بسم اللّه الرحمن الرحيم

دانشگاه تهران

دانشکده فنی

بررسی تاثیر هندسه و ابعاد روزنه بر آبشستگی پایین دست جت‌های ریزشی با استفاده از مدل‌های فیزیکی

نگارش:

هدی حدیدی

اساتید راهنما:

دکتر مجتبی صانعی

دکتر محمد علی بنی هاشمی

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در

رشته سازه‌های هیدرولیکی

شهریور ۱۳۸۷

تقدیم به پدر و مادر

دلسوز و مهربانم

چکیده

بررسی پدیده آبشستگی موضعی ناشی از جت‌های ریزشی، در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی، به منظور جلوگیری از فرسایش شدید حاصل از آن و به خطر انداختن ایمنی سازه، امری مهم و ضروری می‌باشد. در این پایان‌نامه، نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی درباره تأثیر شکل روزنه بر ابعاد آبشستگی موضعی پایین‌دست جتهای ریزشی، ارائه می‌شود. جت آب که از روزنه‌هایی با مقاطع دایره‌ای، مربعی و لوزی شکل، با مساحت‌های یکسان و دبی‌های مختلف در محدوده ۲/۴۶ تا ۴/۸ لیتر بر ثانیه، از ارتفاع ۲۹ سانتیمتری، بر روی بستری از جنس شن با d_{50} برابر سه میلیمتر، با عمق‌های پایاب متفاوت در محدوده ۱۰ تا ۲۴/۸ سانتیمتر، به مدت ۶۰ دقیقه ریزش می‌کرد، مدل‌سازی شد. ابعاد حفره آبشستگی اندازه‌گیری شدند و مورد تحلیل قرار گرفتند. مشخص شد که حداکثر عمق آبشستگی، با افزایش عمق پایاب تا حد معینی، افزایش یافته، و پس از آن با افزایش بیشتر عمق پایاب، کاهش می‌یابد. افزایش دبی در عمق پایاب ثابت نیز، افزایش ابعاد آبشستگی را موجب شده است. هم‌چنین مشاهده شد که، ابعاد حفره آبشستگی ایجاد شده توسط جت‌های ریزشی در شرایط یکسان، برای روزنه دایره‌ای شکل بیشتر از مربع شکل و برای روزنه مربع شکل بیش از روزنه لوزی شکل می‌باشد. مشخص شد که، ابعاد حفره آبشستگی با پارامترهای بی بعد $\frac{Tw+ds}{\Delta h}$ و $\frac{v_0}{\sqrt{g\cdot\Delta h}}\cdot\frac{Tw}{R_H}$ که در آنها V_0 سرعت جریان در مقطع روزنه، R_H شعاع هیدرولیکی ، Tw عمق پایاب، Δh ارتفاع ریزش جت از مرکز روزنه تا سطح پایاب و d_s حداکثر عمق آبشستگی می‌باشد، رابطه توانی دارند. درنهایت، روابط بی بعدی برای برآورد ابعاد آبشستگی برای دبی‌ها و عمق‌های پایاب مختلف، برای هر سه روزنه پیشنهاد شده است.

پیشگفتار

بحث آبشستگی هرچند قدمتی طولانی در علم هیدرولیک دارد، لیکن به دلیل شرایط و پیچیدگی‌های خاص آن و هم‌چنین به دلیل نبودن رابطه‌ای قوی که بتواند پاسخگوی تمامی شرایط باشد هم‌چنان مورد توجه خاص محققین علم هیدرولیک و مهندسی رودخانه است.

سازه‌های هیدرولیکی که به صورت مانعی در برابر جریان قرار می‌گیرند، الگوی جریان در نزدیکی خود را تغییر می‌دهند و به صورت موضعی باعث فرسایش در این منطقه می‌شوند. اهمیت بررسی پدیده آبشستگی زمانی آشکار می‌شود که عمق آبشستگی قابل ملاحظه باشد، به طوری‌که این عمق به پی سازه‌های رودخانه‌ای برسد و پایداری این سازه‌ها را در معرض خطر قرار دهد یا موجب تخریب آنها می‌شود.

آبشستگی موضعی پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی نظیر سرریزها، شوت‌ها، دریچه‌ها و ... پدیده‌ای است که به دلیل وجود سرعت محلی بیش از سرعت بحرانی(سرعت آستانه حرکت ذرات بستر) به وجود می‌آید.

