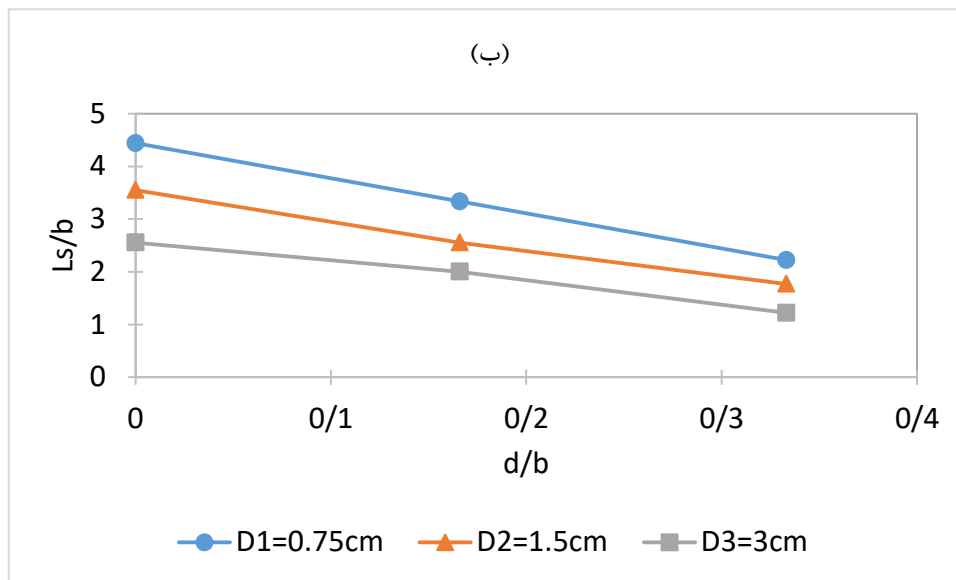
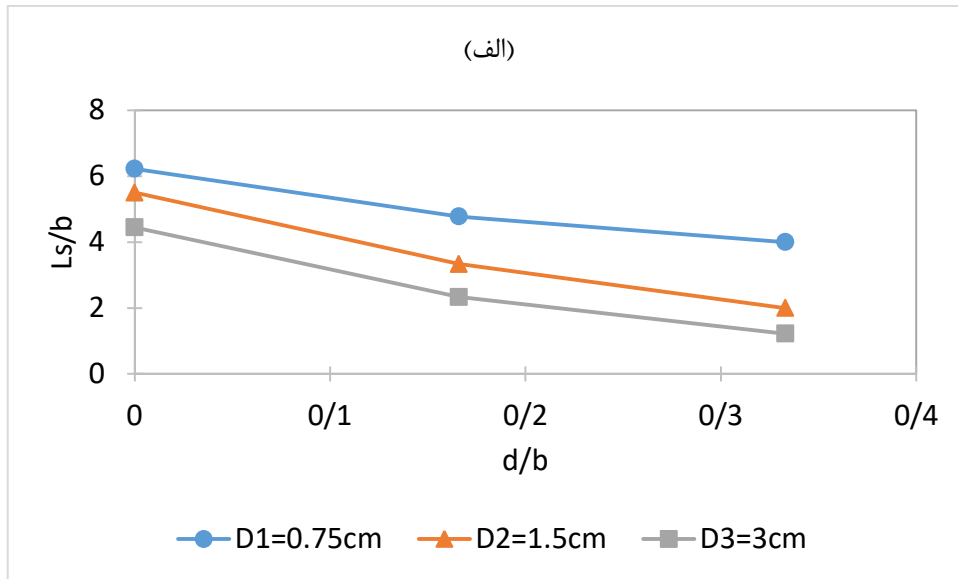


شکل ۴-۸- تغییرات $\frac{L_s}{b}$ در برابر $\frac{d}{b}$ برای شیب‌های مختلف، بازشدگی در پیچه ۱ سانتیمتر، دبی ۵، قطر زبری ۱/۵.

شکل (۴-۹) تاثیر نسبت $\frac{d}{b}$ بر روی $\frac{L_s}{b}$ برای قطرهای زبری مختلف در شیب صفر را نشان می‌دهد.

همانطور که مشخص است با افزایش $\frac{d}{b}$ ، مقدار $\frac{L_s}{b}$ در قطرهای مختلف کاهش یافت. برای ۲ بازشدگی

۱ و ۳ سانتیمتر و بالاترین نسبت $\frac{d}{b}$ و زبری (D3) مقدار $\frac{L_s}{b}$ در حدود ۱/۳ بود.



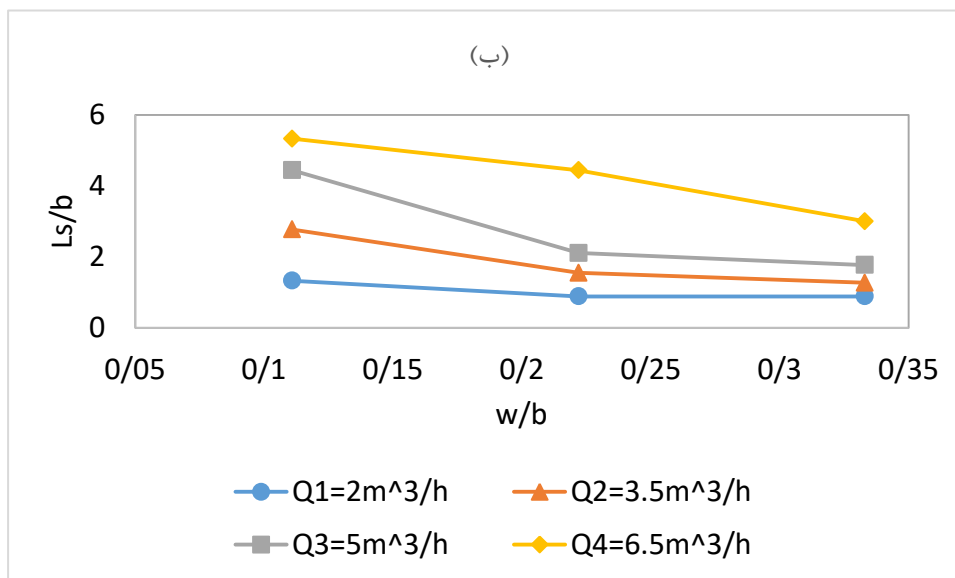
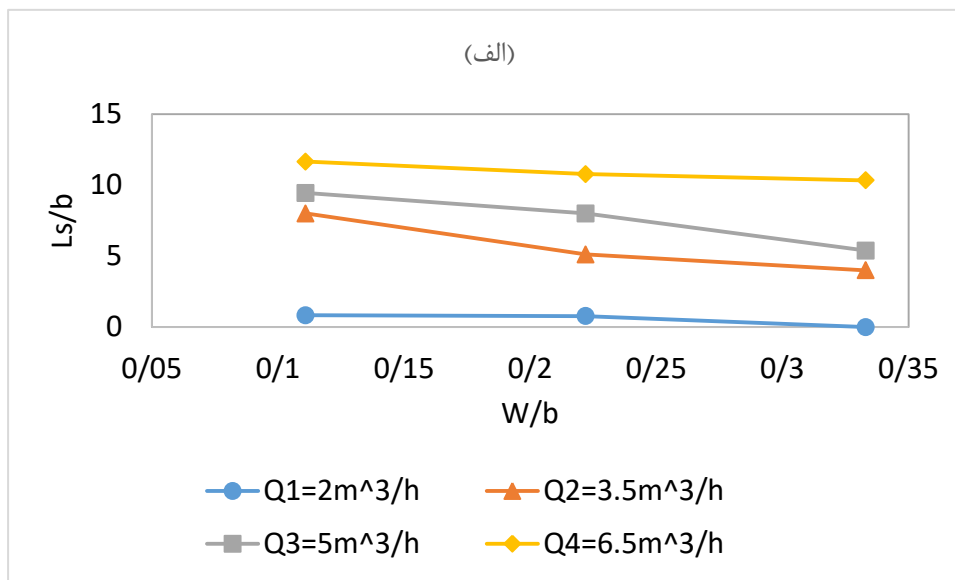
شکل ۴-۹- تغییرات $\frac{L_s}{b}$ در برابر $\frac{d}{b}$ برای قطرهای زبری مختلف. (الف) بازشدگی دریچه ۱سانتیمتر، دبی ۵، شیب صفر.

(ب) بازشدگی دریچه ۳سانتیمتر، دبی ۵، شیب صفر.

۴-۳-۴- بررسی تاثیر $\frac{w}{b}$ بر روی پارامتر $\frac{L_s}{b}$

مطابق شکل (۴-۱۰) با افزایش نسبت $\frac{W}{b}$ ، نسبت $\frac{L_s}{b}$ برای دبی مختلف کاهش یافت. البته نرخ تغییرات $\frac{L_s}{b}$ ، برای دبی مختلف در برابر $\frac{W}{b}$ برای بستر صاف ناچیز بود. برای بستر زبر بهترین عملکرد مربوط به زبری با قطر ۱/۵ سانتی‌متر بود، که برای نسبت‌های مختلف $\frac{W}{b}$ و دبی مقدار $\frac{L_s}{b}$ کاهش

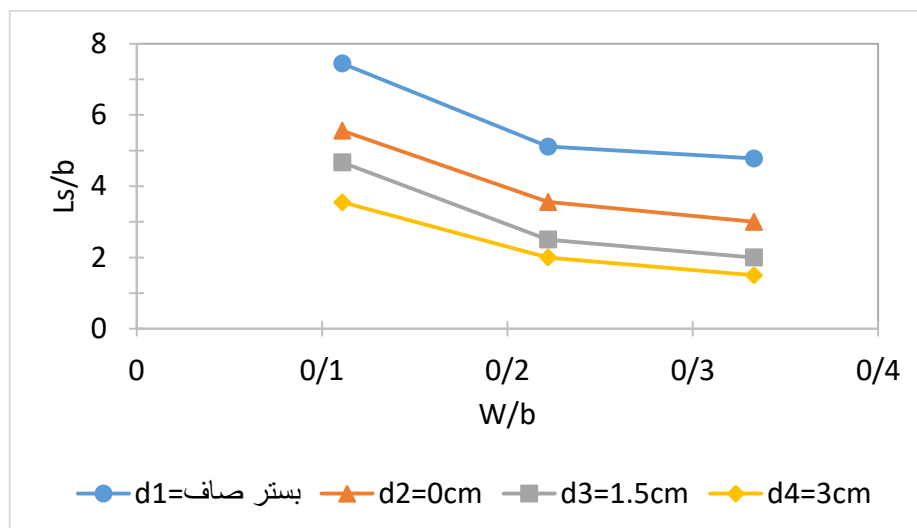
بیشتری را نشان داد. در این حالت با افزایش دبی نرخ تغییرات $\frac{L_s}{b}$ در برابر $\frac{W}{b}$ ، افزایش یافت به-
 طوریکه برای بالاترین دبی مقدار $\frac{L_s}{b}$ از ۵/۵ تا ۳ تغییر کرد.



شکل ۴-۱۰- تغییرات $\frac{L_s}{b}$ در برابر $\frac{W}{b}$ برای دبی‌های مختلف، الف) بستر صاف، ب) بستر به قطر ۱/۵

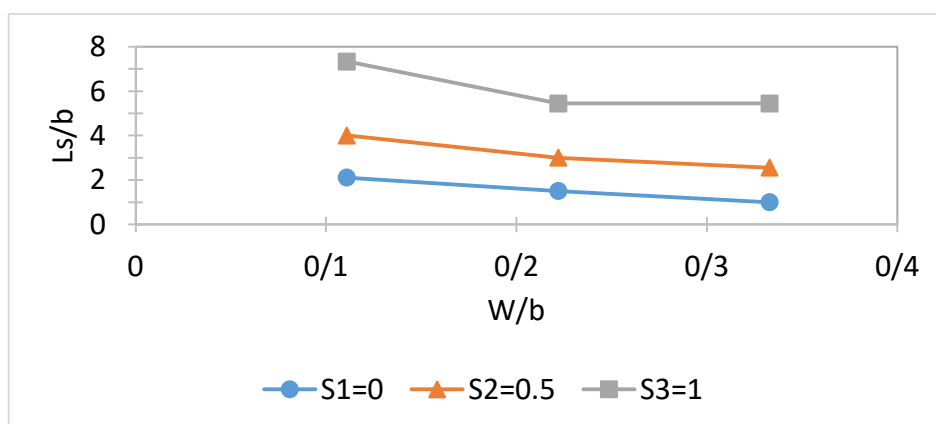
شکل (۴-۱۱) تغییرات $\frac{L_s}{b}$ را در برابر $\frac{W}{b}$ برای فاصله زبری مختلف در شیب صفر نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با افزایش $\frac{W}{b}$ مقدار $\frac{L_s}{b}$ برای فاصله‌های مختلف زبری کاهش یافت. به-
 طوریکه در فاصله زبری ۱/۵ سانتیمتر (d_3) مقدار آن از ۴/۶ تا ۲ در حدود ۵۶ درصد کاهش یافت.

همچنین در ماکزیمم نسبت $\frac{W}{b}$ در فاصله‌های مختلف مقدار آن از $\frac{4}{7}$ به $\frac{1}{5}$ در حدود ۶۸ درصد کاهش یافت.



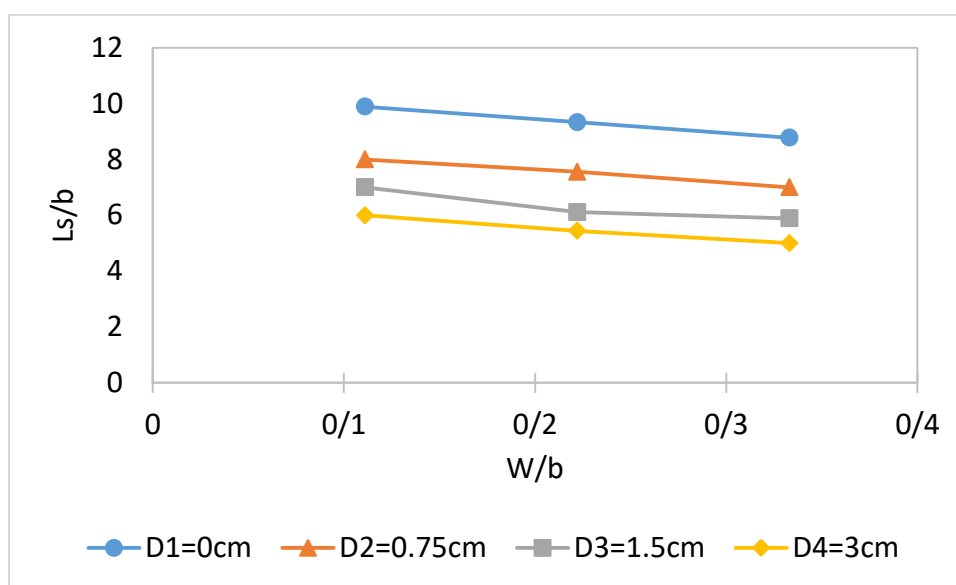
شکل ۴-۱۱- تغییرات $\frac{L_s}{b}$ در برابر $\frac{W}{b}$ برای فاصله‌های زبری مختلف، قطر زبری 0.75 ، دبی $\frac{3}{5}$ ، شیب صفر

شکل (۴-۱۲) با افزایش $\frac{W}{b}$ مقدار $\frac{L_s}{b}$ برای شیب‌های مختلف کاهش یافت. این شکل نشان دهنده این است که با افزایش شیب کف، عملکرد بازشدگی در پیچه در کاهش $\frac{L_s}{b}$ افزایش می‌یابد به طوری که از مقایسه ماکزیمم بازشدگی در پیچه برای شیب‌های 0 تا 1 مقدار $\frac{L_s}{b}$ از 1 تا $\frac{5}{4}$ ، بیش از 5 برابر افزایش یافت. همچنین میزان کاهش $\frac{L_s}{b}$ برای کمترین شیب در حدود 53 درصد بود.



