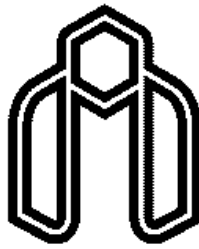


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه شاهرود

دانشگاه شاهرود

دانشکده کشاورزی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته

مهندسی کشاورزی - سازه های آبی

موضوع:

تخمین آزمایشگاهی حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی

آزاده رفیعی

استاد راهنما:

دکتر خلیل اژدری

دکتر صمد امامقلی زاده

زمستان ۹۳

تقدیم به

مادر عزیزم

پدر مهربانم

برادر و خواهرم

که تا این لحظه مدیون لطف و مهربانی های بی دریغشان بوده ام.

# تعهد نامه

اینجانب ..... دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ..... دانشکده

..... دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه .....

..... تحت راهنمایی ..... متعهد می 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 افزارها 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 نم ، باشد.

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

## شکر و قدردانی:

پاس از آن خداوندی است که لطف بیکرانیش گشاینده راه و حلال مشکلاتم بود. محارش رساله حاضر ممکن نبود مگر به لطف پروردگار

و یاورمی اساتید عزیز، دوستان گرامی و خانواده صبورم. تحت لازم می دانم از زحمات بی دریغ استاد عزیزم، دکتر خلیل اژدی، که

در تمامی مسیر یاورم بودند پاسکزاری ویژه نمایم. همچنین از دکتر صد اما مقلی زاده نیز که به صورت حستکی ناندیس، هم قدم من شدند شکر

میکنم. اساتید و دوستان گرامی دیکری همچون دکتر حسینی، دکتر زهر کنجی و مهندس حوریه رضایی نیز در طول انجام تحقیق پشتیبان من

بودند. بعلاوه لازم می دانم از بکاری مسولان دانشگاه صنعتی شاهرود و دانشکده کشاورزی که امکانات لازم جهت تحقیقات را در

اختیارم نهادند مسالت دارم.

آزاده رفیعی

زمستان ۱۳۹۳

## چکیده:

سرریزها برای عبور دبی‌های زیاد از روی سازه‌های هیدرولیکی به گونه‌ای طراحی می‌شوند که هیچ گونه صدمه‌ای به سازه و محیط اطراف آن وارد نشود. در دهه‌های اخیر، سرریزهای پلکانی به عنوان یک راهکار مناسب برای استهلاک انرژی مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند. سرریز پلکانی متشکل از پله‌هایی است که از نزدیکی تاج شروع و تا پنجه واقع در پایین دست ادامه دارند. علی‌رغم استهلاک انرژی بالای سرریزهای پلکانی، در پایین دست مقداری انرژی مستهلک نشده باقی می‌ماند که موجب فرسایش بستر و ایجاد حفره در آن می‌گردد. با مطالعه پدیده آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی، پارامترهای موثر بر این پدیده، یعنی دبی جریان بر واحد عرض ( $q$ )، ارتفاع ریزش ( $H$ )، عمق پایاب ( $y_t$ )، متوسط قطر مصالح ( $d_{50}$ )، به عنوان عوامل موثر شناخته شده‌اند و همچنین با استفاده از تحلیل ابعادی روابط بدون بعدی بدست آمده است، که آزمایش‌های مورد نیاز بر اساس این روابط برنامه ریزی شده‌اند. این آزمایش‌ها برای مصالح با دانه‌بندی یکنواخت انجام گردید، آزمایش‌ها با چهار قطر ۰/۳، ۱، ۳/۵، ۶/۸ میلی‌متر و ۷ دبی ۲/۵، ۵/۵، ۷/۵، ۹/۵، ۱۱/۵، ۱۳/۵ و ۱۶ لیتر بر ثانیه و عمق‌های پایاب مختلف انجام شد. در این آزمایش‌ها پارامترهای حداکثر عمق آبشستگی از سطح پایاب ( $d_s$ )، فاصله و محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی از سرریز ( $L_s$ )، اندازه گیری گردید. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در شرایط هیدرولیکی مشابه با افزایش ( $d_{50}$ )، حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد، حداکثر عمق آبشستگی در  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$  برای دبی  $Q = 7/5 \text{ cm}$  برابر ۷/۳ می‌باشد در حالیکه برای  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$  با همان دبی حداکثر عمق آبشستگی ۳/۵ می‌باشد. همچنین با افزایش عمق پایاب ( $y_t$ )، حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. در بررسی تاثیر دو پارامتر ( $d_{50}$ ) و ( $y_t$ ) باهم مشاهده گردید که ابعاد آبشستگی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: آبشستگی، سرریز پلکانی، قطر مصالح، عمق پایاب.

## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- "اثر عمق پایاب بر حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست سرریزهای پلکانی"، سیزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران آبان ماه ۱۳۹۳، دانشگاه تبریز.
- "اثر دانه بندی مصالح بستر بر حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست سرریزهای پلکانی"، کانون ملی معماری ایران، همایش ملی معماری، توسعه نوین شهری اردیبهشت ماه ۱۳۹۳، دانشگاه تبریز.

## فهرست مطالب:

### فصل اول-مقدمه

صفحه

۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- اهداف تحقیق.....	۴
۳-۱- ضرورت انجام تحقیق.....	۵

### فصل دوم- کلیات و پیشینه تحقیق

۱-۲- مقدمه.....	۷
۲-۲- انواع سرریز.....	۷
۱-۲-۲- سرریز پلکانی.....	۸
۲-۲-۲- پیشینه سرریز پلکانی.....	۹
۳-۲-۲- کاربرد سرریز پلکانی.....	۱۳
۴-۲-۲- انواع جریان روی سرریز پلکانی.....	۱۵
۵-۲-۲- اجزای تشکیل دهنده سرریزها.....	۱۷
۱-۵-۲-۲- آستانه کنترل.....	۱۷
۲-۵-۲-۲- کانال تخلیه.....	۱۸
۳-۵-۲-۲- سازه پایه.....	۱۸
۴-۵-۲-۲- آبراهه ورودی و خروجی.....	۱۹
۶-۲-۲- هوادهی سرریز.....	۱۹
۳-۲-۲- آبشستگی.....	۱۹
۴-۲-۲- مراحل توسعه آبشستگی.....	۲۱
۵-۲-۲- انواع آبشستگی.....	۲۲
۱-۵-۲-۲- آبشستگی عمومی.....	۲۲
۱-۱-۵-۲- پایین افتادگی تراز رودخانه.....	۲۳
۲-۱-۵-۲- جابجایی آبراهه.....	۲۳
۳-۱-۵-۲- آبشستگی در خم رودخانهها.....	۲۴
۴-۱-۵-۲- آبشستگی در محل اتصال آبراهه.....	۲۵
۲-۵-۲- آبشستگی ناشی از تنگشدگی.....	۲۵
۳-۵-۲- آبشستگی موضعی.....	۲۵
۴-۵-۲- آبشستگی کل.....	۲۶
۵-۵-۲- آبشستگی در آب زلال و آب حاوی رسوب.....	۲۷
۶-۵-۲- آبشستگی استاتیکی و دینامیکی.....	۲۷
۷-۵-۲- آبشستگی ناشی از جت ریزشی.....	۲۸



## فهرست مطالب:

### صفحه

۲۹	۸-۵-۲- آبشستگی در پایین دست سرریزها
۳۰	۶-۲- الگوی جریان
۳۰	۱-۶-۲- الگوی جریان در جت‌های ریزشی عمودی
۳۰	۲-۶-۲- الگوی جریان در جت‌های ریزشی مایل
۳۲	۷-۲- مروری بر مطالعات انجام شده

## فصل سوم- مواد و روش‌ها

۴۱	۱-۳- مقدمه
۴۱	۲-۳- مراحل که برای انجام تحقیق انتخاب شده است
۴۲	۳-۳- تجهیزات آزمایشگاه هیدرولیک
۴۲	۴-۳- سرریز پلکانی ساخته شده و مشخصات آن
۴۳	۵-۳- روش انجام آزمایش
۴۴	۶-۳- شرح آزمایش‌ها
۴۵	۷-۳- پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه
۴۵	۸-۳- اندازه‌گیری دبی جریان
۴۷	۹-۳- اندازه‌گیری عمق آبشستگی
۴۷	۱۰-۳- تحلیل ابعادی
۴۸	۱-۱۰-۳- تحلیل ابعادی پارامترهای موثر بر عمق آبشستگی در پایین دست سرریزهای پلکانی

## فصل چهارم- بحث و نتایج

۵۲	۱-۴- مقدمه
۵۲	۲-۴- مشاهدات آزمایشگاهی
۵۵	۳-۴- نتایج آزمایش‌ها
۵۶	۱-۳-۴- بررسی تغییرات دبی روی ابعاد آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی
۶۵	۲-۳-۴- درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی در اثر تغییرات دبی
۶۸	۳-۳-۴- بررسی تغییرات قطر مصالح روی ابعاد آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی
۷۵	۴-۳-۴- درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی در اثر تغییرات دانه بندی مصالح
۷۷	۵-۳-۴- بررسی تغییرات عمق پایاب روی ابعاد آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی
۹۱	۶-۳-۴- درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی در اثر تغییرات عمق پایاب
۹۲	۴-۴- ارائه روابط رگرسیون خطی و غیر خطی برای برآورد حداکثر عمق آبشستگی

## فصل پنجم- نتیجه‌گیری

۹۶	۱-۵- نتایج
۹۹	۲-۵- پیشنهادات
۱۰۱	مراجع و منابع

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۸	شکل ۱-۲- سرریز پلکانی.....
۹	شکل ۲-۲- کانال‌های زیرگذر پله‌ای در جزیره کرت.....
۱۰	شکل ۳-۲- سرریز پلکانی آکارنایا.....
۱۱	شکل ۴-۲- سرریز سد نباتائین.....
۱۲	شکل ۵-۲- سرریز سد نیوکروتون.....
۱۴	شکل ۶-۲- نمایی سه بعدی از سرریز پلکانی.....
۱۵	شکل ۷-۲- رژیم جریان غیرریزشی روی سرریز پلکانی.....
۱۶	شکل ۸-۲- رژیم جریان ریزشی روی سرریز پلکانی.....
۲۱	شکل ۹-۲- مراحل توسعه حفره آبستگی.....
۲۴	شکل ۱۰-۲- نمایی از آبستگی جداره خارجی خم رودخانه و جریان ثانویه.....
۲۶	شکل ۱۱-۱- اجزای آبستگی.....
۲۹	شکل ۱۲-۲- آبستگی ناشی از جت ریزشی.....
۳۱	شکل ۱۳-۲- الگوی جریان جت ریزشی مایل داخل حفره.....
۳۲	شکل ۱۴-۲- شکل و خصوصیات یک جت ریزشی مایل.....
۴۲	شکل ۱-۳- پلان تجهیزات موجود در آزمایشگاه هیدرولیک.....
۴۳	شکل ۲-۳- نمایی از سرریز پلکانی ( قبل از نصب).....
۴۳	شکل ۳-۳- نمایی از سرریز پلکانی ( بعد از نصب).....
۴۶	شکل ۴-۳- نمایی از جریان سنج.....
۵۶	شکل ۱-۴- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی $d_{50} = 6/8mm$ با عمق پایاب اولیه $y_{t1}$ .....
۵۷	شکل ۲-۴- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی $d_{50} = 3.5mm$ با عمق پایاب اولیه $y_{t1}$ .....
۵۹	شکل ۳-۴- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی $d_{50} = 1mm$ با عمق پایاب اولیه $y_{t1}$ .....

- شکل ۴-۴- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 0/3mm$ ، با عمق پایاب اولیه  $y_{t1}$  ..... ۶۰
- شکل ۴-۵- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 6.8 mm$ ، با عمق پایاب ثانویه  $y_{t2}$  ..... ۶۱
- شکل ۴-۶- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 3.5mm$ ، با عمق پایاب ثانویه  $y_{t2}$  ..... ۶۱
- شکل ۴-۷- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 1mm$ ، با عمق پایاب ثانویه  $y_{t2}$  ..... ۶۲
- شکل ۴-۸- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 1mm$ ، با عمق پایاب ثانویه  $y_{t2}$  ..... ۶۳
- شکل ۴-۹- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $y_{t1} = 2 cm, Q = 2/5 l/s$  ..... ۶۸
- شکل ۴-۱۰- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $y_{t2} = 5 cm, Q = 2/5 l/s$  ..... ۶۹
- شکل ۴-۱۱- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $y_{t1} = 2/9 cm, Q = 5/5 l/s$  ..... ۷۰
- شکل ۴-۱۲- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $y_{t2} = 7 cm, Q = 5/5 l/s$  ..... ۷۱
- شکل ۴-۱۳- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $y_{t1} = 3/3 cm, Q = 7/5 l/s$  ..... ۷۲
- شکل ۴-۱۴- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $y_{t2} = 7/9 cm, Q = 7/5 l/s$  ..... ۷۲
- شکل ۴-۱۵- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $y_{t1} = 3/5 cm, Q = 9/5 l/s$  ..... ۷۳
- شکل ۴-۱۶- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 6/8 mm, Q = 5/5 l/s$  ..... ۷۸
- شکل ۴-۱۷- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 6/8 mm, Q = 7/5 l/s$  ..... ۷۹
- شکل ۴-۱۸- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 6/8 mm, Q = 9/5 l/s$  ..... ۷۹
- شکل ۴-۱۹- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 6/8 mm, Q = 11/5 l/s$  ..... ۸۰
- شکل ۴-۲۰- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 6/8 mm, Q = 13/5 l/s$  ..... ۸۱
- شکل ۴-۲۱- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 6/8 mm, Q = 16 l/s$  ..... ۸۱
- شکل ۴-۲۲- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 3/5 mm, Q = 2/5 l/s$  ..... ۸۲
- شکل ۴-۲۳- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 3/5 mm, Q = 5/5 l/s$  ..... ۸۳
- شکل ۴-۲۴- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 3/5 mm, Q = 7/5 l/s$  ..... ۸۳
- شکل ۴-۲۵- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 3/5 mm, Q = 9/5 l/s$  ..... ۸۴
- شکل ۴-۲۶- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 3/5 mm, Q = 11/5 l/s$  ..... ۸۴

عنوان

صفحه

شکل ۴-۲۷- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 3/5 \text{ mm}$ ،  $Q = 9/5 \text{ l/s}$  ..... ۸۵

شکل ۴-۲۸- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 1 \text{ mm}$ ،  $Q = 2/5 \text{ l/s}$  ..... ۸۵

شکل ۴-۲۹- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 1 \text{ mm}$ ،  $Q = 5/5 \text{ l/s}$  ..... ۸۶

شکل ۴-۳۰- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 1 \text{ mm}$ ،  $Q = 7/5 \text{ l/s}$  ..... ۸۷

شکل ۴-۳۱- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 1 \text{ mm}$ ،  $Q = 7/5 \text{ l/s}$  ..... ۸۷

شکل ۴-۳۲- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$ ،  $Q = 2/5 \text{ l/s}$  ..... ۸۸

شکل ۴-۳۳- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$ ،  $Q = 5/5 \text{ l/s}$  ..... ۸۹

شکل ۴-۳۴- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$ ،  $Q = 7/5 \text{ l/s}$  ..... ۸۹

شکل ۴-۳۵- مقادیر محاسبه شده حداکثر عمق آبشستگی در مقابل مقادیر اندازه گیری شده

۹۲ .....  $\frac{d_s}{y_t} = f\left(f_g, \frac{d_{50}}{H}, \frac{h}{y_t}\right)$

شکل ۴-۳۶- مقادیر محاسبه شده حداکثر عمق آبشستگی در مقابل مقادیر اندازه گیری شده

۹۳ .....  $\frac{d_s}{y_t} = f\left(f_g, \frac{d_{50}}{H}, \frac{h}{y_t}\right)$

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
49	جدول ۱-۳- پارامترهای موثر بر عمق آبشستگی.....
2۵	جدول ۱-۴- مشخصات متغیرهای آزمایش.....
۵۳	جدول ۲-۴- مقادیر حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) بر حسب سانتی‌متر به ازای تغییرات قطر مصالح ( $d_{50}$ ) برای عمق پایاب اولیه ( $y_{t1}$ ).....
۵۳	جدول ۳-۴- مقادیر حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) بر حسب سانتی‌متر به ازای تغییرات قطر مصالح ( $d_{50}$ ) برای عمق پایاب ثانویه ( $y_{t1}$ ).....
۵۴	جدول ۴-۴- مقادیر حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) بر حسب سانتی‌متر به ازای تغییرات عمق پایاب ( $y_t$ ) برای $d_{50} = 6/8 mm$ .....
۵۴	جدول ۵-۴- مقادیر حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) بر حسب سانتی‌متر به ازای تغییرات عمق پایاب ( $y_t$ ) برای $d_{50} = 3/5 mm$ .....
۵۵	جدول ۶-۴- مقادیر حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) بر حسب سانتی‌متر به ازای تغییرات عمق پایاب ( $y_t$ ) برای $d_{50} = 1 mm$ .....
۵۵	جدول ۷-۴- مقادیر حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) بر حسب سانتی‌متر به ازای تغییرات عمق پایاب ( $y_t$ ) برای $d_{50} = 3/5 mm$ .....
۶۵	جدول ۸-۴- درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی در اثر تغییرات دبی، قطر مصالح $d_{50} = 6/8 mm$ .....
۶۶	جدول ۹-۴- درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی در اثر تغییرات دبی، قطر مصالح $d_{50} = 3/5 mm$ .....
۶۷	جدول ۱۰-۴- درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی در اثر تغییرات دبی برای $d_{50} = 1 mm$ .....
۶۸	جدول ۱۱-۴- درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی در اثر تغییرات دبی برای $d_{50} = 0/3 mm$ .....
۷۶	جدول ۱۲-۴- درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی در اثر تغییرات دانه‌بندی مصالح ( $d_{50}$ ) با عمق پایاب اولیه ( $y_{t1}$ ).....
۷۶	جدول ۱۳-۴- درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی در اثر تغییرات دانه‌بندی

مصالح ( $d_{50}$ ) با عمق پایاب ثانویه ( $y_{t2}$ ) ..... ۷۷

جدول ۴-۱۴- درصد کاهش حداکثر عمق آبستگي در پایین دست سرریز پلکانی در اثر تغییرات

عمق پایاب ( $y_t$ ) ..... ۹۱

جدول ۴-۱۶- رابطه‌های رگرسیونی خطی و غیر خطی ..... ۹۴

فصل اول

کلیات

برای تخلیه آب اضافی، همچنین تخلیه سیلاب‌های بزرگ و جلوگیری از خسارات ناشی از سیل در سدها انواع مختلف سرریزها ساخته می‌شود. عبور جریان از روی سرریزها با اتلاف انرژی همراه است، با این حال مقداری انرژی مستهلک نشده باقی می‌ماند که موجب فرسایش بستر و ایجاد حفره در پایین دست می‌شود. از جمله سازه‌های هیدرولیکی که مورد توجه خاص مهندسان طراح قرار گرفته است، سرریزهای پلکانی می‌باشد. سرریزهای پلکانی اولین بار در سدهای بتنی و سپس در سدهای خاکی توسعه یافته‌اند. سرریزهای پلکانی دارای سابقه طولانی در حدود ۳۵۰۰ سال یا بیشتر هستند (چانسون، ۲۰۰۰). استفاده از سرریزهای پلکانی در دهه‌های اخیر نیز با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در ساخت بتن غلطکی مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند. سرریزهای پلکانی در واقع نمونه‌ای ساده‌ای از آبراهه با ضریب زبری بالاست که از یک سری پله با ابعاد ثابت یا متغیر تشکیل شده است و با توجه به استهلاک انرژی در طول آن، در پنجه سد یا نیاز به به‌کارگیری سازه‌های مستهلک کننده انرژی نیست یا ابعاد آن بسیار کوچک می‌باشد. یکی از روش‌های رایج برای اتلاف انرژی جریان عبوری از روی سرریزها، استفاده از حوضچه آرامش استغراق و جت‌های ریزشی آزاد و سرریز پلکانی و... است. اگرچه این روش اتلاف از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است لیکن ریزش جت و برخورد آن با بستر رودخانه در پایین دست باعث آبشستگی می‌گردد که در صورت عدم پیش‌بینی لازم، افزایش ابعاد این حفره می‌تواند پایداری سازه هیدرولیکی را به مخاطره اندازد.

ابعاد حفره آبشستگی تابع پارامترهای مختلفی است که از جمله مهم‌ترین این پارامترها می‌توان به دبی در واحد عرض ( $q$ )، عمق پایاب ( $Y_t$ )، ارتفاع ریزش جت ( $H$ )، تعداد پله‌ها ( $N$ )، زاویه سرریز پلکانی، قطر متوسط مصالح ( $d_{50}$ ) و دانه‌بندی مصالح اشاره کرد (اردشیرآذر، ۱۳۸۶).



نکته قابل توجه در مورد آبشستگی پایین دست سرریز پلکانی، شکل هندسی آبشستگی پایین دست این سرریزها است. برای این منظور پروفیل گودال آبشستگی در حالت تعادل آبشستگی، حداکثر عمق آبشستگی و محل حداکثر عمق آبشستگی و طول گودال آبشستگی برداشت می شود (تنا و همکاران، ۲۰۱۱).

سرریز پلکانی از گزینه‌های مناسب برای استهلاک انرژی جریان از لحاظ فنی و اقتصادی می باشد (وفاداری، ۱۳۸۳). قسمت زیادی از انرژی جریان، در اثر مقاومت هیدرولیکی عناصر زبر (پله‌ها) بر روی سطح پلکانی شده سرریز مستهلک می شود. پله‌ها در سرریز پلکانی نقش مؤثری در استهلاک انرژی دارند، که این کاهش انرژی باعث کاهش میزان آبشستگی در پایین دست می شود و همچنین پله‌ها می توانند استهلاک انرژی حاصل از جریان در شوت را به نحوه قابل توجهی افزایش داده و نیاز به احداث سازه استهلاک انرژی را در انتهای پایین دست حذف نموده و یا تا حد زیادی کاهش می دهد (بوز و مینور، ۲۰۰۲).

با توجه به مطالعاتی که در سال‌های اخیر صورت گرفته است به طوری که میزان استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی بیش تر از سرریزهای صاف (بدون پلکان) با همان ابعاد است که استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی حدود ۷۵٪ بیش تر از سرریزهای غیرپلکانی است. به کارگیری مناسب این سرریزها می تواند تأثیر زیادی بر کاهش ابعاد سازه، از قبیل کاهش عمق حفاری حوضچه آرامش پایین دست، طول حوضچه آرامش و ارتفاع دیواره‌های جانبی آن داشته و باعث صرفه اقتصادی گردد (شمسایی و نونهال، ۱۳۸۴). اگرچه تاکنون تحقیقات زیادی به منظور تخمین عمق آبشستگی صورت گرفته و روابط زیادی به دست آمده ولی پیچیدگی مسئله و دخالت عوامل مختلف در این پدیده سبب شده است که تحقیقات در این زمینه هنوز ادامه داشته باشد. همچنین در مورد تأثیر این نوع سرریز بر میزان عمق آبشستگی تحقیقات زیادی صورت نگرفته است و با توجه به این نکته ضرورت انجام این تحقیق آشکار می شود.

## ۸-۱- تعریف مسئله مورد بررسی

یکی از عوامل مؤثر روی پدیده آبشستگی در پایین دست سرریزهای پلکانی، اثر دانه‌بندی مصالح بستر رودخانه و قطر مصالح بستر رودخانه است. به نظر می‌رسد با افزایش قطر مصالح بستر رودخانه، عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. از جمله عوامل دیگری که در این پدیده مؤثراند عمق پایاب می‌باشد که با افزایش عمق پایاب آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی کاهش می‌یابد.

## ۹-۱- هدف از تحقیق حاضر

در این پایان‌نامه سعی شده است نظریات محققین مختلف در حد امکان جمع آوری و مورد بررسی قرار گیرد و بررسی بیش‌تری روی فرسایش پایین دست سرریز پلکانی به عمل آمده است. لذا ابتدا با انجام آزمایش‌های متعددی به بررسی آبشستگی برای مصالح با دانه‌بندی یکنواخت پرداخته شد و مشخص گردید که پارامترهای دبی در واحد عرض ( $q$ )، عمق پایاب ( $y_t$ )، ارتفاع ریزش جت ( $H$ ) و قطر متوسط ذرات بستر ( $d_{50}$ ) در میزان عمق آبشستگی مؤثرند. در نهایت روابط مناسبی برای تعیین ابعاد حفره آبشستگی پایین دست سرریزهای پلکانی ارائه شد که از دقت قابل قبولی برخوردار هستند.

در حال حاضر مطالعات کمی روی پیش‌بینی ابعاد حفره آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی انجام شده است، اکثر تحقیق‌ها روی سرریز پلکانی با تعداد پله متغیر و تغییرات زاویه سرریز بوده است. در این تحقیق تعداد پله و زاویه سرریز ثابت است و حوضچه پایین دست ساده می‌باشد. تحقیق‌های بسیار کمی روی تاثیر عمق پایاب بر آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی انجام شده است که در تحقیق حاضر عمق پایاب مورد بررسی بیش‌تری قرار گرفته است. و تاثیر آن روی حداکثر عمق آبشستگی، طول گودال آبشستگی و محل حداکثر عمق آبشستگی مورد بررسی قرار گرفته است.

# فصل دوم

## پیشینه تحقیق

## ۱-۲- انواع سرریزها

سرریزها را معمولاً بر اساس برجسته‌ترین ویژگی آن‌ها طبقه‌بندی می‌کنند، که این ویژگی‌ها می‌توانند مربوط به سازه کنترل، کانال تخلیه و یا اجزای دیگر باشد. انواع سرریزهایی که در طرح سدها به کار می‌روند عبارت‌اند از:

- سرریز ریزشی<sup>۱</sup>
- سرریز اوجی<sup>۲</sup>
- سرریز جانبی<sup>۳</sup>
- سرریز تونلی<sup>۴</sup>
- سرریز نیلوفری<sup>۵</sup>
- سرریز سقوطی با بارشکن<sup>۶</sup>
- سرریز شوت<sup>۷</sup>
- سرریز آبرو<sup>۸</sup>
- سرریز سیفونی<sup>۹</sup>
- سرریز چند وجهی<sup>۱۰</sup>
- سرریز پلکانی<sup>۱۱</sup>

---

<sup>1</sup>over\_fall

<sup>2</sup>ogee

<sup>3</sup>side channel

<sup>4</sup>tunnel

<sup>5</sup>horining glory

<sup>6</sup>baffled apron drop

<sup>7</sup>chute spillway

<sup>8</sup>culvert

<sup>9</sup>siphon

<sup>10</sup>labyrinth

<sup>11</sup>stepped spillway

### ۱-۳- سرریز پلکانی

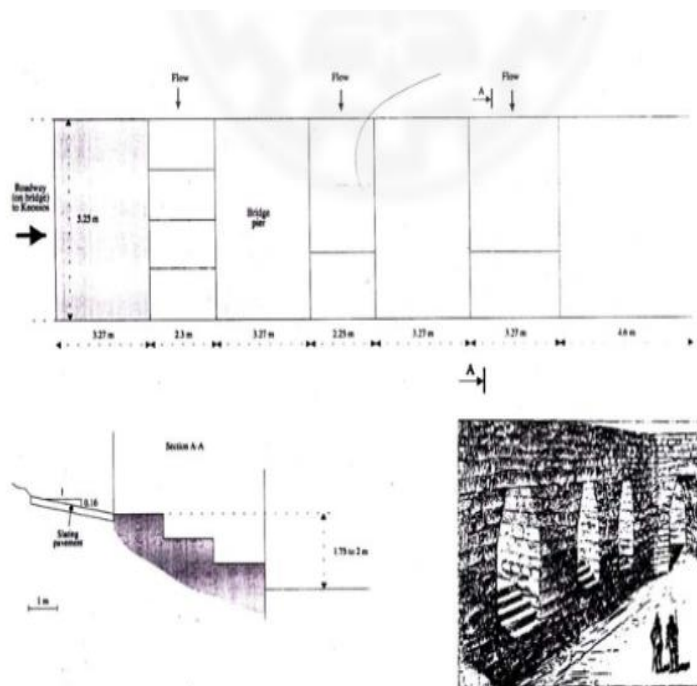
سرریز پلکانی در حقیقت یک کانال روباز است که به جای کف صاف و یکنواخت دارای یک سری پله (آبشار) متوالی باشد. در بعضی موارد و زمانی که شیب برای احداث تنداب بسیار تند است، برای انتقال آب از سراب به پایاب از سرریز پلکانی استفاده می‌شود. در سرریزهای پلکانی چند حوضچه آرامش پشت سر هم قرار می‌گیرند. در سال‌های اخیر در بعضی از سدهای وزنی سرریز پلکانی بدون حوضچه آرامش و به صورت پله‌های معمولی ساخته شده‌اند، هدف در اینجا کاهش انرژی جنبشی مخرب در پایانه سرریز است. شکل (۱-۱) یک سرریز پلکانی با حوضچه آرامش را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲- سرریز پلکانی

#### ۴-۱- پیشینه تاریخی سرریز پلکانی

به عقیده چانسون (۲۰۰۱) سرریزهای پلکانی از زمان‌های بسیار قدیم (حدود ۳۵۰۰ سال پیش) مورد استفاده قرار می‌گرفته‌اند. قدیمی‌ترین کانال‌های پله‌ای جهان احتمالاً یک سری از کانال‌های زیرگذر (کالورت‌های پله‌ای) می‌باشند. شکل (۲-۱) کانال‌های زیرگذر پله‌ای که حدود ۱۵۰۰ سال قبل از میلاد در جزیره کرت<sup>۱۲</sup> دریای مدیترانه ساخته شده‌اند را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱- کانال‌های زیرگذر پله‌ای در جزیره کرت (وفاداری، ۱۳۸۳)

<sup>1</sup>crete

قدیمی‌ترین سرریز پلکانی جهان احتمالاً سرریز پلکانی آکارناتیا<sup>۱۳</sup> در یونان است که حدود ۱۳۰۰ سال قبل از میلاد ساخته شده است (شکل ۱-۳) و دارای ۱۰/۵ متر ارتفاع، طول تاج ۲۵ متر است. پایین‌دست این سد پلکانی بوده و دارای ۱۴ پله می‌باشد، با قلوه‌سنگ‌های تراشیده شده‌ای که در بستر ملات فرو رفته‌اند، ساخته شده است. این سد لبریز شونده هنوز هم پا برجاست (چانسون، ۲۰۰۱).



شکل ۱-۳- سرریز پلکانی آکارناتیا (محمدی، ۱۳۸۴)

---

<sup>1</sup>akarnania

حدود ۱۰۰ سال قبل از میلاد سد نباتائین ساخته شده است (شکل ۱-۴).



شکل ۱-۴- سرریز سد نباتائین (محمدی، ۱۳۸۴)

از جمله سازه‌های پلکانی قدیمی شامل دو سرریز در آسیریا است. دو سرریز قدیمی دیگر، نیز سدهای رودخانه خوسر (یا سدهای آجیلاه) در عراق هستند این سدها تقریباً حدود ۶۹۴ سال پیش از میلاد به وسیله سینا کریب پادشاه آشور به منظور تأمین آب نینوا احداث شد. دامنه هر دو سد ذکر شده پلکانی است و طوری طراحی شده‌اند که آب رودخانه از روی تاج آن‌ها سرریز می‌شود. تعداد زیادی از این سازه‌ها در زمان امپراتوری‌های بزرگ رومیان ساخته شده‌اند که آثار آن در سوریه، لیبی و تونس پیدا شده است. یکی دیگر از این سازه‌ها که بسیار جلب توجه می‌کند سد کاسیرین است که طول تاج سرریز شونده آن ۱۵۰ متر است. سازه‌های کوچک‌تر دیگری مثل تاریگلات در لیبی، قصر خباز در سوریه و قود گرگور در تونس وجود داشته‌اند (چانسون، ۲۰۰۱).



در قرن نوزدهم سرریزهای لبریز شونده به وفور مورد استفاده قرار گرفتند، بسیاری از سازه‌ها مشتمل بر سدهایی از نوع مصالح بنایی و یا بتن بوده‌اند که سطح پله‌ای پایین دست آن‌ها مجهز به بلوک‌های گرانیتی بوده است. توسعه سرریز پلکانی را می‌توان منتسب به دو آبشار پله‌ای سد گلدگریک<sup>۱۴</sup> (استرالیا، ۱۸۹۰) و سد نیوکروتون<sup>۱۵</sup> دانست (چانسون، ۲۰۰۱). شکل (۱-۵) سرریز سد نیوکروتون را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۵- سرریز سد نیوکروتون

سرریز سد نیوکروتون احتمالاً اولین شوت پله‌ای بوده که برای به حداکثر رسانی استهلاک انرژی طراحی شده است (چانسون، ۲۰۰۱).

پل الله وردی خان (سی و سه پل) که بر روی رودخانه زاینده رود در قرن ۱۰۰۰ هجری ساخته شده است، که یکی از قدیمی‌ترین سازه‌های بنایی است که در پایین دست آن از سرریز پلکانی استفاده شده است. این پل ۲۹۵ متر طول و ۱۳/۷۵ متر عرض دارد.

<sup>1</sup>gold greek 1890

<sup>2</sup>newcroton 1956

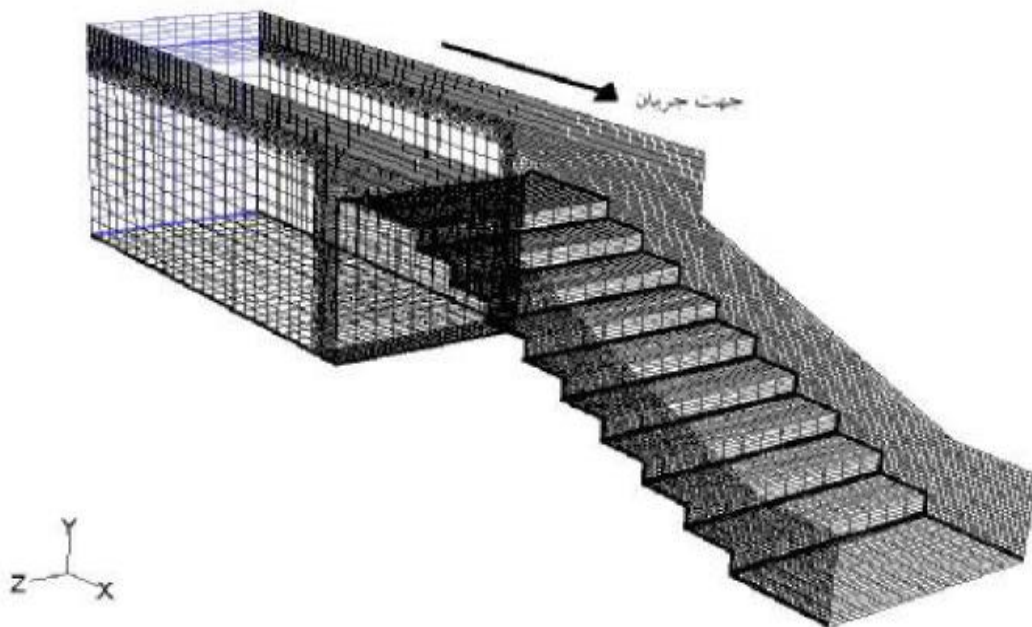
## ۱-۵- کاربرد سرریزهای پلکانی

طراحی این آبشارها از آن جهت مدنظر قرار گرفته‌اند که به‌خوبی می‌تواند به کاهش انرژی و هوادهی جریان بپردازد. یکی از بارزترین مشخصه‌های کاربردی سرریز پلکانی در مقایسه با سرریزهای دیگر استهلاک انرژی قابل ملاحظه در طول مسیر سرریز است که به واسطه‌ای آن انرژی جریان در پایین دست کاهش و میزان آبشستگی بستر رودخانه یا پایین دست به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و در نتیجه آن، سازه انرژی‌گیر متمرکز پایین دست، کوچک‌تر و با هزینه کمتر ساخته می‌شود (چانسون، ۲۰۰۱).