تخمین میزان عمق آبشستگی از این رو اهمیت دارد که این پدیده ممکن است باعث تخریب سازه شود. یک فرمول عمومی که بتواند برای تعیین میزان عمق فرسایش در هر یک از حالات مورد استفاده قرار گیرد، وجود ندارد. لذا روشی که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرد، به کارگیری روابط آزمایشگاهی و یا استفاده از مدل‌های فیزیکی می‌باشد. برای مقابله با پدیده آبشستگی موضعی، ابتدا باید پدیده آبشستگی موضعی و مکانیزم حاکم بر آن شناخته شود تا بتوان حداکثر عمق آبشستگی را محاسبه کرده و در جهت حذف یا کاهش آن، در طراحی‌ها پیش‌بینی لازم را انجام داد.

مقدار آبشستگی در اطراف سازه‌های واقع در مسیر جریان و سرعت توسعه آبشستگی به موقعیت و هندسه سازه، شرایط هیدرولیکی جریان در محدوده سازه و مشخصات مصالح بستر در نزدیکی سازه و بازه بالادست آن بستگی دارد. عوامل مؤثر در ایجاد آبشستگی با درجه بالایی از عدم قطعیت یا دشواری پیش‌بینی‌های طولانی مدت مواجه هستند. اغلب اطلاعات موجود درباره سیلاب طراحی محدود است. هم‌چنین در خلال عمر یک سازه شرایط جریان با تغییر در کاربری حوضه یا شرایط آب و هوایی ممکن است تغییر نماید.

پیش‌بینی دقیق پاسخ آبراهه‌های طبیعی به فرسایش در سیلاب‌های کوتاه‌مدت و طولانی مدت نیز بسیار مشکل است. بخشی از این مشکل به علت درک نادرست و ناقص از فرآیندهای فیزیکی مؤثر بر پدیده است و بخش دیگر ناشی از اتفاقی بودن پدیده‌های مؤثر بر آبشستگی است. بنابراین معمولاً نمی‌توان درصد ریسک تعیین عمق آبشستگی و خسارت‌های وارد شده به سازه ناشی از آبشستگی را با دقت کافی تعیین کرد.

در این پایان‌نامه نیز بررسی پدیده آبشستگی موضعی در پایین‌دست جت‌های ریزشی با استفاده از مدل آزمایشگاهی صورت گرفته است. مطالعات و بررسی‌های انجام شده، در شش فصل، به شرح زیر ارائه شده است.

فصل اول، شامل کلیات موضوع مورد نظر و لزوم بررسی آن می‌باشد. در فصل دوم، تعاریف و تقسیم‌بندی دقیق‌تر آبشستگی از جنبه‌های مختلف ، و نیز نتایج مطالعات انجام شده در زمینه آبشستگی توسط محققین متعدد، آمده است. در فصل سوم، روش تحقیق استفاده شده در این پایان‌نامه و نیز عوامل مؤثری که مورد بررسی قرار گرفته‌اند، ذکر شده‌اند. کلیه تجهیزات آزمایشگاهی و شرح انجام آزمایش‌ها، به صورت دقیق و جامع در فصل چهارم آورده شده است. در فصل پنجم، روند تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی و نتایج بدست آمده حاصل از آن، بیان شده است. در فصل ششم، خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده و پیشنهاداتی برای مطالعات آتی، ارائه شده است.

تقدیر و تشکر

با سپاس و قدردانی از راهنمایی‌ها و زحمات بی‌شائبه استاد محترم، جناب آقای دکتر صانعی و هم‌چنین با قدردانی از استاد ارجمند، جناب آقای دکتر بنی هاشمی که با راهنمایی‌های خود، در انجام این پایان‌نامه به اینجانب یاری رساندند. با تشکر از همکاری مسئولین و کارمندان محترم مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، که امکانات مورد نیاز برای انجام آزمایش‌های این پایان‌نامه را در اختیار قرار دادند.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول:کلیات	
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- تعریف مسئله مورد بررسی	۳
۱-۳- هدف از انجام پایان‌نامه	۴
فصل دوم: مروری بر مطالعات انجام شده	
۲-۱- مقدمه	۶
۲-۲- انواع آبشستگی	۶
۲-۳- مراحل توسعه آبشستگی	۸
۲-۴- آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی	۹
۲-۴-۱- روابط آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی مایل	۱۰
۲-۴-۲- مقایسه روابط ارائه شده	۱۶
۲-۵- خلاصه‌ای از آزمایش‌های انجام شده	۱۷
فصل سوم: روش تحقیق و تحلیل ابعادی	
۳-۱- مقدمه	۲۱
۳-۲- روش تحقیق	۲۱
۳-۲-۱- پارامترهای مؤثر بر پدیده	۲۱
۳-۲-۲- آنالیز ابعادی	۲۲

