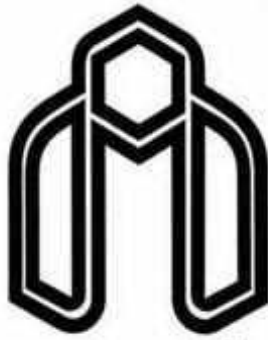


اللَّهُ أَحْمَرُ الْبُرْمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده کشاورزی

گروه آب و خاک

بررسی آزمایشگاهی آبشستگی ناشی از جت آب خروجی از دریچه‌های سدهای مخزنی

دانشجو: سمیرا منصوری

اساتید راهنما:

دکتر خلیل اژدری

دکتر صمد امامقلی زاده

استاد مشاور:

دکتر روزبه مؤذن زاده

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

اسفند ۱۳۹۴

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می‌کنم

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه‌ی اثار و از خودگذشتگی

به پاس گرمای امید‌نخس و جودشان که در این سردترین روزگار ان بهترین پشتیبان است

به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و ترس در پناهمشان به شجاعت می‌گراید

و به پاس محبت‌های بی‌دینشان که هرگز فروکش نمی‌کند

حمد و ستایش از آن خداوندی است که الطاف بی‌کرانش چراغ راه و روشنایی بخش دهنم بود. مکارش پایان نامه حاضر ممکن نبود مگر به لطف پروردگار و یاری اساتید گرامی، دوستان عزیز و خانواده صبورم...

تخت لازم می‌دانم از زحمات بی‌دیغ استاد ارجمند دکتر خلیل اژدری که در تمامی مسیر پیوسته پشتیبان و راعلشای کلیه مشکلات بودند سپاس گزار بی‌نایم...

هم‌چنین از دکتر صدما مطلق زاده نیز که به صورت محنتی ناپذیر، بار بار بهمانی‌های ارزشمند خود هم‌قدم من شدند تشکر ویژه می‌کنم. اساتید و دوستان گرامی دیگری هم چون دکتر روزه مؤذن زاده، دکتر سید حسین حسینی، دکتر زهرا کنجی نوروزی، دکتر مهدی دلشادی، مهندس حسن گل‌ی و آقای حدادان نیز در طول انجام این تحقیق پشتیبان من بودند که از آنان کمال قدر دانی را می‌نمایم...

به علاوه لازم می‌دانم از بکاربری مسئولان دانشگاه صنعتی شاهرود و دانشکده کشاورزی که امکانات لازم جهت تحقیقات را در اختیارم نهادند سپاس گزار بی‌نایم...

سمیرا منصوری اسفند ۱۳۹۴

# تعهد نامه

اینجانب سمیرا منصوری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته سازه‌های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه بررسی آزمایشگاهی آبخستگی ناشی از جت آب خروجی از دریچه‌های سدهای مخزنی تحت راهنمایی دکتر خلیل ازدری و دکتر صمد امامقلی زاده متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه 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 پایان‌نامه 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 می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به‌دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

## تاریخ

## امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه‌های تکثیر شده پایان‌نامه وجود داشته باشد.

## چکیده

در تحقیق حاضر نتایج یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی در زمینه‌ی تعیین ابعاد حفره‌ی آبستگي حاصل از جت‌های ریزشی آزاد در پایین‌دست دریچه‌های سدهای مخزنی ارائه شده است. بدین منظور اثر پارامترهای دبی جت ( $Q_j$ )، قطر متوسط رسوبات بستر ( $D_{50}$ ) و زاویه‌ی برخورد جت‌ها ( $\theta$ ) نسبت به صفحه‌ی افق مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایش‌های مربوط به این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی شاهرود، در یک فلوم مستطیلی شکل با عرض ۱ متر، طول ۲/۴۳ متر و ارتفاع ۱/۱۱ متر انجام شد؛ به‌طوری که آبستگي درون آن تحت تأثیر دیواره‌های کناری قرار نمی‌گرفت. جت آب از لوله‌هایی با مقاطع دایره‌ای به قطر ۱/۲۵ اینچ از ارتفاع ۹۵ سانتی‌متر بر روی بستر رسوبات پایین‌دست ریزش می‌کرد. کف حوضچه‌ی پایین‌دست با سه نوع رسوب غیرچسبنده‌ی یکنواخت با قطر متوسط معادل ۱/۷، ۳/۲ و ۶/۷۵ میلی‌متر تا ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر پوشانده شد. آزمایش‌ها با دبی‌های متفاوت در محدوده‌ی ۱/۳۲ تا ۵/۱۴ لیتر بر ثانیه انجام پذیرفت. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که در تمامی آزمایش‌های انجام شده، حفره‌ی آبستگي در پایین‌دست جت‌های ریزشی تشکیل شده و عمق نسبی آبستگي ( $d_s/h_{tw}$ ) تابعی از عدد فرود ذره ( $F_g$ ) و زاویه‌ی برخورد جت‌های ریزشی ( $\theta$ ) می‌باشد. آنالیز حساسیت صورت گرفته بر رابطه‌ی عمومی معرفی شده در این تحقیق حاکی از آن بود که با اعمال  $\pm 10$  ،  $\pm 20$  و  $\pm 30$  درصد تغییر در پارامترهای  $Q_j$ ،  $D_{50}$  و  $\theta$ ، زاویه‌ی برخورد جت‌ها و قطر متوسط رسوبات بستر به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین تأثیر را در تخمین پارامتر  $d_s/h_{tw}$  داشتند. به‌طوری که اعمال  $\pm 30$  درصد تغییر در  $Q_j$ ،  $D_{50}$  و  $\theta$ ، در مجموع  $d_s/h_{tw}$  را به ترتیب ۱۸/۶۵، ۹/۵۴ و ۵۷/۰۸ درصد تحت تأثیر قرار داد.

**کلمات کلیدی:** ابعاد حفره‌ی آبستگي، جت‌های ریزشی آزاد، دبی جت، زاویه‌ی برخورد جت‌ها، قطر

متوسط رسوبات بستر

**فصل اول: کلیات**

۲	۱-۱- مقدمه
۳	۱-۲- تاریخچه علم رسوب و آبستگي
۵	۱-۳- ضرورت تحقيق
۵	۱-۴- اهداف پايان نامه
۶	۱-۵- ساختار پايان نامه

**فصل دوم: پيشينه تحقيق**

۱۰	۲-۱- مقدمه
۱۱	۲-۲- آبستگي
۱۱	۲-۲-۱- مفهوم آبستگي
۱۳	۲-۲-۲- مراحل توسعه آبستگي
۱۵	۲-۲-۳- انواع آبستگي
۱۵	۲-۲-۳-۱- آبستگي عمومي
۱۶	۲-۲-۳-۲- آبستگي ناشي از تنگ شدگي
۱۷	۲-۲-۳-۳- آبستگي موضعي
۱۸	۲-۲-۳-۴- آبستگي كل
۱۹	۲-۲-۳-۵- آبستگي در آب زلال و آب حاوي رسوب
۲۰	۲-۲-۳-۶- آبستگي استاتيكي و ديناميكي
۲۱	۲-۳- جت هاي ريزشي
۲۲	۲-۳-۱- الگوي جريان در انواع جت هاي ريزشي
۲۲	۲-۳-۱-۱- الگوي جريان در جت هاي ريزشي عمودي
۲۳	۲-۳-۱-۱-۱- جت با انحراف كم

- ۲۴-۳-۱-۲- جت با انحراف زیاد ..... ۲۴
- ۲۵-۳-۱-۲- الگوی جریان در جت‌های ریزشی مایل ..... ۲۵
- ۲۸-۴-۲- تغییرات زمانی عمق آبشستگی ..... ۲۸
- ۲۹-۵-۲- روابط تخمین ابعاد حفره آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی ..... ۲۹
- ۲۹-۵-۲-۱- روابط آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی عمودی ..... ۲۹
- ۳۲-۵-۲- تخمین آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی مایل ..... ۳۲
- ۳۲-۵-۲-۱- گروه اول ..... ۳۲
- ۳۴-۵-۲-۲- گروه دوم ..... ۳۴
- ۳۷-۵-۲-۳- گروه سوم ..... ۳۷
- ۳۸-۵-۲-۴- گروه چهارم ..... ۳۸
- ۳۹-۵-۲-۵- گروه پنجم ..... ۳۹
- ۳۹-۶-۲- مروری بر تحقیقات پیشین ..... ۳۹
- ۵۱-۷-۲- جمع‌بندی ..... ۵۱

### فصل سوم: مواد و روش‌ها

- ۵۴-۳-۱- مقدمه ..... ۵۴
- ۵۵-۳-۲- مدل آزمایشگاهی ..... ۵۵
- ۵۹-۳-۳- پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه ..... ۵۹
- ۶۰-۳-۳-۱- اندازه‌گیری قطر متوسط رسوبات ..... ۶۰
- ۶۱-۳-۳-۲- اندازه‌گیری دبی جت آب خروجی از دریچه‌ها ..... ۶۱
- ۶۲-۳-۳-۳- اندازه‌گیری عمق پایاب ..... ۶۲
- ۶۲-۳-۳-۴- اندازه‌گیری عمق آبشستگی و ارتفاع برآمدگی رسوبات در پایین‌دست حفره ..... ۶۲
- ۶۳-۳-۴- آنالیز ابعادی ..... ۶۳
- ۶۸-۳-۵- روش انجام آزمایش‌ها ..... ۶۸
- ۷۱-۳-۶- تعیین زمان لازم برای هر آزمایش ..... ۷۱
- ۷۲-۳-۷- معرفی آزمایش‌های انجام شده و تعیین تعداد آزمایش‌ها ..... ۷۲



## فصل چهارم: نتایج و بحث

۷۴	۱-۴- مقدمه.....
۷۴	۲-۴- مشاهدات آزمایشگاهی.....
۷۶	۳-۴- نتایج آزمایش‌ها.....
۷۶	۱-۳-۴- بررسی تأثیر تغییرات دبی جت آب خروجی از دریچه‌ها بر حداکثر عمق آبشستگی پایین‌دست سدهای مخزنی.....
۸۱	۲-۳-۴- بررسی تأثیر تغییرات قطر متوسط رسوبات بر حداکثر عمق آبشستگی پایین‌دست سدهای مخزنی.....
۸۵	۳-۳-۴- بررسی تأثیر تغییرات زاویه برخورد جت‌های ریزشی آزاد نسبت به صفحه افق بر حداکثر عمق آبشستگی پایین‌دست سدهای مخزنی.....
۸۸	۴-۴- تحلیل گسترش ابعاد حفره آبشستگی در پایین‌دست سدهای مخزنی.....
۹۸	۵-۴- ارائه رابطه‌ای بی‌بعد برای برآورد حداکثر عمق آبشستگی پایین‌دست سدهای مخزنی.....
۱۰۲	۵-۵- تحلیل حساسیت رابطه خطی ارائه شده در این تحقیق نسبت به پارامترهای مؤثر در ایجاد حفره آبشستگی.....

## فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۱۰۸	۱-۵- نتیجه‌گیری.....
۱۱۰	۲-۵- پیشنهادها.....
۱۱۴	فهرست منابع.....

## فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲- مقادیر مختلف ضریب و توان‌های ثابت روابط موجود در گروه اول.....	۳۳
جدول ۲-۲- مقادیر a, b, c و d در رابطه (۲-۱۹).....	۳۵
جدول ۳-۲- مقادیر a, b, c و d در رابطه (۲-۲۰).....	۳۶
جدول ۱-۳- پارامترهای مؤثر در آنالیز ابعادی.....	۶۵
جدول ۱-۴- مشخصات متغیرهای مورد آزمایش.....	۷۴
جدول ۲-۴- مقادیر حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) برحسب میلی‌متر برای رسوباتی با قطر متوسط معادل ۱/۷ میلی‌متر.....	۷۵
جدول ۳-۴- مقادیر حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) برحسب میلی‌متر برای رسوباتی با قطر متوسط معادل ۳/۲ میلی‌متر.....	۷۵
جدول ۴-۴- مقادیر حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) برحسب میلی‌متر برای رسوباتی با قطر متوسط معادل ۶/۷۵ میلی‌متر.....	۷۵
جدول ۵-۴- مجموع تغییرات پارامتر $d_s/h_{TW}$ در اثر $\pm 10$ ، $\pm 20$ و $\pm 30$ درصد تغییر در پارامترهای $Q_z$ ، $D_{50}$ و $\theta$ .....	۱۰۵

## فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲- جت آب خروجی از دریچه‌های سد دز .....	۱۰
شکل ۲-۲- آبشستگی موضعی پایین‌دست برخی از سازه‌های هیدرولیکی .....	۱۲
شکل ۳-۲- مراحل توسعه حفره آبشستگی .....	۱۴
شکل ۴-۲- آبشستگی عمومی .....	۱۶
شکل ۵-۲- آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی .....	۱۷
شکل ۶-۲- اجزای آبشستگی .....	۱۸
شکل ۷-۲- تغییرات حفره آبشستگی بر حسب زمان .....	۲۰
شکل ۸-۲- نمایی از یک جت عمودی الف- مستغرق، ب- آزاد .....	۲۱
شکل ۹-۲- الگوهای جریان و نیمرخ بستر ناشی از آن برای جت عمودی .....	۲۴
شکل ۱۰-۲- الگوی جریان جت ریزشی مایل داخل حفره آبشستگی .....	۲۶
شکل ۱۱-۲- شکل و خصوصیات یک جت ریزشی مایل .....	۲۷
شکل ۱۲-۲- نمای شماتیک موقعیت جت ریزشی و چگونگی اثر آن بر ابعاد حفره آبشستگی در حوضچه استغراق .....	۴۸
شکل ۱۳-۲- نمای شماتیک موقعیت نازل و چگونگی تأثیر جت آب خروجی از آن بر ابعاد حفره آبشستگی .....	۵۰
شکل ۱-۳- نمایی از مدل دریچه‌ها قبل از نصب .....	۵۷
شکل ۲-۳- پلان فلوم آزمایشگاهی (مشخصات آن بر حسب سانتی‌متر) .....	۵۸
شکل ۳-۳- نمای جانبی از فلوم آزمایشگاهی (مشخصات آن بر حسب سانتی‌متر) .....	۵۹
شکل ۴-۳- نمایی از ذرات رسوب با دانه‌بندی الف- ریزدانه، ب- متوسط، ج- درشت دانه .....	۶۰
شکل ۵-۳- منحنی دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده در آزمایش‌ها .....	۶۱
شکل ۶-۳- عمق سنج نقطه‌ای مورد استفاده برای برداشت پروفیل و حداکثر عمق آبشستگی .....	۶۳
شکل ۷-۳- مسطح و متراکم کردن سطح بستر قبل از شروع هر آزمایش .....	۶۸
شکل ۸-۳- نمایی از فلوم آزمایشگاهی و ورق پلی‌اتیلنی واقع بر روی بستر پایین‌دست دریچه‌ها قبل از شروع آزمایش .....	۶۹

- شکل ۳-۹- نمایی از فلوم آزمایشگاهی بعد از برداشتن پوشش پلی اتیلنی از روی بستر و شروع آزمایش ..... ۷۰
- شکل ۳-۱۰- تغییرات زمانی حداکثر عمق آبشستگی در بحرانی ترین شرایط (رسوبات ریزدانه و بیشترین دبی جت) ..... ۷۱
- شکل ۳-۱۱- نمایی از برخورد جت های ریزشی آزاد در سه زاویه ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه (به ترتیب از چپ به راست) ..... ۷۲
- شکل ۴-۱- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) به ازای دبی های مختلف در رسوبات ریزدانه (۱/۷mm) ..... ۷۷
- شکل ۴-۲- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) به ازای دبی های مختلف در رسوبات متوسط (۳/۲mm) ..... ۷۸
- شکل ۴-۳- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) به ازای دبی های مختلف در رسوبات درشت دانه (۶/۷۵mm) ..... ۷۹
- شکل ۴-۴- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) با دبی در عمق پایاب های مختلف ..... ۸۰
- شکل ۴-۵- نمایش مرکز آبشستگی پایین دست سرریز لبه تیز با سه دبی مختلف ..... ۸۰
- شکل ۴-۶- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) در زاویه ۱۵ درجه نسبت به صفحه افق برای دانه بندی های مختلف ..... ۸۲
- شکل ۴-۷- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) در زاویه ۳۰ درجه نسبت به صفحه افق برای دانه بندی های مختلف ..... ۸۳
- شکل ۴-۸- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) در زاویه ۴۵ درجه نسبت به صفحه افق برای دانه بندی های مختلف ..... ۸۳
- شکل ۴-۹- تغییرات عمق آبشستگی بر حسب قطر متوسط مصالح بستر ..... ۸۴
- شکل ۴-۱۰- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) برای رسوبات ریزدانه (۱/۷mm) در زوایای مختلف برخورد جت ها ..... ۸۵
- شکل ۴-۱۱- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) برای رسوبات متوسط (۳/۲mm) در زوایای مختلف برخورد جت ها ..... ۸۶
- شکل ۴-۱۲- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) برای رسوبات درشت دانه (۶/۷۵mm) در زوایای مختلف برخورد جت ها ..... ۸۷
- شکل ۴-۱۳- پروفیل طولی تغییرات میزان آبشستگی به ازای دبی های مختلف در رسوبات درشت دانه (۶/۷۵mm) ..... ۸۹

- شکل ۴-۱۴- تأثیر افزایش دبی بر پروفیل طولی آبشستگی در یک عمق پایاب ثابت در آرام‌کننده جامی مستغرق ساده و دندانه‌دار ..... ۹۰
- شکل ۴-۱۵- توپوگرافی کم‌ترین مقدار حفره و تل آبشستگی در دبی ۱/۳۲ لیتر بر ثانیه ..... ۹۰
- شکل ۴-۱۶- توپوگرافی بیش‌ترین مقدار حفره و تل آبشستگی در دبی ۵/۱۴ لیتر بر ثانیه ..... ۹۱
- شکل ۴-۱۷- پروفیل طولی تغییرات میزان آبشستگی در دانه‌بندی‌های مختلف به‌ازای دبی ۵/۱۴ لیتر بر ثانیه ..... ۹۲
- شکل ۴-۱۸- پروفیل‌های طولی تغییرات عمق آبشستگی در پایین‌دست سرریز در  $Y_{TW}=7/5\text{cm}$  به‌ازای  $Q=9/6\text{Lit/s}$  ..... ۹۳
- شکل ۴-۱۹- توپوگرافی بیش‌ترین مقدار حفره و تل آبشستگی در رسوبات ریزدانه (۱/۷mm) ..... ۹۴
- شکل ۴-۲۰- توپوگرافی بیش‌ترین مقدار حفره و تل آبشستگی در رسوبات متوسط (۳/۲mm) ..... ۹۴
- شکل ۴-۲۱- توپوگرافی بیش‌ترین مقدار حفره و تل آبشستگی در رسوبات درشت دانه (۶/۷۵mm) ..... ۹۴
- شکل ۴-۲۲- پروفیل طولی آبشستگی با قرارگیری دریچه‌ها در زاویه‌های مختلف در دبی ۵/۱۴ لیتر بر ثانیه ..... ۹۵
- شکل ۴-۲۳- توپوگرافی بیش‌ترین مقدار حفره و تل آبشستگی در زاویه ۱۵ درجه نسبت به صفحه افق ..... ۹۶
- شکل ۴-۲۴- توپوگرافی بیش‌ترین مقدار حفره و تل آبشستگی در زاویه ۳۰ درجه نسبت به صفحه افق ..... ۹۶
- شکل ۴-۲۵- توپوگرافی بیش‌ترین مقدار حفره و تل آبشستگی در زاویه ۴۵ درجه نسبت به صفحه افق ..... ۹۷
- شکل ۴-۲۶- نمایی از جت‌های ریزشی آزاد با زاویه برخورد ۴۵ درجه و حفره ایجاد شده در پایین‌دست ..... ۹۷
- شکل ۴-۲۷- مقادیر  $d_s/h_{TW}$  محاسبه شده با استفاده از رابطه (۴-۱)، در مقابل مقادیر  $d_s/h_{TW}$  اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها ..... ۹۹
- شکل ۴-۲۸- مقادیر  $d_s/h_{TW}$  محاسبه شده با استفاده از رابطه (۴-۵)، در مقابل مقادیر  $d_s/h_{TW}$  اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها ..... ۱۰۱
- شکل ۴-۲۹- تحلیل حساسیت پارامتر  $d_s/h_{TW}$ ، در مقابل پارامترهای  $Q_j$ ،  $D_{50}$  و  $\theta$  با اعمال  $\pm 10\%$  درصد تغییر ..... ۱۰۳
- شکل ۴-۳۰- تحلیل حساسیت پارامتر  $d_s/h_{TW}$ ، در مقابل پارامترهای  $Q_j$ ،  $D_{50}$  و  $\theta$  با اعمال  $\pm 20\%$  درصد تغییر ..... ۱۰۴
- شکل ۴-۳۱- تحلیل حساسیت پارامتر  $d_s/h_{TW}$ ، در مقابل پارامترهای  $Q_j$ ،  $D_{50}$  و  $\theta$  با اعمال  $\pm 30\%$  درصد تغییر ..... ۱۰۵



فصل اول

کلیات

نیاز انسان به آب منجر به شکل‌گیری بیش‌تر تمدن‌های بشری در کنار رودخانه‌ها شده است. تعادل پایدار رودخانه در استفاده‌ی بهینه از آب برای اهداف گوناگون حائز اهمیت است. از جمله پدیده‌هایی که سبب برهم زدن تعادل پایدار رودخانه‌ها می‌شوند، پدیده‌های فرسایش<sup>۱</sup> و رسوب‌گذاری<sup>۲</sup> هستند. شناخت پدیده‌های فرسایش، حمل رسوبات و رسوب‌گذاری و مکانیزم وقوع آن‌ها برای افرادی که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم در زمینه‌ی تحقیقات توسعه و مدیریت منابع آب و خاک فعالیت می‌کنند، اهمیت زیادی دارد. چرا که عدم کنترل این پدیده‌ها پیامدهای جبران‌ناپذیری نظیر بروز تغییرات و ناپایداری‌ها و در نهایت تغییر الگوی رفتاری رودخانه، وقوع جریان‌های سیلابی، از بین رفتن زمین‌های حاصل‌خیز، پر شدن سدها و تأسیسات موجود بر روی رودخانه، اثر منفی بر آبخوان‌ها و سطح آب زیرزمینی، پر شدن دهانه‌های آبگیر و عدم انتقال آب و غیره را در پی دارد.

یکی از سازه‌های جنبی سدها با توجه به نقش ویژه‌ی آن در تخلیه‌ی سیلاب، کنترل آن و مصارف آبیاری که نیازمند طراحی دقیق می‌باشد، دریچه‌های تخلیه‌کننده هستند. عبور جریان از دریچه‌ها همواره توأم با پراکنش انرژی و معمولاً همراه با فرسایش در بستر پایین‌دست است که می‌تواند پایداری سازه را به خطر اندازد. از طرف دیگر مصالح شسته شده به‌صورت پشته‌ای درست در انتهای حفره‌ی آبشستگی ظاهر می‌شود و در نتیجه باعث افزایش عمق پایاب<sup>۳</sup> شده و حتی در مواردی انرژی دریافتی از توربین‌های نیروگاه را کاهش می‌دهد. در این راستا، وظیفه‌ی مهندسی هیدرولیک ارائه‌ی راه‌حلی برای پراکنش انرژی جریان خروجی از دریچه‌ها بدون ایجاد مشکل و با حفظ ایمنی سازه می‌باشد. بدین منظور لازم است طراحان از روش‌های پراکنش انرژی و هم‌چنین از محل وقوع آبشستگی<sup>۴</sup> و عمق تأثیر

---

<sup>1</sup> Erosion

<sup>2</sup> Sedimentation

<sup>3</sup> Tailwater Depth

<sup>4</sup> Scour



آن بر پایداری سازه به درستی مطلع باشند تا با اتخاذ تصمیم مناسب بتوانند از ایجاد مشکلات بعدی جلوگیری نمایند. در پایان نامه‌ی حاضر با ارائه‌ی کلیاتی در مورد آبشستگی و سپس عوامل مؤثر بر ایجاد این پدیده، به راه کارهای محاسبه و کنترل آن پرداخته شده است.

## ۱-۲- تاریخچه علم رسوب و آبشستگی

با پی‌ریزی علم هیدرولیک در قرن ۱۷ میلادی توسط کاستلی<sup>۱</sup>، توریچلی<sup>۲</sup>، ماریوتی<sup>۳</sup>، هوک<sup>۴</sup>، پارنت<sup>۵</sup>، دکارت<sup>۶</sup>، پاسکال<sup>۷</sup> و نیوتن<sup>۸</sup>، مسأله‌ی حرکت آب و به‌طور کلی سیالات در بستر خود مورد توجه بیش‌تری قرار گرفت. در قرن ۱۸ میلادی با ارائه‌ی معادلات انرژی از سوی برنولی<sup>۹</sup>، لاگرانژ<sup>۱۰</sup> و اولر<sup>۱۱</sup> تحولی در این علم رخ داد. این پیشرفت‌ها، هیدرولیک را از حالت ریاضیات محض خارج نموده و به‌سوی کاربردی شدن پیش برد. در همین ایام بود که شزی<sup>۱۲</sup> رابطه‌ی زیر را پیشنهاد نمود:

$$V = C\sqrt{RS} \quad (1-1)$$

هرچند که هنوز مسأله‌ی رسوب در آبشستگی، مرکز توجه محققان قرار نگرفته بود اما ضریب  $C$ ، به‌وضوح اثر جنس بستر بر حرکت را می‌رساند. در اواخر قرن ۱۸ میلادی یک مهندس فرانسوی به‌نام دوبوات<sup>۱۳</sup> پایه‌گذار آزمایش‌هایی شد که این آزمایش‌ها نام او را به‌عنوان بنیان‌گذار علم رسوب و آبشستگی در

---

<sup>1</sup> Gastelli

<sup>2</sup> Toricelli

<sup>3</sup> Mariotte

<sup>4</sup> Hooke

<sup>5</sup> Parent

<sup>6</sup> Descartes

<sup>7</sup> Pascal

<sup>8</sup> Newton

<sup>9</sup> Bernoulli

<sup>10</sup> Lagrange

<sup>11</sup> Euler

<sup>12</sup> Chezy

<sup>13</sup> Dubuat

تاریخ هیدرولیک ثبت کرد. کندی<sup>۱</sup> در سال ۱۸۹۵ نتایج مطالعات گسترده‌ی خود را در مورد کانال‌های آبیاری در مقاله‌ای تحت عنوان «جلوگیری از رسوب‌گذاری در کانال‌های آبیاری» منتشر کرد. او اولین کسی بود که اصول پایداری کانال‌ها را مطرح و روابطی جهت طراحی کانال‌هایی که نه فرسایش دارند و نه رسوب‌گذاری ارائه نمود. افراد دیگری چون لیزی<sup>۲</sup>، اینگلس<sup>۳</sup>، بلنچ<sup>۴</sup>، مطالعات کندی را ادامه دادند که امروزه تحت عنوان «تئوری رژیم» مشهور است.

در شش دهه‌ی قبل، علم هیدرولیک انتقال رسوب پیشرفت گسترده‌ای کرده است. شیلدز<sup>۵</sup> در سال ۱۹۳۶، نخستین کسی بود که به‌طور اصولی آستانه‌ی حرکت<sup>۶</sup> یا شروع حرکت ذرات رسوبی را مورد مطالعه قرار داد. وی با نموداری که ارائه داد ابزاری جهت استفاده‌ی طراحان فراهم آورد تا نسبت به پایداری کانال‌های خاکی و رودخانه‌ای اظهار نظر نمایند.

اینشتین<sup>۷</sup> در سال ۱۹۵۰ با تکمیل و ارائه‌ی رابطه‌ی خود برای برآورد میزان بار رسوبی، گامی جدید در پیشبرد روش‌های انتقال مواد رسوبی برداشت. افراد متعدد دیگری هم که امروزه پایه‌گذاران مباحث فرسایش و حمل رسوب شناخته می‌شوند به پیشبرد این علم کمک کرده‌اند (شفاعی بجستان، ۱۳۸۷). در حال حاضر نیز به‌دلیل نیاز به حل مسائل مختلفی که مرتبط با رسوب است، مطالعات دامنه‌داری در مراکز تحقیقاتی و دانشگاهی دنیا در حال انجام می‌باشد.

---

<sup>1</sup> Kennedy

<sup>2</sup> Lacy

<sup>3</sup> Inglis

<sup>4</sup> Blench

<sup>5</sup> Shields

<sup>6</sup> Incipient motion

<sup>7</sup> Einstein

### ۱-۳- ضرورت تحقیق

جت خروجی از سازه‌های هیدرولیکی سرعت زیادی داشته و سبب آبشستگی موضعی<sup>۱</sup> در پایین دست این سازه‌ها می‌گردد. در صورتی که آبشستگی موضعی ایجاد شده مهار نشود، می‌تواند باعث فرسایش شدید شده و پایداری سد و سازه‌های مرتبط را به مخاطره اندازد. ضمن این که تجمع مواد فرسایش یافته می‌تواند با تغییر رقوم پایاب، بر عملکرد خروجی سازه تأثیر گذارد. بنابراین پیش‌بینی مقدار آبشستگی موضعی در مرحله‌ی طراحی و قبل از اجرای هر سازه‌ی هیدرولیکی که در مجاورت جریان آب قرار دارد، از این جهت اهمیت دارد که طراح با برآورد مقدار تقریبی آن، می‌تواند پی سازه‌ی هیدرولیکی را به نحوی طراحی نماید که آبشستگی ناشی از جریان‌های مختلف، منجر به تخریب آن نشود.

با توجه به کاستی‌های موجود در مدارک علمی و فنی در خصوص جت‌های ریزشی افقی آزاد در پایین دست سدهای مخزنی و ضرورت ارائه‌ی راه‌کاری مقرون به صرفه برای کنترل آبشستگی ایجاد شده، طرح این پایان‌نامه پیشنهاد شد.

### ۱-۴- اهداف پایان‌نامه

در پایان‌نامه‌ی حاضر، نظریات محققین مختلف در حد امکان جمع‌آوری و مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین بررسی بیشتری بر روی آبشستگی حاصل از جت‌های ریزشی آزاد در پایین دست سدهای مخزنی به عمل آمد که اهداف زیر را در پی داشت:

---

<sup>1</sup> Local Scour

- بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای هیدرولیکی و هندسی (شامل دبی جت آب خروجی از دریچه‌ها، قطر متوسط رسوبات و زاویه‌ی برخورد جت‌های ریزشی آزاد نسبت به صفحه‌ی افق) بر حداکثر عمق آبشستگی پایین‌دست سدهای مخزنی
- تحلیل گسترش ابعاد حفره‌ی آبشستگی در پایین‌دست سدهای مخزنی
- ارائه‌ی رابطه‌ی بی‌بعد برای برآورد حداکثر عمق آبشستگی در پایین‌دست سدهای مخزنی
- تحلیل حساسیت رابطه‌ی خطی ارائه شده در این تحقیق نسبت به پارامترهای مؤثر در ایجاد حفره‌ی آبشستگی

## ۱-۵- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه شامل ۵ فصل می‌باشد که در پی آن منابع و مآخذ تحقیق ارائه شده است. در فصل اول به مقدمه، تاریخچه‌ی علم رسوب و آبشستگی، ضرورت تحقیق و اهداف پایان‌نامه به همراه خلاصه‌ای از فصول مختلف این مجموعه پرداخته شده است.

فصل دوم شامل کلیاتی از آبشستگی و انواع آن با شکل‌های مختلف می‌باشد که در ادامه‌ی فصل، توضیحاتی راجع به جت‌های ریزشی (عمودی و مایل) و مکانیزم آبشستگی ناشی از آن‌ها ارائه شده است. از دیگر مواردی که در این فصل به آن پرداخته شده تغییرات زمانی عمق آبشستگی، روابط تخمین ابعاد حفره‌ی آبشستگی حاصل از جت‌های ریزشی و مروری بر تحقیقات پیشین می‌باشد.

در فصل سوم به شرح تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده، آنالیز ابعادی و تعیین پارامترهای مؤثر در آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی آزاد، روش انجام آزمایش‌ها و زمان انجام هر آزمایش پرداخته شده است. این فصل در نهایت با معرفی آزمایش‌های انجام شده و تعیین تعداد آزمایش‌ها به اتمام رسیده است.

در فصل چهارم پس از ارائه‌ی داده‌های به‌دست آمده از آزمایش‌ها و تعیین تأثیر تغییر پارامترهای مختلف در روند آبشستگی حاصل از جت‌های ریزشی آزاد، به تفسیر نمودارها و نتایج و هم‌چنین تحلیل توپوگرافی بستر پرداخته شده است. در ادامه‌ی فصل نیز با استفاده از آنالیز ابعادی انجام شده، نرم‌افزار SPSS و آنالیز آماری، رابطه‌ای بی‌بعد برای پیش‌بینی حداکثر عمق حفره‌ی آبشستگی ارائه شده است. در نهایت به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای  $Q_j$ ،  $D_{50}$  و  $\theta$  بر رابطه‌ی عمومی معرفی شده در تخمین حداکثر عمق آبشستگی، نسبت به تحلیل حساسیت رابطه‌ی مذکور اقدام گردیده است.

فصل پنجم نیز شامل نتایج به‌دست آمده‌ی خلاصه شده و پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده می‌باشد.



# فصل دوم

پیشینه تحقیق

## ۲-۱- مقدمه

برای تخلیه‌ی سیلاب از کنار و یا از روی سدها، روش‌های متعددی وجود دارد. یک روش آن است که جریان را به‌صورت آزاد در هوا رها کرد. این هدف با احداث سرریزهای آزاد آبشاری مستقر در تراز نزدیک به تاج سد، یا سرریزهای تندآب منتهی به جام پرتاب‌کننده، یا با سرریزهای روزنه‌ای و یا دریچه‌های مستقر در ترازهای پایین سد حاصل می‌شود. شکل (۲-۱) جت آب خروجی از دریچه‌های سد دز را نشان می‌دهد که بر روی رودخانه‌ی دز در ۲۳ کیلومتری شمال شرقی اندیمشک واقع شده است.



شکل ۲-۱- جت آب خروجی از دریچه‌های سد دز



در این حالت، جریان آب به صورت یک جت آزاد پر انرژی ریزش و در نهایت به محلی در پایین دست سد برخورد می نماید که موجب حرکت ذرات بستر و ایجاد حفره‌ی آبستنگی می گردد و در نهایت ممکن است منجر به شکست سد شود. در این جا مسأله‌ی اصلی آن است که جریان سیلاب به نحوی تخلیه گردد که آبستنگی در پایین دست سازه رخ ندهد و یا میزان آن محدود باشد.

از آن جایی که حفاظت کامل بستر پایین دست سازه‌های هیدرولیکی خصوصاً سدها در مقابل این پدیده بسیار گران تمام می شود و از طرفی با صرف هزینه‌های بسیار زیاد نیز امکان حفاظت کامل وجود ندارد؛ لازم است با مطالعات آزمایشگاهی روی مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی، به شناسایی عوامل مختلف مؤثر بر این پدیده پرداخت.

در این فصل با توجه به مطالعات انجام گرفته و منابع موجود، به تشریح مفاهیم مورد بحث شامل آبستنگی و جت‌های ریزشی (عمودی و مایل) پرداخته شده و در ادامه مروری بر تحقیقات پیشین ارائه می شود.

## ۲-۲- آبستنگی

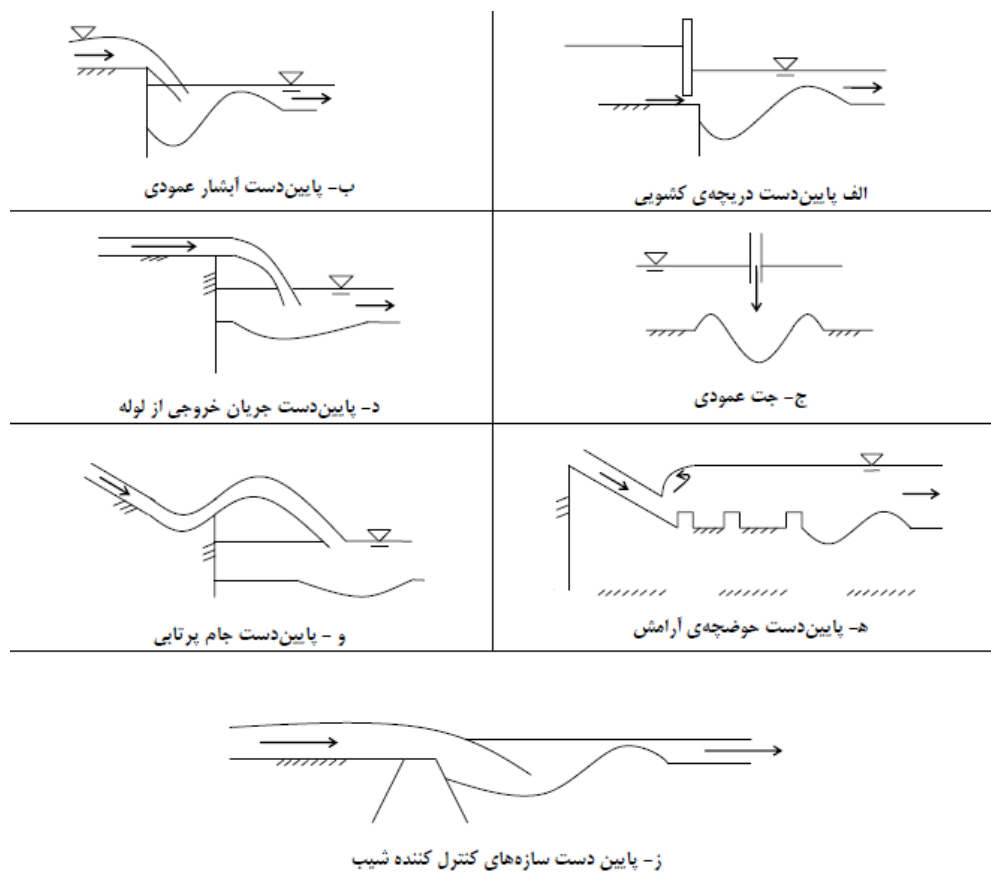
### ۲-۲-۱- مفهوم آبستنگی

آبستنگی در حقیقت جابه‌جایی ذرات توسط جریان از محل استقرار اولیه‌ی آن‌ها به مکان دیگری است. آبستنگی ممکن است در نتیجه‌ی تغییرات طبیعی جریان در آبراهه یا در نتیجه‌ی فعالیت‌های انسان مانند ساخت سازه‌ها در مسیر جریان یا برداشت مصالح بستر اتفاق افتد. به طور کلی آبستنگی در اثر اندرکنش نیروهای زیر حاصل می شود:

– نیروی محرک ناشی از جریان که در راستای جدا کردن ذره از بستر عمل می کند.