همچنین احداث سرریزهای پلکانی روگذر با بلوک‌های بتنی پیش ساخته بر روی بدنه سدهای خاکی، اهمیت این نوع سرریزها را دو چندان کرده است (چانسون، ۲۰۰۲). کاهش هزینه اجرای سرریز، کوتاه شدن زمان اجرا، بهره‌برداری و نگهداری آسان، افزایش میزان افت انرژی و در نتیجه کاهش هزینه اجرای حوضچه آرامش، از دلایل افزایش کاربرد این سرریزها هستند.

همچنین می‌توان از این سازه‌ها برای اکسیژن دهی جریان‌هایی که اکسیژن محلول در آن‌ها کم است یا در امتداد رودخانه‌ها و آبراهه‌ها وجود دارد کمک گرفت. با استفاده از سرریزهای پلکانی می‌توان تهویه جریان‌های آلود را نیز بالا برد. از سرریزهای پلکانی می‌توان برای فراهم کردن یک منظره زیبا به‌منظور جلب گردشگران و دادن جنبه هنری به محیط استفاده کرد. کاربرد دیگر آبشارهای پلکانی استفاده از آن‌ها به‌عنوان سدهای تنظیمی برای سیلاب‌های محتوی قلوه‌سنگ می‌باشد. این سیلاب‌ها در مناطق کوهستانی ممکن است بسیار مخرب باشد. احداث این سدها به شکل یک سری سازه‌های آبشاری متوالی در سراب جویبارها می‌تواند از تشکیل این سیلاب‌ها جلوگیری کند (چانسون، ۲۰۰۱).

سرریزهای پلکانی گابیونی متداول‌ترین نوع سرریزهای مورد استفاده در سدهای گابیونی هستند. پلکان‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای شدت استهلاک انرژی در امتداد سطح سرریز را افزایش داده و اندازه و هزینه احداث حوضچه آرامش را کاهش دهند. همچنین از پلکان‌ها برای استهلاک انرژی در کانال‌هایی که رگبارهای شدید را از خود عبور می‌دهند و دیوارهای حائل رودخانه استفاده می‌شود. در جزیره هنگ کنگ آبراهه‌های سیلابی در شیب‌های تند کوهپایه‌ای را برای افزایش استهلاک انرژی علاوه بر استفاده از انرژی‌گیرهای معمولی به طریق کانال‌های پلکانی طراحی نموده‌اند (چانسون، ۲۰۰۰). نمایی از یک سرریز پلکانی در شکل (۶-۱) نشان داده شده است.



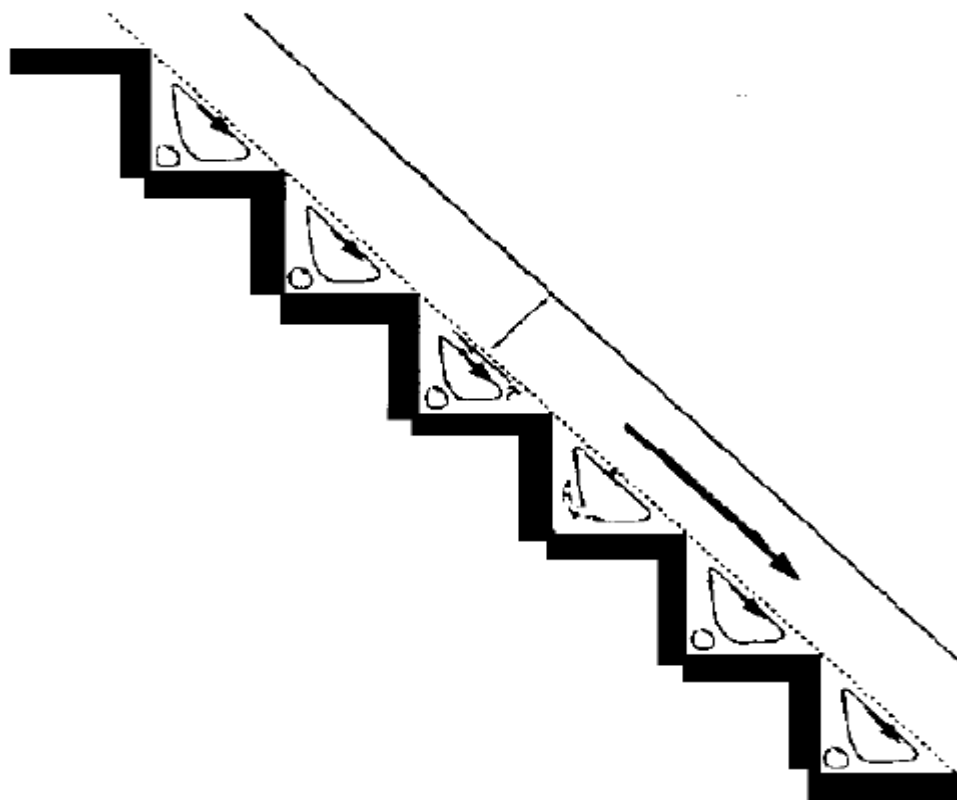
شکل ۶-۱- نمایی سه بعدی از سرریز پلکانی

## ۱-۶- انواع جریان روی سرریز پلکانی

رفتار جریان روی سرریز پلکانی به سه دسته تقسیم می‌شود:

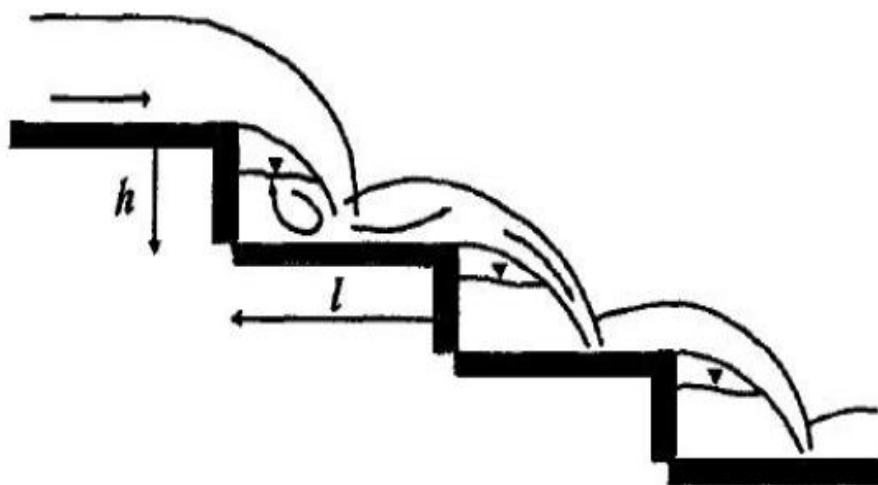
۱. رژیم جریان ریزشی
۲. رژیم جریان غیرریزشی
۳. رژیم جریان انتقالی

در جریان غیرریزشی جریان از روی هر پله سر می‌خورد و به صورت گردابی چرخش کرده وارد جریان شده و به سمت پایین دست حرکت می‌کند (شفاعی بجستان، ۱۳۸۵). نمایی از جریان غیرریزشی روی سرریز پلکانی در شکل (۷-۱) نشان داده شده است.



شکل ۷-۱- رژیم جریان غیرریزشی روی سرریز پلکانی

در جریان ریزشی، جریان از روی هر پله به صورت جریان فورانی سقوطی بر روی پله پایینی می‌ریزد و اتلاف انرژی از طریق جدا کردن جریان آب و هوا، اختلاط جریان آب بر روی پله‌ها و احتمالاً شکل‌گیری پرش هیدرولیکی ناقص صورت می‌گیرد (شفاعی بجستان، ۱۳۸۵). نمایی از جریان ریزشی روی سرریز پلکانی در شکل (۸-۱) نشان داده شده است.



شکل ۸-۱- جریان ریزشی روی سرریز پلکانی

در جریان انتقالی، افزایش جریان در یک سازه سرریز پلکانی ممکن است نوعی الگوی جریان واسط بین جریان ریزشی و غیرریزشی به وجود آورد، که آن را جریان انتقالی می‌نامند. خصوصیات الگوی جریان انتقالی بر روی هر پله و نیز از هر پله به پله بعدی تغییرات طولی عمده‌ای را از خود نشان می‌دهند به نظر می‌رسد که جریان بسیار نامنظم است و ظاهر آن کاملاً با جریان غیرریزشی فرق دارد.

## ۱-۷- اجزای تشکیل دهنده سرریزها

تفاوت کلی بین انواع سرریزها به خاطر اختلاف در شکل و یا اجزای تشکیل دهنده آنها است و گرنه در طراحی تمام سرریزها هدف واحدی دنبال می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت اکثر سرریزها از چهار بخش تشکیل شده‌اند که در زیر به‌طور مختصر به آنها می‌پردازیم.

### ۱-۷-۱- آستانه کنترل

این قسمت مهم‌ترین عضو یک سرریز است، زیرا وظیفه کنترل دبی خروجی از مخزن را به عهده دارد. این عضو مانع خروج جریان از مخزن در ترازهای پایین‌تر از سطح مشخص می‌شود. همچنین هرگاه تراز آب مخزن از سطح یاد شده بالاتر رود، آستانه کنترل، جریان‌های خروجی از سرریز را تنظیم خواهد کرد.

تأسیسات کنترل ممکن است شامل یک آستانه، لبریز، روزنه و یا لوله و یا اجزای دیگری باشد. رابطه دبی- اشل آب ممکن است ثابت یا متغیر باشد، اما در صورت استفاده از یک لبریز با تاج آزاد می‌توان رابطه دبی- اشل آب را تثبیت نمود و در صورت استفاده از یک سرریز درپچه‌دار یا یک لوله مجهز به شیر کنترل، این رابطه تغییر می‌کند.

تأسیسات کنترل ممکن است دارای شکل و موقعیت مختلفی باشند. لبریزهای با تاج آزاد می‌توانند مستقیم، منحنی شکل، ۷ شکل، گنکره‌ای و یا گرد باشند. روزنه‌ها ممکن است که در وضعیت افقی، شیب‌دار و یا قائم قرار گرفته باشند؛ همچنین لوله‌ها ممکن است قائم، افقی و یا شیب‌دار بوده و سطح مقطع آنها می‌تواند به شکل دایره‌ای، چهار گوش، مستطیلی، نعل اسبی و یا هر شکل دیگری باشد. یک سرریز می‌تواند به‌صورت لبه تیز، سهموی شکل، اوجی، لبه پهن و یا ترکیبی از این حالت‌ها و در بعضی موارد نیز داراری مقطع متغیری باشد. همچنین روزنه‌ها نیز به شکل‌های لبه تخت، لبه گرد و یا زنگوله‌ای در نظر گرفته می‌شوند و می‌توانند به‌طوری قرار گیرند که جریان را به‌صورت یک جریان

فورانی کاملاً فشرده و یا بدون فشردگی تخلیه نمایند. روزنه‌ها می‌توانند جریان را به‌صورت آزاد یا مستغرق و یا کاملاً مستغرق از خود عبور دهند. گوشه ورودی لوله‌های کوتاه ممکن است به‌صورت لبه تیز، لبه گرد و یا لبه زنگوله‌ای ساخته شود و اندازه داخلی آن‌ها در طول می‌تواند یکنواخت، واگرا و یا همگرا باشد. جریان در لوله‌های کوتاه ممکن است به‌صورت آزاد باشد و یا اینکه در تمام درازای لوله و یا بخشی از آن به‌صورت پر عمل کند (عباس افشار، ۱۳۷۶).

### ۱-۷-۲- کانال تخلیه

معمولاً جریانی که از آستانه کنترل می‌گذرد، توسط یک کانال تخلیه و یا آبراهه به بستر رودخانه در پایین دست سد می‌ریزد. البته استثناهایی هم وجود دارد که جریان به‌طور آزاد از تاج یک سد قوسی یا به‌طور مستقیم از امتداد تکیه‌گاه سد به‌صورت آبشار به سمت پایین دست آن ریزش می‌کند (عباس افشار، ۱۳۷۶).

ابعاد کانال تخلیه بر اساس نیازهای هیدرولیکی تعیین می‌شود.

### ۱-۷-۳- سازه پایه

وقتی جریان آب توسط یک سرریز از مخزن تا سطح آزاد آب در پایین دست سقوط می‌کند، ارتفاع استاتیک آن تبدیل به انرژی جنبشی می‌شود. بنابراین لازم است وسایل و تأسیساتی پیش‌بینی و تعبیه شود تا از فرسایش و آبخستگی در پاشنه سد جلوگیری کند و مانع بروز خسارت به پایین دست شود. در مواردی که لازم باشد از فرسایش جدی بستر رودخانه جلوگیری شود، باید انرژی اضافی آب قبل از ورود به رودخانه مستهلک گردد. این عمل ممکن است با ایجاد یک سازه مستهلک کننده انرژی انجام گیرد. حوضچه‌های آرامش، حوضچه‌های مجهز به بلوک و آستانه، حوضچه‌های با بارشکن، نمونه‌های از این سیستم‌ها هستند (عباس افشار، ۱۳۷۶).

## ۱-۷-۴- آبراهه ورودی و خروجی

آبراهه ورودی عضوی از سیستم است که هدایت آب را از مخزن سد به آستانه کنترل بر عهده دارد. آبراهه خروجی، آب سرریز شده را از سازه پایانه به رودخانه پایین دست منتقل می‌کند.

آبشستگی به فرسایش قسمتی از بستر یک آبراهه یا اطراف سازه احداث شده که در اثر سرعت جریان زیاد 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). اگرچه تاکنون تحقیقات زیادی به منظور تخمین عمق آبشستگی صورت گرفته و روابط زیادی به دست آمده است ولی پیچیدگی مسئله و دخالت عوامل مختلف در این پدیده سبب شده است که تحقیقات در این زمینه ادامه داشته باشد.

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.

در این جهت مهندسين و متخصصين علوم آب به خصوص مهندسين هیدرولیک، باید راه حلی برای اتلاف انرژی جریان خروجی از سرریز بدون ایجاد مشکل و با حفظ ایمنی سازه ارائه دهند. امروزه سرریزهای پلکانی بیشتر به منظور استهلاک انرژی جریان مورد استفاده قرار می‌گیرند و به علت استهلاک

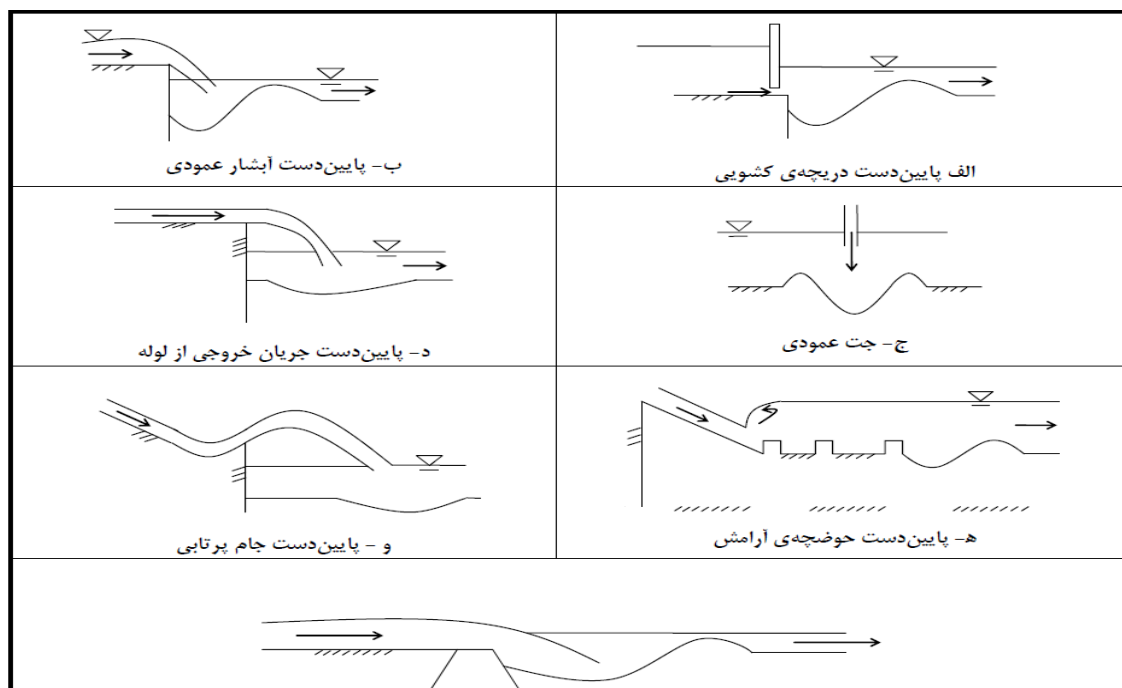


انرژی مناسبی که در طول سرریز ایجاد می‌نمایند موجب کاهش ابعاد مورد نیاز حوضچه آرامش واقع در پایین‌دست و در نتیجه اقتصادی‌تر شدن طرح می‌گردند و همچنین این اتلاف انرژی باعث کاهش عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی می‌شود (ادرشیر آذر، ۱۳۸۶).

## ۲-۲- آبشستگی

آبشستگی در حقیقت جابجایی ذرات توسط جریان از محل استقرار اولیه آن‌ها به مکان دیگری است. آبشستگی ممکن است در نتیجه تغییرات طبیعی جریان در آبراهه یا در نتیجه فعالیت‌های انسان مانند ساخت سازه‌ها در مسیر جریان یا برداشت مصالح بستر اتفاق افتد. به‌طور کلی آبشستگی در اثر اندرکنش نیروهای زیر حاصل می‌شود:

- نیروی محرک ناشی از جریان که در راستای جدا کردن ذره از بستر عمل می‌کند.
- نیروی مقاوم ناشی از اصطکاک ذرات و وزن ذره که در برابر حرکت ذره مقاومت کرده و مانع جدایی ذره از بستر می‌شود. حرکت یک ذره هنگامی آغاز می‌شود که نیروهای اعمال شده توسط جریان یعنی نیروی کشسانی و بالابرنده که باعث جدا شدن ذره از بستر می‌شوند، بر نیروی مقاوم ذره غالب آید.



شکل ۲-۱- آبشستگی موضعی پایین‌دست برخی از سازه‌های هیدرولیکی (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۹۰).

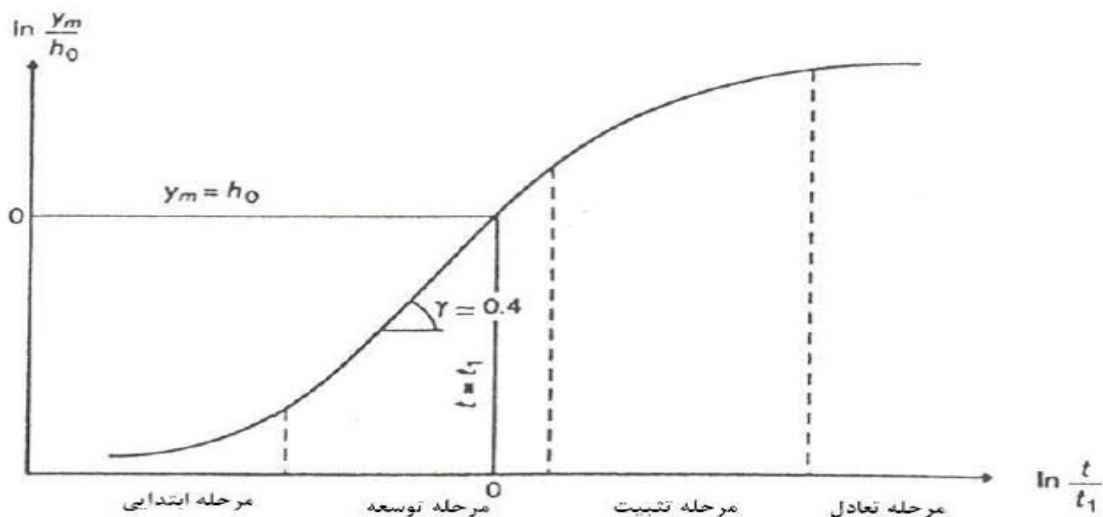
شکل (۲-۱) آبشستگی موضعی پایین دست در برخی از سازه‌های هیدرولیکی را نشان می‌دهد (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۹۰).

### ۲-۳- مراحل توسعه 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
- مرحله توسعه
- مرحله تثبیت
- مرحله تعادل

مرحله اول ظرفیت آبشستگی بالایی دارد و حفره آبشستگی در این مرحله آغاز می‌شود. در مرحله دوم عمق و ابعاد حفره آبشستگی گسترش می‌یابد. در مرحله سوم روند تغییرات نیم‌رخ بستر کاهش می‌یابد. در این مرحله، دیواره پایین دست حفره آبشستگی دستخوش تغییرات محسوسی می‌شود. در مرحله چهارم که مرحله تعادل است، تنها حرکت ذرات ممکن است درون حفره آبشستگی صورت گیرد به‌طوری که ذراتی که حرکت غلطشی دارند از درون حفره آبشستگی خارج نمی‌شوند. در این مرحله، با توجه به



شرایط جریان، ممکن است حتی جابجایی ذرات نیز متوقف شود هر کدام از مراحل آبشستگی در شکل (۲-۲) نشان داده شده است (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۹۰).

## ۲-۴- انواع آبشستگی

آبشستگی از جنبه‌های مختلف به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شود:

- 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 و آبشستگی در حالت آب حاوی رسوب است.
- آبشستگی از نظر وضعیت ذرات رسوب در حفره آبشستگی شامل آبشستگی استاتیکی و دینامیکی می‌شود.

## ۲-۴-۱- 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 (رانگا راجو، گارد، کوتیاری، 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.

## ۲-۴-۲- پایین افتادگی تراز رودخانه

پایین افتادگی بستر رودخانه‌ها، ناشی از فرسایش طولانی مدت در بستر رودخانه‌ها می‌باشد. پایین افتادگی تراز بستر به صورت یک پایین افتادگی کلی در بازه‌ای از رودخانه ظاهر می‌شود. این پایین افتادگی سبب می‌شود بازه، شیب طولی خود را به منظور تطبیق با نیازهای جریان و بار رسوبی حمل شده توسط جریان، تنظیم نماید. اگر بار رسوبی ورودی به بازه مورد نظر کم‌تر از ظرفیت حمل واقعی در آن بازه باشد، پایین افتادگی بستر از بالادست بازه آغاز می‌شود و به طرف پایین دست توسعه می‌یابد، به گونه‌ای که شیب طولی کلی بازه را کاهش می‌دهد. اما اگر آبراهه در پایین دست بازه مورد بحث، دارای ظرفیت حمل رسوب بیش‌تری باشد، پایین افتادگی از قسمت پایین دست بازه مورد نظر شروع می‌شود و به بالادست پیشروی می‌نماید و موجب افزایش شیب بازه مورد نظر می‌گردد (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۹۰).

## ۲-۴-۳- جابجایی آبراهه

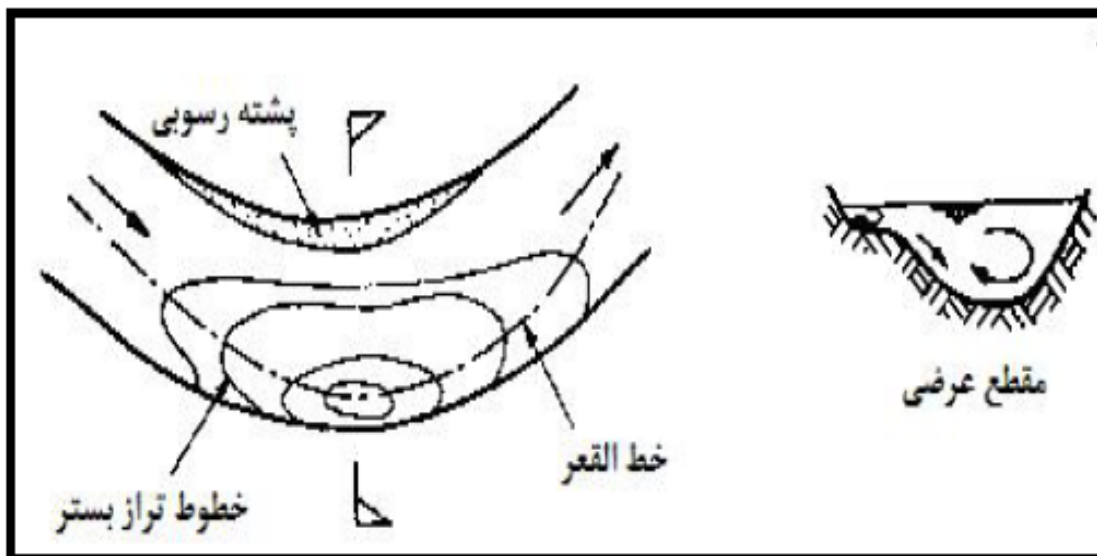
جابجایی آبراهه ممکن است به طور طبیعی، یا در نتیجه فعالیت‌های بشری اتفاق بیفتد. جابجایی بخشی از آبراهه به عنوان قسمتی از فرآیند پیشروی پیچانرود یا جابجایی بخش عمیق آبراهه به سمت جداره‌های آبراهه، می‌تواند مشکلاتی را برای رودخانه و سازه‌های هیدرولیکی مربوط به همراه داشته باشد. در بعضی موارد مانند وقوع سیلاب، جابجایی آبراهه ممکن است به سرعت اتفاق افتد. ولی در موارد دیگر ممکن است این امر به صورت تدریجی حادث شود. در نظر گرفتن پتانسیل جابجایی آبراهه، بخش مهمی از طراحی سازه‌های مرتبط با رودخانه است. به طور کلی اگر پتانسیل جابجایی رودخانه وجود داشته باشد، پی‌ها باید بر اساس جابجایی آبی بستر رودخانه طراحی شوند. همچنین با بررسی احتمال جابجایی بستر رودخانه در آینده، روش‌های حفاظتی و ساماندهی رودخانه می‌تواند جهت

جلوگیری یا محدود کردن جابجایی‌های بستر رودخانه انجام گیرد (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۹۰).

#### ۲-۴-۴- آبشستگی در خم رودخانه‌ها

یکی از مشخصه‌های جریان در قوس رودخانه‌ها، وجود جریان‌های حلزونی است که موجب افزایش آبشستگی در ساحل خارج خم می‌گردد. آبشستگی در خم‌ها ممکن است مربوط به پیش روی پیچانرود نیز باشد. آبشستگی خم که در شکل (۲-۳) نشان داده شده است یک فرآیند پیچیده است و به پارامترهای زیر بستگی دارد:

- انحنای خم
- نسبت عرض به عمق جریان
- خصوصیات جریان
- فرسایش پذیری جداره
- دانه‌بندی مصالح بستر



شکل ۲-۳- نمایی از آبشستگی جداره خارجی خم رودخانه و جریان ثانویه (میسن، ۱۹۹۳)

## ۲-۴-۵- آبشستگی در محل اتصال آبراهه‌ها

نوعی آبشستگی است که در محل تقاطع دو رودخانه یا تقاطع آبراهه‌ها در یک رودخانه شریانی ایجاد می‌شود (می، ۲۰۰۲).

## ۲-۴-۶- آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی

وجود تنگ‌شدگی مقطع در مسیر جریان باعث افزایش سرعت جریان و بالا رفتن قدرت فرسایشی جریان در این محل می‌شود. آبشستگی ایجاد شده در این حالت را آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی می‌گویند. آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی به‌طور معمول نتیجه محدود کردن عرض رودخانه می‌باشد. به‌عنوان مثال تکیه‌گاه‌های کناری پل‌ها و پایه‌های پل که در وسط آبراهه احداث می‌گردند، باعث کاهش عرض مجرا و در نتیجه آبشستگی می‌شوند (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۹۰).

## ۲-۴-۷- آبشستگی موضعی

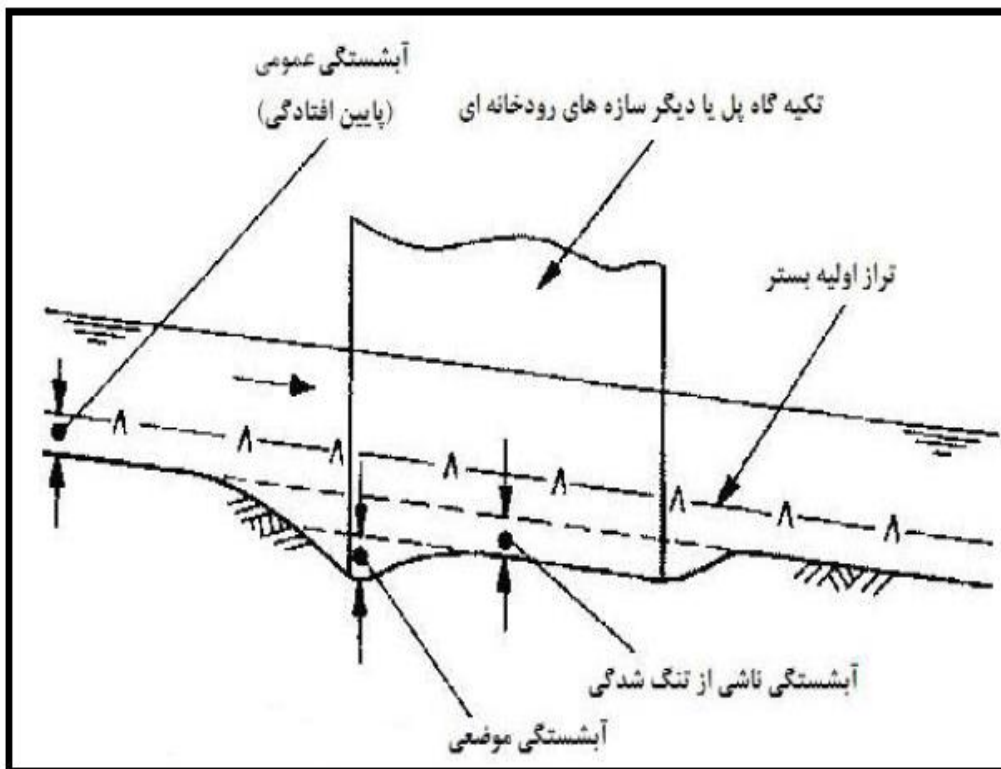
این نوع آبشستگی ناشی از اثر موضعی سازه بر روی الگوی جریان می‌باشد که به‌صورت موضعی در پایین‌دست سرریز پلکانی رخ می‌دهد. این نوع آبشستگی ممکن است به‌تنهایی و یا به همراه آبشستگی‌های دیگر باشد. آبشستگی موضعی بر اثر ایجاد موانعی مانند پایه‌های پل‌ها، تکیه‌گاه‌های کناری و آبشکن‌ها در مسیر جریان و در اطراف این موانع یا پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی رخ می‌دهد. این موانع می‌توانند سرعت موضعی جریان و آشفتگی آن را افزایش دهند و بسته به شکل سازه می‌توانند گردابه‌هایی ایجاد نمایند که نیروهای فرسایشی اضافی را بر بستر اطراف سازه اعمال نمایند. در نتیجه، نرخ حرکت رسوب و فرسایش به‌صورت موضعی در حوالی این سازه‌ها افزایش می‌یابد و منجر به پایین رفتن موضعی بستر نسبت به تراز عمومی بستر آبراهه می‌گردد (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۹۰).

## ۲-۴-۸- آبشستگی کل

عمق آبشستگی کل مرتبط با یک سازه مشخص، از مجموع سه آبشستگی زیر به دست می‌آید:

- آبشستگی عمومی
- آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی
- آبشستگی موضعی

تراز موضعی بستر حاصل از هر کدام از آبشستگی‌های فوق، به‌عنوان شرایط اولیه برای تخمین قسمت دیگر به کار می‌رود (رانگا راجو، گارد، کوتیاری، ۱۹۹۲). شکل (۲-۴) نمونه‌ای از سه قسمت آبشستگی کل را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴- اجزای آبشستگی (می، ۲۰۰۲)

## ۲-۴-۹- آبشستگی در آب زلال و آب حاوی رسوب

آبشستگی در آب زلال در شرایطی اتفاق می‌افتد که مواد بستر در بالادست محدوده آبشستگی در جای خود ثابت بوده و به آستانه حرکت نرسیده باشند. به عبارت دیگر جریان ورودی از بالادست حاوی رسوب نباشد. هنگامی که سرعت جریان افزایش می‌یابد، میزان آبشستگی آب زلال تا زمان آغاز حرکت کلی مصالح بستر افزایش می‌یابد. از این زمان به بعد، تغذیه رسوبات از بالادست آغاز می‌شود. در این حالت جریان از بالادست حاوی رسوب است. آبشستگی در آب حاوی رسوب سریع‌تر به مقدار حداکثر می‌رسد (رانگا راجو، گارد، کوتیاری، ۱۹۹۲).

## ۲-۴-۱۰- 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 به جای 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).



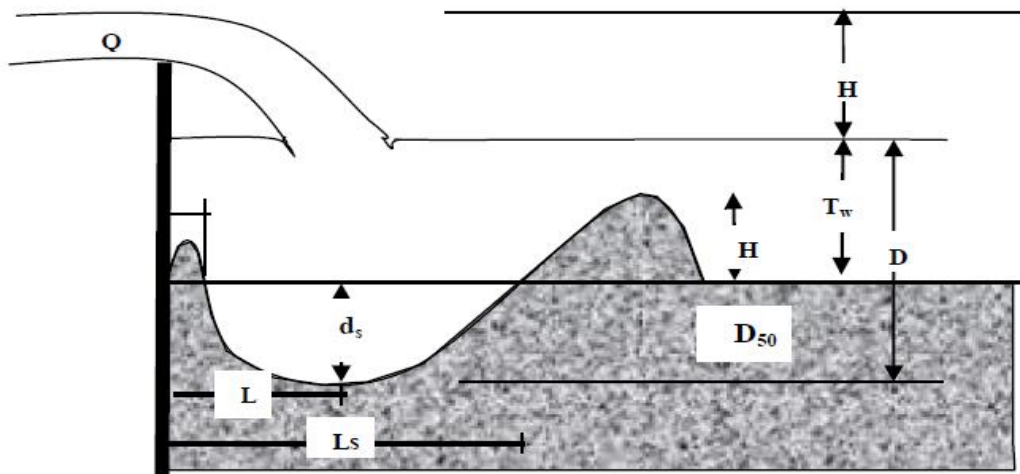
منابع و داده‌های مورد نیاز برای تخمین عمق آبشستگی اطراف سازه‌های هیدرولیکی به شرح زیر می‌باشد:

- دبی جریان
- هندسه مقطع آبراهه
- عمق جریان
- مشخصات مصالح بستر
- سرعت جریان
- خصوصیات سازه‌های هیدرولیکی که تعیین عمق آبشستگی در اطراف آن‌ها مورد نظر است.

