





دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده عمران

## بررسی آزمایشگاهی آب‌شستگی پایین‌دست سازه‌ی حذف پرش هیدرولیکی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران

سازه‌های هیدرولیکی

زهرة فخاری

استاد راهنما

دکتر عبدالرضا کبیری سامانی

زمستان

۱۳۹۳



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی عمران

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی عمران - سازه‌های هیدرولیکی  
خانم زهره فخاری

تحت عنوان

بررسی آزمایشگاهی آب‌شستگی در پایین‌دست سازه‌ی حذف پرش هیدرولیکی

در تاریخ ۱۳۹۳/۱۰/۲۷ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

امضاء  
امضاء  
امضاء  
امضاء  
امضاء

دکتر عبدالرضا کبیری سامانی

دکتر محمدرضا چمنی

دکتر عاطفه پرورش ریزی

دکتر محمد نوید مقیم

دکتر عبدالرضا کبیری سامانی

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه

۲- استاد مشاور پایان‌نامه

۳- استاد داور

۴- استاد داور

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

سپاس پروردگارم را که سرفرازانه پایان داد این نامه را ...

برگ حاضر از این نامه را مغتنم شمرده، از تمامی یاورانم قدردانی می‌نمایم. دستان مادرم و پدرم را به پاس هر آنچه که هستم می‌بوسم. می‌فشارم دستان خواهر و برادرم را و یاری‌های بی‌دریغشان را به یاد می‌آورم. سپاس فراوان می‌گویم اساتید دلسوز را، به ویژه استاد راهنمایم جناب آقای دکتر کبیری و استاد مشاورم جناب آقای دکتر چمنی که مشوقانه راهنما و راه‌گشایم بودند و بی‌دریغ حمایت کردند. از اساتید محترم، خانم دکتر پرورش و هم‌چنین جناب آقای دکتر مقیم که با بازخوانی این پایان‌نامه نکات ارزشمندی را یادآور شدند، سپاسگزارم. از مساعدت‌های آقای مهندس براتی و همیاری دوست عزیزم خانم مهندس منعمیان صمیمانه تشکر می‌کنم.

کلیدی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این  
پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان  
است.

تقدیم به پدر و مادرم

که از نگاهشان صلابت

از رفتارشان محبت

و از صبرشان ایستادگی را آموختم.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
هشت	فهرست مطالب
۱	چکیده.....
	<b>فصل اول</b>
۲	۱-۱ مقدمه.....
۳	۲-۱ آب شستگی.....
۳	۱-۲-۱ انواع آب شستگی.....
۵	۲-۲-۱ آب شستگی در جریان های فوق بحرانی و آشفته.....
۶	۳-۱ پرش هیدرولیکی.....
۷	۱-۳-۱ کاربردهای پرش هیدرولیکی.....
۷	۲-۳-۱ معایب پرش هیدرولیکی.....
۸	۴-۱ سازه‌ی تبدیل رژیم فوق بحرانی به زیر بحرانی بدون وقوع پرش هیدرولیکی.....
۱۰	۵-۱ ضرورت انجام و اهداف تحقیق حاضر.....
۱۰	۶-۱ ساختار پایان نامه.....
	<b>فصل دوم</b>
۱۱	۱-۲ مقدمه.....
۱۲	۲-۲ پدیده‌ی انتقال رسوب.....
۱۲	۱-۲-۲ اندازه رسوبات.....
۱۲	۲-۲-۲ توزیع اندازه ذرات.....
۱۲	۳-۲-۲ سرعت سقوط رسوب.....
۱۳	۴-۲-۲ آستانه حرکت رسوبات.....
۱۶	۳-۲ زمان تعادل.....
۱۷	۴-۲ تاریخچه‌ی آب شستگی.....
۱۷	۱-۴-۲ آب شستگی پایین دست سرریزها.....
۲۰	۲-۴-۲ آب شستگی پایین دست دریچه‌ها.....
۲۳	۳-۴-۲ تاریخچه آب شستگی پایین دست حوضچه‌های آرامش.....
۲۵	۴-۴-۲ آب شستگی پایین دست جت‌های غوطه‌ور.....
۲۶	۵-۲ تاریخچه‌ی مطالعاتی سازه‌ی تبدیل حذف پرش هیدرولیکی.....
۳۶	۶-۲ جمع‌بندی فصل و نوآوری پژوهش حاضر.....
	<b>فصل سوم</b>
۳۷	۱-۳ مقدمه.....
۳۸	۲-۳ آنالیز ابعادی.....