- 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<sup>۱</sup> و بالا برنده<sup>۲</sup> که باعث جدا شدن ذره از بستر می‌شوند، بر نیروی مقاوم ذره غالب آید. شکل (۲-۲) آبشستگی موضعی پایین دست برخی از سازه‌های هیدرولیکی را نشان می‌دهد (نشریه‌ی شماره‌ی ۵۴۹ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۹۰).



شکل ۲-۲- آبشستگی موضعی پایین دست برخی از سازه‌های هیدرولیکی (نشریه‌ی شماره‌ی ۵۴۹ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۹۰)

<sup>1</sup> Drag Force

<sup>2</sup> Lift Force

## ۲-۲-۲- مراحل توسعه آبستگی

براساس مطالعاتی که توسط محققانی نظیر بروسرز<sup>۱</sup> و دیتز<sup>۲</sup> انجام گرفته است، پدیده‌ی آبستگی به‌طور کلی دارای چهار مرحله‌ی زیر می‌باشد (بیات ۱۳۷۹، مولیناس و خیرالدین<sup>۳</sup> ۲۰۰۵):

۱. مرحله‌ی ابتدایی<sup>۴</sup>

۲. مرحله‌ی توسعه<sup>۵</sup>

۳. مرحله‌ی تثبیت<sup>۶</sup>

۴. مرحله‌ی تعادل<sup>۷</sup>

- مرحله‌ی اول یا ابتدایی، عبارت است از مرحله‌ای که در آن جریان در گودال آبستگی در راستای طولی تقریباً یکنواخت است. این مرحله از فرآیند آبستگی را می‌توان مرحله‌ای که حداکثر ظرفیت آبستگی در آن اتفاق می‌افتد، دانست. مشاهدات انجام شده بر روی مصالح نرم و زبر نشان داده است که در شروع شکل‌گیری حفره‌ی آبستگی، بخشی از مصالح بستر نزدیک شیب بالادست آبستگی به‌حالت تعلیق درمی‌آیند.

- در مرحله‌ی دوم یا مرحله‌ی توسعه، عمق آبستگی افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند اما شکل گودال آبستگی تغییر نمی‌یابد. اندازه‌گیری‌های انجام شده نشان داده‌اند که اگرچه بخش بالایی شیب بالادست آبستگی در تعادل است اما بخش پایینی آن همچنان در حال توسعه می‌باشد.

---

<sup>1</sup> Breusers

<sup>2</sup> Dietz

<sup>3</sup> Molinas and Kheireldin (2005)

<sup>4</sup> Initial Phase

<sup>5</sup> Development Phase

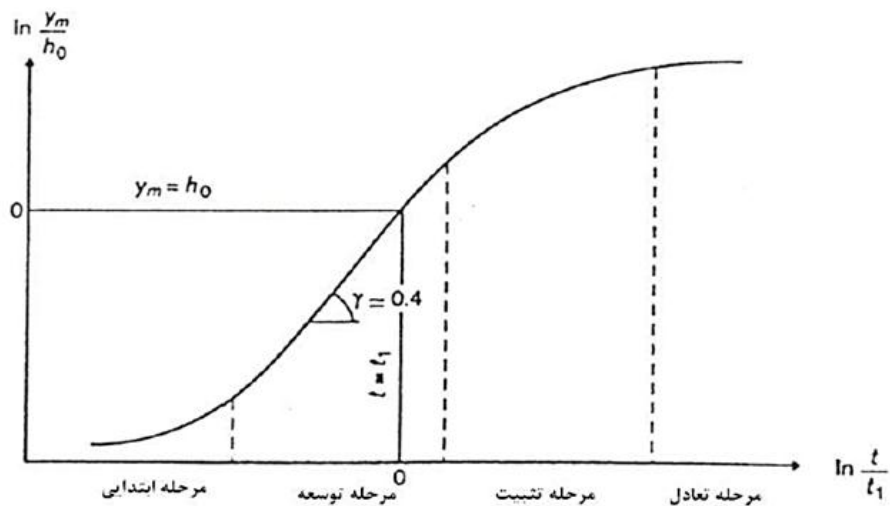
<sup>6</sup> Stabilization Phase

<sup>7</sup> Equilibrium Phase

- در مرحله سوم یا مرحله تثبیت، آهنگ توسعه‌ی عمق آبشستگی کند می‌شود. در این مرحله، دیواره‌ی پایین دست حفره‌ی آبشستگی دچار تغییرات محسوسی می‌گردد.

- مرحله چهارم یا مرحله تعادل را می‌توان به صورت مرحله‌ای که در آن ابعاد گودال آبشستگی تغییر قابل ملاحظه‌ای نخواهد یافت، تعریف کرد. در این مرحله تنها حرکت ذرات ممکن است درون حفره‌ی آبشستگی صورت گیرد و ممکن است حتی جابه‌جایی ذرات متوقف شود (بروسرز و رادکیوی<sup>۱</sup>، ۱۹۹۱).

مراحل آبشستگی در شکل (۳-۲) نشان داده شده است.



شکل ۳-۲- مراحل توسعه حفره آبشستگی (خداشناس، ۱۳۸۸).

در شکل فوق  $y_m$  عمق آبشستگی،  $t$  زمان آبشستگی،  $t_1$  زمان پایه‌ی آبشستگی،  $\gamma$  شیب منحنی در مرحله‌ی توسعه و  $h_0$  عمق آب است.

<sup>1</sup> Breusers and Raudkivi (1991)

## ۲-۲-۳- انواع آبستگی

آبستگی از جنبه‌های مختلف به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شود:

- آبستگی از نظر علت به وجود آمدن آن، که شامل آبستگی عمومی، آبستگی ناشی از تنگ‌شدگی مقطع و آبستگی موضعی است. از مجموع این سه آبستگی، عمق آبستگی کل به دست می‌آید.
  - آبستگی از نظر وضعیت حمل رسوب، که شامل آبستگی در حالت آب زلال و آبستگی در حالت آب حاوی رسوب است.
  - آبستگی از نظر وضعیت ذرات رسوب در حفره‌ی آبستگی، شامل آبستگی استاتیکی و دینامیکی می‌شود.
- هم‌چنین موارد دیگری از انواع آبستگی مانند آبستگی دریایی و آبستگی ناشی از قایقرانی وجود دارد که در این پایان‌نامه به آن پرداخته نمی‌شود (آلابی<sup>۱</sup>، ۲۰۰۶).

## ۲-۲-۳-۱- آبستگی عمومی<sup>۲</sup>

این نوع آبستگی زمانی رخ می‌دهد که در بازه‌ای از رودخانه سرعت برشی<sup>۳</sup> از سرعت بحرانی<sup>۴</sup> بالاتر باشد. در این حالت جریان آب ذرات بستر را در طول مسیر جابه‌جا کرده و با خود به پایین دست حمل می‌کند. این پدیده کاهش تراز بستر رودخانه در همان بازه را به همراه خواهد داشت. آبستگی عمومی شامل موارد زیر است (رادکیوی و اتما<sup>۵</sup>، ۱۹۸۳):

---

<sup>1</sup> Alabi (2006)

<sup>2</sup> General Scour

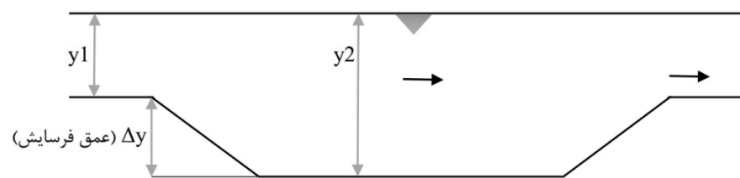
<sup>3</sup> Shear velocity

<sup>4</sup> Critical velocity

<sup>5</sup> Raudkivi and Ettema (1983)

- پایین افتادگی<sup>۱</sup> تراز رودخانه
- مهاجرت جانبی رودخانه (جابجایی رودخانه در پلان)
- آبشستگی در قوس رودخانه<sup>۲</sup> و پیچان رودها<sup>۳</sup>
- آبشستگی در محل اتصال آبراهه<sup>۴</sup> و انشعابات

پدیده‌های فوق به‌طور مستقیم به مشخصات حوضه‌ی آبریز و شکل رودخانه وابسته‌اند (نشریه‌ی شماره‌ی ۵۴۹ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۹۰). شکل (۲-۴) شماتیکی از آبشستگی عمومی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴- آبشستگی عمومی (رادکیوی و اتما، ۱۹۸۳)

## ۲-۲-۳-۲- آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی<sup>۵</sup>

وجود تنگ‌شدگی مقطع در مسیر جریان باعث افزایش سرعت جریان و بالا رفتن قدرت فرسایشی جریان در این محل می‌گردد. آبشستگی ایجاد شده در این حالت را آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی (انقباض) می‌گویند. آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی به‌طور معمول نتیجه‌ی محدود کردن عرض رودخانه

<sup>1</sup> Degradation

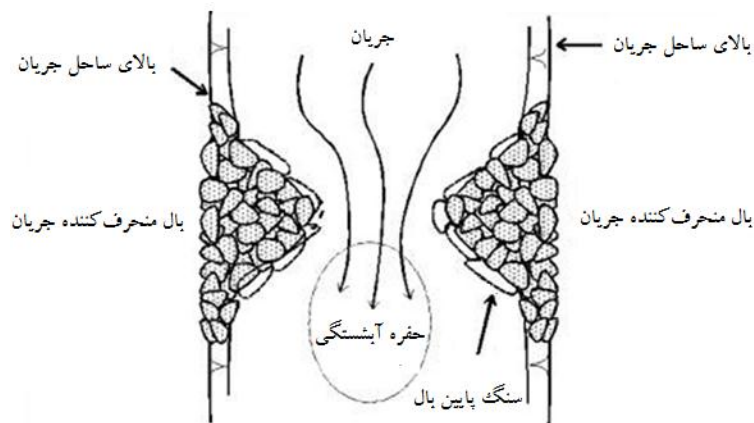
<sup>2</sup> Bend Scour

<sup>3</sup> Meander

<sup>4</sup> Confluence Scour

<sup>5</sup> Contraction Scour

می‌باشد (خداشناس، ۱۳۸۸). در شکل (۵-۲) شماتیکی از آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی نشان داده شده است.



شکل ۵-۲- آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی (خداشناس، ۱۳۸۸)

## ۲-۳-۲- آبشستگی موضعی<sup>۱</sup>

این نوع آبشستگی مستقیماً ناشی از اثر سازه بر الگوی جریان است و تابعی از نوع سازه می‌باشد و ممکن است هم‌زمان با آبشستگی عمومی و آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی رخ دهد. این نوع آبشستگی در اثر شدت جریان و گرداب‌های ایجاد شده در اطراف سازه ایجاد می‌شود. به‌طور کلی عمق آبشستگی موضعی بسیار بزرگ‌تر از آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی و آبشستگی عمومی می‌باشد. در تحلیل مسائل آبشستگی موضعی، فقط عمق بیشینه‌ی آبشستگی در مرحله‌ی تعادل اهمیت دارد (بروسرز و رادکیوی<sup>۲</sup>، ۱۹۹۱).

<sup>۱</sup> Local Scour

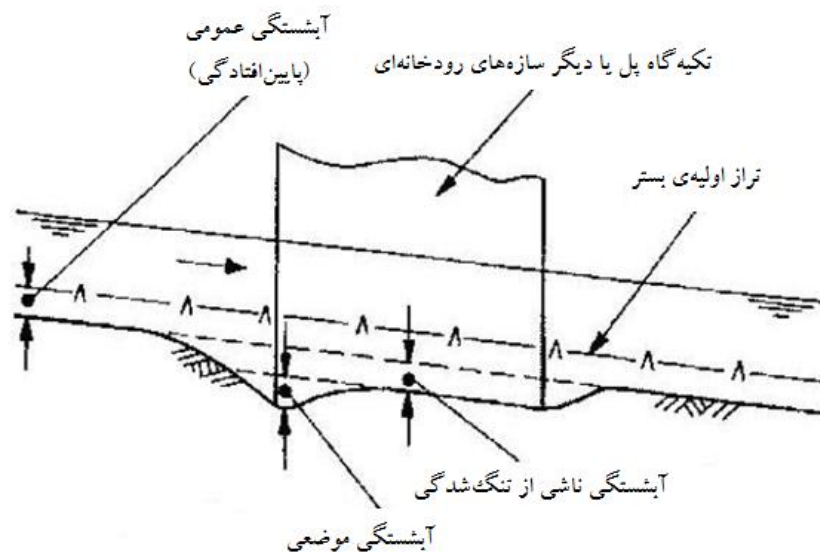
<sup>۲</sup> Breusers and Raudkivi (1991)

## ۲-۲-۳-۴- آبستگي كل<sup>۱</sup>

عمق آبستگي كل مرتبط با يك سازه‌ي مشخص، از مجموع سه آبستگي زير به دست مي آيد:

- آبستگي عمومي
- آبستگي ناشي از تنگ شدگي
- آبستگي موضعي

تراز موضعي بستر حاصل از هر کدام از آبستگي‌هاي فوق، به عنوان شرايط اوليه براي تخمين قسمت ديگر به كار مي رود (كوتيارى و همكاران<sup>۲</sup>، ۱۹۹۲). شكل (۶-۲) نمونه‌اي از سه قسمت آبستگي كل را نشان مي دهد.



شكل ۶-۲- اجزای آبستگي (ميسون، ۱۹۹۳)

<sup>1</sup> Total Scour

<sup>2</sup> Kothyari et al. (1992)



## ۲-۲-۳-۵- آبشستگی در آب زلال<sup>۱</sup> و آب حاوی رسوب<sup>۲</sup>

آبشستگی در آب زلال، در شرایطی اتفاق می‌افتد که مواد بستر در بالادست حفره‌ی آبشستگی ساکن هستند و انتقال رسوب رودخانه وجود ندارد. در این آبشستگی سرعت متوسط جریان کم‌تر از سرعت آستانه‌ی حرکت ذرات رسوبی است. طبق بررسی‌های انجام شده، حرکت مواد بستر عملاً در سرعت  $\frac{V_c}{2}$  (نصف سرعت در آستانه‌ی حرکت) به صورت تدریجی و انفرادی آغاز می‌شود. و در سرعت  $V_c$  مجموعه مواد تشکیل دهنده‌ی بستر رودخانه به صورت فراگیر و یک‌پارچه حرکت خود را آغاز کرده و حداکثر عمق چاله‌ی فرسایشی اتفاق می‌افتد (رادکیوی<sup>۳</sup>، ۱۹۹۰).

در آبشستگی در حالت آب زلال با بستر ثابت، ابتدا شدت افزایش عمق آبشستگی نسبت به زمان زیاد است، ولی با افزایش زمان این شدت کاهش یافته و در نهایت پس از گذشت زمانی نسبتاً طولانی به عمق تعادل می‌رسد. روند افزایش عمق آبشستگی در شرایط آب زلال تا زمانی است که جریان دیگر توانایی جابه‌جایی ذرات بستر را نداشته باشد، که در این زمان حداکثر عمق آبشستگی رخ داده است (بروسرز و همکاران<sup>۴</sup>، ۱۹۹۷).

در آب حاوی رسوب، عمق حفره‌ی آبشستگی به سرعت افزایش یافته و به حداکثر خود می‌رسد. اما با آغاز ورود ذرات به داخل حفره عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. در بسترهای متحرک حرکت تلماسه‌ها<sup>۵</sup> و پشته‌های رسوبی موجب نوسان عمق چاله‌ی فرسایشی می‌گردد. مطابق شکل (۲-۷) عمق آبشستگی

---

<sup>1</sup> Clear Water Scour

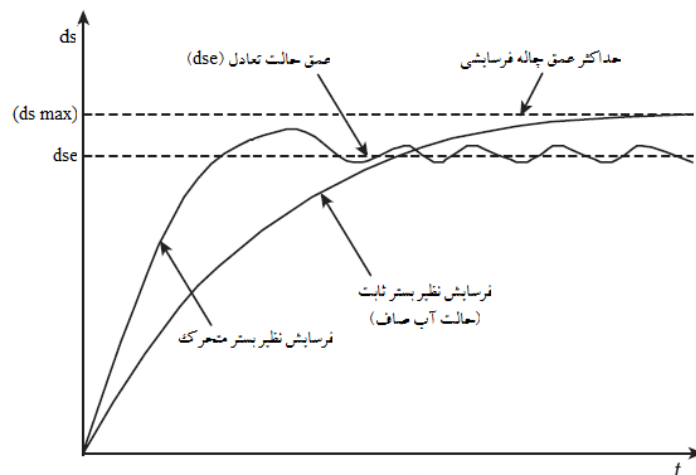
<sup>2</sup> Live Bed Scour

<sup>3</sup> Raudkivi (1990)

<sup>4</sup> Breusers et al. (1997)

<sup>5</sup> Dunes

متعادل زمانی رخ می‌دهد که در یک دوره‌ی زمانی، مقدار ذرات خارج شده از حفره‌ی آبشستگی با میزان ذرات تأمین شده از بالادست حفره توسط جریان برابر باشد (ملویل و چيو<sup>۱</sup>، ۱۹۹۹).



شکل ۲-۷- تغییرات حفره آبشستگی بر حسب زمان (نشریه‌ی شماره‌ی ۳۱۸ وزارت نیرو، ۱۳۸۱)

طبق نظر داویس و ریچاردسون حداکثر عمق آبشستگی با زمان افزایش می‌یابد، در حالی که در شرایط بستر زنده این عمق طی زمان به صورت نوسانی کم و زیاد می‌شود (آلابی<sup>۲</sup>، ۲۰۰۶).

## ۲-۳-۲-۶- آبشستگی استاتیکی و دینامیکی

اندازه‌گیری عمق حفره‌ی آبشستگی بعد از وقوع سیلاب می‌تواند گمراه‌کننده باشد؛ زیرا حداکثر عمق آبشستگی معمولاً در زمان حداکثر سیلاب اتفاق می‌افتد و در خلال فروکش نمودن سیلاب قسمتی از حفره‌ی آبشستگی ممکن است پر شود. کاهش عمق آبشستگی ممکن است در اثر ته‌نشینی مصالح معلق شده در حفره‌ی آبشستگی یا ریزش شیب‌های دیواره‌ی حفره‌ی 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

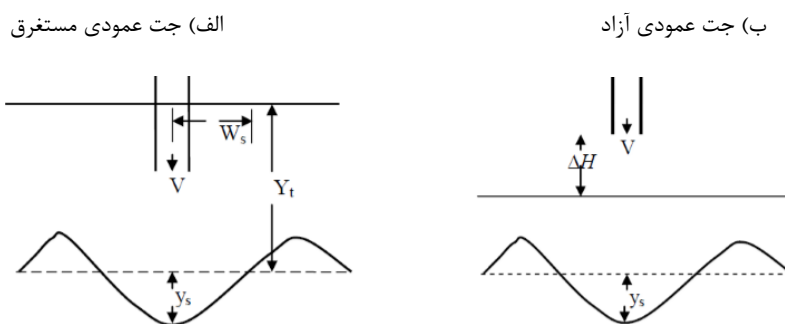
<sup>1</sup> Melville and Chiew (1999)

<sup>2</sup> Alabi (2006)

در نظر می‌گیرند که پس از ته‌نشینی احتمالی ذرات در حفره‌ی آبستگي به‌جای می‌ماند و عمق آبستگي دینامیکی، عمقی است که در هنگام انجام آزمایش و قبل از ته‌نشینی رسوبات در حفره‌ی آبستگي وجود دارد (خداشناس، ۱۳۸۸).

## ۲-۳- جت‌های ریزشی

جریان خروجی از سازه‌های هیدرولیکی اغلب به‌صورت جت می‌باشد که ممکن است موجب تغییرات زیادی در توپوگرافی رودخانه و اطراف این سازه‌ها گردد و خسارت‌های سازه‌ای و زیست محیطی قابل توجهی به‌همراه داشته باشد. بسته به عمق پایاب، جت ریزشی می‌تواند به‌صورت آزاد یا مستغرق<sup>۱</sup> باشد. هرگاه مقدار عمق پایاب از مقدار ارتفاع ریزش بیش‌تر باشد، جت مستغرق است. شکل (۲-۸) جت عمودی مستغرق و آزاد را نشان می‌دهد. جت‌های ریزشی را می‌توان به دو دسته جت‌های ریزشی عمودی و جت‌های ریزشی مایل تقسیم‌بندی نمود. جریان در جت‌های عمودی، به‌طور عمودی با بستر برخورد می‌کند و حفره‌ی آبستگي در جهت طولی و عرضی متقارن است، در حالی که در جت‌های ریزشی مایل، جت با زاویه به بستر برخورد می‌نماید و حفره‌ی آبستگي فقط در جهت عرضی متقارن است (بروسرز و رادکیوی<sup>۲</sup>، ۱۹۹۱).



شکل ۲-۸- نمایی از یک جت عمودی الف- مستغرق، ب- آزاد (ادریگ و راجاراتنام، ۱۹۹۶)

<sup>1</sup> Submerged

<sup>2</sup> Breusers and Raudkivi (1991)

## ۲-۳-۱- الگوی جریان در انواع جت‌های ریزشی

الگوی جریان در جت‌های ریزشی عمودی و جت‌های ریزشی مایل متفاوت است که در ادامه به‌طور مجزا به هر یک پرداخته می‌شود.

## ۲-۳-۱-۱- الگوی جریان در جت‌های ریزشی عمودی

پس از برخورد جت عمودی به بستر، آبشستگی آغاز شده و ابتدا جت با زاویه‌ی حدود ۱۸۰ درجه به اطراف منحرف می‌شود. پس از آن توسعه و افزایش عمق آبشستگی باعث افزایش فاصله‌ی برخورد جت با بستر (ارتفاع ریزش جت) شده و جت از مرز حفره‌ی آبشستگی تبعیت کرده و با زاویه‌ی انحراف کم‌تری به اطراف منحرف می‌شود. در جت عمودی، شکل حفره‌ی آبشستگی در پلان متقارن بوده و رسوبات خارج شده از حفره‌ی آبشستگی در اطراف حفره ته‌نشین می‌شود (نشریه‌ی شماره‌ی ۵۴۹ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۹۰).

ادریبگ و راجاراتنام<sup>۱</sup> (۱۹۹۶)، براساس مقادیر پارامتر فرسایش<sup>۲</sup> ( $E_c$ ) و پارامتر فشار ( $K$ ) (روابط ۱-۲ و ۲-۲)، جت مستغرق عمودی را به دو دسته جت با انحراف زیاد<sup>۳</sup> (SDJR) و جت با انحراف کم<sup>۴</sup> (WDJR) تقسیم‌بندی کردند. شکل (۲-۹) الگوهای جریان و نیمرخ بستر ناشی از این دو نوع جت را نشان می‌دهد.

$$E_c = \frac{v\left(\frac{D}{H}\right)}{\sqrt{gd_{50}(s-1)}} \quad (1-2)$$

<sup>1</sup> Aderibigbe and Rajaratnam (1996)

<sup>2</sup> Erosion Coefficient

<sup>3</sup> Strongly Deflected Jet Regime

<sup>4</sup> Weak Deflected Jet Regime

$$K = \left(\frac{V_b}{\omega}\right)^2 \quad (2-2)$$

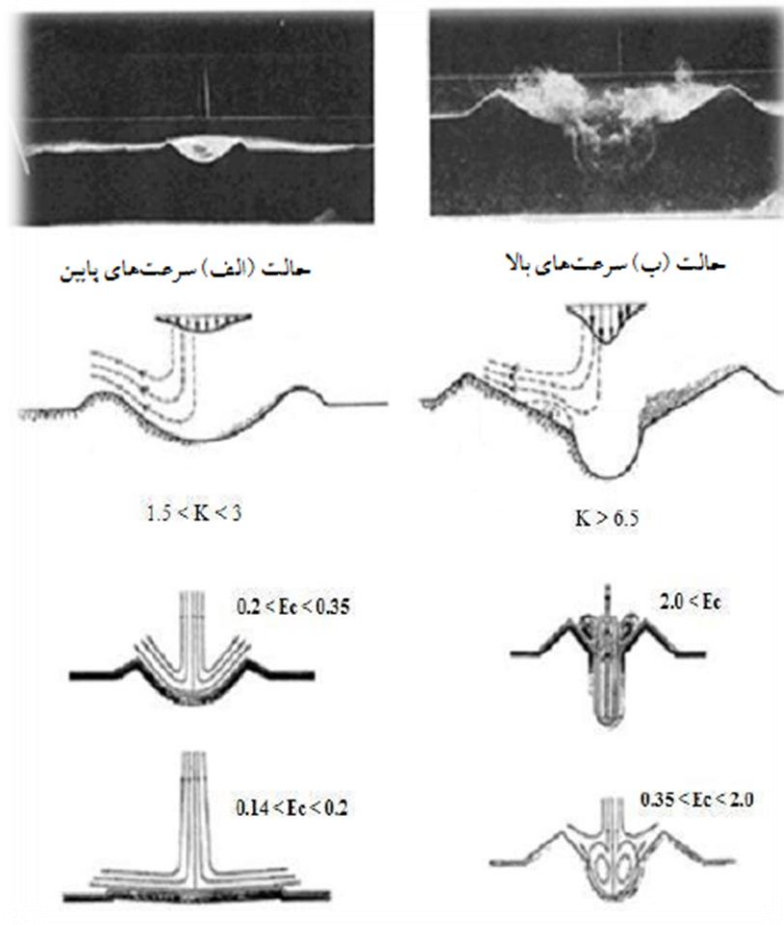
که در این روابط  $V_b$  سرعت جت در برخورد با سطح مصالح بستر (متر بر ثانیه)،  $\omega$  سرعت سقوط<sup>۱</sup> ذرات بستر (متر بر ثانیه)،  $D$  قطر جت (متر)،  $V$  سرعت جت در خروجی (متر بر ثانیه)،  $g$  شتاب جاذبه‌ی زمین (متر بر مجذور ثانیه)،  $d_{50}$  قطر متوسط ذرات بستر (متر)،  $H$  ارتفاع ریزش جت (متر)،  $s$  چگالی نسبی ( $s = \rho_s / \rho$ )،  $\rho_s$  چگالی ذرات بستر و  $\rho$  چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب) می‌باشد.

### ۲-۳-۱-۱-۱- جت با انحراف کم

این نوع جت در شرایط  $3 < K < 1/5$  و  $Ec < 0/35$  ایجاد می‌شود. در این حالت حفره‌ی آبشستگی کم عمقی ایجاد می‌شود و جت پس از برخورد به بستر، انحراف کم‌تری (بین ۹۰ و  $90 + \phi$ ) خواهد داشت. در این جا  $\phi$  زاویه‌ی استقرار ذرات بستر می‌باشد. جت دیواره‌ای حاصل از انحراف جریان، مسیر حفره را تا تاج برآمدگی اطراف حفره طی می‌کند. جدایی جریان در لبه‌ی حفره بر اثر تغییر شکل بستر حاصل می‌شود که البته تأثیری بر آبشستگی داخل حفره ندارد. مواد فرسایش یافته، پس از انحراف جت ته‌نشین شده و به‌صورت باربستر در جهت شعاعی به‌سمت بیرون حمل می‌شوند. شعاع فرسایش ( $r_0$ ) که حداکثر فاصله‌ی حمل رسوبات می‌باشد، با گذشت زمان تغییر زیادی نمی‌کند، ولی حداکثر عمق فرسایش با افزایش هر دو پارامتر فشار و زمان فرسایش افزایش می‌یابد تا در نهایت به مقدار تعادل برسد. در این نوع جت، شیب کناره‌های حفره‌ی آبشستگی نسبت به  $K$  یا  $Ec$  بسیار حساس بوده و با افزایش این پارامترها مقدار آن افزایش می‌یابد (ادریبگ و راجاراتنام<sup>۲</sup>، ۱۹۹۶).

<sup>۱</sup> Fall Velocity

<sup>۲</sup> Aderibigbe and Rajaratnam (1996)



شکل ۹-۲- الگوهای جریان و نیمرخ بستر ناشی از آن برای جت عمودی (ادریگ و راجاراتنام، ۱۹۹۶).

## ۲-۱-۱-۳-۲- جت با انحراف زیاد

حفره‌ی آبشستگی ناشی از این نوع جت که دارای یک فرورفتگی عمیق در مرکز است و با یک سطح شیب‌دار به برآمدگی اطراف حفره وصل می‌شود، در شرایط  $6/5 < K < 14$  و  $Ec > 0/35$  تشکیل می‌شود. در این حالت، جت با زاویه‌ای بین  $(90 + \phi)$  و  $180$  درجه وابسته به  $K$  یا  $Ec$  تغییر جهت می‌دهد. این انحراف جت، مواد فرسایش یافته‌ی درون حفره را به صورت معلق به خارج حفره انتقال می‌دهد. در نتیجه ظرفیت انتقال جت در فواصل شعاعی بزرگ‌تر، کاهش یافته و ذرات بر روی کناره‌های داخلی حفره‌ی آبشستگی ته‌نشین شده و به تدریج به سمت مرکز حفره سر می‌خورند و دوباره توسط

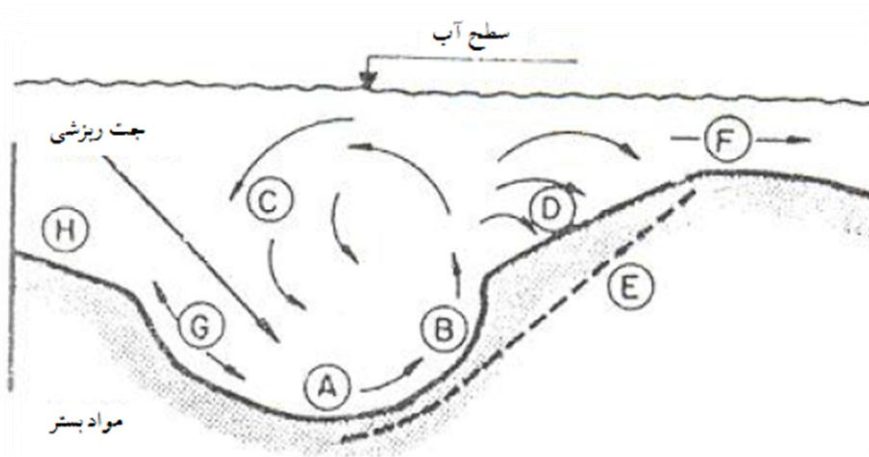
جریان برداشته می‌شوند. در این نوع جت، جریان داخل حفره‌ی آبشستگی به‌صورت دورانی است و ذرات را به‌صورت معلق در حفره‌ی آبشستگی می‌چرخاند و پس از توقف جت، ذرات معلق در حفره ته‌نشین می‌شوند. بنابراین عمق آبشستگی استاتیکی (عمق آبشستگی پس از قطع جریان) کم‌تر از عمق آبشستگی دینامیکی (عمق آبشستگی در هنگام انجام آزمایش) است. در این حالت شیب اطراف حفره‌ی آبشستگی تقریباً برابر با زاویه‌ی استقرار ذرات در حالت مستغرق است. در این نوع جت، جدایی جریان در لبه‌ی داخلی حفره‌ی آبشستگی اتفاق می‌افتد. مواد فرسایش یافته از حفره‌ی آبشستگی توسط جت دیواره‌ای به‌صورت معلق به‌سمت بیرون حمل شده و در نهایت ته‌نشین می‌شوند. با افزایش  $K$  یا  $Ec$ ، زاویه‌ی انحراف جت افزایش می‌یابد و ممکن است به مقدار  $180^\circ$  درجه نیز برسد. هرچه زاویه‌ی جت منحرف شده بیش‌تر شود، قسمت بیش‌تری از مواد فرسایش یافته دوباره به داخل حفره‌ی آبشستگی باز می‌گردند و نمی‌توانند خود را از جریانات دورانی داخل حفره خارج ساخته و به نرخ فرسایش کمک کنند. تنها بخش کوچکی از ذرات از طریق جریان شعاعی به‌سمت لبه‌ی حفره، حمل شده و ته‌نشین می‌شوند. این روند تا زمانی که تعادل دینامیکی بین جریان و شکل بستر به‌وجود آید، ادامه می‌یابد (ادریبیگ و راجاراتنام<sup>۱</sup>، ۱۹۹۶).

### ۲-۳-۱-۲- الگوی جریان در جت‌های ریزشی مایل

در جت ریزشی مایل نیز فرآیند آبشستگی اولیه خیلی سریع است. شکل (۲-۱۰) الگوی جریان داخل حفره‌ی آبشستگی برای یک جت ریزشی مایل را نشان می‌دهد. در این حالت جت پس از برخورد با بستر، مواد فرسایش یافته را از ته حفره‌ی آبشستگی (محدوده‌ی  $A$ ) شسته و همراه خود به‌سمت پایین‌دست (محدوده‌ی  $B$ ) انتقال می‌دهد. در این محدوده بخشی از جت به‌همراه مصالح منحرف شده

<sup>1</sup> Aderibigbe and Rajaratnam (1996)

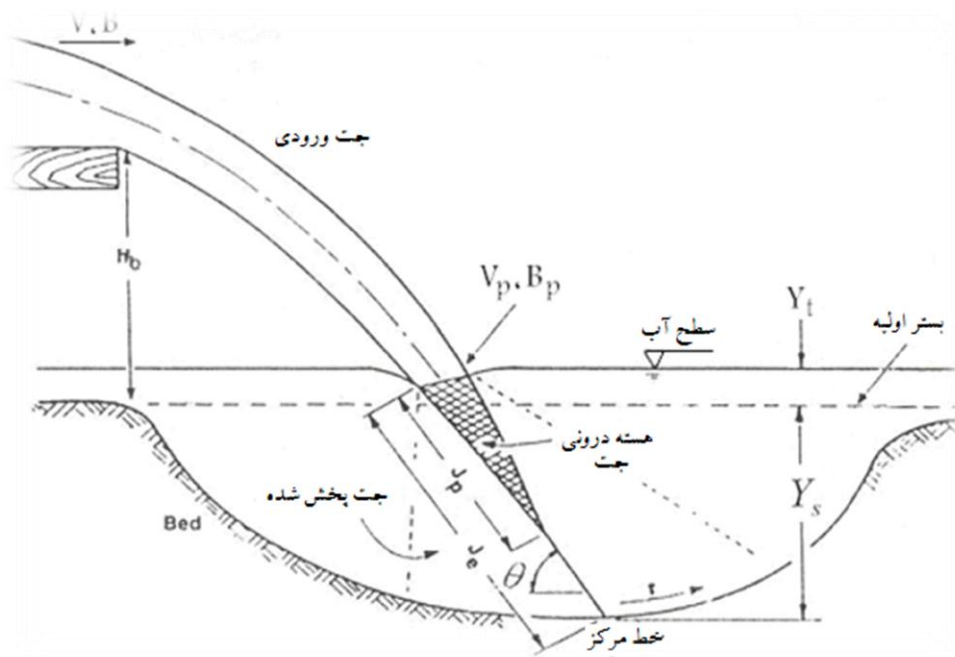
و تقریباً رو به بالا بلند می‌شود و قسمتی از جریان به سمت بالادست (محدوده‌ی C) بر می‌گردد و وارد جریان بالادست می‌شود. رسوبات همراه این جریان به صورت معلق داخل حفره باقی می‌مانند. بقیه‌ی جریان به سمت پایین دست منتقل شده و بخشی از مواد فرسایش یافته‌ی همراه خود را روی سطح شیب دار در محدوده‌ی D ته‌نشین می‌کند و همراه بقیه‌ی ذرات به سمت پایین دست (محدوده‌ی 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 حفره‌ی اصلی باز می‌گردد. در نتیجه با گذشت زمان، سطح D تغییر یافته و سطح E پدیدار می‌شود. در محدوده‌ی G قسمتی از مواد بستر دارای حرکت نوسانی می‌باشند، در حالی که در محدوده‌ی H مواد بستر بدون حرکت هستند. روند فوق تا زمانی که میزان فرسایش در محدوده‌ی 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 زاویه‌ی قرارگیری مواد بستر ( $\phi$ )، به داخل حفره ریزش خواهند کرد (نشریه‌ی شماره‌ی ۵۴۹ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۹۰).



شکل ۲-۱- الگوی جریان جت ریزشی مایل داخل حفره آبستگي (نشریه‌ی شماره‌ی ۵۴۹ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی، ۱۳۹۰)



هنگامی که جت آب جاری می‌شود، به دلیل اغتشاش داخلی، تنش برشی هوای اطراف آن و تأثیر کشش سطحی ناچیز می‌گردد. حتی ممکن است جت به صورت اسپری متشکل از ذرات آب با قطره‌های گوناگون درآید. زاویه‌ی برخورد جت با سطح آب ( $\theta$ )، در فرآیند آبستگي به خصوص شکل حفره تأثیر می‌گذارد. مطابق شکل (۱۱-۲) جت پس از برخورد به سطح پایاب، به دو ناحیه‌ی مجزا تقسیم می‌شود. قسمت اول دارای یک هسته‌ی درونی به طول  $J_p$  از سطح پایاب است که ضخامت آن در جهت جت کاهش می‌یابد. در این ناحیه سرعت جت در طول خط مرکزی جت تقریباً ثابت می‌ماند و مقدار آن برابر با سرعت اولیه‌ی جت خروجی ( $V$ ) در نظر گرفته می‌شود. در خارج از این ناحیه، سرعت جت به دلیل پخشیدگی کم می‌شود و انرژی آن در جهت جت کاهش چشمگیری دارد (هافمن و بوجی<sup>۱</sup>، ۱۹۹۳).



شکل ۱۱-۲- شکل و خصوصیات یک جت ریزشی مایل (هافمن و بوجی، ۱۹۹۳)

<sup>1</sup> Hoffman and Booji (1993)

با توجه به کثرت روابط موجود برای محاسبه‌ی کمی آبخستگی در این نوع جت‌ها نیاز به استفاده‌ی درست از این روابط در زمان و مکان مناسب آن‌ها احساس می‌شود. در این تحقیق ابتدا توزیع زمانی مناسب را تعریف، سپس به ارائه‌ی روابط خواهیم پرداخت.