شکل ۴-۱۲- تغییرات $\frac{L_s}{b}$ در برابر $\frac{W}{b}$ برای شیب‌های مختلف، قطر زبری 0.75 ، دبی $\frac{3}{5}$ ، فاصله زبری $\frac{1}{5}$.

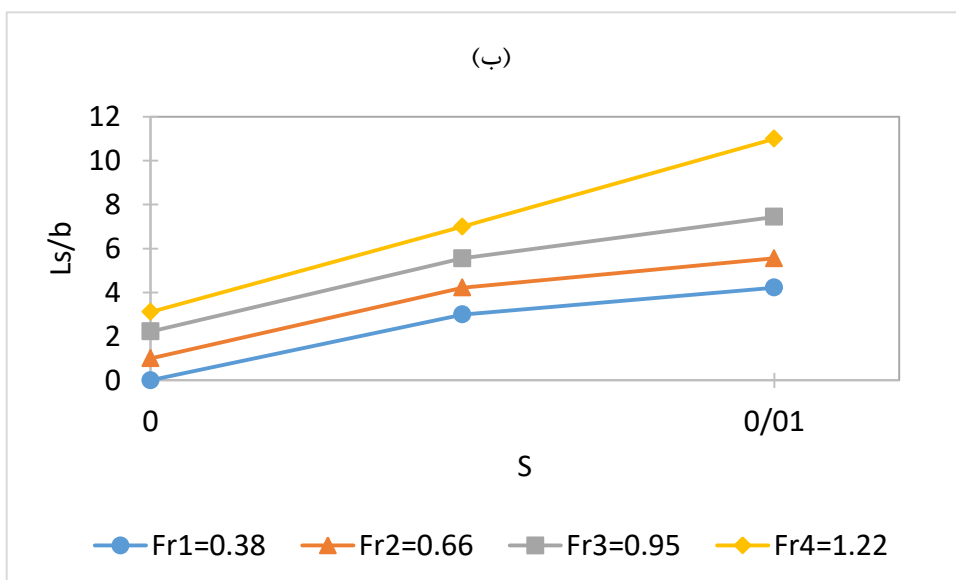
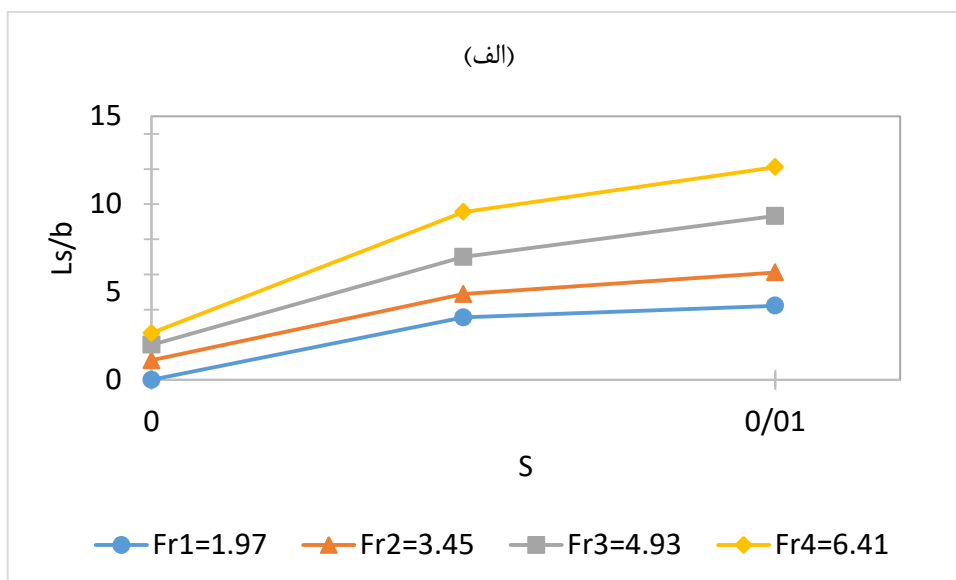
تغییرات $\frac{L_s}{b}$ در برابر $\frac{W}{b}$ برای قطر زبری‌های مختلف و بستر صاف در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است. با افزایش $\frac{W}{b}$ ، مقدار $\frac{L_s}{b}$ برای حالت‌های مختلف کاهش یافت و نرخ تغییرات $\frac{L_s}{b}$ در برابر $\frac{W}{b}$ تقریباً یکسان بود. مقدار $\frac{L_s}{b}$ برای بستر صاف ماکزیمم بوده، به‌طوری‌که از حدود ۹/۸ تا ۸/۸ تغییر می‌کند. همچنین مقدار $\frac{L_s}{b}$ برای ماکزیمم قطر زبری (D4) از ۶ تا ۵ تغییر کرد. دلیل آن را می‌توان نقش قطر زبری در افزایش تلاطم جریان دانست.



شکل ۴-۱۳- تغییرات $\frac{L_s}{b}$ در برابر $\frac{W}{b}$ برای قطرهای مختلف، دبی ۳/۵، شیب ۱، فاصله زبری صفر.

۴-۳-۵- بررسی تاثیر S بر روی پارامتر $\frac{L_s}{b}$

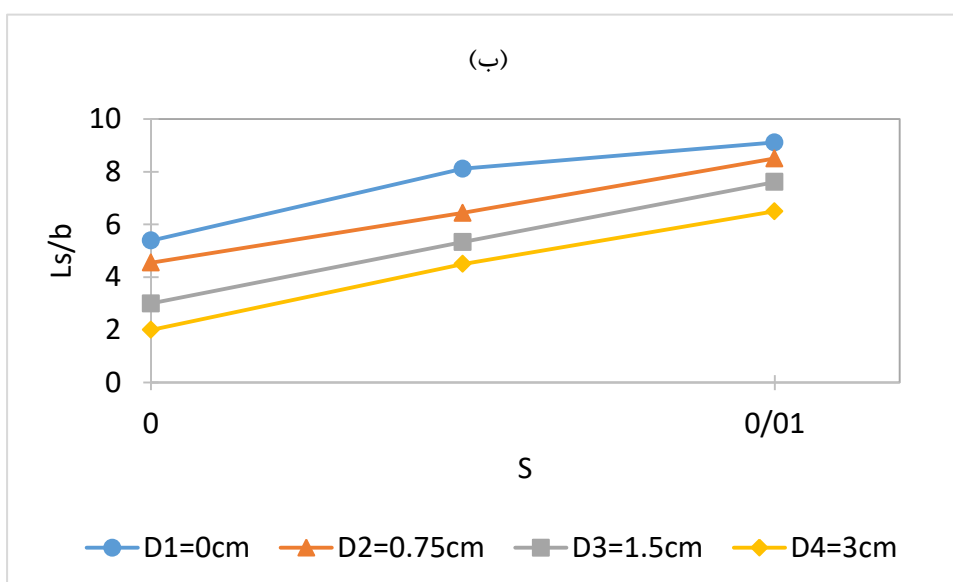
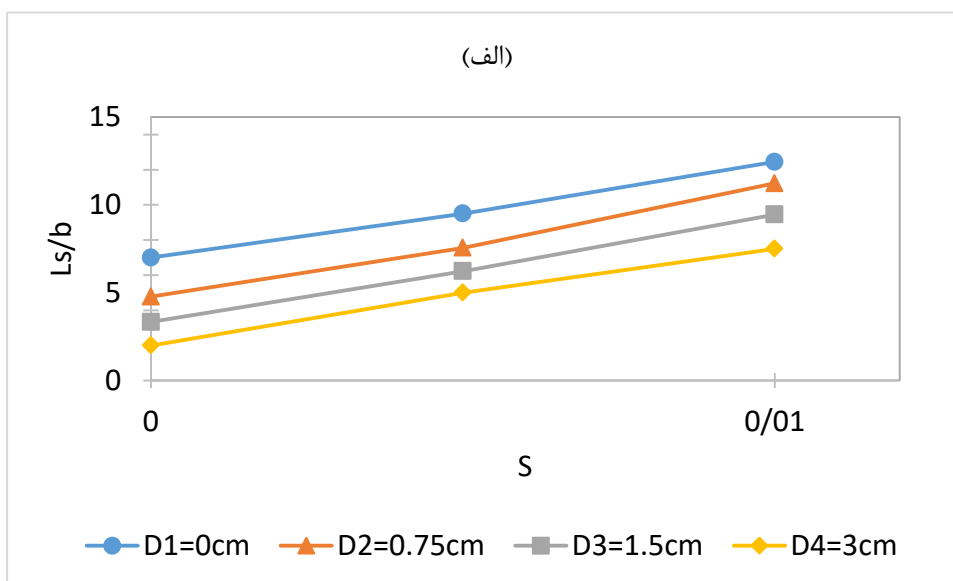
همان‌طوری که در شکل (۴-۱۴) مشخص است با افزایش شیب (S)، برای اعداد فرود مختلف، نسبت $\frac{L_s}{b}$ افزایش یافت. برای بازشدگی درجه ۳ سانتی‌متر و ماکزیمم دبی، نسبت $\frac{L_s}{b}$ از ۳ به ۱۱ و برای بازشدگی ۱ سانتی‌متر، نسبت $\frac{L_s}{b}$ از ۲/۶ به ۱۲/۱۱ رسید. همان‌طور که مشخص است برای بازشدگی درجه ۳ سانتی‌متر $\frac{L_s}{b}$ تقریباً ۴ برابر و برای بازشدگی درجه ۱ سانتی‌متر، $\frac{L_s}{b}$ تقریباً ۵ برابر است. البته با کاهش دبی جریان نرخ تغییرات $\frac{L_s}{b}$ در برابر S کاهش یافت.



شکل ۴-۱۴- تغییرات L_s/b در برابر S برای دبی‌های مختلف. (الف) بازشدگی در پیچه ۱ سانتیمتر، قطر زبری ۳، فاصله

زبری ۳. (ب) بازشدگی در پیچه ۳ سانتیمتر، قطر زبری ۳، فاصله زبری ۳.

تغییرات L_s/b در برابر S برای قطرهای زبری مختلف در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است با افزایش S مقدار L_s/b در قطرهای زبری مختلف افزایش یافت که برای قطرهای زبری کوچکتر مقدار L_s/b بیشتر از قطرهای زبری بزرگتر است. بهترین عملکرد برای بازشدگی‌های ۱ و ۳ سانتیمتر مربوط به قطر زبری $D4$ می‌باشد که برای هر دو محدوده‌ی تغییرات L_s/b در برابر S ، از ۲ تا ۶/۵ می‌باشد، که تقریباً افزایش سه برابری را نشان می‌دهد.

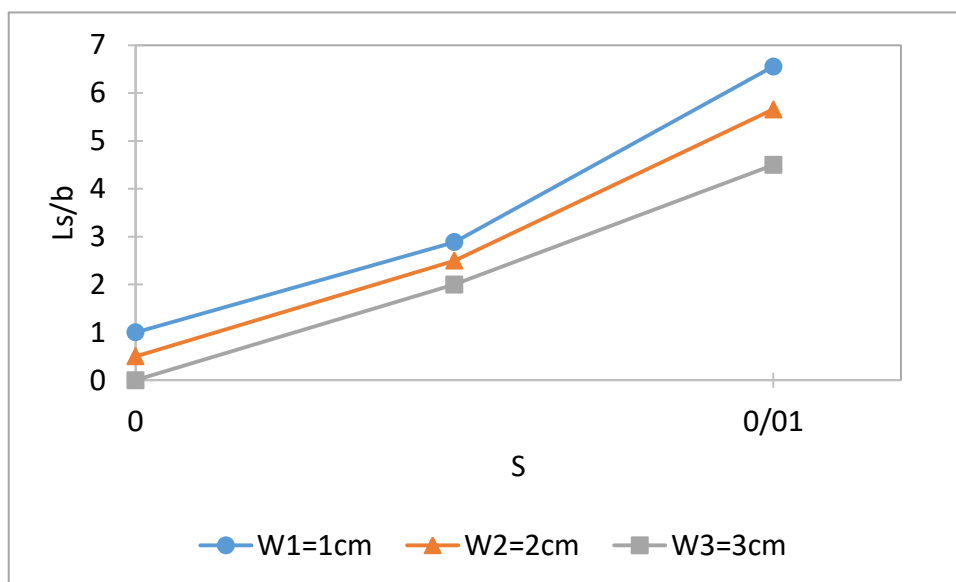


شکل ۴-۱۵- تغییرات $\frac{L_s}{b}$ در برابر S برای قطرهای زبری مختلف. الف) بازشدگی دریچه ۱ سانتیمتر، دبی ۵، فاصله زبری

۰.۱/۵. ب) بازشدگی دریچه ۳ سانتیمتر، دبی ۵، فاصله زبری ۰.۱/۵.