۳۹	تجهیزات آزمایشگاهی	۳-۳
۳۹	کانال آزمایشگاهی	۱-۳-۳
۴۱	تجهیزات آزمایش	۲-۳-۳
۴۴	آماده سازی شرایط آزمایش ها و بستر رسوبی	۴-۳
۴۷	نحوه ی انجام آزمایش ها	۵-۳
۴۸	اندازه گیری ها	۶-۳
۴۸	آزمایش های انجام شده	۷-۳
۴۹	آستانه حرکت	۸-۳
۵۰	جمع بندی فصل	۹-۳

#### فصل چهارم

۵۱	مقدمه	۱-۴
۵۲	بررسی آب شستگی در شرایط حذف پرش هیدرولیکی	۲-۴
۵۲	مشاهدات هیدرولیک جریان	۱-۲-۴
۵۵	مشاهدات آزمایشگاهی آب شستگی	۲-۲-۴
۵۹	توسعه ی زمانی چاله ی آب شستگی	۳-۲-۴
۶۴	آب شستگی در شرایط حذف پرش هیدرولیکی، گسترش آب شستگی و تشکیل چاله ثانویه	4-2-4
۶۸	تحلیل نتایج آب شستگی در شرایط حذف پرش هیدرولیکی	۵-۲-۴
۷۶	پروفیل های طولی آب شستگی در حالت تعادل	۶-۲-۴
۷۹	روابط تجربی برآورد حداکثر عمق چاله ی آب شستگی پایین دست سازه ی تبدیل	۷-۲-۴
۸۱	بررسی آب شستگی در شرایط وقوع پرش هیدرولیکی	۳-۴
۸۱	مشاهدات پرش هیدرولیکی	۱-۳-۴
۸۳	مقایسه و تحلیل نتایج آب شستگی در شرایط وقوع پرش هیدرولیکی	۲-۳-۴
۸۷	مقایسه نتایج آب شستگی در شرایط حذف پرش هیدرولیکی و مطالعات پیشین	۴-۴
۸۹	جمع بندی فصل	۵-۴

#### فصل پنجم

۹۱	مقدمه	۱-۵
۹۱	جمع بندی تحقیق	۲-۵
۹۲	نتیجه گیری های کلی	۳-۵
۹۴	پیشنهادها	۴-۵
۹۵	مراجع	



- شکل ۱-۱- تغییر مسیر خطوط جریان در اطراف پایه‌ی پل و افزایش آشفتگی ..... ۴
- شکل ۲-۱- تغییرات حفرة‌ی آب‌شستگی بر حسب زمان، [۵] ..... ۵
- شکل ۳-۱- وقوع پرش هیدرولیکی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی ..... ۶
- شکل ۴-۱- منحنی‌های عمق جریان در کانال منشوری ..... ۸
- شکل ۵-۱- منحنی‌های عمق جریان در کانال غیرمنشوری، [۷] ..... ۹
- شکل ۶-۱- وقوع پرش در کانال غیرمنشوری، [۷] ..... ۹
- شکل ۷-۱- تداخل منحنی‌های عمق جریان در کانال غیرمنشوری، [۷] ..... ۹
- شکل ۱-۲- نمودار آستانه حرکت ذرات رسوب، [۱۴] ..... ۱۵
- شکل ۲-۲- (الف) تشابه پروفیل‌های آب‌شستگی بی‌بعد برای ارتفاع‌های مختلف سرریز بسته به نوع مصالح بستر ( $h_d$ ) ارتفاع سرریز است) (ب) تشابه پروفیل‌های آب‌شستگی وابسته به زمان، [۲۸] ..... ۱۹
- شکل ۳-۲- شمایی از آزمایش‌های دی و سرکار، [۲۹] ..... ۲۲
- شکل ۴-۲- (الف) برهم‌نهی پروفیل‌های آب‌شستگی زمانی بی‌بعد در طول یک آزمایش (ب) برهم‌نهی پروفیل‌های آب‌شستگی تعادلی بی‌بعد در آزمایش‌های مختلف، [۲۹] ..... ۲۲
- شکل ۵-۲- تغییرات  $d_s$  با  $Fr_d$  برای مقادیر مختلف طول کف‌بند،  $y_1$  و  $d_{50}$ ، [۲۹] ..... ۲۳
- شکل ۶-۲- شکلی شماتیک از آب‌شستگی پایین‌دست پله‌ی مثبت واقع در پایین‌دست سرریز در حالت وقوع پرش هیدرولیکی مستغرق، [۳۰] ..... ۲۳
- شکل ۷-۲- توپوگرافی بستر شسته شده، [۳۰] ..... ۲۴
- شکل ۸-۲- پروفیل‌های بستر شسته شده در مقطع مجاور دیواره‌ی کانال در مختصات بی‌بعد، [۳۰] ..... ۲۴
- شکل ۹-۲- نمایی شماتیک از آزمایش‌های لوینت، [۳۹] ..... ۲۶
- شکل ۱۰-۲- مثال ارائه شده در کتاب چاو، [۶] ..... ۲۷
- شکل ۱۱-۲- انواع پروفیل‌های جریان در محدوده‌ی نقطه‌ی تکینه، [۶] ..... ۲۸
- شکل ۱۲-۲- توزیع سرعت متوسط در صفحه‌ی میانی قائم کانال،  $Fr_1 = 2/172$ ، [۷] ..... ۳۰
- شکل ۱۳-۲- توزیع سرعت متوسط در صفحه‌ی میانی قائم کانال،  $Fr_1 = 2/558$ ، [۷] ..... ۳۰
- شکل ۱۴-۲- خطوط جریان شکل گرفته بعد از تبدیل،  $Fr_1 = 2/558$ ، [۷] ..... ۳۱
- شکل ۱۵-۲- خطوط جریان شکل گرفته بعد از تبدیل،  $Fr_1 = 3/384$ ، [۷] ..... ۳۱
- شکل ۱۶-۲- توزیع  $(\sqrt{u'^2}/U_1)$  بعد از سازه‌ی تبدیل،  $Fr_1 = 2/251$ ، [۷] ..... ۳۲
- شکل ۱۷-۲- توزیع  $(\sqrt{u'^2}/U_1)$  بعد از سازه‌ی تبدیل،  $Fr_1 = 2/558$ ، [۷] ..... ۳۲

