

بررسی آزمایشگاهی کاهش عمق آبشستگی پایین دست کالورت با مقطع مربع در مجاورت کفبند (شکل کالورت مربع شکل)

مصطفی منصوری^{1*}

1 - گروه مهندسی عمران، گرایش مهندسی سازه های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد، دزفول، ایران

mansuri.m72@yahoo.com

تاریخ پذیرش: 1400/12/09

تاریخ دریافت: 1399/06/25

چکیده

حفاظت از پایین دست کالورت ها در برابر فرآیند آبشستگی، به عنوان یک ساختار انتقال آب، یک مسئله بسیار مهم در طراحی کالورت است. در این تحقیق به بررسی اثر طول کفبند بستر بر روی عمق آبشستگی پایین دست کالورت پرداخته شده است. به این منظور آزمایش بر روی کفبند با طول های متفاوت به انجام آزمایش در این زمینه پرداخته شد با توجه به نتایج مشاهده گردید در فرود ذره 2 به ترتیب 22، 33 و 66 درصد و کفبند در فرود ذره 2/5 به ترتیب 15، 20 و 40 درصد و در فرود ذره 3 به ترتیب 20، 25 و 31 عمق آبشستگی را کاهش داده اند. این امر نشان می دهد که کفبند بستر در کاهش عمق آبشستگی پایین دست تأثیر مثبت دارد. همچنین عمق آبشستگی برای کفبند با در نظر گرفتن طول لایه نشان داد که با افزایش طول لایه به ازای ثابت بودن عدد فرود ذره عمق آبشستگی کاهش می یابد.

واژه های کلیدی: آبشستگی، کفبند، فرود ذره، مدل آزمایشگاهی.

مقدمه

در امان بماند ضروری می باشد (Manafpour & Sheikhloo, 2014). کالورت ها ساختارهای هیدرولیکی هستند که جریان آب را کنترل می کنند. گاه و بی گاه، از کالورت ها برای مدیریت بیش از حد رواناب ها استفاده می شود. یکی از قابل توجه ترین ملاحظات برای طراحی کالورت ها، برآورد عمق آبشستگی در پایین دست کالورت است. فرآیند آبشستگی در محل های خروجی کالورت ها به دلیل نقص های مختلف در طراحی آن می تواند اتفاق بیفتد.

آبشستگی در حقیقت جابجایی ذرات توسط جریان از محل استقرار اولیه آن ها به مکان دیگری است (نشریه، 318). بستر طبیعی کالورت در اثر عبور جریان آب دستخوش فرایش می شود، به فرسایش موضعی که در اثر جریان ایجاد می گردد آبشستگی گفته می شود. آبشستگی می تواند موجب تخریب و انهدام سازه به ویژه در مواقع سیلابی شده و طرح را با شکست روبرو سازد. تخمین واقع گرایانه آبشستگی می تواند در برآورد عمقی که شالوده باید در آن بنا شود تا از آثار فرسایش