#### ۲-۴-۱۱- آبشستگی ناشی از جت ریزشی

جریان خروجی از سازه‌های هیدرولیکی اغلب به صورت جت می‌باشد که ممکن است موجب تغییرات زیادی در توپوگرافی رودخانه و اطراف این سازه‌ها گردد و خسارت‌های سازه‌ای و زیست محیطی قابل توجهی به همراه داشته باشد. بسته به عمق پایاب، جت ریزشی می‌تواند به صورت آزاد یا مستغرق باشد. هرگاه مقدار عمق پایاب از مقدار ارتفاع ریزش بیش‌تر باشد، جت مستغرق است. جت‌های ریزشی را می‌توان به دو دسته جت‌های ریزشی عمودی و جت‌های ریزشی مایل نیز تقسیم‌بندی نمود.

جریان در جت‌های عمودی، به‌طور عمودی با بستر برخورد می‌کند و حفره آبشستگی در جهت طولی و عرضی متقارن است، درحالی که در جت‌های ریزشی مایل، جت با زاویه به بستر برخورد می‌نماید و حفره آبشستگی فقط در جهت عرضی متقارن است. شکل (۲-۵) نمایی از آبشستگی ناشی از جت را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴- ایشستگی ناشی از جت ریزشی

## ۲-۵- الگوی جریان

الگوی جریان در جت‌های ریزشی عمودی و جت‌های ریزشی مایل متفاوت است.

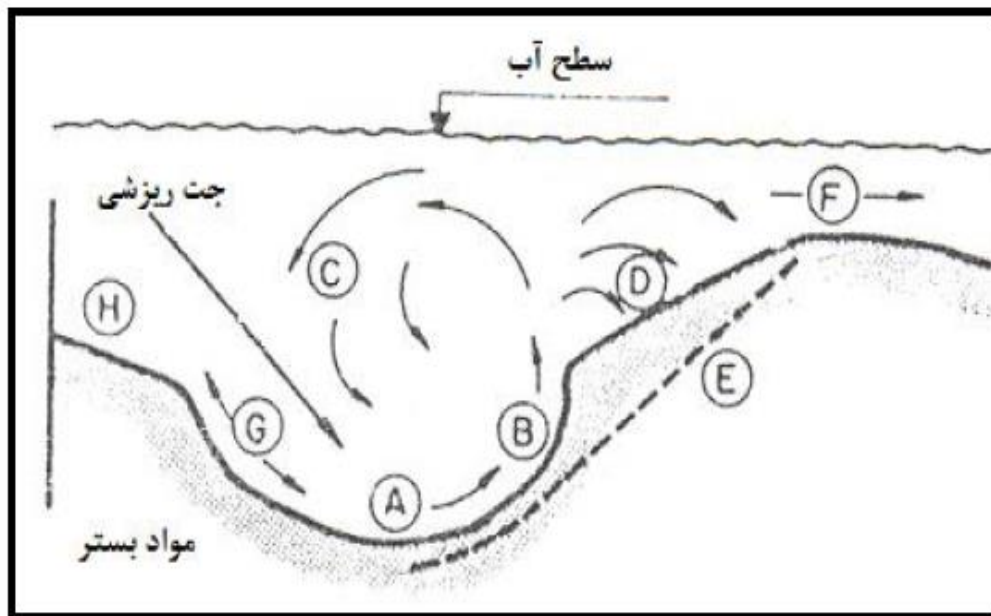
### ۲-۵-۱- الگوی جریان در جت‌های ریزشی عمودی

پس از برخورد جت عمودی به بستر، آیشستگی آغاز شده و ابتدا جت با زاویه حدود ۱۸۰ درجه به اطراف منحرف می‌شود. پس از آن توسعه و افزایش عمق آیشستگی باعث افزایش فاصله برخورد جت با بستر (ارتفاع ریزش جت) شده و جت از مرز حفره آیشستگی تبعیت کرده و با زاویه انحراف کم‌تری به اطراف منحرف می‌شود. در جت عمودی، شکل حفره آیشستگی در پلان متقارن بوده و رسوبات خارج شده از حفره آیشستگی در اطراف حفره ته‌نشین می‌شود (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۹۰).

### ۲-۵-۲- الگوی جریان در جت‌های ریزشی مایل

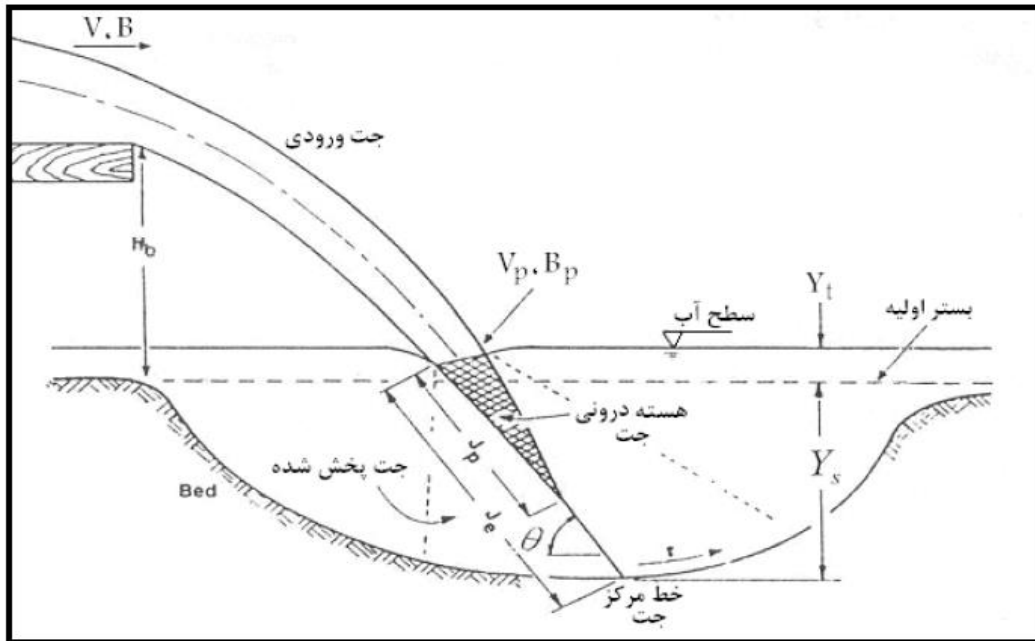
در جت ریزشی مایل نیز فرآیند آیشستگی اولیه خیلی سریع است. شکل (۲-۶) الگوی جریان داخل حفره آیشستگی برای یک جت ریزشی مایل را نشان می‌دهد. در این حالت جت پس از برخورد با بستر، مواد فرسایش یافته را از ته حفره آیشستگی (محدوده A) شسته و همراه خود به سمت پایین‌دست (محدوده B) انتقال می‌دهد. در این محدوده بخشی از جت به همراه مصالح منحرف شده و تقریباً رو به

بالا بلند می‌شود و قسمتی از جریان به سمت بالادست (محدوده C) بر می‌گردد و وارد جریان بالادست می‌شود. رسوبات همراه این جریان به صورت معلق داخل حفره باقی می‌مانند. بقیه جریان به سمت پایین دست منتقل شده و بخشی از مواد فرسایش یافته همراه خود را روی سطح شیب‌دار در محدوده D ته‌نشین می‌کند و همراه بقیه ذرات به سمت پایین دست (محدوده F) حرکت می‌کند. تراز بستر در محدوده D به طور متناوب افزایش می‌یابد و مواد ته‌نشین شده در این سطح به تدریج سر خورده به داخل حفره اصلی باز می‌گردد. در نتیجه با گذشت زمان، سطح D تغییر یافته و سطح E پایدار می‌شود. در محدوده G مقداری از مواد بستر دارای حرکت نوسانی می‌باشد. در حالی که در محدوده H مواد بستر بدون حرکت هستند. روند فوق تا زمانی که میزان فرسایش در محدوده A با نرخ مواد فرستاده شده به پایین دست برابر شود و شرایط تعادل حاصل شود پیوسته تکرار می‌شود. پس از قطع جریان، هر دو سطح بالادست و پایین دست حفره با زاویه قرارگیری مواد بستر  $\emptyset$ ، به داخل حفره ریزش می‌کند (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۹۰).



شکل ۲-۶- الگوی جریان جت ریزشی مایل داخل حفره (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۹۰)

هنگامی که جت آب جاری می‌شود، به دلیل اغتشاش داخلی، تنش برشی هوای اطراف آن و تأثیر کشش سطحی رو به انهدام می‌رود. حتی ممکن است جت به صورت اسپری متشکل از ذرات آب با قطره‌های گوناگون درآید. زاویه برخورد جت با سطح  $\theta$  در فرآیند آبشستگی به خصوص شکل حفره تأثیر می‌گذارد. مطابق شکل (۶-۲) جت پس از برخورد به سطح پایاب، به دو ناحیه مجزا تقسیم می‌شود.



شکل ۷-۲- شکل و خصوصیات یک جت ریزشی مایل (هافمن و بوجی، ۱۹۹۳)

## ۶-۲- آبشستگی در پایین دست سرریزها

### سرریزهای پرتابی

جریان‌های سیلابی داخل مخزن سدها غالباً موجب به کار افتادن سرریزها می‌گردد. این سرریزها انواع مختلفی دارند که در نهایت به یک سازه مستهلک کننده انرژی و یا یک سطح خاص منتهی می‌گردند. سازه مستهلک می‌تواند حوضچه مشخصی باشد و یا اینکه در کف طبیعی رودخانه جاری شود. چنانچه حوضچه آرامشی وجود نداشته باشد، جریان سیلابی می‌تواند باعث ایجاد آبشستگی ناشی از برخورد جت به کف رودخانه گردد. شکل نهایی حاصل از آبشستگی به خصوصیات، محل سنگ کف چسبیده و

یا غیر چسبنده بودن مواد سازنده آن بستگی دارد. مطالعه این نوع آبشستگی‌ها معمولاً سه هدف کلی را دنبال می‌کند.

- عدم وجود خطر برای سازه به خاطر شکست سازه‌ای و یا افزایش زه آب.
- بی‌خطر بودن برای کف رودخانه در پایین‌دست و همچنین کناره‌های آن
- جلوگیری از شکل یافتن تپه حاصل از مواد فرسایش یافته، که امکان دارد سطح پایاب را به پایین‌دست سد افزایش دهد.

## ۲-۷- مروری بر مطالعات انجام شده

مطالعه آبشستگی موضعی پیشینه‌ای مستمر در طول ۵۰ سال گذشته دارد. بررسی منابع نشان می‌دهد محققین زیادی در این زمینه مطالعه داشته‌اند. همچنین مطالعات وسیعی بر روی پلکان‌های با کف پله صاف طی سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۷ انجام گردیده است. در این راستا یک کنفرانس خاص مسائل سرریز پلکانی در سال ۲۰۰۰ در زوریخ سویس برگزار گردید و جمع بندی کلیه تحقیقات پژوهشگران طی یک کتاب منتشر گردید (مینور و هگر، ۲۰۰۰). و چانسون (۲۰۰۰) کتاب جامعی ماحصل تحقیقات چند ساله خود و دیگر محققان جهت سرریزهای پلکانی تهیه کرد. در سال‌های ۲۰۰۲ تاکنون پیرامون درک هر چه بیشتر هیدرولیک جریان روگذر سرریز پلکانی (چانسون، مینور، هگر، بوز، ماتوس) از فعال‌ترین محققان بوده‌اند (فریزل، ۲۰۰۶).

محققین مختلفی نیز به بررسی جریان عبوری از روی سرریزهای پلکانی پرداخته‌اند که در ادامه به بخشی از آن‌ها اشاره می‌شود.

۱. 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 به عنوان تابعی از قطر مجرای آبی، دبی و همچنین دانه بندی بیان شد.

۲. ایت و همکاران (۱۹۸۴) تحقیقاتی به منظور برآورد ابعاد آبشستگی انجام دادند. نتایج ایشان نشان داد که عدد فرود پایین دست کالورت عامل مؤثری می باشد. همچنین ابعاد حفره آبشستگی به شدت تخلیه و قطر متوسط دانه ها وابسته است و روابطی برای تعیین ابعاد حفره آبشستگی برای انواع مواد بستر تعیین شد.

۳. سورنسن احتمالاً از اولین افرادی بوده است که تحقیقاتی را در زمینه هیدرولیک سرریزهای پلکانی انجام داده است (سورنسن، ۱۹۸۵) و اسری، هورنر و سورنسن جزو اولین پژوهشگرانی بوده اند که جریان از روی سرریزهای پلکانی را به دو نوع رژیم جریان ریزشی و غیرریزشی تقسیم بندی نموده اند.

۴. مسن (۱۹۸۵) بررسی هایی را در مورد دقت روابط مختلف ارائه شده توسط محققین انجام داد و بر اساس این تحقیقات روابط به دست آمده برای تعیین حداکثر عمق آبشستگی را به پنج گروه تقسیم بندی کرد (مسن، ۱۹۸۵).

۵. در راستای افزایش میزان استهلاک انرژی سرریز پلکانی طی سالیان اخیر کوشش های متعددی توسط تعدادی از محققان، نظیر پلکان با شیب معکوس کف پله، تمهید آستانه در انتهای لبه پلکان های متوالی یا یک در میان، استفاده از لبه نیم دایره ای در انتهای لبه پلکان، ترکیب پله های با ارتفاع های متفاوت و... انجام گرفته است. از جمله روابط شوکلیچ، ورونس (A)، ورونس (B)، اگنبرگر، هارتونگ، فرانکی، دامل (A)، دامل (B)، چی وپادیر، بی سازو تی شاب، چی و کونگ، مارتینز (B)، تاراموویچ، ماکادو و سوفرلک بود. بر اساس مطالعات میسن (۱۹۸۵) روابطی که از شدت جریان، ارتفاع ریزش و اندازه ذرات در پیش بینی حداکثر عمق آبشستگی استفاده می کنند به قدر کافی دقت دارند و وارد کردن پارامترهای دیگر، تأثیر قابل توجهی ندارد.

۶. الیس (۱۹۸۹) و پیرس و همکاران (۱۹۹۱) پیشنهاد دادند که اتلاف انرژی در جریان ریزشی بیشتر از جریان غیرریزشی است. در این مطالعه، جریان ریزشی در دبی‌های پایین و جریان غیرریزشی برای دبی‌های بالاتر اتفاق می‌افتد (چانسون، ۲۰۰۰).

۷. امانیان (۱۹۹۳) در مطالعاتی که روی آبشستگی پایین دست جام پرتاب کننده انجام داده، روابط حداکثر عمق و برخی از خصوصیات هندسی حفره آبشستگی پایین دست این نوع سرریزها را ارائه نموده است (امانیان، ۱۹۹۳).

۸. هافمن (۱۹۹۸) با بکار بردن قانون دوم نیوتن رابطه نیمه تحلیلی برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی ارائه نمود. وایتلر و همکاران (۱۹۹۸) با استفاده از روابط و مطالعات بوهرر روش جدیدی را در پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی ارائه دادند که به نام روش آناندال خوانده می‌شود. در این روش با در نظر گرفتن خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها در اعماق مختلف و شاخص فرسایش‌پذیری، انرژی جنبشی لازم جهت فرسایش مصالح بستر در هر عمق به دست می‌آید، سپس این انرژی با انرژی موجود جریان مقایسه می‌شود و در نهایت عمق آبشستگی به دست می‌آید.

۹. پگرام و همکاران (۱۹۹۹) تحقیق جامعی را با هدف بررسی تأثیر مشخصات هندسی پله‌ها و اثر مقیاس بر روی نوع جریان و میزان افت انرژی، با فرض ایجاد شرایط تعادل در پایین دست تندآب پله‌ای انجام دادند. برای انجام این تحقیق دو سری سرریز پله‌ای با شیب ۱/۶:۱ (افقی: عمودی) و با شکل مشابه، با ارتفاع پله‌های ۰/۲۵ تا ۲ متر و با مقایس ۱:۲۰ و ۱:۱۰ ساخته شده و مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین اتلاف انرژی در سرریز پلکانی با سرریز اوجی صاف مقایسه شد. در این تحقیق با اندازه‌گیری انرژی جریان در پایین دست سرریز پلکانی و اوجی مشابه از نظر ابعاد، میزان اتلاف انرژی در سرریز پلکانی بیشتر از سرریز صاف گزارش شده است. همچنین نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که استهلاک انرژی با افزایش شیب سرریز کاهش می‌یابد (پگرام، ۱۹۹۹).

۱۰. قدسیان و همکاران (۱۹۹۹) حداکثر عمق آبشستگی را در پایین دست سرریزهای ریزشی آزاد بررسی کردند. فرهودی و ناصحی (۱۹۹۹) پروفیل آبشستگی را در پایین دست آبشارهای قائم مطالعه نمودند.

۱۱. بالاچندار و کلس (۲۰۰۰) پروفیل آبشستگی بستر را با استفاده از تحلیل تصویری و ویدویی بررسی کرده است. در مطالعات خود نشان داده‌اند که دینامیک محل آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی به عمق پایاب وابسته می‌باشد (بالاچندار و کلس، ۱۹۹۸).

مطالعات گذشته نشان می‌دهد که عواملی چون سرعت جریان، زاویه جت جریان، دانه‌بندی رسوبات ( $d_{50}$ )، زاویه گسیختگی رسوبات، عدد فرود جرمی، در میزان عمق آبشستگی تأثیر بسزای دارد (سلامتیان ۱۳۸۴). معادلات حاکم بر آبشستگی توسط، (هانتروز ۱۹۵۰، روس ۱۹۳۵، کاردوس ۱۹۹۹، کوتولاس ۱۹۶۰، بلاسیدل ۱۹۸۰) مطالعه و عوامل مؤثر بر عمق گودال آبشستگی مورد بررسی قرار گرفت.

۱۲. چانسون (۲۰۰۰) به بررسی خصوصیات جریان غیرریزشی روی سرریز پلکانی و تأثیر آن روی آبشستگی پایین دست پرداخته است از نتایج این تحقیقات مشخص شد که در سرریز پلکانی حدود ۴۸ تا ۶۳ درصد انرژی مستهلک می‌شود (چانسون، ۲۰۰۰).

۱۳. چانسون (۲۰۰۱) و همچنین چمنی و راجاراتنام (۱۹۹۴) تحقیقات زیادی را بر روی رژیم جریان تیغه‌ای انجام داده و روابطی را نیز جهت تعیین میزان افت انرژی در این نوع از رژیم جریان ارائه نمودند (چانسون، ۲۰۰۱ و چمنی، ۱۹۹۴).

۱۴. اوهوتسو و همکاران (۲۰۰۴) روشی را برای طراحی سرریزهای پلکانی ارائه کردند، به این ترتیب که به ازای مقادیر ثابت شیب، عرض، ارتفاع سرریز، ارتفاع پله‌ها و دبی جریان در سرریز، مقدار انرژی باقی مانده، عمق و سرعت آب در پایین دست سرریز پلکانی را محاسبه کردند. این محققین روش طراحی گام به گام سرریز پلکانی را با معادلات هیدرولیکی برای طراحان ارائه داده‌اند، در صورتی که بهینه سازی



سرریز پلکانی جهت دستیابی به بیشترین میزان استهلاک انرژی در الگوریتم طراحی مورد توجه نبوده است (اوهوتسو، ۲۰۰۴).

۱۵. عظمت اله و همکاران (۲۰۰۵) مدلی برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی با استفاده از روش شبکه‌های عصبی ارائه نمودند و آن را با روش‌های تجربی مقایسه کردند.

۱۶. قدسیان و همکاران (۲۰۰۶) به بررسی آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی پرداختند و روابطی را برای تخمین ابعاد حفره آبشستگی در اثر جت‌های ریزشی دایره‌ای و مستطیلی ارائه کردند که شکل کلی آن به صورت رابطه زیر است:

$$\frac{\phi}{Y_t} = a \left( \frac{Y_t}{H_c} \right)^b \left( Fr_d \frac{R}{H_c} \right)^c \quad (1-2)$$

که در رابطه (۱-۲):

R: شعاع هیدرولیکی جت

∅: یکی از ابعاد حفره آبشستگی (طول، عرض، عمق آبشستگی) در پایین‌دست حفره است.

V: سرعت جت خروجی

S: نسبت چگالی مصالح به چگالی آب

a, b, c: ضرایب ثابت هستند.

۱۷. تنا و ایمان امیرقلو (۲۰۱۰) تأثیر عمق پایاب بر محل آبشستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی را مورد بررسی قرار داده‌اند، بر اساس آزمایش‌های خود به این نتیجه رسیدند که با افزایش عمق پایاب

حداکثر عمق آبخستگی کاهش پیدا کرده و محل آبخستگی از سرریز دورتر می‌شود (تنا و ایمان امیراقلو، ۲۰۱۰).

۱۸. تنا و همکاران (۲۰۱۱) پروفیل آبخستگی در پایین دست سرریز پلکانی را مورد بررسی قرار داده، وی عمق آبخستگی را بر اساس تعداد پله، زاویه سرریز، عمق پایاب به دست آورد و از دو نوع دانه‌بندی با مواد غیر چسبنده در پایین دست سرریز پلکانی استفاده کرد (تنا، ۲۰۱۱).

۱۹. احمدپار و بیات (۱۳۷۲) به بررسی تأثیر شیب کف پله‌ها در سرریز پلکانی پرداختند. بر اساس آزمایش‌های خود به این نتیجه رسیدند که با افزایش دبی جریان میزان افت انرژی کاهش می‌یابد. در اثر پلکانی شدن سرریز میزان قابل توجهی از انرژی، مستهلک می‌گردد و در نتیجه ابعاد حوضچه آرامش مورد نیاز کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه پله، میزان افت انرژی کاهش می‌یابد (احمدپار و بیات، ۱۳۷۲).

۲۰. محبوبی (۱۳۷۵) اثر قطر مصالح بر میزان حداکثر عمق آبخستگی ناشی از جت‌های ریزشی آزاد را مورد بررسی قرار داد و رابطه‌ای برای برآورد حداکثر عمق آبخستگی در پایین دست جت‌های ریزشی ارائه نمود (محبوبی، ۱۳۷۵).

۲۱. دائمی و همکاران (۱۳۷۶) آبخستگی ناشی از جت‌های ریزشی آزاد را مورد بررسی قرار دادند و بجای ارائه رابطه‌ای مستقل، نتایج مطالعات خود را با برخی روابط موجود بررسی و مقایسه کردند (دائمی و امانیان و زراتی، ۱۳۷۶).

۲۳. صادقی (۱۳۸۲) افت انرژی در سرریزهای پلکانی را با کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی بررسی نمود. تحقیق او با هدف تولید، تربیت و آموزش شبکه‌های عصبی به منظور تخمین افت انرژی بر روی سرریز پلکانی انجام گرفت که این کار با استفاده از یک سری داده‌های آماری صورت پذیرفت. دقت نتایج

حاصله نشان داد که با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توان اقدام به تعیین میزان استهلاک انرژی و طراحی این سرریز نمود (صادقی، ۱۳۸۲).

۲۳. دائمی و همکاران (۱۳۷۵) آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی آزاد را مورد بررسی قرار داده‌اند در این مطالعات اثرات قطر مصالح ( $d_{50}$ )، عمق پایاب ( $y_t$ )، دبی در واحد عرض ( $q$ ) و ارتفاع ریزش ( $H$ ) مورد بررسی قرار گرفته است (دائمی و همکاران، ۱۳۷۵).

۲۴. شفاعی بجستان (۱۳۸۵) به بررسی و تعیین حداکثر عمق آبشستگی پایین‌دست سرریز پلکانی در شرایط جریان ریزشی پرداختند و روابطی را برای حداکثر عمق آبشستگی پایین‌دست سرریز پلکانی بر اساس زاویه سرریز و تعداد پله‌ها ارائه دادند (شفاعی بجستان، ۱۳۸۵).

۲۵. اردشیر آذر (۱۳۸۶) اثر دانه‌بندی مصالح بر حداکثر عمق آبشستگی پایین‌دست سرریزهای آزاد را بررسی کرد. او در مطالعات خود رابطه بدون بعدی ارائه داد که هم برای مصالح یکنواخت پایین‌دست و هم غیریکنواخت کاربرد دارد و همچنین در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی عوامل مؤثر در میزان آبشستگی پایین‌دست سرریزهای ریزشی آزاد با تکیه بر اثر غیر یکنواختی مصالح بر حداکثر عمق آبشستگی پرداخته شده است. با تحلیل داده‌های به دست آمده در آزمایشگاه رابطه جدیدی برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی ارائه شده است ( اردشیر آذر ۱۳۸۶).

۲۶. شفاعی بجستان (۱۳۸۸) به بررسی پیش‌بینی ابعاد حفره آبشستگی ناشی از جت در پایین‌دست سرریزهای جامی شکل با استفاده از مدل عصبی و عصبی فازی پرداخته است. که در این تحقیق روش مناسبی را جایگزین روابط سنتی رگرسیونی جهت پیش‌بینی ابعاد حفره آبشستگی پایین‌دست سرریز جامی شکل ارائه داده است. در این تحقیق علاوه بر اینکه پارامترهای عمق، عرض و مکان حداکثر آبشستگی نسبت به لبه جام پیش‌بینی شد (شفاعی بجستان ۱۳۸۸).

۲۷. اکبری (۱۳۹۰) 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 (اکبری ۱۳۹۰).

اگرچه محققین رابطه‌ای ارائه نکرده‌اند لیکن نتایج خود را با برخی روابط موجود مقایسه کرده‌اند. نتایج نامبردگان به شرح زیر است:

هر رابطه تجربی، محدود در دامنه مورد آزمایش است. خارج از دامنه مورد آزمایش نتایج غیر واقعی را نتیجه می‌دهد.

➤ رابطه ورونزه ب<sup>۱۶</sup> (۱۹۳۷) که توسط USBR توصیه شده است در مصالح ریزدانه عمق آبشستگی را کم‌تر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند. این رابطه برای مصالح ریزدانه با قطر متوسط کمتر از ۵ میلی‌متر توصیه شده است.

➤ رابطه کوتولاس<sup>۱۷</sup> (۱۹۶۷) در کلیه آزمایش‌ها میزان آبشستگی را بیش از مقدار مشاهده شده نشان می‌دهد و این امر در مصالح ریزدانه بارزتر است.

➤ رابطه میسن<sup>۱۸</sup> (۱۹۸۵) عمق آبشستگی را کم‌تر از مقدار واقعی نشان می‌دهد. رابطه میسن در مصالح درشت‌دانه جواب‌های بهتری نسبت به مصالح ریزدانه به دست می‌دهد.

➤ رابطه امانیان<sup>۱۹</sup> (۱۹۹۳) برای جت‌های خروجی از جام پرتابی ارائه شده است با این حال روند منطقی و مناسبی برای آبشستگی ارائه می‌دهد.

➤ رابطه شوکلیتش<sup>۲۰</sup> (۱۹۳۲) مقدار آبشستگی را اندکی بیش از مقادیر مشاهده‌ای نشان می‌دهد.

➤ در اکثر روابطی که دارای ترم اندازه مصالح هستند، عمق آبشستگی را در بستر با مصالح ۰/۳ میلی‌متر بیش از واقع نشان می‌دهند.

---

<sup>1</sup>Veronese-B

<sup>2</sup>Kotoulas

<sup>3</sup>masen

<sup>4</sup>amanian

<sup>5</sup>Schoklitsch

با توجه به اهمیت روزافزون این سرریزها تحقیقات و مطالعات فراوانی در رابطه با هیدرولیک جریان و عوامل مؤثر بر استهلاک انرژی، در سرریزهای پلکانی صورت پذیرفته است. تحقیقات انجام گرفته، مبتنی بر آزمایش‌های هیدرولیکی بر روی مدل‌های فیزیکی بوده و یا عملکرد هیدرولیکی جریان بر روی این سرریز توسط روش‌های عددی شبیه‌سازی شده است. که بر این اساس هیدرولیک جریان در سرریزهای پلکانی سه نوع می‌باشد (راجاراتنام، ۱۹۹۰ و چانسون، ۱۹۹۴).

نتیجه حدود نیم قرن فعالیت محققین و مهندسین در زمینه آبشستگی، ارائه بیش از چهل فرمول برای تخمین عمق آبشستگی بوده است. روابط ارائه شده عمدتاً به صورت توابعی از متغیرهای وابسته هستند که با پردازش داده‌های آزمایشگاهی و یا صحرایی به کمک روش‌های آماری به دست آمده‌اند و هر معادله به صورت انفرادی فقط نقش عوامل محدودی (یک یا دو عامل) را ارزیابی می‌کند. به همین دلیل کاربرد این معادلات برای برآورد میزان عمق آبشستگی در یک موقعیت خاص، معمولاً نتایج متفاوتی داده و انتخاب معادله‌ای که نتایج آن با واقعیت تطابق بیشتری داشته باشد اساساً اگر امکان پذیر باشد، امر ساده‌ای نیست.

فصل سوم

مواد و روش ها

در طراحی سازه‌های هیدرولیکی مسائلی مطرح هست که حل آن‌ها به کمک روابط تحلیلی و تجربی امکان پذیر نبوده و باید از راه‌های عملی و آزمایشگاهی استفاده کنیم. به‌طور کلی از راه حل‌های تحلیلی فقط در حل تعداد محدودی از مسائل جریان می‌توان استفاده کرد و در بسیاری از موارد به علت الگویی سه بعدی و پیچیدگی جریان هندسه جدار، حل معادلات جریان مشکل بوده و نمی‌توان با استفاده از تئوری و روابط ریاضی رفتار آن‌ها را در واقعیت پیش‌بینی کرد.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد هدف از انجام این پایان‌نامه بررسی اثر پارامترهای مؤثر نظیر تأثیر دانه‌بندی مصالح بستر و عمق پایاب بر میزان حداکثر عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی می‌باشد. در این فصل ابتدا مشخصات فلوم موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه شاهرود و سرریز پلکانی ساخته شده برای این تحقیق شرح داده می‌شود. سپس روش‌های اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی، شامل عمق جریان و دبی جریان بیان می‌گردد. در ادامه آنالیز ابعادی و پارامترهای بی‌بعد به دست آمده، ارائه می‌شود.

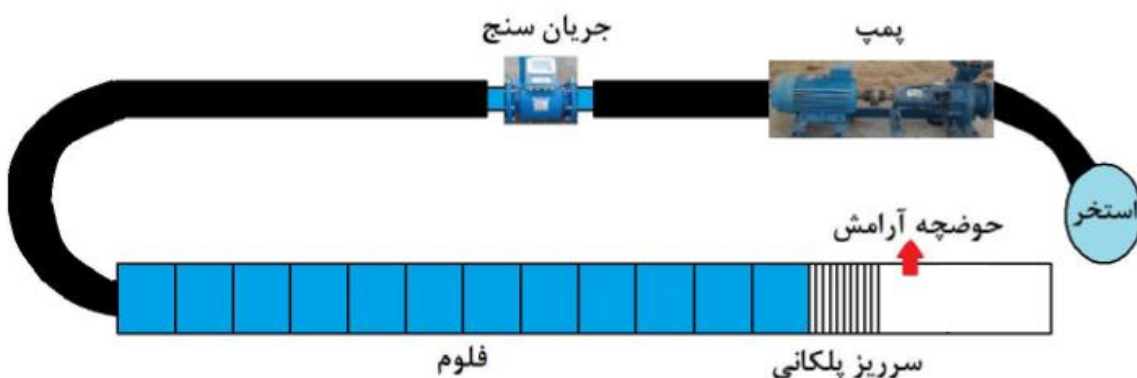
### ۳-۲- در این پایان‌نامه مراحل کلی که برای تحقیق انتخاب شده است به شرح زیر می‌باشد

۱. شناسایی و انتخاب پارامترهای مهم مؤثر بر پدیده آبشستگی پایین‌دست سرریزهای پلکانی
۲. تحلیلی ابعادی روی پارامتر مؤثر و استخراج پارامترهای بدون بعد که ارتباط ابعاد حفره آبشستگی را با عوامل مؤثر بیان می‌دارند.
۳. انجام آزمایش‌های مورد نیاز بر اساس پارامترهای بدون بعد حاصل از تحلیل ابعادی
۴. تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از آزمایش‌ها و مقایسه آن‌ها با کارهای قبلی

### ۳-۳- تجهیزات آزمایشگاه هیدرولیک

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شاهرود در یک فلوم آزمایشگاهی فلزی-شیشه‌ای مستطیلی شکل با عرض ۱ متر، طول ۱۲ متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر انجام شد.

آب توسط یک پمپ با الکتروموتور به قدرت ۷/۵ کیلو وات پمپاژ شده و توسط یک لوله از جنس به قطر به ابتدای فلوم متصل می‌گردد. جهت تنظیم دبی از دو عدد شیر که بر روی پمپ نصب شده استفاده می‌شد و برای آرام نمودن جریان آب، از یک دیواره فلزی متخلخل که در ابتدای فلوم نصب شده بود استفاده شد. سرریز پلکانی در انتهای فلوم نصب شده که آب عبور کرده از روی آن به داخل حوضچه آرامش آرامش به طول ۳ متر وارد شده و نهایتاً توسط یک کانال به داخل استخر تخلیه می‌شود. شکل (۳-۱) نمایی از پلان تجهیزات موجود در آزمایشگاه هیدرولیک را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱- پلان تجهیزات موجود در آزمایشگاه هیدرولیک

### ۳-۴- سرریز پلکانی ساخته شده و مشخصات آن

یک سرریز پلکانی با شیب ۴۵ درجه، ارتفاع و عرض یک متر و با تعداد ۱۰ عدد پله از نوعی چوب به نام فومیزه (PVC) ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفت. این ورقه‌ها دارای دانسیته یکسان در طول ورق، سطح صیغلی با قابلیت روکش شدن با انواع فیلم‌های طرح چوب، امکان تولید در رنگ‌های مختلف را دارند.



منظور از نمونه فیزیکی - هیدرولیکی ساختن نمونه‌ای از طرح واقعی ولی با ابعاد کوچک‌تر است، به طوری که رفتارهای هیدرولیکی در نمونه کوچک شده منطبق با نمونه واقعی باشد. علی‌رغم اینکه نمونه‌های فیزیکی - هیدرولیکی نسبت به مدل‌های ریاضی دارای هزینه بیشتری به همراه داشته و تنها برای یک شرایط استفاده هستند، ولی از آنجا که رفتار هیدرولیکی در مدل فیزیکی به اصل شباهت بیشتری داشته، و جریان‌های سه بعدی را می‌توان به راحتی شبیه سازی کرد، هنوز مدل فیزیکی - هیدرولیکی در علم هیدرولیک کاربرد وسیعی دارند. علاوه بر این، بسیاری از پدیده‌های هیدرولیکی دارای آن چنان پیچیدگی می‌باشند که روابط ریاضی حاکم یا پیچیده بوده، یا در برخی موارد حل آن‌ها هنوز امکان پذیر نیست؛ در نتیجه، روش‌های تحلیلی برای حل آن‌ها توصیه نمی‌شود. شکل‌های (۲-۳) و (۳-۳) نمایی از سرریز قبل و بعد از نصب را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳- نمایی از سرریز پلکانی ( قبل از نصب)



شکل ۳-۳- نمایی از سرریز پلکانی ( بعد از نصب)

### ۳-۵- روش انجام آزمایش

در این مطالعه، ابتدا مدل فیزیکی سرریز در پایین دست فلوم نصب و به طور کامل آب‌بندی گردید و سپس بستر پایین دست سرریز به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر از مصالح مورد نظر ایجاد و سطح آن به وسیله تخته و تراز کاملاً صاف و افقی گردید. یک واحد توری سنگ نیز در انتهای فلوم هم سطح با مصالح بستر

(رسوب ریزدانه و درشت دانه با دانه‌بندی مختلف) برای جلوگیری از شسته شدن مصالح در نظر گرفته شد. در ادامه در حالی که دریاچه انتهایی فلوم کاملاً بسته است، الکتروپمپ روشن و با باز شدن تدریجی شیر ورودی، جریان آب به آرامی از طریق لوله ۶ اینچی از کف مخزن ورودی وارد فلوم گردید و پس از عبور از روی سرریز به سمت پایین دست منتقل شد. مقدار دبی جریان تا زمانی که ماسه‌ها و آخرین پله به‌طور کامل مستغرق شد کم باقی ماند و بعد از آن، هم زمان با بالا نگه داشتن عمق پایاب، دبی افزایش یافت تا دبی مورد نظر حاصل شد و سپس با باز کردن دریاچه پایین دست، عمق پایاب تا عمق مورد نظر پایین آورده شد. با تنظیم عمق پایاب، آزمایش شروع شد و خاتمه آزمایش زمانی بود که ذرات دانه‌بندی شده بستر به پایین دست منتقل نمی‌شدند و حفره آبشستگی به حالت تعادل رسید.