- شکل ۲-۱۸- تغییرات بیشینه‌ی متوسط شدت نوسانات آشفتگی بی بعد شده در جهت طولی بعد از سازه‌ی تبدیل، [۷] ۳۳
- شکل ۲-۱۹- توزیع  $(\sqrt{k}/U_1)$  بعد از سازه‌ی تبدیل،  $Fr_1 = 2/264$ ، [۷] ۳۴
- شکل ۲-۲۰- توزیع  $(\sqrt{k}/U_1)$  بعد از سازه‌ی تبدیل،  $Fr_1 = 2/558$ ، [۷] ۳۴
- شکل ۲-۲۱- تغییرات بیشینه‌ی انرژی آشفتگی بی بعد شده، در صفحه‌ی قائم میانی کانال، بعد از سازه‌ی تبدیل، [۷] ۳۴
- شکل ۲-۲۲- توزیع  $(-\rho u'v')/U_1^2$  بعد از سازه‌ی تبدیل،  $Fr_1 = 2/433$ ، [۷] ۳۵
- شکل ۲-۲۳- محدوده‌ی اعداد فرود مناسب جهت حذف پرش هیدرولیکی در تبدیل جریان فوق‌بحرانی به زیربحرانی، [۴۰] ۳۵
- شکل ۳-۱- نمای کلی از کانال تحقیقاتی ۳۹
- شکل ۳-۲- نمایی از یک دبی سنج الکترومغناطیسی ۴۰
- شکل ۳-۳- الف) مانیتور نمایش دهنده دبی (ب) شیر فلکه‌ی تنظیم دبی ۴۰
- شکل ۳-۴- الف) دریچه ابتدایی کانال در حالت باز. (ب) ورق‌های منحنی هدایت‌گر جریان ورودی ۴۱
- شکل ۳-۵- نمای کلی از کالورت ۴۱
- شکل ۳-۶- سازه‌ی تبدیل حذف پرش هیدرولیکی ۴۲
- شکل ۳-۷- عمق سنج مورد استفاده الف) در ۸ آزمایش اول (ب) در آزمایش‌های بعدی ۴۳
- شکل ۳-۸- منحنی دانه‌بندی رسوبات بستر ۴۴
- شکل ۳-۹- نمایی از کالورت، سازه‌ی حذف پرش و بستر رسوبی آماده‌سازی شده ۴۶
- شکل ۳-۱۰- شکل شماتیک کانال و تجهیزات؛ الف) پلان، (ب) نمای جانبی ۴۶
- شکل ۳-۱۱- بالا آوردن ارتفاع آب تا ۸۰ میلی‌متر بالاتر از سطح بستر قبل از روشن کردن پمپ ۴۷
- شکل ۴-۱- شکل شماتیک از عبور جریان از روی سازه‌ی تبدیل ۵۲
- شکل ۴-۲- سطح آزاد جریان در حذف کامل پرش هیدرولیکی ۵۳
- شکل ۴-۳- سطوح فوق‌بحرانی و زیربحرانی تئوریک شکل گرفته در اثر عبور جریان از روی تبدیل، آزمایش E10 ۵۴
- شکل ۴-۴- پروفیل سطح جریان تئوریک شکل گرفته بر روی تبدیل، آزمایش E10 ۵۴
- شکل ۴-۵- سطوح فوق‌بحرانی و زیربحرانی تئوریک شکل گرفته در اثر عبور جریان از روی تبدیل، آزمایش E11 ۵۵
- شکل ۴-۶- پروفیل سطح جریان تئوریک شکل گرفته بر روی تبدیل، آزمایش E11 ۵۵
- شکل ۴-۷- شکل شماتیک از تغییرات بستر رسوبی در طول انجام آزمایش الف) تشکیل چاله‌های متقارن در طرفین بستر در ابتدای آزمایش. (ب) گسترش عرضی چاله ۵۷
- شکل ۴-۸- تغییرات حداکثر عمق آب‌شستگی با گذشت زمان در آزمایش E14 ۶۰