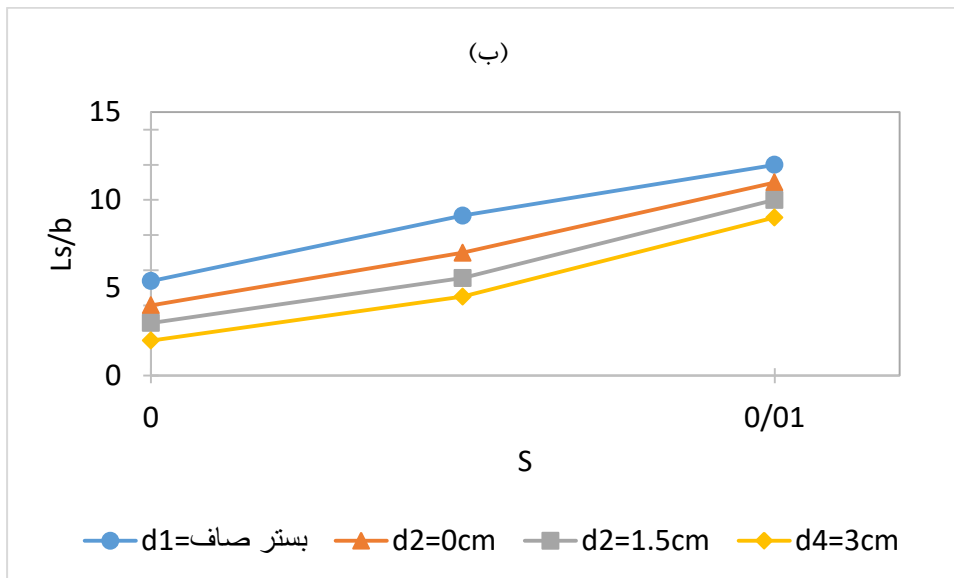
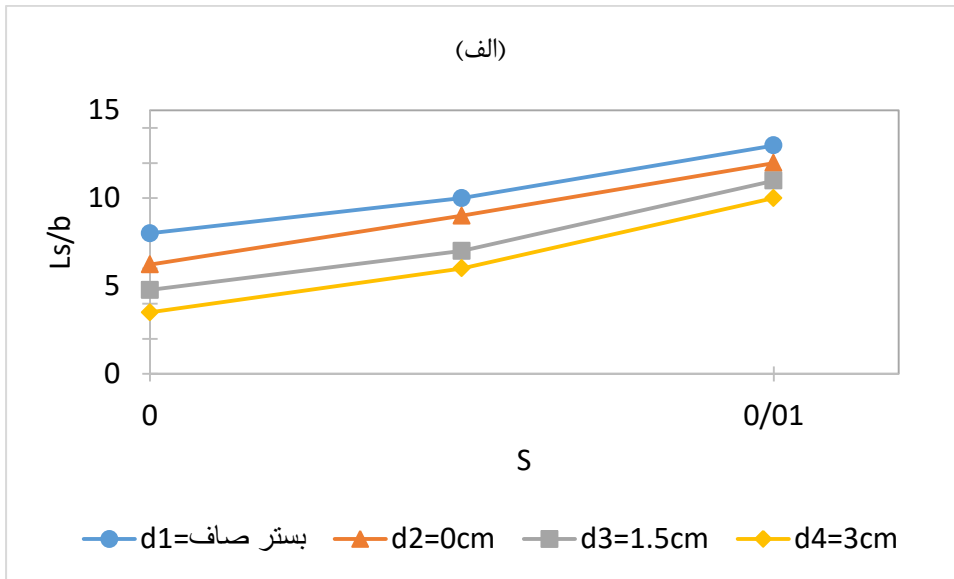
شکل (۴-۱۶) تغییرات $\frac{L_s}{b}$ را در برابر S برای بازشدگی‌های مختلف نشان می‌دهد، که هر چه بازشدگی کمتر باشد نرخ افزایش $\frac{L_s}{b}$ در برابر S بیشتر است و برای بازشدگی $w1$ از ۱ تا ۶/۵ تغییر می‌کند. همچنین به ازای یک بازشدگی ثابت هرچه شیب افزایش یابد طول آبستگي افزایش می‌یابد. زیرا سرعت جریان افزایش داشته، انرژی مخرب آن بیشتر است که منجر به افزایش طول آبستگي

خواهد شد. در شکل زیر درماکزیمم شیب با افزایش بازشدگی دریچه از ۱ تا ۳ سانتیمتر مقدار $\frac{L_s}{b}$ از ۶/۵ تا ۴ تغییر کرد.



شکل ۴-۱۶- تغییرات $\frac{L_s}{b}$ در برابر S برای بازشدگی دریچه مختلف، دبی ۲، قطر زبری ۰/۷۵، فاصله زبری ۱/۵.

همانطور که در شکل ۴-۱۷ مشخص است با افزایش S مقدار $\frac{L_s}{b}$ برای فاصله‌های مختلف زبری افزایش می‌یابد. برای بازشدگی دریچه ۳ سانتیمتر و ماکزیمم شیب مقدار $\frac{L_s}{b}$ از ۹ تا ۱۲ تغییر می‌کند و برای بازشدگی ۱ سانتیمتر مقدار $\frac{L_s}{b}$ برای ماکزیمم شیب از ۱۰ تا ۱۳ تغییر می‌کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد، محدوده تغییرات $\frac{L_s}{b}$ در برابر S، برای بازشدگی دریچه کمتر، حداقل بود.



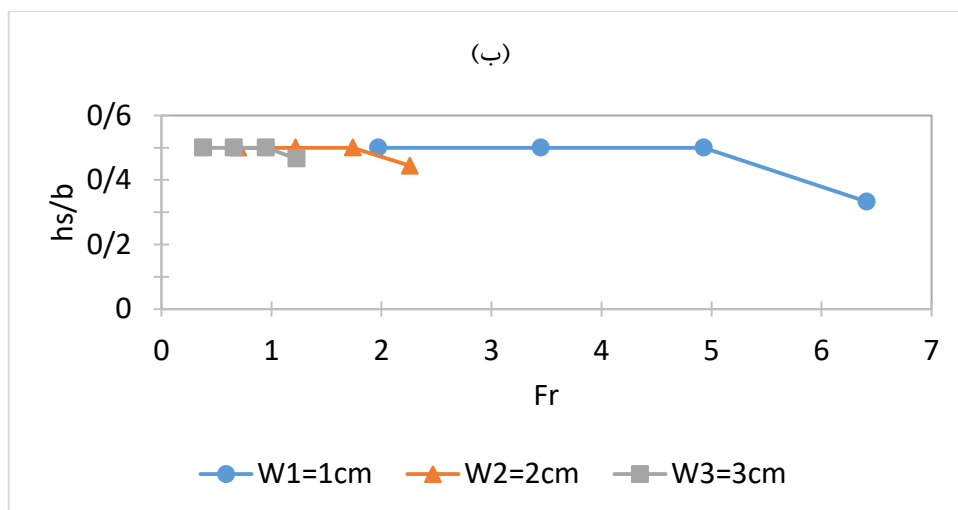
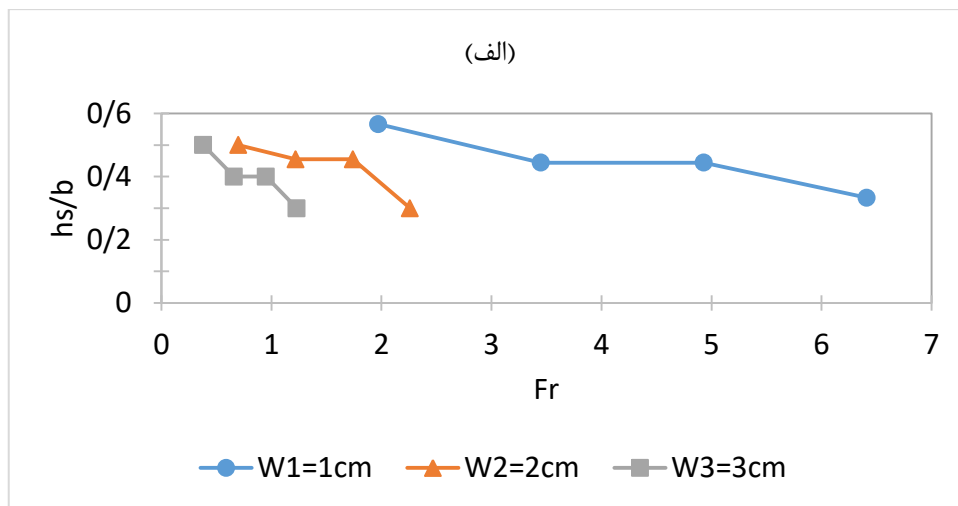
شکل ۴-۱۷- تغییرات $\frac{L_s}{b}$ در برابر S برای فاصله زبری مختلف. (الف) بازشدگی دریاچه ۱سانتیمتر، دبی ۵، قطر زبری ۱/۵

(ب) بازشدگی دریاچه ۳سانتیمتر، دبی ۵، قطر زبری ۱/۵.

۴-۴- بررسی تاثیر عدد فرود جریان (Fr)، $\frac{d}{b}$ ، $\frac{D}{b}$ و $\frac{W}{b}$ بر روی پارامتر $\frac{h_s}{b}$

۴-۴-۱- بررسی تاثیر Fr بر روی پارامتر $\frac{h_s}{b}$

همان طور که در شکل ۴-۱۸ مشخص است مقدار $\frac{h_s}{b}$ با افزایش فرود برای بازشدگی های مختلف، کاهش می یابد که میزان کاهش $\frac{h_s}{b}$ برای دو قطر زبری ۱/۵ و ۳ سانتیمتر، برای بازشدگی ۱ سانتیمتر ماکزیمم بود و حداقل مقدار $\frac{h_s}{b}$ در حدود ۰/۳ اندازه گیری شد.

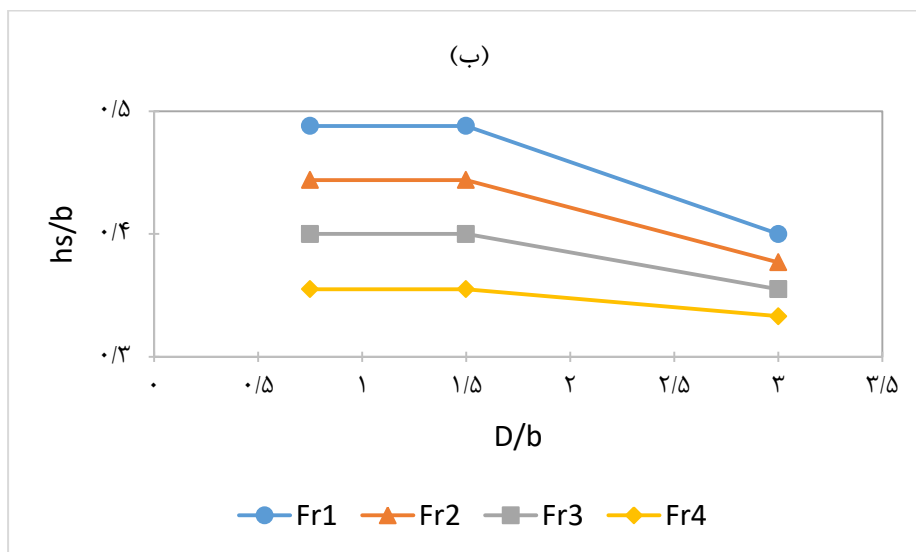
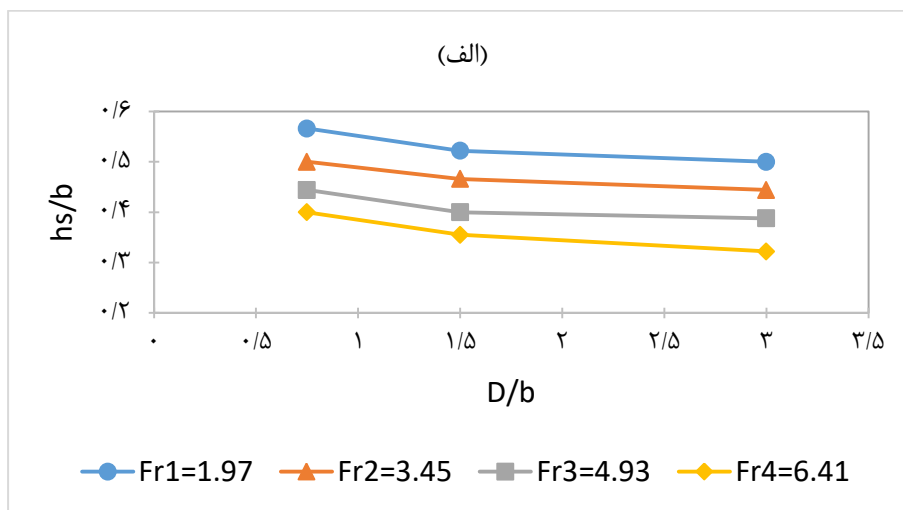


شکل ۴-۱۸- تغییرات $\frac{h_s}{b}$ در برابر Fr ، برای بازشدگی های مختلف. الف) قطر زبری ۱/۵، شیب صفر، بازشدگی درجه

متغیر. ب) قطر زبری ۳، شیب صفر، بازشدگی درجه متغیر.

۴-۴-۲- بررسی تاثیر $\frac{D}{b}$ بر روی پارامتر $\frac{h_s}{b}$

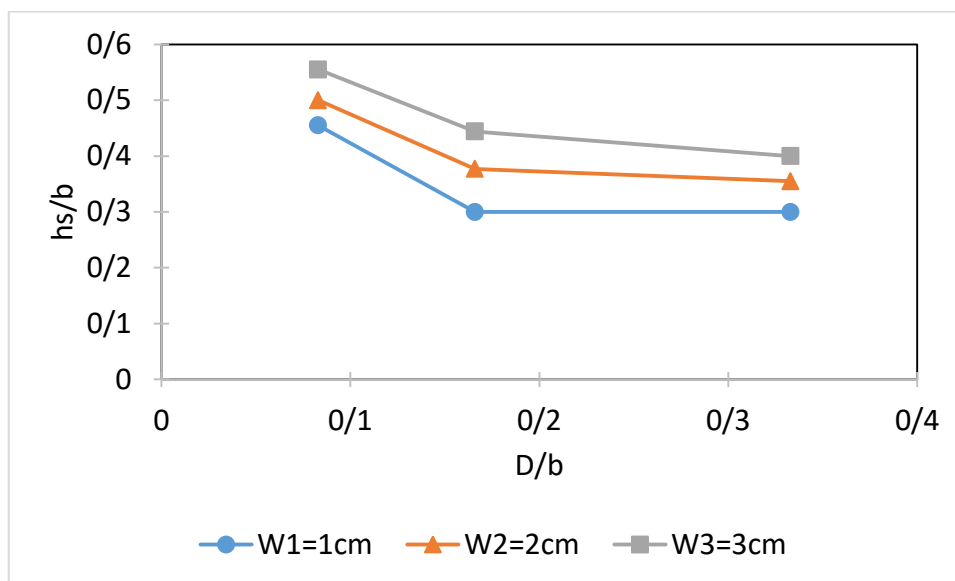
با افزایش نسبت $\frac{D}{b}$ برای اعداد فرود مختلف، نسبت $\frac{h_s}{b}$ کاهش یافت. البته با کاهش دبی جریان، مقدار آن نیز افزایش پیدا کرد که برای بازشدگی ۱ سانتیمتر و فرود ۶/۴۱ نسبت $\frac{h_s}{b}$ در حدود ۱۹/۵ درصد و برای بازشدگی ۳ سانتیمتر و فرود ۱/۲۳ نسبت $\frac{h_s}{b}$ در حدود ۹ درصد نسبت به حالت صاف کاهش پیدا کرد. از نتایج می‌توان استنباط کرد که اندازه‌ی زبری تاثیر چندانی در مقدار $\frac{h_s}{b}$ ندارد (شکل ۴-۱۹).



شکل ۴-۱۹- تغییرات $\frac{h_s}{b}$ در برابر $\frac{D}{b}$ برای دبی‌های مختلف. (الف) بازشدگی درجه ۱ سانتیمتر.