آزمایش‌ها با دبی‌های مختلف ۲/۵، ۵/۵، ۷/۵، ۹/۵، ۱۱/۵، ۱۳/۵ و ۱۶ لیتر بر ثانیه انجام شد. به‌منظور اندازه‌گیری پروفیل آبشستگی از یک عمق‌سنج ریلی استفاده شد که امکان جابجای در هر دو امتداد طولی و عرضی را برای عمق سنج مهیا کرده بود.

### ۳-۶- شرح آزمایش‌ها

آزمایش‌ها ابتدا با مصالح درشت دانه انجام شد. هر بار مصالح با قطر مشخص در پایین دست سرریز پلکانی ریخته و سطح آن صاف و هموار شد، و با یک دبی و عمق پایاب مشخص آزمایش انجام گرفت. بعد از اتمام آزمایش و انجام اندازه‌گیری‌ها، مصالح شسته شده به درون حفره آبشستگی برگردانده شده و سطح مصالح همانند قبل هموار گردیده و با افزایش عمق پایاب دوباره با همان شرایط قبل آزمایش جدید انجام می‌شد.

با توجه به اینکه مصالح استفاده شده یکنواخت هستند. لذا بعد از انجام آزمایش و انجام اندازه‌گیری‌های لازم، و آزمایش بعدی شروع می‌گردد. با توجه به این توضیحات آزمایش‌ها با چهار دانه‌بندی مصالح ۰/۳، ۱، ۳/۵، ۶/۸ میلی‌متر انجام شد.

### ۳-۷- پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه

از آنجایی که پارامترهای مؤثر بر آبشستگی بر اساس قوانین آنالیز ابعادی بی‌بعد شده‌اند، لذا در تعیین و انتخاب محدوده آزمایش‌ها تنها عامل محدود کننده امکانات موجود می‌باشد. انجام آزمایش‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که دامنه تغییرات پارامترها وسیع باشد. در این تحقیق انتخاب پارامترها به شکلی صورت گرفته که حداکثر آبشستگی به کف نرسد و همچنین پدیده آبشستگی حتماً اتفاق افتد. جهت تجزیه و تحلیل ابعاد آبشستگی، پارامترهای مختلفی اندازه‌گیری گردیدند که عبارت‌اند از قطر متوسط ذرات ( $D_{50}$ )، از طریق منحنی دانه‌بندی به دست می‌آید. دبی در واحد عرض ( $q$ )، عمق پایاب ( $y_f$ ).

پارامترهای اندازه‌گیری شده در این تحقیق مربوط به ابعاد آبشستگی می‌باشد می‌توان به حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ )، فاصله محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی از سرریز ( $L_s$ )، فاصله انتهایی حفره آبشستگی از سرریز ( $L_c$ )، حداکثر عرض حفره آبشستگی ( $w_s$ ) و ارتفاع تپه ایجاد شده ناشی از ته‌نشینی مواد فرسایش یافته در پایین‌دست حفره ( $H_c$ ) اشاره کرد.

### ۳-۸- اندازه‌گیری دبی جریان

برای اندازه‌گیری جریان از جریان سنج الکترومغناطیسی (pmag) استفاده شد. این دستگاه برای سنجش دبی مایعات رسانا البته با میزان محدودی از مواد جامد معلق در آب، کاملاً مناسب می‌باشد. محدوده دبی اندازه‌گیری شده توسط این دستگاه از  $0/2 \text{ m}^3/\text{h}$  تا  $30000 \text{ m}^3/\text{h}$  و درصد خطای آن  $\pm 0/5\%$  می‌باشد. اساس کار سیستم دبی‌سنج‌های مغناطیسی مبتنی بر قانون القای مغناطیسی فارادی است که بیانگر آن است که هرگاه رسانایی در یک میدان مغناطیسی حرکت کند در آن ولتاژ جریان القاء می‌شود.

$$\text{faraday's law: } E = KBDV$$

مقدار ولتاژ القایی، مستقیماً متناسب با سرعت رسانا  $V$ ، پهنای رسانا  $D$ ، و قدرت میدان مغناطیسی  $B$ ، می‌باشد. هنگامی که مایع رسانا از میدان مغناطیسی با سرعت  $V$  عبور می‌کند الکترودها ولتاژ القایی را دریافت می‌کنند. پهنای رسانا به فاصله بین الکترودها بستگی دارد (بدنه ایزوله از اتصال کوتاه با دیواره جلوگیری می‌کند)، تنها متغیر این وسیله سرعت مایع رسانا است و به دلیل آن که قدرت میدان مغناطیسی و فواصل الکترودها ثابت نگه داشته شده است ولتاژ خروجی  $E$ ، مستقیماً با سرعت متناسب است.

این دبی‌سنج هیچ‌گونه قطعه متحرکی ندارد و انسدادی در برابر جریان سیال ایجاد نمی‌کند و به دلیل آنکه نیازی به دانسیته و ویسکوزیته سیال برای اندازه‌گیری ندارد برای سنجش دبی دوغاب‌ها، مایعات خورنده مناسب می‌باشد. با وجود عدم افت فشار در آن‌ها (به دلیل عدم وجود مانع بر سر راه جریان) برای گازها مناسب نمی‌باشد. سیال مورد استفاده باید رسانای الکتریسیته و غیر مغناطیسی باشد.



شکل ۳-۴- نمایشی از جریان‌سنج

### ۳-۹- هوادهی سرریزها

یکی از مؤثرترین و اقتصادی‌ترین روش‌ها برای جلوگیری از خسارت ناشی از کاویتاسیون هوادهی جریان می‌باشد. هواده‌ها سازه‌هایی هستند که به‌منظور هوادهی جریان بر روی سرریزها ساخته می‌شوند. مکانیزم ورود هوا به جریان آب بسیار پیچیده است و برای طراحی هواده‌ها اغلب از مدل فیزیکی استفاده می‌شود. در صورت عدم هوادهی، جت جریان ریزشی به سرریز نزدیک شده و در دبی‌های خیلی کوچک عملاً از بدنه سرریز جدا نمی‌شود. در نمونه‌های واقعی نیز هوادهی به‌طور طبیعی از زیر سفره جریان ریزشی انجام می‌شود.

### ۳-۱۰- اندازه‌گیری عمق آبشستگی

پس از تمام شدن هر آزمایش اقدام به اندازه‌گیری عمق آبشستگی و ارتفاع رسوب گذاری ناشی از رسوب‌های شسته شده در پایین دست گردید. برای این منظور از عمق‌سنج نقطه‌ای با دقت ۰/۵ میلی‌متر استفاده شد که بر روی یک ریل سوار شده و قابلیت جابجایی در راستای طولی و عرضی را دارد. این دستگاه یک میلهٔ مدرج است که برای قرائت سطح بستر یا سطح جریان بکار می‌رود و صفر آن با سطح روئی مصالح مطابقت داده شده است. بعد از انجام آزمایش برای اندازه‌گیری عمق آبشستگی میله مدرج را در داخل رسوبات فرو کرده تا عمق آبشستگی و ارتفاع رسوب‌گذاری به دست آید. به‌منظور اندازه‌گیری عمق آب در بالادست و پایین دست سرریز پلکانی نیز از عمق‌سنجی با دقت ۱ میلی‌متر استفاده گردید.

### ۳-۱۱- تحلیل ابعادی

پدیده‌ها اغلب به متغیرهای زیادی وابسته‌اند که بررسی تأثیر هر یک از متغیرها بر روی نمونه اصلی کار پرهزینه و وقت‌گیری است این مشکل با استفاده از تحلیل ابعادی حل شده است بدین ترتیب که به‌جای بررسی تأثیر تک تک متغیرها، اعداد بدون بعدی را به دست آورده که تعداد آن‌ها نسبت به

متغیرها کم‌تر بوده و از آن‌ها در بررسی پدیده‌های مورد نظر استفاده می‌کنیم. در واقع هدف از تحلیل ابعادی، کاهش متغیرها و گروه‌بندی آن‌ها به صورت پارامترهای بی‌بعد است. با استفاده از تحلیل ابعادی می‌توان در بسیاری از حالت‌ها رابطه‌ای پیچیده را تجزیه و تحلیل نموده و بین متغیرهای مختلف آن پدیده روابط صحیحی را ایجاد نمود که رابطه به دست آمده معمولاً ساده‌تر و منطبق با شرایط فیزیکی می‌باشد.

نکته مهم در مورد رابطه مورد نظر این است که رابطه مذکور باید معنی‌دار، دارای کاربرد ساده و قابل استفاده در هر سیستم آحاد باشد. تحلیل ابعادی بر این اصل استوار است که در یک رابطه صحیح فیزیکی، هر گاه کمیت‌های مختلفی که در طرفین رابطه وجود دارند بر حسب پارامترهای اصلی دستگاه یکاهای آحادی نوشته شوند، در هر دو طرف تجانس و تشابه کامل برقرار باشد. پارامترهای اصلی دستگاه مختلف شامل طول، جرم و زمان می‌باشد و بدین ترتیب در طرفین یک رابطه صحیح فیزیکی، بایستی نمای پارامترها یکسان باشد.

از مزایای به‌کارگیری تحلیل ابعادی در کارهای آزمایشگاهی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- با تجزیه و تحلیل ابعادی از تعداد متغیرهایی که برای مطالعات مدل هیدرولیکی لازم است کاسته می‌شود.
- تجزیه و تحلیل ارتباط بین متغیرها را به صورت تابعی با جملات بی‌بعد بیان می‌کند.
- تجزیه و تحلیل ابعادی مسئله را چنان طرح می‌کند که می‌توان برنامه آزمایش‌ها را به صورت سیستماتیک و ساده شده در حداقل زمان ممکن انجام داد.
- نسبت‌های بدون بعد مستقل از دستگاه آحاد و سیستم‌های اندازه‌گیری قابل استفاده می‌باشد.
- تجزیه و تحلیل ابعادی تبدیل واحدهای اندازه‌گیری کمیت‌ها را از یک سیستم آحاد به سیستم دیگر آسان می‌سازد.

روش‌های مختلفی برای آنالیز ابعادی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش  $\pi$  (باکینگهام)، روش ریلی و روش ماتریسی حاصل ضرب‌های بی‌بعد اشاره کرد. در بین روش‌های فوق، روش  $\pi$  (باکینگهام) به‌طور گسترده جهت تعیین نسبت‌های بدون بعد مؤثر در پدیده‌های مختلف فیزیکی استفاده می‌شود. در این پایان‌نامه تجزیه و تحلیل ابعادی به روش  $\pi$  باکینگهام انجام گرفته است.

### ۳-۱۱-۱- تحلیل ابعادی پارامترهای مؤثر بر عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی

تعیین عوامل مؤثر بر عمق آبشستگی در پایین‌دست از سرریزهای پلکانی:

با توجه به نوع سرریز و مطالعات صورت گرفته که به‌وسیلهٔ بیشتر محققین در مورد این سازه صورت

گرفته است، عوامل مؤثر عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی به شرح زیر می‌باشند:

**الف- خصوصیات مربوط به سیال شامل:** لزجت دینامیکی ( $\mu$ )، جرم مخصوص سیال ( $\rho_w$ )، جرم مخصوص رسوب ( $\rho_s$ ) و شتاب ثقل ( $g$ ).

**ب- خصوصیات مربوط به هیدرولیک جریان شامل:** سرعت جریان ( $v$ )، عمق جریان ( $y$ )، عمق بحرانی ( $y_c$ ) و دبی در واحد عرض جریان ( $q$ ).

**ج- خصوصیات هندسی سرریز شامل:** ارتفاع پله‌ها ( $h$ )، طول پیش آمدگی پله‌ها ( $l$ )، تعداد پله ( $N$ )، ارتفاع کل سرریز ( $H_{dam}$ ) و قطر ذرات رسوبی ( $d_{50}$ ).

سه متغیر تکراری باید انتخاب شود. این سه متغیر عبارتند از: ( $q, y_t, \rho_w$ ).

جدول (۳-۱) پارامترهای مؤثر بر عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۳ پارامترهای مؤثر بر عمق آبشستگی

ردیف	پارامتر	واحد پارامتر	بعد پارامتر
۱	$q^*$	$m^2/s$	$L^2T^{-1}$
۲	$g$	$m/s^2$	$LT^{-2}$
۳	$y_t^*$	$m$	$L$
۴	$y_c$	$m$	$L$
۵	$\rho_s$	$kg/m^3$	$ML^{-3}$
۶	$\rho_w^*$	$kg/m^3$	$ML^{-3}$
۷	$H_{dam}$	$m$	$L$
۸	$h$	$m$	$L$
۹	$L$	$m$	$L$
۱۰	$\theta$	-	-
۱۱	$N$	-	-
۱۲	$d_{50}$	$m$	$L$
۱۳	$d_s$	$m$	$L$
۱۴	$\mu$	$m^2/s$	$L^2T^{-1}$

با توجه به متغیرهای ذکر شده پارامترهای مؤثر بر روی عمق آبشستگی را می‌توان به صورت تابع زیر نمایش داد.

$$f(q, g, \rho_s, \rho_w, y_t, y_c, H_{dam}, h, L, \mu, d_{50}, d_s, \theta, N) = 0$$

با توجه به پارامترها با ابعاد مشابه پارامترهای بی بعد به شرح زیر است:

$$f \left( \begin{array}{l} \pi_1 = \frac{y_t^3 g}{q^2}, \pi_2 = \frac{d_{50}}{y_t}, \pi_3 = \frac{y_t}{H_{dam}}, \pi_4 = \frac{d_s}{y_t}, \pi_5 = \frac{\mu}{vy} \\ \pi_6 = \frac{\rho_s}{\rho_w}, \pi_7 = \frac{h}{y_t}, \pi_8 = \frac{L}{y_t}, \pi_9 = \frac{y_c}{y_t}, \pi_{10} = N, \pi_{11} = \frac{L_a}{y_t} \end{array} \right) = 0$$



پارامتر بی بعد اول  $\pi_1 = \frac{y_t^3 g}{q^2} = fr$  و پارامتر بی بعد پنجم  $\pi_5 = \frac{\mu}{\nu y} = Re$  و همچنین از حاصل ضرب

دو پارامتر بی بعد  $\frac{y_t^3 g}{q^2} \times \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) = \frac{1}{f_g}$  به دست می آید.

با انجام آنالیز ابعادی به روش  $\pi$  باکینگهام نهایتاً می توان تابع زیر را مشخص کرد.

$$f\left(f_g, \frac{d_{50}}{y_t}, \frac{y_t}{H}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, \frac{h}{y_t}, \frac{L}{y_t}, \frac{y_c}{y_t}, Re, N, \frac{L_a}{y_t}\right) = 0$$

با توجه به اینکه هدف در این مطالعه بررسی اثر پارامترهای مؤثر در حالت تعادل پدیده آبشستگی است لذا عامل زمان حذف و همچنین به دلیل ثابت بودن  $\rho_s$  و  $\rho_w$  در آزمایشها از روابط حذف شده اند. همچنین عدد رینولدز به دلیل آشفته بودن جریان در پایین دست که مقدار آن بیشتر از ۴۰۰۰ می شود از رابطه حذف گردید، لذا با استفاده از آنالیز ابعادی رابطه زیر به دست آمده است.

$$\frac{d_s}{y_t} = f\left(F_g, \frac{d_{50}}{H}, N, \frac{h}{y_t}\right)$$

که در این رابطه  $d_s$ : حداکثر عمق آبشستگی،  $y_t$ : عمق آب پایین دست سرریز  $H$ : ارتفاع سرریز  $h$ : ارتفاع هر پله  $N$ : تعداد پله ها،  $d_{50}$ : قطر ذرات رسوبی،  $F_g$ : فرود ذره.

فصل چہارم

نتیجہ و بحث

#### ۴-۱- مقدمه

در این فصل از پایان‌نامه، با استفاده از آزمایش‌های اندازه‌گیری شده، مشاهدات و نتایج مورد بحث و بررسی قرار گرفته است و همچنین با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و انجام تجزیه و تحلیل آماری روابط رگرسیونی برای برآورد حداکثر عمق آبستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی ارائه شده است. در نهایت نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری با نتایج مشاهداتی مقایسه شده است.

- بررسی تغییرات دبی روی ابعاد حفره آبستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی
- بررسی تغییرات قطر مصالح روی ابعاد حفره آبستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی
- بررسی تغییرات عمق پایاب روی ابعاد حفره آبستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی

#### ۴-۲- مشاهدات آزمایشگاهی

در این بخش به بیان مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج حاصل از آن‌ها پرداخته شده، در این تحقیق به‌طور کلی ۱۰۰ آزمایش انجام شده که ۱۴ آزمایش آن به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شده است. در جدول (۴-۱) مشخصات متغیرهای آزمایش آورده شده است.

جدول ۴-۱- مشخصات متغیرهای آزمایش

مقدار							پارامتر
۱۶	۱۳/۵	۱۱/۵	۹/۵	۷/۵	۵/۵	۲/۵	Q دبی بر حسب لیتر بر ثانیه
۶/۸		۳/۵		۱		۰/۳	$d_{50}$ قطر مصالح بستر بر حسب میلی‌متر
*	۴	۳/۷	۳/۵	۳/۳	۲/۹	۲	$y_{t1}$ عمق پایاب اولیه بر حسب سانتی‌متر
*	۹/۷	۹	۸/۵	۷/۹	۷	۵	$y_{t2}$ عمق پایاب ثانویه بر حسب سانتی‌متر

در جدول (۲-۴) و جدول (۳-۴) مقادیر حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) در پایین دست سرریز پلکانی را بر حسب سانتی متر به ازای تغییرات قطر مصالح ( $d_{50}$ ) برای چهار نوع دانه بندی در عمق پایاب ( $y_t$ ) مختلف ارائه شده است.

جدول ۲-۴- مقادیر حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) بر حسب سانتی متر به ازای تغییرات قطر مصالح ( $d_{50}$ ) برای عمق پایاب اولیه ( $y_{t1}$ )

۱۶	۱۳/۵	۱۱/۵	۹/۵	۷/۵	۵/۵	۲/۵	دبی (litr/s) $d_{50}(mm)$
*	*	*	*	۷/۳	۵/۱	۳/۴	۰/۳
*	*	*	۷/۷	۷	۴/۵	۳	۱
*	۸/۲	۷/۵	۷	۵/۵	۴/۹	۲	۳/۵
۸/۱	۶/۱	۵/۴	۵/۱	۳/۵	۳	۱/۳	۶/۸

جدول ۳-۴- مقادیر حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) بر حسب سانتی متر به ازای تغییرات قطر مصالح ( $d_{50}$ ) برای عمق پایاب ثانویه ( $y_{t2}$ )

۱۶	۱۳/۵	۱۱/۵	۹/۵	۷/۵	۵/۵	۲/۵	دبی (litr/s) $d_{50}(mm)$
*	*	*	۷/۱	۴/۵۴	۳/۹	۲/۷	۰/۳
*	*	۶/۹	۶/۱	۴/۵	۳/۵	۲	۱
*	۷/۴	۶/۶	۵/۷	۳/۷	۳/۲	۱	۳/۵
۵	۴/۳	۳/۹	۳/۸	۳	۱/۳	۰	۶/۸

جدول (۴-۴) تا جدول (۷-۴) مقادیر حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) در پایین دست سرریز پلکانی را بر حسب سانتی متر به ازای تغییرات عمق پایاب ( $y_t$ ) برای چهار نوع دانه بندی با ( $d_{50}$ ) مختلف ارائه شده است ( $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$ ,  $d_{50} = 1 \text{ mm}$ ,  $d_{50} = 3/5 \text{ mm}$ ,  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$ ). عمق پایاب اولیه با ( $y_{t1}$ ) و عمق پایاب ثانویه با ( $y_{t2}$ ) نشان داده شده. منظور از عمق پایاب ثانویه، عمق آب در پایین دست حوضچه آرامش می باشد که افزایش یافته است.

جدول ۴-۴- مقادیر حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) بر حسب سانتی متر به ازای تغییرات عمق پایاب ( $y_t$ ) برای  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$

							دبی (litr/s)
۱۶	۱۳/۵	۱۱/۵	۹/۵	۷/۵	۵/۵	۲/۵	$y_t (cm)$
۸/۱	۶/۱	۵/۴	۵/۱	۳/۵	۳	۱/۳	$y_{t1}$
۵	۴/۳	۳/۹	۳/۸	۳	۱/۳	۰	$y_{t2}$

جدول ۵-۴- مقادیر حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) بر حسب سانتی متر به ازای تغییرات عمق پایاب ( $y_t$ ) برای  $d_{50} = 3/5 \text{ mm}$

							دبی (litr/s)
۱۳/۵	۱۱/۵	۹/۵	۷/۵	۵/۵	۲/۵		$y_t (cm)$
۸/۲	۷/۵	۷	۵/۵	۴/۹	۲		$y_{t1}$
۷/۴	۶/۶	۵/۷	۳/۷	۳/۲	۱		$y_{t2}$

جدول ۴-۶- مقادیر حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) بر حسب سانتی متر به ازای تغییرات عمق پایاب ( $y_t$ )  
برای  $d_{50} = 1 \text{ mm}$

دبی (litr/s)	۲/۵	۵/۵	۷/۵	۹/۵	۱۱/۵
$y_t(\text{cm})$					
$y_{t1}$	۳	۴/۵	۷	۷/۷	*
$y_{t2}$	۲	۳/۵	۴/۵	۶/۱	۶/۹

جدول ۴-۷- مقادیر حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) بر حسب سانتی متر به ازای تغییرات عمق پایاب ( $y_t$ )  
برای  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$

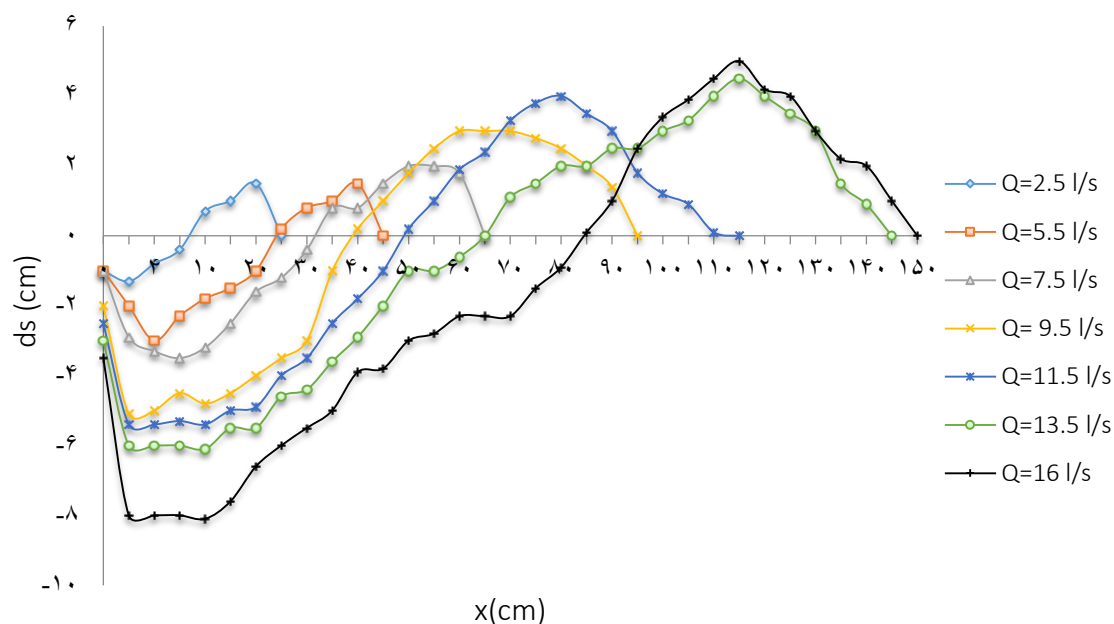
دبی (litr/s)	۲/۵	۵/۵	۷/۵	۹/۵
$y_t(\text{cm})$				
$y_{t1}$	۳/۴	۵/۱	۷/۳	*
$y_{t2}$	۲/۷	۳/۹	۶/۵۴	۷/۱

#### ۴-۳- نتایج آزمایش‌ها

با توجه به پارامترهای تاثیرگذار بر آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی و آنالیز ابعادی طرح، برای در نظر گرفتن تأثیر پارامترهای مختلف، آزمایش‌ها بر مبنای ثابت نگه داشتن همه متغیرها و تغییر یک متغیر انجام شد تا به طور صریح تأثیر هر پارامتر مشاهده شود. پس از انجام هر آزمایش اطلاعات مربوط به عمق آبشستگی استخراج و نمودارهای آن ترسیم گردید.

### ۳-۳-۱- بررسی تغییرات دبی روی ابعاد حفره آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی

شکل (۳-۴) الی شکل (۳-۴) پروفیل‌های مشاهداتی پایین دست سرریز پلکانی با دبی متغیر و ( $d_{50}$ ) متفاوت اختصاص دارد، این آزمایش‌ها با عمق پایاب اولیه ( $y_{t1}$ ) انجام شده است. شکل (۳-۴) تغییرات عمق آبشستگی را برای  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$  در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. نکات حائز اهمیت در این شکل وجود دارد، همان‌طور که ملاحظه می‌شود به ازای تک تک مقادیر اندازه جریان به کار رفته در آزمایش ابتدا در پای سرریز یک حفره آبشستگی ایجاد می‌گردد. سپس بخشی از رسوبات شسته شده در طول مسیر جریان روی هم انباشته شده و تپه آبشستگی را به وجود می‌آورد. این شکل نشان می‌دهد که به ازای دبی  $Q = 2/5 \text{ liter/s}$  حداکثر عمق آبشستگی  $d_s = 1/3 \text{ cm}$  دبی  $Q = 5/5 \text{ liter/s}$  حداکثر عمق آبشستگی  $d_s = 3 \text{ cm}$  دبی  $Q = 7/5 \text{ liter/s}$  حداکثر عمق آبشستگی  $d_s = 3/5 \text{ cm}$  دبی  $Q = 9/5 \text{ liter/s}$  حداکثر عمق آبشستگی  $d_s = 5/1 \text{ cm}$  دبی  $Q = 11/5 \text{ liter/s}$  حداکثر عمق آبشستگی  $d_s = 5/4 \text{ cm}$  دبی  $Q = 13/5 \text{ liter/s}$  حداکثر عمق آبشستگی  $d_s = 6/1 \text{ cm}$  و دبی  $Q = 16 \text{ liter/s}$  حداکثر عمق آبشستگی  $d_s = 8/1 \text{ cm}$  می‌باشد. لذا حداکثر مقدار آبشستگی در دبی  $Q = 16 \text{ liter/s}$  اتفاق افتاد. نکته دیگری که در شکل وجود دارد این است که بر اساس حداکثر مقدار دبی جریان تپه در فاصله ۸۵ تا ۱۵۰ سانتی‌متری از سرریز تشکیل گردیده است. و به ازای کاهش جریان این تپه به پای سرریز کشیده شده است. همچنین بر حسب حداکثر مقدار دبی  $Q = 16 \text{ liter/s}$  طول گودال آبشستگی ۸۵ سانتی‌متر می‌باشد، و با کاهش دبی طول گودال آبشستگی کاهش می‌یابد به طوری که برای دبی  $Q = 2/5 \text{ liter/s}$  طول گودال آبشستگی ۷ سانتی‌متر می‌باشد و همچنین محل حداکثر عمق آبشستگی با افزایش دبی از سرریز فاصله می‌گیرد.

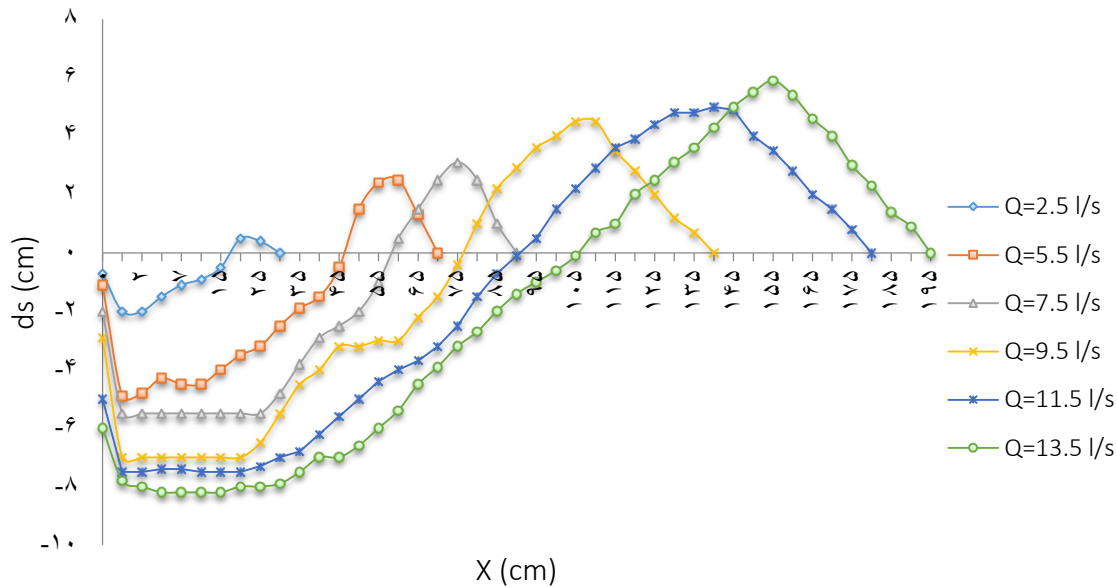


شکل ۴-۱- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 6/8mm$ ، با عمق پایاب اولیه  $y_{t1}$

شکل (۴-۲) تغییرات عمق آبستگي را برای  $d_{50} = 3/5mm$  در دبی های مختلف نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که به ازای دبی  $Q = 2/5 \text{ liter/s}$  حداکثر عمق آبستگي  $d_s = 2 \text{ cm}$ ، دبی  $Q = 5/5 \text{ liter/s}$  حداکثر عمق آبستگي  $d_s = 4 \text{ cm}$ ، دبی  $Q = 7/5 \text{ liter/s}$  حداکثر عمق آبستگي  $d_s = 5/5 \text{ cm}$ ، دبی  $Q = 9/5 \text{ liter/s}$  حداکثر عمق آبستگي  $d_s = 7 \text{ cm}$ ، دبی  $Q = 11/5 \text{ liter/s}$  حداکثر عمق آبستگي  $d_s = 7/5 \text{ cm}$  و دبی  $Q = 13/5 \text{ liter/s}$  حداکثر عمق آبستگي  $d_s = 8/2 \text{ cm}$  می باشد. لذا حداکثر مقدار آبستگي در بیش ترین دبی آزمایش شده  $Q = 13/5 \text{ liter/s}$  اتفاق افتاد. نکته دیگری که در شکل وجود دارد این است که بر اساس حداکثر مقدار دبی جریان تپه در فاصله ۱۰۵ تا ۱۹۵ سانتی متری از سرریز تشکیل گردیده است. و به ازای کاهش جریان این تپه به پای سرریز کشیده شده است. همچنین بر حسب حداکثر مقدار دبی  $Q = 13/5 \text{ liter/s}$  طول گودال آبستگي ۱۰۵ سانتی متر می باشد، و با کاهش دبی طول گودال آبستگي کاهش می یابد به طوری که برای دبی  $Q = 2/5 \text{ liter/s}$  طول گودال آبستگي ۱۶ سانتی متر می باشد. همان طور که در نمودار مشاهده می شود طول گودال آبستگي با دبی نسبت مستقیم دارد به طوری که

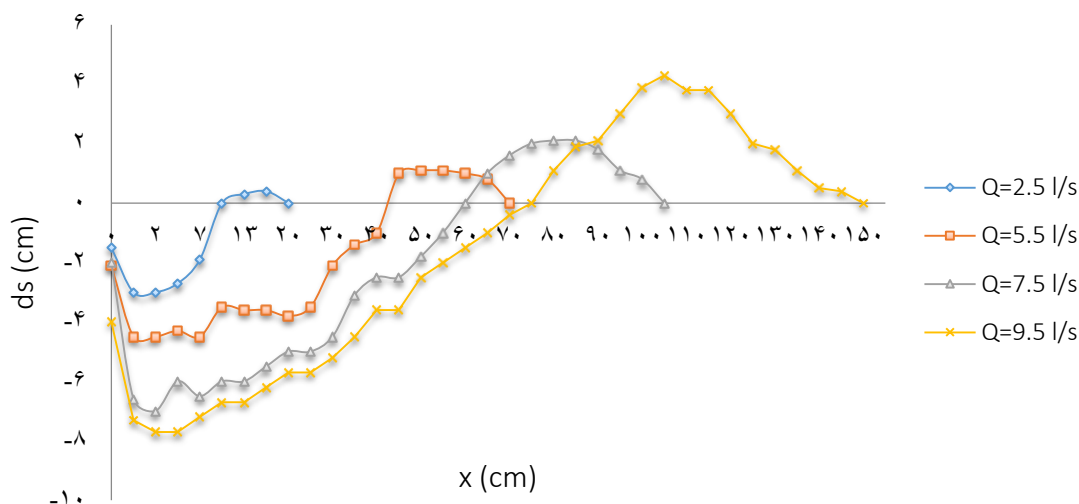


با افزایش دبی طول گودال آبشستگی افزایش می‌یابد و همچنین محل حداکثر عمق آبشستگی با افزایش دبی از سرریز فاصله می‌گیرد.