- شکل ۹-۴- تغییرات حداکثر عمق آب شستگی با گذشت زمان در آزمایش‌های مختلف ..... ۶۲
- شکل ۱۰-۴- پروفیل‌های طولی آب شستگی در زمان‌های مختلف در آزمایش (E2) ..... ۶۲
- شکل ۱۱-۴- پروفیل‌های طولی بی‌بعد آب شستگی در زمان‌های مختلف در آزمایش (E2) ..... ۶۳
- شکل ۱۲-۴- پروفیل‌های طولی آب شستگی در زمان‌های مختلف در آزمایش (E7) ..... ۶۳
- شکل ۱۳-۴- پروفیل‌های طولی بی‌بعد آب شستگی در زمان‌های مختلف در آزمایش (E7) ..... ۶۳
- شکل ۱۴-۴- پروفیل بی‌بعد آب شستگی در زمان‌های مختلف در آزمایش (E14) ..... ۶۴
- شکل ۱۵-۴- پروفیل بی‌بعد آب شستگی در زمان‌های مختلف در آزمایش (E14) ..... ۶۴
- شکل ۱۶-۴- دستگاه مختصات استفاده شده در برداشت نقاط بستر ..... ۶۵
- شکل ۱۷-۴- توپوگرافی نسبتاً متقارن بستر تعادلی (E14) ..... ۶۶
- شکل ۱۸-۴- توپوگرافی بستر تعادلی در آزمایش (E5) ..... ۶۷
- شکل ۱۹-۴- توپوگرافی بستر تعادلی در آزمایش (E6) ..... ۶۷
- شکل ۲۰-۴- تصویر چاله آب شستگی ثانویه ..... ۶۷
- شکل ۲۱-۴- تغییرات طول چاله‌ی آب شستگی بی‌بعد شده در مقابل سرعت اولیه‌ی بی‌بعد جریان ..... ۶۹
- شکل ۲۲-۴- تغییرات سرعت جریان پایین دست تبدیل در مقابل سرعت اولیه‌ی بی‌بعد جریان ..... ۷۰
- شکل ۲۳-۴- تغییرات عمق پایاب بی‌بعد در مقابل سرعت اولیه‌ی بی‌بعد جریان ..... ۷۱
- شکل ۲۴-۴- تغییرات حداکثر عمق آب شستگی بی‌بعد شده در مقابل سرعت اولیه‌ی بی‌بعد جریان ..... ۷۱
- شکل ۲۵-۴- تغییرات حداکثر طول چاله‌ی آب شستگی بی‌بعد در مقابل سرعت اولیه‌ی بی‌بعد جریان ..... ۷۲
- شکل ۲۶-۴- افزایش آشفتگی محل تغییر رژیم جریان با افزایش عدد فرود اولیه‌ی جریان ..... ۷۲
- شکل ۲۷-۴- تغییرات حداکثر ارتفاع تل ماسه بی‌بعد شده در مقابل سرعت اولیه‌ی بی‌بعد جریان ..... ۷۳
- شکل ۲۸-۴- تغییرات حجم رسوب شسته شده‌ی بی‌بعد شده در مقابل سرعت اولیه‌ی بی‌بعد جریان ..... ۷۳
- شکل ۲۹-۴- تغییرات حداکثر عمق آب شستگی بی‌بعد در مقابل عدد فرود چگالی ذرات ..... ۷۵
- شکل ۳۰-۴- تغییرات طول چاله‌ی آب شستگی بی‌بعد در مقابل عدد فرود چگالی ذرات ..... ۷۵
- شکل ۳۱-۴- تغییرات حداکثر ارتفاع تلماسه‌ی بی‌بعد شده در مقابل عدد فرود چگالی ذرات ..... ۷۶
- شکل ۳۲-۴- پروفیل‌های آب شستگی تعادلی،  $y_1/B = 0/132$  برای اعداد فرود مختلف ..... ۷۷
- شکل ۳۳-۴- پروفیل‌های آب شستگی تعادلی بی‌بعد،  $y_1/B = 0/132$  در اعداد فرود مختلف ..... ۷۷
- شکل ۳۴-۴- پروفیل‌های آب شستگی تعادلی،  $y_1/B = 0/165$  در اعداد فرود مختلف ..... ۷۷
- شکل ۳۵-۴- پروفیل‌های آب شستگی تعادلی بی‌بعد،  $y_1/B = 0/165$  در اعداد فرود مختلف ..... ۷۸
- شکل ۳۶-۴- پروفیل‌های آب شستگی تعادلی،  $y_1/B = 0/188$  در اعداد فرود مختلف ..... ۷۸
- شکل ۳۷-۴- پروفیل‌های آب شستگی تعادلی بی‌بعد،  $y_1/B = 0/188$  در اعداد فرود مختلف ..... ۷۸
- شکل ۳۸-۴- پروفیل‌های آب شستگی تعادلی بی‌بعد به ازای مقادیر  $y_1/B$  و اعداد فرود مختلف ..... ۷۹
- شکل ۳۹-۴- مقایسه‌ی مقادیر محاسباتی و آزمایشگاهی حداکثر عمق آب شستگی بی‌بعد شده ..... ۸۰