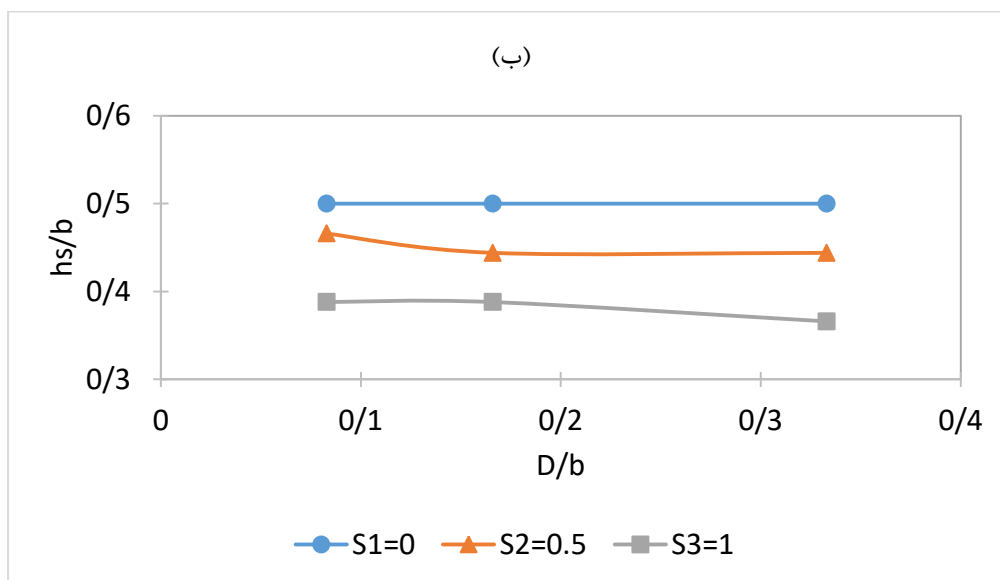
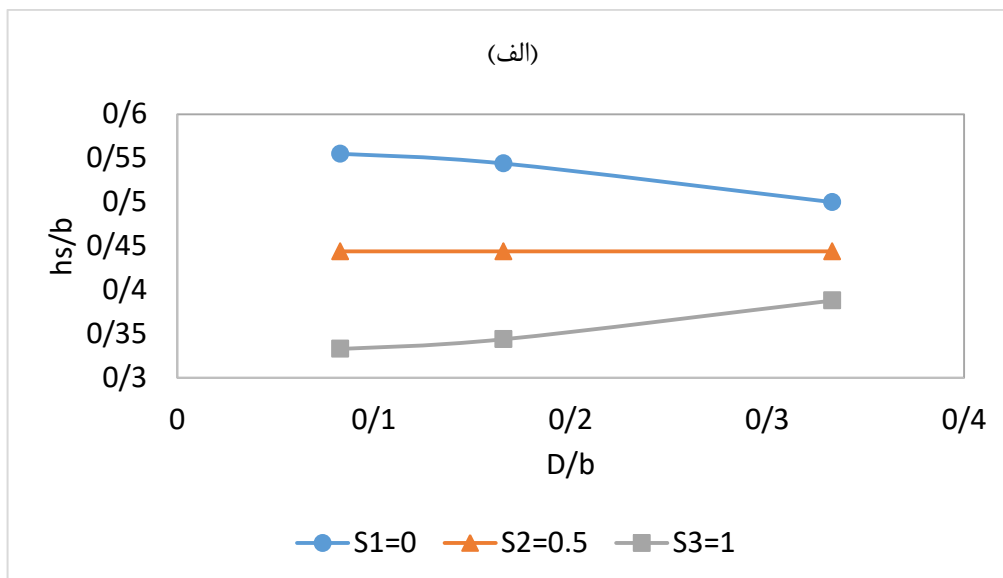
(ب) بازشدگی درجه ۳ سانتیمتر.

همانطور که در شکل (۴-۲۰) مشخص است، در شیب ۰/۵ با افزایش $\frac{D}{b}$ مقدار $\frac{h_s}{b}$ در بازشدگی‌های مختلف دریچه کاهش یافت. برای کمترین میزان بازشدگی دریچه مقدار $\frac{h_s}{b}$ از ۰/۴۵ تا ۰/۳ در حدود ۳۳ درصد کاهش یافت و برای $\frac{D}{b}$ ماکزیمم و بازشدگی‌های مختلف مقدار $\frac{h_s}{b}$ از ۰/۴ تا ۰/۳ کاهش یافت.



شکل ۴-۲۰- تغییرات $\frac{h_s}{b}$ در برابر $\frac{D}{b}$ برای بازشدگی‌های دریچه‌ی مختلف، دبی ۲، شیب ۰/۵، فاصله صفر.

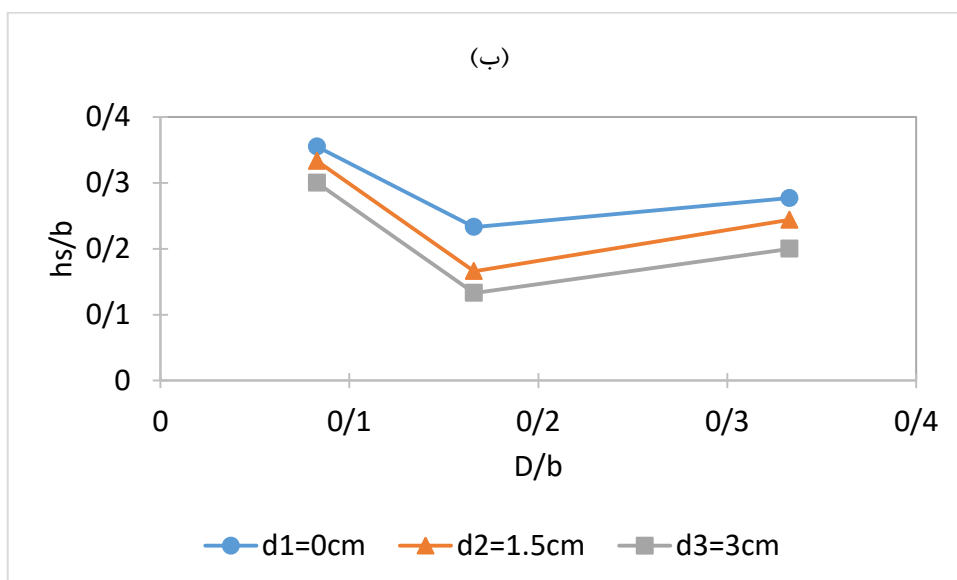
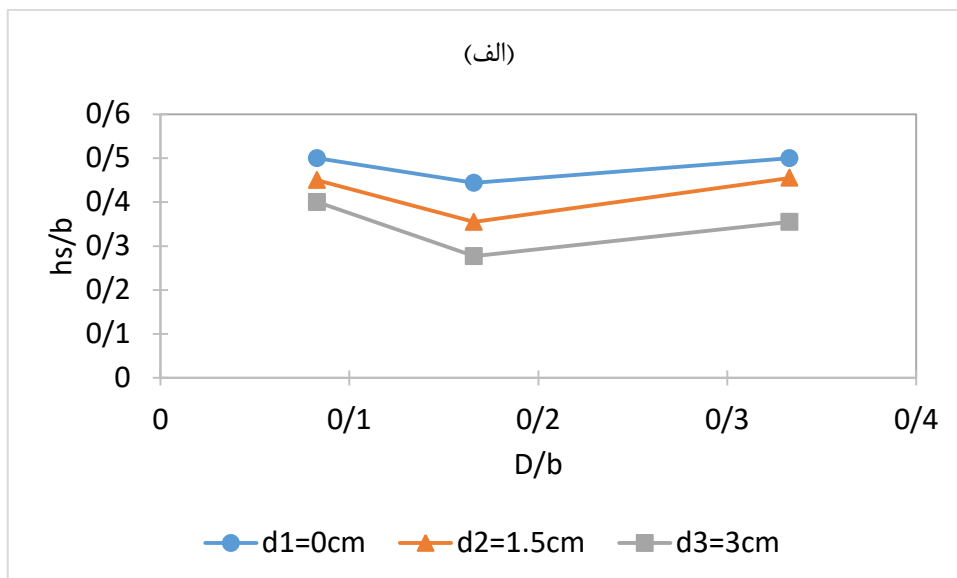
در شکل (۴-۲۱) تغییرات $\frac{D}{b}$ ، در برابر $\frac{h_s}{b}$ برای شیب‌های مختلف تقریباً یکسان می‌باشد. برای یک شیب ثابت با افزایش قطر زبری ارتفاع آبشستگی ثابت می‌باشد، برای بازشدگی ۱ سانتیمتر حداقل مقدار $\frac{h_s}{b}$ نیز مربوط به ملایم‌ترین شیب می‌باشد که مقدار آن برای قطر زبری مختلف در حدود ۰/۱۰ درصد بود. این روند برای بازشدگی دریچه ۳ سانتیمتر نیز مشابه بازشدگی دریچه‌ی ۱ سانتیمتر بود و مقدار آن نیز در حدود ۰/۳۳ بود.



شکل ۴-۲۱- تغییرات $\frac{h_s}{b}$ در برابر $\frac{D}{b}$ برای شیب‌های مختلف. الف) بازشدگی دریاچه ۱ سانتیمتر، دبی ۲، فاصله زبری ۳.

ب) بازشدگی دریاچه ۳ سانتیمتر، دبی ۲، فاصله زبری ۳.

با توجه به شکل (۴-۲۲)، همانطور که مشخص است با افزایش $\frac{D}{b}$ ، مقدار $\frac{h_s}{b}$ برای فاصله‌های مختلف روند نوسانی را نشان می‌دهد که برای بازشدگی دریاچه ۱ سانتیمتر با توجه به شکل جت مانند جریان نسبت به بازشدگی دریاچه ۳ سانتیمتر بیشتر بود، برای بازشدگی دریاچه ۱ سانتیمتر، محدوده‌ی تغییرات از ۰/۲۷ تا ۰/۵ و برای بازشدگی دریاچه ۳ سانتیمتر، محدوده‌ی تغییرات از ۰/۱۳ تا ۰/۳۵ قرار داشت.

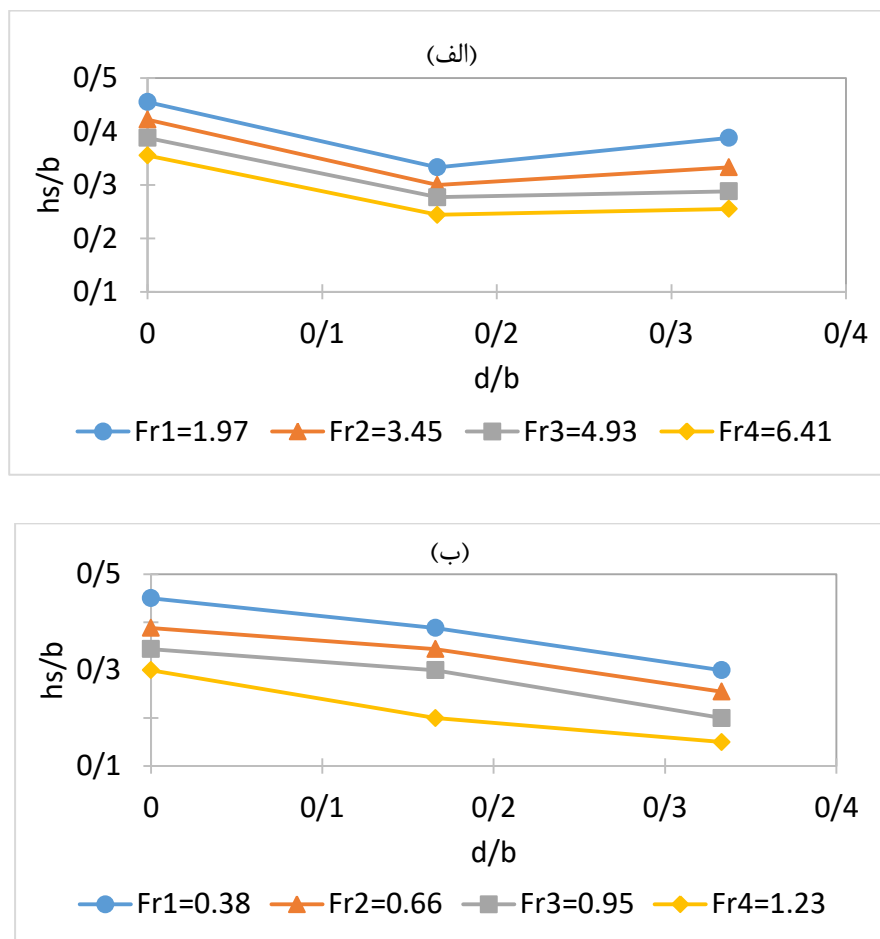


شکل ۴-۲۲- تغییرات $\frac{h_s}{b}$ در برابر $\frac{D}{b}$ برای فاصله زبری مختلف. الف) بازشدگی دریاچه ۱سانتیمتر، دبی ۶/۵، شیب ۱.

ب) بازشدگی دریاچه ۳سانتیمتر، دبی ۶/۵، شیب ۱.

۴-۳- بررسی تاثیر $\frac{d}{b}$ بر روی پارامتر $\frac{h_s}{b}$

با افزایش نسبت $\frac{d}{b}$ برای اعداد فرود مختلف، مقدار $\frac{h_s}{b}$ کاهش یافت، که برای فاصله زبری $1/5$ سانتیمتر در بازشدگی درجه ۱ سانتیمتر و برای بازشدگی ۳ سانتیمتر مقدار $\frac{h_s}{b}$ ، مربوط به بالاترین عدد فرود در محدوده $0/2$ تا $0/3$ قرار دارد. بررسی‌ها نشان داد که تغییرات $\frac{h_s}{b}$ در برابر $\frac{d}{b}$ برای بازشدگی درجه حداقل روندی نوسانی دارد و بهترین عملکرد برای $0/166 \frac{d}{b}$ به دست آمد و برای ماکزیمم بازشدگی درجه روندی کاهشی را نشان داد و بهترین عملکرد مربوط به $0/333 \frac{d}{b}$ بود (شکل ۴-۲۳).

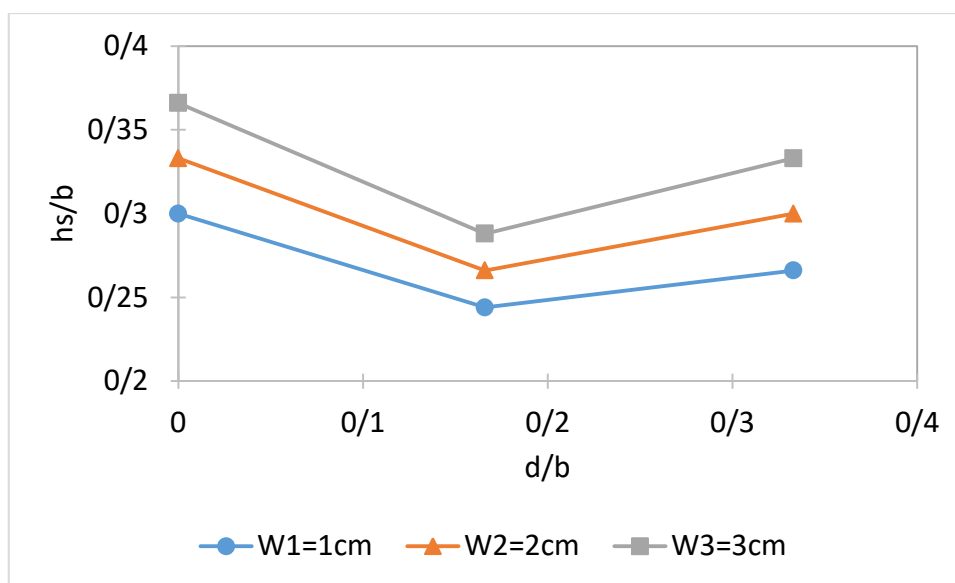


شکل ۴-۲۳- تغییرات $\frac{h_s}{b}$ در برابر $\frac{d}{b}$ برای فاصله زبری مختلف. الف) بازشدگی درجه ۱ سانتیمتر، قطر زبری ۳، شیب ۱.