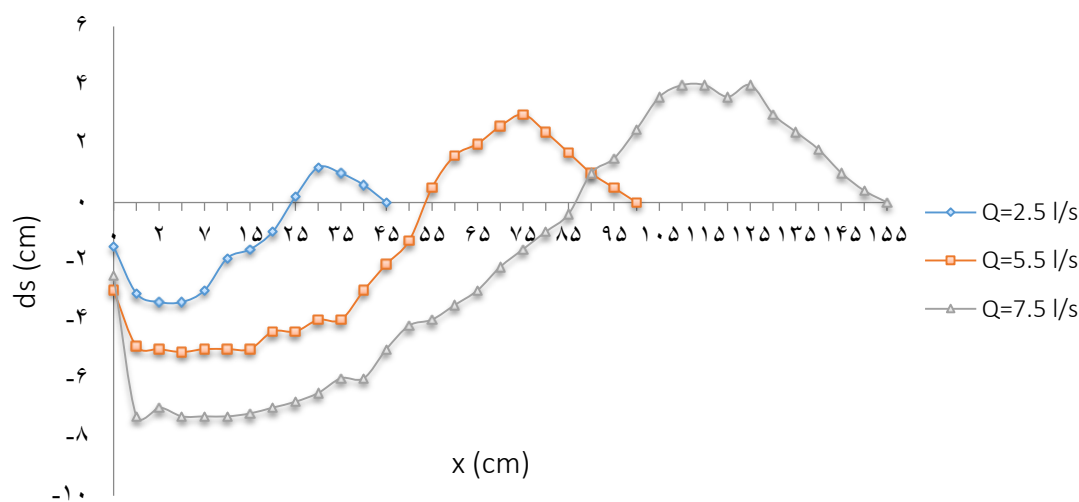
شکل ۴-۲- پروفیل مشاهداتی در پایین‌دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 3/5mm$ ، با عمق پایاب اولیه  $y_{t1}$

شکل (۳-۴) تغییرات عمق آبشستگی را برای  $d_{50} = 1mm$  در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. از روی این شکل مشخص می‌شود که به ازای دبی  $Q = 2/5 \text{ liter/s}$  حداکثر عمق آبشستگی  $d_s = 3 \text{ cm}$  و دبی  $Q = 9/5 \text{ liter/s}$  حداکثر عمق آبشستگی  $d_s = 7/7 \text{ cm}$  می‌باشد، که حداکثر مقدار آبشستگی در دبی  $Q = 9/5 \text{ liter/s}$  اتفاق افتاد. همچنین بر اساس حداکثر مقدار دبی جریان تپه آبشستگی در فاصله ۷۵ تا ۱۵۰ سانتی‌متر تشکیل گردیده است. با کاهش دبی این تپه به پای سرریز نزدیک‌تر می‌شود. به ازای دبی  $Q = 9/5 \text{ liter/s}$  طول گودال آبشستگی ۷۵ سانتی‌متر می‌باشد، و با کاهش دبی طول گودال آبشستگی کاهش می‌یابد به طوری که برای دبی  $Q = 2/5 \text{ liter/s}$  طول گودال آبشستگی ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. و همچنین محل حداکثر عمق آبشستگی همانند شکل‌های (۴-۱) و (۴-۲) با افزایش دبی از سرریز فاصله می‌گیرد.



شکل ۳-۴- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 1mm$ ، با عمق پایاب اولیه  $y_{t1}$

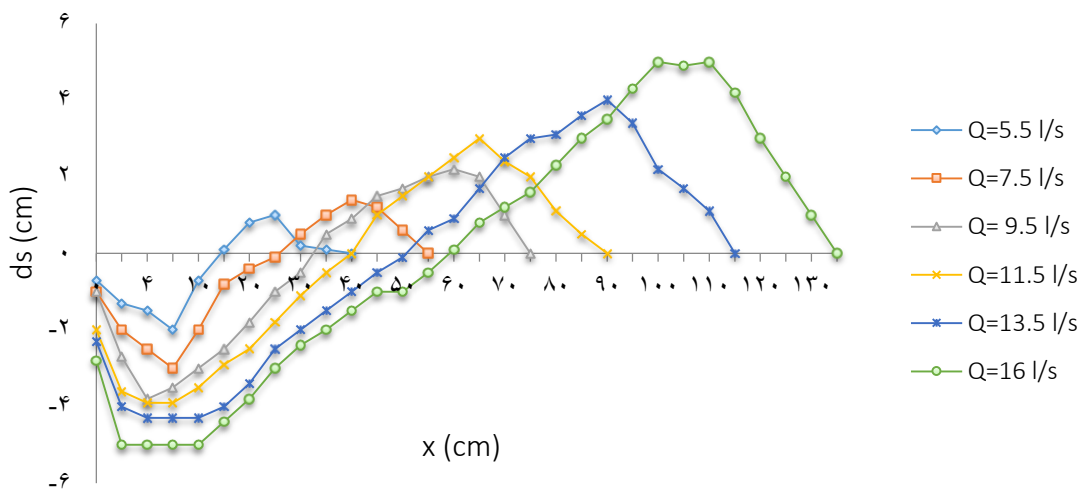
شکل (۴-۴) تغییرات عمق آبشستگی را برای  $d_{50} = 0/3 mm$  در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. کم‌ترین مقدار آبشستگی به ازای دبی  $Q = 2/5 \text{ liter/s}$  برابر  $d_s = 3/4 cm$  و طول گودال آبشستگی 20 سانتی متر می‌باشد، بیش‌ترین مقدار آبشستگی به ازای دبی  $Q = 7/5 \text{ liter/s}$  برابر  $d_s = 7/3 cm$  و طول گودال آبشستگی 85 سانتی متر می‌باشد. تپه آبشستگی در فاصله ۸۵ تا ۱۵۵ در بیش‌ترین مقدار دبی مورد آزمایش  $Q = 7/5 \text{ liter/s}$  رخ داده است. روند تغییرات در تمامی حالات یکسان است.



شکل ۴-۴- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 0/3 mm$  با عمق پایاب اولیه  $y_{t1}$

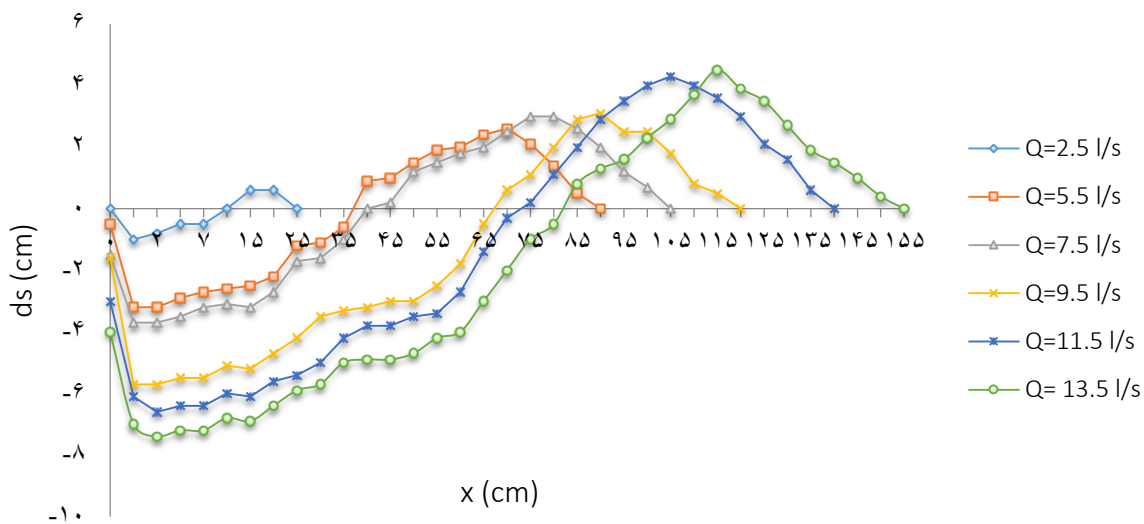
شکل (۵-۴) الی شکل (۸-۴) پروفیل‌های مشاهداتی پایین‌دست سرریز پلکانی با دبی متغیر و ( $d_{50}$ ) متفاوت را نشان می‌دهد، این آزمایش‌ها با عمق پایاب ثانویه ( $y_{t2}$ ) انجام شده است. در اینجا منظور از عمق پایاب ثانویه ( $y_{t2}$ )، عمق پایاب در پایین‌دست سرریز پلکانی که با بستن انتهای حوضچه آرامش افزایش داده شد به این ترتیب تأثیر عمق پایاب روی حداکثر عمق آبشستگی مورد بررسی قرار گرفت. نکته جالب رفتار مشابه این سری نمودارها با نمودارهای (۱-۴) تا (۴-۴) می‌باشد که در ( $d_{50}$ ) مختلف با افزایش دبی حداکثر عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی افزایش می‌یابد ولی هنگامی که عمق پایاب از ( $y_{t1}$ ) به ( $y_{t2}$ ) افزایش می‌یابد حداکثر عمق آبشستگی در شرایط هیدرولیکی مشابه کاهش می‌یابد. این روند در نمودارهای زیر مشاهده می‌شود.

شکل (۵-۴) تغییرات عمق آبشستگی را برای  $d_{50} = 6/8mm$  در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. کم‌ترین مقدار آبشستگی مربوط به  $Q = 5/5 \text{ liter/s}$  برابر  $d_s = 1/5cm$  و طول گودال آبشستگی 10 سانتی‌متر می‌باشد، بیش‌ترین مقدار آبشستگی مربوط به  $Q = 16 \text{ liter/s}$  برابر  $d_s = 5cm$  و طول گودال آبشستگی 55 سانتی‌متر می‌باشد. حداکثر مقدار تپه آبشستگی در فاصله ۵۵ تا ۱۳۵ به ازای دبی  $Q = 16 \text{ liter/s}$  و حداقل مقدار آن در فاصله ۱۴ تا ۴۰ به ازای دبی  $Q = 2/5 \text{ liter/s}$  می‌باشد. محل حداکثر عمق آبشستگی با افزایش دبی از سرریز فاصله می‌گیرد.



شکل ۵-۴- پروفیل مشاهداتی در پایین‌دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 6/8 mm$ ، با عمق پایاب ثانویه  $y_{t2}$

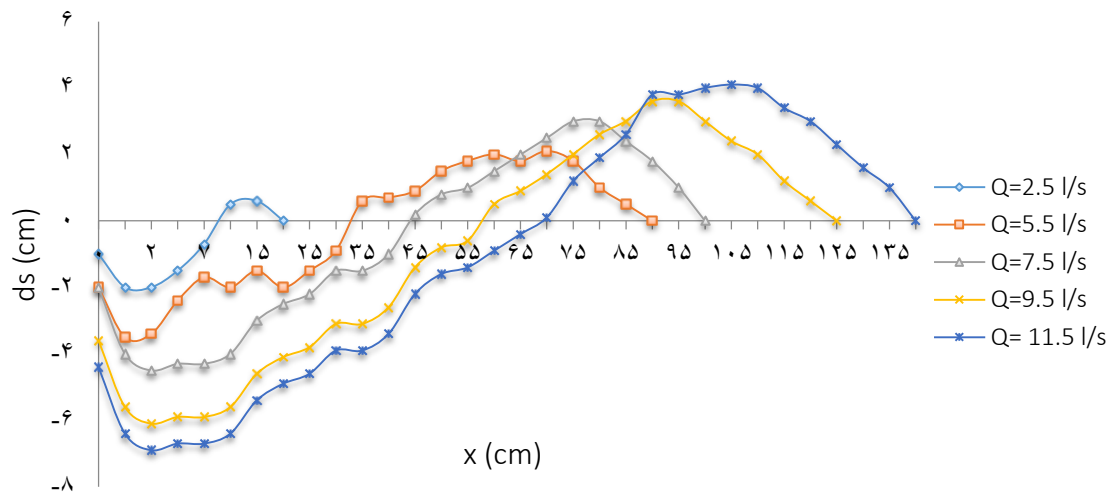
شکل (۴-۶) تغییرات عمق آبشستگی را برای  $d_{50} = 3/5 \text{ mm}$  در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. کم‌ترین مقدار آبشستگی برحسب  $Q = 2/5 \text{ liter/s}$  برابر  $d_s = 1 \text{ cm}$  و طول گودال آبشستگی ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد، بیش‌ترین مقدار آبشستگی برحسب  $Q = 13/5 \text{ liter/s}$  برابر  $d_s = 7/4 \text{ cm}$  و طول گودال آبشستگی 80 سانتی‌متر می‌باشد. حداکثر مقدار تپه آبشستگی در فاصله ۸۰ تا ۱۵۵ به ازای دبی  $Q = 13/5 \text{ liter/s}$  و حداقل مقدار آن در فاصله ۱۰ تا ۳۰ برای دبی  $Q = 2/5 \text{ liter/s}$  می‌باشد. محل حداکثر عمق آبشستگی با افزایش دبی از سرریز فاصله می‌گیرد.



شکل ۴-۶- پروفیل مشاهداتی در پایین‌دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 3/5 \text{ mm}$ ، با عمق پایاب ثانویه  $y_{t2}$

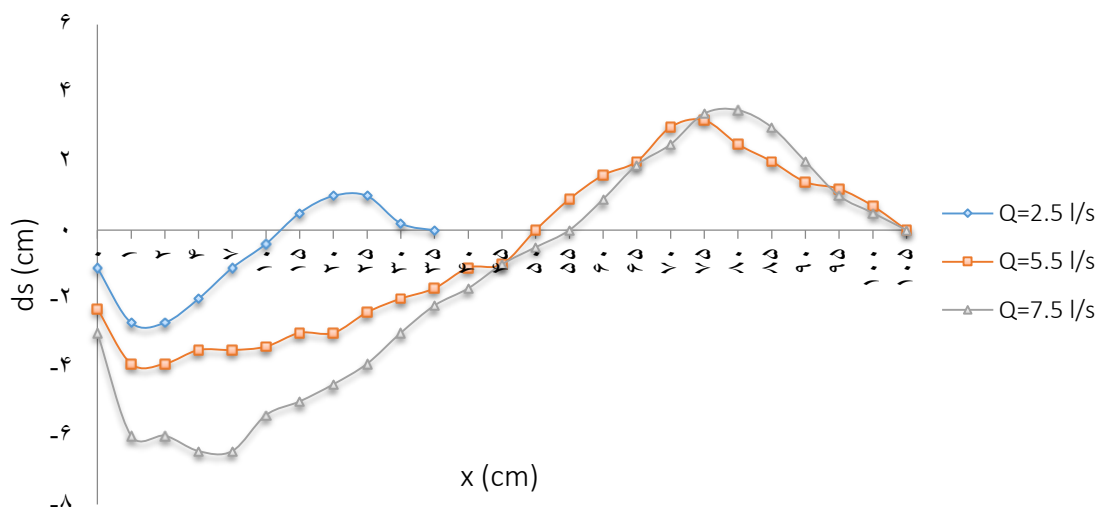
شکل (۴-۷) تغییرات عمق آبشستگی را برای  $d_{50} = 1 \text{ mm}$  در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. روند تغییرات همانند شکل‌های بالا می‌باشد، همان‌طور که مشاهده می‌شود کم‌ترین مقدار آبشستگی مربوط به  $Q = 2/5 \text{ liter/s}$  برابر  $d_s = 2 \text{ cm}$  و بیش‌ترین مقدار آبشستگی مربوط به  $Q = 11/5 \text{ liter/s}$  برابر  $d_s = 6/9 \text{ cm}$  می‌باشد. نکته دیگری که در شکل وجود دارد این است که بر اساس حداکثر مقدار دبی جریان تپه در فاصله ۷۰ تا ۱۴۰ سانتی‌متری از سرریز تشکیل گردیده است. و به ازای کاهش جریان این تپه به پای سرریز کشیده شده است. بر حسب حداکثر مقدار دبی  $Q = 11/5 \text{ liter/s}$  طول گودال آبشستگی ۷۰ سانتی‌متر می‌باشد، و با کاهش دبی طول گودال آبشستگی کاهش می‌یابد به طوری

که برای دبی  $Q = 2/5 \text{ liter/s}$  طول گودال آبشستگی ۸ سانتی متر می باشد و همچنین محل حداکثر عمق آبشستگی با افزایش دبی از سرریز فاصله می گیرد.



شکل ۴-۷- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 1 \text{ mm}$ ، با عمق پایاب ثانویه  $y_{t2}$

شکل (۴-۸) تغییرات عمق آبشستگی را برای  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$  در دبی های مختلف نشان می دهد. کم ترین مقدار آبشستگی مربوط به  $Q = 2/5 \text{ liter/s}$  و برابر  $d_s = 2/7 \text{ cm}$  و طول گودال آبشستگی 10 سانتی متر می باشد، بیش ترین مقدار آبشستگی مربوط به  $Q = 7/5 \text{ liter/s}$  و برابر  $d_s = 5/4 \text{ cm}$  و طول گودال آبشستگی ۵۵ سانتی متر می باشد.



شکل ۴-۸- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 1 \text{ mm}$ ، با عمق پایاب ثانویه  $y_{t2}$

با توجه به نتایج به دست آمده، تغییرات دبی روی حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی در تمامی دانه بندی ها و عمق پایاب مختلف روند یکسانی را نشان می دهد، با این تفاوت که هر چه  $d_{50}$  افزایش می یابد مقدار آبشستگی در دبی مورد نظر کاهش می یابد. اگر با افزایش  $d_{50}$ ، عمق پایاب افزایش یابد مقدار آبشستگی کاهش قابل ملاحظه ای می یابد. همچنین طول گودال آبشستگی کاهش می یابد و محل حداکثر عمق آبشستگی به سرریز نزدیک تر می شود. در واقع افزایش دبی همراه با افزایش حمل رسوب باعث افزایش آبشستگی می گردد.

مجتبی صانعی (۱۳۸۵) در بررسی میزان آبشستگی در پایین دست سرریزهای آبشاری به این نتیجه رسید که با افزایش دبی در واحد عرض سرریز باعث افزایش حداکثر عمق آبشستگی می گردد. شفاعی بجستان (۱۳۸۵) در بررسی حداکثر عمق آبشستگی پایین دست سرریز پلکانی در شرایط جریان ریزشی به این نتیجه رسید که با افزایش دبی جریان، فاصله محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی از انتهای سرریز بیش تر می گردد.

### ۴-۳-۲- درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی در اثر تغییرات دبی

جدول (۴-۸) الی جدول (۴-۱۱) درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی در اثر تغییرات دبی برای عمق پایاب  $(y_{t1})$  و  $(y_{t2})$  با قطر مصالح مختلف ارائه شده است. در شرایطی که عمق پایاب  $(y_{t1})$  و  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$  باشد، بیشترین درصد کاهش آبشستگی مربوط به کاهش دبی از ۱۶ به ۲/۵ لیتر بر ثانیه برابر ۸۳/۹۵ درصد می باشد و کمترین درصد کاهش آبشستگی مربوط به کاهش دبی از ۱۱/۵ به ۹/۵ لیتر بر ثانیه برابر ۵/۵۶ درصد می باشد.

جدول ۴-۸- درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی در اثر تغییرات دبی قطر مصالح  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$

$d_{50} = 6/8 \text{ mm}$		کاهش دبی (litr/s)	ردیف
$y_{t2}$	$y_{t1}$		
۱۴	۲۴/۶۹	۱۶ به ۱۳/۵	۱
۲۲	۳۳/۳۴	۱۶ به ۱۱/۵	۲
۲۴	۳۷/۰۳	۱۶ به ۹/۵	۳
۴۰	۵۶/۸	۱۶ به ۷/۵	۴
۷۴	۶۲/۹۶	۱۶ به ۵/۵	۵
*	۸۳/۹۵	۱۶ به ۲/۵	۶
۹/۳	۱۱/۴۷	۱۳/۵ به ۱۱/۵	۷
۱۱/۶۲	۱۶/۴	۱۳/۵ به ۹/۵	۸
۳۰/۲۳	۴۲/۶۲	۱۳/۵ به ۷/۵	۹
۶۹/۷۶	۵۰/۸	۱۳/۵ به ۵/۵	۱۰
*	۷۸/۶۸	۱۳/۵ به ۲/۵	۱۱
۲/۵۶	۵/۵۶	۱۱/۵ به ۹/۵	۱۲
۲۳/۰۷	۳۵/۱۸	۱۱/۵ به ۷/۵	۱۳
۶۶/۶۷	۴۴/۴۵	۱۱/۵ به ۵/۵	۱۴
۲۱/۰۵	۷۵/۹۲	۱۱/۵ به ۲/۵	۱۵
۶۵/۷۸	۴۵/۷۱	۹/۵ به ۷/۵	۱۶
۵۶/۶۷	۴۱/۱۷	۹/۵ به ۵/۵	۱۷
*	۷۴/۵	۹/۵ به ۲/۵	۱۸
*	۱۴/۲۸	۷/۵ به ۵/۵	۱۹
*	۶۲/۸۵	۷/۵ به ۲/۵	۲۰
*	۵۶/۶۷	۵/۵ به ۲/۵	۲۱

در شرایطی که عمق پایاب ( $v_{t2}$ ) و  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$  باشد، بیشترین درصد کاهش آبستگی مربوط به کاهش دبی از ۱۶ به ۵/۵ لیتر بر ثانیه برابر ۷۴ درصد می‌باشد و کمترین درصد کاهش آبستگی مربوط به کاهش دبی از ۱۱/۵ به ۹/۵ لیتر بر ثانیه برابر ۲/۵۶ درصد می‌باشد.

جدول (۹-۴) برای عمق‌های پایاب مختلف و  $d_{50} = 3/5 \text{ mm}$  را نشان می‌دهد، بیشترین درصد کاهش آبستگی برای ( $v_{t1}$ ) مربوط به کاهش دبی از ۱۳/۵ به ۲/۵ لیتر بر ثانیه برابر ۷۵/۶ درصد می‌باشد و کمترین درصد کاهش آبستگی مربوط به کاهش دبی از ۱۱/۵ به ۹/۵ لیتر بر ثانیه برابر ۶/۶۷ درصد می‌باشد. بیشترین درصد کاهش آبستگی برای ( $v_{t2}$ ) مربوط به کاهش دبی از ۱۳/۵ به ۲/۵ لیتر بر ثانیه برابر ۸۶/۴۸ درصد می‌باشد و کمترین درصد کاهش آبستگی مربوط به کاهش دبی از ۱۳/۵ به ۱۱/۵ لیتر بر ثانیه برابر ۱۰/۸۱ درصد می‌باشد.

جدول ۹-۴- درصد کاهش حداکثر عمق آبستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی در اثر تغییرات دبی برای قطر مصالح

$$d_{50} = 3/5 \text{ mm}$$

$d_{50} = 3/5 \text{ mm}$		کاهش دبی ( $\text{liter/s}$ )	ردیف
$v_{t2}$	$v_{t1}$		
۱۰/۸۱	۸/۵۳	۱۱/۵ به ۱۳/۵	۱
۲۲/۹۷	۱۴/۶۳	۹/۵ به ۱۳/۵	۲
۵۰	۳۲/۹۲	۷/۵ به ۱۳/۵	۳
۵۶/۷۵	۵۱/۲۱	۵/۵ به ۱۳/۵	۴
۸۶/۴۸	۷۵/۶	۲/۵ به ۱۳/۵	۵
۱۳/۶۳	۶/۶۷	۹/۵ به ۱۱/۵	۶
۴۳/۹۳	۲۶/۶۷	۷/۵ به ۱۱/۵	۷
۵۱/۵۱	۴۶/۶۷	۵/۵ به ۱۱/۵	۸
۸۴/۸۴	۷۳/۳۴	۲/۵ به ۱۱/۵	۹
۳۵/۰۸	۲۱/۴۳	۷/۵ به ۹/۵	۱۰
۴۳/۸۵	۴۲/۸۵	۵/۵ به ۹/۵	۱۱
۸۲/۴۵	۷۱/۴۲	۲/۵ به ۹/۵	۱۲
۱۳/۵۱	۲۷/۲۷	۵/۵ به ۷/۵	۱۳
۷۲/۹۷	۶۳/۶۳	۲/۵ به ۷/۵	۱۴
۶۸/۷۵	۵۰	۲/۵ به ۵/۵	۱۵



جدول (۴-۱۰) برای عمق پایاب مختلف و  $d_{50} = 1 \text{ mm}$  را نشان می‌دهد، بیش‌ترین درصد کاهش آبستگی برای  $(y_{t1})$  مربوط به کاهش دبی از ۹/۵ به ۲/۵ لیتر بر ثانیه برابر ۶۱/۰۳ درصد می‌باشد و کم‌ترین درصد کاهش آبستگی مربوط به کاهش دبی از ۹/۵ به ۷/۵ لیتر بر ثانیه برابر ۹/۱ درصد می‌باشد. بیش‌ترین درصد کاهش آبستگی برای  $(y_{t2})$  مربوط به کاهش دبی از ۱۱/۵ به ۲/۵ لیتر بر ثانیه برابر ۷۱/۰۱ درصد می‌باشد و کم‌ترین درصد کاهش آبستگی مربوط به کاهش دبی از ۱۱/۵ به ۹/۵ لیتر بر ثانیه برابر ۱۱/۵۹ درصد می‌باشد.

جدول ۴-۱۰- درصد کاهش حداکثر عمق آبستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی در اثر تغییرات دبی برای

$$d_{50} = 1 \text{ mm}$$

$d_{50} = 1 \text{ mm}$		کاهش دبی ( $\text{liter/s}$ )	ردیف
$y_{t2}$	$y_{t1}$		
۱۱/۵۹	*	۹/۵ به ۱۱/۵	۱
۳۴/۷۸	*	۷/۵ به ۱۱/۵	۲
۴۹/۲۷	*	۵/۵ به ۱۱/۵	۳
۷۱/۰۱	*	۲/۵ به ۱۱/۵	۴
۲۶/۲۲	۹/۱	۷/۵ به ۹/۵	۵
۴۲/۶۲	۴۱/۵۵	۵/۵ به ۹/۵	۶
۶۷/۲۱	۶۱/۰۳	۲/۵ به ۹/۵	۷
۲۲/۲۳	۳۵/۷۱	۵/۵ به ۷/۵	۸
۵۵/۵۶	۵۷/۱۴	۲/۵ به ۷/۵	۹
۴۲/۸۵	۳۳/۳۴	۲/۵ به ۵/۵	۱۰

جدول (۴-۱۱) برای عمق پایاب مختلف و  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$  را نشان می‌دهد، بیش‌ترین درصد کاهش آبستگی برای  $(y_{t1})$  مربوط به کاهش دبی از ۷/۵ به ۲/۵ لیتر بر ثانیه برابر ۵۳/۴۴ درصد می‌باشد و کم‌ترین درصد کاهش آبستگی مربوط به کاهش دبی از ۷/۵ به ۵/۵ لیتر بر ثانیه برابر ۳۰/۱۳ درصد می‌باشد. بیش‌ترین درصد کاهش آبستگی برای  $(y_{t2})$  مربوط به کاهش دبی از ۹/۵ به ۲/۵ لیتر بر ثانیه برابر ۶۱/۹۷ درصد می‌باشد و کم‌ترین درصد کاهش آبستگی مربوط به کاهش دبی از ۹/۵ به ۷/۵ لیتر بر ثانیه برابر ۹/۱۵ درصد می‌باشد.

جدول ۴-۱۱- درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی در اثر تغییرات دبی برای  
 $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$

$d_{50} = 0/3 \text{ mm}$		کاهش دبی (litr/s)	ردیف
$y_{t2}$	$y_{t1}$		
۹/۱۵	*	۷/۵ به ۹/۵	۱۱
۴۵/۰۷	*	۵/۵ به ۹/۵	۱۲
۶۱/۹۷	*	۲/۵ به ۹/۵	۱۳
۳۹/۵۳	۳۰/۱۳	۵/۵ به ۷/۵	۱۴
۵۸/۱۴	۳۵/۴۲	۲/۵ به ۷/۵	۱۵
۳۰/۷۶	۳۳/۳۴	۲/۵ به ۵/۵	۱۶

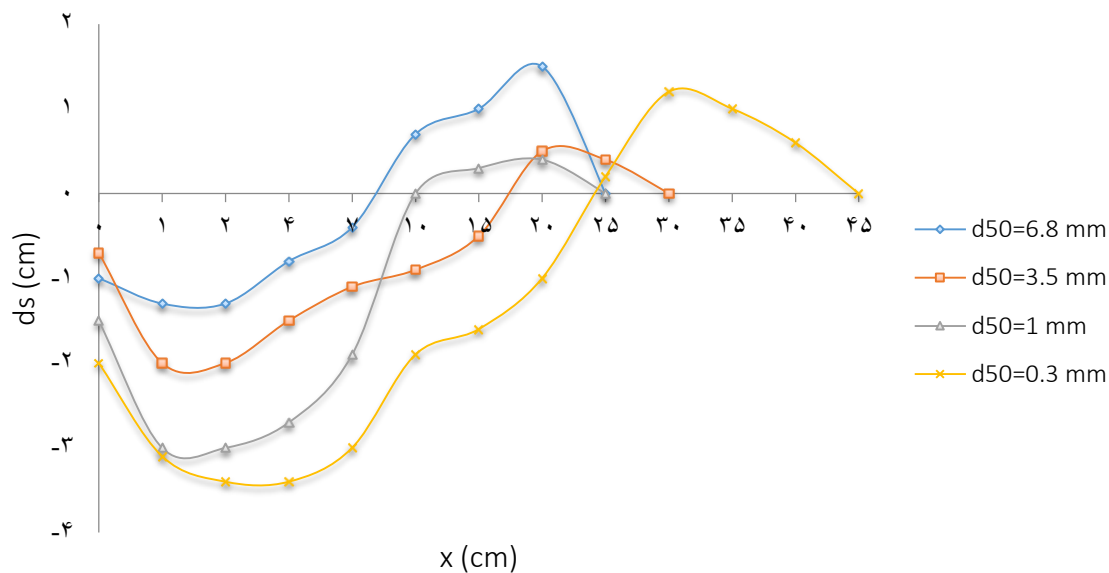
#### ۴-۳-۳- بررسی تغییرات قطر مصالح روی ابعاد حفره آبشستگی در پایین دست سرریز

##### پلکانی

شکل (۴-۹) تا شکل (۴-۱۴) به بررسی تأثیر قطر مصالح ( $d_{50}$ ) بر حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی در دبی‌های مختلف می‌پردازند. در تمامی حالت‌های در نظر گرفته شده با افزایش ( $d_{50}$ ) حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش ( $d_{50}$ ) طول گودال آبشستگی کاهش و به سرریز نزدیک تر می‌شود.

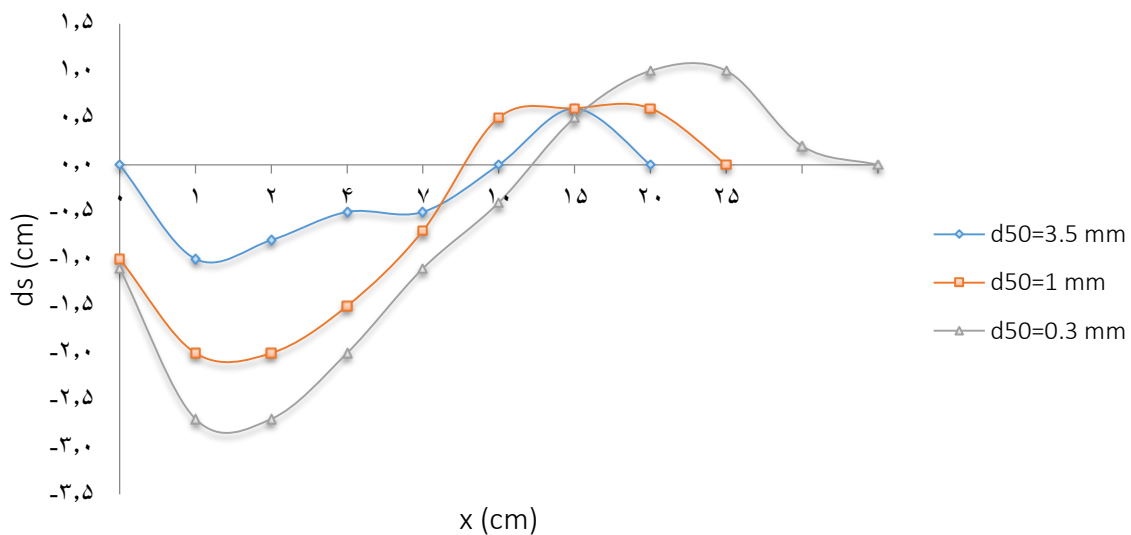
شکل (۴-۹) تغییرات عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی را برای  $Q = 2/5 \text{ litr/s}$  با عمق پایاب اولیه  $y_{t1} = 2 \text{ cm}$  در دانه‌بندی مختلف نشان می‌دهد. نکات مهمی در این شکل وجود دارد، به ازای تک تک مقادیر قطر مصالح مختلف ابتدا در پای سرریز یک حفره آبشستگی ایجاد می‌گردد. سپس بخشی از رسوبات شسته شده در طول مسیر جریان روی هم انباشته شده و تپه را به وجود می‌آورد.

این شکل نشان می‌دهد که در دانه‌بندی  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$  حداکثر عمق آبهستگی  $d_s = 3/4 \text{ cm}$  دانه‌بندی  $d_{50} = 1 \text{ mm}$  حداکثر عمق آبهستگی  $d_s = 3 \text{ cm}$  دانه‌بندی  $d_{50} = 3/5 \text{ mm}$  حداکثر عمق آبهستگی  $d_s = 2 \text{ cm}$  دانه‌بندی  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$  حداکثر عمق آبهستگی  $d_s = 1/3 \text{ cm}$  می‌باشد. لذا حداکثر مقدار آبهستگی در دانه‌بندی  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$  اتفاق افتاد. نکته دیگر این است که بر اساس  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$  تپه در فاصله ۲۵ تا ۴۵ سانتی‌متری از سرریز تشکیل گردیده است. و به ازای افزایش قطر مصالح این تپه به پای سرریز کشیده شده است. و با افزایش قطر مصالح طول گودال آبهستگی کاهش می‌یابد به طوری که برای دانه‌بندی  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$  طول گودال آبهستگی ۸ سانتی‌متر می‌باشد، همچنین برای دانه‌بندی  $0/3 \text{ mm}$  طول گودال آبهستگی ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود طول گودال آبهستگی با قطر مصالح نسبت عکس دارد به طوری که هر چه  $(d_{50})$  افزایش می‌یابد طول گودال آبهستگی کاهش پیدا می‌کند، همچنین محل حداکثر عمق آبهستگی به سرریز نزدیک‌تر می‌شود.