- شکل ۴-۴۰- مقایسه‌ی افت انرژی در حالت وقوع و حذف پرش هیدرولیکی ..... ۸۲
- شکل ۴-۴۱- سطح آب نوسانی در پایین دست سازه‌ی حذف پرش هیدرولیکی ..... ۸۳
- شکل ۴-۴۲- سطح آب یکنواخت در پایین دست پرش هیدرولیکی ..... ۸۳
- شکل ۴-۴۳- توزیع جذر میانگین مربعات نوسانات سرعت در جهت (الف) طولی و (ب) قائم و (ج) توزیع مقدار انرژی آشفتگی و (د) توزیع تنش برشی رینولدز در پرش هیدرولیکی با عدد فرود اولیه‌ی ۱/۱۹ ارائه شده توسط میسرا و همکاران (۲۰۰۸). ( $h_0$  عمق اولیه‌ی جریان است) ..... ۸۵
- شکل ۴-۴۴- مقایسه‌ی توسعه‌ی زمانی بی‌بعد آب‌شستگی در حالت وقوع و حذف پرش هیدرولیکی ..... ۸۶
- شکل ۴-۴۵- مقایسه‌ی توسعه‌ی زمانی بی‌بعد آب‌شستگی در حالت وقوع و حذف پرش هیدرولیکی ..... ۸۶
- شکل ۴-۴۶- توپوگرافی بستر تعادلی در آزمایش E15 در شرایط وقوع پرش هیدرولیکی ..... ۸۷
- شکل ۴-۴۷- توپوگرافی بستر تعادلی در آزمایش E14 در شرایط حذف پرش هیدرولیکی ..... ۸۷
- شکل ۴-۴۸- مقایسه حداکثر عمق آب‌شستگی بی‌بعد در تحقیق حاضر و دیگر محققان ..... ۸۸
- شکل ۴-۴۹- مقایسه نتایج تحقیق حاضر و نتایج دی و سرکار [۲۹] ..... ۸۸
- شکل ۴-۵۰- مقایسه نتایج تحقیق حاضر و نتایج چيو و ليم [۳۸] ..... ۸۹