ب) بازشدگی درجه ۳ سانتیمتر، قطر زبری ۳، شیب ۱.

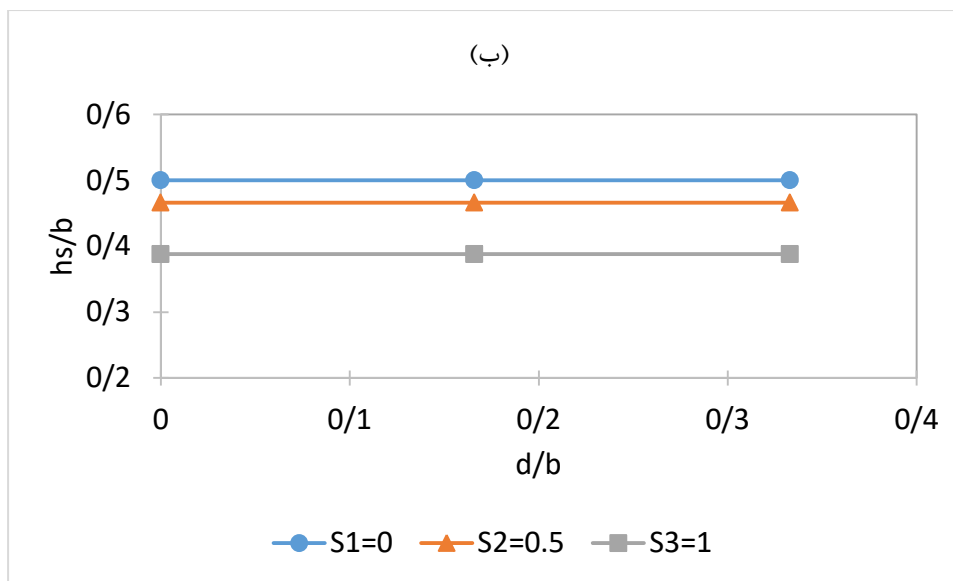
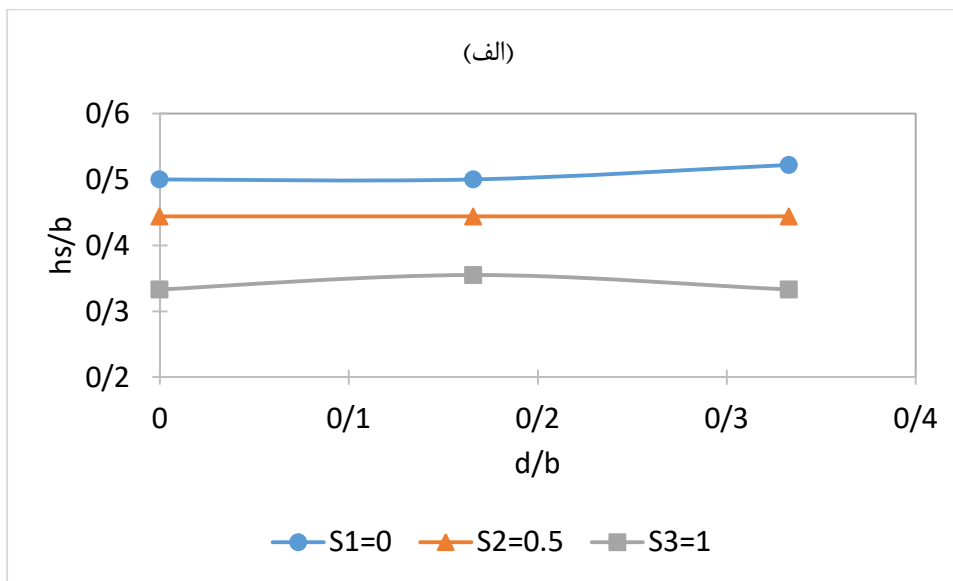
همانطور که در شکل (۴-۲۴) مشخص است با افزایش نسبت $\frac{d}{b}$ مقدار $\frac{h_s}{b}$ برای بازشدگی‌های مختلف روند نوسانی دارد، بطوریکه مقدار $\frac{h_s}{b}$ برای بیشترین بازشدگی مختلف از مقدار ۰/۲۷ تا ۰/۳۳ تغییر کرد.

برای فاصله‌ی زبری صفر با عبور جریان از زیر دریچه جریان همانند جت از روی بستر زبر عبور کرده و زبری تاثیر زیادی در کاهش ابعاد آبشستگی نشان نداد. با افزایش فاصله زبری به ۱/۵ سانتیمتر بخشی از جریان عبوری در فاصله بین زبری‌ها قرار گرفته با توجه به چرخش و تلاطم جریان، بخشی از انرژی جریان مستهلک شده‌که نتیجه آن افزایش عملکرد در کنترل آبشستگی می‌باشد. برای فاصله زبری ۳ سانتیمتر از شدت تلاطم و گردابه‌ها در حد فاصل زبری‌ها کاسته شده و فاصله بین زبری‌ها همانند یک گودال عمل کرده که کاهش عملکرد را به دنبال داشت.



شکل ۴-۲۴- تغییرات $\frac{h_s}{b}$ در برابر $\frac{d}{b}$ برای بازشدگی‌های مختلف، دبی ۵، قطر زبری ۳، شیب ۱.

با توجه به شکل (۴-۲۵) تقریباً نسبت $\frac{h_s}{b}$ در برابر $\frac{d}{b}$ برای شیب‌های مختلف ثابت است، به‌طوریکه با افزایش شیب مقدار $\frac{h_s}{b}$ برای $\frac{d}{b}$ ثابت، برای مثال برای بازشدگی ۳ سانتیمتر، برای شیب‌های مختلف به ترتیب ۰/۵، ۰/۴۶ و ۰/۴ بود. برای بازشدگی مختلف دریچه نیز روند تغییرات مشابه بود.



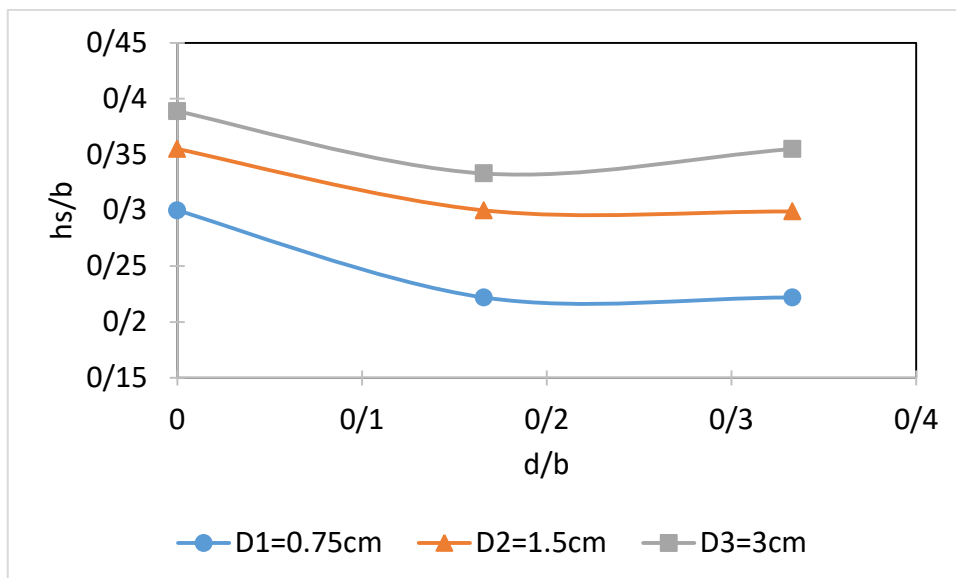
شکل ۴-۲۵- تغییرات $\frac{h_s}{b}$ در برابر $\frac{d}{b}$ برای شیب‌های مختلف. (الف) بازشدگی دریچه ۱ سانتیمتر، قطر زبری ۰/۷۵، دبی ۲

(ب) بازشدگی دریچه ۳ سانتیمتر، قطر زبری ۰/۷۵، دبی ۲.

در شکل (۴-۲۶) برای اندازه زبری‌های مختلف، با افزایش نسبت فاصله بین زبری $(\frac{d}{b})$ مقدار $\frac{h_s}{b}$ دارای

نوسان بود. در ماکزیمم قطر زبری برای بازشدگی دریچه ۳ سانتیمتر مقدار $\frac{h_s}{b}$ از ۰/۳۸ به ۰/۳۵ در

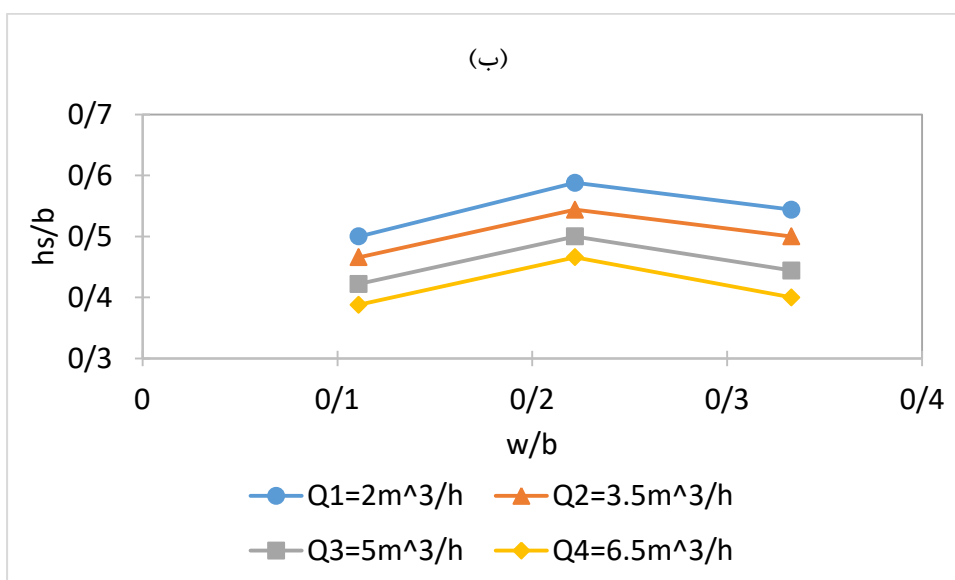
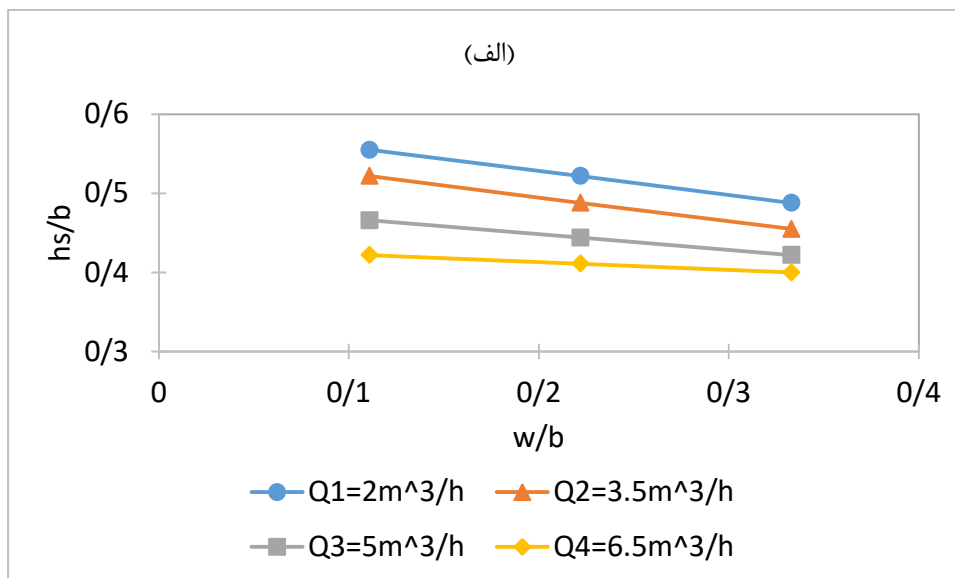
حدود ۷/۸ درصد نسبت به فاصله زبری صفر کاهش یافت.



شکل ۴-۲۶- تغییرات $\frac{h_s}{b}$ در برابر $\frac{d}{b}$ برای قطرهای زبری مختلف، بازشدگی در پیچه ۳ سانتیمتر، دبی ۰/۵، شیب ۰/۵.

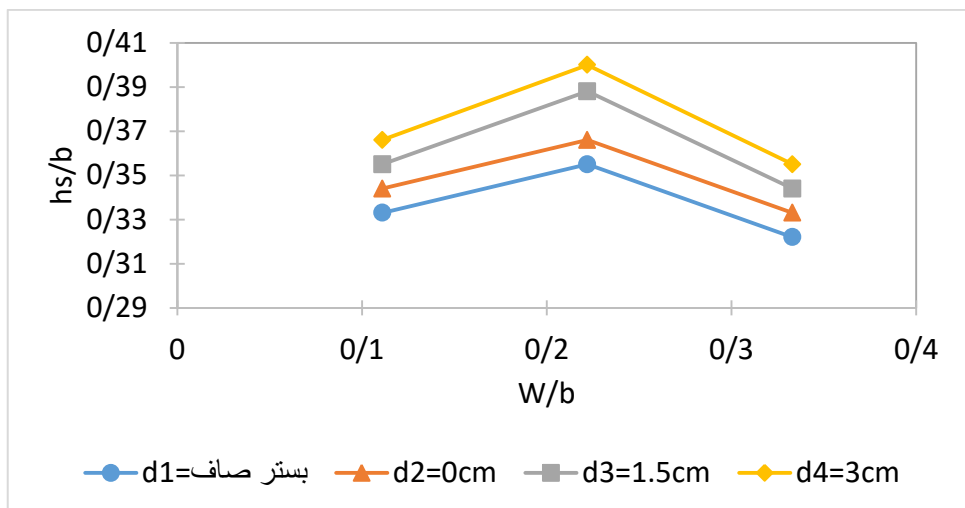
۴-۴-۴- بررسی تاثیر $\frac{W}{b}$ بر روی پارامتر $\frac{h_s}{b}$

در شکل (۴-۲۷) برای اعداد فرود مختلف، با افزایش نسبت $\frac{W}{b}$ مقدار $\frac{h_s}{b}$ برای دبی‌های مختلف نوسانات بسیار کمی دارد و مقدار آن برای زبری‌های مختلف در حدود ۰/۴۵ است. شاید یکی از دلایل این اتفاق، به کف رسیدن عمق آبشستگی بعد از کف صلب می‌باشد. که نتیجه‌ی آن برخورد جریان به کف صلب و شسته شدن قله آبشستگی در پایین دست و کاهش ارتفاع آن است.