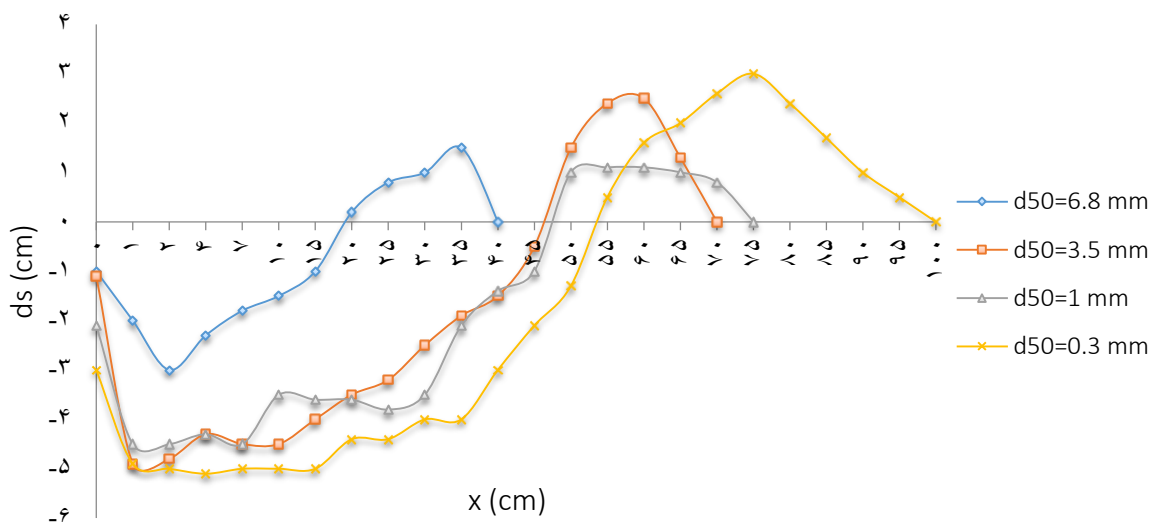
شکل ۴-۹- پروفیل مشاهداتی در پایین‌دست سرریز پلکانی  $Q = 2/5 \text{ l/s}$ ،  $y_{t1} = 2 \text{ cm}$

شکل (۴-۱۰) تغییرات عمق آبستگي در پايين دست سرريز پلکانی را برای  $Q = 2/5 \text{ liter/s}$  با عمق پاياب ثانويه  $y_{t2} = 5 \text{ cm}$  در دانه بندی مختلف نشان می دهد. کم ترين عمق آبستگي مربوط به دانه بندی  $d_{50} = 3/5 \text{ mm}$  برابر  $d_s = 1 \text{ cm}$  و دارای کم ترين طول گودال آبستگي، که برابر ۱۰ سانتی متر می باشد، بیش ترين عمق آبستگي مربوط به دانه بندی  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$  برابر  $d_s = 2/7 \text{ cm}$  و طول گودال آبستگي ۱۳ سانتی متر می باشد. نکته ديگر حائز اهميت در شکل اين است که بر اساس  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$  تپه آبستگي در فاصله ۱۳ تا ۴۰ سانتی متری از سرريز تشکيل گردیده است. و به ازای افزایش قطر مصالح اين تپه به پای سرريز کشيده شده است. به طوری که برای دانه بندی  $d_{50} = 3/5 \text{ mm}$  تپه آبستگي در فاصله ۱۰ تا ۲۰ سانتی متری از سرريز تشکيل شده است.



شکل ۴-۱۰- پروفيل مشاهداتی در پايين دست سرريز پلکانی  $Q = 2/5 \text{ l/s}$ ،  $y_{t2} = 5 \text{ cm}$

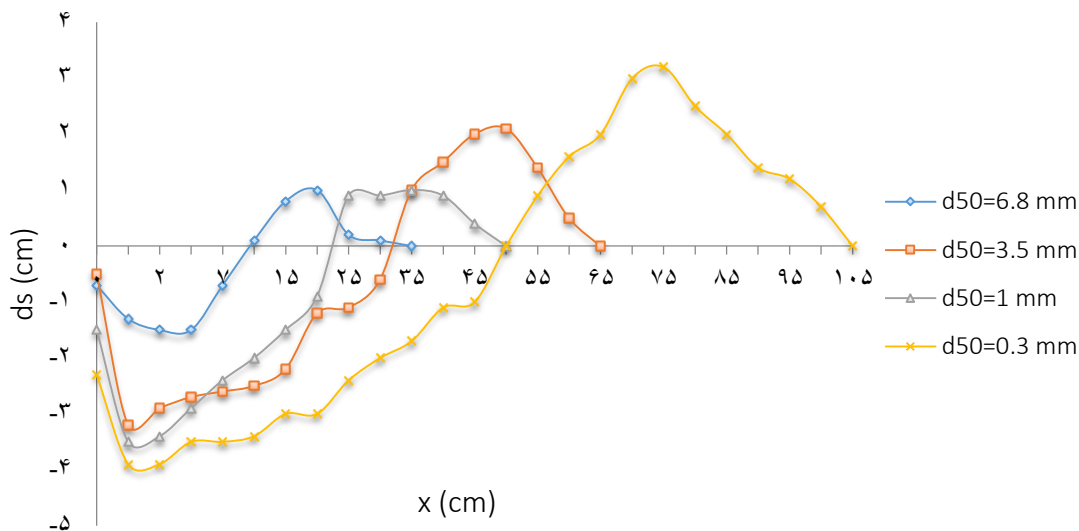
شکل (۴-۱۱) تغییرات عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی را برای  $Q = 5/5 \text{ liter/s}$  با عمق پایاب اولیه  $y_{t1} = 2/9 \text{ cm}$  در دانه بندی مختلف نشان می دهد. کم ترین مقدار آبشستگی مربوط به دانه بندی  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$  برابر  $d_s = 3 \text{ cm}$  و طول گودال آبشستگی 19 سانتی متر می باشد، بیش ترین مقدار آبشستگی مربوط به دانه بندی  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$  برابر  $d_s = 5/1 \text{ cm}$  و طول گودال آبشستگی 54 سانتی متر می باشد. نکته دیگر این است که بر اساس  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$  تپه آبشستگی در فاصله 54 تا 100 سانتی متری از سرریز تشکیل گردیده است. و به ازای افزایش قطر مصالح این تپه به پای سرریز کشیده شده است. به طوری که برای دانه بندی  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$  تپه آبشستگی در فاصله 19 تا 40 سانتی متری از سرریز تشکیل شده است.



شکل ۴-۱۱- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $Q = 5/5 \text{ l/s}$ ،  $y_{t1} = 2/9 \text{ cm}$

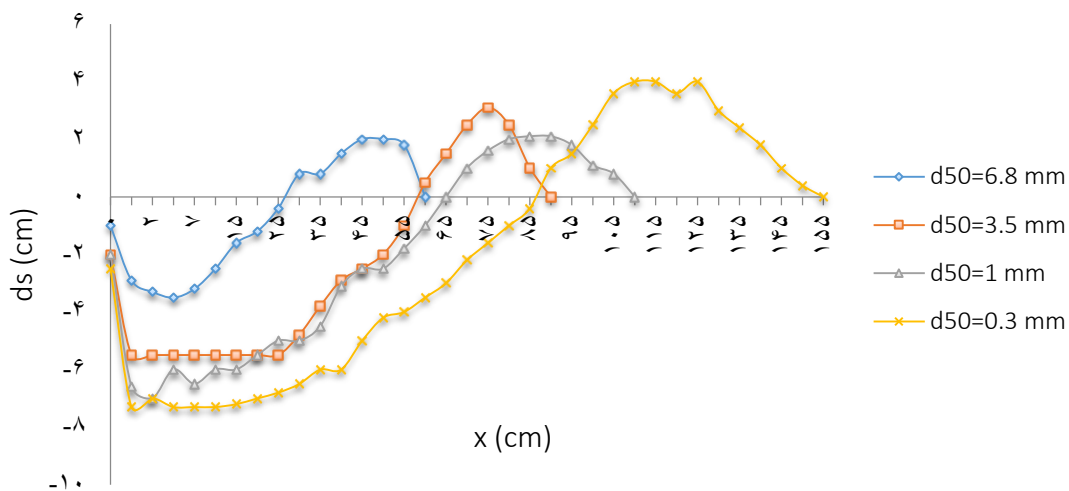
شکل (۴-۱۲) تغییرات عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی را برای  $Q = 5/5 \text{ liter/s}$  با عمق پایاب ثانویه  $y_{t2} = 7 \text{ cm}$  در دانه بندی مختلف نشان می دهد. کم ترین مقدار آبشستگی مربوط به دانه بندی  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$  برابر  $d_s = 1/5 \text{ cm}$  و طول گودال آبشستگی 7 سانتی متر می باشد، بیش ترین مقدار آبشستگی مربوط به دانه بندی  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$  برابر  $d_s = 3/9 \text{ cm}$  و طول گودال آبشستگی 45 سانتی متر می باشد. یکی از نکته های مهم که در این شکل مشاهده می شود این است که بر اساس

ازای افزایش قطر مصالح این تپه به پای سرریز کشیده شده است. به طوری که برای دانه بندی  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$  تپه آبستگي در فاصله 10 تا 35 سانتی متری از سرریز تشکیل شده است. و به



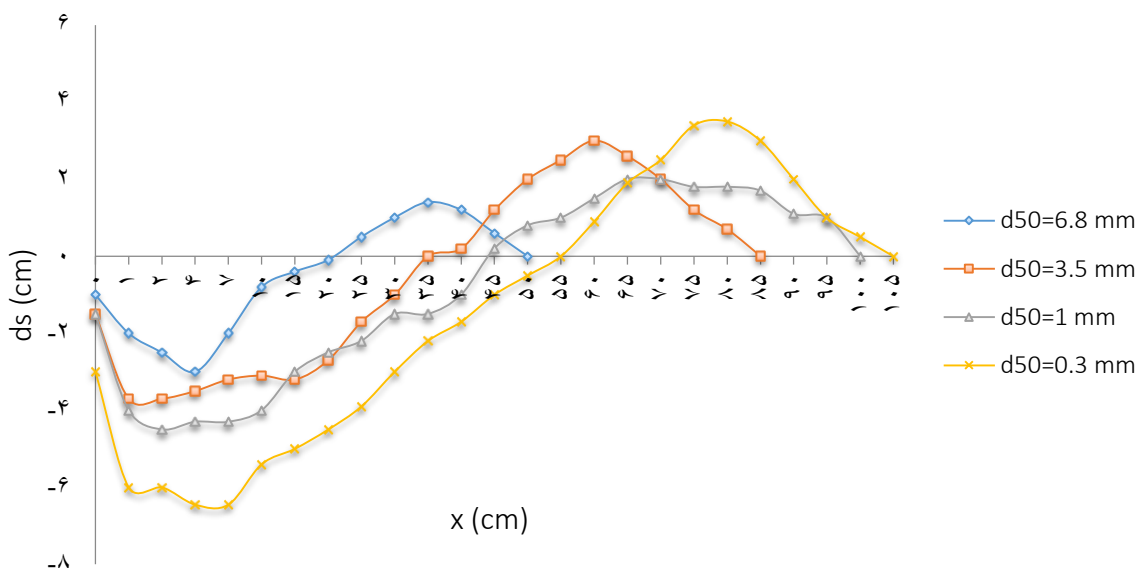
شکل ۴-۱۲- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $Q = 5/5 \text{ l/s}$ ،  $y_{t2} = 7 \text{ cm}$

شکل (۴-۱۳) تغییرات عمق آبستگي را برای  $Q = 7/5 \text{ liter/s}$  با عمق پایاب  $y_{t1} = 3/3 \text{ cm}$  در دانه بندی مختلف نشان می دهد. در این شکل مشاهده می شود که برای دانه بندی با  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$  حداکثر عمق آبستگي برابر  $d_s = 3/5 \text{ cm}$  و طول گودال آبستگي ۲۰ سانتی متر می باشد، بیش ترین مقدار آبستگي مربوط به دانه بندی  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$  برابر  $d_s = 7/3 \text{ cm}$  و طول گودال آبستگي ۸۶ سانتی متر می باشد. همانند شکل های قبل با افزایش  $(d_{50})$  گسترش تپه آبستگي کاهش می یابد، روند تغییرات یکسان است.



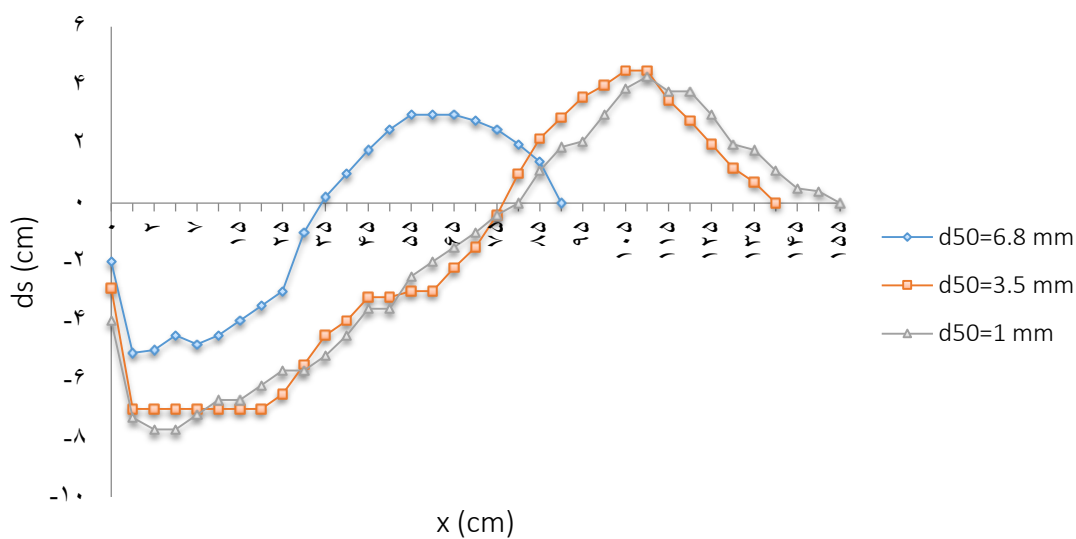
شکل ۴-۱۳- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $Q = 7/5 \text{ l/s}$ ،  $y_{t1} = 3/3 \text{ cm}$

شکل (۴-۱۴) تغییرات عمق آبستگی در پایین دست سرریز پلکانی را برای  $Q = 7/5 \text{ liter/s}$  با عمق پایاب  $y_{t2} = 7/9 \text{ cm}$  در دانه بندی مختلف نشان می دهد. کم ترین مقدار آبستگی مربوط به  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$  برابر  $d_s = 3 \text{ cm}$  و طول گودال آبستگی ۲۰ سانتی متر می باشد، بیش ترین مقدار آبستگی مربوط به  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$  برابر  $d_s = 5/4 \text{ cm}$  و طول گودال آبستگی ۵۵ سانتی متر می باشد.



شکل ۴-۱۴- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $Q = 7/5 \text{ l/s}$ ،  $y_{t2} = 7/9 \text{ cm}$

شکل (۴-۱۵) تغییرات عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی را برای  $Q = 9/5 \text{ liter/s}$  با عمق پایاب اولیه  $y_{t1} = 3/5 \text{ cm}$  در دانه بندی مختلف نشان می دهد. کمترین مقدار آبشستگی مربوط به  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$  و طول گودال آبشستگی 34 سانتی متر می باشد، بیشترین مقدار آبشستگی مربوط به  $d_{50} = 1 \text{ mm}$  برابر  $d_s = 7/7 \text{ cm}$  و طول گودال آبشستگی ۷۵ سانتی متر می باشد.



شکل ۴-۱۵- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $Q = 9/5 \text{ l/s}$ ،  $y_{t1} = 3/5 \text{ cm}$

همان طور که مشاهده می شود با افزایش قطر مصالح ( $d_{50}$ ) برای دبی های مختلف حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست سرریز کاهش می یابد و همچنین محل حداکثر عمق آبشستگی با افزایش قطر مصالح ( $d_{50}$ ) به سرریز نزدیک تر می شود و طول گودال آبشستگی نیز کاهش می یابد. در واقع هر چه دانه بندی ریزتر باشد به دلیل اینکه پتانسیل حمل رسوب بالا می رود میزان آبشستگی در رسوبات ریز افزایش می یابد. مقادیر حداکثر عمق آبشستگی در آزمایش های که همراه با افزایش عمق پایاب بوده کاهش می یابد، یعنی زمانی که عمق پایاب افزایش یافته حداکثر عمق آبشستگی نسبت به عمق پایاب اولیه کاهش بیشتری می یابد که این روند در نمودارها مشاهده می شود.



شفاعی بچستان (۱۳۸۵) در بررسی حداکثر عمق آبشستگی پایین دست سرریز پلکانی در شرایط جریان ریزشی در رابطه با تغییرات دانه بندی به این نتیجه رسید که دانه بندی پایین دست و اندازه ( $d_{50}$ ) تأثیر زیادی روی میزان عمق آبشستگی دارد. به طوری که در شرایط هیدرولیکی مشابه هرچه ( $d_{50}$ ) بیش تر شود میزان آبشستگی کم تر و فاصله آن از انتهای سرریز کاهش می یابد.

اردشیر آذر (۱۳۸۶) در بررسی اثر دانه بندی مصالح بر حداکثر عمق آبشستگی پایین دست سرریزهای ریزش آزاد به این نتیجه رسید که پارامتر  $\frac{H}{D_{50}}$  بر روی حداکثر عمق آبشستگی بسیار مؤثر است.

#### ۴-۳-۴- درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی در اثر تغییرات دانه بندی مصالح

پس از انجام شبیه سازی های جریان و رسوب در حالت های مختلف، عمق فرسایش در پایین دست سرریز پلکانی برای هر یک از حالت های انجام آزمایش محاسبه شد. سپس درصد کاهش عمق آبشستگی به ازای تغییرات قطر مصالح ( $d_{50}$ ) به دست آمد. در جدول مقادیر درصد کاهش عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی در اثر تغییر قطر مصالح ارائه شده است.

جدول (۴-۱۲) درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی در اثر تغییرات دانه بندی مصالح ( $d_{50}$ ) با عمق پایاب اولیه ( $v_{t1}$ ) را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود تقریباً در تمامی حالات، با افزایش قطر مصالح درصد کاهش عمق آبشستگی نیز افزایش می یابد. بیش ترین درصد کاهش عمق آبشستگی مربوط به افزایش قطر مصالح از  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$  به  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$  با  $Q = 2/5 \text{ liter/s}$  برابر  $61/76$  درصد می باشد و کم ترین مقدار آن مربوط به افزایش قطر مصالح از  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$  به  $d_{50} = 1 \text{ mm}$  با  $Q = 7/5 \text{ liter/s}$  برابر  $4/2$  درصد می باشد.

جدول (۴-۱۳) درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی در اثر تغییرات دانه بندی مصالح ( $d_{50}$ ) با عمق پایاب ثانویه ( $v_{t2}$ ) را نشان می دهد. بیش ترین درصد کاهش عمق

آبشستگی مربوط به افزایش قطر مصالح از  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$  به  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$  با  $Q = 5/5 \text{ liter/s}$  برابر  $66/67$  درصد می‌باشد و کم‌ترین مقدار آن مربوط به افزایش قطر مصالح از  $d_{50} = 1 \text{ mm}$  به  $d_{50} = 3/5 \text{ mm}$  با  $Q = 9/5 \text{ liter/s}$  برابر  $6/55$  درصد می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود قطر مصالح و عمق پایاب تأثیر زیادی در میزان آبشستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی دارد، تأثیر این دو پارامتر با هم در کاهش حداکثر عمق آبشستگی قابل ملاحظه است.

جدول ۴-۱۲- درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی در اثر تغییرات دانه‌بندی مصالح ( $d_{50}$ ) با عمق پایاب اولیه ( $y_{t1}$ )

$y_{t1}$								
افزایش قطر مصالح از $0/3$ به $6/8$ میلی‌متر			افزایش قطر مصالح از $0/3$ به $3/5$ میلی‌متر			افزایش قطر مصالح از $0/3$ به $1$ میلی‌متر		
$Q = 2/5$ liter/s	$Q = 5/5$ liter/s	$Q = 7/5$ liter/s	$Q = 2/5$ liter/s	$Q = 5/5$ liter/s	$Q = 7/5$ liter/s	$Q = 2/5$ liter/s	$Q = 5/5$ liter/s	$Q = 7/5$ liter/s
61/76	41/2	52/0.5	41/17	21/56	24/65	11/76	11/77	4/2
افزایش قطر مصالح از $1$ به $6/8$ میلی‌متر				افزایش قطر مصالح از $1$ به $3/5$ میلی‌متر				
$Q = 2/5$ liter/s	$Q = 5/5$ liter/s	$Q = 7/5$ liter/s	$Q = 9/5$ liter/s	$Q = 2/5$ liter/s	$Q = 5/5$ liter/s	$Q = 7/5$ liter/s	$Q = 9/5$ liter/s	
56/67	33/34	50	33/77	33/34	11/12	21/42	9/1	
افزایش قطر مصالح از $3/5$ به $6/8$ میلی‌متر								
$Q = 2/5$ liter/s	$Q = 5/5$ liter/s	$Q = 7/5$ liter/s	$Q = 9/5$ liter/s	$Q = 11/5$ liter/s	$Q = 13/5$ liter/s	$Q = 16$ liter/s		
35	25	36/36	27/14	28	25/6	*		

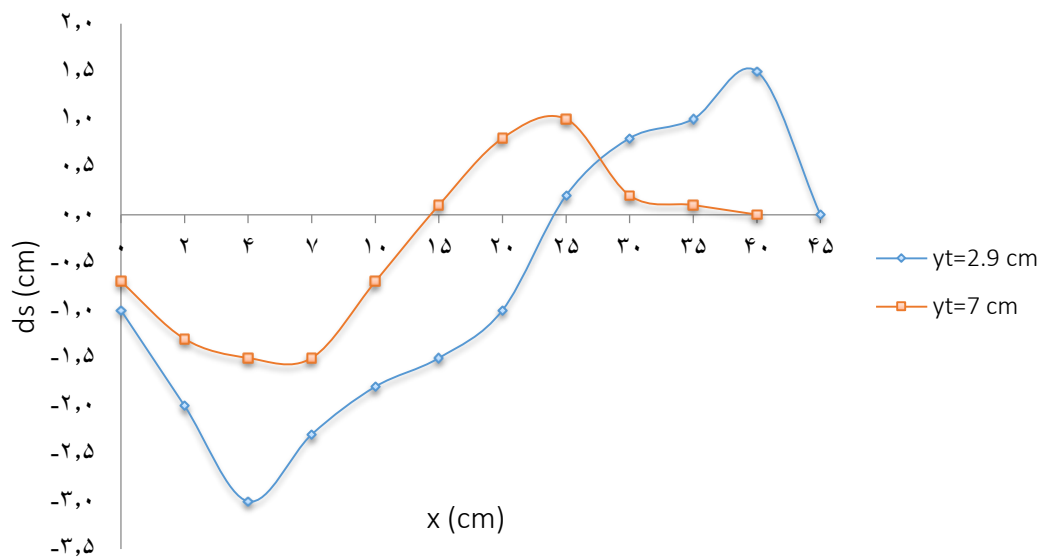
جدول ۴-۱۳- درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی در اثر تغییرات دانه بندی مصالح ( $d_{50}$ ) با عمق پایاب ثانویه ( $Y_{t2}$ )

$Y_{t2}$							
افزایش قطر مصالح از ۰/۳ به ۳/۵ میلی متر				افزایش قطر مصالح از ۰/۳ به ۱ میلی متر			
$Q = 2/5$ litr/s	$Q = 5/5$ litr/s	$Q = 7/5$ litr/s	$Q = 9/5$ litr/s	$Q = 2/5$ litr/s	$Q = 5/5$ litr/s	$Q = 7/5$ litr/s	$Q = 9/5$ litr/s
۶۲/۹۶	۱۷/۹۵	۴۲/۶۳	۱۹/۷۲	۲۵/۹۲	۱۰/۲۵	۳۰/۱۳	۱۴/۱
افزایش قطر مصالح از ۱ به ۳/۵ میلی متر				افزایش قطر مصالح از ۰/۳ به ۶/۸ میلی متر			
$Q = 2/5$ litr/s	$Q = 5/5$ litr/s	$Q = 7/5$ litr/s	$Q = 9/5$ litr/s	$Q = 11/5$ litr/s	$Q = 5/5$ litr/s	$Q = 7/5$ litr/s	$Q = 9/5$ litr/s
۵۰	۸/۵۷	۱۷/۷۸	۶/۵۵	۴/۳۵	۶۶/۶۷	۵۳/۴۸	۴۶/۴۷
افزایش قطر مصالح از ۳/۵ به ۶/۸ میلی متر				افزایش قطر مصالح از ۱ به ۶/۸ میلی متر			
$Q = 5/5$ litr/s	$Q = 7/5$ litr/s	$Q = 9/5$ litr/s	$Q = 9/5$ litr/s	$Q = 5/5$ litr/s	$Q = 7/5$ litr/s	$Q = 9/5$ litr/s	$Q = 11/5$ litr/s
۵۹/۳۷۵	۱۸/۹۲	۳۳/۳۴	۴۰/۹۰	۶۲/۹۵	۳۳/۳۴	۳۷/۷	۴۳/۴۷

#### ۴-۳-۵- بررسی تغییرات عمق پایاب روی ابعاد حفره آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی

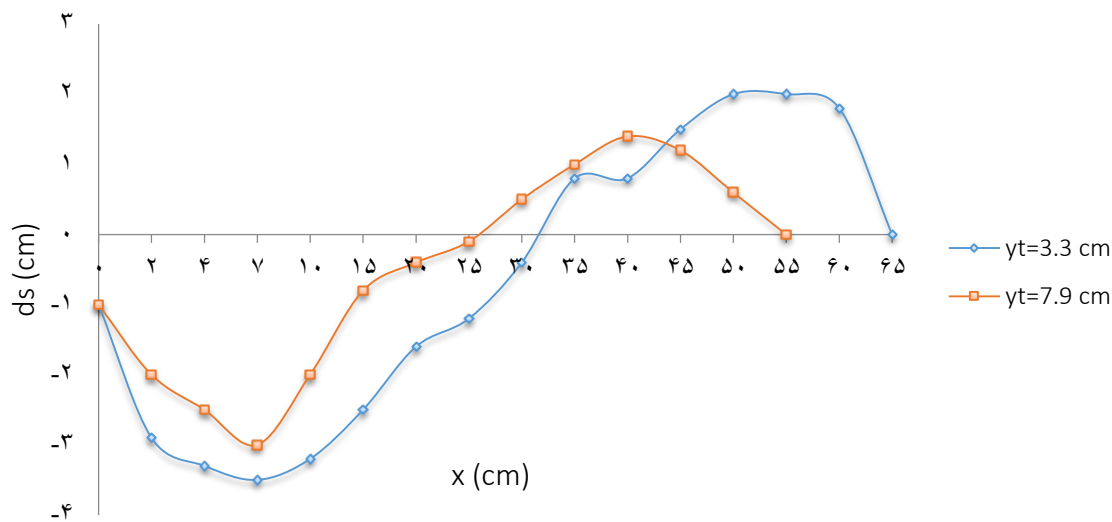
در این تحقیق، هدف تأثیر سرریز پلکانی روی حداکثر عمق آبشستگی می باشد. پارامتر مورد بررسی دیگر، تغییر عمق پایاب می باشد. شکل (۴-۱۶) تا شکل (۴-۲۶) به بررسی تأثیر عمق پایاب بر حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی در دبی های مختلف می پردازند. همان طور که مشاهده می شود با افزایش عمق پایاب حداکثر عمق آبشستگی کاهش می یابد و همچنین با افزایش عمق پایاب طول گودال آبشستگی کاهش و به سرریز نزدیک تر می شود. این روند در تمامی نمودارهای مربوطه قابل مشاهده است.

شکل (۴-۱۶) پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی را برای دبی  $Q = 5/5 \text{ liter/s}$  با دانه بندی  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$  در عمق های پایاب ( $y_t$ ) مختلف نشان می دهد. در این شکل مشاهده می شود که برای عمق پایاب  $y_t = 2/9 \text{ cm}$  حداکثر عمق آبستگي  $d_s = 3 \text{ cm}$  و طول گودال آبستگي ۲۴ سانتی متر می باشد. با افزایش عمق پایاب  $y_t = 7 \text{ cm}$  حداکثر عمق آبستگي  $d_s = 1/3 \text{ cm}$  کاهش یافته است و طول گودال آبستگي ۱۵ سانتی متر می باشد. نکته دیگر این است که بر اساس  $y_t = 2/9 \text{ cm}$  تپه در فاصله ۲۴ تا ۴۵ سانتی متری از سرریز تشکیل گردیده است. و به ازای افزایش عمق پایاب این تپه به پای سرریز کشیده شده است. همان طور که مشاهده می شود در شرایط هیدرولیکی مشابه و دانه بندی یکسان به ازای افزایش عمق پایاب مقدار آبستگي کاهش می یابد.



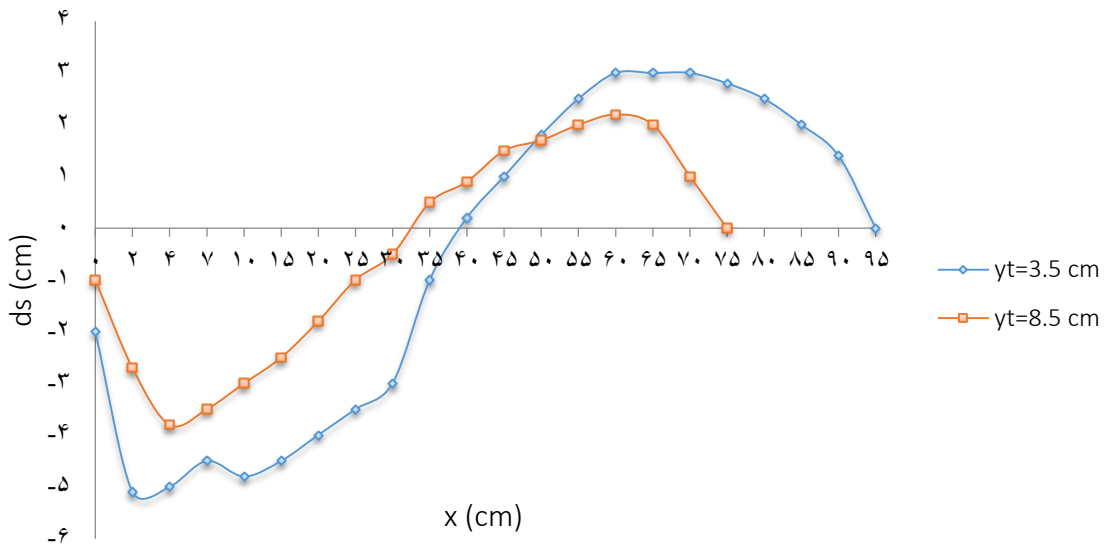
شکل ۴-۱۶- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $Q = 5/5 \text{ l/s}$  ،  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$

شکل (۴-۱۷) پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی را برای  $Q = 7/5 \text{ liter/s}$  با  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$  در عمق‌های پایاب ( $y_t$ ) مختلف نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که برای عمق پایاب  $y_t = 3/3 \text{ cm}$  حداکثر عمق آبشستگی  $d_s = 3/5 \text{ cm}$  و طول گودال آبشستگی ۳۲ سانتی‌متر می‌باشد. با افزایش عمق پایاب  $y_t = 7/9 \text{ cm}$  حداکثر عمق آبشستگی  $d_s = 3 \text{ cm}$  کاهش یافته است و طول گودال آبشستگی ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین بر اساس  $y_t = 3/3 \text{ cm}$  تپه در فاصله ۳۲ تا ۶۵ سانتی‌متری از سرریز تشکیل گردیده است. و به ازای افزایش عمق پایاب این تپه به پای سرریز کشیده شده است.



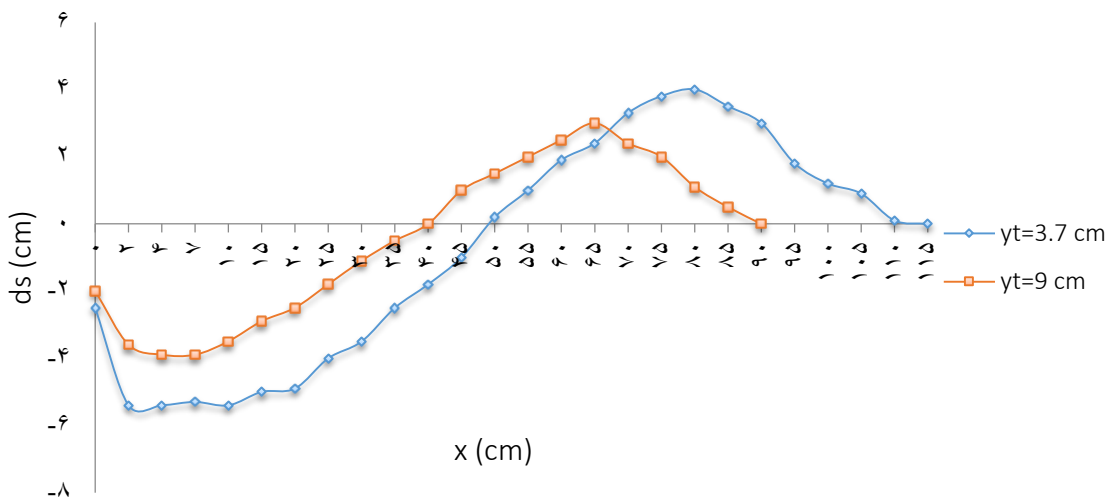
شکل ۴-۱۷- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $Q = 7/5 \text{ l/s}$ ،  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$

شکل (۴-۱۸) تغییرات عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی را برای دبی  $Q = 7/5 \text{ liter/s}$  با  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$  در عمق‌های پایاب ( $y_t$ ) مختلف را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که برای عمق پایاب  $y_t = 3/5 \text{ cm}$  حداکثر عمق آبشستگی  $d_s = 5/1 \text{ cm}$  و طول گودال آبشستگی ۴۰ سانتی‌متر می‌باشد. با افزایش عمق پایاب  $y_t = 8/5 \text{ cm}$  حداکثر عمق آبشستگی  $d_s = 3/8 \text{ cm}$  کاهش یافته است و طول گودال آبشستگی ۳۴ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین بر اساس  $y_t = 3/5 \text{ cm}$  تپه در فاصله ۴۰ تا ۹۵ سانتی‌متری از سرریز تشکیل گردیده است. و به ازای افزایش عمق پایاب این تپه به پای سرریز کشیده شده است.



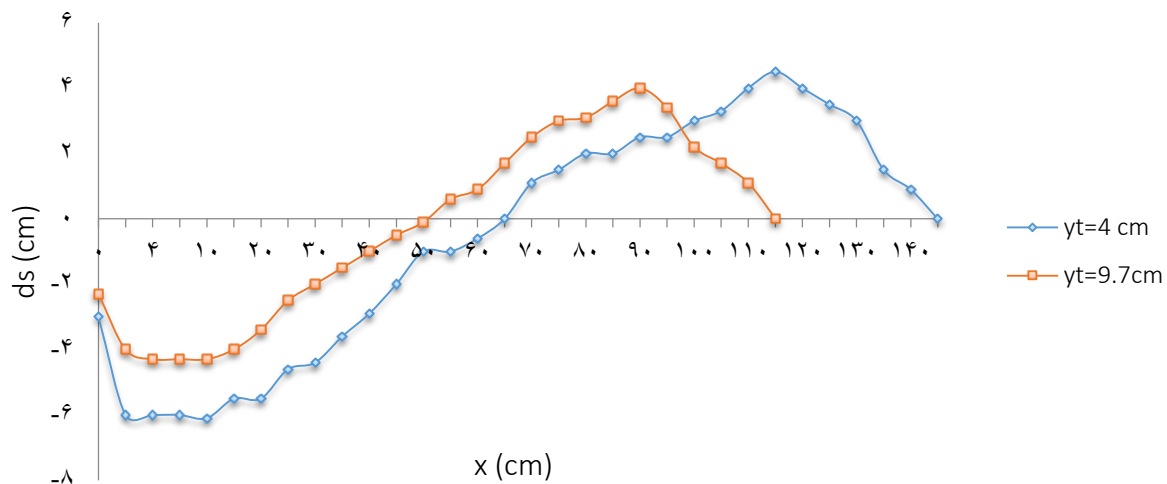
شکل ۴-۱۸- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $Q = 9/5 \text{ l/s}$ ،  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$

شکل (۴-۱۸) تغییرات عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی را برای دبی  $Q = 7/5 \text{ liter/s}$  با  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$  در عمق‌های پایاب  $(y_t)$  مختلف نشان می‌دهد. نکته قابل توجه این است که روند تغییرات تمامی نمودارها یکسان است و با افزایش عمق پایاب حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. همچنین گسترش طول آبشستگی کاهش پیدا می‌کند.