## ۲-۴- تغییرات زمانی عمق آبخستگی

کلارک<sup>۱</sup> (۱۹۶۲) مطالعاتی روی جت‌های مستغرق عمودی دایره‌ای انجام داد. ایشان بیان نمود که عمق آبخستگی دینامیکی ( $y_{sd}$ ) از عمق آبخستگی استاتیکی ( $y_{ss}$ ) بزرگ‌تر است. همچنین حدود ۷۰ درصد عمق نهایی حفره‌ی آبخستگی در زمان‌های اولیه تشکیل می‌گردد. کلارک برای تغییرات زمانی آبخستگی ناشی از جت عمودی دایره‌ای شکل و مستغرق روابط زیر را ارائه داد:

$$y_{s,t} = (0.21 \pm 0.003) D_c \quad (۳-۲)$$

$$\frac{D_c}{D} = 5.5 \left( \frac{V}{\sqrt{gD}} \right)^{0.43} \left( \frac{V}{\omega_s} \right)^{0.05} \left( \frac{gt}{\omega_s} \right)^{0.05} \quad (۴-۲)$$

که در این روابط  $y_{s,t}$  عمق حفره‌ی آبخستگی اندازه‌گیری شده از سطح اولیه‌ی بستر در زمان  $t$  (متر)،  $D_c$  فاصله‌ی بین قله‌های ایجاد شده در دو طرف حفره آبخستگی (متر)،  $D$  قطر جت استوانه‌ای (متر)،  $V$  سرعت جت خروجی از روزنه (متر بر ثانیه)،  $g$  شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)،  $\omega_s$  سرعت سقوط ذرات بستر (متر بر ثانیه) و  $t$  زمان (ثانیه) می‌باشد.

هانتر و رویز (۱۹۵۰) نیز مطالعاتی روی جت‌های ریزشی مایل انجام دادند. براساس نظریه‌ی هانتر و رویز، آبخستگی به صورت تابعی از زمان در نظر گرفته می‌شود و هیچ‌گاه به تعادل واقعی نخواهد رسید. ایشان عمق آبخستگی را به‌عنوان تابعی از زمان به صورت زیر ارائه کردند:

<sup>۱</sup> Clarke (1962)

$$y_s = \frac{1.9H^{0.35}q^{0.7}}{g^{0.35}d_{95}^{0.2}} [1 - \exp(0.55t^{0.2})] \quad (5-2)$$

که در این رابطه  $y_s$  حداکثر عمق حفره‌ی آبشستگی از سطح اولیه‌ی بستر (متر)،  $H$  ارتفاع ریزش (متر)،  $q$  دبی در واحد عرض (متر مکعب بر ثانیه بر متر)،  $g$  شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)،  $d_{95}$  قطر مصالح بستر که ۹۵ درصد وزنی ذرات از آن کوچک‌تر هستند (متر) و  $t$  زمان آبشستگی (ثانیه) می‌باشد.

## ۵-۲- روابط تخمین ابعاد حفره آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی

آبشستگی در جت‌های ریزشی در حالت مستغرق و آزاد اندکی متفاوت است؛ زیرا در جت‌های آزاد، سیال مقداری از مسیر را در هوا و مقداری را در آب طی می‌کند تا به سطح بستر برسد. این در حالی است که در جت‌های مستغرق، سیال تمام مسیر را در آب طی می‌کند. این مسأله باعث می‌شود تأثیر برخی از پارامترهای مؤثر بر آبشستگی پایین‌دست جت‌های مستغرق نسبت به جت‌های آزاد متفاوت باشد. از جمله این پارامترها عمق پایاب می‌باشد که در آبشستگی پایین‌دست جت‌های مستغرق اثر کم‌تر ولی در جت‌های آزاد اثر بیش‌تری دارد.

## ۵-۲-۱- روابط آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی عمودی

مطالعات راجاراتنام<sup>۱</sup> (۱۹۸۱) روی جت‌های عمودی مستغرق با بستر ماسه‌ای به قطر متوسط ۱/۲ و ۲/۳۸ میلی‌متر منجر به ارائه‌ی رابطه‌ی زیر برای حداکثر عمق آبشستگی گردید:

<sup>۱</sup> Rajaratnam (1981)

$$\frac{y_s}{B} = 0.23 \left( \frac{V}{\sqrt{(s-1)gd_{50}}} \right) \left( \frac{H}{B} \right)^{0.5} \quad (6-2)$$

که در این رابطه  $y_s$  حداکثر عمق آبشستگی از سطح اولیه‌ی بستر (متر)،  $B$  ضخامت جت (متر)،  $V$  سرعت اولیه‌ی جت در خروجی (متر بر ثانیه)،  $s$  چگالی نسبی ( $s = \rho_s/\rho$ )،  $\rho_s$  چگالی ذرات بستر و  $\rho$  چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب)،  $g$  شتاب جاذبه (متر بر مجذور ثانیه)،  $d_{50}$  قطر متوسط ذرات بستر (متر) و  $H$  ارتفاع ریزش جت (متر) می‌باشد.

راجاراتنام (۱۹۸۱) مطالعات دیگری را با پایاب کم عمق روی جت‌های عمودی آزاد دایره‌ای انجام داد و رابطه‌ی زیر را برای محاسبه‌ی حداکثر عمق آبشستگی ارائه کرد:

$$\frac{y_s}{D} = 0.13 \frac{V'}{\sqrt{(s-1)gd_{50}}} \quad (7-2)$$

$$V' = (V^2 + 2gH)^{0.5} \quad (8-2)$$

که در این روابط  $y_s$  حداکثر عمق آبشستگی از سطح اولیه‌ی مصالح بستر (متر)،  $D$  قطر جت (متر)،  $V'$  سرعت برخورد جت با سطح آب (متر بر ثانیه)،  $V$  سرعت جت در خروجی (متر بر ثانیه)،  $g$  شتاب جاذبه (متر بر مجذور ثانیه)،  $s$  چگالی نسبی ( $s = \rho_s/\rho$ )،  $\rho_s$  چگالی ذرات بستر و  $\rho$  چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب)،  $H$  اختلاف تراز خروجی جت و سطح آب (متر) و  $d_{50}$  قطر متوسط ذرات بستر (متر) می‌باشد.

راجاراتنام<sup>۱</sup> (۱۹۸۲) هم‌چنین آزمایشاتی بر روی جت‌های عمودی آزاد با پایاب کم عمق انجام داد؛ که منجر به ارائه‌ی رابطه‌ی زیر جهت برآورد حداکثر عمق آبشستگی گردید:

<sup>۱</sup> Rajaratnam (1982)

$$\frac{y_s}{B} = 0.182 \frac{V}{\sqrt{(s-1)gd_{50}}} \quad \text{for:} \quad 17 < \frac{V}{\sqrt{(s-1)gd_{50}}} < 26 \quad (9-2)$$

که در این رابطه  $y_s$  حداکثر عمق آبشستگی از سطح اولیه‌ی مصالح بستر (متر)،  $B$  ضخامت جت (متر)،  $V$  سرعت اولیه‌ی جت در خروجی (متر بر ثانیه)،  $s$  چگالی نسبی ( $s = \rho_s/\rho$ )،  $\rho_s$  چگالی ذرات بستر و  $\rho$  چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب)،  $g$  شتاب جاذبه (متر بر مجذور ثانیه) و  $d_{50}$  قطر متوسط ذرات بستر (متر) می‌باشد.

ادریگ و راجاراتنام<sup>۱</sup> (۱۹۹۶) با جمع‌آوری داده‌های مربوط به جت‌های عمودی دایره‌ای مستغرق روابط زیر را به دست آوردند:

$$\frac{y_s}{H} = 0.05(Ec - 0.14)^{0.6} \frac{(s)^{3.1}}{(s-1)^{2.8}} \quad \text{و} \quad Ec = \frac{V(D/H)}{\sqrt{(s-1)gd_{50}}} \quad (10-2)$$

که در این رابطه  $y_s$  حداکثر عمق آبشستگی از سطح اولیه‌ی مصالح بستر (متر)،  $H$  ارتفاع ریزش جت تا بستر (متر)،  $V$  سرعت جت در خروجی (متر بر ثانیه)،  $D$  قطر جت خروجی (متر)،  $s$  چگالی نسبی ( $s = \rho_s/\rho$ )،  $\rho_s$  چگالی ذرات بستر و  $\rho$  چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب)،  $g$  شتاب جاذبه (متر بر مجذور ثانیه) و  $d_{50}$  قطر متوسط ذرات بستر (متر) می‌باشد.

ایشان هم‌چنین حداکثر عرض حفره‌ی آبشستگی ( $W_s$ ) را به شکل زیر تعریف کردند:

$$\frac{W_s}{H} = 11Ec^{0.65} \frac{(s-1)^{6.2}}{(s)^{6.6}} \quad (11-2)$$

پارامترهای این رابطه مشابه روابط پیشین تعریف می‌شوند.

<sup>1</sup> Aderibigbe and Rajaratnam (1996)

مطالعات رادکیوی<sup>۱</sup> (۱۹۹۰) بر روی جت‌های دایره‌ای عمودی مستغرق منجر به ارائه‌ی روابط زیر گردید:

$$\frac{y_s}{D} = 0.075 \left( \frac{V}{u_{*c}} \right)^{1.0} \quad \text{اگر } V/u_{*c} < 100 \quad (۱۲-۲)$$

$$\frac{y_s}{D} = 0.035 \left( \frac{V}{u_{*c}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{اگر } V/u_{*c} > 100 \quad (۱۳-۲)$$

در روابط فوق  $y_s$  حداکثر عمق آبشستگی از سطح اولیه‌ی مصالح بستر (متر)،  $D$  قطر جت خروجی (متر)،  $u_{*c}$  سرعت برشی بحرانی ذرات بستر (سرعت برشی ذرات بستر در آستانه‌ی حرکت) و  $V$  سرعت جت در خروجی (متر بر ثانیه) می‌باشد.

## ۲-۵-۲- تخمین آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی مایل

با توجه به تقسیم‌بندی میسون<sup>۲</sup> (۱۹۹۳) روابط محاسبه‌ی حداکثر عمق آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی مایل در پنج گروه عمده، به‌صورت زیر ارائه می‌گردد:

### ۲-۵-۲-۱- گروه اول

شکل کلی روابط ارائه شده در این گروه به‌صورت زیر است:

$$y_s = \frac{Kq^x H^y}{d^z} \quad (۱۴-۲)$$

که در این رابطه  $y_s$  حداکثر عمق حفره‌ی آبشستگی (متر)،  $q$  دبی در واحد عرض (مترمکعب بر ثانیه بر متر)،  $H$  ارتفاع ریزش جت (متر)،  $d$  اندازه‌ی قطر مشخصه‌ی مصالح بستر (متر) و  $x$ ،  $y$ ،  $z$  و  $k$  ضریب و

<sup>۱</sup> Raudkivi (1990)

<sup>۲</sup> Mason (1993)

توان‌های ثابتی هستند که مقادیر آن‌ها در روابط مختلف این گروه متفاوت بوده و در جدول (۱-۲) ارائه شده است (میسون و آروموگام، ۱۹۸۵).

جدول ۱-۲- مقادیر مختلف ضریب و توان‌های ثابت روابط موجود در گروه اول (میسون و آروموگام، ۱۹۸۵)

d	z	y	x	k	محقق	ردیف
d <sub>50</sub>	۰/۳۲	۰/۲	۰/۵۷	۰/۵۲۱	شوکلیچ <sup>۱</sup>	۱
d <sub>50</sub>	۰/۴۲	۰/۲۲۵	۰/۵۴	۰/۲۰۲	ورونس (A) <sup>۲</sup>	۲
-	۰	۰/۲۲۵	۰/۵۴	۱/۹	ورونس (B) <sup>۳</sup>	۳
d <sub>90</sub>	۰/۴	۰/۵	۰/۶	۱/۴۴	اگنبرگر <sup>۴</sup>	۴
d <sub>85</sub>	۰/۳۲	۰/۳۶	۰/۶۴	۱/۴	هارتونگ <sup>۵</sup>	۵
d <sub>90</sub>	۰/۵	۰/۵	۰/۶۷	۱/۱۳	فرانکی <sup>۶</sup>	۶
-	۰	۰/۵	۰/۵	۰/۶۵۲	دامل (A) <sup>۷</sup>	۷
-	۰	۰/۵	۰/۵	۰/۵۴۳	دامل (B) <sup>۸</sup>	۸
-	۰	۰/۵	۰/۵	۰/۳۶۵	دامل (C) <sup>۹</sup>	۹
d <sub>50</sub>	۰/۰۶۳	۰/۱۱۸	۰/۶۷	۲/۱۲۶	چی و پادیار <sup>۱۰</sup>	۱۰
d <sub>90</sub>	۱	۰/۲۵	۰/۵	۲/۷۶	بی‌ساز و تی‌شاپ <sup>۱۱</sup>	۱۱
d <sub>50</sub>	۰/۱	۰/۲	۰/۶	۱/۶۳۳	چی و کونگ <sup>۱۲</sup>	۱۲
-	۰	۰/۱	۰/۶	۱/۵	مارتینز (B) <sup>۱۳</sup>	۱۳
-	۰	۰/۲۵	۰/۶۷	۰/۶۳۳	تارایموویچ <sup>۱۴</sup>	۱۴
d <sub>90</sub>	۰/۰۶۴۵	۰/۳۴۵	۰/۵	۱/۳۵	ماکادو <sup>۱۵</sup>	۱۵
-	۰	۰/۱	۰/۶	۲/۳	سوفرلک <sup>۱۶</sup>	۱۶
-	۰	۰/۲۳۵	۰/۵۱	۱/۱۸	چیان مین وو <sup>۱۷</sup>	۱۷

- <sup>1</sup> Schoklitsch  
<sup>2</sup> Veronese-A  
<sup>3</sup> Veronese-B  
<sup>4</sup> Eggenburger  
<sup>5</sup> Hartunge  
<sup>6</sup> Franke  
<sup>7</sup> Damle-A  
<sup>8</sup> Damle-B  
<sup>9</sup> Damle-C  
<sup>10</sup> Chee and Padiyar  
<sup>11</sup> Bisaz and Tschopp  
<sup>12</sup> Chee and Kung  
<sup>13</sup> Martins-B  
<sup>14</sup> Taraimovich  
<sup>15</sup> Machado  
<sup>16</sup> Sofrelec  
<sup>17</sup> Chian Min Wu

جدول (۱-۲) نشان می‌دهد که مقدار ضریب  $x$  در این روابط تقریباً حدود  $۰/۶$  است. ضریب  $y$  بین  $۰/۱$  تا  $۰/۵$  و مقدار  $z$  بین صفر تا  $۱$  تغییر می‌کند.

## ۲-۵-۲-۲- گروه دوم

در این گروه از روابط، علاوه بر پارامترهای دبی در واحد عرض ( $q$ )، ارتفاع ریزش ( $H$ ) و قطر مصالح بستر ( $d$ )، از عمق پایاب ( $Y_t$ ) نیز استفاده شده است. اولین رابطه‌ی این گروه مربوط به جایگر<sup>۱</sup> (۱۹۳۹) می‌باشد که وی رابطه‌ی زیر را برای برآورد حداکثر عمق آبستگي ناشی از جت‌های ریزشی ارائه کرد:

$$y_s = 0.6q^{0.5}H^{0.25} \left( \frac{Y_t}{d_{50}} \right)^{0.333} \quad (۱۵-۲)$$

که در این رابطه  $y_s$  حداکثر عمق آبستگي (متر)،  $q$  دبی در واحد عرض (متر مکعب بر ثانیه بر متر)،  $H$  ارتفاع ریزش (متر)،  $Y_t$  عمق پایاب (متر) و  $d_{50}$  قطر متوسط ذرات بستر (متر) می‌باشد.

دومین رابطه از این گروه توسط مارتینز<sup>۲</sup> (۱۹۷۳) به صورت زیر ارائه شده است:

$$y_s = 0.14N - 0.73 \frac{Y_t^2}{N} + 1.7Y_t \quad (۱۶-۲)$$

که در این رابطه:

$$N = 7(Q^3 H^{1.5} d_{50}^{-2})^{0.5} \quad (۱۷-۲)$$

پارامترهای این روابط (۱۶-۲ و ۱۷-۲) مشابه روابط پیشین تعریف می‌شوند.

<sup>۱</sup> Jaeger (1939)

<sup>۲</sup> Martins (1973)



میسون و آروموگام<sup>۱</sup> (۱۹۸۵) با توجه به داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های موجود برای نمونه‌ی اصلی رابطه‌ی (۱۸-۲) را برای تخمین حداکثر عمق آبشستگی ارائه کردند:

$$Y_s = 3.27 \frac{q^{0.6} H^{0.05} Y_t^{0.15}}{g^{0.2} d_{50}^{0.1}} - Y_t \quad (18-2)$$

پارامترهای رابطه‌ی (۱۸-۲) نیز مشابه روابط پیشین تعریف می‌شوند.

قدسیان<sup>۲</sup> (۲۰۰۲) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی دوه‌رینگ و ایت<sup>۳</sup> (۱۹۹۴)، رابطه‌ی زیر را برای پیش‌بینی پارامترهای بی‌بعد حفره‌ی آبشستگی در پایین دست جت‌های ریزشی دایره‌ای ارائه داد:

$$\frac{\phi}{H} = a \left(\frac{H}{D}\right)^b \left(\frac{Q}{A\sqrt{gR}}\right)^c \left(\frac{H}{D}\right)^d \quad (19-2)$$

که در این رابطه  $\phi$  نشانگر پارامتر مربوط به حفره‌ی آبشستگی نظیر عمق، عرض و طول حفره (متر)، H ارتفاع ریزش تا بستر اولیه (متر)، D قطر جت (متر)، Q دبی جت (متر مکعب بر ثانیه)، A سطح مقطع جت (متر مربع)، g شتاب جاذبه (متر بر مجذور ثانیه) و R شعاع هیدرولیکی جت (متر) است. مقادیر a, b, c و d برای هر یک از پارامترهای حفره‌ی آبشستگی در جدول (۲-۲) ارائه شده است.

جدول ۲-۲- مقادیر a, b, c و d در رابطه (۱۹-۲) (قدسیان، ۲۰۰۲)

پارامترهای حفره آبشستگی	a	b	C	d
عمق (m)	۱/۶۲۵	-۱/۰۵	۰/۴۹۷	۰/۲
عرض (m)	۲/۹۷۳	-۰/۶۴۲	۱/۴۲۸	۰/۱۳۷
طول (m)	۵/۳۶۴	-۰/۹۱	-۱/۰۱۷	۰/۰۴۱
حجم حفره	۱۱/۰۱۹	۲/۶۰۷	۲/۵۰۹	-۰/۰۵۸۲

<sup>1</sup> Mason and Arumugam (1985)

<sup>2</sup> Ghodsian (2002)

<sup>3</sup> Doehring and Abt (1994)

نجفی (۱۳۸۱) براساس تحقیق آزمایشگاهی روی جت ریزشی دایره‌ای رابطه‌ی زیر را برای محاسبه‌ی ابعاد حفره‌ی آبشستگی ارائه داد:

$$\frac{\phi}{H_c} = a \left( \frac{Y_t}{D} \right)^b \left( \frac{F_0 D}{\sqrt{(s-1)H_c}} \right)^c \left( \frac{Y_t}{D} \right)^d \quad (20-2)$$

که در این رابطه  $\phi$  پارامتر حفره‌ی آبشستگی نظیر عمق، عرض و طول حفره (متر)،  $H_c$  ارتفاع ریزش از مرکز جت تا کف بستر اولیه (متر)،  $Y_t$  عمق پایاب (متر)،  $D$  قطر جت خروجی (متر)،  $F_0$  عدد فرود ذرات بستر ( $F_0 = V/\sqrt{gd_{50}}$ ،  $V$  سرعت جریان خروجی (متر بر ثانیه)،  $g$  شتاب جاذبه (متر بر مجذور ثانیه)،  $d_{50}$  قطر متوسط ذرات بستر (متر)،  $S$  چگالی نسبی ( $S = \rho_s/\rho$ ،  $\rho_s$  چگالی ذرات بستر و  $\rho$  چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب) می‌باشد.

مقادیر  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  در جدول (۳-۲) ارائه شده است.

جدول ۳-۲- مقادیر  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  در رابطه (۲۰-۲) (نجفی، ۱۳۸۱)

پارامترهای حفره آبشستگی	a	b	C	d
عمق (m)	۰/۲۷۱	-۰/۲۲۶	۰/۶۰۵	-۰/۴۸
عرض (m)	۱/۲۹	-۰/۱۲۵	۰/۹۲۶	-
طول (m)	۱/۹۵	-۰/۰۷۲	۱/۰۸۱	-

قدسیان و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۶) با بررسی داده‌های آزمایشگاهی متعدد، روابط زیر را برای پیش‌بینی ابعاد حفره‌ی آبشستگی پایین‌دست جت‌های ریزشی ارائه دادند:

$$\frac{y_s}{Y_t} = 1.925 \left( \frac{Y_t}{H_c} \right)^{-0.66} \left( Fr_d \frac{R}{H_c} \right)^{0.3} \quad (21-2)$$

<sup>۱</sup> Ghodsian et al. (2006)

$$\frac{L_s}{Y_t} = 8.432 \left(\frac{Y_t}{H_c}\right)^{-0.90} \left(Fr_d \frac{R}{H_c}\right)^{1.0} \quad (22-2)$$

$$\frac{W_s}{Y_t} = 10.126 \left(\frac{Y_t}{H_c}\right)^{-0.02} \left(Fr_d \frac{R}{H_c}\right)^{0.2} \quad (23-2)$$

$$\frac{h_m}{Y_t} = 0.549 \left(\frac{Y_t}{H_c}\right)^{-0.30} \left(Fr_d \frac{R}{H_c}\right)^{0.03} \quad (24-2)$$

که در این روابط  $y_s$  حداکثر عمق حفره‌ی آبشستگی (متر)،  $Y_t$  عمق پایاب (متر)،  $H_c$  ارتفاع ریزش جت از مرکز آن تا بستر اولیه (متر)،  $Fr_d$  عدد فرود ذرات بستر ( $Fr_d = V/\sqrt{g(s-1)d_{50}}$ )،  $V$  سرعت جریان خروجی (متر بر ثانیه)،  $g$  شتاب جاذبه (متر بر مجذور ثانیه)،  $d_{50}$  قطر متوسط ذرات بستر (متر)،  $s$  چگالی نسبی ( $s = \rho_s/\rho$ )،  $\rho_s$  چگالی ذرات بستر و  $\rho$  چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب)،  $R$  شعاع هیدرولیکی جت (متر)،  $L_s$  حداکثر طول حفره‌ی آبشستگی (متر)،  $W_s$  حداکثر عرض حفره‌ی آبشستگی (متر) و  $h_m$  حداکثر ارتفاع برآمدگی رسوبات در انتهای حفره (متر) می‌باشد.

## ۲-۵-۳- گروه سوم

در این گروه رابطه‌ی خاصی وجود ندارد بلکه محققان با پدیده‌ی آبشستگی به صورت کیفی برخورد و توصیه‌هایی در مورد آبشستگی ارائه کرده‌اند. به عنوان مثال کولا<sup>۱</sup> (۱۹۶۵) بیان می‌دارد که حداکثر عمق آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی تقریباً ۴۰ برابر ضخامت جت در محل برخورد با بستر فرسایش پذیر است. هم‌چنین دیویس و سورنسون<sup>۲</sup> (۱۹۶۹) بر این عقیده بودند که مقدار حداکثر عمق آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی حدود ۰/۶۷ ارتفاع ریزش جت است. در این گروه هم‌چنین هارتونگ و هاسلر<sup>۳</sup>

<sup>1</sup> Cola (1965)

<sup>2</sup> Davis and Sorenson (1969)

<sup>3</sup> Hartung and Hausler (1973)

(۱۹۷۳) با توجه به مطالعات انجام شده توسط کولا، عقیده داشتند که حداکثر عمق آبستگي ناشی از جت‌های ریزشی تقریباً ۲۰ برابر قطر جت است.

## ۲-۵-۲-۴- گروه چهارم

این گروه از روابط توسط محققان روسی ارائه شده است. روابط این گروه اگرچه دارای پارامترهای زیادی هستند، اما تعیین برخی از این پارامترها به قضاوت شخصی مربوط می‌شوند و برای آن‌ها تعریف مشخص و دقیقی ارائه نشده است. میسون و آروموگام<sup>۱</sup> (۱۹۸۵) اظهار می‌دارند که از میان این روابط تنها روابط میخالف، رابینستین و معادله‌ی میرتسخالف را با اطمینان بیش‌تر می‌توان به‌کار برد. این روابط به‌ترتیب به‌شرح زیر ارائه گردیده‌اند:

### - رابطه‌ی میخالف

$$y_s = \left( \frac{1.804q \sin \alpha}{1 - 0.21 \cot \alpha} \right) \left( \frac{1}{d_{90}^{0.33} Y_t^{0.5}} - \frac{1.126}{H} \right) \quad (25-2)$$

### - رابطه‌ی رابینستین

$$y_s = Y_t + 0.19 \left( \frac{H + Y_t}{d_{90}} \right)^{0.75} \left( \frac{q^{1.2}}{H^{0.37} Y_t^{0.33}} \right) \quad (26-2)$$

### - رابطه‌ی میرتسخالف

$$y_s = \left( \frac{0.97}{\sqrt{d_{90}}} - \frac{1.35}{\sqrt{H}} \right) \frac{q \sin \alpha}{1 - 0.17 \cot \alpha} + 0.25 Y_t \quad (27-2)$$

<sup>1</sup> Mason and Arumugam (1985)

در روابط فوق،  $y_s$  حداکثر عمق آبشستگی (متر)،  $q$  دبی در واحد عرض (متر مکعب بر ثانیه بر متر)،  $\alpha$  زاویه‌ی برخورد جت با سطح پایاب (درجه)،  $d_{90}$  قطر ذرات بستر که ۹۰ درصد وزنی ذرات از آن کوچک‌تر هستند (متر)،  $Y_t$  عمق پایاب (متر) و  $H$  ارتفاع ریزش (متر) می‌باشد.

## ۲-۵-۲-۵- گروه پنجم

در گروه پنجم، پارامتر زمان نیز به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در آبشستگی در نظر گرفته شده است. از این گروه می‌توان به رابطه‌ی هانتز و رویز (رابطه‌ی ۲-۵) اشاره نمود.

در نهایت توصیه می‌شود عمق آبشستگی از روابط مختلف محاسبه شود و سپس مقدار مناسب با توجه به قضاوت مهندسی و اهمیت پروژه انتخاب گردد.

## ۲-۶- مروری بر تحقیقات پیشین

به‌منظور تعیین عمق قرارگیری پی سدها، اطمینان از پایداری شیب کناره‌ی رودخانه‌ها و سازه‌های قرار گرفته در پایین‌دست سدها، تخمین صحیح ابعاد حفره‌ی آبشستگی الزامی است. عوامل مختلفی بر ابعاد حفره‌ی آبشستگی تأثیر دارند که از جمله این عوامل می‌توان به عمق پایاب، ارتفاع ریزش، سرعت جریان، سطح مقطع و زاویه‌ی برخورد جت، دانه‌بندی، قطر و چگالی مصالح اشاره کرد. موضوع تحقیقات تعداد زیادی از محققان نحوه‌ی تأثیر این متغیرها بر ابعاد حفره‌ی آبشستگی بوده که اکثر این افراد به‌دلیل پیچیدگی‌های خاص مسئله، آن را به‌صورت آزمایشگاهی و تجربی بررسی کرده‌اند که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

یکی از اولین کسانی که در خصوص پیدایش رابطه‌ای برای تخمین عمق آبشستگی پایین‌دست آبشار (شکل ۲-۲-ب) مطالعه کرد، شوکلیچ<sup>۱</sup> (۱۹۳۲) بود که رابطه‌ی زیر را بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی پیشنهاد نمود:

$$d_s = 4.75 \frac{H^{0.2} q^{0.5}}{D_{90}^{0.30}} - d_2 \quad (28-2)$$

که در این رابطه  $d_s$  حداکثر عمق حفره‌ی آبشستگی (متر)،  $H$  فاصله‌ی عمودی بین خط انرژی بالادست و سطح آب پایین‌دست (متر)،  $q$  دبی در واحد عرض (مترمکعب بر ثانیه بر متر) و  $D_{90}$  اندازه‌ی مصالح رسوبی بستر رودخانه که ۹۰ درصد ذرات از آن کوچک‌تر می‌باشد (متر) و  $d_2$  عمق آب پایین‌دست (متر) است. رابطه‌ی (۲۸-۲)، میزان عمق آبشستگی را در رودخانه‌هایی که  $D_{90}$  آن‌ها زیاد است، نسبتاً خوب پیش‌بینی می‌کند.

سیممی<sup>۲</sup> (۱۹۴۷) در آزمایش‌های خود روی مدل یک سرریز به این نتیجه رسید که عمق آبشستگی با کاهش قطر رسوبات یا با کاهش تنش برشی بستر افزایش می‌یابد. هم‌چنین حداکثر عمق آبشستگی متناظر با شرایطی است که در آن قطر رسوبات نزدیک به صفر بوده و تمام انرژی جت مصرف می‌شود. کارستنز<sup>۳</sup> (۱۹۶۶) نیز با معرفی متغیری بی‌بعد به نام "عدد رسوب" که با استفاده از تحلیل ابعادی به‌دست آورد و با به‌کار بردن داده‌های آزمایشگاهی رابطه‌ی زیر را برای تخمین میزان عمق آبشستگی پایین‌دست دریچه‌های کشویی ارائه کرد:

$$\left(\frac{d_s}{b}\right)^6 = 2.85 \times 10^{-3} (N_s^2 - 4)^{\frac{5}{2}} \tan \phi \left(\frac{D_{50}}{b}\right) \left(\frac{Vt}{b}\right) \quad (29-2)$$

<sup>1</sup> Schoklitch (1932)

<sup>2</sup> Scimemi (1947)

<sup>3</sup> Carstens (1966)

که در این رابطه  $d_s$  میزان عمق آبشستگی (متر)،  $b$  ضخامت جت (متر)،  $\phi$  زاویه ایستایی مصالح رسوبی،  $D_{50}$  اندازه‌ی متوسط ذرات رسوبی (متر)،  $V$  سرعت جت آب خروجی از دریچه‌ی کشویی (متر بر ثانیه)،  $t$  زمان (ثانیه) و  $N_s^2$  عدد رسوب می‌باشد که به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$N_s^2 = \frac{V^2}{g(G_s - 1)D_{50}} \quad (30-2)$$

که در این رابطه  $V$  سرعت جت آب خروجی (متر بر ثانیه)،  $g$  شتاب جاذبه (متر بر مجذور ثانیه)،  $G_s$  چگالی نسبی ( $G_s = \rho_s/\rho$ )،  $\rho_s$  چگالی ذرات بستر و  $\rho$  چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب) و  $D_{50}$  اندازه‌ی متوسط ذرات رسوبی بستر (متر) می‌باشد.

والن تاین<sup>۱</sup> (۱۹۶۷) برای آبشستگی پایین دست دریچه‌ی کشویی رابطه‌ی زیر را پیشنهاد کرده است:

$$\log \frac{d_s}{b} = \frac{Fr - 2}{4.7} + 0.55 \log \frac{b}{D_{90}} \quad (31-2)$$

که در آن  $Fr = V/\sqrt{gd}$  می‌باشد. بقیه‌ی پارامترها قبلاً معرفی شده‌اند.

استرلچاک<sup>۲</sup> (۱۹۶۹) با بررسی آبشستگی بستر شنی در پایین دست پرتاب کننده‌ی جامی آزاد نشان داد که ۲ و ۳ برابر کردن دبی جت، به ترتیب موجب افزایش ۵۰ و ۸۰ درصدی عمق حفره می‌گردد.

میسون و آروموگام<sup>۳</sup> (۱۹۸۵) به مطالعاتی در زمینه‌ی آبشستگی حاصل از جت‌های ریزشی پرداختند. براساس مطالعات ایشان روابطی که از شدت جریان، ارتفاع ریزش و اندازه‌ی ذرات در پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی استفاده می‌کنند، به قدر کافی دقت دارند و وارد کردن پارامترهای دیگر، پیش‌بینی‌ها را در حد قابل قبولی بهبود نمی‌بخشد.

<sup>1</sup> Valentine (1967)

<sup>2</sup> Strelchuck (1969)

<sup>3</sup> Mason and Arumugam (1985)

میسون<sup>۱</sup> (۱۹۹۳) با تقسیم‌بندی روابط محاسبه‌ی حداکثر عمق آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی مایل در پنج گروه عمده و جمع‌آوری اطلاعات و نتایج آزمایشات مختلف، به بررسی نتایج حاصل از روابط ارائه شده پرداخت. او بدین منظور ۴۷ سری داده‌ی آزمایشگاهی و ۲۶ سری داده‌ی صحرایی را انتخاب کرد. وی اظهار می‌دارد که بهترین جواب‌ها برای داده‌های مربوط به مدل، روابط مارتینز-B، چی و کانگ و سوفرلک می‌باشد. برای داده‌های مربوط به نمونه‌ی اصلی، روابط دامل بهترین نتیجه را داده است. از روابط گروه دوم، رابطه‌ی مارتینز-A برای محاسبه‌ی حداکثر عمق آبشستگی در مدل از بقیه‌ی روابط گروه اول نیز بهتر جواب می‌دهد. نتایج حاصل از بررسی روابط گروه سوم نشان داد که هیچ‌کدام از این روابط مناسب نمی‌باشد. هم‌چنین نتایج حاصل از گروه چهارم با نتایج واقعی هیچ‌گونه مطابقتی نشان نداد. در گروه پنجم نیز رابطه‌ای که توسط توماس ارائه شده، نتایج نسبتاً ضعیفی ارائه کرده است. ناصحی (۱۳۷۵) پژوهشی را با هدف بررسی پروفیل آبشستگی در پایین‌دست آبشارهای قائم انجام داد. براساس نتایج آزمایشگاهی، عمق آبشستگی با دبی رابطه‌ی مستقیم و با عمق پایاب رابطه‌ی معکوس دارد. هم‌چنین در پایین‌دست حفره‌ی آبشستگی تپه‌هایی تشکیل می‌گردد که ارتفاع و موقعیت آن‌ها تابعی از عمق پایاب و دبی جریان است.

دائمی و همکاران (۱۳۷۶) آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی آزاد را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعات اثرات قطر مصالح ( $d_{50}$ )، ارتفاع ریزش ( $H$ )، دبی در واحد عرض ( $q$ ) و عمق پایاب ( $Y_t$ ) مورد بررسی قرار گرفت. اگرچه این محققین رابطه‌ی ارائه نکرده‌اند، لیکن نتایج خود را با برخی روابط موجود مقایسه نموده‌اند. نتایج نام‌برندگان به شرح زیر است:

- هر رابطه‌ی تجربی، محدود در دامنه‌ی مورد آزمایش است. خارج از دامنه‌ی مورد آزمایش نتایج غیرواقعی را به دست می‌دهد.

---

<sup>1</sup> Mason (1993)



- رابطه‌ی شوکلیچ مقدار آبشستگی را اندکی بیش از مقادیر مشاهده‌ای نشان می‌دهد.
  - رابطه‌ی ورونز-B که توسط USBR توصیه شده است در مصالح ریزدانه عمق آبشستگی را کم‌تر از واقعیت پیش‌بینی می‌کند. این رابطه برای مصالح ریزدانه با قطر متوسط کم‌تر از ۵ میلی‌متر توصیه شده است.
  - رابطه‌ی کوتولاس در کلیه‌ی آزمایش‌ها میزان آبشستگی را بیش از مقدار مشاهده شده نشان می‌دهد و این امر در مصالح ریزدانه بارزتر است.
  - رابطه‌ی میسون عمق آبشستگی را کم‌تر از آنچه هست نشان می‌دهد. هم‌چنین در مصالح درشت دانه جواب‌های بهتری نسبت به مصالح ریزدانه به‌دست می‌دهد.
  - رابطه‌ی امانیان برای جت‌های خروجی از جام پرتابی، روند منطقی و مناسبی برای آبشستگی ارائه می‌دهد.
- آذر فرادنبه (۱۳۷۷) با انجام آزمایش‌هایی بر روی یک سرریز ریزشی آزاد با قطر مصالح ۲/۹ تا ۱۵/۶ میلی‌متر، دبی ۵ تا ۲۰ لیتر بر ثانیه، ارتفاع ریزش ۲۶/۳ تا ۵۰/۶ سانتی‌متر و عمق پایاب ۵ تا ۲۵ سانتی‌متر، نشان داد که افزایش دبی در واحد عرض (q) باعث افزایش ابعاد حفره‌ی آبشستگی می‌شود. هم‌چنین افزایش q اثر قابل توجهی روی ارتفاع تپه‌ی تشکیل شده در پایین‌دست حفره نداشته است.
- انصاری و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۳) در طی مطالعات خود در زمینه‌ی جت قائم دایره‌ای مستغرق، نسبت به معرفی معادله‌ی (۲-۳۲) جهت نمایش تغییرات پارامتر عمق نسبی متعادل شده‌ی حفره‌ی آبشستگی (d<sub>s</sub>/h<sub>j</sub>) در مقابل پارامتر فرسایش اقدام نمودند.

---

<sup>1</sup> Ansari et al. (2003)

$$\frac{d_s}{h_j} = 1.3 Ec^{0.15} - 1 \quad (32-2)$$

Ec پارامتر فرسایش می باشد که به شرح زیر تعریف می شود:

$$Ec = \frac{V_j}{\sqrt{g (G_s - 1) D_{50}}} \times \frac{d_j}{h_j} \quad (33-2)$$

که در این رابطه  $V_j$  سرعت جت (متر بر ثانیه)،  $g$  شتاب جاذبه‌ی زمین (متر بر مجذور ثانیه)،  $D_{50}$  قطر متوسط ذرات بستر (متر)،  $G_s$  چگالی نسبی ( $G_s = \rho_s / \rho$ )،  $\rho_s$  چگالی ذرات بستر و  $\rho$  چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب)،  $d_j$  قطر جت (متر) و  $h_j$  ارتفاع ریزش جت (متر) می باشد.

راجاراتنام و مازورک<sup>۱</sup> (۲۰۰۳) آبخستگی ناشی از جت با ریزش قائم را بر روی مصالح غیرچسبنده با پایاب‌های کوچک بررسی کرده و نتیجه گرفتند که عمق حفره‌ی آبخستگی تابعی از عدد فرود ذره ( $F_g = V / \sqrt{g(G_s - 1) D_{50}}$ ) است.

سعیدی نژاد (۱۳۸۴) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر تغییرات پارامتر سرعت جت بر میزان آبخستگی پایین دست سرریز پرداخت. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده نشان داد که سرعت جت مهم‌ترین عامل در آبخستگی پایین دست سرریز است. به طوری که با افزایش سرعت جت، پتانسیل حمل رسوب افزایش یافته، در نتیجه ابعاد حفره‌ی آبخستگی گسترش پیدا می کند.

اختری و صانعی (۱۳۸۵) به بررسی آزمایشگاهی آبخستگی پایین دست سرریزهای آبخاری پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که افزایش ارتفاع ریزش و دبی در واحد عرض سرریز، باعث افزایش عمق حفره‌ی آبخستگی می گردد. در نهایت این محققان با توجه به داده‌های مشاهداتی، رابطه‌ی

<sup>1</sup> Rajaratnam and Mazurek (2003)

(۳۴-۲) را با ضریب تعیین  $R^2=0/96$  جهت تخمین عمق آبشستگی ارائه دادند. این رابطه می تواند برای طراحی اولیه ی این گونه سرریزها توصیه شود.

$$d_s = 72.229q^{1.123}H^{0.776}T_w^{-0.328} \quad (۳۴-۲)$$

که در این رابطه  $d_s$  عمق حفره ی آبشستگی (متر)،  $q$  دبی در واحد عرض سرریز (متر مکعب بر ثانیه بر متر)،  $H$  ارتفاع ریزش (متر) و  $T_w$  عمق پایاب (متر) می باشد.