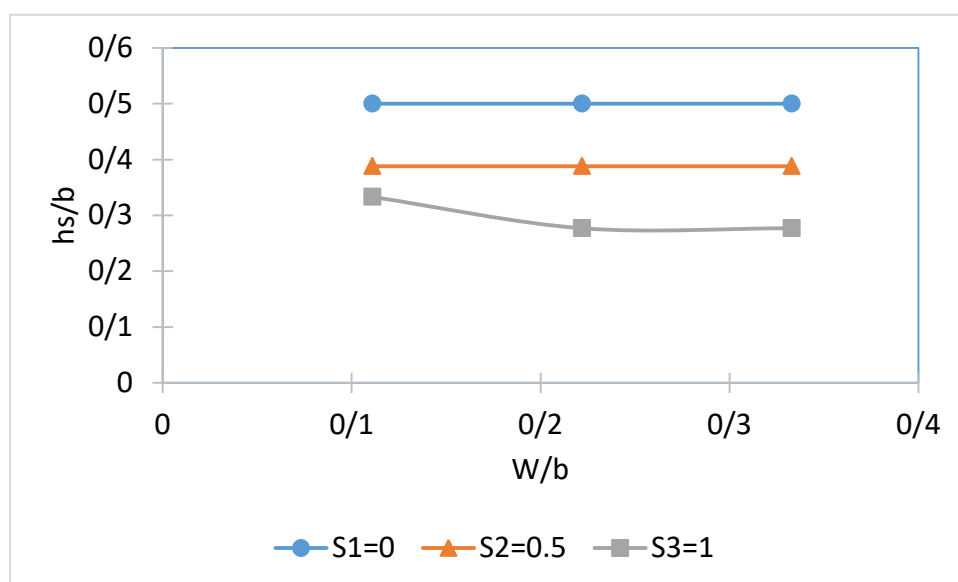
شکل ۴-۲۷- تغییرات در $\frac{h_s}{b}$ برابر $\frac{W}{b}$ برای اعداد فرود مختلف. (الف) بستر کاذب صاف. (ب) زبری به قطر ۱/۵.

شکل (۴-۲۸) تغییرات $\frac{h_s}{b}$ را در برابر $\frac{W}{b}$ برای فاصله‌ی زبری مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با افزایش $\frac{W}{b}$ ، مقدار $\frac{h_s}{b}$ در فاصله‌های مختلف زبری دارای روند نوسانی می‌باشد. در بازشدگی دریاچه ۲ سانتیمتر، مقدار $\frac{h_s}{b}$ در زبری به قطر ۱/۵ در محدوده‌ی ۰/۳۲ تا ۰/۴ قرار داشت. در این حالت با توجه به ارتفاع زبری و بازشدگی دریاچه، انرژی جریان عبوری از زیر دریاچه کاهش یافته که نتیجه‌ی آن افزایش $\frac{h_s}{b}$ است.



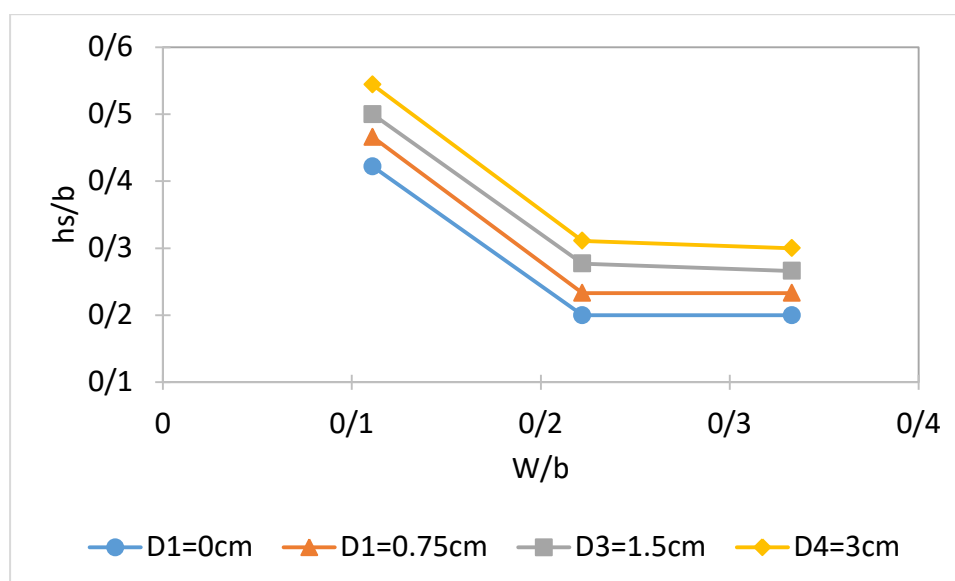
شکل ۴-۲۸- تغییرات $\frac{h_s}{b}$ در برابر $\frac{W}{b}$ برای فاصله زبری مختلف، دبی ۲، قطر زبری ۱/۵، شیب ۱.

با توجه به شکل (۴-۲۹) تغییرات $\frac{h_s}{b}$ در برابر $\frac{W}{b}$ برای شیب‌های مختلف ثابت بود، البته با تغییر شیب کف مقدار $\frac{h_s}{b}$ تغییر کرد، به طوری که برای فاصله‌ی زبری ۱/۵ سانتیمتر با افزایش شیب مقدار آن به ترتیب ۰/۵، ۰/۴ و ۰/۳ بدست آمد. با افزایش قدرت جریان فرسایشی افزایش یافته، نتیجه آن شستشوی قله‌ی رسوبات و کاهش $\frac{h_s}{b}$ است.



شکل ۴-۲۹- تغییرات $\frac{h_s}{b}$ در برابر $\frac{W}{b}$ برای شیب‌های مختلف، دبی ۳/۵، قطر زبری ۰/۷۵، فاصله زبری ۱/۵.

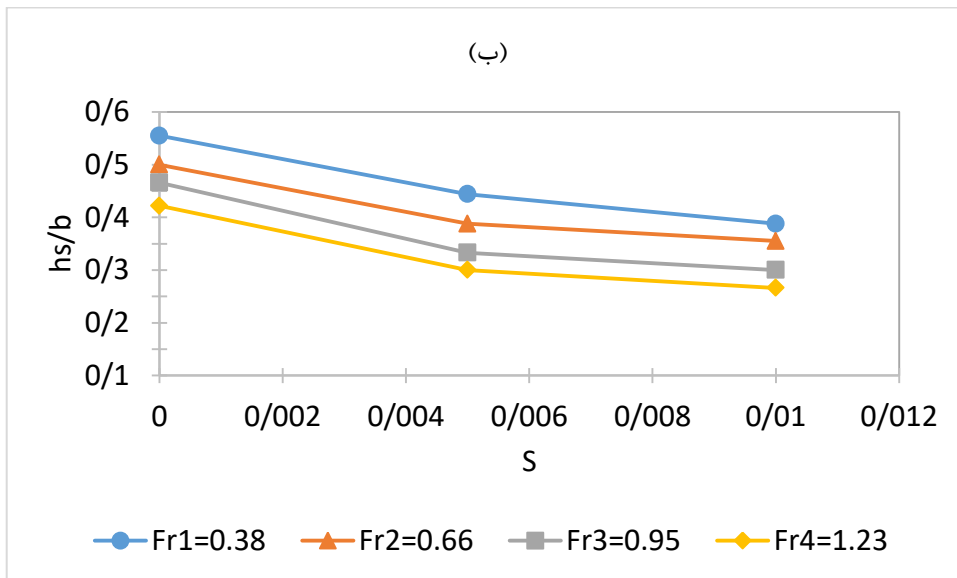
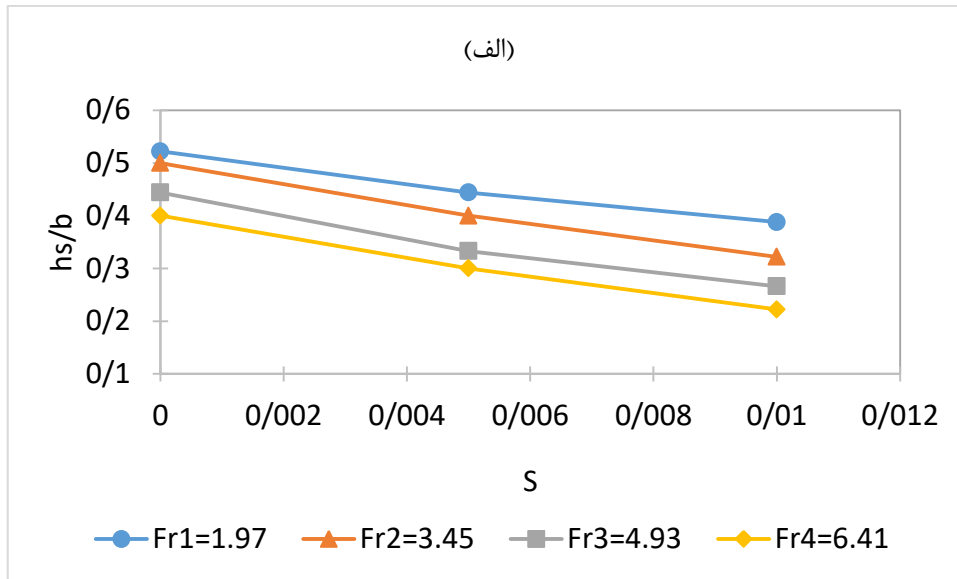
همانطور که در شکل (۴-۳۰) مشخص است با افزایش $\frac{W}{b}$ برای قطرهای مختلف زبری، مقدار $\frac{h_s}{b}$ کاهش یافت. در بازشدگی دریچه ۲ سانتیمتر با تغییر قطر زبری از ۰ تا ۳ مقدار آن از ۰/۳ به ۰/۲ در حدود ۳۳ درصد کاهش یافت. همچنین تغییرات $\frac{h_s}{b}$ برای ماکزیمم قطر زبری در حدود ۴۵ درصد و نشان دهنده‌ی بیشترین تغییرات بود. با افزایش بازشدگی جریان عبوری افزایش یافته، نتیجه آن با توجه به قطر زبری‌ها، افزایش تلاطم و کاهش $\frac{h_s}{b}$ است.



شکل ۴-۳۰- تغییرات $\frac{h_s}{b}$ در برابر $\frac{W}{b}$ برای قطر زبری مختلف، دبی ۶/۵، فاصله صفر، شیب ۱.

۴-۴-۵- بررسی تاثیر S بر روی پارامتر $\frac{h_s}{b}$

همانطور که در شکل (۴-۳۱) مشخص است با افزایش شیب (S) برای اعداد فرود مختلف، نسبت $\frac{h_s}{b}$ کاهش یافت، بطوریکه بیشترین مقدار $\frac{h_s}{b}$ مربوط به شیب صفر بود. در بازشدگی‌های مختلف روند تغییرات مشابه کاهش نشان داد. با افزایش عدد فرود برای یک شیب ثابت مقدار $\frac{h_s}{b}$ افزایش یافت، که دلیل آن را می‌توان افزایش تلاطم جریان دانست.

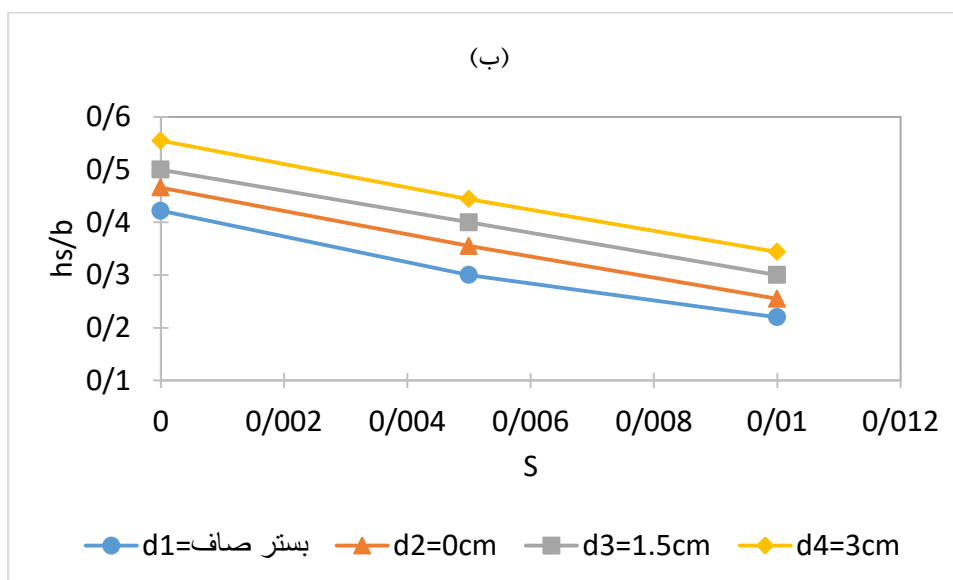
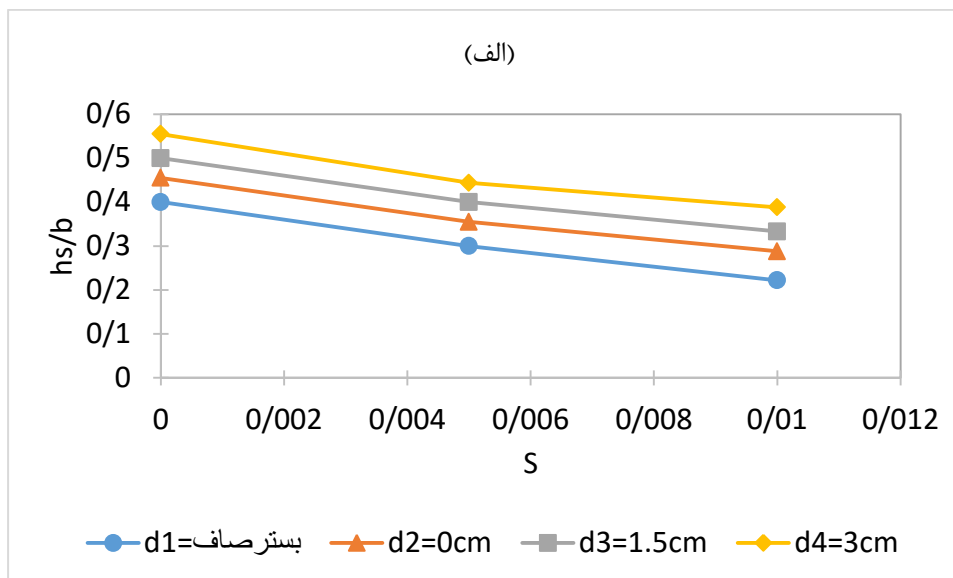


شکل ۴-۳۱- تغییرات $\frac{h_s}{b}$ در برابر S برای اعداد فرود مختلف. الف) بازشدگی در پیچه ۱ سانتیمتر، قطر زبری ۳، فاصله

زبری ۳. ب) بازشدگی در پیچه ۳ سانتیمتر، قطر زبری ۳، فاصله زبری ۳.