آبشستگی در کالورت برای هر دو جریان آزاد و مستغرق مهمترین عاملی است که منجر به خسارات برگشتناپذیر می‌شود (Abt et al. 1985, 1987; Lim 1995; Najafzadeh & Kargar, 2019). یکی از مدل‌های آب شستگی‌ها، آب شستگی پایین دست کفبند بستر است. کفبند بستر ممکن است به عنوان یک بخش از یک طرح نگهداری تراز آب یا کنترل ارتفاع بستر در رودخانه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. کفبند بستر در رودخانه معمولاً به شکلی ساخته می‌شود که ارتفاع آن با تراز بستر تقریباً برابر یا بالاتر و کف در بالادست و پایین دست باشد. این سازه امکان دارد از مصالح سنگی، شمع یا سپری، بتنی، گابیون یا تور سنگی و یا به صورت ترکیبی از آنها ساخته شده باشد. کالورت یکی از مهمترین سازه‌های هیدرولیکی تقاطعی است که به منظور انتقال جریان آب از زیر خاکریز جاده، بزرگراه، راه آهن و غیره به کار می‌رود و نقش مؤثری در عبور جریان هنگام سیلاب دارد. بنابراین می‌توان گفت که کالورت‌ها ساختمان‌هایی حفاظتی هستند که هنگام عبور سیلاب و یا هرگونه جریان کنترل نشده، از کانال‌ها و سازه‌های وابسته و همچنین خاکریزها حفاظت می‌کنند. در همین راستا طراحی و اجرای دقیق آن‌ها و مدیریت بهره‌برداری و نگهداری از آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد و نقش مؤثری در طول عمر سازه دارد. آبشستگی موضعی در خروجی کالورت پدیده‌ای متداول است و از عوامل تهدیدکننده پایداری آن می‌باشد که در صورت عدم کنترل و مهار آن، پتانسیل خرابی تمامیت سازه زیربنایی آن را دارد و خسارت زیادی را به همراه می‌آورد. در خروجی کالورت به دلیل سرعت زیاد، جریان معمولاً به صورت جت افقی خارج می‌شود، به این صورت که خطوط جریان موازی با بستر می‌باشد. با برخورد جریان خروجی از کالورت به سطح آب پایاب و تغییرات سرعت، الگوی خطوط جریان تغییر می‌کند و باعث افزایش تلاطم

جریان و ایجاد جریان‌های ثانویه به شکل گرداب¹ (Eddy) در این ناحیه می‌شود که باعث جدا شدن و انتقال ذرات بستر به پایین دست و در نتیجه تشکیل گودال آبشستگی در خروجی کالورت می‌شود. رسوبات حمل شده در پایین دست تجمع پیدا می‌کنند و یک برآمدگی را تشکیل می‌دهند. با گذشت زمان انرژی گرداب‌ها توسط حجم آب درون گودال مستهلک می‌شود و گودال آبشستگی به تعادل می‌رسد. با مرور زمان و تکرار جریان سیلاب عبوری از کالورت و در صورت عدم تمهیدات لازم در این ناحیه این‌گونه آبشستگی به سمت بالادست حرکت می‌کند و باعث شسته شدن زیر سازه می‌شود و پایداری آن را مختل می‌کند. کالورت‌ها اگرچه از نظر اجرایی ساده هستند اما طرح هیدرولیکی آن‌ها تا حدودی پیچیده می‌باشد و تابعی از عوامل مختلف است که به سادگی قابل تقسیم به جریان‌های تحت فشار یا آزاد نمی‌باشد بلکه در برخی موارد ترکیبی از این دو حالت می‌باشد (Hosseini & Abrishami, 2019). طبقه بندی جریان در کالورت طبق سه مشخصه بیان می‌شود. مشخصه اول این است که ورودی کالورت مستغرق است یا خیر، که به وسیله سطح آب بالادست مشخص می‌شود. مشخصه دوم شامل ویژگی‌های جریان درون مجرا است و مشخصه سوم وضعیت جریان در پایین دست کالورت می‌باشد (Yoo & Lee, 2012). به منظور جلوگیری از آبشستگی در پایین دست کالورت از حوضچه‌های آرامش، پوشش بتنی و سنگ چین استفاده می‌شود اما در مواردی به جهت کاهش هزینه احداث و یا در مواردی که کالورت در نواحی دور افتاده باشد و از تبدیل خاکی استفاده شده باشد خروجی آن حفاظت نمی‌شود بنابراین دچار فرسایش و آبشستگی می‌شود. محققان زیادی به مطالعه و بررسی پارامترهای مؤثر در آبشستگی در