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۲۹	جدول ۱-۲- مشخصات مدل‌های ساخته شده و مقادیر پارامترهای مربوط به آنها
۳۰	جدول ۲-۲- برداشت‌های انجام شده در آزمایش‌های نادری [۷]
۴۲	جدول ۱-۳- مشخصات طراحی سازه‌ی تبدیل
۴۴	جدول ۲-۳- محاسبات مربوط به انتخاب قطر ذره‌ی رسوب
۴۹	جدول ۳-۳- مشخصات هیدرولیکی آزمایش‌های انجام شده
۵۰	جدول ۴-۳- برآورد تجربی نسبت در برخی از آزمایش‌های تحقیق حاضر
۵۸	جدول ۱-۴- داده‌های مربوط به آزمایش‌های انجام شده در شرایط حذف پرش هیدرولیکی
۸۱	جدول ۲-۴- داده‌های آزمایش‌های انجام شده در شرایط وقوع پرش هیدرولیکی

## فهرست علامتها

<u>علامت</u>	<u>توضیح</u>
$B$	عرض کانال
$B_0$	ضخامت جت (بازشدگی دریچه‌ی خروج جت)
$d$	قطر ذره رسوب
$d_{16}$	قطر رسوبی که قطر ۱۶ درصد از ذرات رسوب کوچک‌تر از آن است.
$d_{50}$	قطر متوسط ذرات رسوب
$d_{84}$	قطر رسوبی که قطر ۸۴ درصد از ذرات رسوب از آن کوچک‌تر است.
$d_s$	حداکثر عمق آب شستگی لحظه‌ای
$d_{se}$	عمق آب شستگی در فواصل مکانی مختلف در زمان تعادل چاله
$d_{smax}$	حداکثر عمق آب شستگی در زمان تعادل چاله‌ی آب شستگی
$d_{st}$	عمق آب شستگی در فواصل مختلف زمانی و مکانی
$\hat{d}$	قطر رسوب بی‌بعد
$\hat{d}_s$	حداکثر عمق آب شستگی تعادلی بی‌بعد
$d_*$	قطر بی‌بعد ذره
$F_1$	خط متناسب با عمق نرمال
$F_2$	خط فرضی متناسب با عمق بحرانی
$f_i$	نام تابع
$f(x)$	مقادیر اندازه‌گیری شده
$F(x)$	مقادیر تخمینی

## فهرست علامتها

### علامت

### توضیح

$\bar{f}$	متوسط مقادیر اندازه گیری شده
$F_c$	حاصل تقسیم سرعت جریان بر جذر حاصل ضرب وزن مخصوص مستغرق رسوب، شتاب گرانش زمین و عمق بحرانی
$Fr_1$	عدد فرود اولیه ی جریان
$Fr_{1d}$	عدد فرود اولیه ی جریان در طراحی سازه ی تبدیل
$Fr_d$	عدد فرود چگالی ذرات
$Fr_j$	عدد فرود اولیه ی پرش هیدرولیکی
$G$	نسبت چگالی رسوب به چگالی سیال
$g$	شتاب گرانش زمین
$H_v$	
$H_r$	پروفیل سطح آب در بستر با شیب صفر در حدفاصل جریان فوق-بحرانی و بحرانی
$h_0$	هد مؤثر در جریان سرریز
$h_d$	حداکثر ارتفاع تل ماسه
$K$	انرژی جنبشی آشفتگی بی بعد
$k$	انرژی جنبشی آشفتگی
$k_m$	بیشینه ی انرژی جنبشی آشفتگی
$k_s$	زبری معادل ماسه ی نیکورادزه
$L$	حداکثر طول لحظه ای چاله ی آب شستگی
$L_{hd}$	فاصله ی محل وقوع حداکثر ارتفاع تل ماسه از انتهای سازه ی تبدیل
$L_{hmax}$	فاصله ی محل حداکثر ارتفاع سازه ی تبدیل از ابتدای سازه ی تبدیل