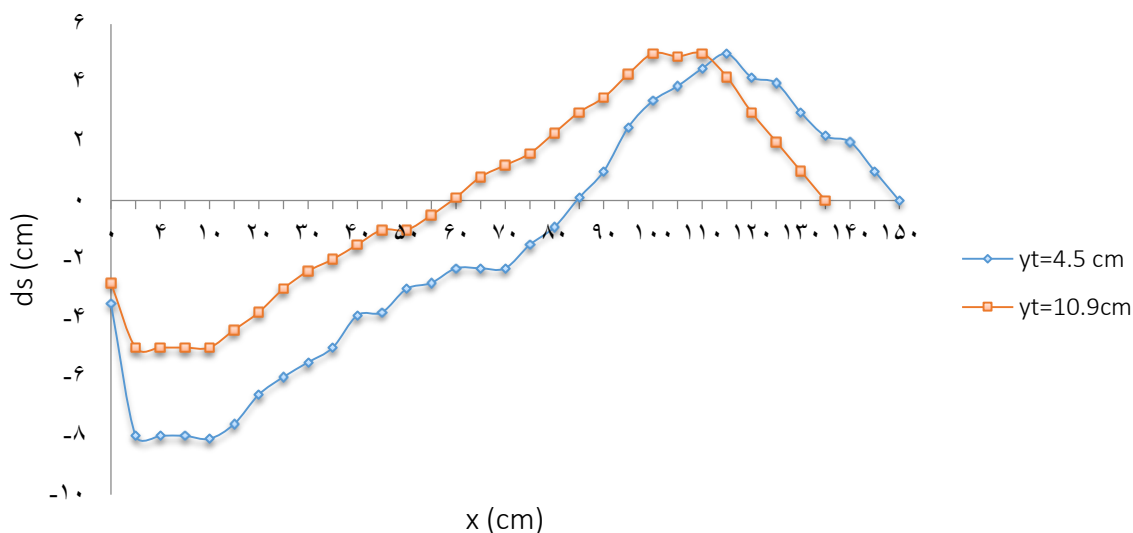


شکل ۴-۱۹- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $Q = 11/5 \text{ l/s}$ ،  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$

شکل‌های (۴-۲۰) و شکل (۴-۲۱) تغییرات عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی را برای دبی-های (۱۳/۵، ۱۶/۵) لیتر بر ثانیه برای  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$  در عمق‌های پایاب ( $y_t$ ) مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در شرایط هیدرولیکی مشابه و دانه‌بندی یکسان به ازای افزایش عمق پایاب مقدار آبشستگی کاهش می‌یابد. در تمامی نمودارها این روند قابل مشاهده است.

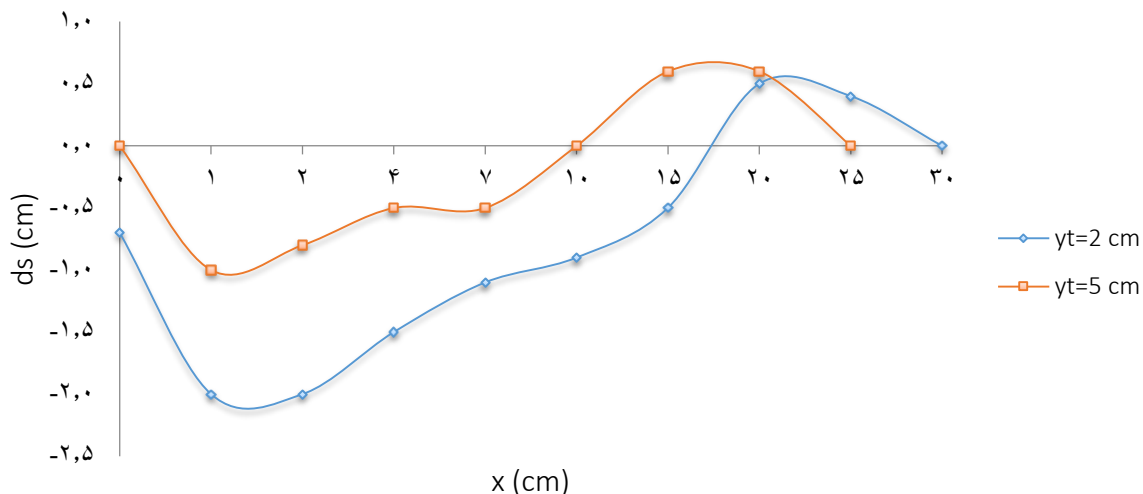


شکل ۴-۲۰- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$ ،  $Q = 13/5 \text{ l/s}$



شکل ۴-۲۱- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$ ،  $Q = 16 \text{ l/s}$

شکل (۴-۲۲) پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی را برای دبی  $Q = 2/5 \text{ liter/s}$  با دانه بندی  $d_{50} = 3/5 \text{ mm}$  در عمق های پایاب  $(y_t)$  مختلف نشان می دهد. از روی این شکل مشخص می شود که برای عمق پایاب  $y_t = 2 \text{ cm}$  حداکثر عمق آبستگي  $d_s = 2 \text{ cm}$  و طول گودال آبستگي ۱۸ سانتی متر می باشد. برای عمق پایاب  $y_t = 5 \text{ cm}$  حداکثر عمق آبستگي  $d_s = 1 \text{ cm}$  و طول گودال آبستگي ۱۰ سانتی متر می باشد. نکته مهم شکل این است که بر اساس  $y_t = 2 \text{ cm}$  تپه در فاصله 18 تا ۳۰ سانتی متری از سرریز تشکیل گردیده است. و به ازای افزایش عمق پایاب این تپه به پای سرریز کشیده شده است.

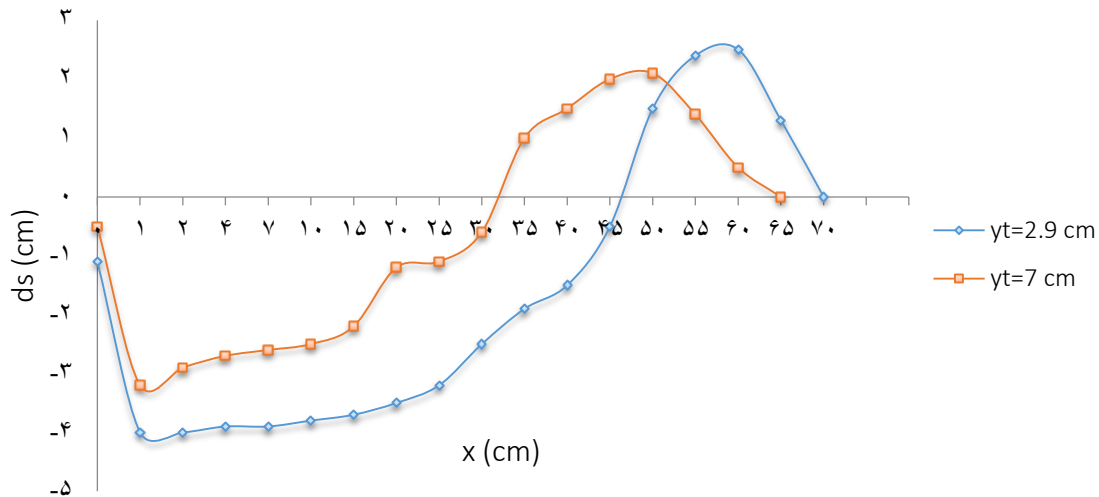


شکل ۴-۲۲- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $Q = 2/5 \text{ l/s}$ ،  $d_{50} = 3/5 \text{ mm}$

شکل (۴-۲۳) تغییرات عمق آبستگي در پایین دست سرریز پلکانی را برای دبی  $Q = 5/5 \text{ liter/s}$  با دانه بندی  $d_{50} = 3/5 \text{ mm}$  در عمق های پایاب  $(y_t)$  مختلف نشان می دهد. از روی این شکل مشخص می شود که برای عمق پایاب  $y_t = 2/9 \text{ cm}$  حداکثر عمق آبستگي  $d_s = 4 \text{ cm}$  و طول گودال آبستگي ۴۵ سانتی متر می باشد. برای عمق پایاب  $y_t = 7/9 \text{ cm}$  حداکثر عمق آبستگي  $d_s = 3/2 \text{ cm}$  و طول گودال آبستگي 32 سانتی متر می باشد. همچنین بر اساس  $y_t = 2/9 \text{ cm}$  تپه در

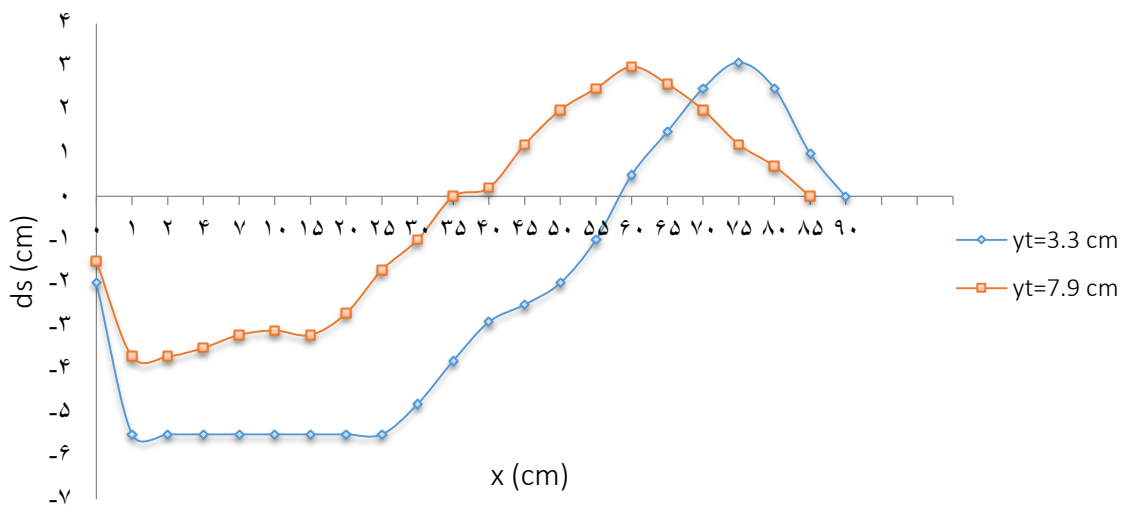


فاصله 45 تا 70 سانتی متری و برای  $y_t = 7\text{ cm}$  تپه در فاصله 32 تا 65 سانتی متری از سرریز تشکیل گردیده است.



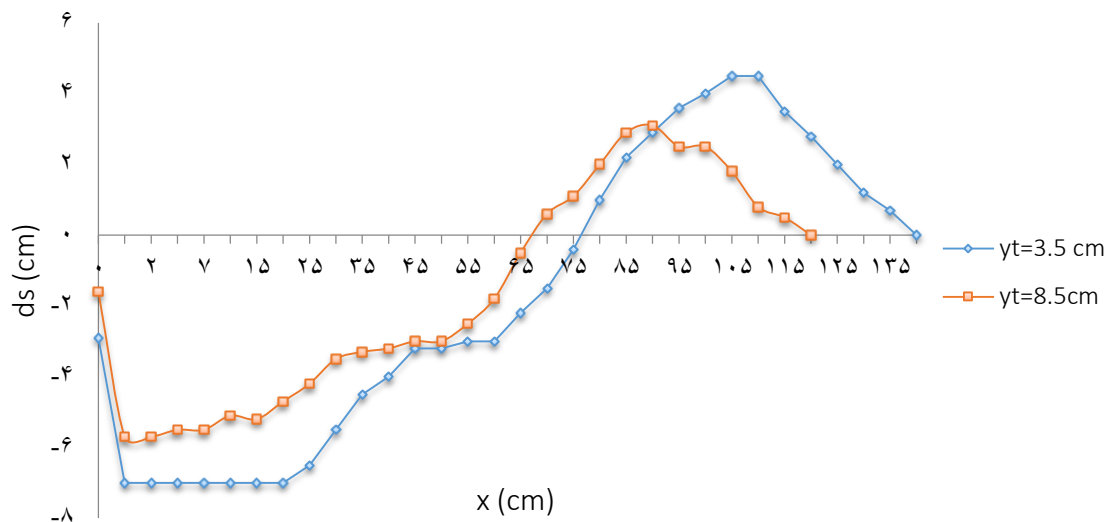
شکل ۴-۲۳- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 3/5\text{ mm}$ ،  $Q = 5/5\text{ l/s}$

شکل (۴-۲۴) تغییرات عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی را برای دبی  $Q = 7/5\text{ liter/s}$  با  $d_{50} = 6/8\text{ mm}$  در عمق‌های پایاب ( $y_t$ ) مختلف نشان می‌دهد. نکته قابل توجه این است که روند تغییرات تمامی نمودارها یکسان است و با افزایش عمق پایاب حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. همچنین گسترش طول آبشستگی کاهش پیدا می‌کند.

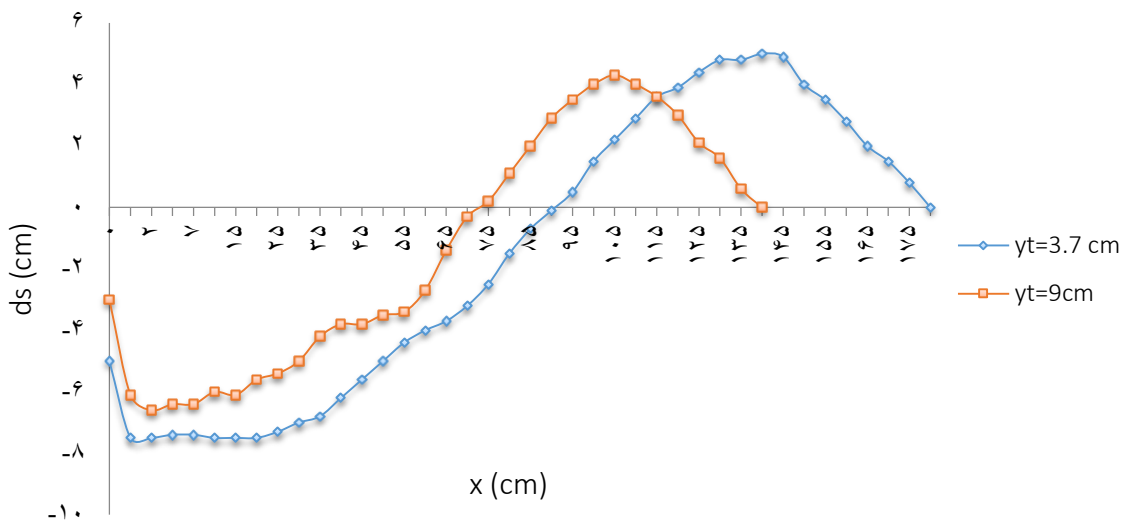


شکل ۴-۲۴- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 3/5\text{ mm}$ ،  $Q = 7/5\text{ l/s}$

شکل‌های (۲۵-۴) و شکل (۲۶-۴) پروفیل مشاهداتی در پایین‌دست سرریز پلکانی را برای دبی‌های (۹/۵، ۱۱/۵) لیتر بر ثانیه برای دانه‌بندی  $d_{50} = 3/5 \text{ mm}$  در عمق‌های پایاب ( $y_t$ ) مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در شرایط هیدرولیکی مشابه و دانه‌بندی یکسان به ازای افزایش عمق پایاب مقدار آبشستگی کاهش می‌یابد. در تمامی نمودارها این روند قابل مشاهده است.

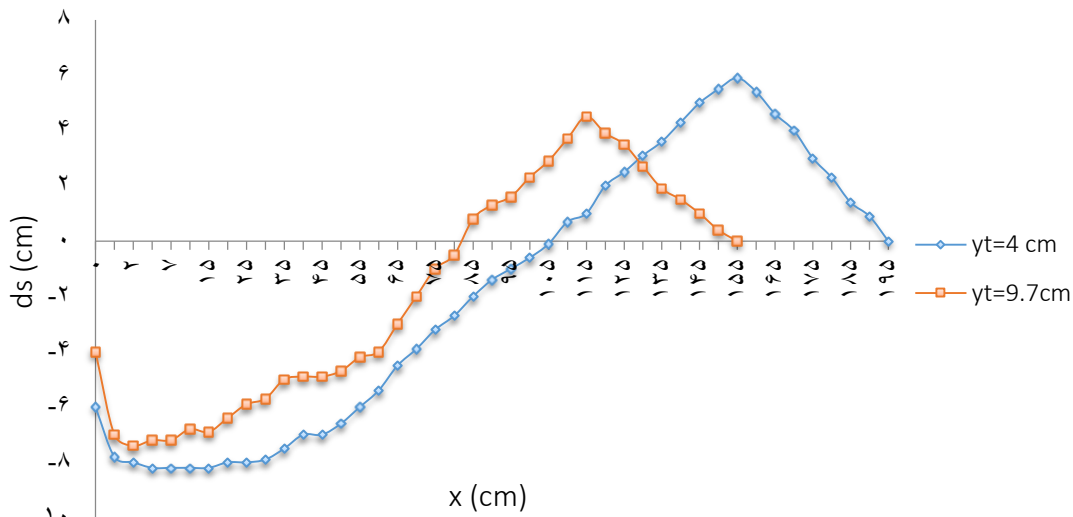


شکل ۴-۲۵- پروفیل مشاهداتی در پایین‌دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 3/5 \text{ mm}$ ،  $Q = 9/5 \text{ l/s}$



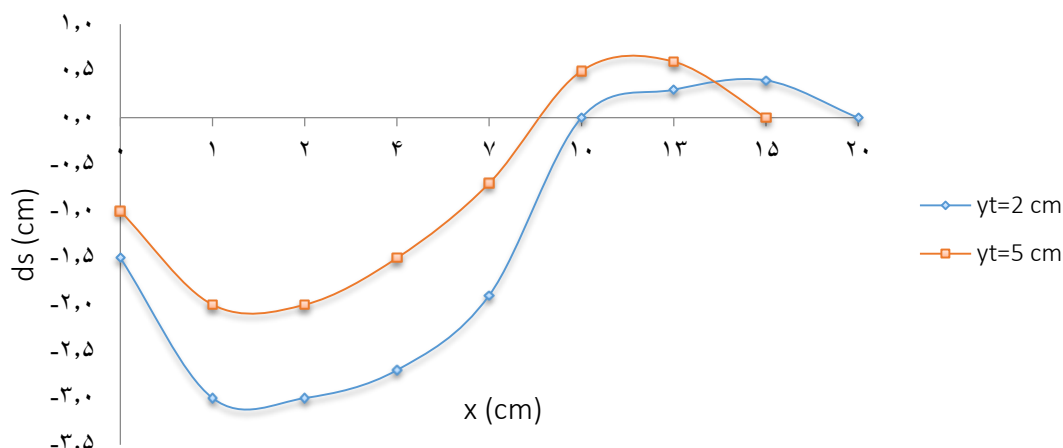
شکل ۴-۲۶- پروفیل مشاهداتی در پایین‌دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 3/5 \text{ mm}$ ،  $Q = 11/5 \text{ l/s}$

شکل (۴-۲۷) تغییرات عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی را برای دبی  $Q = 7/5 \text{ liter/s}$  با  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$  در عمق‌های پایاب ( $y_t$ ) مختلف نشان می‌دهد. روند تغییرات همانند نمودارهای قبل می‌باشد.



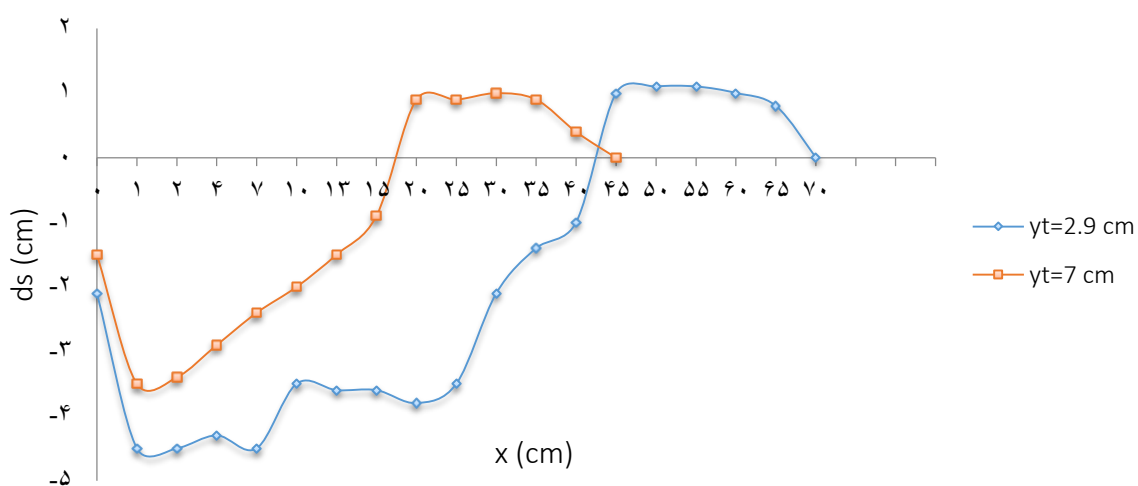
شکل ۴-۲۷- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $Q = 13/5 \text{ l/s}$ ،  $d_{50} = 3/5 \text{ mm}$

شکل (۴-۲۸) تغییرات عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی را برای دبی  $Q = 2/5 \text{ liter/s}$  با دانه بندی  $d_{50} = 1 \text{ mm}$  در عمق‌های پایاب ( $y_t$ ) مختلف نشان می‌دهد. از روی این شکل مشخص می‌شود که برای عمق پایاب  $y_t = 2 \text{ cm}$  حداکثر عمق آبشستگی  $d_s = 3 \text{ cm}$  و طول گودال آبشستگی ۱۰ سانتی متر می‌باشد. برای عمق پایاب  $y_t = 5 \text{ cm}$  حداکثر عمق آبشستگی  $d_s = 2 \text{ cm}$  و طول گودال آبشستگی ۸ سانتی متر می‌باشد. همچنین بر اساس  $y_t = 2 \text{ cm}$  تپه در فاصله ۱۰ تا ۲۰ سانتی-متری و برای  $y_t = 5 \text{ cm}$  تپه در فاصله ۸ تا ۱۵ سانتی متری از سرریز تشکیل گردیده است.



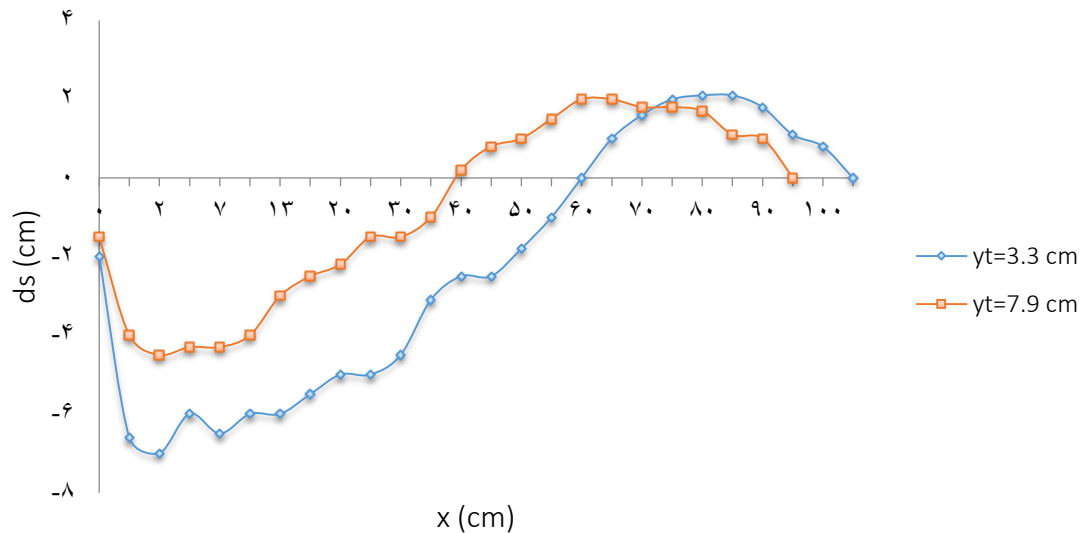
شکل ۴-۲۸- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 1 \text{ mm}$ ،  $Q = 2/5 \text{ l/s}$

شکل (۴-۲۹) پروفیل آبشستگی را برای دبی  $Q = 2/5 \text{ liter/s}$  با دانه بندی  $d_{50} = 1 \text{ mm}$  در عمق های پایاب ( $y_t$ ) مختلف نشان می دهد. از روی این شکل مشخص می شود که برای عمق پایاب  $y_t = 2/9 \text{ cm}$  حداکثر عمق آبشستگی  $d_s = 4/5 \text{ cm}$  و طول گودال آبشستگی 43 سانتی متر می باشد. برای عمق پایاب  $y_t = 7 \text{ cm}$  حداکثر عمق آبشستگی  $d_s = 3/5 \text{ cm}$  و طول گودال آبشستگی 17 سانتی متر می باشد. همچنین بر اساس  $y_t = 2/9 \text{ cm}$  تپه در فاصله 43 تا 70 سانتی متری و برای  $y_t = 7 \text{ cm}$  تپه در فاصله 17 تا 45 سانتی متری از سرریز تشکیل گردیده است.

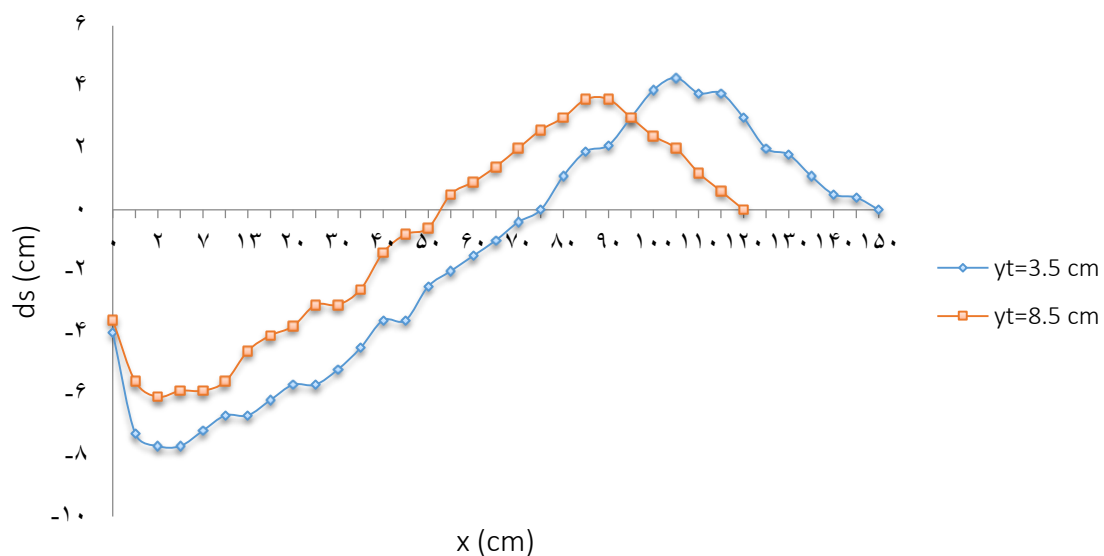


شکل ۴-۲۹- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 1 \text{ mm}$ ،  $Q = 5/5 \text{ l/s}$

شکل (۳۰-۴) و شکل (۳۱-۴) پروفیل مشاهداتی آبشستگی را برای دبی‌های  $Q = 7/5 \text{ liter/s}$  و  $Q = 9/5 \text{ liter/s}$  در عمق‌های پایاب ( $y_t$ ) مختلف نشان می‌دهد. نکته قابل توجه این است که روند تغییرات تمامی نمودارها یکسان است و با افزایش عمق پایاب حداکثر عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. همچنین گسترش طول آبشستگی پیدا می‌کند.

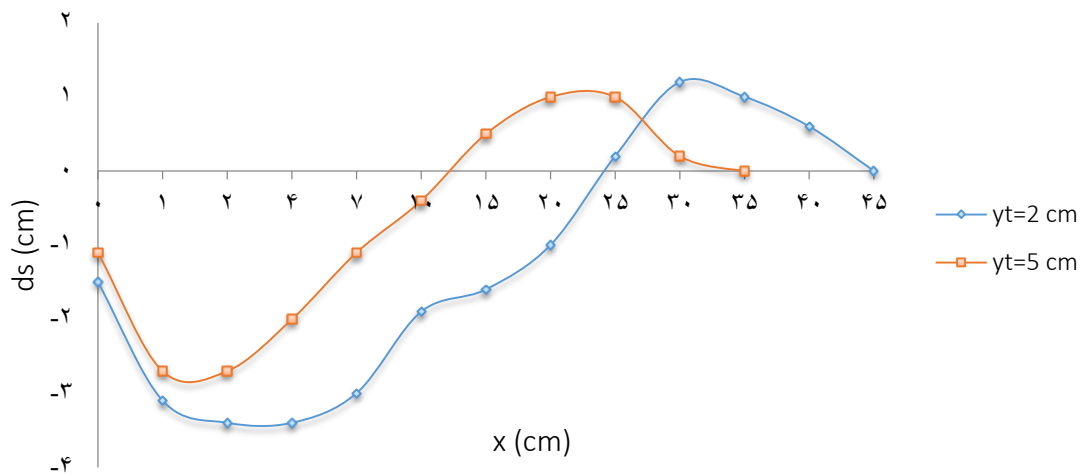


شکل ۳۰-۴- پروفیل مشاهداتی در پایین‌دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 1 \text{ mm}$ ،  $Q = 7/5 \text{ l/s}$



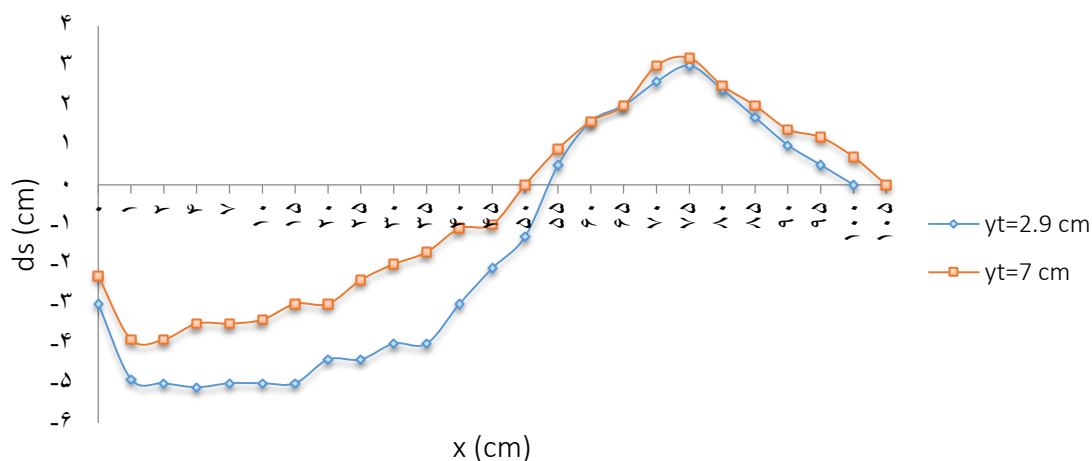
شکل ۳۱-۴- پروفیل مشاهداتی در پایین‌دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 1 \text{ mm}$ ،  $Q = 9/5 \text{ l/s}$

شکل (۴-۳۲) پروفیل مشاهداتی را برای دبی  $Q = 2/5 \text{ liter/s}$  برای  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$  در عمق پایاب  $y_t = 2 \text{ cm}$  مختلف نشان می‌دهد. از روی این شکل مشخص می‌شود که برای عمق پایاب  $y_t = 2 \text{ cm}$  حداکثر عمق آبشستگی  $d_s = 3/4 \text{ cm}$  و طول گودال آبشستگی 24 سانتی‌متر می‌باشد. برای عمق پایاب  $y_t = 5 \text{ cm}$  حداکثر عمق آبشستگی  $d_s = 2/7 \text{ cm}$  و طول گودال آبشستگی 12 سانتی‌متر می‌باشد. همچنین بر اساس  $y_t = 2 \text{ cm}$  تپه در فاصله ۲۴ تا ۴۵ سانتی‌متری و برای  $y_t = 5 \text{ cm}$  تپه در فاصله ۱۲ تا ۳۵ سانتی‌متری از سرریز تشکیل گردیده است.

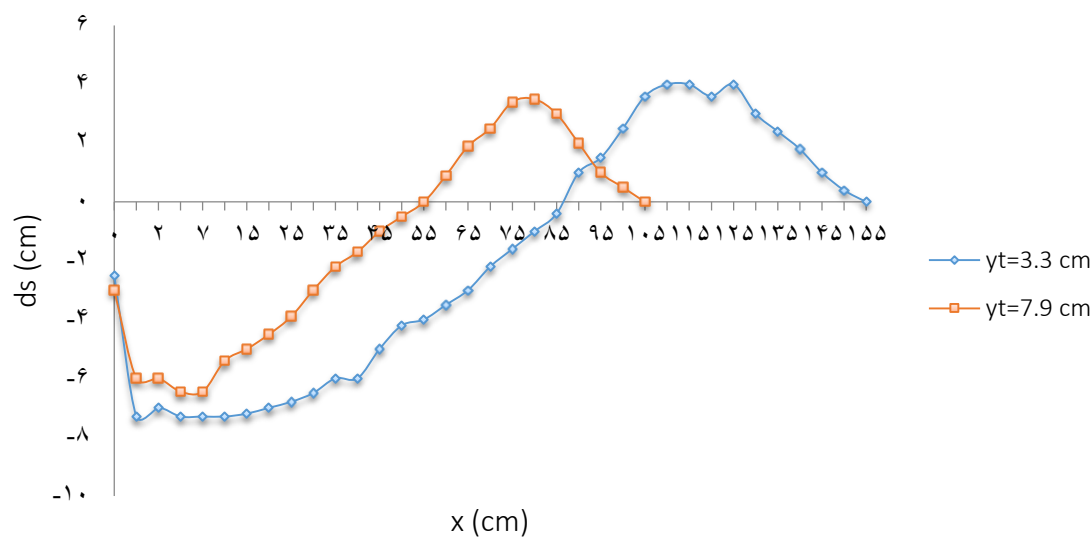


شکل ۴-۳۲- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $Q = 2/5 \text{ l/s}$ ،  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$

شکل (۴-۳۳) و شکل (۴-۳۳) پروفیل مشاهداتی آبشستگی را برای دبی‌های  $Q = 5/5 \text{ liter/s}$  و  $Q = 7/5 \text{ liter/s}$  در عمق‌های پایاب  $(y_t)$  مختلف نشان می‌دهد. روند تغییرات همانند نمودارهای بالا می‌باشد.