¹ . Eddy

ناحیه پایبندست کالورت پرداخته‌اند از جمله زونبرگ و همکاران با بررسی آبستگي در ناحیه خروجی کالورت‌ها بیان نمودند که سرعت خروجی شاخص اولیه برای تخمین پتانسیل فرسایش‌پذیری می‌باشد (Zevenbergen *et al.*, 2012). در تجزیه و تحلیل آبستگي باید الگوهای بلند مدت تغییر کانال را مد نظر قرار دهد. درک ژئومورفولوژی رودخانه‌ای در تعیین این بخش از تجزیه و تحلیل اهمیت دارد. این شامل ارزیابی انتقال رسوب، الگوهای کاهش کانال معکوس یا روبرو (تخریب) کانال‌ها، الگوهای رسوب-گذاری (تجمع) و مهاجرت جانبی می‌باشد. تخریب می‌تواند منجر به از بین رفتن ظرفیت زیر یک پل شود و تخریب می‌تواند باعث تضعیف پایه‌ی پل شود. در مورد تخریب طولانی مدت یک کانال، ساختارهای کنترل درجه در پایین‌دست از پل ممکن است در نظر گرفته شود. با این حال، توجه به این نکته مهم است که آبستگي محلی در اطراف عناصر ساختاری یک پل حتی با ساختارهای کنترل درجه ممکن است رخ دهد. برداشت طولانی مدت نشان دهنده نیاز احتمالی اقدامات تثبیت کننده در بالادست بستر و سیل‌گیر است که باعث کاهش بار رسوب می‌شود.

(Piristani *et al.*, 2011) میزان آبستگي بستر قابل فرسایش و توسعه آن در اثر برخورد جت‌ها توجه بسیاری از مهندسين هیدرولیک را به خود جلب کرده است. در پژوهشی، تغییرات بستر پایین‌دست یک جت در دو حالت مستغرق و ریزشی و با اعمال تغییرات دبی مورد بررسی قرار می‌گیرد. خروجی کالورت در حالت مستغرق دقیقاً مماس بر سطح مصالح بستر و در حالت غیرمستغرق 46 سانتی‌متر از سطح مصالح بستر متحرک فاصله دارد. جت‌ها در هر دو حالت زاویه‌ی 10 درجه با افق می‌سازند. نتایج حاصله مؤید این واقعیت بود که در دقایق نخست آزمایش تغییرات ابعاد آبستگي بسیار شدید است، اما با گذشت زمان، از

شدت آن در هر دو حالت مستغرق و غیر مستغرق کاسته می‌شود. به طوری که در حالت مستغرق نزدیک به 80 درصد از عمق نهایی حفره در 5 دقیقه اول رخ می‌دهد و این میزان در حالت غیرمستغرق حدوداً 70 درصد خواهد بود. Crookston & Tullis, (2012) به بررسی آستانه حرکت اولیه برای چهار نوع مصالح مختلف در کالورت قوسی با کف فرسایش‌پذیر¹ در فلولم مستطیلی پرداختند. روش‌های مختلفی برای محاسبه پارامتر θ_c شیلدز در حرکت اولیه براساس پارامترهای محلی جریان بررسی شد. منطقه‌ی حرکت اولیه برای کالورت قوسی با کف فرسایش‌پذیر در جریان کاملاً آشفته در منحنی محدودی روی دیاگرام شیلدز تعریف شد و تغییرات θ_c به عنوان تابعی از زبری نسبی مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت یک روش که با بهره‌گیری از سرعت جریان، قطر ذرات را برای کالورت قوسی با کف فرسایش‌پذیر تعیین می‌کرد، به عنوان جایگزین دیاگرام شیلدز ارائه شد.