فصل چهارم: تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش‌ها

۴-۱- مقدمه ۲۵

۴-۲- تجهیزات آزمایشگاهی ۲۵

۴-۳- تأمین ارتفاع آب پشت روزنه ۲۶

۴-۴- تأمین عمق پایاب ۲۷

۴-۵- اندازه‌گیری دبی جریان ۲۷

۴-۶- دستگاه ژرفاسنج نقطه‌ای (شاخص مدرج) ۲۸

۴-۷- مصالح استفاده شده برای بستر ۲۸

۴-۸- تعیین مدت زمان انجام آزمایش ۲۹

۴-۹-شرح انجام آزمایش‌ها ۲۹

۴-۱۰- پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه ۳۰

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی

۵-۱- مقدمه ۳۶

۵-۲- تأثیر عمق پایاب بر حداکثر عمق آبشستگی ۳۶

۵-۳- تأثیر عمق پایاب بر ضریب حوزه حفره آبشستگی ۴۶

۵-۴- تأثیر دبی بر ابعاد حفره آبشستگی ۵۰

۵-۴-۱- حداکثر عمق حفره آبشستگی ۵۰

۵-۴-۲- حداکثر عرض حفره آبشستگی ۵۶

۵-۴-۳- حداکثر طول حفره آبشستگی ۶۱

۵-۴-۴- حداکثر ارتفاع برآمدگی رسوبات پایین دست حفره آبشستگی ۶۱

۵-۴- ۵- فاصله محل شروع حفره آبشستگی تا روزنه ۶۲

۵-۴-۶- حجم کنده شده حفره آبشستگی ۶۲
۵-۵- تأثیر شکل روزنه بر ابعاد حفره آبشستگی ۶۵
۵-۶- مقایسه نتایج آزمایش‌های دو روزنه دایره‌ای بزرگ و کوچک ۷۲
۵-۷- تأثیر ارتفاع ریزش بر ابعاد حفره آبشستگی ۷۴
۵-۸- ارائه رابطه برای ابعاد حفره آبشستگی ۷۴
۵-۸-۱- رابطه حجم حفره آبشستگی با ابعاد آن ۷۴
۵-۸-۲- روابط بدون بعد حجم حفره آبشستگی با پارامترهای مؤثر ۷۷
۵-۸-۳- روابط برای حداکثر عمق حفره آبشستگی ۷۹
۵-۸-۴- روابط برای حداکثر عرض حفره آبشستگی ۸۲
۵-۸-۵- روابط برای حداکثر طول حفره آبشستگی ۸۴
۵-۸-۶- روابط برای حداکثر ارتفاع برآمدگی رسوبات پایین‌دست حفره آبشستگی ۸۶
۵-۸-۷- روابط برای فاصله افقی حداکثر برآمدگی رسوبات پایین‌دست حفره تا انتها ۸۸
۵-۸-۸- روابط برای فاصله افقی محل شروع آبشستگی تا روزنه ۹۰
۵-۹- ضرایب آبگذری روزنه‌ها ۹۳
۵-۱۰- مقایسه نتایج با روابط ارائه شده قبلی ۹۴