موسوی و همکاران (۱۳۸۵) با ساخت مدل آزمایشگاهی، حداکثر عمق آبشستگی پایین دست سرریز پلکانی را در شرایط جریان ریزشی مورد مطالعه قرار دادند. مهم ترین نتایج حاصل از انجام این مطالعه بدین صورت ارائه گردید که با افزایش دبی جریان، فاصله ی محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی از انتهای سرریز بیش تر می گردد. دانه بندی بستر پایین دست و اندازه ی  $D_{50}$  نیز تأثیر زیادی بر میزان عمق آبشستگی دارد؛ به طوری که در شرایط هیدرولیکی مشابه با افزایش  $D_{50}$  میزان آبشستگی کم تر و فاصله ی محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی از انتهای سرریز کاهش می یابد.

صانعی و همکاران (۱۳۸۷) به یک مطالعه ی آزمایشگاهی درباره ی تأثیر شکل روزنه بر ابعاد آبشستگی موضعی پایین دست جت های ریزشی پرداختند. جت آب از روزنه هایی با مقاطع دایره ای، مربعی و لوزی شکل با مساحت های یکسان و دبی های متفاوت در محدوده ی  $2/46$  تا  $4/8$  لیتر بر ثانیه بر روی بستری از جنس شن با  $D_{50}$  برابر ۳ میلی متر ریزش می کرد. لازم به ذکر است که آزمایش ها با ارتفاع ریزش ثابت ۲۹ سانتی متر و عمق های پایاب متفاوت در محدوده ی ۱۰ تا  $24/8$  سانتی متر انجام پذیرفت. نتایج آزمایش ها نشان داد که ابعاد حفره ی آبشستگی با پارامترهای بی بعد  $(T_w + d_s)/\Delta h$  و  $(v_0/\sqrt{g \cdot \Delta h}) \times (T_w/R_H)$  رابطه ی توانی دارند؛ که در آن ها  $T_w$  عمق پایاب (متر)،  $d_s$  حداکثر عمق آبشستگی (متر)،  $\Delta h$  ارتفاع ریزش جت از مرکز روزنه تا سطح پایاب (متر)،  $v_0$  سرعت جریان در مقطع روزنه (متر بر ثانیه)،  $g$  شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه) و  $R_H$  شعاع هیدرولیکی جت (متر) می باشد.

همچنین مشخص شد که ابعاد حفره‌ی آبشستگی ایجاد شده در شرایط یکسان برای روزنه‌ی دایره‌ای شکل بیش‌تر از روزنه‌ی مربع شکل و برای روزنه‌ی مربع شکل بیش‌تر از روزنه‌ی لوزی شکل است.

قدسیان و رنجبر (۱۳۸۷) با در نظر گرفتن عمق پایاب ثابت، دو دبی و دو نوع دانه‌بندی یکنواخت و غیریکنواخت برای مصالح بستر، به بررسی تأثیر ارتفاع ریزش بر حداکثر ابعاد حفره‌ی آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی آزاد در زمان تعادل پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که در محدوده‌ی مورد مطالعه، حداکثر طول و عرض حفره‌ی آبشستگی با ارتفاع ریزش رابطه‌ی معکوس دارند. این در حالیست که حداکثر عمق حفره‌ی آبشستگی و ارتفاع برآمدگی رسوبات پایین‌دست حفره رابطه‌ی مستقیمی با ارتفاع ریزش دارند. نکته‌ی قابل توجه این است که این موضوع برای هر دو نوع مصالح بستر (یکنواخت و غیریکنواخت) صادق بوده هرچند که روند تغییرات آن‌ها با یک‌دیگر متفاوت است.

ترمینی<sup>۱</sup> (۲۰۱۱) آبشستگی بستر پایین‌دست دریچه‌ی کشویی را مورد مطالعه قرار داد. براساس نتایج به‌دست آمده مشخص شد که حفره‌ی آبشستگی در ۳۴ درصد اول طول مخزن رسوبات رخ می‌دهد.

اکبری و همکاران (۱۳۹۰) به مطالعه‌ی آزمایشگاهی تأثیر تغییرات دبی و عمق پایاب بر بیش‌ترین عمق آبشستگی ناشی از جت آب خروجی از پرتاب‌کننده‌ی جامی شکل پرداختند. به‌طور کلی مشاهدات این پژوهش نشان داد که هنگام برخورد جت به پایاب، ضخامت آب موجود انرژی جنبشی جت را مستهلک کرده و آشفتگی آن را می‌گیرد. بنابراین هرچه ضخامت آب بیش‌تر باشد، میزان استهلاک انرژی بیش‌تر شده و در نهایت میزان آبشستگی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دبی، سرعت جت خروجی از پرتاب‌کننده بیش‌تر شده که منجر به افزایش میزان مصالح شسته شده و حداکثر عمق آبشستگی پایین‌دست می‌گردد.

---

<sup>1</sup> Termini (2011)

پیرستانی و همکاران (۱۳۹۰) در یک پژوهش تغییرات بستر پایین دست یک جت را در دو حالت مستغرق و ریزشی، با اعمال تغییرات دبی مورد بررسی قرار دادند. در حالت مستغرق خروجی دقیقاً مماس بر سطح مصالح بستر و در حالت غیرمستغرق ۴۶ سانتی متر از سطح مصالح بستر متحرک فاصله داشت. نتایج حاصله مؤید این واقعیت بود که در دقایق نخست آزمایش، تغییرات ابعاد آبشستگی بسیار شدید است؛ اما با گذشت زمان از شدت آن در هر دو حالت مستغرق و غیرمستغرق کاسته می شود. به طوری که در حالت مستغرق نزدیک به ۸۰ درصد از عمق نهایی حفره در ۵ دقیقه اول رخ می دهد و این میزان در حالت غیرمستغرق حدوداً ۷۰ درصد است.

تونا و امیرآغلو<sup>۱</sup> (۲۰۱۳) پروفیل های آبشستگی در پایاب سرریزهای پلکانی را در شرایط جریان ریزشی بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش عدد فرود جریان باعث افزایش عمق آبشستگی می گردد. همچنین براساس پروفیل های عرضی برداشت شده، الگوی آبشستگی متقارن نبوده و بیشینه عمق آبشستگی در چپ و راست خط طولی مرکزی اتفاق افتاده است.

چاکراواری و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۳) با انجام آزمایش هایی به بررسی آبشستگی استاتیکی و دینامیکی حاصل از جت های قائم دایره ای مستغرق پرداختند. در این تحقیق از نازل با دو قطر مختلف ۸ و ۱۲/۵ میلی متر و ذرات غیرچسبنده با اندازه ی متوسط ۲/۸ میلی متر استفاده شد. ارتفاع نصب جت تا سطح اولیه ی رسوبات در دو سناریو ۱۵ و ۳۰ سانتی متر تدوین گردید. نتایج حاصل نشان داد که تفاضل بین عمق آبشستگی دینامیکی و استاتیکی ( $d_d - d_s$ ) به صورت خطی با پارامتر فرسایش ( $Ec$ ) افزایش می یابد. نتایج کار ایشان با نتایج تحقیق انصاری و همکاران (۲۰۰۳) مطابقت مطلوبی نشان می دهد.

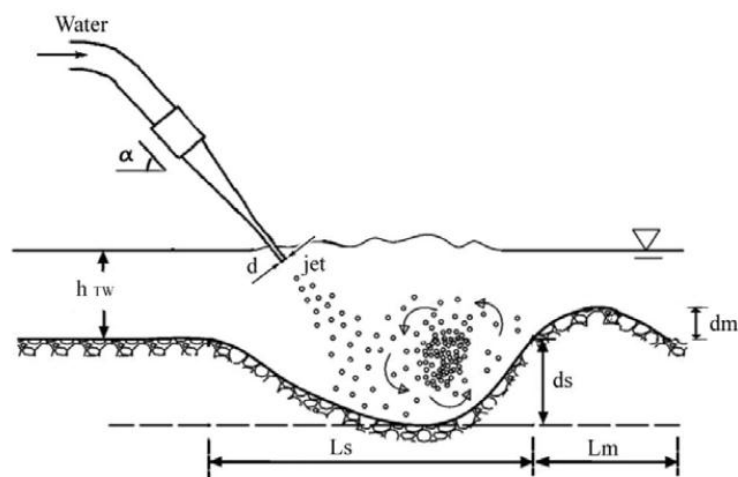
---

<sup>1</sup> Tuna and Emiroghlu (2013)

<sup>2</sup> Chakravarti et al. (2013)

شهرکی و همکاران (۱۳۹۱) تأثیر بازشدگی دریچه و دبی جریان را در آبشستگی ناشی از جت مستغرق عبوری از دریچه‌ی کشویی مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج به دست آمده هرچه بازشدگی دریچه کم‌تر باشد، مقدار آبشستگی بیش‌تر و هرچه دبی جریان کم‌تر باشد، مقدار آبشستگی کم‌تر است.

ارمغانی و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی آزمایشگاهی اثر زاویه‌ی جت ( $\alpha$ ) بر ابعاد حفره‌ی آبشستگی در حوضچه‌ی استغراق پرداختند. در شکل (۲-۱۲) مشخصات هندسی حفره‌ی ایجاد شده پس از حالت تعادل به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۲-۱۲- نمای شماتیک موقعیت جت ریزشی و چگونگی اثر آن بر ابعاد حفره آبشستگی در حوضچه استغراق (ارمغانی و همکاران، ۱۳۹۲)

نتایج نشان داد که با افزایش عمق پایاب ( $h_{tw}$ )، مقدار پارامتر فرسایش ( $EC = V_0/\sqrt{g h_{tw}}$ ) کاهش یافته که این موضوع منجر به کاهش نسبی عمق آبشستگی در کلیه‌ی زوایای مورد بررسی شده است. همچنین با افزایش عمق پایاب، شکل و نحوه‌ی ته‌نشینی رسوبات پایین‌دست حفره‌ی آبشستگی تغییر کرده است. به طوری که با افزایش عمق پایاب،  $EC$  کاهش یافته و این امر منجر به آرام‌تر شدن الگوی آشفستگی در لایه‌های سیال نزدیک بستر شده است. بنابراین ذراتی که از جای خود حرکت کرده‌اند، سریع‌تر انرژی جنبشی خود را از دست داده و در ناحیه‌ی برآمدگی به فرم یک قله ته‌نشین شده‌اند. این

در حالیست که در اعماق پایاب کم، رسوبات تقریباً با ارتفاعی ثابت در انتهای حفره ته‌نشین می‌شوند. هم‌چنین مشخص شد که به‌ازای  $Ec > 2/82$ ، میزان عمق نسبی آبشستگی  $(d_s/h_{tw})$  جت خروجی با زاویه‌ی ۴۵ درجه از ۶۰ درجه بیش‌تر است. روند تغییر در میزان برآمدگی رسوبات در مقابل پارامتر فرسایش نیز مشابه روند تغییرات حفره‌ی آبشستگی است. با این تفاوت که در این حالت حدود آستانه‌ی فرسایش به‌میزان  $1/97$  محدود شده است؛ به‌طوری که به‌ازای  $Ec > 1/97$ ، میزان برآمدگی نسبی رسوبات  $(d_m/h_{tw})$  در جت خروجی با زاویه‌ی ۴۵ درجه از ۶۰ درجه بیش‌تر است. در نهایت این‌که با کاهش زاویه‌ی جت خروجی از نازل، پهنه‌ی تنش برشی مازاد بر تنش بحرانی  $(\tau > \tau_c)$  گسترش یافته که این امر باعث توسعه‌ی دوبعدی در پلان حفره‌ی آبشستگی و برآمدگی رسوبات شده است.

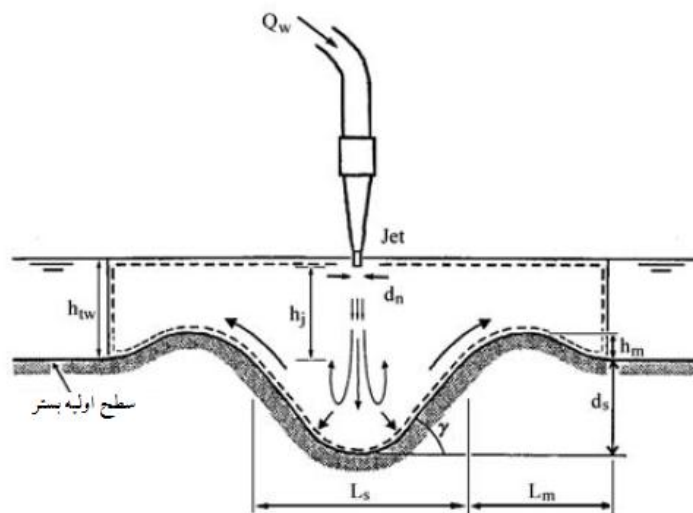
امین‌پور و همکاران (۱۳۹۳) در بررسی پدیده‌ی آبشستگی موضعی در پایین‌دست سرریزهای پلکانی در شرایط جریان ریزشی به این نتیجه رسیدند که ابعاد حفره‌ی آبشستگی با افزایش عدد فرود ذره  $(F_g = \frac{V}{\sqrt{g(G_s - 1) D_{50}}})$  افزایش می‌یابد.

کلانتری و بازرگان (۱۳۹۳) با به‌کارگیری داده‌های میدانی و آزمایشگاهی جمع‌آوری شده، رابطه‌ی بی‌بعد زیر را جهت تخمین میزان آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی آزاد در پایین‌دست سرریز پرتابی ارائه دادند:

$$\frac{d_s}{T_w} = 2.879 \left( \frac{D_{50}}{H} \right)^{-0.009} \left( \frac{q}{\sqrt{T_w^3 * g}} \right)^{0.491} \quad (35-2)$$

که در این رابطه  $d_s$  حداکثر عمق آبشستگی (متر)،  $T_w$  عمق پایاب (متر)،  $D_{50}$  قطر متوسط دانه‌بندی ذرات بستر (متر)،  $H$  اختلاف ارتفاع ریزش آب بالادست و پایین‌دست سد (متر)،  $q$  دبی در واحد عرض (مترمکعب بر ثانیه بر متر) و  $g$  شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه) می‌باشد.

لشکرآرا و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی ابعاد حفره‌ی آبشستگی تحت اثر جت‌های قائم دایره‌ای مستغرق پرداختند. جهت انجام آزمایش‌ها، سناریوهای مختلفی با تغییر در ارتفاع ریزش جت نسبت به بستر اولیه‌ی رسوبات ( $h_j$ ) و همچنین تغییر در سرعت جت خروجی از نازل ( $V_j$ ) تدوین گردید. در شکل (۲-۱۳) موقعیت نازل نسبت به حفره‌ی آبشستگی و همچنین پارامترهای حاکم بر تحقیق نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۳- نمای شماتیک موقعیت نازل و چگونگی تأثیر جت آب خروجی از آن بر ابعاد حفره آبشستگی (لشکرآرا و همکاران، ۱۳۹۴)

نتایج نشان داد که با افزایش عدد فرود جت ( $Fr_j = V_j/\sqrt{gh_j}$ )، میزان عمق و طول نسبی متعادل شده‌ی حفره‌ی آبشستگی افزایش می‌یابد. به طوری که به ازای تغییرات پارامتر عدد فرود جت در محدوده  $4 < Fr_j < 7$  روند تغییرات عمق و طول نسبی متعادل شده‌ی حفره‌ی آبشستگی به ترتیب بین مقادیر  $0.7 < d_s/h_j < 0.5$  و  $0.4 < L_s/h_j < 0.2$  تغییر کرده است. از طرفی افزایش ارتفاع ریزش جت، باعث کاهش تفاوت عمق آبشستگی دینامیکی و استاتیکی ( $d_d - d_s$ ) می‌گردد. به گونه‌ای که با افزایش هر یک درصد عمق نصب جت نسبت به بستر اولیه‌ی رسوبات، ۰/۴۶۵ درصد از عدد فرود جت کاسته شده و به تناسب آن ۰/۳۳ درصد از تفاوت عمق آبشستگی دینامیکی و استاتیکی کسر شده است. ایشان در



طی مطالعات خود نسبت به ارائه‌ی رابطه‌ی (۳۶-۲) با  $R^2=0.9122$  جهت نمایش تغییرات پارامتر نسبی  $(d_s/h_j)$  در مقابل پارامتر فرسایش  $(Ec)$  اقدام نمودند.

$$\frac{d_s}{h_j} = 1.289 Ec^{0.1508} - 1 \quad (36-2)$$

معادله‌ی (۳۶-۲) علاوه بر برخورداری از شکلی ساده، قادر به توصیف شرایط آستانه‌ی حدی فرسایش می‌باشد. ذکر این نکته ضروری است که تشابه زیادی در ضرایب معادلات (۳۲-۲) و (۳۶-۲) وجود دارد. لذا در ظاهر اختلاف معنی‌داری بین نتایج معادلات مذکور دیده نمی‌شود و تنها مزیت معادله‌ی (۳۶-۲) را می‌توان افزایش دامنه‌ی به‌کارگیری قطر مصالح رسوبات غیرچسبنده دانست. به‌طوری که قطر مصالح به‌کار رفته در تحقیقات پیشین در محدوده‌ی ماسه‌ی ریز بوده و این در حالیست که در تحقیق حاضر از شن ریز یکنواخت با قطر متوسط ۱۱/۱ میلی‌متر استفاده شده است.

## ۲-۷- جمع‌بندی

در مجموع بررسی منابع موجود نشان داد، هنوز به‌طور خاص تحقیقی در ارتباط با جت‌های ریزشی افقی در پایین‌دست سدهای مخزنی انجام نشده است. بنابراین در تحقیق حاضر با استفاده از ساخت مدل فیزیکی به بررسی این پدیده پرداخته شد. بدین منظور با ثابت نگه داشتن پارامتر ارتفاع ریزش جت  $(h_j)$ ، تأثیر تغییرات پارامترهای دبی جت  $(Q_j)$ ، قطر متوسط رسوبات بستر  $(D_{50})$  و زاویه‌ی برخورد جت‌های ریزشی آزاد نسبت به صفحه‌ی افق  $(\theta)$ ، در ایجاد حفره‌ی آبشستگی مورد بررسی قرار گرفت. تفاوت عمده‌ی مشخصات این تحقیق را با تحقیقات پیشین، می‌توان در تعداد جت‌های خروجی و زاویه‌ی مورد استفاده در استقرار دریچه‌ها جستجو کرد.



فصل سوم

مواد و روش ها

در طراحی سازه‌های هیدرولیکی مسائلی مطرح است که حل آن‌ها صرفاً به کمک تئوری و روابط تحلیلی امکان‌پذیر نبوده و ناگزیر باید از راه‌های عملی و آزمایشگاهی استفاده کنیم. به‌طور کلی راه‌حل‌های تحلیلی فقط برای حل تعداد محدودی از مسائل جریان وجود دارد و در بسیاری از موارد به‌علت پیچیدگی مسئله، حل معادلات جریان فوق‌العاده مشکل بوده و با استفاده از تئوری و روابط ریاضی نمی‌توان رفتار نمونه‌ی اصلی را پیش‌بینی کرد.

علی‌رغم رشد چشم‌گیر علم مهندسی در قرن اخیر و از آن جمله استفاده از مدل‌های محاسباتی و رایانه‌ای جهت حل روابط پیچیده‌ی تئوری، هنوز بدون استفاده از مدل‌های فیزیکی نمی‌توان به‌طور کامل پیش‌بینی لازم را در جهت بهینه‌سازی طرح‌های آبی انجام داد.

در پایان‌نامه‌ی حاضر به‌منظور بررسی آبشستگی حاصل از جت‌های ریزشی آزاد در پایین‌دست سدهای مخزنی، آزمایش‌هایی بر روی یک مدل فیزیکی انجام گرفت. در این فصل ابتدا مشخصات فلوم مورد آزمایش، روش اندازه‌گیری پارامترهای هندسی و هیدرولیکی (شامل قطر متوسط رسوبات، دبی جت، عمق پایاب، عمق آبشستگی و ارتفاع برآمدگی رسوبات در پایین‌دست حفره)، آنالیز ابعادی پارامترهای مؤثر و به‌دست آوردن پارامترهای بی‌بعد تشریح شده است. در ادامه به نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها و زمان انجام هر آزمایش پرداخته شده و در نهایت با معرفی آزمایش‌های انجام شده و تعیین تعداد آزمایش‌ها به اتمام رسیده است.

## ۳-۲- مدل آزمایشگاهی

در هیدرولیک پدیده‌های متعددی وجود دارد که لازم است عملکرد آن‌ها در مقابل متغیرهای مختلف پیش‌بینی گردد. از این‌رو، ابزار "مدل" کاربرد فراوانی در علم هیدرولیک دارد. بعضی از پدیده‌ها وجود دارند که یا معادلات بین علت و معلول هنوز به‌وجود نیامده‌اند و یا این معادلات وجود دارند ولی حل کامل آن‌ها فعلاً غیرممکن است. برای پیش‌بینی فرآیند این پدیده‌ها از مدل‌های فیزیکی-هیدرولیکی استفاده می‌شود. منظور از مدل فیزیکی و هیدرولیکی، ساخت نمونه‌ای از طرح واقعی ولی با ابعاد کوچک‌تر است؛ به طوری که رفتارهای هیدرولیکی و دینامیکی در نمونه‌ی کوچک شده منطبق با نمونه‌ی واقعی باشد. در این نوع مدل رفتار هیدرولیکی در نمونه شباهت زیادی به اصل داشته و جریان‌های سه‌بعدی را می‌توان به راحتی شبیه‌سازی کرد. در مدل‌های فیزیکی-هیدرولیکی آن‌چه اهمیت زیادی دارد، اندازه‌گیری دقیق متغیرهای لازم است که دقت اندازه‌گیری بستگی به اهمیت مسأله دارد.

مطالعه بر روی یک پدیده‌ی هیدرولیکی با استفاده از مدل فیزیکی در آزمایشگاه، طی چهار مرحله صورت می‌گیرد که به شرح زیر است:

مرحله‌ی ۱) محاسبات تئوری

مرحله‌ی ۲) ساخت مدل

مرحله‌ی ۳) اجرای مدل و اندازه‌گیری متغیرها

مرحله‌ی ۴) تجزیه و تحلیل نتایج

در مرحله‌ی اول، معمولاً در خصوص نوع مدل، مقیاس مدل و محدوده‌ی متغیرهایی که در آزمایشگاه باید رعایت و یا اندازه‌گیری شوند، تصمیم‌گیری می‌گردد. در مرحله‌ی بعد با توجه به فضای مورد نیاز و دسترسی به امکانات خاص در خصوص انتخاب مصالح مورد نیاز و محل ساخت مدل در آزمایشگاه

تصمیم‌گیری و مدل احداث می‌گردد. بدیهی است در این مرحله قبل از شروع به ساخت لازم است تا در خصوص نیاز به نیروی انسانی، مصالح مورد نیاز، فضای آزمایشگاه، حداکثر دبی مورد نیاز، وسایل و تجهیزات برداشت داده‌ها اطلاعات کافی داشته باشیم. در صورتی که قرار است نتایج مدل در طراحی سازه‌ی هیدرولیکی و یا اصلاح سازه‌ی طراحی شده مورد استفاده قرار گیرد، باید زمان ساخت مدل و انجام آزمایش‌ها قبل از طرح نهایی انجام شده باشد.

مرحله‌ی سوم، اجرای مدل و اندازه‌گیری متغیرها می‌باشد که ممکن است این مرحله چندین ماه به طول انجامد. در طی این مرحله با توجه به جمع‌بندی نتایج به دست آمده ممکن است تغییراتی در مدل داده شود و آزمایش‌ها چندین بار تکرار گردند. بهتر است بخشی از مرحله‌ی نهایی که معمولاً تجزیه و تحلیل داده‌ها می‌باشد، هم‌زمان با مرحله‌ی سوم انجام گردد. بدین ترتیب که نتایج آزمایش‌ها مرتب مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گیرد. این تجزیه و تحلیل می‌تواند کمک شایانی به مهندس طراح نماید تا طرح بهینه‌ی خود را ارائه دهد. به هیچ وجه توصیه نمی‌شود که مرحله‌ی چهارم پس از انجام کامل مرحله‌ی سوم صورت گیرد. زیرا معمولاً در صورت تعطیلی آزمایش‌های مدل برای چندین ماه و با گذشت زمان مشکلاتی به وجود می‌آید که برگشت مجدد پرهزینه و وقت‌گیر است و در بعضی موارد باید بخش‌هایی از مدل مجدداً ساخته شود. در مرحله‌ی انجام آزمایش‌ها ضرورت دارد تا از کلیه‌ی مراحل ساخت و آزمایش‌ها عکس و فیلم تهیه گردد. در نهایت باید گزارش نهایی از انجام مدل فیزیکی شامل شرح کامل مراحل چهارگانه تهیه شود. در این گزارش کلیه داده‌های اندازه‌گیری شده باید منعکس گردند. تجزیه و تحلیل داده‌ها با رسم نمودارهای مختلف ارائه شود و نتایج نهایی نیز عرضه گردد. همچنین لازم است پیشنهاداتی برای بهبود طرح ارائه گردد.

در پایان‌نامه‌ی حاضر مدل آزمایشگاهی دریچه برای بررسی آبستگي موضعی در پایین دست سدهای مخزنی طراحی شده است. آزمایش‌های مربوط به این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی شاهرود، در یک فلوم مستطیلی شکل با عرض ۱ متر، طول ۲/۴۳ متر و ارتفاع (فاصله‌ی کف حوضچه‌ی

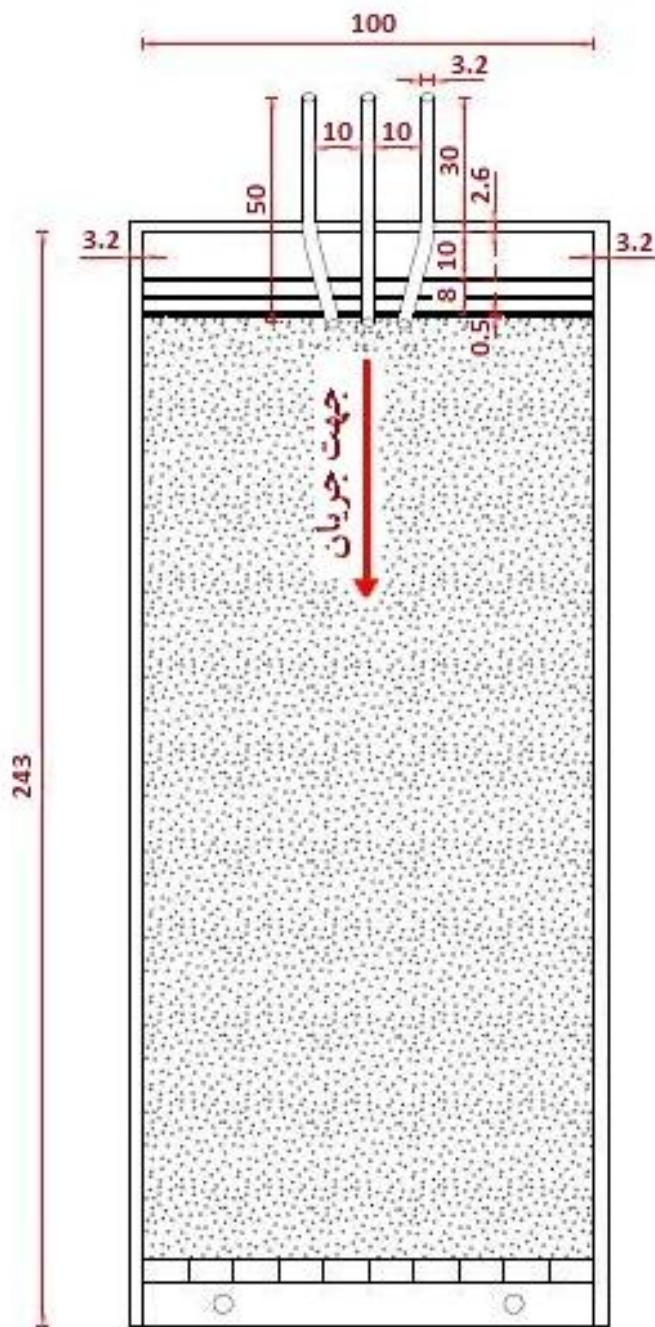
رسوب تا سطح زمین) ۱/۱۱ متر انجام شد؛ به طوری که آبشستگی درون آن تحت تأثیر دیواره‌های کناری قرار نمی‌گرفت. دیواره‌های فلوم از جنس پلاکسی‌گلاس شفاف بوده که امکان مشاهده‌ی تغییرات آبشستگی را فراهم می‌ساخت و کف آن از فلز (ورق گالوانیزه) با شیب صفر ساخته شده بود.

برای ساخت مدل از سه لوله با مقاطع دایره‌ای به قطر ۱/۲۵ اینچ از جنس نیوپایپ به‌عنوان دریچه‌های سد استفاده شد. به‌منظور بررسی تأثیر زاویه‌ی اسقرار دریچه‌ها بر میزان آبشستگی، لوله‌ها در سه حالت با سه زاویه‌ی ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه (نسبت به صفحه‌ی افق) به فاصله‌ی ۱۰ سانتی‌متر از هم در ابتدای فلوم نصب گردید. در شکل (۱-۳) نمایی از لوله‌ها قبل از نصب نشان داده شده است.



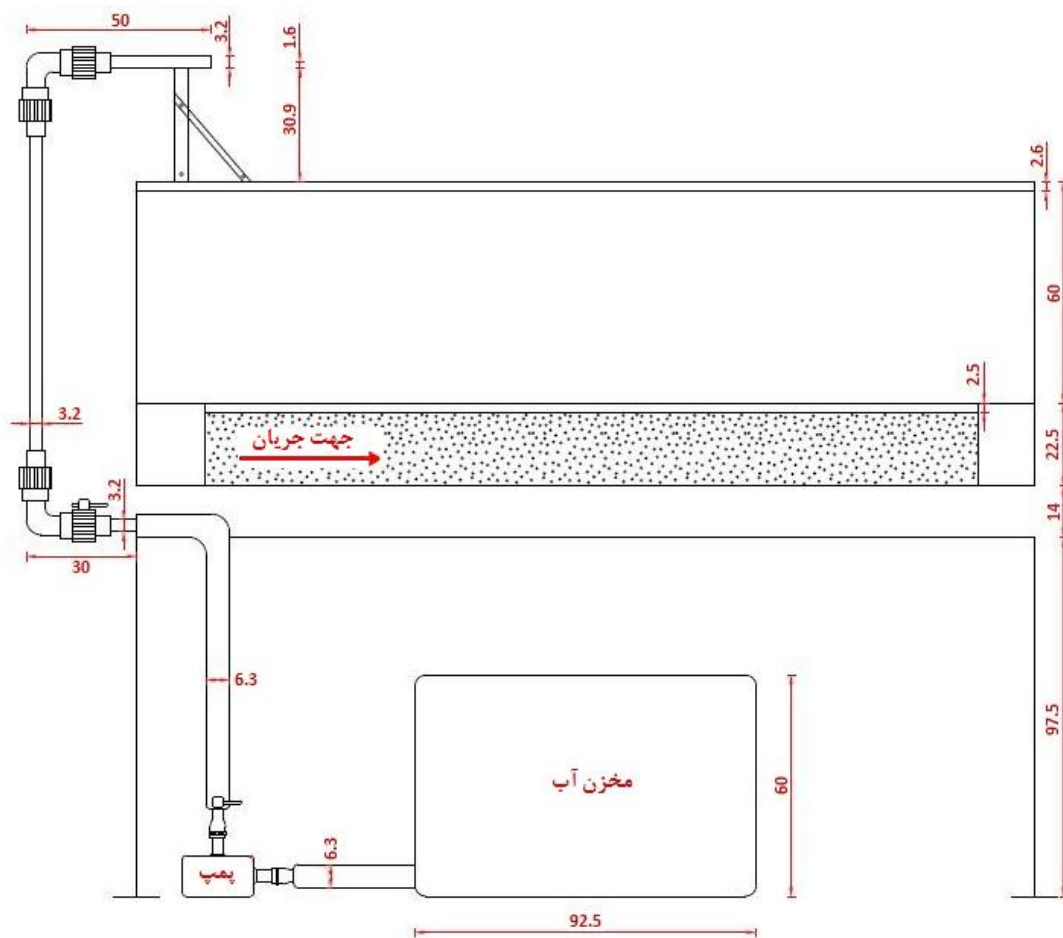
شکل ۱-۳- نمایی از مدل دریچه‌ها قبل از نصب

انتقال آب از مخزنی مکعبی به ابعاد  $۶۰ \times ۷۴/۵ \times ۹۲/۵$  سانتی‌متر (طول  $\times$  عرض  $\times$  ارتفاع) توسط دو دستگاه پمپ انجام می‌گرفت. به طوری که ابتدا آب به کمک پمپی واقع در سطح زمین، به داخل حوضچه‌ی رسوب تغذیه و مجدداً توسط پمپ کف‌کش به مخزن هدایت می‌شد. شیرهای نصب شده در طول مسیر، وظیفه‌ی کنترل آب عبوری از لوله‌ها را برعهده داشتند. شکل (۲-۳) و (۳-۳) به ترتیب پلان و نمای جانبی مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد که جهت جریان بر روی آن‌ها مشخص شده است.



شکل ۳-۲- پلان فلوم آزمایشگاهی (مشخصات آن بر حسب سانتی متر)





شکل ۳-۳- نمای جانبی از فلوم آزمایشگاهی (مشخصات آن بر حسب سانتی متر)

### ۳-۳- پارامترهای اندازه گیری شده در آزمایشگاه

از مهم ترین اهداف انجام هر کار آزمایشگاهی جمع آوری اطلاعات لازم به منظور بررسی عملکرد سازه در اصل، مقایسه ی گزینه های مختلف طراحی و یا قانونمند کردن پدیده ی هیدرولیکی می باشد که بتواند در موارد مشابه کاربرد داشته باشد. این اطلاعات ممکن است شامل یک سری داده اندازه گیری شده مربوط به متغیرهای مختلف در مدل باشد و یا ممکن است مشاهدات آن پدیده باشد. مشاهده ی خطوط جریان، حرکت رسوب، گرداب های ایجاد شده در محل های خاص و یا جداسدگی خطوط جریان از مرزها گاهی آن قدر مهم هستند که ممکن است نادیده گرفتن آن ها و یا عدم مطالعه ی دقیق آن ها منجر به

درک صحیحی از پدیده‌ی هیدرولیکی نگردد. بنابراین در مدل‌سازی، همه‌ی اتفاقات هیدرولیکی باید به‌دقت برداشت گردند.

از آن‌جایی که پارامترهای مؤثر بر آبشستگی براساس قوانین آنالیز ابعادی بی‌بعد شده‌اند، بنابراین در تعیین و انتخاب محدوده‌ی آزمایش‌ها تنها عامل محدودکننده، امکانات موجود می‌باشد. انجام آزمایش‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که دامنه‌ی تغییرات پارامترها وسیع باشد. در این تحقیق انتخاب پارامترها به‌شکلی صورت گرفته که حداکثر آبشستگی به کف نرسد و هم‌چنین پدیده‌ی آبشستگی حتماً اتفاق افتد. جهت تجزیه و تحلیل ابعاد آبشستگی پارامترهای مختلفی از جمله قطر متوسط رسوبات بستر ( $D_{50}$ )، دبی جت آب خروجی از دریچه‌ها ( $Q_j$ )، عمق پایاب ( $h_{tw}$ )، عمق آبشستگی ( $d_s$ ) و ارتفاع برآمدگی رسوبات در پایین‌دست حفره ( $d_m$ ) اندازه‌گیری شد.

### ۳-۳-۱- اندازه‌گیری قطر متوسط رسوبات

قطر متوسط ذرات رسوب ( $D_{50}$ ) از طریق منحنی دانه‌بندی به‌دست آمده است. دانه‌بندی مصالح رسوبی با روش‌های مختلف امکان‌پذیر می‌باشد که در این تحقیق از روش الک استفاده شده است. در شکل‌های (۳-۴) و (۳-۵) به‌ترتیب نمایی از رسوبات مورد استفاده در آزمایش‌ها و منحنی دانه‌بندی مربوط به هر یک ارائه شده است.

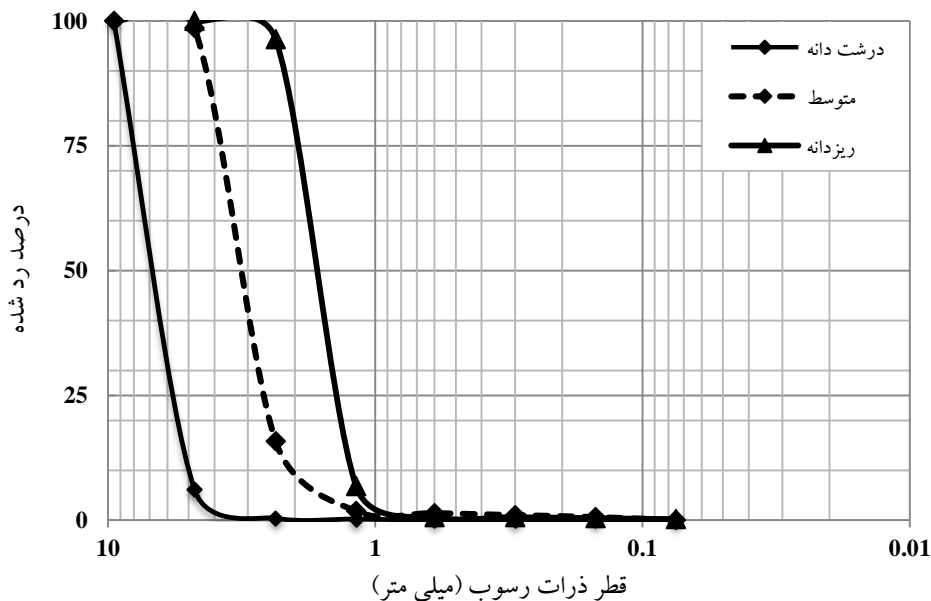
الف- ریزدانه ( $1/7 \text{ mm}$ )

ب- متوسط ( $3/2 \text{ mm}$ )

ج- درشت دانه ( $6/75 \text{ mm}$ )



شکل ۳-۴- نمایی از ذرات رسوب با دانه‌بندی الف- ریزدانه، ب- متوسط، ج- درشت دانه



شکل ۳-۵- منحنی دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده در آزمایش‌ها

از منحنی دانه‌بندی می‌توان خصوصیتی از قبیل یکنواخت بودن یا غیریکنواخت بودن مصالح، اندازه‌ی متوسط ذرات ( $D_{50}$ )، انحراف معیار هندسی ذرات ( $\sigma_g = \sqrt{D_{84}/D_{16}}$ ) و ... را به‌دست آورد. در صورتی- که  $\sigma_g < 1/3$  باشد، مصالح بستر یکنواخت و برای  $\sigma_g \geq 1/5$  رسوبات غیریکنواخت می‌باشد. منظور از رسوب غیریکنواخت رسوبی است که از مخلوط ذرات با اندازه‌های متفاوت تشکیل شده باشد. همان‌طوری که از شکل (۳-۵) مشهود است رسوبات مورد استفاده در آزمایش‌های مربوط به این تحقیق دارای  $D_{50}$  معادل با  $1/7$ ،  $3/2$  و  $6/75$  میلی‌متر و به‌ترتیب  $\sigma_g$  برابر با  $1/29$ ،  $1/3$  و  $1/28$  بوده و یکنواخت می‌باشند.