شکل ۴-۳۳- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$ ،  $Q = 5/5 \text{ l/s}$



شکل ۴-۳۴- پروفیل مشاهداتی در پایین دست سرریز پلکانی  $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$ ،  $Q = 7/5 \text{ l/s}$

میزان کاهش فرسایش در پایاب‌های عمیق بیشتر از پایاب‌های کم عمق است چون در پایاب‌های عمیق نیروی وارد شده به حباب‌های هوا فرصت بیشتری برای استهلاک انرژی دارد، اما در پایاب‌های کم عمق عمده انرژی در اثر برخورد آب با بستر مستهلک می‌شود و هوادهی نقش کمتری دارد.

این روند در تمامی دبی‌های اندازه‌گیری شده (۲/۵، ۵/۵، ۷/۵، ۹/۵، ۱۱/۵، ۱۳/۵، ۱۶) و دانه‌بندی‌های مختلف ( $d_{50} = 0/3 \text{ mm}$ ,  $d_{50} = 1 \text{ mm}$ ,  $d_{50} = 3/5 \text{ mm}$ ,  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$ ) دیده می‌شود. هنگامی که عمق پایاب افزایش می‌یابد و قطر مصالح هم افزایش می‌یابد میزان آبشستگی به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و همچنین طول گودال آبشستگی کاهش می‌یابد و محل حداکثر عمق آبشستگی به سرریز نزدیک می‌شود.

اسماعیل مرادی و یوسف پریش (۱۳۹۰) در ارزیابی پدیده آبشستگی در پایاب سرریزها و راهکارهایی جهت مقاوم سازی و کاهش آبشستگی در رابطه با تأثیر عمق پایاب به این نتیجه رسیدند که با افزایش عمق آب پایین دست سازه میزان آبشستگی کاهش می‌یابد و میزان کاهش فرسایش در پایاب‌های عمیق بیشتر از پایاب‌های کم عمق است.

حمید تائی، منوچهر فتحی مقدم، شفاعی بجستان (۱۳۹۰) در تخمین اندازه سنگچین پایدار به منظور جلوگیری از پیشرفت آبشستگی در پایاب حوضچه آرامش، در رابطه با تأثیر عمق پایاب به این نتیجه رسیدند که به ازای یک تراز مشخص (پایین تر از کف حوضچه) با افزایش عمق پایاب، دبی بیش‌تری برای حرکت دادن دانه‌های سنگچین لازم است.

مسعود قدسیان و جواد نجفی (۱۳۸۳) نتایج حاصل از بررسی آزمایشگاهی ابعاد حفره آبشستگی در پایین دست کالورت لوله‌ای، با افزایش عمق پایاب طول برآمدگی رسوبات کاهش می‌یابد.



### ۴-۳-۶- درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی در اثر تغییرات عمق پایاب

جدول (۴-۱۰) درصد کاهش عمق آبشستگی به ازای تغییرات عمق پایاب ( $y_t$ ) می‌باشد. با افزایش عمق پایاب از ( $y_{t1}$ ) به ( $y_{t2}$ ) ابعاد حفره آبشستگی در شرایط هیدرولیکی مشابه کاهش می‌یابد.

بیشترین درصد کاهش عمق آبشستگی مربوط به  $d_{50} = 6/8 \text{ mm}$  به  $Q = 5/5 \text{ liter/s}$  برابر  $56/67$  درصد می‌باشد و کمترین مقدار آن مربوط به افزایش قطر مصالح از  $d_{50} = 3/5 \text{ mm}$  با  $Q = 13/5 \text{ liter/s}$  برابر  $9/7$  درصد می‌باشد.

جدول ۴-۱۵- درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریز پلکانی در اثر تغییرات عمق پایاب ( $y_t$ )

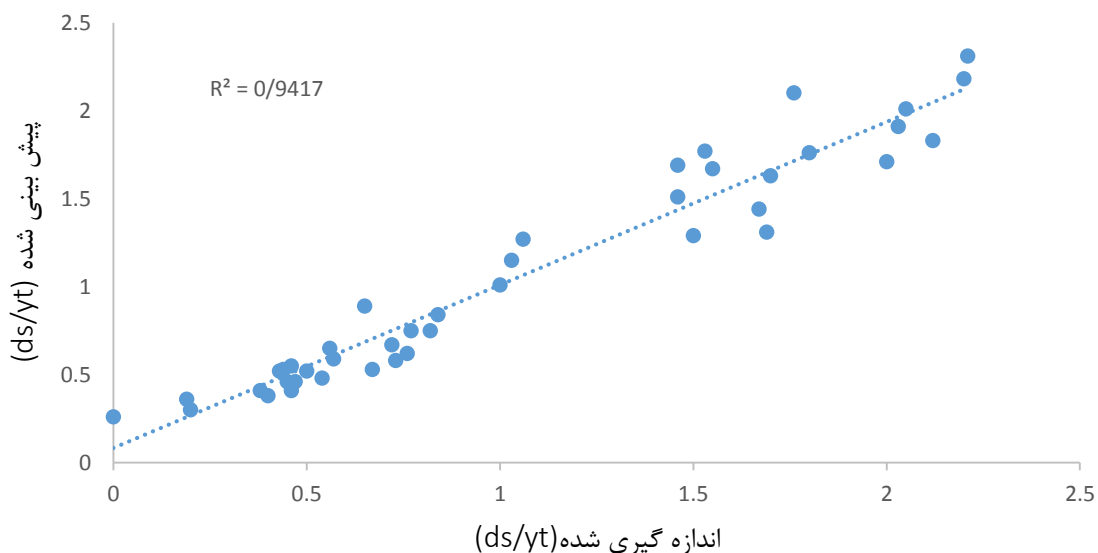
افزایش عمق پایاب از $y_{t1}$ به $y_{t2}$						
$d_{50} = 1 \text{ mm}$				$d_{50} = 0/3 \text{ mm}$		
$Q = 2/5 \text{ liter/s}$	$Q = 5/5 \text{ liter/s}$	$Q = 7/5 \text{ liter/s}$	$Q = 9/5 \text{ liter/s}$	$Q = 2/5 \text{ liter/s}$	$Q = 5/5 \text{ liter/s}$	$Q = 7/5 \text{ liter/s}$
۳۳/۳۴	۲۲/۲۳	۳۵/۷۱	۲۰/۷۷	۲۰/۵۸	۲۳/۵۲	۱۱/۶۴
$d_{50} = 3/5 \text{ mm}$						
$Q = 2/5 \text{ liter/s}$	$Q = 5/5 \text{ liter/s}$	$Q = 7/5 \text{ liter/s}$	$Q = 9/5 \text{ liter/s}$	$Q = 11/5 \text{ liter/s}$	$Q = 13/5 \text{ liter/s}$	$Q = 16 \text{ liter/s}$
۵۰	۲۰	۳۲/۷۲	۱۸/۵۷	۱۲	۹/۷۵	*
$d_{50} = 6/8 \text{ mm}$						
$Q = 2/5 \text{ liter/s}$	$Q = 5/5 \text{ liter/s}$	$Q = 7/5 \text{ liter/s}$	$Q = 9/5 \text{ liter/s}$	$Q = 11/5 \text{ liter/s}$	$Q = 13/5 \text{ liter/s}$	$Q = 16 \text{ liter/s}$
*	۵۶/۶۷	۱۴/۲	۲۵/۴۹	۲۷/۷۸	۲۹/۵	۳۸/۲۷

#### ۴-۴- ارائه روابط رگرسیون خطی و غیر خطی برای برآورد حداکثر عمق آبشستگی

در انتها به منظور تعیین رابطه بین متغیرهای مختلف و تأثیر هر یک از پارامترهای بی بعد بر میزان آبشستگی، تجزیه و تحلیل آماری بر روی داده‌ها انجام پذیرفت. در این تجزیه و تحلیل، آزمون رگرسیون خطی و غیرخطی برای ارائه *sps22* با استفاده از نرم افزار مدل و برازش اطلاعات، بر روی داده‌های بدون بعد به دست آمده انجام گرفت.

➤ در تحلیل رابطه  $\frac{d_s}{y_t} = f(f_g, \frac{d_{50}}{H}, \frac{h}{y_t})$  بهترین مدل رگرسیون غیرخطی چندگانه بین  $d_s$  و متغیرهای مستقل با  $R^2 = 0/9417$  به صورت زیر ارائه می گردد.

$$\frac{d_s}{y_t} = 5.13 \times f_g^{0.954} \left(\frac{d_{50}}{H}\right)^{0.284} \left(\frac{h}{y_t}\right)^{0.374} \quad (1)$$

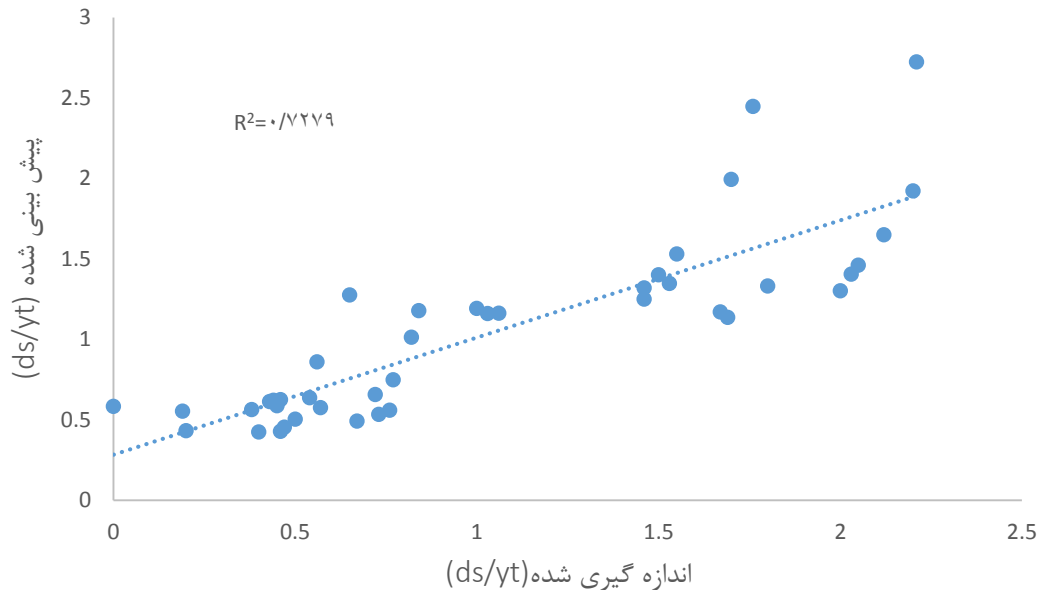


شکل ۴-۳۴- مقادیر محاسبه شده حداکثر عمق آبشستگی در مقابل مقادیر اندازه گیری شده

$$\frac{d_s}{y_t} = f(f_g, \frac{d_{50}}{H}, \frac{h}{y_t})$$

➤ همچنین بهترین مدل رگرسیون خطی چندگانه بین  $d_s$  و متغیرهای مستقل با  $R^2 = 0/7279$  به صورت زیر ارائه می گردد.

$$\frac{d_s}{y_t} = 0.782f_g + 60.08\left(\frac{d_{50}}{H}\right)0.171\left(\frac{h}{y_t}\right) - 0.284 \quad (2)$$



شکل ۴-۳۵- مقادیر محاسبه شده حداکثر عمق آبستگي در مقابل مقادير اندازه گیری شده

$$\frac{d_s}{y_t} = f\left(f_g, \frac{d_{50}}{H}, \frac{h}{y_t}\right)$$

در جدول (۴-۱۱) همه مدل های رگرسیون خطی و غیرخطی چندگانه بین  $d_s$  و متغیرهای مستقل با  $R^2$  متفاوت به صورت زیر ارائه گردید. همان طور که مشاهده می شود در تحلیل انواع رابطه ها با متغیرهای متفاوت همبستگی  $R^2$  برای مدل رگرسیون غیرخطی مناسب می باشد و از آن جای که مقادیر  $R^2$  در تمامی رابطه ها تقریباً یکسان است، برای صرفه جویی در هزینه و کاهش خطای آزمایشگاهی از رابطه با متغیر کمتر استفاده گردید. که بهترین مدل رگرسیونی غیر خطی از رابطه تحلیلی

$$\frac{d_s}{y_t} = f\left(f_g, \frac{d_{50}}{H}, \frac{h}{y_t}\right) \text{ با } R^2 = 0/9417 \text{ به دست آمد.}$$

جدول (۴-۱۶) رابطه‌های رگرسیونی خطی و غیرخطی

مدل	پارامترهای ورودی	$R^2$	RMSE
۱	$\frac{d_s}{y_t} = f(f_g, \frac{d_{50}}{y_t}, \frac{h}{H}, \frac{h}{y_t}, N)$	۰/۷۶۹۳	۰/۳۲۳۹
$\frac{d_s}{y_t} = 0.576f_g + 1.077(\frac{d_{50}}{y_t}) - 8.403(\frac{y_t}{H}) + 0.29(\frac{h}{y_t}) + 0.807$			
۲	$\frac{d_s}{y_t} = f(f_g, \frac{d_{50}}{y_t}, \frac{h}{H}, \frac{h}{y_t}, N)$	۰/۹۳۳۷	۰/۱۶۹۳
$\frac{d_s}{y_t} = 1.619 \times f_g^{0.881} (\frac{d_{50}}{y_t})^{0.26} (\frac{y_t}{H})^{0.089} (\frac{h}{y_t})^{0.273} N^{0.242}$			
۳	$\frac{d_s}{y_t} = f(f_g, \frac{d_{50}}{y_t}, \frac{h}{H}, \frac{h}{y_t})$	۰/۹۲۸۱	۰/۱۷۶۴
$\frac{d_s}{y_t} = 1.663 \times f_g^{0.881} (\frac{d_{50}}{y_t})^{0.26} (\frac{y_t}{H})^{-0.141} (\frac{h}{y_t})^{0.43}$			
۴	$\frac{d_s}{y_t} = f(f_g, \frac{d_{50}}{y_t}, \frac{h}{H})$	۰/۷۴۵۶	۰/۳۳۱۲۸
$\frac{d_s}{y_t} = 0.575f_g + 1.079(\frac{d_{50}}{y_t}) - 9.686(\frac{y_t}{H}) + 0.947$			
۵	$\frac{d_s}{y_t} = f(f_g, \frac{d_{50}}{y_t}, \frac{h}{H})$	۰/۹۲۶۶	۰/۱۷۸۱۱۷
$\frac{d_s}{y_t} = 1.508 \times f_g^{0.881} (\frac{d_{50}}{y_t})^{0.26} (\frac{y_t}{H})^{-0.183}$			
۶	$\frac{d_s}{y_t} = f(f_g, \frac{d_{50}}{H}, \frac{h}{y_t})$	۰/۷۸۲	۰/۳۲۱۵۴۴
$\frac{d_s}{y_t} = 0.782f_g + 60.08(\frac{d_{50}}{H})0.171(\frac{h}{y_t}) - 0.284$			
۷	$\frac{d_s}{y_t} = f(f_g, \frac{d_{50}}{H}, \frac{h}{y_t})$	۰/۹۴۱۷	۰/۱۵۳۹
$\frac{d_s}{y_t} = 5.13 \times f_g^{0.954} (\frac{d_{50}}{H})^{0.284} (\frac{h}{y_t})^{0.374}$			
۸	$\frac{d_s}{y_t} = f(f_g, \frac{d_{50}}{y_t})$	۰/۶۶۷۶	۰/۳۷۸۴۸
$\frac{d_s}{y_t} = 0.796f_g + 3.232(\frac{d_{50}}{y_t}) + 0.41$			
۹	$\frac{d_s}{y_t} = f(f_g, \frac{d_{50}}{y_t})$	۰/۹۱۴۹	۰/۱۹۲۳
$\frac{d_s}{y_t} = 3.088 \times f_g^{0.963} (\frac{d_{50}}{y_t})^{0.292}$			

فصل پنجم

نتیجہ گیری

## نتیجه گیری

در حالت کلی نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر به صورت زیر می باشد:

۱. حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی به شدت وابسته به عمق پایاب است به طوری که با افزایش عمق آب در پایین دست سرریز پلکانی حداکثر عمق آبشستگی کاهش می یابد در تمامی دبی ها، با افزایش عمق پایاب، عمق آب روی رسوبات بالاتر می آید در نتیجه مقداری از انرژی آب در هنگام برخورد با سطح آب کاهش می یابد و باعث کاهش میزان آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی می شود. و همچنین افزایش عمق پایاب روی طول گودال آبشستگی نیز تأثیر دارد به طوری که با افزایش عمق پایاب، طول گودال آبشستگی کاهش می یابد و به سازه هیدرولیکی نزدیک تر می شود و محل حداکثر عمق آبشستگی به سرریز پلکانی نزدیک تر می شود.
۲. میزان کاهش فرسایش در پایاب های عمیق بیش تر از پایاب های کم عمق است چون در پایاب های عمیق نیروی وارد شده به حباب های هوا فرصت بیشتری برای استهلاک انرژی دارد، اما در پایاب های کم عمق عمده انرژی در اثر برخورد آب با بستر مستهلک می شود و هوادهی نقش کمتری دارد.
۳. دانه بندی پایین دست یا اندازه ( $d_{50}$ ) تأثیر زیادی روی حداکثر عمق آبشستگی دارد به طوری که در شرایط هیدرولیکی مشابه هر چه ( $d_{50}$ ) بیش تر شود حداکثر عمق آبشستگی کاهش می یابد و همچنین محل حداکثر عمق آبشستگی با افزایش قطر مصالح ( $d_{50}$ ) به سرریز نزدیک تر می شود و طول گودال آبشستگی نیز کاهش می یابد. در واقع هر چه دانه بندی ریزتر باشد به دلیل اینکه پتانسیل حمل رسوب بالا می رود میزان آبشستگی در رسوبات ریز افزایش می یابد. مقادیر حداکثر عمق آبشستگی در آزمایش های که همراه با افزایش عمق پایاب بوده کاهش می یابد، یعنی زمانی که عمق پایاب افزایش یافته حداکثر عمق آبشستگی نسبت به عمق پایاب اولیه کاهش بیشتری می یابد.

۴. تغییرات دبی روی حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست سرریز پلکانی در تمامی دانه بندی ها و عمق پایاب مختلف روند یکسانی را نشان می دهد، با این تفاوت که هر چه  $(d_{50})$  افزایش می یابد مقدار آبشستگی در دبی مورد نظر کاهش می یابد. اگر با افزایش  $(d_{50})$ ، عمق پایاب افزایش یابد مقدار آبشستگی کاهش قابل ملاحظه ای می یابد. همچنین طول گودال آبشستگی کاهش می یابد و محل حداکثر عمق آبشستگی به سرریز نزدیک تر می شود. در واقع افزایش دبی همراه با افزایش حمل رسوب باعث افزایش آبشستگی می گردد.

۵. شرایط جریان روی سرریز پلکانی تأثیر زیادی روی آبشستگی دارد به طوری که حداکثر عمق آبشستگی در شرایط جریان غیرریزشی بیشتر از جریان ریزشی می باشد.

۶. هنگامی که عمق پایاب افزایش می یابد و قطر مصالح هم افزایش می یابد میزان آبشستگی به صورت قابل ملاحظه ای کاهش می یابد و همچنین طول گودال آبشستگی کاهش می یابد و محل حداکثر عمق آبشستگی به سرریز نزدیک می شود.

۷. در پایان تجزیه و تحلیل ابعادی، پارامترهای بی بعد ریز به دست آمد:

$$\frac{d_s}{y_t} = f\left(F_g, \frac{d_{50}}{H}, N, \frac{h}{y_t}\right)$$

۸. به طور کلی الگوی آبشستگی متقارن نیست و حداکثر عمق آبشستگی یا در سمت چپ یا راست از خط مرکز طولی حوضچه پایین دست رخ می دهد.

۹. رابطه غیر خطی چندگانه بین  $d_s$  و متغیرهای مستقل با  $R^2 = 0/9417$  به صورت زیر ارائه می گردد.

$$\frac{d_s}{y_t} = 5.13 \times f_g^{0.954} \left(\frac{d_{50}}{H}\right)^{0.284} \left(\frac{h}{y_t}\right)^{0.374}$$

۱۰. رابطه خطی چندگانه بین  $d_s$  و متغیرهای مستقل با  $R^2 = 0/7279$  به صورت زیر ارائه می گردد.

$$\frac{d_s}{y_t} = 0.782f_g + 60.08\left(\frac{d_{50}}{H}\right)0.171\left(\frac{h}{y_t}\right) - 0.284$$

## پیشنهادات

تحقیق حاضر بر روی سرریز پلکانی با ارتفاع ثابت ۱ متر زاویه ۴۵ درجه و تعداد پله (۱۰) انجام گرفت.

در این قسمت به بیان پیشنهاداتی در رابطه با تحقیقات آینده پرداخته شده است.

۱. بررسی تأثیر تعداد پله‌ها با ارتفاع ثابت سرریز و ارتفاع‌های متغیر.

۲. بررسی تأثیر زاویه سرریز.

۳. بررسی تأثیر نوع حوضچه آرامش در پایین دست.



# مراجع و منابع

## منابع

۱. ابریشمی، جلیل. حسینی، محمود، (۱۳۸۰)، "هیدرولیک کانال‌های روباز"، انتشارات دانشگاه امام رضا.
۲. احمدیار، د. و ا. بیات، (۱۳۷۲)، "بررسی تأثیر شیب کف پله‌ها در سرریزهای پلکانی"، مجله دانشگاه امیر و کبیر، سال ۶، شماره ۲۲، ۱۴۶-۵۴.
۳. آذر، اردشیر، (۱۳۸۶)، "اثر دانه‌بندی مصالح بر حداکثر عمق آبستنگی پایین‌دست سرریزهای ریزش آزاد"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد عمران آب.
۴. ترابی، محمد رضا و همکاران، (۱۳۹۲)، "بررسی استهلاک کارمایه در شبیه سرریز پلکانی با شیب معکوس" مجله مهندسی منابع آب، سال ششم، صص ۷۸-۶۳.
۵. چانسون ه، (۱۳۸۴)، "هیدرولیک شوت‌ها و سرریزهای پلکانی"، ترجمه شمسایی ا و، پاک نهال ف، چاپ اول، انتشارات علمی دانشگاه شریف، تهران، ۴۵۲ صفحه.
۶. دائمی ع.ن. امانیان ا.ر. زراتی، (۱۳۷۶)، "پیش‌بینی آبستنگی در اثر جت‌های ریزشی آزاد"، مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران. دانشگاه صنعتی شریف تهران.
۷. سلماسی ف، (۱۳۸۲). پایان‌نامه دکتری: "ارزیابی هیدرولیکی سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل فیزیکی"، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۸. شفاعی بجستان، محمود، (۱۳۷۳)، "هیدرولیک رسوب"، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
۹. شفاعی بجستان، محمود، (۱۳۷۳)، "مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی"، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
۱۰. شفاعی بجستان، محمود، (۱۳۸۵)، "تعیین حداکثر عمق آبستنگی پایین‌دست سرریز پلکانی در شرایط جریان ریزشی"، هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه.
۱۱. شفاعی بجستان، محمود؛ موسوی جهرمی، سید حبیب (۱۳۸۸). "پیش‌بینی ابعاد حفره آبستنگی ناشی از جت در پایین‌دست سرریزهای پرش اسکی با استفاده از مدل عصبی و عصبی فازی"، هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران.
۱۲. شمسایی، ا. و نونهال، ف، (۱۳۸۴)، "هیدرولیک شوت‌ها و سرریزهای پلکانی"، ترجمه: انتشارات مؤسسه علمی دانشگاه صنعتی شریف.
۱۳. شیخ اسلامی، مریم، (۱۳۸۹)، "تخمین عمق آبستنگی در محل پایه‌های پل با استفاده از مدل ریاضی FASTER"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد.

۱۴. صانعی، مجتبی؛ اختری، روح انگیز، (۱۳۸۵)، "تخمین میزان آبستگي در پايين دست سرريزه‌هاي آبشاري"، همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده علوم مهندسی آب.
۱۵. فتحي، احمد، (۱۳۸۸)، "بررسی تأثیر شیب تندآب پايين دست تاج بر محل هواگیری طبیعی در جریان غير ريزشي در سرريز پلکانی"، نشریه آب و خاک.
۱۶. فتحي مقدم، منوچهر؛ شفاعی، محمود؛ تائبی، حمید، (۱۳۹۰)، "تخمین اندازه سنگچين پايidar به منظور جلوگیری از پیشرفت آبستگي در پایاب حوضچه آرامش"، مجله پژوهش آب ایران، سال پنجم/شماره هشتم.
۱۷. فرهودی ج. و. ناصحی م، (۱۳۷۵)، "پروفیل آبستگي در پايين دست آبشارهاي قائم"، دانشگاه ارومیه.
۱۸. فرهودی ج. و. ناصحی م، (۱۳۷۸)، "معادله پروفیل آبستگي در پايين دست آبشارهاي قائم"، دومین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت. تهران.
۱۹. قدسیان، مسعود، اردشیر آذر و علی اکبر عباسی، (۱۳۷۷)، "تعیین حداکثر عمق آبستگي پايين دست سرريزه‌هاي ريزشي آزاد"، مجموعه مقالات پنجمین سمینار مهندسی رودخانه، ۲۸ تا ۳۰ بهمن، ۱۳۷۷، ایران، دانشگاه شهید چمران.
۲۰. کاظمی نسبان، غلامرضا، (۱۳۷۵)، "بررسی و پی بینی حداکثر عمق آبستگي پايين دست سرريزه‌هاي پلکانی گابیونی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته تأسیسات آبیاری.
۲۱. محبوبی ا، (۱۳۷۵)، "اثر قطر مصالح بر میزان آبستگي ناشی از جت‌هاي ريزشي آزاد"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران.
۲۲. محمدی، عباس، (۱۳۸۴)، "مطالعه عددی تأثیر هندسی پله بر افت انرژی در سرريز پلکانی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.
۲۳. مرادی، اسماعیل؛ پریش، یوسف (۱۳۹۰). "ارزیابی پدیده آبستگي در پایاب سرريزه‌ها و راهکارهاي جهت مقاوم سازی و کاهش آبستگي"، چهارمین کنفرانس ملی عمران.
۲۴. معاونت امور آب و آبفا، دفتر مهندسی و معیارهاي فنی آب و آبفا، (۱۳۸۹) "راهنمای روش‌هاي محاسبه آبستگي موضعی" وزارت نیرو، نشریه شماره ۳۱۸-الف.
۲۵. معاونت برنامه ريزي و نظارت راهبردی رییس جمهور، (۱۳۹۰) "راهنمای روش‌هاي محاسبه آبستگي موضعی" وزارت نیرو، نشریه شماره ۵۴۹.
۲۶. مومنی، رضا؛ موسوی، س.ح؛ شفاعی بجستان، م. (۱۳۸۷)، "آبستگي ناشی از جت‌هاي مستطیلی در پايين دست پرتابه‌هاي جامی شکل با مصالح یکنواخت"، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی.

۲۷. مومنی م، فعال قیومی ع، (۱۳۹۱)، "تحلیل‌های آماری با استفاده از spss"، چاپ هفتم، گنج شایگان، تهران، ص ۱.
۲۸. وفاداری، بهاره، (۱۳۸۳)، بررسی تأثیر ابعاد و شیب معکوس پله در استهلاک انرژی و تغییر رژیم جریان سرریز پلکانی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.

29. Abt S. R., Kloberdanz R. L. and Mendoza C. (1984). "Unified culvert scour determination", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. Vol. 110. No. 10. PP. 1363-1367.
30. Amanian, N. A. (1993). "Scouring below a flip bucket spillway", Ph.D. dissertation, Utah state University, Logan, Utah.
31. Azmathullah, H. Md., Deo, M.C., and Deolalikar, P.B. (2005). Neural networks for estimation of vscur downstream of ski-jump bucket. *Journal of Hydr. Engrg, ASCE*, vol. 131, No. 10, Pp: 898-908.
32. Balachandar. R. and Kells. J. A. (1998). "Instantaneous water surface and bed scour profiles using video image analysis" *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 25: 662-667.
33. Balachandar, R., Kells, J. A., and Thiessen, R. J. (2000). "The effect of tailwater depth on the dynamics of local scour." *Canadian J. of Civil Engineering*, Vol. 27, pp. 138-150.
34. Boes, R.M. and Minor, H.E. (2002). "Hydraulic design of stepped spillways for rcc dams". *Hydropower Dams*, 9(33), pp. 87-91.
35. Boes, R. and Hager, W. H. (2003). "Two-phase flow characteristics of stepped spillways." *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 129, No. 9, pp. 661-670.
36. Breuserse, H.N.C., A.J. Raudkivi, (1991), "Scouring", *Hydraulic Structures Design Manuall*, No2, IAHR, Balkema, 143PP.
37. Breusers, H. N. C. and Raudkivi A. J. (1966). "Conformity and time scale in two-dimensional local scour." *Proc. Symp. On Model and Prototype Conformity*, Hydr. Res. Lab., Poona, India, pp. 1-8.
38. Doddiah, D., Albertson, M.L. and thomson, R. (1953). "Scour from jet." *Proceeding of the minnesota International Hydraulic Convention*, Minneapolis, minnesota, USA, PP. 161-169.

39. M. Emin Emiroglu, and M. Cihat Tuna (2010), " The Effect of Tailwater Depth on the Local Scour Downstream of Stepped-Chutes". Received July 3, 2009/Revised April 26, 2010/Accepted April 26, 2010.
40. Chamani,M.R. and Rajaratnam ,N. (1999). Characteristics of skimming flow over stepped spil.
41. Chanson, H. (1994a). Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research* 32(2): 213-218.
42. Chanson, H. (1994b). Jet flow on stepped spillways, Discussion. *Journal of Hydraulic Engineering* 20(2):441-442.
43. Chanson, H. (1994c). Hydraulic design of stepped channels and spillways. The University of Queensland. Report No.CH43/94.
44. Chanson, H. (1994). Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. *J. Hydr. Res.* 32: 445-460.
45. Chanson, H(1994). " Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes " , *Journal of hydraulic research*.
46. Chansan H. (2000) "Forumarticle, Hydraulic of Stepped Spillway: Current Status" *J. Hyd, Engrg.*, 126, PP630-637.
47. CHANSON, H. (2000). "Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways. Discussion." *Jl of Hyd. Engrg.*
48. Chanson, H. (2001). "The hydraulics of stepped chutes and spillways", Balkema, Lisse, The Netherlands.
49. Chanson, H. (2002). "Timber Crib Weirs in Queensland, Australia. Some Heritage Stuctures with a Solid Operational Record." *Royal Historical Society of Queensland Journal*, Vol. 18, No. 3, pp. 115-129.
50. Chitsu I. Yasuda Y. and Takahashi M (2004). "Flow Characteristics of Skimming Flows in Stepped channels" *J. Hydr. Engrg.*, 130, PP860-869.
51. Farhoudi, J., and Nasehi, M. (1999). Scour profile downstream of vertical falling jet. hydraulic conference, Iran university of science and technology, Tehran, Iran, pp: 71-78.
52. Farhoudi, J. and Smith, K. V. H. (1982). "Time scale for scour downstream of hydraulic jump." *J. Hydraul. Div.*, Vol. 108, No. 10, pp. 1147-1162.
53. Farhoudi, J. and Smith, K. V. H. (1985). "Local scour profiles downstream of hydraulic jump." *J. Hydraul. Res.*, Vol. 23, No. 4, pp. 343-358.

54. French, R.H. (1985). "Open-Channel Hydraulics", MC GROW-HIL.
55. Frizell, K.H. (1992). "Hydraulics of Stepped Spillways for RCC Dams and Dam Rehabilitations. " *Proc. 3rd Specialty Conf. on Roller Compacted Concrete*, ASCE, San Diego CA, USA, pp. 423-439.
56. Hoffman, G. J. C. M and Booji, R. (1993). "Two dimensional mathematical modeling of local scour holes". *Journal of hydraulic research. IAHR*.Vol:31. No:5. 615-634.
57. Ghodsian, M., Melville, B. and Tajkarimi, D. (2006). "Local scour due to free overfall jets". *Journal of Water Management*. Vol. 159. Isu WM4. pp.253-26.
58. Ghodsian, M., Melville, B. and Tajkarimi, D. (2006). "Scour Due to Free Overfall Jet." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers.*, Paper:14427, PP. 253-260
59. Mason , P.J. and K.Aramougam. (1985). " Free jet scour below dams and flip bucket" , *journal of Hydraulic Engineering* , Asce, Vol .111,No 2. pp.220-235.
60. Mason, P. J. (1993). "Practical guidelines for the design of flip buckets and plunge pools. *Water Power & Dam Construction*. September/October.
61. May, J. C. Ackers. A. M. Kirby. (2002). *Manual on scour at bridges and other hydraulic structures*. London.
62. Pegram G. G. S and Officer A. K. (1999). "Hydraulic of Skimming Flow on Medeled Stepped Spillways" *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, 125,5,PP500-509.
63. Rajaratnam, N. (1990). "Skimming flow in stepped Spillways " , *j. La Houille Blanche*, No.
64. Ruff, J. R., Abt, S. R., Mendoza, C., Shaikh, A. and Kloberdanz, R. (1982). "Scour a culvert outlets in mixed bed materials". *Colorado State University Engineering Research Center Report no. FHWA/RD-82/011*. Fort Collins Colorado.
65. Sorensen RM. (1985) "Stepped spillway hydraulic model investigation". *J. Hydraul Eng*, ASCE;111(12):1461–72.
66. Tuna, m.c. and emiroglu (2011). " scour profiles at downstream of cascades ". *Department of Civil Engineering, Firat University, 23119, Elazig, Turkey*.
67. Tuna, m.c. and emiroglu (2010). " The Effect of Tailwater Depth on the Local Scour Downstream of Stepped-Chutes". *KSCE Journal of Civil Engineering* (2011) 15(5): 907-915.

## Abstract

Spillway are designed to pass high discharges on the hydraulic structures No damage to structure and It is not entered around. In recent decades, stepped spillways as a suitable solution for energy dissipation Special attention has been placed. Stepped consists the steps that are located near the crest began to toe continued in downstream. Although energy dissipation above stepped spillways, in downstream some energy dissipation not remain that it is caused bed erosion and create hole on it. By studying the phenomenon of scour downstream of the stepped spillway, effective parameters the phenomenon, discharge Flow on the unit width ( $q$ ), height Falling ( $H$ ), tailwater depth ( $y_t$ ), the average diameter material ( $d_{50}$ ), have been recognized as contributing factors and the dimensionless parameter is obtained by using dimensional analysis, which tests needed on the relationship between the planned have. These experiments were done for materials with uniform grain size, experiment with four diameters 0/3, 1, 3/5, 6/8 Millimeter and 7 discharge 2/5, 5/5, 7/5, 9/5, 11/5, 13/5, 16 and tailwater depth was different. In these experiments, the parameters of the maximum scour depth tailwater surface ( $d_s$ ), distance and location of the maximum scour depth of spillway ( $L_c$ ), were measured. The results show that with the increase ( $d_{50}$ ) in the same hydraulic conditions, the maximum scour depth decreases. With increasing depth downstream ( $y_t$ ), the maximum scour depth decreases. The effect of two parameters ( $d_{50}$ ) and ( $y_t$ ) both observed that scour dimensions are considerably reduced.

**Keywords:** scour, Stepped spillway, Diameter materials, Tailwater depth.



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Agriculture  
Department of Water and Soil**

**Experimental Estimation of Maximum Local Scour depth in the  
downstream of stepped Spillway**

**Azade Rafiei**

**Supervisor(s):**

**Dr. Khalil Azhdary**

**Dr. Samad Emamgholizadeh**

**February 2015**