فصل ششم: نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاد

۶-۱- مقدمه ۱۰۴
۶-۲- نتیجه‌گیری ۱۰۴
۶-۳- ارائه پیشنهادات برای مطالعات آتی ۱۰۶

منابع و مراجع ۱۰۹

فهرست جداول

شماره و عنوان جدول **صفحه**

فصل دوم

۲-۱- مقادیر مختلف ضرایب ثابت موجود در گروه اول ۱۱

۲-۲- ضرایب معادله(۲-۵) ۱۳

۲-۳- مقادیر d,c,b,a در معادله (۲-۶) ۱۳

۲-۴- مقادیر d,c,b,a در معادله (۲-۷) ۱۴

۲-۵- مقادیر d,c,b,a در معادله (۲-۱۵) ۱۹

فصل چهارم

۴-۱- خلاصه مشخصات روزنه‌ها و دبی ها ۲۵

۴-۲- نتایج آزمایش‌های روزنه دایره‌ای شکل با قطر ۸ سانتیمتر با مقطع پر ۳۱

۴-۳- نتایج آزمایش‌های روزنه دایره‌ای شکل با قطر ۸ سانتیمتر با مقطع نیمه‌پر ۳۲

۴-۴- نتایج آزمایش‌های روزنه مربع شکل با مقطع پر ۳۲

۴-۵- نتایج آزمایش‌های روزنه مربع شکل با مقطع نیمه‌پر ۳۲

۴-۶- نتایج آزمایش‌های روزنه لوزی‌شکل با مقطع پر ۳۳

۴-۷- نتایج آزمایش‌های روزنه لوزی‌شکل با مقطع نیمه‌پر ۳۳

۴-۸- نتایج آزمایش‌های روزنه دایره‌ای‌شکل با قطر ۴ سانتیمتر با مقطع پر با پایین بردن کف ۳۳

۴-۹- نتایج آزمایش‌های روزنه دایره‌ای‌شکل با قطر ۴ سانتیمتر با مقطع پر ۳۴

فصل پنجم

۵-۱- روابط بدون بعد حجم حفره آبشستگی با پارامتراول(مقاطع پر) ۷۷

۵-۲- روابط بدون بعد حجم حفره آبشستگی با پارامتردوم(مقاطع پر) ۷۷

۵-۳- روابط بدون بعد حجم حفره آبشستگی با پارامتراول(مقاطع نیمه‌پر) ۷۸

۵-۴- روابط بدون بعد حجم حفره آبشستگی با پارامتردوم(مقاطع نیمه‌پر) ۷۸

۵-۵- روابط بدون بعد حجم حفره آبشستگی با پارامتراول(روزنه دایره‌ای به قطر چهار سانتیمتر) ۷۹

۵-۶- روابط بدون بعد حجم حفره آبشستگی با پارامتراول(روزنه دایره‌ای به قطر چهار سانتیمتر) ۷۹

۵-۷- ضرایب معادله(۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای روزنه دایره ای شکل(عمق حفره) ۸۰

۵-۸- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای روزنه مربع شکل(عمق حفره) ۸۰

۵-۹- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای روزنه لوزی شکل(عمق حفره) ۸۱

۵-۱۰- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای هر سه روزنه با هم (عمق حفره) ۸۱

۵-۱۱- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای روزنه دایره ای شکل(عرض حفره) ۸۳

۵-۱۲- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای روزنه مربع شکل(عرض حفره) ۸۳

۵-۱۳- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای روزنه لوزی شکل(عرض حفره) ۸۳

۵-۱۴- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای هر سه روزنه با هم (عرض حفره) ۸۴

۵-۱۵- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای روزنه دایره ای شکل(طول حفره) ۸۵

۵-۱۶- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای روزنه مربع شکل(طول حفره) ۸۵

۵-۱۷- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای روزنه لوزی شکل(طول حفره) ۸۵

۵-۱۸- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای هر سه روزنه با هم (طول حفره) ۸۶

۵-۱۹- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای روزنه دایره ای شکل(ارتفاع رسوبات) ۸۷

۵-۲۰- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای روزنه مربع شکل(ارتفاع رسوبات) ۸۷

۵-۲۱- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای روزنه لوزی شکل(ارتفاع رسوبات) ۸۷