## فهرست علامتها

### علامت

### توضیح

$L_{opt}$	طول بهینه‌ی سازه‌ی تبدیل
$L_s$	فاصله‌ی حداکثر عمق لحظه‌ای آب‌شستگی از انتهای سازه‌ی تبدیل
$L_{smax}$	فاصله‌ی حداکثر عمق چاله‌ی آب‌شستگی تعادلی از انتهای سازه‌ی تبدیل
$L_t$	فاصله‌ی انتهای چاله‌ی آب‌شستگی از انتهای سازه‌ی تبدیل
$L_{td}$	فاصله‌ی انتهای تل‌ماسه‌ی پایین‌دست از انتهای سازه‌ی تبدیل
$\hat{I}$	طول کف‌بند بی‌بعد
$Q$	دبی جریان
$Q_c$	دبی جریان در حالت برقراری عمق بحرانی
$Q_n$	دبی جریان در حالت برقراری عمق نرمال
$R_c$	حاصل تقسیم لزجت سینماتیکی سیال بر حاصل ضرب سرعت اولیه‌ی جریان و عمق بحرانی
$R_s$	تنش برشی رینولدز
$Re^*$	رینولدز برشی
$s$	ارتفاع آبیایه‌ی انتهای حوضچه‌ی آرامش
$S_0$	شیب کف کانال
$t$	زمان
$T_e$	زمان تعادل چاله‌ی آب‌شستگی
$U$	سرعت جریان
$U_l$	سرعت جریان خروجی از کالورت



## فهرست علامتها

### علامت

### توضیح

$U_2$	سرعت جریان در پایین دست سازه ی تبدیل
$U_c$	متوسط سرعت جریان در شرایط آستانه حرکت ذرات
$U_{rms}$	متوسط نوسانات آشفتگی طولی بی بعد
$u'$	نوسانات سرعت در جهت X
$u_*$	سرعت برشی بحرانی
$V$	حجم رسوبات شسته شده
$V_{rms}$	متوسط نوسانات آشفتگی قائم بی بعد
$v'$	نوسانات سرعت در جهت Y
$W_{rms}$	متوسط نوسانات آشفتگی عرضی بی بعد
$w_s$	سرعت سقوط ذره رسوب
$w'$	نوسانات سرعت در جهت Z
$X$	فاصله از انتهای سازه ی تبدیل در جهت طول کانال
$y$	عمق جریان
$Y$	فاصله در جهت عرض کانال
$y_1$	عمق اولیه ی جریان
$y_{1d}$	عمق اولیه ی جریان در طراحی سازه ی تبدیل
$y_2$	عمق جریان در ابتدای بازه ی رسوبی
$y_{2d}$	عمق جریان در انتهای بازه ی رسوبی

## فهرست علامتها

### علامت

### توضیح

$y_{2opt}$	عمق بهینه جریان پایین دست در طراحی سازه‌ی تبدیل
$y_{2r}$	عمق رژیم در جریان‌های دوبعدی
$y_c$	عمق بحرانی جریان
$y_j$	عمق جریان در ابتدای پرش هیدرولیکی
$y_n$	عمق نرمال جریان
$\hat{y}$	عمق جریان بی بعد
$\nu$	لزجت سینماتیکی
$\gamma$	وزن مخصوص سیال
$\gamma_s$	وزن مخصوص ذرات رسوب
$\rho$	چگالی سیال
$\rho_s$	چگالی ذرات رسوب
$\tau$	تنش برشی وارده از طرف سیال به ذرات رسوب
$\tau_c$	تنش برشی در شرایط آستانه حرکت ذرات رسوب
$\mu$	لزجت دینامیکی
$\sigma_g$	انحراف معیار هندسی رسوبات
$\theta_c$	پارامتر شیلدز بحرانی
$\Delta$	وزن مخصوص مستغرق رسوب
$\Delta E$	افت انرژی