### ۳-۳-۲- اندازه‌گیری دبی جت آب خروجی از دریچه‌ها

دبی جریان از مهم‌ترین پارامترهایی است که در تمام کارهای آزمایشگاهی و مدل‌سازی باید با دقت اندازه‌گیری شود. در تحقیق حاضر اندازه‌گیری دبی به روش حجمی انجام پذیرفت. بدین صورت که جت

آب خروجی از دریچه‌ها، وارد ظرفی با حجم مشخص شده و با ثبت مدت زمانی که ظرف پر می‌شود، مقدار دبی از حجم ظرف (لیتر) به زمان (ثانیه) محاسبه می‌گردد.

### ۳-۳-۳- اندازه‌گیری عمق پایاب

در آزمایش‌های مربوط به این تحقیق برای اندازه‌گیری عمق پایاب ( $h_{TW}$ )، از یک شاخص مدرج مجهز به ورنیه با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد. این شاخص به سمت پایین حرکت داده می‌شد تا لبه‌ی آن با سطح آب تماس بگیرد. بدین ترتیب فاصله‌ی عمودی محل قرارگیری شاخص تا سطح آب مشخص می‌گردید. با داشتن فاصله‌ی محل قرارگیری شاخص تا سطح بستر، عمق پایاب به دست می‌آمد.

### ۳-۳-۴- اندازه‌گیری عمق آبستگی و ارتفاع برآمدگی رسوبات در پایین دست حفره

پس از اتمام هر آزمایش، اقدام به اندازه‌گیری عمق آبستگی ( $d_s$ ) و ارتفاع رسوب‌گذاری ناشی از رسوب‌های شسته شده در پایین دست ( $d_m$ ) گردید. این کار توسط یک عمق‌سنج نقطه‌ای<sup>۱</sup> با دقت ۰/۱ میلی‌متر که صفر آن با سطح رویی بستر رسوبات مطابقت داده می‌شد، صورت گرفت. این دستگاه یک شاخص مدرج است که به‌طور دستی در راستای محور طولی و عرضی بستر حرکت کرده و امکان خواندن هر سه مختصات نقطه‌ی مورد نظر را فراهم می‌ساخت. در شکل (۳-۶) نمایی از عمق‌سنج مورد استفاده در آزمایش‌ها نشان داده شده است.

---

<sup>1</sup> Point Gage



شکل ۳-۶- عمق سنج نقطه‌ای مورد استفاده برای برداشت پروفیل و حداکثر عمق آبشستگی

### ۴-۳- آنالیز ابعادی

پدیده‌ها اغلب به متغیرهای زیادی وابسته‌اند که بررسی تأثیر هر یک از متغیرها بر روی نمونه‌ی اصلی، کاری پرهزینه و وقت‌گیر است. این مشکل با استفاده از آنالیز ابعادی حل شده است؛ بدین ترتیب که به‌جای بررسی تأثیر تک تک متغیرها، پارامترهای بدون بعدی را به‌دست 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 به‌صورت پارامترهای بی‌بعد است. با استفاده از آنالیز 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 رابطه‌ی به‌دست آمده معمولاً ساده‌تر و منطبق با شرایط فیزیکی می‌باشد.

نکته‌ی مهم در مورد رابطه‌ی مورد نظر این است که رابطه‌ی مذکور باید معنی‌دار، دارای کاربرد ساده و قابل استفاده در هر سیستم آحاد باشد. تحلیل ابعادی بر این اصل استوار است که در یک رابطه‌ی صحیح فیزیکی، هرگاه کمیت‌های مختلفی که در طرفین رابطه وجود دارند برحسب پارامترهای اصلی دستگاه یک‌گانه‌ی آحادی نوشته شوند، در هر دو طرف تجانس و تشابه کامل برقرار باشد. پارامترهای اصلی دستگاه‌های مختلف شامل طول، جرم و زمان می‌باشد و بدین ترتیب در طرفین یک رابطه‌ی 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 به‌صورت تابعی با جملات بی‌بعد بیان می‌کند.
- تجزیه و تحلیل ابعادی مسئله را چنان طرح می‌کند که می‌توان برنامه‌ی آزمایش‌ها را به‌صورت 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 باکینگهام (قضیه  $\pi$ )، روش ریلی و روش ماتریسی (حاصل ضرب‌های بی‌بعد) اشاره کرد. در بین روش‌های فوق، روش باکینگهام به‌طور گسترده جهت تعیین نسبت‌های بدون بعد مؤثر در پدیده‌های مختلف فیزیکی استفاده می‌شود. در این پایان‌نامه تجزیه و تحلیل ابعادی به روش باکینگهام صورت گرفته است. بدین منظور عوامل مؤثر بر آبشستگی تحت اثر جت آب خروجی از دریچه‌ها به‌شرح زیر دسته‌بندی شده است:

عوامل مربوط به سیال و رسوب: لزجت دینامیکی ( $\mu$ )، جرم مخصوص آب ( $\rho_w$ )، جرم مخصوص مستغرق

ذرات رسوب ( $\rho_s - \rho_w$ )، شتاب ثقل ( $g$ ) و قطر متوسط رسوبات بستر ( $D_{50}$ ).

عوامل هیدرولیکی: دبی جت آب خروجی از دریچه‌ها ( $Q_j$ ) و عمق پایاب ( $h_{tw}$ ).

عوامل هندسی: عرض حوضچه‌ی رسوب ( $B$ )، ارتفاع ریزش جت ( $h_j$ ) و زاویه‌ی برخورد جت‌های ریزشی

آزاد نسبت به صفحه‌ی افق ( $\theta$ ).

پارامتر عمق حفره‌ی آبستگي ( $d_s$ ) نیز در محاسبات آنالیز ابعادی مؤثر است. این عوامل به‌همراه ابعاد

آن‌ها در جدول (۱-۳) نشان داده شده است.

جدول ۱-۳- پارامترهای مؤثر در آنالیز ابعادی

ردیف	علامت اختصاری پارامتر	بعد
۱	$\mu$	$ML^{-1}T^{-1}$
۲	$\rho_w^*$	$ML^{-3}$
۳	$\rho_s - \rho_w$	$ML^{-3}$
۴	$g$	$LT^{-2}$
۵	$D_{50}$	$L$
۶	$Q_j^*$	$L^3T^{-1}$
۷	$h_{tw}$	$L$
۸	$B$	$L$
۹	$h_j^*$	$L$
۱۰	$\theta$	-
۱۱	$d_s$	$L$

متغیرهای \* دار در جدول (۱-۳) به عنوان پارامترهای تکراری انتخاب شده‌اند. با توجه به متغیرهای ذکر شده، پارامترهای مؤثر بر عمق آبستگي را می‌توان به صورت تابع (۱-۳) نمایش داد:

$$f(Q_j, B, h_{tw}, h_j, D_{50}, g, \mu, \rho_w, \rho_s - \rho_w, \theta, d_s) = 0 \quad (1-3)$$

با انجام آنالیز ابعادی و انتخاب سه متغیر  $\rho_w$ ،  $Q_j$  و  $h_j$  به عنوان متغیرهای تکراری و ترکیب معادلات به دست آمده، رابطه‌ی (۲-۳) حاصل می‌شود:

$$f\left(\frac{V_j D_j^2}{h_j^2 \sqrt{g h_j}}, \frac{1}{\sqrt{G_s - 1}}, \frac{h_j}{\sqrt{D_{50}}}, \theta, \frac{\rho V D_j}{\mu}, \frac{B}{h_j}, \frac{h_j}{h_{tw}}, \frac{d_s}{h_j}\right) = 0 \quad (2-3)$$

در شرایط انجام این تحقیق، تعدادی از پارامترهای رابطه‌ی فوق ثابت بوده و از رابطه حذف می‌شوند. با توجه به این که تمام آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی و با ارتفاع ریزش ثابت انجام گرفته است، پارامترهای عرض حوضچه‌ی رسوب ( $B$ ) و ارتفاع ریزش جت ( $h_j$ ) از رابطه‌ی (۲-۳) حذف می‌شوند. از طرفی طبق محاسبات انجام شده در معادلات (۳-۳) و (۴-۳) مقدار عدد رینولدز ( $Re$ ) بسیار بالا بوده و جریان متلاطم<sup>۱</sup> در فلوم برقرار است؛ پس می‌توان از اثر لزجت<sup>۲</sup> و یا پارامتر بی‌بعد  $\rho V D / \mu$  صرف نظر کرد. محاسبات مربوطه به صورت زیر انجام شده است:

$$V_j = \frac{Q_j}{A_j} = \frac{Q_j}{\frac{\pi}{4} D_j^2} \quad (3-3)$$

که در این رابطه  $D_j = 0.032$  (m) و  $u = 10^{-6}$  (m<sup>2</sup>/s) می‌باشد. بنابراین معادله (۳-۳) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

<sup>1</sup> Turbulent flow

<sup>2</sup> Viscosity



$$\rightarrow V_j = \frac{0.00132}{\frac{3.14}{4} \times 0.032^2} = 1.64 \text{ (m/s)}$$

$$\text{Re} = \frac{V_j D_j}{\nu} \quad (4-3)$$

$$\rightarrow \text{Re} = \frac{1.64 \times 0.032}{10^{-6}} = 52480$$

همچنین تعدادی از پارامترهای بی بعد رابطه‌ی (۲-۳) را می‌توان به صورت زیر باهم ترکیب کرد:

$$\frac{V_j D_j^2}{h_j^2 \sqrt{gh_j}} \times \frac{1}{\sqrt{G_s - 1}} \times \frac{h_j}{\sqrt{D_{50}}} = \frac{V_j D_j^2}{h_j \sqrt{gh_j} (G_s - 1) D_{50}}$$

همان طور که گفته شد پارامترهای قطر جت ( $D_j$ ) و ارتفاع ریزش جت ( $h_j$ ) ثابت بوده و از رابطه‌ی فوق حذف می‌شود.

$$\rightarrow \frac{V_j}{\sqrt{g(G_s - 1)D_{50}}} = F_g \quad (5-3)$$

$$\frac{h_j}{h_{tw}} \times \frac{d_s}{h_j} = \frac{d_s}{h_{tw}} \quad (6-3)$$

با ترکیب پارامترها نهایتاً رابطه‌ی (۷-۳) به دست می‌آید:

$$\frac{d_s}{h_{tw}} = f(F_g, \theta) \quad (7-3)$$

رابطه‌ی (۷-۳) بیانگر این مطلب است که عمق نسبی آبشستگی ( $d_s/h_{tw}$ ) تابعی از عدد فرود ذره ( $F_g$ ) و زاویه‌ی برخورد جت‌های ریزشی آزاد نسبت به صفحه‌ی افق ( $\theta$ ) می‌باشد. لازم به توضیح است که از حاصل ضرب پارامترهای  $F_g$  و  $d_j/h_j$ ، پارامتر جدیدی حاصل می‌شود که در تحقیقات ادربیگ و راجاراتنام<sup>۱</sup> (۱۹۹۶) از آن تحت عنوان پارامتر فرسایش<sup>۲</sup> یاد شده و با نماد  $Ec$  نمایش داده شده است.

<sup>۱</sup> Aderibigbe and Rajaratnam (1996)

<sup>۲</sup> Erosion Coefficient

بنابراین می‌توان گفت عمق نسبی آبستگي تابعی از پارامتر فرسایش و زاویه‌ی برخورد جت‌های ریزشی آزاد نسبت به صفحه‌ی افق است.

### ۳-۵- روش انجام آزمایش‌ها

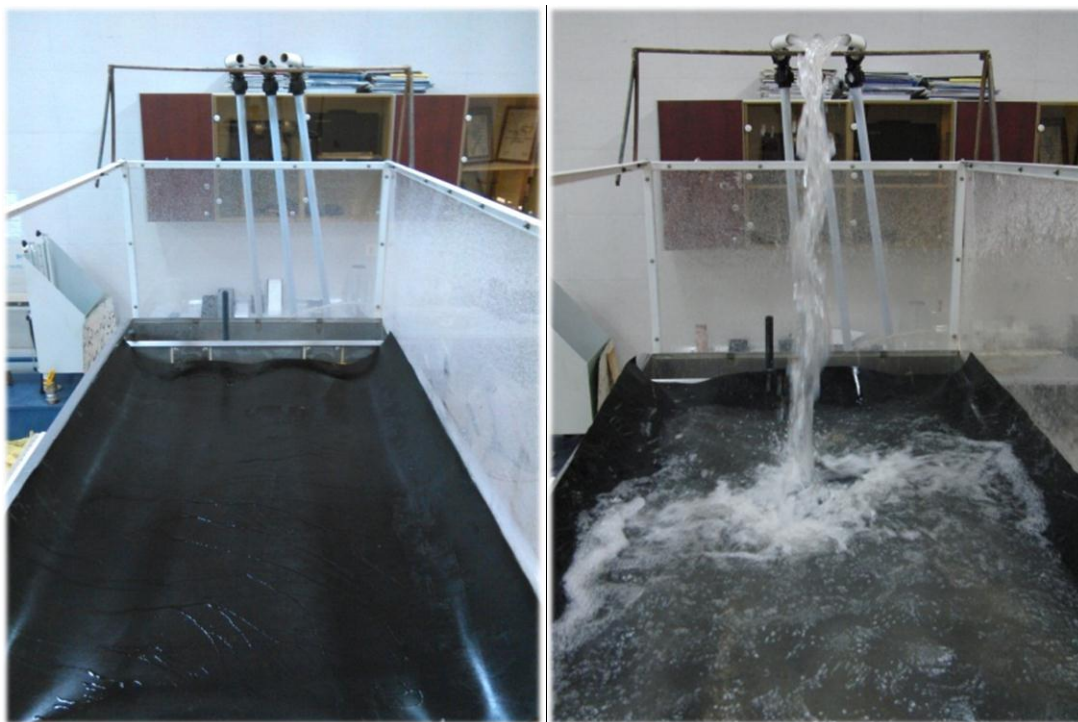
با در نظر گرفتن کلیه نکات لازم در مورد آماده‌سازی و رعایت نکات ضروری در کاهش خطای آزمایش‌ها مراحل زیر صورت گرفت:

ابتدا مدل فیزیکی دریاچه‌ها با زاویه‌ی مشخص در بالادست فلوم نصب و به‌طور کامل آب‌بندی گردید. سپس بستر پایین‌دست دریاچه‌ها به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر از سه نوع رسوب غیرچسبنده‌ی یکنواخت با قطر متوسط ( $D_{50}$ ) معادل با ۱/۷، ۳/۲ و ۶/۷۵ میلی‌متر پوشانده شد. یک واحد توری‌سنگ نیز در انتهای فلوم هم‌سطح با ذرات رسوب بستر برای جلوگیری از شسته شدن رسوبات در نظر گرفته شد. قبل از انجام هر آزمایش سطح بستر با استفاده از مالای چوبی و تراز کاملاً مسطح شده و برای ایجاد تراکمی یکنواخت، به‌منظور حصول اطمینان از شرایط یکسان و عدم وقوع تغییرات موضعی غیرقابل پیش‌بینی، کوبیده شد (شکل ۳-۷).



شکل ۳-۷- مسطح و متراکم کردن سطح بستر قبل از شروع هر آزمایش

سپس نقاط مختلف بستر به صورت تصادفی با استفاده از عمق سنج نقطه‌ای (با دقت ۰/۱ میلی‌متر)، تراز و یک صفحه‌ی مسطح کنترل گردید تا خطای چشمی در آزمایش‌ها دخالت نداشته و تمام سطح بستر صاف و یک‌دست باشد. بعد از تراز کردن سطح بستر، بازه‌ی رسوبی به وسیله‌ی یک ورق از جنس پلی‌اتیلن کاملاً پوشانده شد؛ به طوری که آب بدون برخورد با بستر، به انتهای حوضچه‌ی رسوب هدایت می‌شد. این امر باعث می‌شد که شرایط نامناسب قبل از شروع هر آزمایش (دبی و زاویه‌ی نامطلوب) تأثیری بر نتایج حاصله نداشته باشد. در ادامه الکتروپمپ روشن و با باز شدن تدریجی شیر ورودی، جریان آب به آرامی از طریق لوله‌ای به قطر ۲/۵ اینچ از مخزن وارد دریچه‌ها (به قطر ۱/۲۵ اینچ) شده و از آنجا به داخل فلوم، جریان می‌یافت. سپس دبی افزایش یافته تا دبی مورد نظر حاصل شود (شکل ۸-۳).



شکل ۸-۳- نمایی از فلوم آزمایشگاهی و ورق پلی‌اتیلنی واقع بر روی بستر پایین دست دریچه‌ها قبل از شروع آزمایش

پس از تنظیم دبی و دستیابی به مقدار مورد نظر، در یک لحظه پوشش پلی اتیلنی از روی بستر برداشته شده و زمان صفر درج می‌گردد (شکل ۳-۹). خاتمه‌ی آزمایش زمانی بود که ذرات رسوبی بستر به پایین دست منتقل نشده و حفره‌ی آبستگي به حالت تعادل می‌رسید.



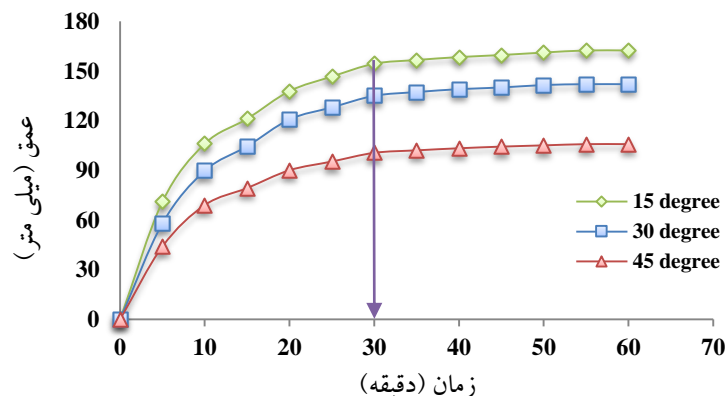
شکل ۳-۹- نمایی از فلوم آزمایشگاهی بعد از برداشتن پوشش پلی اتیلنی از روی بستر و شروع آزمایش

آزمایش‌ها به‌ازای ارتفاع ریزش (فاصله از وسط مقطع لوله تا سطح بستر) ثابت برابر ۹۵ سانتی‌متر و دبی‌های متفاوت ۱/۳۲، ۲/۰۶، ۲/۸۵، ۴/۰۰، ۴/۷۴ و ۵/۱۴ لیتر بر ثانیه صورت گرفت. در نهایت پروفیل آبستگي به‌صورت شبکه‌ی ۵×۵ سانتی‌متر برداشت شد. با توجه به داده‌های برداشت شده، ابعاد حفره‌ی آبستگي از قبیل طول، عرض و حداکثر عمق آبستگي و نیز ارتفاع برآمدگی رسوبات در پایین دست حفره استخراج گردید تا روند آبستگي مشخص شود.

### ۳-۶- تعیین زمان لازم برای هر آزمایش

در تحقیق حاضر به منظور تعیین مدت زمان آزمایش، سه آزمایش ۱ ساعته برای بحرانی‌ترین شرایط (رسوبات ریزدانه با  $D_{50}$  برابر  $1/7$  میلی‌متر و بیش‌ترین دبی جت معادل  $5/14$  لیتر بر ثانیه) در هر زاویه انجام پذیرفت. ابعاد آبشستگی به صورت مرتب برداشت شده و در نهایت شکل پیشرفت حداکثر عمق آبشستگی با زمان ترسیم گردید.

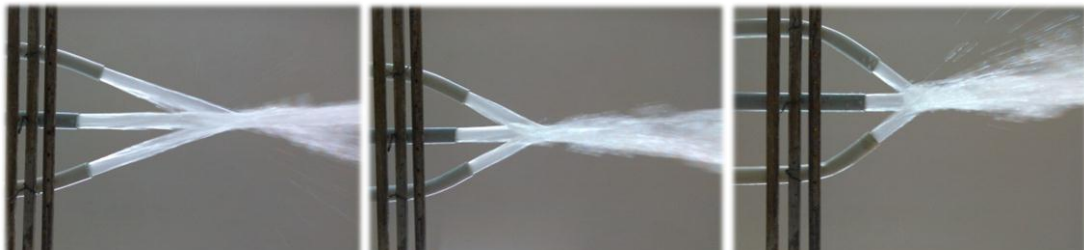
همان‌طوری که از شکل (۳-۱۰) مشهود است، در مرحله‌ی اولیه با برخورد جت آب خروجی از دریچه‌ها به بستر پایین‌دست، آبشستگی به سرعت رخ داده و شیب آن در این مرحله زیاد است. در مرحله‌ی دوم (مرحله‌ی توسعه) با افزایش قدرت و اندازه‌ی گرداب‌های ایجاد شده، ابعاد حفره‌ی آبشستگی افزایش یافته و شیب منحنی در این مرحله خیلی کم‌تر از مرحله‌ی قبل می‌باشد. در مرحله‌ی سوم (مرحله‌ی تثبیت) نیز تغییرات کاهش یافته و نهایتاً در مرحله‌ی پایانی (مرحله‌ی تعادل) ابعاد حفره‌ی آبشستگی بعد از مدت ۳۰ دقیقه به ۹۰ درصد حالت تعادل یا بالاتر از آن رسیده است که شیب منحنی در این مرحله نزدیک به صفر می‌باشد. در نتیجه با توجه به منحنی ارائه شده، زمان ۳۰ دقیقه به‌عنوان زمان اجرای آزمایش‌ها در نظر گرفته شد.



شکل ۳-۱۰- تغییرات زمانی حداکثر عمق آبشستگی در بحرانی‌ترین شرایط (رسوبات ریزدانه و بیش‌ترین دبی جت)

### ۳-۷- معرفی آزمایش‌های انجام شده و تعیین تعداد آزمایش‌ها

پس از نصب مدل فیزیکی دریچه‌ها با زاویه‌ی مشخص در ابتدای فلوم، هر بار رسوباتی با قطر مشخص در پایین دست دریچه‌ها ریخته شده و سطح آن‌ها صاف و هموار می‌گردید. سپس آزمایش‌ها با یک دبی مشخص صورت می‌گرفت. پس از اتمام آزمایش و انجام اندازه‌گیری‌ها، رسوبات شسته شده به درون حفره‌ی آبستنگی برگردانده شده و سطح بستر همانند قبل هموار می‌گردید. و با افزایش دبی با همان شرایط، آزمایش جدید انجام می‌شد. در شکل (۳-۱۱) جت آب خروجی از دریچه‌ها تحت زوایای مختلف نسبت به صفحه‌ی افق نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۱- نمایی از برخورد جت‌های ریزشی آزاد در سه زاویه ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه (به ترتیب از چپ به راست)

بنابراین برای بررسی تأثیر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی بر ابعاد حفره‌ی آبستنگی، پنجاه و چهار آزمایش با به کارگیری شرایط مختلف شامل شش دبی، سه دانه‌بندی و سه زاویه برای برخورد جت‌های ریزشی آزاد انجام شد. پس از انجام آزمایش‌ها، داده‌های مربوط به آبستنگی مانند طول، عرض و عمق آبستنگی اندازه‌گیری شد. هم‌چنین به کمک نرم افزار Surfer حجم آبستنگی محاسبه گردید.

فصل چہارم

نتیجہ و بحث

#### ۴-۱- مقدمه

مباحث اصلی که در این فصل به آن‌ها پرداخته شده به شرح زیر است:

➤ بررسی تأثیر تغییرات دبی جت آب خروجی از دریچه‌ها بر حداکثر عمق آبشستگی پایین دست

سدهای مخزنی

➤ بررسی تأثیر تغییرات قطر متوسط رسوبات بر حداکثر عمق آبشستگی پایین دست سدهای مخزنی

➤ بررسی تأثیر تغییرات زاویه‌ی برخورد جت‌های ریزشی آزاد نسبت به صفحه‌ی افق بر حداکثر عمق

آبشستگی پایین دست سدهای مخزنی

➤ تحلیل گسترش ابعاد حفره‌ی آبشستگی در پایین دست سدهای مخزنی

➤ ارائه‌ی رابطه‌ی بی بعد برای برآورد حداکثر عمق آبشستگی در پایین دست سدهای مخزنی

➤ تحلیل حساسیت رابطه‌ی خطی ارائه شده در این تحقیق نسبت به پارامترهای مؤثر در ایجاد حفره‌ی

آبشستگی

#### ۴-۲- مشاهدات آزمایشگاهی

در این بخش به نتایج حاصل از مشاهدات آزمایشگاهی پرداخته شده است. به طور کلی پنجاه و چهار

آزمایش در راستای اهداف این تحقیق انجام شده و در جدول (۴-۱) متغیرهای مورد آزمایش نشان داده

شده است.

جدول ۴-۱- مشخصات متغیرهای مورد آزمایش

مقدار						پارامتر
۵/۱۴	۴/۷۴	۴/۰۰	۲/۸۵	۲/۰۶	۱/۳۲	$Q_j$ (lit/s)
-	-	-	۶/۷۵	۳/۲	۱/۷	$D_{50}$ (mm)
-	-	-	۴۵	۳۰	۱۵	$\theta$ (degree)



در جدول (۲-۴) تا جدول (۴-۴) مقادیر حداکثر عمق آبستگي ( $d_s$ ) برحسب میلی‌متر در پایین دست جت‌های ریزشی آزاد در آزمایش‌های مختلف ارائه شده است. این بررسی‌ها در دبی‌ها ( $Q_j$ )، دانه‌بندی‌ها ( $D_{50}$ ) و زاویای ( $\theta$ ) مختلف نسبت به صفحه‌ی افق صورت گرفته و ارتفاع ریزش جت‌ها ( $h_j$ ) ثابت می‌باشد.

جدول ۲-۴- مقادیر حداکثر عمق آبستگي ( $d_s$ ) برحسب میلی‌متر برای رسوباتی با قطر متوسط معال ۱/۷ میلی‌متر

$Q_j$ (lit/s)	$\theta$ (degree)	۵/۱۴	۴/۷۴	۴/۰۰	۲/۸۵	۲/۰۶	۱/۳۲
۱۰	۱۶۲/۲۵	۱۵۵	۱۳۷	۱۱۲	۸۷/۵	۶۵/۵	
۳۰	۱۴۲	۱۳۰/۵	۱۱۱	۸۹	۶۸/۵	۴۸/۵	
۴۵	۱۰۵/۷۵	۹۷/۲۵	۸۳	۵۹/۵	۴۴/۲۵	۳۵	

جدول ۳-۴- مقادیر حداکثر عمق آبستگي ( $d_s$ ) برحسب میلی‌متر برای رسوباتی با قطر متوسط معال ۳/۲ میلی‌متر

$Q_j$ (lit/s)	$\theta$ (degree)	۵/۱۴	۴/۷۴	۴/۰۰	۲/۸۵	۲/۰۶	۱/۳۲
۱۵	۱۴۸	۱۴۲	۱۲۲/۵	۹۵	۷۰/۵	۴۹/۵	
۳۰	۱۲۶	۱۱۵/۷۵	۹۶/۲۵	۷۲/۲۵	۵۱/۵	۳۲/۷۵	
۴۵	۹۳	۸۲	۶۵	۴۴/۲۵	۳۰	۱۸/۵	

جدول ۴-۴- مقادیر حداکثر عمق آبستگي ( $d_s$ ) برحسب میلی‌متر برای رسوباتی با قطر متوسط معال ۶/۷۵ میلی‌متر

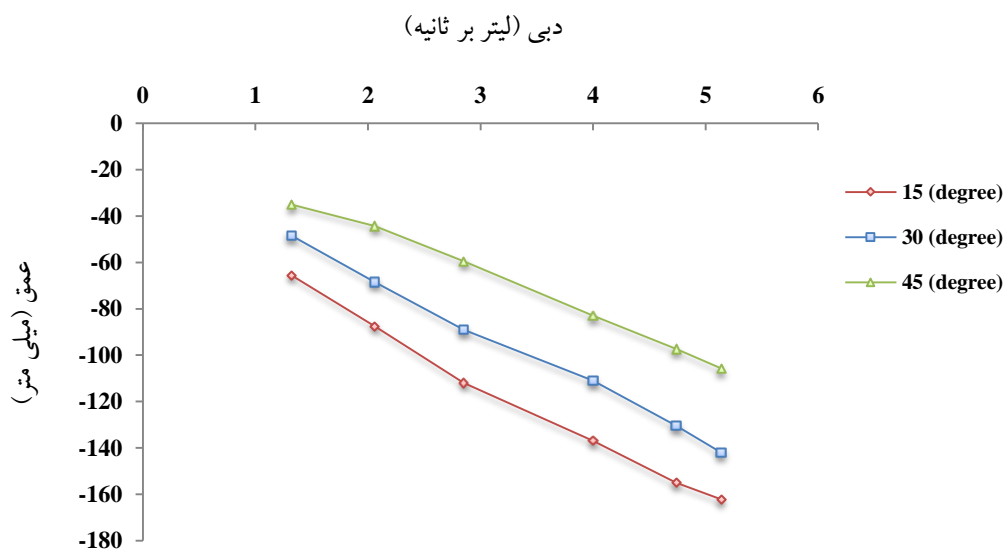
$Q_j$ (lit/s)	$\theta$ (degree)	۵/۱۴	۴/۷۴	۴/۰۰	۲/۸۵	۲/۰۶	۱/۳۲
۱۵	۱۲۹	۱۲۱	۱۰۶	۸۳	۵۵	۳۳	
۳۰	۱۱۲/۵	۱۰۰/۵	۸۱/۵	۶۰	۳۸/۵	۱۹/۵	
۴۵	۷۵	۶۸	۵۰	۳۰	۱۵/۵	۸	

#### ۴-۳- نتایج آزمایش‌ها

با توجه به پارامترهای تأثیرگذار بر آبشستگی حاصل از جت‌های ریزشی آزاد در پایین دست سدهای مخزنی و آنالیز ابعادی انجام شده (رابطه‌ی ۳-۷)، به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف، آزمایش‌ها بر مبنای ثابت نگه داشتن همه‌ی متغیرها و تغییر یک متغیر انجام شد؛ تا به طور صریح تأثیر هر پارامتر مشاهده شود. پس از انجام هر آزمایش، داده‌های مربوط به آبشستگی مانند طول و عمق آبشستگی اندازه‌گیری و نتایج آن‌ها به صورت نمودار ارائه گردید.

#### ۴-۳-۱- بررسی تأثیر تغییرات دبی جت آب خروجی از دریچه‌ها بر حداکثر عمق آبشستگی پایین دست سدهای مخزنی

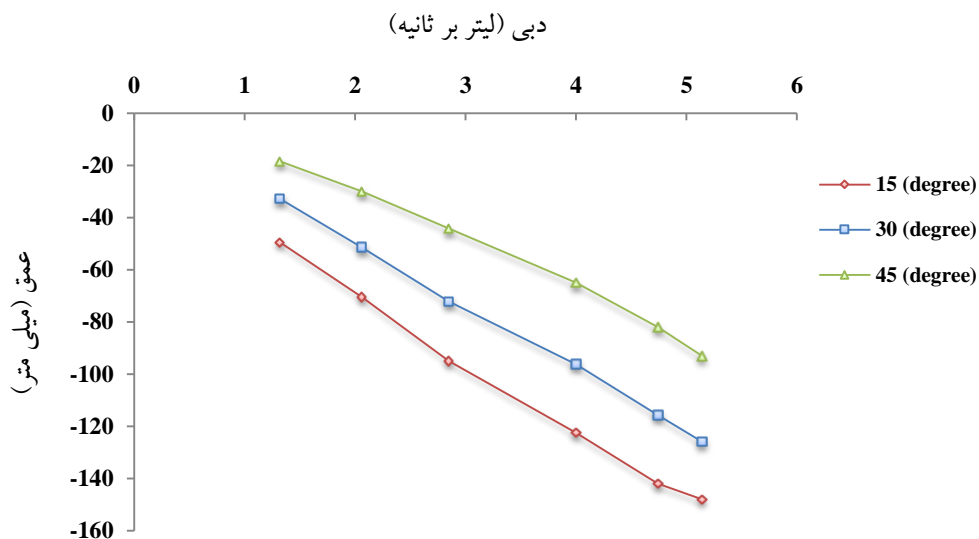
یکی از پارامترهای تأثیرگذار در روند انجام این تحقیق، دبی مورد استفاده در آزمایش‌ها بود. به ازای تک تک دبی‌های به کار رفته در آزمایش ( $Q_j = 1/32, 2/06, 2/85, 4/00, 4/74, 5/14 \text{ Lit/s}$ )، در پایین دست دریچه‌ها یک حفره‌ی آبشستگی ایجاد گردید. در شکل (۴-۱) تا شکل (۴-۳) نتایج مربوط به تأثیر دبی در روند تغییرات حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) برای هریک از رسوبات ریزدانه ( $D_{50} = 1/7 \text{ mm}$ )، متوسط ( $D_{50} = 3/2 \text{ mm}$ ) و درشت دانه ( $D_{50} = 6/75 \text{ mm}$ ) به ازای زوایه‌های مختلف ( $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ ) نسبت به صفحه‌ی افق نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود دبی جت آب خروجی تأثیر زیادی بر میزان حداکثر عمق آبشستگی بستر پایین دست دریچه‌ها دارد؛ به طوری که در یک دانه‌بندی و زاویه‌ی ثابت با افزایش دبی،  $d_s$  افزایش می‌یابد. در واقع افزایش دبی همراه با افزایش انرژی جنبشی جت بوده که این امر منجر به افزایش پتانسیل حمل رسوب در پایین دست دریچه‌ها، افزایش میزان آبشستگی موضعی و در نهایت نشست بیشتر بستر پایین دست شده است.



شکل ۴-۱- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) به ازای دبی‌های مختلف در رسوبات ریزدانه ( $1/7mm$ )

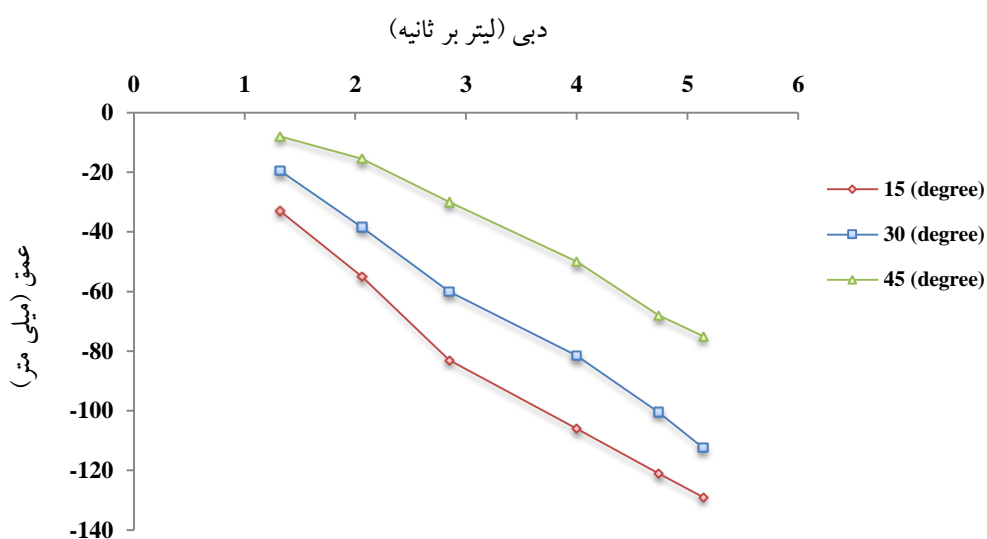
در شکل (۴-۱) کم‌ترین مقدار آبشستگی برابر ۳۵ میلی‌متر در دبی  $1/32$  لیتر بر ثانیه و زاویه‌ی ۴۵ درجه نسبت به صفحه‌ی افق، و بیش‌ترین این مقدار برابر  $162/25$  میلی‌متر در دبی  $5/14$  لیتر بر ثانیه و زاویه‌ی ۱۵ درجه می‌باشد. هم‌چنین بیش‌ترین درصد کاهش عمق آبشستگی برابر  $66/90$  درصد در زاویه‌ی ۴۵ درجه و کاهش دبی از  $5/14$  به  $1/32$  لیتر بر ثانیه می‌باشد. در صورتی‌که کم‌ترین این مقدار برابر  $4/47$  درصد، در زاویه‌ی ۱۵ درجه و کاهش دبی از  $5/14$  به  $4/74$  لیتر بر ثانیه مشاهده می‌شود. نکته‌ی مهم دیگری که در این شکل وجود دارد این است که در زاویه‌ی ۱۵ درجه، درصد کاهش عمق آبشستگی با کاهش دبی از  $4/74$  به  $4/00$  لیتر بر ثانیه کمتر از  $2/06$  به  $1/32$  لیتر بر ثانیه می‌باشد. علت این پدیده را می‌توان این‌گونه استدلال نمود که در دبی  $2/06$  لیتر بر ثانیه آبشستگی اتفاق افتاده و به یک حد قابل قبولی رسیده، اما در دبی  $1/32$  لیتر بر ثانیه هنوز این اتفاق نیفتاده است؛ به همین دلیل اختلاف زیادی بین مقادیر عمق آبشستگی دیده می‌شود. درحالی‌که در دبی‌های  $4/74$  و  $4/00$  لیتر بر ثانیه آشفستگی لازم وجود دارد و این اختلاف کمتر است. این روند تقریباً در سایر زاویه‌ها (۴۵،

$\theta=30^\circ$ ) نیز برقرار بوده و نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که در دبی‌های پایین‌تر، درصد کاهش عمق آبشستگی بیش‌تر است.