۵-۲۲- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای هر سه روزنه با هم (ارتفاع رسوبات) ۸۸
۵-۲۳- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای روزنه دایره ای شکل(فاصله رسوبات تا انتها) ۸۹
۵-۲۴- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای روزنه مربع شکل(فاصله رسوبات تا انتها) ۸۹
۵-۲۵- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای روزنه لوزی شکل(فاصله رسوبات تا انتها) ۸۹
۵-۲۶- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای هر سه روزنه با هم(فاصله رسوبات تا انتها) ۹۰
۵-۲۷- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای روزنه دایره ای شکل (فاصله روزنه تا شروع آبشستگی) ۹۱
۵-۲۸- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای روزنه مربع شکل(فاصله روزنه تا شروع آبشستگی)۹۱
۵-۲۹- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای روزنه لوزی شکل(فاصله روزنه تا شروع آبشستگی) ۹۱
۵-۳۰- ضرایب معادله (۵-۲۰) و میزان درصد خطا برای هر سه روزنه با هم(فاصله روزنه تا شروع آبشستگی) ۹۲
۵-۳۱- ضرایب معادله (۵-۲۲) و میزان درصد خطا برای هر سه روزنه با هم (کلیه ابعاد آبشستگی) ۹۳
۵-۳۲- مقایسه حداکثر عمق آبشستگی برای روزنه دایره‌ای شکل(روابط گروه اول) ۹۴
۵-۳۳- مقایسه حداکثر عمق آبشستگی برای روزنه مربع شکل(روابط گروه اول) ۹۵
۵-۳۴- مقایسه حداکثر عمق آبشستگی برای روزنه لوزی شکل(روابط گروه اول) ۹۵
۵-۳۵- مقایسه حداکثر عمق آبشستگی برای روزنه دایره‌ای شکل(روابط گروه دوم) ۹۶
۵-۳۶- مقایسه حداکثر عمق آبشستگی برای روزنه مربع شکل(روابط گروه دوم) ۹۶
۵-۳۷- مقایسه حداکثر عمق آبشستگی برای روزنه لوزی شکل(روابط گروه دوم) ۹۶
۵-۳۸- مقایسه حداکثر عمق آبشستگی برای روزنه دایره‌ای شکل(جت‌های ریزشی دایره‌ای) ۹۷
۵-۳۹- مقایسه حداکثر عمق آبشستگی برای روزنه مربع شکل(روابط گروه دوم) ۹۷
۵-۴۰- مقایسه حداکثر عمق آبشستگی برای روزنه لوزی شکل(روابط گروه دوم) ۹۸

۵-۴۱- مقایسه ارتفاع برآمدگی رسوبات برای روزنه دایره‌ای شکل(روابط گروه دوم) ۱۰۰
۵-۴۲- مقایسه ارتفاع برآمدگی رسوبات برای روزنه مربع شکل(روابط گروه دوم) ۱۰۰
۵-۴۳- مقایسه ارتفاع برآمدگی رسوبات برای روزنه لوزی شکل(روابط گروه دوم) ۱۰۱
۵-۴۴- مقایسه فاصله روزنه تا محل شروع آبشستگی برای روزنه دایره‌ای شکل(روابط گروه دوم) ۱۰۲
۵-۴۵- مقایسه فاصله روزنه تا محل شروع آبشستگی برای روزنه مربع شکل(روابط گروه دوم) ۱۰۲

فهرست اشکال

شماره و عنوان شکل **صفحه**

فصل دوم

۲-۱- مراحل توسعه حفره آبشستگی ۸

۲-۲- الگوی جریان جت ریزشی مایل داخل حفره آبشستگی ۱۰

فصل چهارم

۴-۱- پروفیل طولی فلوم آزمایشگاهی و متعلقات آن ۲۶

۴-۲- دریچه لولایی برای تنظیم ارتفاع آب پشت روزنه ۲۶

۴-۳- سرریز لبه‌تیز مثلثی برای اندازه‌گیری دبی جریان ۲۸

۴-۴- نمای جانبی و فوقانی حفره آبشستگی و برآمدگی رسوبات پایین‌دست آن ۳۰

فصل پنجم

۵-۱- منحنی‌های حداکثر عمق آبشستگی بر حسب عمق پایاب برای هر سه روزنه ۳۷

۵-۲- منحنی‌های حداکثر عمق آبشستگی بر حسب عمق پایاب برای روزنه‌ها با مقاطع نیمه‌پر ۳۹

۵-۳- منحنی‌های حداکثر عمق آبشستگی بر حسب عمق پایاب برای روزنه دایره‌ای به قطر ۴ سانتیمتر ۳۸