## چکیده

در مسائل هیدرولیکی فرسایش بستر یکی از مهم ترین عوامل مخرب به شمار می رود و کنترل آن در طراحی ها همواره مدنظر است. جریان پایین دست سازه های هیدرولیکی مانند کالورت ها، دریچه ها و سرریزها با عبور از بستر رسوبی و فرسایش بستر در نزدیکی سازه، در بلند مدت موجب ناپایداری سازه می شود. از این رو محققین جهت طراحی هر چه بهتر سازه های هیدرولیکی به مدل سازی و بررسی آزمایشگاهی پدیده ی آب شستگی پرداخته اند. در این راستا در تحقیق حاضر به مدل سازی آزمایشگاهی، آب شستگی پایین دست سازه ی حذف پرش هیدرولیکی پرداخته شده است. بدین منظور یک سازه ی تبدیل جریان فوق بحرانی به زیر بحرانی بدون وقوع پرش هیدرولیکی در مسیر جریان نصب شده و در شرایط هیدرولیکی مختلف، آب شستگی پایین دست این سازه مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایش ها در کانالی به طول ۹/۵ و عرض ۰/۴ متر بر روی بستری از رسوبات یکنواخت شنی انجام شده اند. ۱۴ آزمایش در شرایط حذف پرش هیدرولیکی در سه عمق اولیه ی متفاوت و به ازای اعداد فرود مختلف در محدوده ی ۲/۰۵ تا ۲/۸۵ انجام شدند. محدوده ی اعداد فرود مورد بررسی بر اساس نتایج مطالعات پیشین انجام شده در زمینه ی حذف پرش هیدرولیکی انتخاب شد. علاوه بر آن دو آزمایش در شرایط وقوع پرش هیدرولیکی انجام شد. نتایج آزمایش ها نشان داد که در هر دو حالت وقوع و حذف پرش هیدرولیکی، بستر به صورت متقارن شسته می شود و حداکثر عمق آب شستگی در مجاورت دیواره ها اتفاق می افتد. در شرایط حذف پرش هیدرولیکی افزایش سرعت اولیه، عمق اولیه جریان و هم چنین عدد فرود چگالی ذرات منجر به افزایش ابعاد چاله ی آب شستگی از جمله حداکثر عمق، حداکثر طول چاله و نیز حداکثر ارتفاع تل ماسه می شود. در ادامه بر اساس پارامترهای هیدرولیکی و رسوبی مؤثر بر حداکثر عمق چاله ی آب شستگی روابطی تجربی به منظور برآورد حداکثر عمق و طول چاله ی آب شستگی در حالت حذف پرش هیدرولیکی استخراج شد. با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش های انجام شده و هم چنین مطالعات پیشین در زمینه آب شستگی پایین دست پرش هیدرولیکی، آب شستگی در حالت وقوع و حذف پرش هیدرولیکی مقایسه شد. نتایج تحلیل های مربوطه نشان داد که علی رغم مشابه بودن سازوکار و روند تغییرات زمانی آب شستگی در دو حالت وقوع و حذف پرش، قدرت فرسایش جریان در حالت حذف پرش هیدرولیکی به طور قابل ملاحظه ای کم تر از حالت وقوع پرش است، اما با افزایش عدد فرود قدرت فرسایش جریان در حالت حذف و وقوع پرش به یک دیگر نزدیک می شود.

**کلمات کلیدی:** پرش هیدرولیکی، سازه ی حذف پرش هیدرولیکی، آب شستگی و آشفستگی جریان

## فصل اول

### مقدمه

#### ۱-۱ مقدمه

از آنجا که حیات همه‌ی موجودات زنده متأثر از منابع آبی است، شناخت طبیعت و قوانین رفتاری آب، امکان مدیریت منابع آبی را برای انسان فراهم آورده است. مدیریت منابع آبی در رسیدن به اهداف خود به سازه‌ها و تجهیزاتی به منظور فعالیت‌هایی از قبیل ذخیره، انتقال و استفاده از انرژی آب نیازمند است. طراحی مطلوب این سازه‌ها و تجهیزات، منوط به شناخت هرچه بیش‌تر پدیده‌های هیدرولیکی است که در اثر اندرکنش سازه‌ها و آب اتفاق می‌افتند. البته تاکنون مطالعات زیادی نیز در این زمینه صورت گرفته است. در همین راستا در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی پدیده‌های منتج از احداث سازه‌ای خاص در مسیر جریان پرداخته می‌شود.

در پایین دست برخی از سازه‌های هیدرولیکی رژیم جریان فوق‌بحرانی است. جریان فوق‌بحرانی، معمولاً به صورت طبیعی و یا با برقراری شرایطی مصنوعی، در طی پدیده‌ای موسوم به پرش هیدرولیکی، به رژیم زیربحرانی تبدیل می‌شود. در سال ۱۳۸۹ رییعی سازه‌ی تبدیلی را پیشنهاد کرد که با افزایش تدریجی تراز بستر امکان این تغییر رژیم را بدون وقوع پرش هیدرولیکی به وجود می‌آورد [۱]. در صورت قرارگیری این سازه در مسیر جریانی با بستر رسوبی، انرژی جریان عبوری از این تبدیل صلب، در برخورد با بستر غیر صلب، سبب فرسایش بستر می‌شود. از آنجا که در طراحی ایمن سازه‌های هیدرولیکی، پیش‌بینی حداکثر عمق آب‌شستگی امری ضروری است، بررسی آب‌شستگی در پایین دست سازه‌ی تبدیلی جریان فوق‌بحرانی به زیربحرانی بدون وقوع پرش هیدرولیکی، موضوعی است که در این تحقیق به صورت آزمایشگاهی مطالعه شده است.