شکل ۴-۲- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) به‌ازای دبی‌های مختلف در رسوبات متوسط (۳/۲mm)

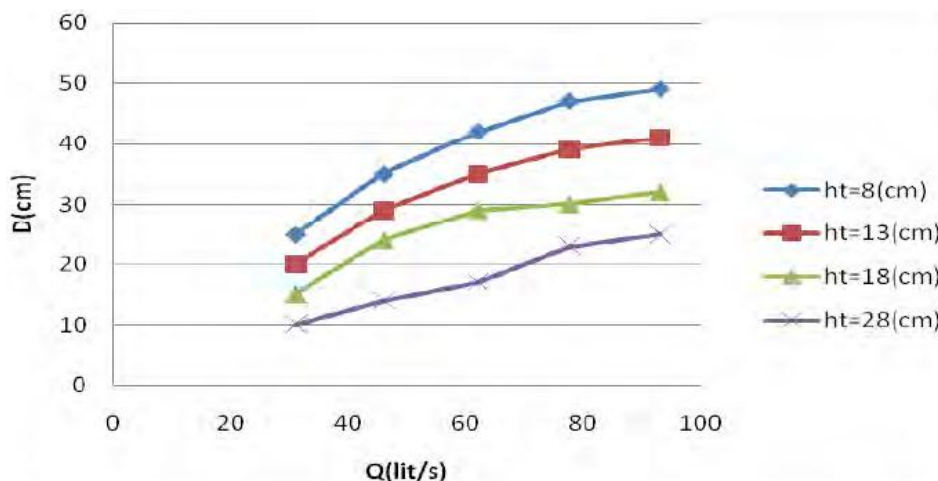
در شکل (۲-۴) کم‌ترین مقدار آبشستگی برابر  $18/5$  میلی‌متر در دبی  $1/32$  لیتر بر ثانیه و زاویه‌ی  $45^\circ$  درجه نسبت به صفحه‌ی افق، و بیش‌ترین این مقدار برابر  $148$  میلی‌متر در دبی  $5/14$  لیتر بر ثانیه و زاویه‌ی  $15^\circ$  درجه می‌باشد. هم‌چنین بیش‌ترین درصد کاهش عمق آبشستگی برابر  $80/11$  درصد در زاویه‌ی  $45^\circ$  درجه و کاهش دبی از  $5/14$  به  $1/32$  لیتر بر ثانیه می‌باشد. در صورتی‌که کم‌ترین این مقدار برابر  $4/05$  درصد، در زاویه‌ی  $15^\circ$  درجه و کاهش دبی از  $5/14$  به  $4/74$  لیتر بر ثانیه مشاهده می‌شود. نکته‌ی دیگر این است که در یک دانه‌بندی و زاویه‌ی مشخص درصد کاهش عمق آبشستگی در دبی‌های پایین، بیش‌تر است. این موضوع به این علت است که آشفتگی جریان در دبی‌های بالا نسبت به دبی‌های پایین، کم‌تر تغییر می‌کند.



شکل ۳-۴- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) به‌ازای دبی‌های مختلف در رسوبات درشت دانه (۶/۷۵mm)

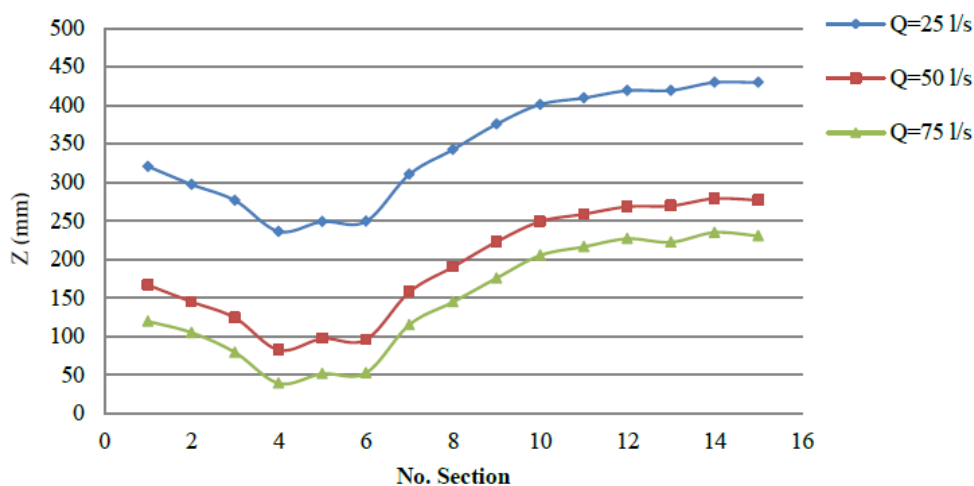
شکل (۳-۴) تغییرات حداکثر عمق آبشستگی را برحسب تغییرات دبی جت ( $Q_j$ ) نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود اولاً با افزایش مقدار دبی، مقادیر  $d_s$  افزایش می‌یابد. ثانیاً این شکل نشان می‌دهد که حداقل مقدار آبشستگی به‌ازای دبی ۱/۳۲ لیتر بر ثانیه معادل ۸ میلی‌متر و در زاویه‌ی ۴۵ درجه نسبت به صفحه‌ی افق و حداکثر آن به‌ازای دبی ۵/۱۴ لیتر بر ثانیه معادل ۱۲۹ میلی‌متر و در زاویه‌ی ۱۵ درجه می‌باشد.

اکبری و همکاران (۱۳۹۰) به مطالعه‌ی آزمایشگاهی تأثیر تغییرات دبی جت ( $Q_j$ ) بر حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) پایین‌دست پرتاب‌کننده‌ی جامی شکل پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش دبی، سرعت جت آب خروجی از پرتاب‌کننده بیشتر شده که این امر منجر به افزایش میزان مصالح شسته شده و حداکثر عمق آبشستگی می‌گردد. در بررسی دقیق‌تر نمودارها مشخص شد که با افزایش دبی جت، میزان تغییرات حداکثر عمق آبشستگی در ابتدا زیاد است؛ به‌طوری که شیب منحنی‌ها در شکل (۴-۴) در ابتدا زیاد می‌باشد. اما با افزایش بیشتر دبی، این شیب کمتر شده و بیانگر این است که تغییرات  $d_s$  با افزایش دبی کندتر است و اثر دبی با افزایش آن کاهش پیدا کرده است.



شکل ۴-۴- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) با دبی در عمق پایاب‌های مختلف

چاخارلو و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی تأثیر دبی‌های مختلف بر آبشستگی پایین‌دست سرریز لبه تیز پرداختند. در شکل (۴-۵) تغییرات عمق آبشستگی مرکز فلوم نسبت به دبی، در سه دبی مختلف نشان داده شده است.



شکل ۴-۵- نمایش مرکز آبشستگی پایین‌دست سرریز لبه تیز با سه دبی مختلف

روند کلی تغییرات مؤید این نکته است که افزایش دبی، تأثیر عمده‌ای در عمق آبشستگی پایین‌دست سرریز دارد؛ به طوری که با افزایش دبی، عمق آبشستگی بیش‌تر می‌شود. اما نکته‌ی اصلی این‌جاست که

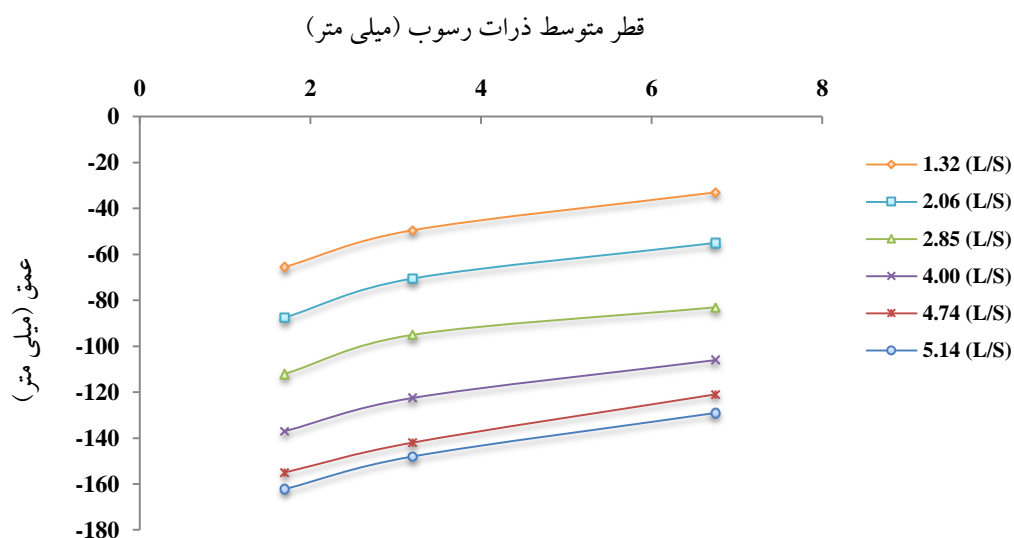
با افزایش بیش‌تر دبی از دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه، عمق آبستگي نسبت به دبی‌های کم‌تر کاهش قابل ملاحظه‌ای نداشته است. این پدیده را می‌توان این‌گونه استدلال نمود که در واقع در دبی‌های بالا، دبی اثر خود را در روند آبستگي از دست می‌دهد یا تأثیر آن کم‌تر می‌شود.

#### ۴-۳-۲- بررسی تأثیر تغییرات قطر متوسط رسوبات بر حداکثر عمق آبستگي پایین-

##### دست سدهای مخزنی

پارامتر مورد بررسی دیگر قطر متوسط ذرات رسوب ( $D_{50}$ ) بستر پایین‌دست دریچه‌ها می‌باشد. شکل (۴-۶) تا شکل (۴-۸) نشان‌دهنده‌ی نتایج مربوط به تأثیر تغییر دانه‌بندی در روند تغییرات حداکثر عمق آبستگي در هریک از زوایه‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه نسبت به صفحه‌ی افق، به‌ازای دبی‌های مختلف ( $Q_j = 1/32, 2/06, 2/85, 4/00, 4/74, 5/14 \text{ Lit/s}$ ) می‌باشد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود برای تمامی حالات جریان و در زوایای مختلف افزایش قطر متوسط رسوبات تأثیر معکوس در مقدار حداکثر عمق آبستگي دارد؛ به‌طوری که با افزایش  $D_{50}$ ، حداکثر عمق آبستگي کاهش می‌یابد. در واقع آنچه در نحوه‌ی تشکیل حفره‌ی آبستگي مؤثر است قدرت حمل جریان می‌باشد که آن هم تحت تأثیر انرژی جنبشی جت و اندازه‌ی ذرات رسوب است. هرچه دانه‌بندی ریزتر باشد به‌دلیل افزایش پتانسیل حمل رسوب، میزان حداکثر عمق آبستگي افزایش می‌یابد.

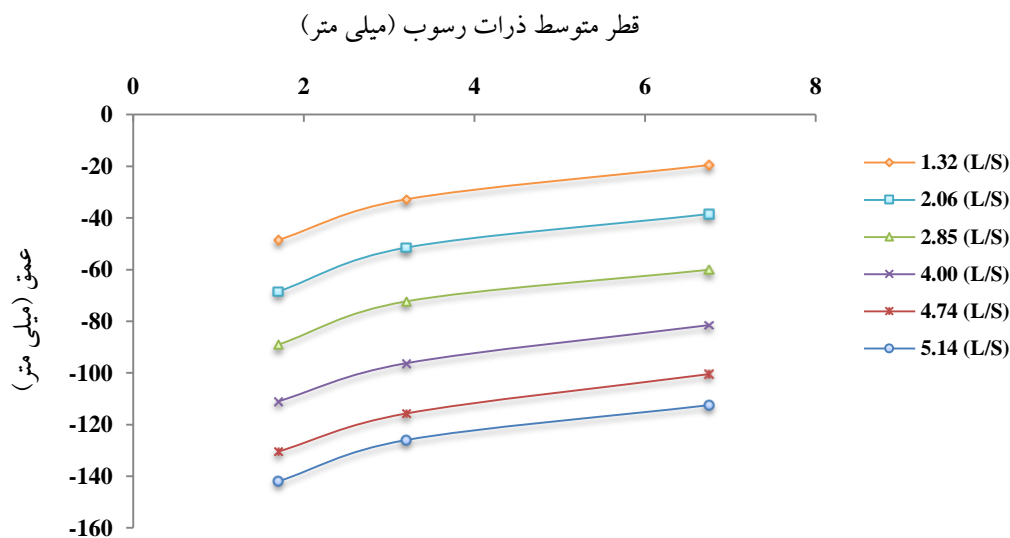
بررسی مطالعات انجام شده و منابع موجود نشان داد که قرار دادن دریچه‌ها در بدنه‌ی سد، با ایجاد آشفتگی اولیه در جریان، باعث اتلاف مقداری از انرژی جنبشی جت و در نتیجه کاهش پتانسیل حمل رسوب توسط جریان می‌شود. با توجه به داده‌های مشاهداتی و نتایج حاصل از این تحقیق نیز می‌توان افزود که مقدار این کاهش پتانسیل با افزایش قطر متوسط رسوبات بستر افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۶- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) در زاویه ۱۵ درجه نسبت به صفحه افق برای دانه‌بندی‌های مختلف

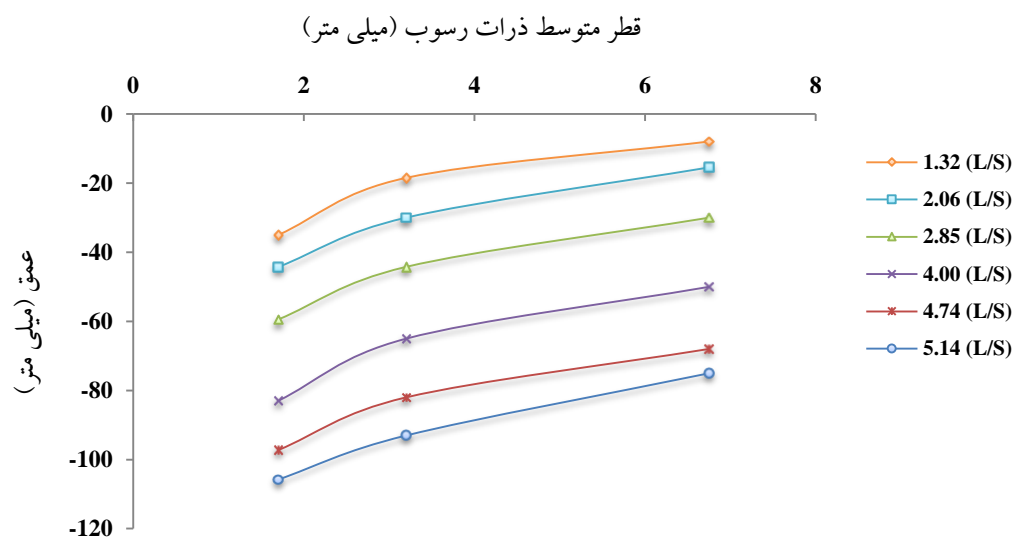
شکل (۴-۶) تغییرات حداکثر عمق آبشستگی را برحسب تغییرات  $D_{50}$  نشان می‌دهد. این شکل به‌ازای زاویه‌ی ۱۵ درجه (نسبت به صفحه‌ی افق) برای مقادیر  $D_{50}=1/7, 3/2, 6/75\text{mm}$  تنظیم گردیده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود اولاً با افزایش  $D_{50}$  مقدار  $d_s$  کاهش پیدا می‌کند. ثانیاً این شکل نشان می‌دهد که حداقل مقدار آبشستگی به‌ازای  $D_{50}=6/75\text{mm}$  برابر ۳۳ میلی‌متر در دبی  $1/32$  لیتر بر ثانیه و حداکثر آن به‌ازای  $D_{50}=1/7\text{mm}$  برابر  $162/25$  میلی‌متر در دبی  $5/14$  لیتر بر ثانیه می‌باشد. نکته‌ی مهم دیگری که در این شکل وجود دارد این است که بیش‌ترین درصد کاهش عمق آبشستگی برابر  $49/62$  درصد و مربوط به دبی  $1/32$  لیتر بر ثانیه و افزایش قطر متوسط رسوبات از  $1/7$  به  $6/75$  میلی‌متر می‌باشد. هم‌چنین کم‌ترین مقدار برابر  $8/78$  درصد در دبی  $5/14$  لیتر بر ثانیه و افزایش  $D_{50}$  از  $1/7$  به  $3/2$  میلی‌متر مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج فوق به‌طور کلی می‌توان گفت با افزایش بیش‌تر قطر متوسط ذرات رسوب، عمق آبشستگی در دبی‌های بالا نسبت به دبی‌های پایین کاهش قابل ملاحظه‌ای نداشته است. این پدیده را می‌توان این‌گونه توجیح کرد که در واقع در شرایطی از جریان، دبی اثر خود را در روند آبشستگی از دست می‌دهد یا تأثیر آن کم‌تر می‌شود.





شکل ۴-۷- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) در زاویه ۳۰ درجه نسبت به صفحه افق برای دانه‌بندی‌های مختلف

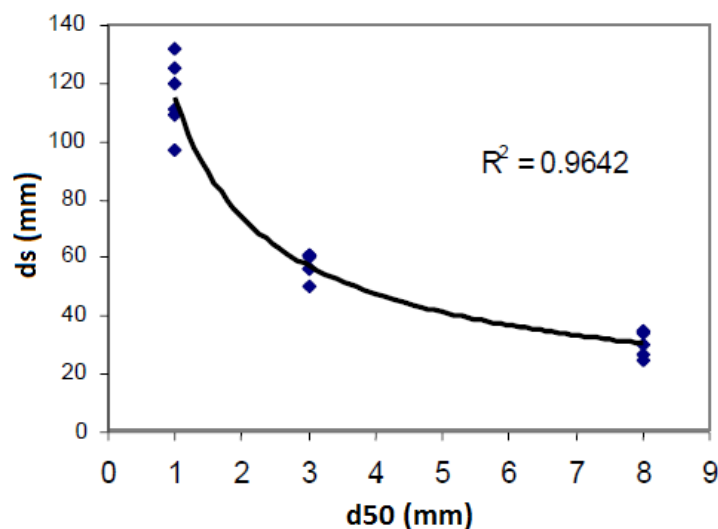
شکل (۴-۷) نمایان‌گر تغییرات حداکثر عمق آبشستگی در حالتی است که دریچه‌ها با زاویه‌ی ۳۰ درجه نسبت به صفحه‌ی افق نصب شده‌اند. در این نمودار کم‌ترین مقدار آبشستگی در  $D_{50}=6/75\text{mm}$  و دبی  $1/32$  لیتر بر ثانیه،  $19/5$  میلی‌متر مشاهده شده است. علاوه بر این بیش‌ترین عمق آبشستگی به‌مقدار  $142$  میلی‌متر، در دبی  $5/14$  لیتر بر ثانیه و  $D_{50}=1/7\text{mm}$  دیده می‌شود.



شکل ۴-۸- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) در زاویه ۴۵ درجه نسبت به صفحه افق برای دانه‌بندی‌های مختلف

شکل (۴-۸) تغییرات حداکثر عمق آبشستگی را در پایین دست دریاچه‌ها با زاویه‌ی قراگیری ۴۵ درجه نسبت به صفحه‌ی افق نشان می‌دهد. در این نمودار کم‌ترین مقدار آبشستگی مربوط به  $D_{50}=6/75\text{mm}$  است که در دبی  $1/32$  لیتر بر ثانیه اتفاق افتاده و مقدار آن ۸ میلی‌متر می‌باشد. از طرفی بیش‌ترین عمق آبشستگی در دبی  $5/14$  لیتر بر ثانیه و در  $D_{50}=1/7\text{mm}$  مشاهده می‌شود که برابر  $105/75$  میلی‌متر است.

صانعی و سلطانی (۱۳۸۸) آزمایش‌های مختلفی با تغییر دانه‌بندی مصالح بستر به منظور تعیین تأثیر دانه‌بندی بر عمق آبشستگی حاصل از جریان ریزشی آزاد انجام دادند. مصالح بستر با قطر متوسط ۱، ۳ و ۸ میلی‌متر در داخل فلوم آزمایشگاهی ریخته شد و اندازه‌گیری‌های مربوطه انجام پذیرفت. شکل (۴-۹) تغییرات عمق آبشستگی برحسب قطر متوسط مصالح بستر را نشان می‌دهد.



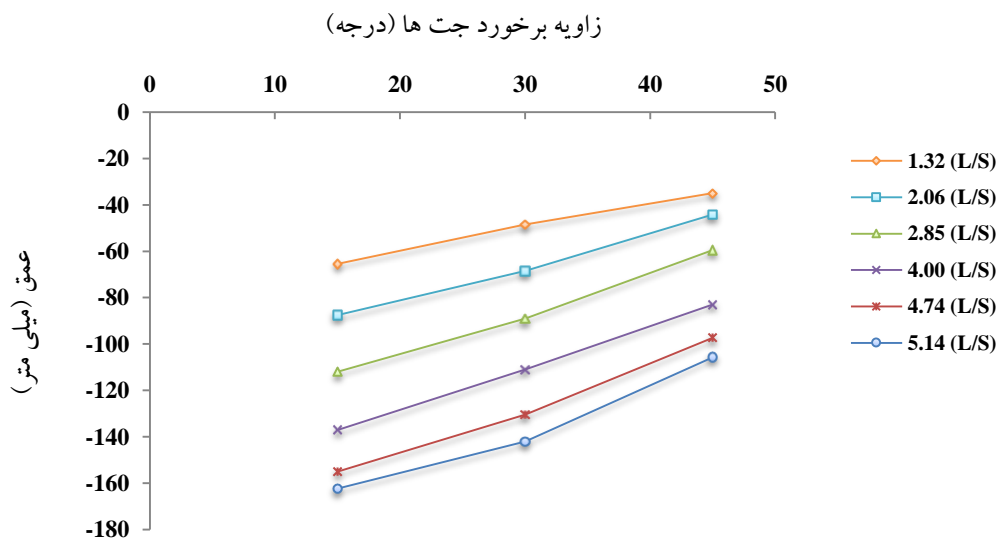
شکل ۴-۹- تغییرات عمق آبشستگی برحسب قطر متوسط مصالح بستر

نتایج نشان داد که با افزایش قطر متوسط مصالح بستر در شرایط هیدرولیکی یکسان، عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. به طوری که به ازای سه برابر شدن قطر متوسط مصالح، عمق آبشستگی نصف و با هشت برابر شدن آن، عمق آبشستگی به یک‌سوم کاهش می‌یابد.

### ۳-۳-۴- بررسی تأثیر تغییرات زاویه برخورد جت‌های ریزشی آزاد نسبت به صفحه افق بر حداکثر عمق آبشستگی پایین دست سدهای مخزنی

شکل (۴-۱۰) تا شکل (۴-۱۲) نمودارهای مربوط به تأثیر تغییر زاویه برخورد جت‌های ریزشی آزاد ( $\theta$ ) را در روند تغییرات حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) برای هریک از دانه‌بندی‌های ۱/۷، ۳/۲ و ۶/۷۵ میلی‌متر به‌ازای دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در تمامی دانه‌بندی‌ها و در دبی‌های مختلف با افزایش زاویه برخورد جت‌ها نسبت به صفحه‌ی افق،  $d_s$  کاهش می‌یابد.

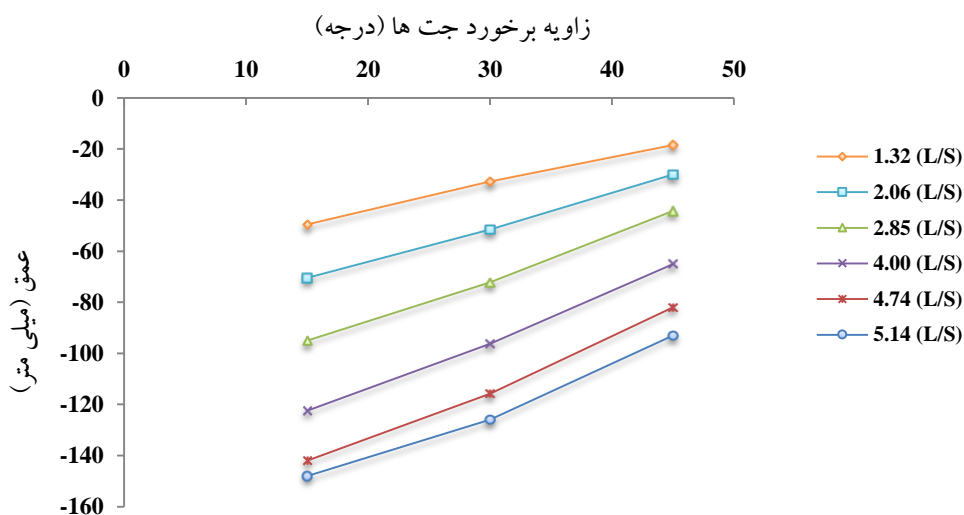
شکل (۴-۱۰) تغییرات حداکثر عمق آبشستگی را برحسب تغییرات  $\theta$  (نسبت به صفحه‌ی افق) نشان می‌دهد. این شکل به‌ازای رسوبات ریزدانه ( $D_{50}=1/7\text{mm}$ )، برای مقادیر ۲/۸۵، ۴/۰۰، ۴/۷۴، ۵/۱۴ Lit/s، برای تنظیم گردیده است.  $Q_j=1/32$ ، ۲/۰۶،



شکل ۴-۱۰- تغییرات حداکثر عمق آبشستگی ( $d_s$ ) برای رسوبات ریزدانه ( $1/7\text{mm}$ ) در زوایای مختلف برخورد جت‌ها

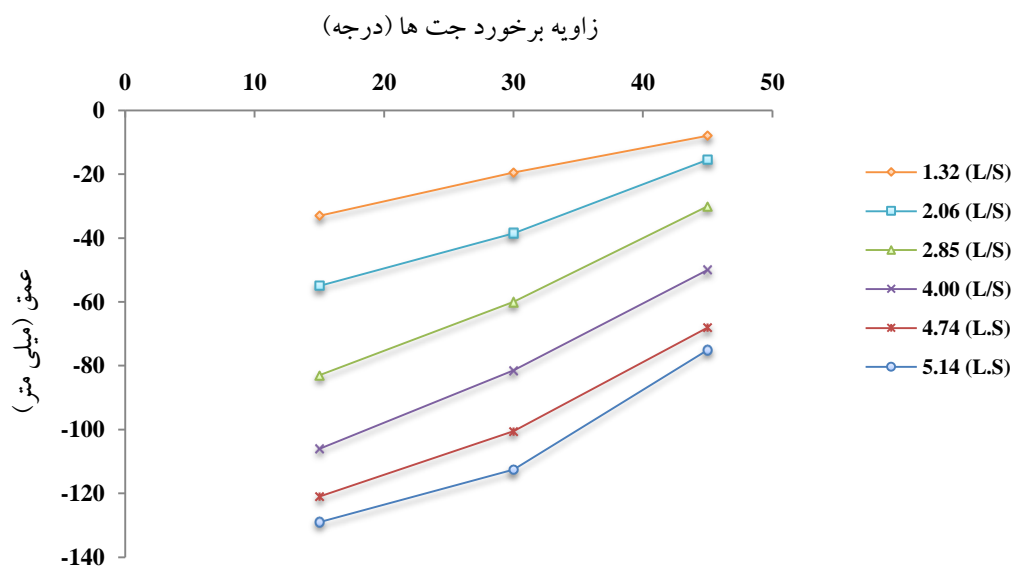
همان‌طور که در شکل (۴-۱۰) ملاحظه می‌شود اولاً با افزایش مقدار  $Q_j$  به‌طور قابل توجه مقادیر  $d_s$  افزایش پیدا می‌کند. ثانیاً این شکل نشان می‌دهد که حداقل مقدار آبشستگی به‌ازای  $Q_j=1/32\text{Lit/s}$  برابر ۳۵ میلی‌متر در زاویه‌ی ۴۵ درجه، و حداکثر آن به‌ازای  $Q_j=5/14\text{Lit/s}$  برابر ۱۶۲/۲۵ میلی‌متر در

زاویه ۱۵ درجه می‌باشد. نکته‌ی دیگر این است که با افزایش زاویه‌ی برخورد جت‌های ریزشی آزاد از ۱۵ به ۴۵ درجه، مقدار افت  $d_s$  شدیدتر از حالتی است که زاویه از ۱۵ به ۳۰ درجه و یا از ۳۰ به ۴۵ درجه افزایش می‌یابد. این موضوع به این دلیل است که ابتدا با نصب دریچه‌ها با زاویه‌ی ۱۵ درجه نسبت به صفحه‌ی افق، پخش‌شدگی جت‌ها در لحظه‌ی برخورد ناچیز بوده و گرداب‌های شدیدی در پایین‌دست دریچه‌ها ایجاد می‌شود. بنابراین در این شرایط دریچه‌ها در کاهش انرژی جنبشی جت اثر چندانی از خود نشان نمی‌دهند و مقدار حداکثر عمق آبستگی زیاد است. اما با تغییر زاویه‌ی قرارگیری دریچه‌ها به زاویه‌ی ۴۵ درجه (نسبت به صفحه‌ی افق)، بخش زیادی از انرژی جنبشی جت مستهلک شده و کاهش زیادی در مقادیر  $d_s$  مشاهده می‌شود. نکته‌ی دیگر این است که در رسوبات ریزدانه ( $D_{50}=1/7\text{mm}$ ) به‌ازای دبی‌های متفاوت (۵/۱۴ تا ۱/۳۲)، با تغییر زاویه‌ی برخورد جت‌ها از ۱۵ به ۴۵ درجه، تغییرات  $d_s$  به‌ازای کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار دبی به‌ترتیب برابر ۴۶/۵۶ و ۳۴/۸۲ درصد می‌باشد. به عبارتی می‌توان نتیجه گرفت با افزایش مقدار  $Q_j$  از ۱/۳۲ تا ۵/۱۴ لیتر بر ثانیه میزان تغییرات  $d_s$  حدود ۲۵/۲۱ درصد کاهش یافته است.



شکل ۴-۱۱- تغییرات حداکثر عمق آبستگی ( $d_s$ ) برای رسوبات متوسط ( $3/2\text{mm}$ ) در زوایای مختلف برخورد جت‌ها

تغییرات حداکثر عمق آبستگي برای ذرات رسوب با قطر متوسط معادل  $3/2$  میلی‌متر و مقادیر  $Q_j=1/32, 2/06, 2/85, 4/00, 4/74, 5/14 \text{ Lit/s}$  در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که کم‌ترین مقدار عمق آبستگي به‌ازای  $Q_j=1/32 \text{ Lit/s}$  معادل  $18/5$  میلی‌متر در زاویه‌ی  $45^\circ$  درجه نسبت به صفحه‌ی افق، و هم‌چنین بیش‌ترین این مقدار به‌ازای  $Q_j=5/14 \text{ Lit/s}$  معادل  $148$  میلی‌متر در زاویه‌ی  $15^\circ$  درجه رخ داده است. نکته‌ی دیگری که وجود دارد این است که بیش‌ترین درصد کاهش عمق آبستگي برابر  $62/63$  درصد و مربوط به دبی  $1/32$  لیتر بر ثانیه و افزایش زاویه‌ی برخورد جت‌ها از  $15^\circ$  به  $45^\circ$  درجه می‌باشد. هم‌چنین کم‌ترین این مقدار برابر  $14/86$  درصد در دبی  $5/14$  لیتر بر ثانیه و افزایش  $\theta$  از  $15^\circ$  به  $30^\circ$  درجه مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۱۲ - تغییرات حداکثر عمق آبستگي ( $d_s$ ) برای رسوبات درشت دانه ( $6/75 \text{ mm}$ ) در زوایای مختلف برخورد جت‌ها

شکل (۴-۱۲) نمایان‌گر تغییرات حداکثر عمق آبستگي برای رسوبات درشت دانه ( $D_{50}=6/75 \text{ mm}$ ) است. در این نمودار کم‌ترین مقدار آبستگي در  $Q_j=1/32 \text{ Lit/s}$  و زاویه‌ی  $45^\circ$  درجه (نسبت به صفحه‌ی افق)،  $8$  میلی‌متر مشاهده شده است. علاوه بر این بیش‌ترین عمق آبستگي به‌مقدار  $129$  میلی‌متر در زاویه‌ی  $15^\circ$  درجه و  $Q_j=5/14 \text{ Lit/s}$  دیده می‌شود. نکته‌ی دیگری که در این شکل وجود دارد این است

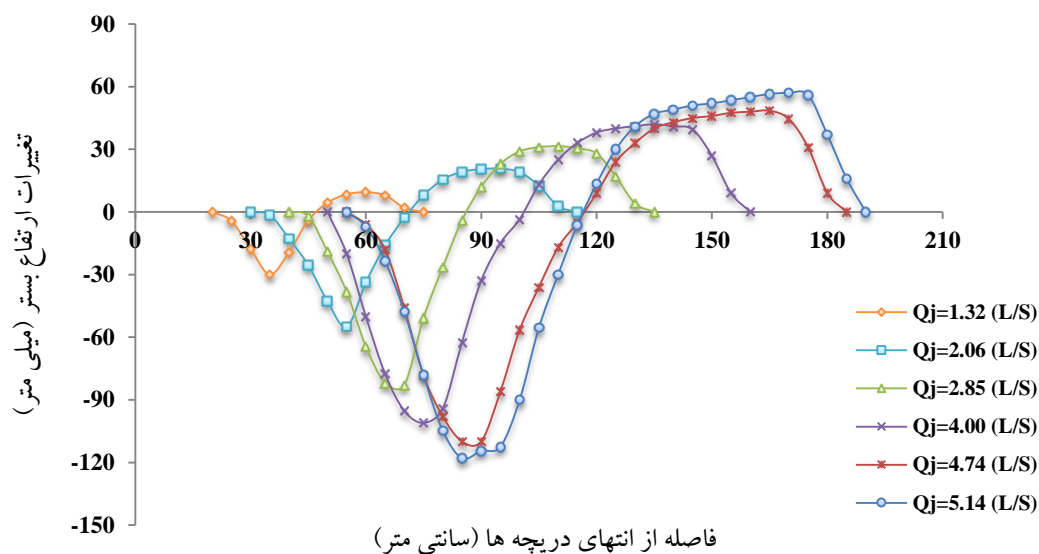
که به ازای  $D_{50}$  معادل  $6/75$  میلی متر بیشترین درصد کاهش عمق آبشستگی برابر  $75/76$  درصد و مربوط به دبی  $1/32$  لیتر بر ثانیه و افزایش زاویه ی برخورد جت ها از  $15$  به  $45$  درجه می باشد. همچنین کمترین این مقدار برابر  $12/79$  درصد در دبی  $5/14$  لیتر بر ثانیه و افزایش  $\theta$  از  $15$  به  $30$  درجه مشاهده می شود.

با توجه به نتایج به دست آمده از منحنی های شکل (۴-۱۰) تا (۴-۱۲) می توان گفت تغییرات زاویه ی برخورد جت های ریزشی آزاد (نسبت به صفحه ی افق)، روی حداکثر عمق آبشستگی پایین دست دریاچه ها، تقریباً در تمامی دانه بندی ها و حالت های جریان روند یکسانی را نشان می دهد. هرچه دبی جریان کمتر شود، مقدار حداکثر عمق آبشستگی در زاویه ی مورد نظر کاهش می یابد. اگر این تغییر با افزایش قطر متوسط رسوبات بستر همراه باشد، مقدار  $d_s$  کاهش بیشتری خواهد داشت. همچنین با افزایش  $\theta$  به دلیل تحلیل انرژی جنبشی جت، کاهش قابل ملاحظه ای در مقدار  $d_s$  مشاهده می شود.

#### ۴-۴- تحلیل گسترش ابعاد حفره آبشستگی در پایین دست سدهای مخزنی

در طراحی دریاچه ها در بدنه ی سدهای مخزنی، گسترش طول و عرض حفره ی آبشستگی نقش مهمی دارد. با دانستن این که حفره ی آبشستگی در چه موقعیتی نسبت به دریاچه ها گسترش پیدا می کند، می توان به بررسی موقعیت مناسب استقرار دریاچه ها با توجه به توپوگرافی منطقه پرداخت.

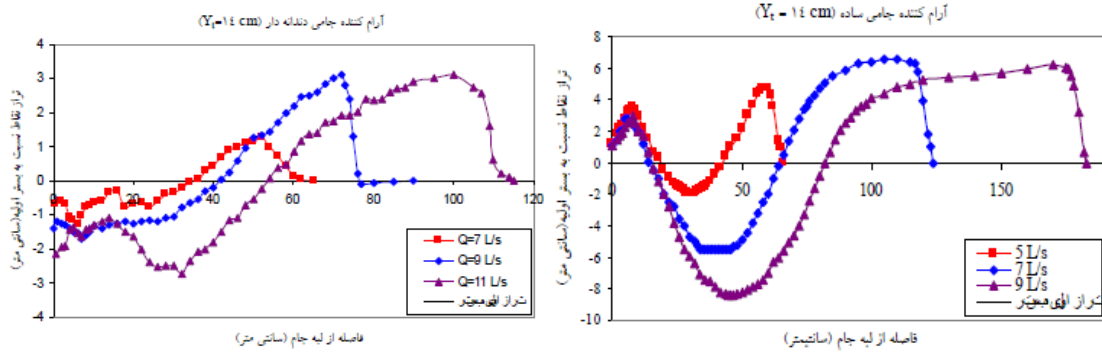
شکل های (۴-۱۳) تا (۴-۲۵) نمونه ای از پروفیل های طولی تغییرات عمق آبشستگی و یک سری از توپوگرافی های حفره و تل آبشستگی رسم شده با نرم افزار Surfer را نشان می دهند. پروفیل طولی در واقع یک مقطع برش زده از حفره و تل آبشستگی در راستای طول فلوم آزمایشگاهی است. لازم به ذکر است که در بعضی حالات به علت پخش شدگی جت ها در لحظه ی برخورد، الگوی آبشستگی متقارن نبوده و بیشینه ی عمق آبشستگی در چپ و راست خط طولی مرکزی اتفاق افتاده است.