۵-۴- مقاطع طولی و عرضی حفره آبشستگی برای روزنه دایره‌ای شکل ۴۱

۵-۵- مقاطع طولی و عرضی حفره آبشستگی برای روزنه مربع شکل ۴۳

۵-۶- مقاطع طولی و عرضی حفره آبشستگی برای روزنه لوزی شکل ۴۵

۵-۷- ضریب حوزه حفره آبشستگی سه روزنه در دبی‌های مختلف ۴۷

۵-۸- ضریب حوزه حفره آبشستگی مقاطع نیمه‌پر ۴۷

۵-۹- ضریب حوزه حفره آبشستگی برای آزمایش‌های روزنه دایره‌ای به قطر ۴ سانتیمتر ۴۸
۵-۱۰- مقایسه ضریب حوزه حفره آبشستگی روزنه مربع شکل در دبی ثابت= ۴/۸لیتر بر ثانیه ۵۰
۵-۱۱- مقاطع طولی آبشستگی برای روزنه دایره‌ای شکل ۵۲
۵-۱۲- مقاطع طولی آبشستگی برای روزنه مربع شکل ۵۴
۵-۱۳- مقاطع طولی آبشستگی برای روزنه لوزی شکل ۵۵
۵-۱۴- مقاطع عرضی آبشستگی روزنه دایره‌ای شکل ۵۷
۵-۱۵- مقاطع عرضی آبشستگی روزنه مربع شکل ۵۹
۵-۱۶- مقاطع عرضی آبشستگی روزنه لوزی شکل ۶۰
۵-۱۷- تغییرات طول حفره آبشستگی بر حسب دبی برای روزنه دایره‌ای به قطر ۴ سانتیمتر ۶۱
۵-۱۸- فاصله افقی محل شروع آبشستگی تا روزنه بر حسب دبی برای روزنه دایره‌ای به قطر ۴ سانتیمتر ۶۲
۵-۱۹- تغییرات حجم حفره آبشستگی با افزایش دبی برای سه روزنه ۶۳
۵-۲۰- تأثیر دبی بر ابعاد حفره آبشستگی روزنه مربع شکل در عمق پایاب ثابت= ۲۴/۳ سانتیمتر ۶۵
۵-۲۱- مقایسه حداکثر عمق حفره آبشستگی بین سه روزنه ۶۶
۵-۲۲- مقایسه حداکثر طول حفره آبشستگی بین سه روزنه ۶۶
۵-۲۳- مقایسه حداکثر عرض حفره آبشستگی بین سه روزنه ۶۷
۵-۲۴- مقایسه حداکثر ارتفاع برآمدگی رسوبات پایین‌دست حفره آبشستگی بین سه روزنه ۶۷
۵-۲۵- مقایسه فاصله افقی حداکثر ارتفاع برآمدگی رسوبات حفره آبشستگی تا انتها بین سه روزنه ۶۷
۵-۲۶- مقایسه فاصله افقی روزنه تا محل شروع حفره آبشستگی بین سه روزنه ۶۸
۵-۲۷- مقایسه حجم کنده شده حفره آبشستگی بین سه روزنه ۶۸
۵-۲۸- عمق بدون بعد شده حفره آبشستگی ۶۹
۵-۲۹- طول بدون بعد شده حفره آبشستگی ۶۹
۵-۳۰- عرض بدون بعد شده حفره آبشستگی ۶۹

۵-۳۱- ارتفاع بدون بعد شده برآمدگی رسوبات پایین‌دست حفره آبشستگی ۷۰
۵-۳۲- فاصله افقی بدون بعد شده ارتفاع برآمدگی رسوبات پایین‌دست حفره آبشستگی تا انتها ۷۰
۵-۳۳- فاصله بدون بعد شده روزنه تا محل شروع حفره آبشستگی ۷۰
۵-۳۴- حجم بدون بعد شده حفره آبشستگی ۷۱
۵-۳۵- مقایسه حداکثر عمق حفره آبشستگی بین دو روزنه دایره‌ای شکل ۷۲
۵-۳۶- مقایسه حداکثر طول حفره آبشستگی بین دو روزنه دایره‌ای شکل ۷۲
۵-۳۷- مقایسه حداکثر عرض حفره آبشستگی بین دو روزنه دایره‌ای شکل ۷۳
۵-۳۸- مقایسه ابعاد حفره آبشستگی بین دو روزنه دایره‌ای شکل بزگ و کوچک در عمق
پایاب ثابت=۲۳/۱ سانتیمتر ۷۳
۵-۳۹- مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی عمق حفره آبشستگی ۸۲
۵-۴۰- مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی عرض حفره آبشستگی ۸۴
۵-۴۱- مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی طول حفره آبشستگی ۸۶
۵-۴۲- مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی ارتفاع برآمدگی رسوبات حفره آبشستگی ۸۸
۵-۴۳- مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی فاصله افقی برآمدگی رسوبات حفره تا انتها ۹۰
۵-۴۴- مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی فاصله افقی محل شروع آبشستگی تا روزنه ۹۲
۵-۴۵- رابطه دبی-اشل سه روزنه ۹۴
۵-۴۶- مقایسه حداکثر عمق آبشستگی برای روزنه دایره‌ای شکل(جت‌های ریزشی دایره‌ای) ۹۸
۵-۴۷- مقایسه حداکثر عمق آبشستگی برای روزنه دایره‌ای شکل(جت‌های ریزشی دایره‌ای) ۹۹
۵-۴۸- مقایسه حداکثر عمق آبشستگی برای روزنه مربع شکل(روابط گروه دوم) ۹۹
۵-۴۹- مقایسه ارتفاع برآمدگی رسوبات برای روزنه دایره‌ای شکل(روابط گروه دوم) ۱۰۱