در شکل (۴-۳۲) تاثیر فاصله بین زبری‌ها بر روی تغییرات $\frac{h_s}{b}$ در برابر S را برای زبری به قطر ۱/۵ سانتیمتر نشان داده شد. همانطور که مشخص است با افزایش S ، مقدار $\frac{h_s}{b}$ برای فاصله‌های مختلف زبری کاهش یافت. به‌طوریکه برای ماکزیمم فاصله زبری در بازشدگی در پیچه ۳ سانتیمتر حداکثر مقدار $\frac{h_s}{b}$ ، ۰/۴۲ و حداقل مقدار آن ۰/۲۲ و در بازشدگی در پیچه ۱ سانتیمتر حداکثر مقدار $\frac{h_s}{b}$ ، ۰/۴ و حداقل آن ۰/۲۲ می‌باشد. در واقع با افزایش فاصله از ۰ تا ۳ سانتیمتر، نسبت $\frac{h_s}{b}$ ۴۸ درصد کاهش

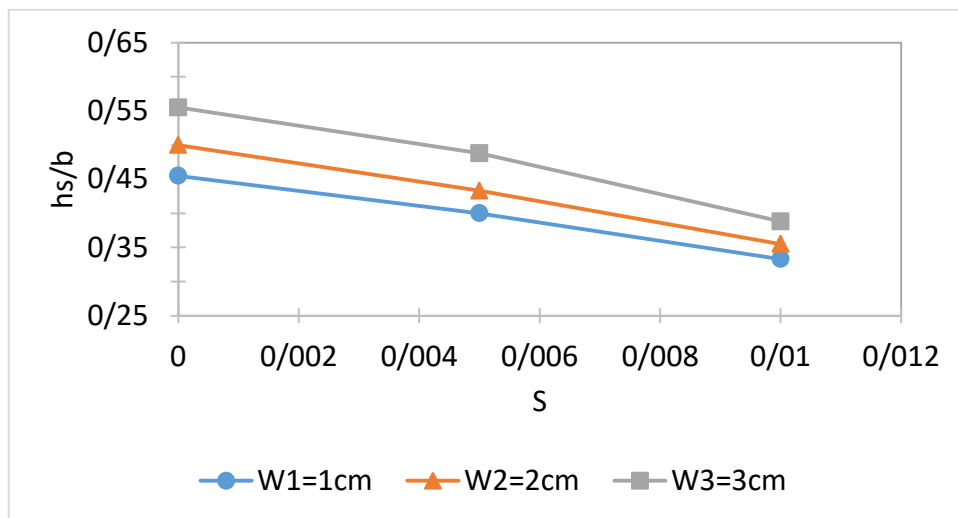
یافت. همانطور که در شکل‌ها مشخص است، روند تغییرات و مقادیر $\frac{h_s}{b}$ برای فاصله‌های زبری مختلف مشابه یکدیگر است. با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت که تاثیر شیب کف در افزایش تلاطم و قدرت جریان نسبت به نقش کنترلی فاصله‌ی زبری‌ها بیشتر است.



شکل ۴-۳۲- تغییرات $\frac{h_s}{b}$ در برابر S برای فاصله زبری مختلف. الف) بازشدگی در پیچه ۱سانتیمتر، دبی ۵، قطر زبری ۱/۵.

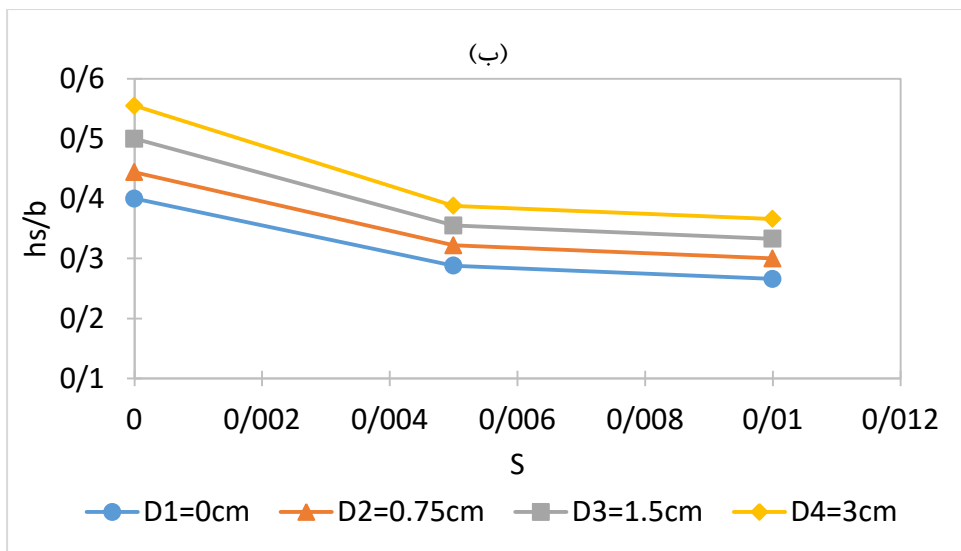
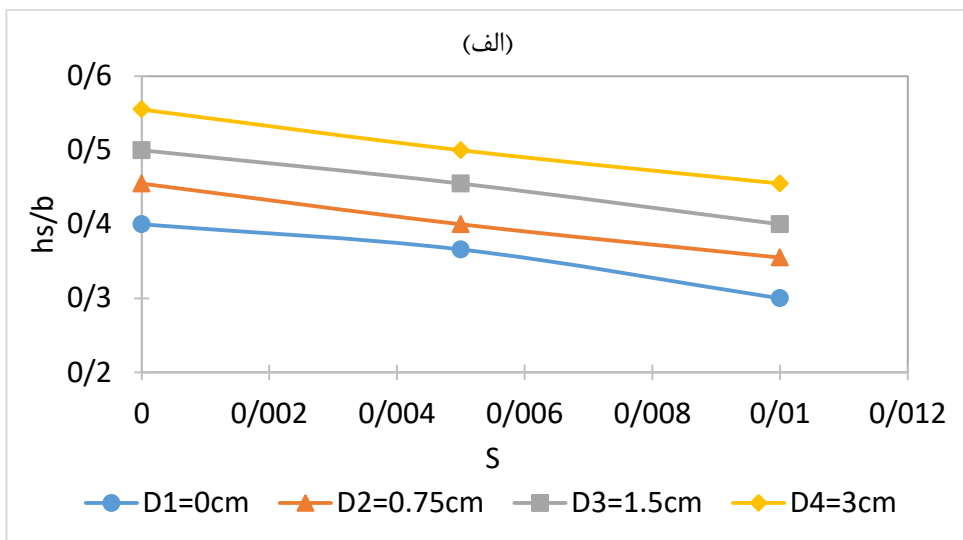
ب) بازشدگی در پیچه ۳سانتیمتر، دبی ۵، قطر زبری ۱/۵.

مطابق شکل (۳۳-۴) تغییرات S در برابر نسبت ارتفاع قله آبستگي را برای بازشدگی دريچه مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در روی شکل مشخص است در بازشدگی‌های مختلف با افزایش شیب مقدار $\frac{h_s}{b}$ کاهش یافت و با افزایش مقدار بازشدگی دريچه، شیب خط تغییرات $\frac{h_s}{b}$ ملایم‌تر خواهد بود، به‌طوریکه برای بازشدگی دريچه ۳ سانتیمتر حداقل مقدار $\frac{h_s}{b}$ در حدود ۰/۳۸ و حداکثر مقدار آن در حدود ۰/۵ بود.



شکل ۳۳-۴- تغییرات $\frac{h_s}{b}$ در برابر S برای بازشدگی‌های مختلف، قطر زبری ۰/۷۵، دبی ۰/۲، فاصله زبری ۰/۳.

شکل (۳۴-۴) تغییرات $\frac{h_s}{b}$ را در برابر S برای قطر زبری‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش S مقدار $\frac{h_s}{b}$ در قطرهای مختلف کاهش یافت. به‌طوریکه برای بازشدگی دريچه ۱ سانتیمتر، حداکثر مقدار $\frac{h_s}{b}$ برای بستر صاف و در حدود ۰/۴ مربوط به حداقل شیب، و حداقل مقدار $\frac{h_s}{b}$ برای بستر صاف در حدود ۰/۳ و برای حداکثر شیب بود. برای بیشترین شیب کف نیز حداقل و حداکثر مقدار $\frac{h_s}{b}$ به ترتیب در حدود ۰/۳ و ۰/۴۵ به دست آمد. علت کاهش $\frac{h_s}{b}$ با افزایش شیب را می‌توان افزایش توان فرسایشی جریان و شستشوی قله‌ی آبستگي دانست.



شکل (۴-۳۴) تغییرات $\frac{h_s}{b}$ در برابر S برای قطرزبری مختلف. (الف) بازشدگی در پیچه ۱ سانتیمتر، دبی $\frac{3}{5}$ ، فاصله زبری

۱/۵. (ب) بازشدگی در پیچه ۳ سانتیمتر، دبی $\frac{3}{5}$ ، فاصله زبری ۱/۵

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه گیری

تحقیق حاضر به بررسی آزمایشگاهی پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مختلف بر روی ابعاد آبشستگی پرداخت. در این تحقیق چهار موضوع اصلی دنبال گردید که عبارت بودند از : تاثیر اندازه زبری‌ها، تاثیر فاصله بین زبری‌ها، تاثیر بازشدگی دریاچه کشویی و تاثیر شیب بر ابعاد آبشستگی (طول آبشستگی و ارتفاع قله).

در این قسمت خلاصه نتایج این تحقیق ارائه شده است.

- با بررسی تاثیر Fr بر روی پارامتر $\frac{L_s}{b}$ مشاهده کردیم که برای بازشدگی‌های مختلف با افزایش عدد فرود طول آبشستگی افزایش یافت. با اعمال زبری نرخ تغییرات $\frac{L_s}{b}$ کاهش یافت. برای زبری‌های مختلف بهترین عملکرد مربوط به زبری $1/5$ سانتیمتر بود. به طوری که $\frac{L_s}{b}$ در حدود 0.33 نسبت به بستر صاف کاهش یافت.
- با افزایش اندازه زبری $(\frac{D}{b})$ ، برای پارامترهای مختلف نظیر عدد فرود، بازشدگی دریاچه، فاصله زبری‌ها و شیب، مقدار $\frac{L_s}{b}$ کاهش یافت، به طوری که بهترین عملکرد مربوط به نسبت $\frac{D}{b}$ برابر 0.333 بود. برای ماکزیمم بازشدگی دریاچه ($W3$)، نسبت $\frac{L_s}{b}$ در حدود 46 درصد کاهش نشان داد. برای یک فاصله زبری ثابت با افزایش $\frac{D}{b}$ (قطر زبری) نسبت $\frac{L_s}{b}$ برای شیب‌های مختلف نیز کاهش یافت.
- برای پارامترهای مختلف (عدد فرود، بازشدگی دریاچه کشویی، قطر زبری‌ها و شیب)، با افزایش فاصله زبری $(\frac{d}{b})$ ، نسبت $\frac{L_s}{b}$ کاهش یافت. همچنین برای یک فاصله زبری $(\frac{d}{b})$ ثابت، با افزایش شیب فلوم نسبت $\frac{L_s}{b}$ افزایش یافت. دلیل این امر را می‌توان افزایش سرعت جریان و توان فرسایشی جریان دانست. با افزایش $\frac{d}{b}$ برای بازشدگی‌های مختلف مقدار $\frac{L_s}{b}$ کاهش یافت،

به طوریکه در ماکزیمم بازشدگی دریاچه مقدار $\frac{L_s}{b}$ برای بستر زبر در حدود ۲۲ درصد نسبت به فاصله زبری صفر کاهش یافت.

- نسبت طول آبشستگی ($\frac{L_s}{b}$) با افزایش بازشدگی دریاچه ($\frac{W}{b}$)، به ازای تغییر پارامترهای مختلف نظیر عدد فرود، فاصله زبری‌ها، قطر زبری‌ها و شیب کاهش یافت. مقدار $\frac{L_s}{b}$ با افزایش $\frac{W}{b}$ ، در قطرهای مختلف زبری کاهش یافت. مقادیر $\frac{L_s}{b}$ برای بستر صاف ماکزیمم بوده، به-طوریکه از حدود ۹/۸ تا ۸/۸ تغییر می‌کند. دلیل آن را می‌توان نقش قطر زبری در افزایش تلاطم جریان دانست.

- برای پارامترهای مختلف (عدد فرود، فاصله زبری‌ها، قطر زبری‌ها و بازشدگی دریاچه) با افزایش شیب (S)، مقدار $\frac{L_s}{b}$ افزایش یافت. با افزایش شیب (S)، برای اعداد فرود مختلف، نسبت $\frac{L_s}{b}$ افزایش یافت. برای بازشدگی دریاچه ۳ سانتیمتر $\frac{L_s}{b}$ تقریباً ۴ برابر و برای بازشدگی دریاچه ۱ سانتیمتر $\frac{L_s}{b}$ تقریباً ۵ برابر بستر صاف است.

- بررسی تاثیر Fr بر روی پارامتر $\frac{h_s}{b}$ نشان داد که مقدار $\frac{h_s}{b}$ با افزایش عدد فرود برای بازشدگی‌های مختلف، کاهش می‌یابد. میزان کاهش $\frac{h_s}{b}$ برای بازشدگی دریاچه ۱ سانتیمتر ماکزیمم بود و حداقل مقدار $\frac{h_s}{b}$ در حدود ۰/۳ اندازه‌گیری شد.

- با افزایش اندازه زبری ($\frac{D}{b}$)، برای پارامترهای مختلف مانند عدد فرود، بازشدگی دریاچه کشویی، فاصله زبری‌ها و شیب، مقدار $\frac{h_s}{b}$ روندی نوسانی و تقریباً یکسان دارد. به طوریکه با افزایش $\frac{D}{b}$ مقدار $\frac{h_s}{b}$ در بازشدگی‌های مختلف دریاچه کاهش یافت. برای کمترین میزان بازشدگی دریاچه مقدار $\frac{h_s}{b}$ در حدود ۳۳ درصد کاهش یافت و برای $\frac{D}{b}$ ماکزیمم و بازشدگی-های مختلف مقدار $\frac{h_s}{b}$ از ۰/۴ تا ۰/۳ کاهش یافت.