شکل ۴-۱۳- پروفیل طولی تغییرات میزان آبشستگی به ازای دبی های مختلف در رسوبات درشت دانه (۶/۷۵mm)

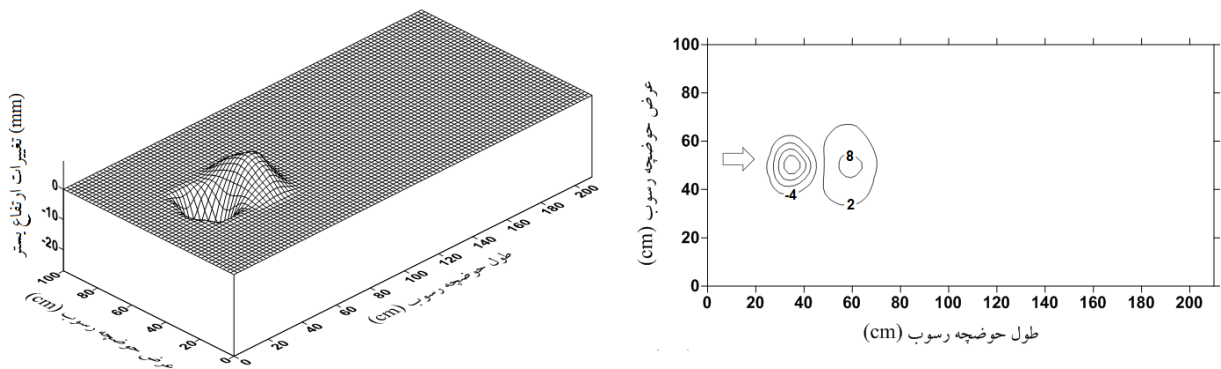
در شکل (۴-۱۳) پروفیل های طولی تغییرات عمق آبشستگی با قرارگیری دریچه ها با زاویه ی ۱۵ درجه نسبت به صفحه ی افق در رسوبات درشت دانه ( $D_{50}=6/75\text{mm}$ ) و برای تمامی دبی های مورد استفاده در آزمایش ها رسم شده اند. همان طور که ملاحظه می شود به ازای تک تک دبی های به کار رفته در آزمایش، ابتدا در پایین دست دریچه ها یک حفره ی آبشستگی ایجاد می گردد. سپس بخشی از رسوبات شسته شده، در طول مسیر جریان روی هم انباشته شده و در پایین دست حفره تشکیل پشته ی رسوبی داده اند. در این شکل کم ترین مقدار عمق آبشستگی برابر ۳۰ میلی متر در  $Q_z=1/32\text{Lit/s}$ ، و بیش ترین مقدار آن ۱۱۸ میلی متر در  $Q_z=5/14\text{Lit/s}$  می باشد. هم چنین کم ترین ارتفاع تپه ۹/۵ میلی متر و بیش ترین ارتفاع ۵۷ میلی متر می باشد. نکته ی دیگر این است که با افزایش دبی از ۱/۳۲ به ۵/۱۴ لیتر بر ثانیه، سرعت جت خروجی از دریچه ها افزایش یافته و فاصله ی محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی از انتهای دریچه ها حدود ۵۸/۸۲ درصد بیش تر می شود.

پناهی و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر افزایش دبی بر پروفیل طولی تغییرات عمق آبشستگی در پایین دست سازه ی آرام کننده ی جامی مستغرق ساده و دندانه دار پرداختند.



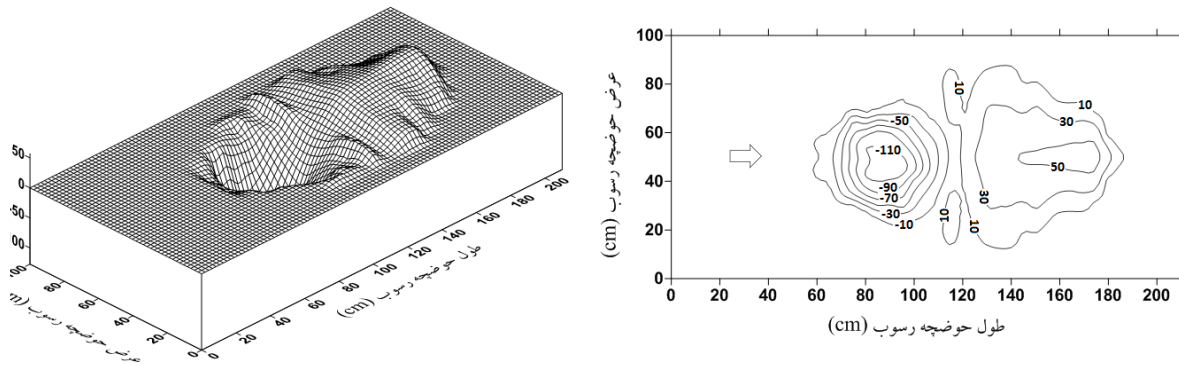
شکل ۴-۱۴- تأثیر افزایش دبی بر پروفیل طولی آبشستگی در یک عمق پایاب ثابت در آرام‌کننده جامی مستغرق ساده و دندانه‌دار

شکل (۴-۱۴) نتایج مربوط به تأثیر افزایش دبی جریان بر پروفیل طولی تغییرات عمق آبشستگی در یک عمق پایاب ثابت در هر دو جام را نشان می‌دهد. با توجه به داده‌های مشاهداتی و نتایج حاصل شده، مشخص گردید که در هر دو سازه‌ی آرام‌کننده‌ی جامی ساده و دندانه‌دار با افزایش دبی، حداکثر عمق حفره‌ی آبشستگی افزایش یافته، محل وقوع آن از لبه‌ی جام دور شده و نقطه‌ی انتهایی حفره از لبه‌ی جام فاصله می‌گیرد. در نهایت این امر منجر به افزایش گسترش طولی حفره‌ی آبشستگی و افزایش حجم رسوبات شسته شده می‌گردد. هم‌چنین با افزایش دبی، قدرت حمل جریان افزایش یافته که موجب انتقال ذرات رسوبی شسته شده به انتهای پشته‌ی پایین دست حفره‌ی آبشستگی و افزایش گسترش طولی پشته می‌شود.



شکل ۴-۱۵- توپوگرافی کم‌ترین مقدار حفره و تل آبشستگی در دبی ۱/۳۲ لیتر بر ثانیه

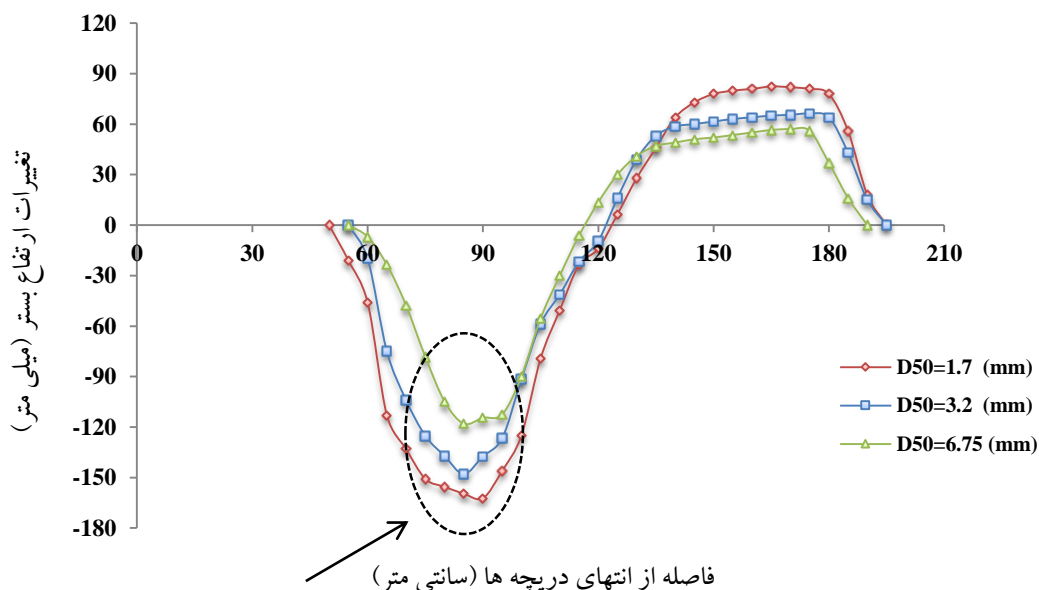




شکل ۴-۱۶- توپوگرافی بیشترین مقدار حفره و تل آبخستگی در دبی ۵/۱۴ لیتر بر ثانیه

شکل‌های (۴-۱۵) و (۴-۱۶) پروفیل‌های رسم شده با نرم‌افزار Surfer را نشان می‌دهند که برای کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار حفره و تل شکل (۴-۱۳) رسم شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش  $Q_j$  از ۱/۳۲ به ۵/۱۴ لیتر بر ثانیه در یک دانه‌بندی و زاویه‌ی ثابت ( $D_{50}=6/75\text{mm}$  و  $\theta=15^\circ$ ) موجب افزایش عمق حفره‌ی آبخستگی ( $d_s$ )، افزایش گسترش طولی ( $L_s$ ) و عرضی حفره ( $W_s$ )، و در نهایت افزایش حجم حفره ( $V_s$ ) به ترتیب به میزان ۷۴/۵۸، ۵۸/۳۳، ۲۷/۲۷ و ۹۵/۶۲ درصد می‌گردد. هم‌چنین با افزایش دبی، سرعت برشی جریان در پایاب افزایش یافته که موجب شسته شدن تاج پشته، ته‌نشین شدن ذرات رسوبی در انتهای پشته، در نهایت هموار شدن سطح پشته و افزایش گسترش طولی آن به میزان ۶۴/۲۹ درصد می‌شود. نکته‌ای دیگر که در این پروفیل‌ها کاملاً مشخص است، این است که در  $Q_j=5/14\text{Lit/s}$ ، میزان حفره‌ی آبخستگی بسیار عمیق‌تر از پشته‌ی ایجاد شده توسط رسوبات است که دلیل آن شسته شدن مقدار زیادی از رسوبات پایین دست دریچه‌ها می‌باشد.

در نهایت با توجه به نتایج حاصل از بررسی تأثیر تغییرات پارامتر دبی جت آب خروجی از دریچه‌ها بر میزان حداکثر عمق آبخستگی پایین دست سدهای مخزنی، می‌توان گفت افزایش دبی جریان در شرایط یکسان، منجر به افزایش ابعاد حفره‌ی آبخستگی (شامل عمق، طول و عرض حفره) و فاصله‌ی محل وقوع حداکثر عمق حفره از انتهای دریچه‌ها می‌گردد.

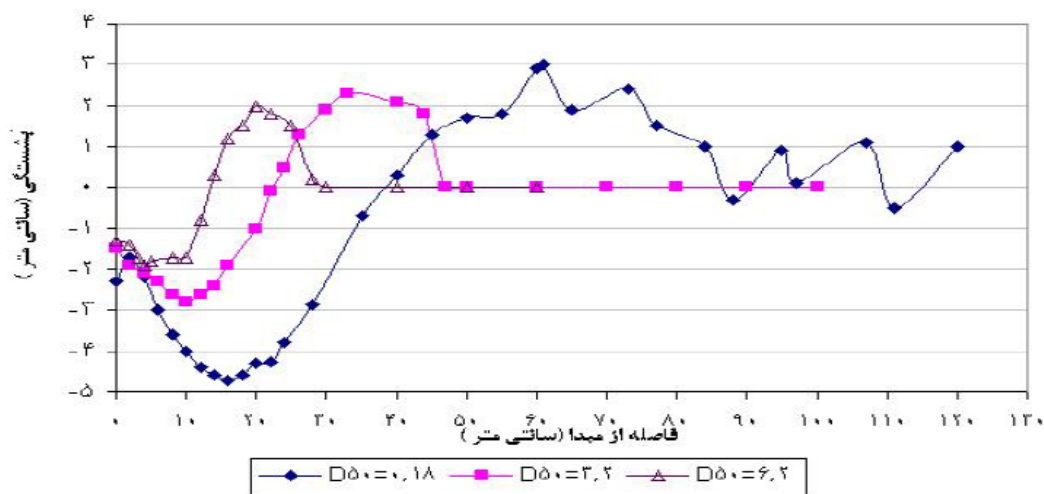


شکل ۴-۱۷- پروفیل طولی تغییرات میزان آبشستگی در دانه‌بندی‌های مختلف به‌ازای دبی ۵/۱۴ لیتر بر ثانیه

در شکل (۴-۱۷) پروفیل طولی تغییرات عمق آبشستگی در زاویه‌ی ۱۵ درجه نسبت به صفحه‌ی افق، به‌ازای دبی ۵/۱۴ لیتر بر ثانیه و دانه‌بندی‌های مختلف مشاهده می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود به‌ازای تک تک دانه‌بندی‌های به‌کار رفته در آزمایش، ابتدا حفرة‌ی آبشستگی و سپس در پایین‌دست آن تپه‌ی رسوبی تشکیل شده است. در این نمودار کم‌ترین مقدار عمق آبشستگی ۱۱۸ میلی‌متر و بیش‌ترین مقدار آن ۱۶۲/۲۵ میلی‌متر است. رسوبات خروجی از چاله‌ی آبشستگی نیز پشته‌های رسوبی را با ارتفاع‌های ۵۷ میلی‌متر به‌عنوان کم‌ترین و ۸۲/۵ میلی‌متر به‌عنوان بیش‌ترین ارتفاع تشکیل داده‌اند. نکته‌ی دیگر این است که با افزایش قطر متوسط ذرات رسوب بستر از ۱/۷ به ۶/۷۵ میلی‌متر، فاصله‌ی محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی از انتهای دریچه‌ها حدود ۵/۵۶ درصد کاهش می‌یابد. علت این پدیده را می‌توان این‌گونه توجیح کرد که 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 ناشی از وزن ذره غالب آید. بنابراین با افزایش اندازه‌ی متوسط ذرات رسوب، وزن ذرات افزایش یافته و

تنش برشی جریان آب از تنش برشی رسوبات بستر کم تر می شود. در نتیجه جدا شدن ذرات از بستر اتفاق نیفتاده و محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی به انتهای دریاچه ها نزدیک تر می شود.

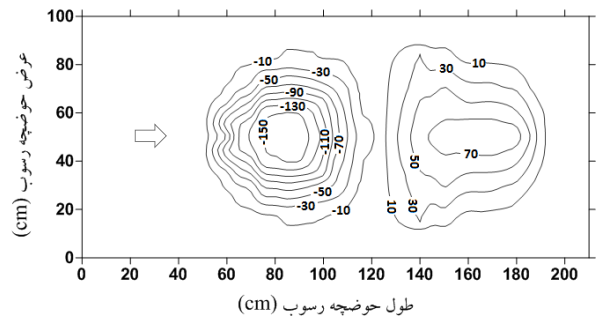
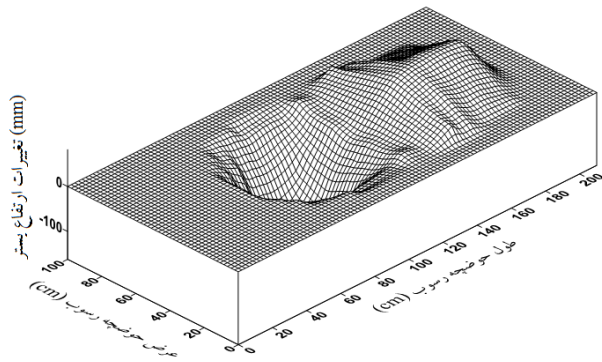
موسوی و همکاران (۱۳۸۵) در بررسی حداکثر عمق آبشستگی پایین دست سرریز پلکانی در شرایط جریان ریزشی به این نتیجه رسیدند که دانه بندی مصالح بستر پایین دست سرریز و به طور مشخصه  $D_{50}$  تأثیر زیادی بر میزان عمق آبشستگی دارد؛ به طوری که در شرایط هیدرولیکی مشابه با افزایش  $D_{50}$ ، میزان عمق آبشستگی کاهش می یابد. هم چنین با افزایش  $D_{50}$ ، فاصله ی حداکثر عمق آبشستگی از انتهای سازه کم می شود. به عنوان مثال شکل (۴-۱۸) پروفیل های طولی تغییرات عمق آبشستگی پایین دست سرریز را در دانه بندی های مختلف نشان می دهد.



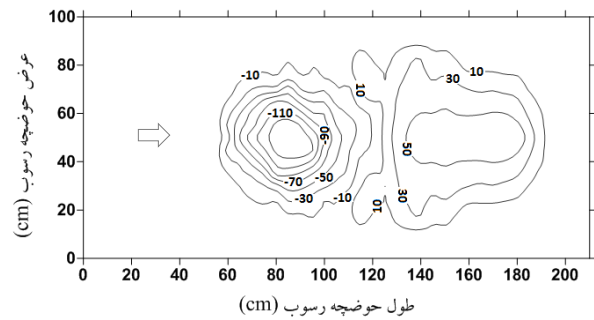
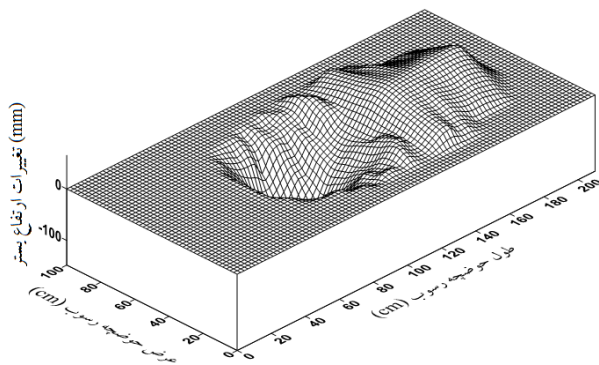
شکل ۴-۱۸- پروفیل های طولی تغییرات عمق آبشستگی در پایین دست سرریز در  $Y_{tw}=7/5\text{cm}$  به ازای  $Q=9/6\text{Lit/s}$

شکل های (۴-۱۹) تا (۴-۲۱) پروفیل های رسم شده با نرم افزار Surfer را نشان می دهند که برای بیشترین مقدار حفره و تل شکل (۴-۱۷) رسم شده اند. مطابق شکل های (۴-۱۹) تا (۴-۲۱) با افزایش  $D_{50}$  از  $1/7$  به  $6/75$  میلی متر در یک دبی و زاویه ی ثابت ( $Q_j=5/14\text{Lit/s}$  و  $\theta=15^\circ$ )، حداکثر عمق آبشستگی حدود  $27/27$  درصد کاهش می یابد. هم چنین با کاهش گسترش عرضی حفره، حجم حفره ی

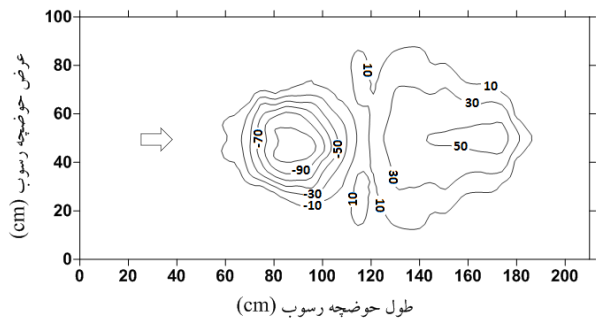
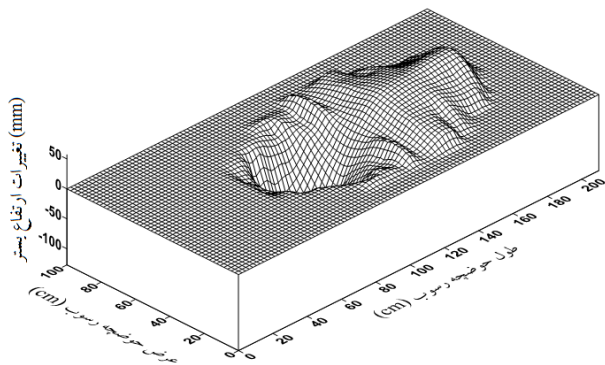
آبشستگی و نیز ارتفاع برآمدگی رسوبات پایین دست حفره به ترتیب حدود ۵۵/۶۹ و ۳۰/۹۱ درصد کم می شود.



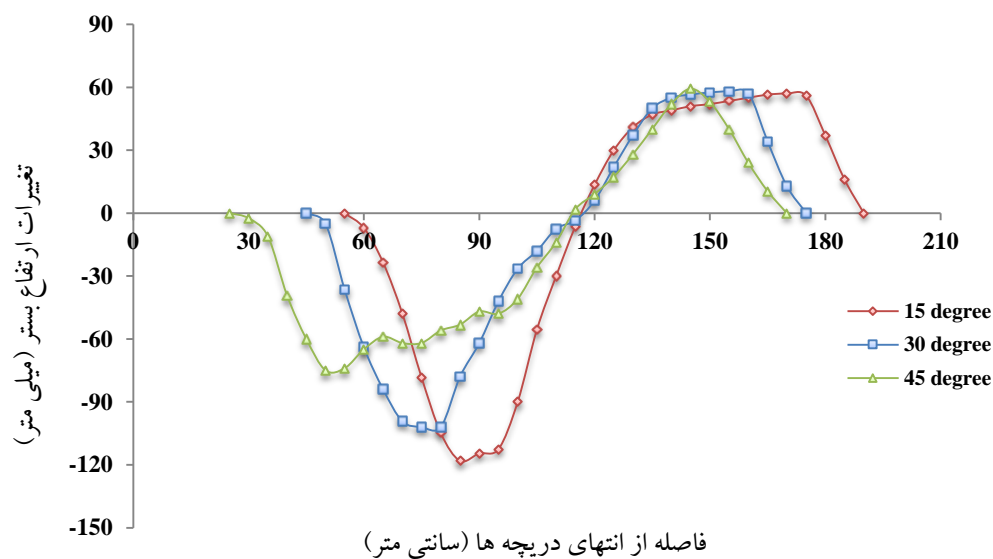
شکل ۴-۱۹- توپوگرافی بیشترین مقدار حفره و تل آبشستگی در رسوبات ریزدانه (۱/۷mm)



شکل ۴-۲۰- توپوگرافی بیشترین مقدار حفره و تل آبشستگی در رسوبات متوسط (۳/۲mm)



شکل ۴-۲۱- توپوگرافی بیشترین مقدار حفره و تل آبشستگی در رسوبات درشت دانه (۶/۷۵mm)

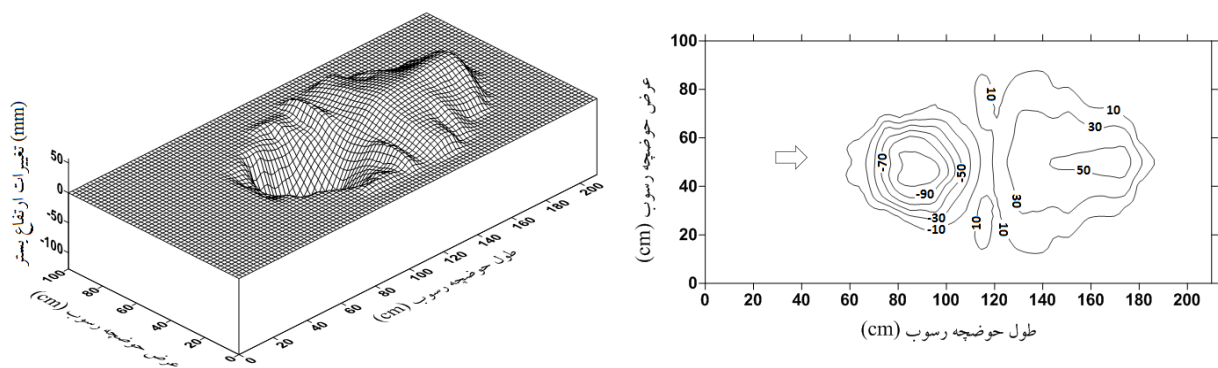


شکل ۴-۲۲- پروفیل طولی آبشستگی با قرارگیری دریاچه‌ها در زاویه‌های مختلف در دبی ۵/۱۴ لیتر بر ثانیه

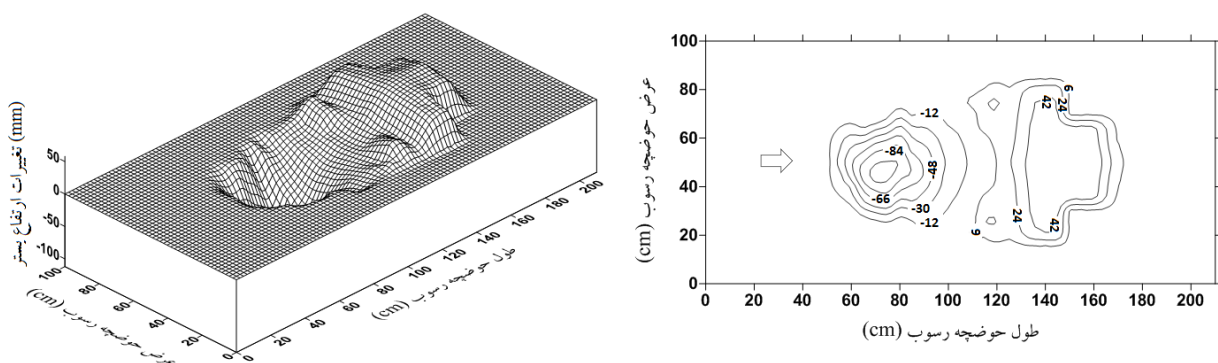
شکل (۴-۲۲) نمایان‌گر پروفیل طولی آبشستگی در رسوبات درشت دانه ( $D_{50}=6/75\text{mm}$ )، به‌ازای دبی ۵/۱۴ لیتر بر ثانیه و زاویه‌های مختلف است. در این شکل کم‌ترین مقدار عمق آبشستگی ۷۵ میلی‌متر و بیش‌ترین عمق ۱۱۸ میلی‌متر مشاهده می‌شود. ارتفاع کم‌ترین و بیش‌ترین تپه نیز، به ترتیب ۵۷ و ۵۹/۲۵ میلی‌متر می‌باشد. هم‌چنین با افزایش زاویه‌ی برخورد جت‌ها از ۱۵ به ۴۵ درجه (نسبت به صفحه‌ی افق)، جت آب در فاصله‌ی نزدیک‌تری از دریاچه‌ها به بستر برخورد می‌کند. در نهایت مطابق شکل (۴-۲۲) ابتدای حفره و محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی به ترتیب ۵۴/۵۵ و ۴۱/۱۸ درصد به دریاچه‌ها نزدیک می‌شود. در این حالت، نرخ افزایش فاصله‌ی انتهای حفره شدیدتر از کاهش فاصله‌ی ابتدای حفره است و گسترش طولی حفره به‌طرف پایین‌دست افزایش می‌یابد.

تغییرات پشته‌ی پایین‌دست نیز تحت تأثیر انرژی جنبشی جت برای شستن رسوبات و قدرت حمل جریان برای انتقال رسوبات شسته شده به پایین‌دست می‌باشد. هرگونه تغییر در زاویه برخورد جت‌ها که موجب تغییر انرژی جنبشی جت و قدرت حمل جریان می‌شود، تغییر شکل و ارتفاع پشته‌ی پایین‌دست را به‌همراه دارد. در زاویه‌ی ۱۵ درجه، قدرت حمل جریان زیاد بوده و شرایط جریان بر روی

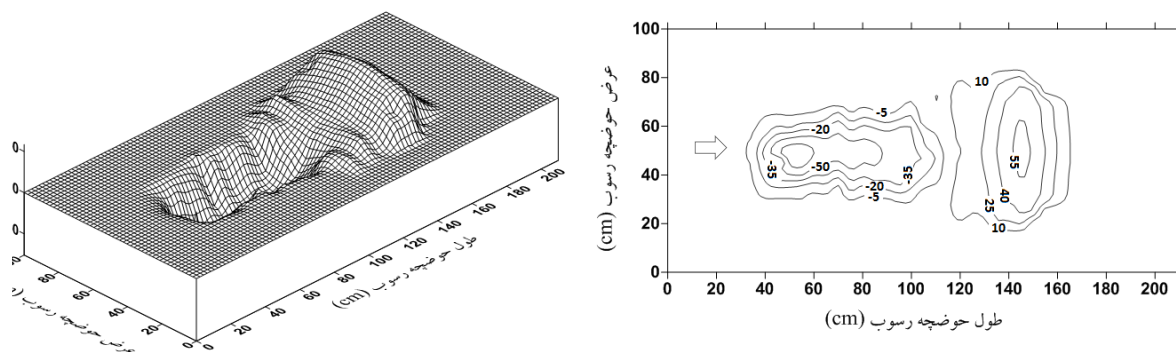
پشته موجب انتقال ذرات رسوبی شسته شده به پایین دست پشته و تغییر شکل آن به حالت ذوزنقه‌ای می‌گردد. در صورتی که با افزایش زاویه‌ی برخورد جت‌ها از ۱۵ به ۴۵ درجه نسبت به صفحه‌ی افق، قدرت حمل جریان کم شده و این امر منجر به آرام‌تر شدن الگوی آشفتگی جریان در لایه‌های سیال نزدیک به بستر شده و ذراتی که از جای خود حرکت کرده‌اند، سریع‌تر انرژی جنبشی خود را از دست داده و بلافاصله بعد از خروج از حفره، در ناحیه‌ی برآمدگی به فرم یک قله‌ی نوک تیز ته‌نشین می‌شوند. به‌همین دلیل اختلاف بین ارتفاع برآمدگی رسوبات پایین دست حفره در زاویه‌های مورد بررسی ناچیز است.



شکل ۴-۲۳- توپوگرافی بیش‌ترین مقدار حفره و تل آبخستگی در زاویه ۱۵ درجه نسبت به صفحه افق



شکل ۴-۲۴- توپوگرافی بیش‌ترین مقدار حفره و تل آبخستگی در زاویه ۳۰ درجه نسبت به صفحه افق



شکل ۴-۲۵- توپوگرافی بیشترین مقدار حفره و تل آبخستگی در زاویه ۴۵ درجه نسبت به صفحه افق

شکل‌های (۴-۲۳) تا (۴-۲۵) پروفیل‌های رسم شده با نرم‌افزار Surfer را نشان می‌دهند که برای بیشترین مقدار حفره و تل شکل (۴-۲۲) رسم شده‌اند. با مقایسه‌ی پروفیل‌های طولی رسم شده در شکل‌های مذکور مشاهده می‌گردد که زاویه‌ی برخورد جت‌ها نسبت به صفحه‌ی افق، تأثیر زیادی بر میزان حداکثر عمق آبخستگی و حجم حفره‌ی ایجاد شده دارد. به‌طوری که در یک دبی و دانه‌بندی ثابت ( $D_{50}=6/75\text{mm}$  و  $Q_j=5/14\text{Lit/s}$ ) با افزایش  $\theta$  از ۱۵ به ۳۰ درجه و همین‌طور از ۳۰ به ۴۵ درجه انرژی جنبشی جت آب خروجی تحلیل رفته، در نهایت به ترتیب  $d_s$  به ترتیب  $13/56$  و  $26/47$  درصد کاهش می‌یابد. هم‌چنین حجم حفره آبخستگی در زاویه‌ی ۱۵ درجه  $12/95$  درصد بیش‌تر از زاویه‌ی ۳۰ درجه و در زاویه‌ی ۳۰ درجه  $16/31$  درصد بیش‌تر از زاویه‌ی ۴۵ درجه است.



شکل ۴-۲۶- نمایی از جت‌های ریزشی آزاد با زاویه برخورد ۴۵ درجه و حفره ایجاد شده در پایین دست

شکل (۴-۲۶) نشان‌دهنده‌ی مرحله‌ای از آزمایش است که جت‌های ریزشی آزاد با زاویه‌ی ۴۵ درجه (نسبت به صفحه‌ی افق) با یک‌دیگر برخورد کرده و تشکیل یک حفره‌ی آبستگی در پایین‌دست دریچه‌ها داده‌اند. همان‌طور که از شکل (۴-۲۶) مشهود است در زاویه‌ی ۴۵ درجه، تمایل برای افزایش در طول حفره‌ی آبستگی به‌مراتب بیش‌تر از عرض حفره می‌باشد. ولی پشته‌ی پایین‌دست حفره از این قانون پیروی نمی‌کند؛ یعنی افزایش در عرض پشته‌ی آبستگی به‌مراتب بیش‌تر از طول آن است.

#### ۴-۵-ارائه رابطه‌ی بی‌بعد برای برآورد حداکثر عمق آبستگی پایین‌دست سدهای

##### مخزنی

به‌منظور تعیین رابطه‌ی بی‌بعد برای برآورد حداکثر عمق آبستگی، تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از آنالیز ابعادی انجام شده (رابطه‌ی ۳-۷) و نرم‌افزار SPSS انجام پذیرفت. به‌طوری که پس از انجام آنالیز ابعادی و تعیین فرم عمومی معادله‌ی حاکم بر مسأله، ضرائب رابطه‌ی مذکور با استفاده از آنالیز رگرسیون<sup>۱</sup> تعیین گردید.

برای تعیین بهترین رابطه‌ی رگرسیونی بین پارامترها، روابط متعدد خطی و غیرخطی با استفاده از پارامترهای ورودی مختلف به‌دست آمد. بهترین مدل رگرسیون خطی بین متغیر وابسته<sup>۲</sup> یا معیار<sup>۳</sup> ( $d_s$ ) و متغیرهای مستقل<sup>۴</sup> به‌صورت رابطه‌ی (۴-۱) ارائه می‌گردد:

$$\frac{d_s}{h_{tw}} = 2.325 + 0.028F_g - 0.037\theta \quad (۴-۱)$$

<sup>۱</sup> Regression analysis

<sup>۲</sup> Dependent variable

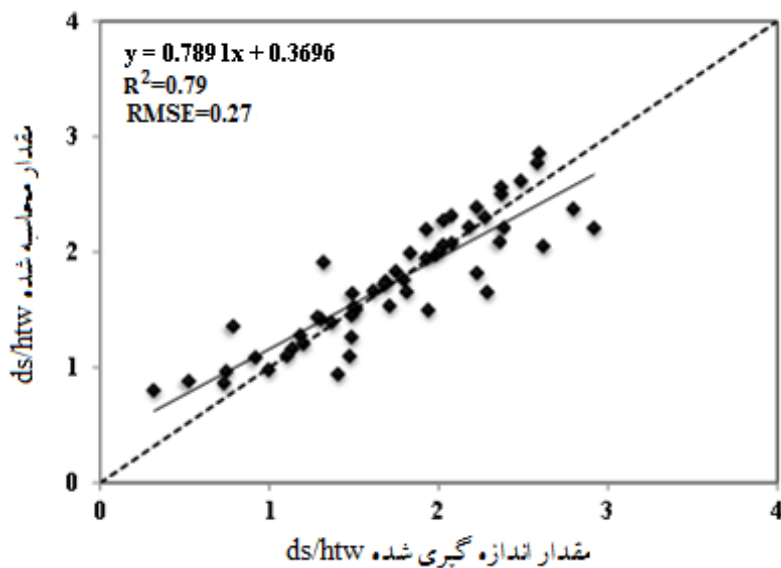
<sup>۳</sup> Criterion variable

<sup>۴</sup> Independent variable



که در این رابطه  $d_s$  حداکثر عمق حفره‌ی آبستگي (متر)،  $h_{tw}$  عمق پایاب (متر)،  $F_g$  عدد فرود ذره ( $F_g = V_j / \sqrt{g(G_s - 1)D_{50}}$ )،  $\theta$  زاویه‌ی برخورد جت‌های ریزشی آزاد نسبت به صفحه‌ی افق (درجه)،  $V_j$  سرعت جت آب خروجی از دریچه‌ها (متر بر ثانیه)،  $g$  شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)،  $G_s$  چگالی نسبی ( $G_s = \rho_s / \rho$ )،  $\rho_s$  چگالی ذرات بستر و  $\rho$  چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب) و  $D_{50}$  قطر متوسط ذرات رسوب بستر پایین‌دست دریچه‌ها (متر) می‌باشد.

شکل (۴-۲۷) مقادیر  $d_s/h_{tw}$  محاسبه شده با استفاده از فرمول (۴-۱) را در مقابل مقادیر  $d_s/h_{tw}$  اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۷- مقادیر  $d_s/h_{tw}$  محاسبه شده با استفاده از رابطه (۴-۱)، در مقابل مقادیر  $d_s/h_{tw}$  اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها

معیار ارزیابی مدل رگرسیون ضریب تعیین ( $R^2$ ) و جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) می‌باشد. ضریب تعیین برابر با مجذور ضریب همبستگی ( $R$ ) است و لذا:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (۲-۴)$$

که در این رابطه  $O_i$  نشانگر پارامتر مشاهده شده،  $P_i$  پارامتر پیش‌بینی شده،  $\bar{O}$  متوسط پارامترهای مشاهداتی و  $n$  تعداد نمونه‌ها می‌باشد. مقدار  $R^2$  همواره بین صفر و یک است. هرگاه ضریب همبستگی صفر گردد، که به آن همبستگی باطل<sup>۱</sup> نیز می‌گویند، نشانگر این مطلب است که ارتباط مناسبی بین متغیر مشاهداتی و متغیر پیش‌بینی شده وجود ندارد.

بر اساس میانگین داده‌ها، می‌توان معادله‌ی (۲-۴) را به فرم زیر نیز نوشت:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n P_i O_i - \frac{(\sum_{i=1}^n P_i)(\sum_{i=1}^n O_i)}{n}}{\left[ \sum_{i=1}^n P_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n P_i)^2}{n} \right]^{0.5} \left[ \sum_{i=1}^n O_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n O_i)^2}{n} \right]^{0.5}} \quad (۳-۴)$$

این فرم از معادله در عمل به دلیل عدم نیاز به محاسبه‌ی مقادیر میانگین داده‌ها، بیش‌تر کاربرد دارد. جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) نیز بیان‌گر تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی است که با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۴-۴)$$

که در این رابطه  $O_i$  نشانگر پارامتر مشاهده شده،  $P_i$  پارامتر پیش‌بینی شده و  $n$  تعداد نمونه‌ها می‌باشد. در نهایت رابطه‌ی (۴-۱) به ترتیب دارای ضریب تعیین ( $R^2$ ) و ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE) معادل ۰/۷۹ و ۰/۲۷ می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در معادله‌ی (۴-۱) تعداد پارامترهای کم‌تری برای ارزیابی دخالت دارند، اما با این حال همبستگی ( $R=۰/۸۹$ ) مناسبی بین داده‌ها مشاهده

<sup>۱</sup> Null correlation

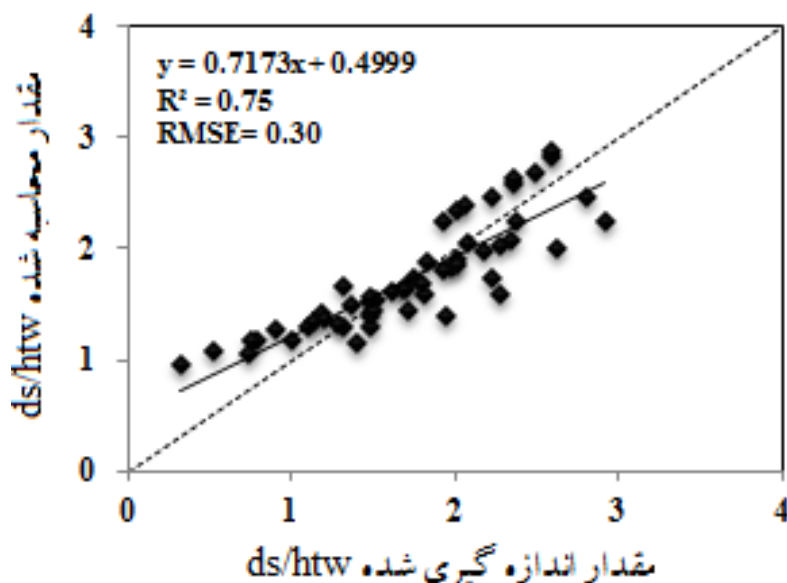
می‌شود و RMSE قابل قبولی نیز برای مدل، به دست آمده است. هرچه پارامترهای کم‌تری در مدل مورد بررسی قرار گیرد (در صورتی که از دقت مدل کم نشود)، از لحاظ اقتصادی به صرفه‌تر، از لحاظ علمی قابل اجراتر و از لحاظ آزمایشگاهی نیز خطای کم‌تری دارد.