فهرست علائم و اختصارات

علائم و اختصارات

فصل اول

V_0: سرعت جریان در مقطع روزنه

d_s: حداکثر عمق حفره آبشستگی

g: شتاب ثقل زمین

Tw: عمق پایاب

Δh: ارتفاع ریزش جت آب از وسط مقطع روزنه تا سطح آب

R_H: شعاع هیدرولیکی روزنه

فصل دوم

y_s: حداکثر عمق آبشستگی از سطح پایاب

H: ارتفاع ریزش جت از مرکز آن تا بستر اولیه

q: دبی بر واحد عرض سرریز

d: اندازه قطر مشخصه مصالح بستر

Y_t: عمق پایاب

Q: دبی جریان

d_{50} : اندازه مؤثر ذرات رسوب

ρ_s: چگالی ذرات بستر

ρ: چگالی سیال

R: شعاع هیدرولیکی جت

s: چگالی نسبی($s = \rho_s / \rho$)

ϕ: پارامترهای حفره آبشستگی

L_s : فاصله انتهای حفره آبشستگی از سرریز

W_s: حداکثر عرض حفره آبشستگی

h_m: ارتفاع برآمدگی ایجاد شده در پایین‌دست حفره آبشستگی

L_{up}: فاصله نقطه شروع حفره از سرریز

H_c: ارتفاع ریزش از مرکز جت تا کف بستر اولیه

A: مساحت سرریز

V: سرعت جریان خروجی

R: شعاع هیدرولیکی جت

α: زاویه برخورد جت با سطح پایاب

d_{90}: قطر مشخصه ذرات بستر

g: شتاب ثقل زمین

ψ: ابعاد حفره آبشستگی و برآمدگی رسوبات پایین‌دست آن

Tw: عمق پایاب

R_H: شکل لوله

F_0: عدد فرود ذره رسوبی

فصول سوم، چهارم، پنجم و ششم

Q: شدت حجمی جریان

Tw: عمق پایاب

ρ_w: چگالی سیال

g: شتاب ثقل زمین

H: ارتفاع آب پشت روزنه(از سطح آب تا مرکز روزنه)

d_{50}: اندازه مؤثر ذرات رسوب

ρ_s: چگالی ذرات بستر

Δh: ارتفاع ریزش جت آب از وسط مقطع روزنه تا سطح آب

R_H: شعاع هیدرولیکی روزنه

A: مساحت روزنه

t: پارامتر زمان

μ: لزجت سیال

ν: لزجت سینماتیک سیال

σ: انحراف معیار هندسی قطر ذرات

ω: سرعت سقوط ذرات

φ: زاویه ایستایی

S_F: ضریب شکل ذرات بستر

ϕ: ابعاد حفره آبشستگی

Fr: عدد فرود جریان($Fr = \frac{V_0}{\sqrt{g.\Delta h}}$)

V_0: سرعت جریان در مقطع روزنه

d_s: حداکثر عمق حفره آبشستگی

W_s: حداکثر فاصله عرضی بین برآمدگی‌های اطراف حفره آبشستگی

L_s: فاصله محل شروع آبشستگی تا حداکثر برآمدگی رسوبات پایین‌دست

L_m: فاصله حداکثر برآمدگی رسوبات پایین‌دست تا انتها