- برای پارامترهای مختلف نظیر عدد فرود، بازشدگی دریچه کشویی، قطر زبری‌ها و شیب، با افزایش فاصله زبری $(\frac{d}{b})$ ، نسبت $\frac{h_s}{b}$ کاهش و روندی نوسانی داشت. برای فاصله زبری ۱/۵ سانتیمتر در بازشدگی دریچه ۱ سانتیمتر و برای بازشدگی دریچه ۳ سانتیمتر مقدار $\frac{h_s}{b}$ مربوط به بالاترین عدد فرود در محدوده‌ی ۰/۲ تا ۰/۳ قرار دارد. بررسی‌ها نشان داد که تغییرات $\frac{h_s}{b}$ در برابر $\frac{d}{b}$ برای بازشدگی دریچه حداقل روندی نوسانی دارد و بهترین عملکرد برای $\frac{d}{b} = ۰/۱۶۶$ به دست آمد و برای ماکزیمم بازشدگی دریچه روندی کاهشی را نشان داد و بهترین عملکرد مربوط به $\frac{d}{b} = ۰/۳۳۳$ بود.
- مقدار ارتفاع قله آبشستگی $(\frac{h_s}{b})$ با افزایش بازشدگی دریچه $(\frac{W}{b})$ ، برای پارامترهای مختلف نظیر عدد فرود، فاصله زبری‌ها، قطر زبری‌ها و شیب، نوسان کمی را نشان داد. با افزایش $\frac{W}{b}$ ، مقدار $\frac{h_s}{b}$ در فاصله‌های مختلف زبری روندی نوسانی داشت. در بازشدگی دریچه ۲ سانتیمتر مقدار $\frac{h_s}{b}$ در زبری به قطر ۱/۵ در محدوده ۰/۳۲ تا ۰/۴ قرار داشت.
- برای پارامترهای مختلف نظیر عدد فرود، فاصله زبری‌ها، قطر زبری‌ها و بازشدگی دریچه، با افزایش شیب (S) ، نسبت $\frac{h_s}{b}$ افزایش یافت. با افزایش فاصله از ۰ تا ۳ سانتیمتر، نسبت $\frac{h_s}{b}$ ۴۸ درصد کاهش یافت. نتایج نشان داد که تاثیر شیب کف در افزایش تلاطم و قدرت جریان نسبت به نقش کنترلی فاصله زبری‌ها بیشتر است.

۵-۲- پیشنهادات

- (۱) افزایش ارتفاع رسوبات و بررسی عمق آبشستگی و توسعه زمانی آن در پایین‌دست دریچه‌های کشویی
- (۲) شبیه‌سازی عددی آبشستگی پایین‌دست دریچه‌کشویی با نرم‌افزار Flow 3D و Fluent
- (۳) بررسی آزمایشگاهی پدیده آبشستگی در پایین‌دست انواع دیگر دریچه‌های کشویی نظیر دریچه‌های رادیالی (عمق آبشستگی و ابعاد آن)

۴) شبیه‌سازی عددی پدیده آبستگي در پايين دست انواع ديگر دريچه‌ها

۵) بررسي راهکارهاي ديگر جهت کنترل پدیده آبستگي در پايين دست دريچه‌هاي کشويي و

انواع ديگر آن

منابع

۱. افضلی، م. خرم، س. (۱۳۹۵) "تاثیر زاویه واگرایی و میزان بازشدگی دریچه در تعیین میزان آبستگی در پایین دست حوضچه‌های آرامش"، سومین کنفرانس ملی مهندسی عمران و توسعه پایدار ایران.
۲. اکبری، غ. ح. کاویانپوراصفهانی، م. ر. سلطانی سامانی، ا. (۱۳۹۳) "اثر تغییرات دبی و عمق پایاب بر بیشترین عمق آبستگی پایین دست پرتاب کننده جامی شکل"، نشریه مهندسی منابع آب. دوره ۷، شماره ۲۰، ص: ۶۴-۵۱.
۳. شفافی بجستان، م. (۱۳۸۷) "هیدرولیک انتقال رسوب"، ویرایش دوم، چاپ اول، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۴. شفافی بجستان، م. (۱۳۸۵) "تعیین حداکثر عمق آبستگی پایین دست سرریز پلکانی در شرایط جریان ریزشی"، هفتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه.
۵. شهبواری، ح. حیدرپور، م. (۱۳۹۷) "بررسی تاثیر زبری‌های موضعی در کنترل و کاهش آبستگی موضعی تکیه‌گاه پل"، دانشگاه شهید چمران اهواز، جلد ۴۱، شماره ۳، ص: ۴۴-۲۹.
۶. علی حسینی، پ. صانعی، م. ابراهیمی، ک. (۱۳۸۷) "بررسی تشابه هندسی پروفیل‌های آبستگی پایین دست جت افقی مستغرق با استفاده از مدل آزمایشگاهی"، چهاردهمین کنفرانس دانشجویان مهندسی عمران سراسر کشور.
۷. حمیدی‌فر، ح. امید، م. ح. و نصرآبادی، م. (۱۳۸۹) "آبستگی موضعی در پایین دست دریچه‌های کشویی"، نشریه آب و خاک، شماره ۴، جلد ۲۴، دانشگاه فردوسی مشهد، ص: ۷۳۶-۷۲۸.
۸. حمیدی‌فر، ح. و امید، م. ح. (۱۳۸۹) "بررسی آزمایشگاهی رسوبات غیرچسبنده در پایین دست کفبند"، مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۱۱، شماره ۲، ۲۸-۱۷.

۹. خلیلی شایان، ح. (۱۳۹۲) "بررسی آبستگی موضعی در پایاب حوضچه‌های آرامش با شیب معکوس"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته‌های سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران.
۱۰. راهنمای روش‌های محاسبه آبستگی موضعی. (۱۳۹۰)، نشریه ۵۴۹، وزارت نیرو، دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا، معاونت نظارت راهبردی، دفتر نظام فنی اجرایی.
۱۱. صاعی، م. (۱۳۸۶) "آبستگی موضعی در پایین‌دست سرریز ریزشی آزاد. اولین همایش سد و سازه‌های هیدرولیکی"، ۲۳ تا ۲۴ آبان، کرج.
۱۲. کاظم‌پور لاکساری، ز. اسمعیلی ورکی، م. ملک‌پور، ا. (۱۳۹۷) "مطالعه آزمایشگاهی آبستگی پایین‌دست سرریزهای پلکانی-کنگره‌ای"، تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۹، شماره ۶. ص: ۱-۱۴.
۱۳. مفتخری رستم خانی، ح. (۱۳۸۸) "بررسی آزمایشگاهی تاثیر غیریکنواختی رسوب بر آبستگی موضعی با وجود صفحات قائم مدفون"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف.
۱۴. مهبودی، ع. عطاری، ج و مجدزاده‌ی طباطبائی، م.ر. (۱۳۸۹) "مطالعه آزمایشگاهی کنترل آبستگی ناشی از جت افقی مستغرق با استفاده از سنگچین"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۴ تا ۱۶ اردیبهشت.
۱۵. معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور، (۱۳۹۰) "راهنمای روش‌های محاسبه آبستگی موضعی"، وزارت نیرو، نشریه شماره ۵۴۹.
۱۶. نورعلیزاده، ا. تلوری، ع، افروس. (۱۳۹۲) "شبیه‌سازی عملکرد دریچه درحداکثر عمق آب شستگی پایین دست و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی"، اولین همایش ملی زهکشی در کشاورزی پایدار، دانشگاه تربیت مدرس. ص: ۹-۱.

17. Aminipor, y., J. Farhoudi, and R. Roshan. (2014). Study scour downstream of stilling basin of stepped weir. *Iranian journal of hydraulic*, 9(4), 25-38
18. Adduce, C. and Sciortino, G., 2006, Scour due to a horizontal turbulent jet: Numerical and experimental investigation, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 44, No. 5, pp. 663-673
19. Balachandar, R., & Kells, J. A. (1997). Local channel in scour in uniformly graded sediments: the time-scale problem. *Canadian journal of civil engineering*, 24(5), 799-807.
20. Breusers, H. N. C. (1966). Conformity and time scale in two-dimensional local scour.
21. Breusers, H. N. C., & Raudkivi, A. J. (1991). *IAHR hydraulic structures design manual: Scouring*, Vol. 2. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
22. Chatterjee, S. S., Ghosh, S. N., & Chatterjee, M. (1994). Local scour due to submerged horizontal jet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(8), 973-992.
23. Dey, S., & Sarkar, A. (2006). Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets. *Journal of hydraulic engineering*, 132(3), 246-257.
24. Dargahi, B. (2003). Scour development downstream of a spillway. *Journal of Hydraulic Research*, 41(4), 417-426.
25. Dehghani, A.A., and Bashiri, H. 2009. Experimental investigation of scouring in downstream of combined flow over weirs and below gates. 33rd IAHR conference. Vancouver, Canada
26. Dey, S., and Sarkar, A. (2008). "Characteristics of Turbulent Flow in Submerged Jumps on Rough Beds." *Journal of engineering mechanics*, 134(1), 49-59
27. Emiroglu, M. E., & Tuna, M. C. (2010). The effect of tailwater depth on the local scour downstream of stepped-chutes. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(5), 907-915.
28. Farhoudi, J., & Smith, K. V. (1982). Time scale for scour downstream of hydraulic jump. *Journal of the Hydraulics Division*, 108(10), 1147-1162.
29. Farhoudi, J., & Smith, K. V. (1985). Local scour profiles downstream of hydraulic jump. *Journal of hydraulic research*, 23(4), 343-358.
30. Farhoudi, J. (1979). Scaling relationships for local scour downstream of stilling basins (Doctoral dissertation, Southampton University).

31. Gaudio, R. and Marion, A., 2003, Time evolution of scouring downstream of bed sills, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 41, No. 3, pp. 271-284
32. Gamal, MM. Abdelazim, MN. Talaat, M.O and Marwa, SH. (2009), Effect of guidewall position on local scour downstream on stilling basins in trapezoidal channels, *Conference on Environmental Hydrology and 1st symp. On coastal and port Engineering*, 28-30 Sep, ASCE-ES, cairo
33. Hoffmans, G. J. C. M. and Verheij, H. J., 1997, *Scour manual*, Balkema, Rotterdam Hoffmans, G. J. (2017). *Scour manual*. Routledge.
34. Hassan, N.M. K. and Narayanan, R. (1985), "Local scour downstream of an apron." *J. Hydraul. Eng.* 111(11), 1371-1385.
35. Izadinia, E., Heydarpoor, M. 2014. Investigation and Comparison of Efficiency of Cable and Groove in Protection Against Scouring, *Irrigation Sciences and Engineering*, 37(1), pp. 23-32. (In Persian)
36. Kothyari, U. C., Garde, R. C. J., & Ranga Raju, K. G. (1992). Temporal variation of scour around circular bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(8), 1091-1106.
37. Kells, J. A. Balachandar, R. and Hagel, K. P. (2001), "Effect of grain size on local channel scour below a sluice gate." *Can. J. Civ. Eng.*, 28(3), 440-451
38. Laursen, E. M. (1952). Observations on the nature of scour. *Proceedings of 5th Hydraulic Conference.*, state University of Iowa. Bulletin, 34, 179-197.
39. Lim, S. Y., & Yu, G. (2002). Scouring downstream of sluice gate. In *First International Conference on Scour of Foundations* International Society of Soil Mech and Foundations.
40. Mason, P. J., & Arumugam, K. (1985). Free jet scour below dams and flip buckets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(2), 220-235.
41. Nik Hassan, N. M. K., & Narayanan, R. (1985). Local scour downstream of an apron. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(11), 1371-1384.
42. Rajaratnam, N., & Berry, B. (1977). Erosion by circular turbulent wall jets. *Journal of Hydraulic Research*, 15(3), 277-289.
43. Rajaratnam, N. (1981). Erosion by plane turbulent jets. *Journal of hydraulic Research*, 19(4), 339-358.
44. Rajaratnam, N., & Macdougall, R. K. (1983). Erosion by plane wall jets with minimum tailwater. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(7), 1061-1064.

45. Shahabi, M., Taleb Beydokhti, N., Dehghani, A.A., and Telvari, A.R. 2011. Experimental investigation of effect of contracted flow on scour in downstream of combined over weirs and through gates. 6th congress of Civil Engineering. Semnan University, Iran.
46. Tuna, M. C., & Emiroglu, M. E. (2011). Scour profiles at downstream of cascades. *Scientia Iranica*, 18(3), 338-347.
47. Rafiei, A. Kh. Ajdari and S. Emamgholizadeh. (2014). Effect of tail water depth on maximum scour depth at downstream of stepped weirs. 13th Iranian hydraulic conference. Tabriz. Iran
48. Uyumaz, A. (1988). Scour downstream of vertical gate. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(7), 811-816.
49. Valentin, F., (1967). Considerations concerning scour in the case of flow under gates, *Proceeding of 12th IAHR congress*, Vol. 3, 92-96

Abstract

Study of bed Scour Downstream of hydraulic structures considering to the imposed costs, has special importance. For this reason, it has always been a matter of interest to various researchers, and throughout the world researchers investigate this phenomenon and its control strategies. Among the hydraulic structures, sluice gates can be pointed out So that the scouring downstream of them in addition to financial costs, changes the morphology of bed , will lead to problems in the impoundment process in the downstream. Therefore, in the present research, an experimental study of scour dimensions, such as length and height of peaks on the downstream of sluice gate carried out. The laboratory flume had 5 m long, 0.09 m wide and 0.34 m height and it was sloping. The geometric and hydraulic parameters considered in the experiments were 3 slopes (0, 0.5 and 1%) with three roughness heights (0.75, 1.5 and 3 cm), roughness distances (0, 1.5 and 3 cm), and four rates (6.5, 5, 3.5, 2 m^3/hr). According to the obtained results, variations of the scour dimensions in the early times of the experiments were high and then decreased gradually with approaching the end of the experiment times. Also the dimensionless longitudinal profile of scouring increased so that for a constant opening as increasing the flow rate, the scour length increased so that the more opening of gate, the slope of length changes is less. The results also showed that with increasing the Froude number, the L_s/b (scour length to flume width ratio) increased and best performance in reduction of L_s/b was related to a roughness size of 1.5 cm, which reduced the L_s/b about 33%. Increasing the roughness size also increased the performance in controlling the L_s/b , for roughness size of 1.5 cm, reduced L_s/b about 75%. Also, with increasing w/b (opening to flume width ratio), the L_s/b also reduced which the range of its variations for roughness of 1.5 cm was in the range of 1 to 5. As increasing the slope (S)

the value of L_s/b for different roughness distances increased. Also results showed that, the range of L_s/b variations against S , for less gate opening was minimum. Also with increase of d/b for different openings, the value of L_s/b reduced, so that at the maximum opening of the gate, the value of L_s/b reduced about 37% relative to the flat bed. Also Variations of h_s/b (peak height to flume width ratio) was low for different models and was about 0.5. By increasing the gate opening, its fluctuations were less and with decreasing the opening, its fluctuations were more.

Keywords: Bed slope, Cylindrical roughness, Sediment, sluice gate, Scour



Shahrood University of Technology
Faculty of Agriculture
M.Sc. Thesis in Water Structures Engineering

***Experimental Investigation of scouring Downstream of Sluice
Gate with sinusoidal Bed***

By:

Marjan Pifloosh

Supervisors:

Dr. Samad Emamgholizadeh

Dr. Khalil Azhdari

Advisors:

Dr. Seyed Hossein Hosseini

Dr. Hossein Mirzaei Moghadam

March 2019