هم‌چنین در بین معادلات غیرخطی به دست آمده با استفاده از پارامترهای دخیل در این پایان‌نامه، بهترین مدل رگرسیون غیرخطی بین  $d_s$  و متغیرهای مستقل با  $R^2=0.75$  و  $RMSE=0.30$  به صورت رابطه‌ی (۵-۴) ارائه می‌گردد:

$$\frac{d_s}{h_{tw}} = 4.271 (F_g)^{0.270} (\theta)^{-0.510} \quad (5-4)$$

پارامترهای این رابطه مشابه رابطه‌ی (۱-۴) تعریف می‌شوند.

شکل (۲۸-۴) نیز مقادیر پارامتر  $d_s/h_{tw}$  محاسبه شده با استفاده از فرمول (۵-۴) را در مقابل مقادیر  $d_s/h_{tw}$  اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۲۸-۴- مقادیر  $d_s/h_{tw}$  محاسبه شده با استفاده از رابطه (۵-۴)، در مقابل مقادیر  $d_s/h_{tw}$  اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها

در میان گزینه‌های مختلف باید کلیه عوامل مثبت و منفی، مطالعه و ارزیابی شده و نهایتاً طی یک فرآیند علمی و منطقی، بهترین گزینه مشخص گردد. مقدار RMSE کم‌تر و  $R^2$  بالاتر نشان‌دهنده‌ی این است که معادله‌ی رگرسیونی انتخاب شده، توصیف مناسب‌تری از روند تغییرات داده‌های مربوط به حداکثر عمق آبشستگی دارد و به‌عبارت دیگر دارای قابلیت اعتماد بالاست.

با توجه به نتایج به‌دست آمده، روش خطی مقادیر پارامتر نسبی  $d_s/h_{tw}$  را خوب پیش‌بینی کرده است. همچنین در نمودار مربوط به معادله‌ی خطی (شکل ۴-۲۷)، پراکنش اندک نقاط در اطراف خط رگرسیون نشان‌دهنده‌ی برازش مناسب داده‌های محاسباتی نرم‌افزار بر داده‌های مشاهده شده در آزمایشگاه می‌باشد. این عوامل نشان می‌دهند که معادله‌ی (۴-۱) مقدار دقیق‌تری نسبت به معادله‌ی (۴-۵) به‌دست می‌دهد، ولی تفاوت بین این دو مقدار کم خواهد بود.

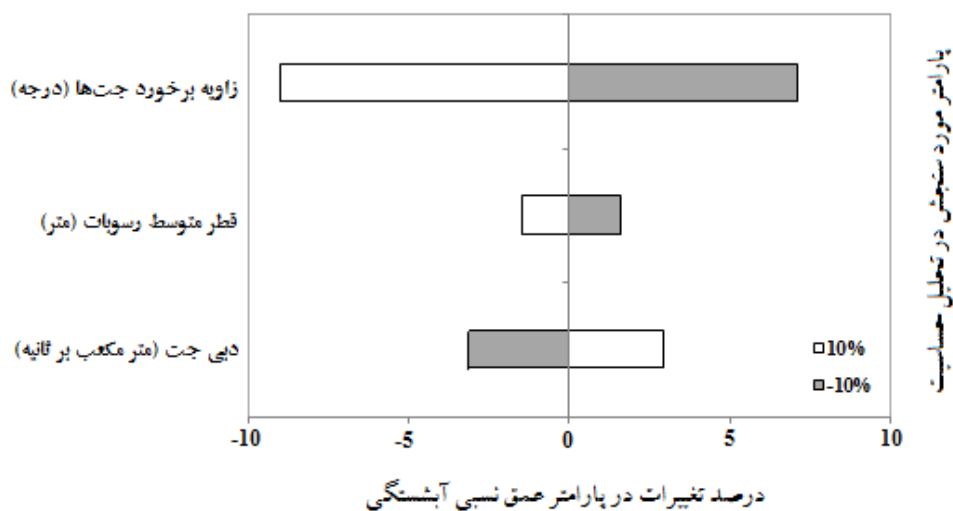
## ۵-۵- تحلیل حساسیت رابطه خطی ارائه شده در این تحقیق نسبت به پارامترهای

### مؤثر در ایجاد حفره آبشستگی

به‌منظور بررسی پارامترهای مؤثر بر رابطه‌ی عمومی معرفی شده در تخمین حداکثر عمق آبشستگی، نسبت به تحلیل حساسیت رابطه‌ی (۴-۱) اقدام گردید. بدین منظور ابتدا مقادیر پارامترهای دبی جت آب خروجی از دریچه‌ها ( $Q_j$ )، قطر متوسط رسوبات بستر ( $D_{50}$ ) و زاویه‌ی برخورد جت‌های ریزشی آزاد نسبت به صفحه‌ی افق ( $\theta$ )، به‌میزان  $\pm 10$ ،  $\pm 20$  و  $\pm 30$  درصد نمود داده شد. سپس نتیجه‌ی این تغییرات بر عملکرد رابطه‌ی (۴-۱) در تخمین پارامتر نسبی  $d_s/h_{tw}$  مورد ارزیابی قرار گرفت.

شکل (۴-۲۹) نمایان‌گر تحلیل حساسیت پارامتر  $d_s/h_{tw}$  در مقابل پارامترهای  $Q_j$ ،  $D_{50}$  و  $\theta$ ، با اعمال  $\pm 10$  درصد تغییر می‌باشد. تحلیل‌ها حاکی از آن است که افزایش ۱۰ درصد در دبی جت، منجر به رشد ۲/۹۶ درصد در پارامتر  $d_s/h_{tw}$  می‌گردد؛ در نقطه‌ی مقابل با کاهش ۱۰ درصد از  $Q_j$ ، عمق نسبی آبشستگی با کاهش معادل ۳/۱۸ درصد روبرو خواهد بود. در رابطه با قطر متوسط رسوبات بستر نیز

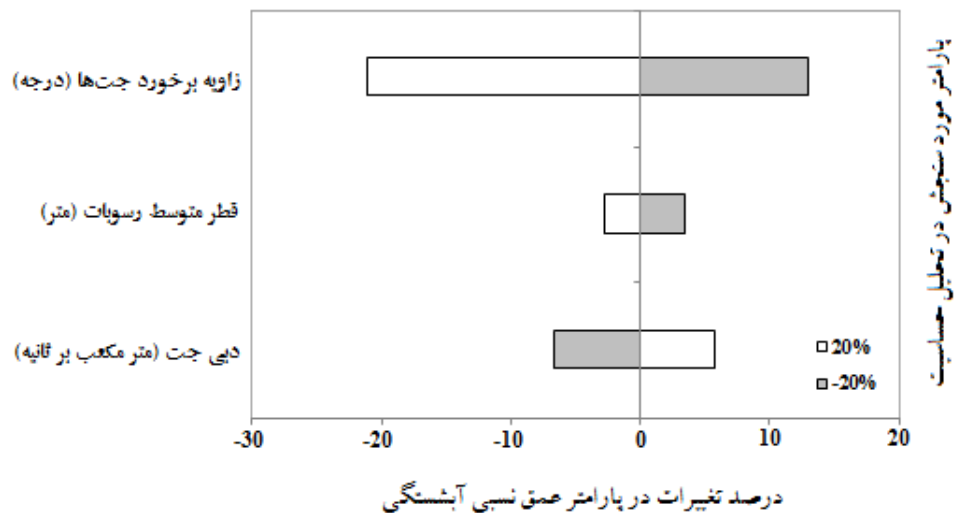
می‌توان گفت که افزایش ۱۰ درصد در  $D_{50}$ ، منجر به کاهش ۱/۴۵ درصد در پارامتر نسبی  $d_s/h_{tw}$  می‌گردد؛ در نقطه‌ی مقابل با کاهش ۱۰ درصد از  $D_{50}$ ، عمق نسبی آبشستگی با رشدی معادل ۱/۶۳ درصد مواجه خواهد بود. تغییرات اعمال شده در زاویه‌ی برخورد جت‌های ریزشی آزاد، از آهنگ تغییراتی مخالف دبی جت برخوردار است. نتایج حاصل از کاهش ۱۰ درصد از زاویه‌ی برخورد جت‌ها نسبت به صفحه‌ی افق در آزمون مورد بحث نشان داد که پارامتر  $d_s/h_{tw}$  با رشدی معادل ۷/۱۰ درصد مواجه است. در نقطه‌ی مقابل، افزایش ۱۰ درصدی پارامتر  $\theta$ ، منجر به کاهش ۸/۹۹ درصد در میزان عمق نسبی آبشستگی می‌گردد.



شکل ۴-۲۹- تحلیل حساسیت پارامتر  $d_s/h_{tw}$  در مقابل پارامترهای  $Q_j$ ،  $D_{50}$  و  $\theta$  با اعمال  $\pm 10\%$  درصد تغییر

در شکل (۴-۳۰) ملاحظه می‌شود که افزایش ۲۰ درصد در دبی جت، منجر به رشد ۵/۷۱ درصد در پارامتر  $d_s/h_{tw}$  می‌گردد؛ در نقطه‌ی مقابل با کاهش ۲۰ درصد از  $Q_j$ ، عمق نسبی آبشستگی با کاهش معادل ۶/۶۲ درصد روبرو خواهد بود. در تحلیلی مشابه در خصوص قطر متوسط رسوبات بستر می‌توان چنین بیان نمود که افزایش ۲۰ درصد در  $D_{50}$ ، منجر به کاهش ۲/۷۶ درصد در پارامتر نسبی  $d_s/h_{tw}$

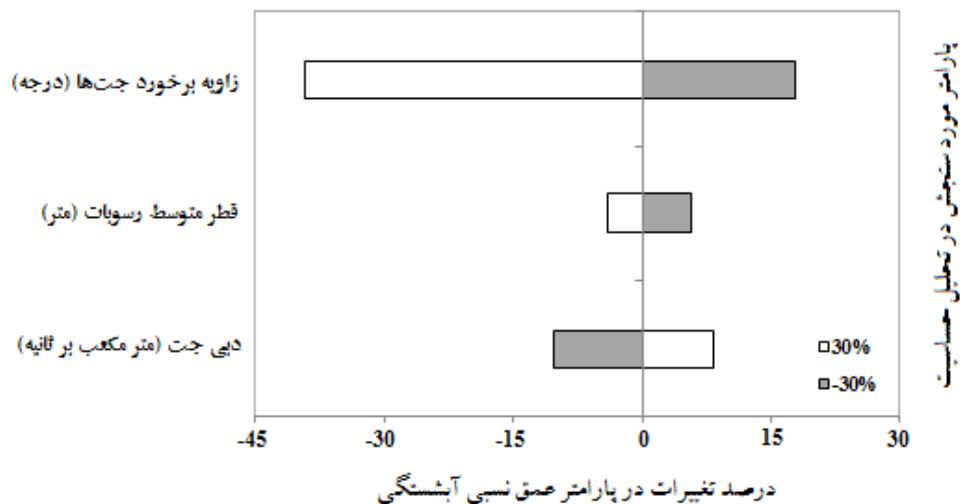
می‌گردد؛ در حالی که با کاهش ۲۰ درصد از  $D_{50}$ ، عمق نسبی آبستتگی با رشدی معادل ۳/۴۷ درصد مواجه خواهد بود. در نهایت کاهش ۲۰ درصد از زاویه‌ی برخورد جت‌ها نسبت به صفحه افق، نشان داد که پارامتر  $d_s/h_{tw}$  با رشدی معادل ۱۲/۹۳ درصد مواجه است. در نقطه‌ی مقابل نیز، با افزایش ۲۰ درصدی پارامتر  $\theta$ ، عمق نسبی آبستتگی ۲۱/۱۰ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۳- تحلیل حساسیت پارامتر  $d_s/h_{tw}$  در مقابل پارامترهای  $Q_z$ ،  $D_{50}$  و  $\theta$  با اعمال  $\pm 20\%$  درصد تغییر

شکل (۴-۳) نمایان‌گر تغییرات عمق نسبی آبستتگی ( $d_s/h_{tw}$ )، به‌ازای  $\pm 30\%$  درصد تغییر در پارامترهای  $Q_z$ ،  $D_{50}$  و  $\theta$  است. مطابق شکل مذکور افزایش ۳۰ درصد در دبی جت، منجر به رشد ۸/۳۰ درصد در پارامتر  $d_s/h_{tw}$  می‌گردد؛ در نقطه‌ی مقابل با کاهش ۳۰ درصد از  $Q_z$ ، عمق نسبی آبستتگی با کاهشی معادل ۱۰/۳۵ درصد روبرو خواهد بود. در خصوص اندازه‌ی متوسط ذرات رسوب نیز افزایش ۳۰ درصد در  $D_{50}$ ، منجر به کاهش ۳/۹۵ درصد در پارامتر  $d_s/h_{tw}$  می‌گردد؛ در نقطه‌ی مقابل با کاهش ۳۰ درصد از  $D_{50}$ ، عمق نسبی آبستتگی با رشدی معادل ۵/۵۹ درصد مواجه خواهد بود. همچنین کاهش ۳۰ درصد از زاویه‌ی برخورد جت‌ها، نشان داد که پارامتر  $d_s/h_{tw}$  با رشدی معادل ۱۷/۸۵ درصد

مواجهه است؛ در حالی که افزایش ۳۰ درصد به پارامتر  $\theta$ ، منجر به کاهش ۳۹/۲۳ درصد در عمق نسبی آبشستگی می‌گردد.



شکل ۴-۳۱- تحلیل حساسیت پارامتر  $d_s/h_{tw}$  در مقابل پارامترهای  $Q_j$ ،  $D_{50}$  و  $\theta$  با اعمال  $\pm 30\%$  درصد تغییر

به‌طور کلی در راستای بررسی عملکرد رابطه‌ی (۴-۱) در تخمین پارامتر نسبی  $d_s/h_{tw}$ ، نتایج حاصل از اعمال  $\pm 10\%$ ،  $\pm 20\%$  و  $\pm 30\%$  درصد تغییر در پارامترهای  $Q_j$ ،  $D_{50}$  و  $\theta$  در جدول (۴-۵) ارائه شده است.

جدول ۴-۵- مجموع تغییرات پارامتر  $d_s/h_{tw}$  در اثر  $\pm 10\%$ ،  $\pm 20\%$  و  $\pm 30\%$  درصد تغییر در پارامترهای  $Q_j$ ،  $D_{50}$  و  $\theta$

درصد تغییرات			پارامتر
$\pm 30\%$	$\pm 20\%$	$\pm 10\%$	
۱۸/۶۵	۱۲/۳۳	۶/۱۴	$Q_j$ ( $m^3/s$ )
۹/۵۴	۶/۲۳	۳/۰۸	$D_{50}$ (m)
۵۷/۰۸	۳۴/۰۳	۱۶/۰۹	$\theta$ (degree)

همان‌طور که از جدول (۴-۵) مشهود است زاویه‌ی برخورد جت‌های ریزشی آزاد و قطر متوسط رسوبات بستر به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین تأثیر را در تخمین پارامتر  $d_s/h_{tw}$  دارند. علت این امر را می‌توان در شکل ظاهری رابطه‌ی ارائه شده جستجو نمود. با توجه به این که در رابطه‌ی (۴-۱)، قطر متوسط رسوبات از توان  $0/5$  برخوردار است، این امر منجر به کاهش اثر این پارامتر در مقابل دبی جت و زاویه‌ی برخورد جت‌ها شده است.



فصل پنجم

نتیجہ گیری و پیشہ داری

## ۵-۱- نتیجه گیری

پایان نامه‌ی حاضر به منظور بررسی آزمایشگاهی آبشستگی پایین دست دریاچه‌های سدهای مخزنی تحت اثر جت‌های ریزشی آزاد انجام شده است. تفاوت عمده‌ی مشخصات این تحقیق را با تحقیقات پیشین، می‌توان در تعداد جت‌های ریزشی و زاویه‌ی مورد استفاده در استقرار دریاچه‌ها جستجو کرد. عمده نتایج حاصل از تحقیق حاضر را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

۱- تغییرات زمانی حفره‌ی ایجاد شده در اثر برخورد جت‌های ریزشی آزاد به بستر پایین دست دریاچه‌ها، نشان می‌دهد که آبشستگی ابتدا به صورت عمقی گسترش یافته و در زمان کوتاهی به مقدار ثابتی می‌رسد؛ در صورتی که گسترش طولی و عرضی آن ادامه دارد.

۲- تغییرات دبی جت ( $Q_j$ )، بر آبشستگی پایین دست سدهای مخزنی در تمامی دانه‌بندی‌ها و زوایای مختلف برخورد جت‌ها، روند یکسانی را نشان می‌دهد. به طوری که افزایش  $Q_j$  از  $1/32$  به  $5/14$  لیتر بر ثانیه در یک دانه‌بندی و زاویه‌ی ثابت ( $D_{50}=6/75\text{mm}$  و  $\theta=15^\circ$ )، موجب افزایش عمق حفره، افزایش گسترش طولی و عرضی حفره، و در نهایت افزایش حجم حفره به ترتیب به میزان  $74/58$ ،  $58/33$ ،  $27/27$  و  $95/62$  درصد می‌گردد. هم‌چنین محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی از انتهای دریاچه‌ها حدود  $58/82$  درصد دور می‌شود.

۳- افزایش قطر متوسط ذرات رسوب ( $D_{50}$ )، تأثیر معکوس در مقدار آبشستگی دارد. به طوری که با افزایش  $D_{50}$  از  $1/7$  به  $6/75$  میلی‌متر در یک دبی و زاویه‌ی ثابت ( $Q_j=5/14\text{Lit/s}$  و  $\theta=15^\circ$ )، حداکثر عمق آبشستگی حدود  $27/27$  درصد کاهش یافته و محل وقوع آن حدود  $5/56$  درصد به دریاچه‌ها نزدیک می‌شود. هم‌چنین با کاهش گسترش عرضی حفره، حجم حفره‌ی آبشستگی و نیز ارتفاع برآمدگی رسوبات پایین دست حفره به ترتیب حدود  $55/69$  و  $30/91$  درصد کم می‌شود.

۴- افزایش زاویه‌ی برخورد جت‌های ریزشی آزاد نسبت به صفحه‌ی افق ( $\theta$ )، تأثیر زیادی بر میزان حداکثر عمق آبشستگی و حجم حفره‌ی ایجاد شده دارد. به طوری که در یک دبی و دانه‌بندی ثابت ( $Q_j=5/14 \text{ Lit/s}$  و  $D_{50}=6/75 \text{ mm}$ )، با افزایش  $\theta$  از ۱۵ به ۳۰ درجه و همین‌طور از ۳۰ به ۴۵ درجه انرژی جنبشی جت آب خروجی تحلیل رفته، در نهایت  $d_s$  به ترتیب ۱۳/۵۶ و ۲۶/۴۷ درصد کاهش می‌یابد. هم‌چنین حجم حفره‌ی آبشستگی در زاویه‌ی ۱۵ درجه ۱۲/۹۵ درصد بیش‌تر از زاویه‌ی ۳۰ درجه و در زاویه‌ی ۳۰ درجه ۱۶/۳۱ درصد بیش‌تر از زاویه‌ی ۴۵ درجه است.

۵- افزایش زاویه‌ی برخورد جت‌ها نسبت به صفحه‌ی افق، منجر به افزایش گسترش طولی و کاهش گسترش عرضی حفره‌ی آبشستگی می‌گردد. به طوری که در بحرانی‌ترین شرایط در این تحقیق (رسوبات ریزدانه با  $D_{50}=1/7 \text{ mm}$  و بیش‌ترین دبی جت معادل با  $Q_j=5/14 \text{ Lit/s}$ )، بیش‌ترین طول حفره برابر ۹۵ سانتی‌متر در زاویه‌ی ۴۵ درجه و بیش‌ترین عرض حفره برابر ۷۰ سانتی‌متر در زاویه‌ی ۱۵ درجه می‌باشد.

۶- با انجام آنالیز ابعادی به روش باکینگهام (قضیه  $\pi$ ) و ترکیب معادلات به‌دست آمده، مشخص گردید که عمق نسبی آبشستگی ( $d_s/h_{tw}$ ) تابعی از عدد فرود ذره ( $F_g = V_j/\sqrt{g(G_s - 1)D_{50}}$ ) و زاویه‌ی برخورد جت‌های ریزشی آزاد نسبت به صفحه‌ی افق ( $\theta$ ) است.

۷- در تحقیق حاضر رابطه‌ی خطی بهترین برازش را بر روی داده‌های آزمایشگاهی دارد که توسط رابطه‌ی (۱-۵) نشان داده شده است:

$$\frac{d_s}{h_{tw}} = 2.325 + \frac{0.028V_j}{\sqrt{g(G_s - 1)D_{50}}} - 0.037\theta \quad (1-5)$$

که در این رابطه  $d_s$  حداکثر عمق آبشستگی (متر)،  $h_{tw}$  عمق پایاب (متر)،  $V_j$  سرعت جت خروجی (متر بر ثانیه)،  $g$  شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)،  $G_s$  چگالی نسبی ( $G_s = \rho_s/\rho$ )،  $\rho_s$  چگالی ذرات بستر و

$\rho$  چگالی آب (کیلوگرم بر متر مکعب)،  $D_{50}$  قطر متوسط رسوبات بستر (متر) و  $\theta$  زاویه‌ی برخورد جت‌های ریزشی آزاد نسبت به صفحه‌ی افق (درجه) می‌باشد.

۸- مقادیر  $d_s/h_{tw}$  محاسبه شده در مقابل مقادیر  $d_s/h_{tw}$  اندازه‌گیری شده، به ترتیب دارای ضریب همبستگی (R) و ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE) معادل ۰/۸۹ و ۰/۲۷ می‌باشد.

۹- آنالیز حساسیت صورت گرفته بر رابطه‌ی معرفی شده در این تحقیق (رابطه‌ی ۵-۱) نشان داد که با اعمال  $\pm 10\%$ ،  $\pm 20\%$  و  $\pm 30\%$  درصد تغییر در پارامترهای  $Q_z$ ،  $D_{50}$  و  $\theta$ ، زاویه‌ی برخورد جت‌ها و قطر متوسط رسوبات بستر به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین تأثیر را در تخمین پارامتر  $d_s/h_{tw}$  دارند. به طوری که اعمال  $\pm 30\%$  درصد تغییر در  $Q_z$ ،  $D_{50}$  و  $\theta$ ، در مجموع  $d_s/h_{tw}$  را به ترتیب ۱۸/۶۵، ۹/۵۴ و ۵۷/۰۸ درصد تحت تأثیر قرار می‌دهد.

## ۵-۲- پیشنهادها

با مطالعه تحقیقات گذشته و با توجه به اهمیت مبحث آبشستگی پایین دست سازه‌های هیدرولیکی، نیاز به ارائه روشی برای کنترل آبشستگی یک ضرورت شناخته شده است. در این پایان‌نامه برخی از پارامترهای مؤثر بر آبشستگی حاصل از جت‌های ریزشی آزاد مورد بررسی قرار گرفت. برای این که بتوان از نتایج مؤثرتری در این راستا بهره جست موارد زیر به عنوان موضوعاتی برای تحقیقات آینده توصیه می‌شود:

۱- در پایان‌نامه‌ی حاضر به بررسی تأثیر پارامترهای دبی جت، قطر متوسط رسوبات بستر و زاویه‌ی برخورد جت‌های ریزشی آزاد (نسبت به صفحه‌ی افق) پرداخته شده است. توصیه می‌شود تأثیر دیگر پارامترها نظیر ارتفاع ریزش جت، عمق پایاب و ... بر روی آبشستگی حاصل از جت‌های ریزشی مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲- در پایان‌نامه‌ی حاضر از سه نوع رسوب غیرچسبیده با دانه‌بندی یکنواخت در بستر پایین‌دست دریاچه‌ها استفاده شده است؛ می‌توان برای طرح‌های آینده به بررسی اثر غیریکنواختی رسوبات بستر بر ابعاد حفره‌ی آبشستگی پایین‌دست جت‌های ریزشی پرداخت.

۳- همان‌طور که در این پایان‌نامه ملاحظه شد، دریاچه‌ها در ارتفاع ثابت ۹۵ سانتی‌متر و به فاصله‌ی ۱۰ سانتی‌متر از هم در یک راستای افقی قرار گرفته و اثر زاویه‌ی استقرار آن‌ها، بر آبشستگی حاصل از جت‌های ریزشی بررسی شد. پیشنهاد می‌شود در طرح‌های آینده در ارتفاعات مختلف و در هر ارتفاع یک دریاچه قرار داده شده و اثر جت ریزشی افقی بر روی آبشستگی پایین‌دست دریاچه‌ها بررسی شود.

۴- در پایان‌نامه‌ی حاضر از سه دریاچه برای بررسی آبشستگی موضعی در پایین‌دست سدهای مخزنی استفاده شد. توصیه می‌شود در طرح‌های آینده حالت‌های مختلفی برای خروج جت در نظر گرفته شود و میزان اثرگذاری هر یک از حالات در آبشستگی ایجاد شده مورد ارزیابی قرار گیرد. به‌عنوان مثال دریاچه‌ی وسط را بسته و آزمایش‌ها با حضور دو دریاچه تکرار شود (شکل ۱-۲).



منابع

۱. آذر فرادنبه، ا. (۱۳۷۷)، "اثر دانه بندی مصالح بر میزان آبشستگی پایین دست سرریزهای ریزشی آزاد"، پایان-نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی.
۲. اختری ر و صانعی م، (۱۳۸۵)، "تخمین میزان آبشستگی در پایین دست سرریزهای آبشاری"، همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۳. ارمغانی ا، لشکرآرا ب. و آخوندعلی ع.م.، (۱۳۹۲)، "بررسی آزمایشگاهی اثر زاویه جت بر ابعاد حفره‌ی آبشستگی در حوضچه‌ی استغراق"، دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تهران.
۴. اکبری غ.ح، کاویانپور اصفهانی م.ر.، روشن ر.، سلطانی سامانی ا. و جمعه بیدختی ا.، (۱۳۹۰)، "مطالعه‌ی آزمایشگاهی اثر تغییرات دبی و عمق پایاب بر بیش‌ترین عمق آبشستگی پایین دست پرتاب‌کننده‌ی جامی شکل"، دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه گیلان.
۵. امین پوری، فرهودی ج و روشن ر، (۱۳۹۳)، "بررسی پدیده‌ی آبشستگی موضعی در پایین دست سرریزهای پلکانی"، سیزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تبریز.
۶. بیات ح، (۱۳۷۹)، "اندرکنش سازه‌های آبی و فرسایش"، جلد اول، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، صفحه ۵۸.
۷. پناهی س، اشتیاق ف، فرسادی زاده د، حسین زاده دلیر ع و کریمی ج، (۱۳۹۱)، "پیش‌بینی ماکزیمم عمق آبشستگی و برآورد درصد تغییرات آن در پایین دست سازه‌ی آرام‌کننده‌ی جامی مستغرق ساده نسبت به دنداندار"، نهمین کنگره‌ی بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.
۸. پیرستانی م.ر.، رضازاده م. و کاویانی م.، (۱۳۹۰)، "مقایسه‌ی میزان آبشستگی ناشی از برخورد جت‌های زاویه‌دار مستغرق و ریزشی آزاد"، دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه گیلان.
۹. چاخولو م.، توکلی ا.، حسینی مبرا س.ع. و رضایی ح.، (۱۳۹۱)، "بررسی سه‌بعدی تأثیر دبی‌های مختلف بر آبشستگی رسوبات پایین دست سرریز لبه تیز"، یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه ارومیه.
۱۰. خداشناس س.ر.، (۱۳۸۸)، "بررسی عملکرد طوق و شکاف در کاهش آبشستگی پایه‌ی پل"، پایان‌نامه ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.
۱۱. دائمی ع.ن.، امانیان ا.ر. و زراتی، (۱۳۷۶)، "پیش‌بینی آبشستگی در اثر جت‌های ریزشی آزاد"، چهارمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف تهران.



۱۲. سعیدی نژاد م.ر.، (۱۳۸۴)، "تحلیل آبشستگی در پایین دست جت‌های ریزشی مستطیل شکل"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی.
۱۳. شفاعی بجستان م.، (۱۳۸۷)، "هیدرولیک انتقال رسوب"، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
۱۴. شهرکی ن.، فرسادی زاده د و محمدیان ع.، (۱۳۹۱)، "اثر بازشدگی دریچه و دبی جریان در آبشستگی ناشی از جت مستغرق عبوری از دریچه‌ی کشویی"، یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه ارومیه.
۱۵. صاعی م.، بنی‌هاشمی م.ع. و حدیدی ه.، (۱۳۸۷)، "بررسی آزمایشگاهی تأثیر شکل روزنه بر آبشستگی موضعی پایین دست جت‌های ریزشی"، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی عمران.
۱۶. صاعی م و سلطانی ن.، (۱۳۸۸)، "بررسی آزمایشگاهی تخمین حجم حفره‌ی آبشستگی ناشی از جریان ریزشی آزاد"، اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی شاهرود.
۱۷. قدسیان م. و رنجبر ح.ر.، (۱۳۸۷)، "اثر ارتفاع ریزش بر حداکثر ابعاد حفره‌ی آبشستگی ناشی از جت‌های ریزشی آزاد"، هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه صنعت آب و برق تهران.
۱۸. کلانتری م و بازرگان ج.، (۱۳۹۳)، "تخمین عمق آبشستگی پایین دست پرتابه‌های جامی شکل در حوضچه‌ی استغراق"، پانزدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، دانشگاه ارومیه.
۱۹. لشکرآرا ب.، لشکرآرا ع و فتاحی مقدم م.، (۱۳۹۴)، "تخمین ابعاد حفره آبشستگی تحت اثر جت قائم دایره‌ای مستغرق"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۴۵، شماره ۱.
۲۰. معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی جمهوری اسلامی ایران، (۱۳۹۰)، "راهنمای روش‌های محاسبه آبشستگی موضعی"، نشریه شماره ۵۴۹.
۲۱. موسوی س.م.، شفاعی بجستان م. و بینا م.، (۱۳۸۵)، "بررسی و تعیین حداکثر عمق آبشستگی پایین دست سرریز پلکانی در شرایط جریان ریزشی"، هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز.
۲۲. ناصحی م.، (۱۳۷۵)، "پروفیل آبشستگی در پایین دست آبشارهای قائم"، چهارمین سمینار مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، ص. ۴۷۴ تا ۴۸۸.
۲۳. نجفی ج.، (۱۳۸۱)، "آبشستگی پایین دست کالورت لوله‌ای"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی.

۲۴. وزارت نیرو، (۱۳۸۱)، "راهنمای روش‌های محاسبه‌ی آبشستگی موضعی"، نشریه شماره ۳۱۸، انتشارات سازمان

مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

25. Aderibigbe O.O. and Rajaratnam N., (1996), "Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets", **J. of Hydraulic Research**, Vol. 34, NO. 1, PP. 19-33.
26. Alabi P.D., (2006), "Time development of local scour at bridge pier fitted with a collar", M.Sc. Thesis, University of Saskatchewan, Canada.
27. Ansari S.A., Kothyari U.C. and Ranga Raju K.G., (2003), "Influence of Cohesion on Scour under Submerged Circular Vertical Jet", **J. of Hydraulic Engineering**, 129 (12), PP. 1014-1019.
28. Breusers H.N.C. and Raudkivi A.J., (1991), "Scouring", Hydraulic structures design manual, volume 2, Balkema, Rotterdam.
29. Breusers H.N.C., Nicollet G. and Shen H.W., (1997), "Local scour around cylindrical piers", **J. of Hydraulic Research**, 15(3), pp 211-252.
30. Carstens, M.R., (1966), Similarity Laws for Localized Scour, **J. of Hydraulics Divison**, ASCE, 92(HY3), Proceedings Paper 4818: 13-36.
31. Chakravarti A., Jain R.K. and Kothyari U.C., (2013), "Scour under Submerged Circular Vertical Jets in Cohesionless Sediments", **ISH J. of Hydraulic Engineering**.
32. Clarke F.R.W., (1962), "The action of submerged jets on movable materials", PhD Thesis Imperial college, London.
33. Cola R., (1965), "Energy dissipation of high velocity vertical jet entering a basin", International association for hydraulic research conference, No. X1, Leningrad, U.S.S.R., Paper 1.52, Vol. 1.
34. Davis, C.V. and Sorenson, E.K., (1969), Handbook of applied hydraulic, 3<sup>rd</sup> ed., Chapt.20, McGraw Hill Book Co., New York.
35. Doehring F. and Abt S.R., (1994), "Drop height influence on outlet scour", **J. of Hydraulic Engineering**, ASCE, Vol. 120, No. 12, PP. 1470-1476.
36. Ghodsian M., (2002), "Scour hole geometry downstream of a culvert", 13<sup>th</sup> APD-IAHR Conference, Singapore.
37. Ghodsian M., Melville B. and Tajkarimi D., (2006), "Local scour due to free overfall jets", **J. of Water Management**, Vol. 159, Isu WM4, PP. 253-260.

38. Hartung F. and Hausler E., (1973), "Scours, stilling basins and downstream protection under free overfall jets at dams", In: ICOLD (ed) Proceedings of the 11<sup>th</sup> congress on large dams, Madrid, Q41, Vol R3, PP. 39-56.
39. Hoffman G.J.C.M. and Booji R., (1993), "Two dimensional mathematical modeling of local scour holes", **J. of Hydraulic Research**, Vol. 31, No. 5, PP. 615-634.
40. Jaeger C h., (1939), "Uber die ahnlichkeit bei flussbaulichen modellversuchen", *Wasserwirtschaft and Wassertechnik* 34, No. 23-27.
41. Kothiyari U.C., Grade R.J. and Ranga raju K.G., (1992), "Temporal variation of scour around circular bridge piers", **J. of Hydraulic Engineering**, ASCE, 118(8), pp. 1091-1106.
42. Martins R., (1973), "Contribution to the knowledge on scour action of free jets on rocky river beds", 11<sup>th</sup> Inter. Comm. On large dams, Trans., Vol IIQ41, Paper R44, PP. 799-814.
43. Mason P. and Arumugam K., (1985), "Free jet scour below dams and flip buckets", **J. of Hydraulic Engineering**, Vol. 111, No. 2, PP. 220-223.
44. Mason P. J., (1993), "Practical guidelines for the design of flip buckets and plunge pools", *Water Power and Dam Construction*.
45. Melville W. and Chiew Y., (1999), "Time scale for local scour at bridge piers", **J. of Hydraulic Engineering**, 125(1), pp. 59-65.
46. Molinas A. and Kheireldin K., (2005), "Shear stress around vertical wall abutments", **J. of Hydraulic Engineering**, 124(2), pp. 67-80.
47. Rajaratnam N., (1981), "Erosion by plane turbulent jets", **J. of Hydraulic Research**, Vol. 19, No. 4, PP. 339-358.
48. Rajaratnam N., (1982), "Erosion by unsubmerged plane water jets", In *Applying research to hydraulic practice*, Jakson, ASCE New York, 280-288.
49. Rajaratnam N. and Mazurek K., (2003), "Erosion of sand by circular impinging water jets with small tailwater", **J. of Hydraulic Engineering**, ASCE, Vol. 129, No. 3, PP. 225-229.
50. Raudkivi A. and Ettema R., (1983), "Clear-water scour at cylindrical piers", **J. of Hydraulic Engineering**, 109(3), pp. 338-350.

51. Raudkivi A.J., (1990), "Loose boundary Hydraulic", 3<sup>rd</sup> Edition, Rotterdam, Brookfield, pp. 496.
52. Schoklitch, (1932), "Kokbildung unter Überfallstrahlen", Wasserwirtschaft.
53. Scimemi E., (1947), "Model Study of Brown Canyon Debris Barrier", Transactions, ASCE, Vol. 112, Paper No. 2319, PP. 1016-1019.
54. Strelchuck D.L., (1969), "Scour at the base of spillway buckets", M.S thesis, University of Windsor, Ontario.
55. Termini D., (2011), "Bed scouring downstream of hydraulic structures under steady flow conditions: Experimental analysis of space and time scales and implications for mathematical modeling", **J. of Hydraulic Engineering**, Vol. 132, No. 3, PP. 243-257.
56. Tuna M.C. and Emiroghlu M.E., (2013), "Scour Profiles at downstream of cascades", Department of Civil Engineering, Firat University, 23119, Elazig, Turkey.
57. Valentine F., (1967), "Considerations Concerning Scour in the Case of Flow Water Under Gates", XII Congress IAHR, Front Collins, Colorado.

## Abstract

In this research, the results of an experimental study to determine dimensions of scour hole due to free falling jets at the downstream of storage reservoirs has been presented. For this purpose, the effect of parameters such as jet discharge ( $Q_j$ ), medium diameter of bed sediments ( $D_{50}$ ) and the impinging angle of jets ( $\theta$ ) relative to horizontal plane were investigated. The experiments were carried out at the hydraulic laboratory of shahrood university of technology, in a rectangular flume with 1 m width, 2.43 m length and 1.11 m height, so that scouring was not affected by sidewalls. Water jet falls from pipes with circular section and diameter of 1.25 inch into the downstream pound. The drop height was 95 cm. The downstream pound filled with 20 cm of non-cohesive sediments with medium diameter of 1.7 mm, 3.2 mm and 6.75 mm. Experiments carried out with different discharges at the range of 1.32 to 5.14 l/s. the results of this study showed that for all experiments a scour hole performed at the downstream of falling jets and the relative scour depth ( $d_s/h_{tw}$ ) related to particles froud number ( $F_g$ ) and impinging angle of jets ( $\theta$ ). The sensitive analysis of the proposed general equation showed that  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$  and  $\pm 30\%$  changing of parameters such as  $Q_j$ ,  $D_{50}$  and  $\theta$ , impinging angle of jets and medium diameter of the bed sediments had maximum and minimum effect to estimating  $d_s/h_{tw}$ , respectively. As  $\pm 30\%$  changing of parameters such as  $Q_j$ ,  $D_{50}$  and  $\theta$  changes  $d_s/h_{tw}$  18.65 %, 9.54 % and 57.08 %, respectively.

**Key words:** Free- falling jets, impinging angle of jets, jet discharge, medium diameter of bed sediments, scour hole dimensions



**Shahrood University of Technology**

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

**Experimental investigation of scour due to water jets from outlets of  
storage dams**

**Samira Mansouri**

**Supervisor(s):**

**Dr. Khalil Azhdary**

**Dr. Samad Emamgholizadeh**

**Advisor:**

**Dr. Roozbeh Moazenzadeh**

**February 2016**