(Zomorodian *et al.*, 2018) در مطالعه‌ای تأثیر دیواره جانبی پایین‌دست کالورت بر ابعاد گودال آبستگي موضعی با در نظر گرفتن دیواره‌هایی با زوایای 15، 30، 45، 60 و 75 درجه نسبت به خط مرکزی جریان، در دو تیپ هیدرولیکی 1 و 4 و در دو کالورت با مقطع دایره‌ای و مستطیلی بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده از دیواره با زاویه 15 درجه باعث کاهش عمق و طول گودال آبستگي و همچنین ارتفاع رسوبگذاری در پایبندست میشود که میزان کاهش عمق آبستگي در کالورت مستطیلی با تیپ 1 هیدرولیکی به میزان 35/3 درصد نسبت به تست شاهد مشاهده شد. همچنین دیواره با زاویه 30 درجه در مقطع مستطیلی با تیپ 1، با کاهش 46 درصد آبستگي عملکرد خوبی را نشان داده است. دیواره‌های جانبی با زاویه 60 و 75 درجه، عملکرد مناسبی

¹. Bottomless Arch Culvert

مصنوعی برتری قابل توجهی نسبت به معادلات سنتی داشتند. در نهایت، ثابت شده است که عبارات ریاضی ارائه شده توسط ابزارهای محاسباتی تکاملی، تعمیم کافی برای ارائه پیش‌بینی دقیق از عمق آبستستگی محلی با توجه به حفظ معنای واقعی نتایج دارد.

آبستستگی بستر در پایین دست سازه هیدرولیکی از قبیل دریچه، سرریزها و... یکی از مهم‌ترین موضوع‌های مورد توجه در علم مهندسی هیدرولیک رسوب است تغییرات ویژگی جریان در یک رودخانه در حالت تعادل سبب تغییرات ویژگی بستر جهت حرکت به حالت تعادل جدید شده است، به صورت کلی که به طور عمومی ارتفاع بستر چه به صورت رسوب‌گذاری و چه به صورت آبستستگی سعی در رسیدن به این ویژگی تعادل را دارد پدیده آبستستگی در هر جا افزایش سرعت روی بدهد به وقوع خواهد پیوست. این افزایش سرعت می‌تواند از کاهش سطح مقطع جریان به صورت تنگ شدگی مقطع باشد آبستستگی چاله‌هایی در اطراف سازه هیدرولیکی و کف بستر رودخانه ایجاد می‌کند که باعث می‌شود سازه در اثر یک سیلاب بزرگ، یعنی وقتی که بیشترین احتیاج به آن وجود دارد تخریب گردد و یا بستر رودخانه در کنار یک سازه هیدرولیکی به صورت قابل توجهی حفر شود بررسی برخی داده‌ها نشان داد که بیشترین خرابی سازه هیدرولیکی در اثر آبستستگی یا عوامل هیدرولیکی وابسته به آن صورت گرفته است. کفبند بستر در پایین دست بیشتری از سازه هیدرولیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند و آبستستگی ایجاد شده در پای کفبند می‌تواند سبب خرابی سازه گردد، پیش‌بینی شکل و ابعاد چاله آبستستگی در پایین دست این سازه از قدیم مورد توجه پژوهشگران بوده است و به دلایل پیچیدگی موضوع اکثر پژوهشگران آن را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. با وجود تمام دانش کسب شده که تاکنون در زمینه آب‌ستستگی

در کاهش آبستستگی نشان ندادند. همچنین در تیپ 1، دیواره در همه زوایا باعث کاهش عمق آبستستگی شد. اما در تیپ 4 فقط در زاویه 15 درجه عمق آبستستگی به میزان 30 درصد در مقطع دایره‌ای و 10 درصد در مقطع مستطیلی کاهش پیدا کرد. همچنین ابعاد گودال آبستستگی در پایین دست کالورت با مقطع دایره‌ای بیشتر از مقطع مستطیلی مشاهده شد. به گونه‌ای که در مقطع دایره‌ای در تیپ 1 هیدرولیکی، عمق آبستستگی به میزان 35 درصد نسبت به مستطیلی افزایش داشته است که این در تیپ 4 هیدرولیکی به میزان 95 درصد مشاهده شد. همچنین ابعاد گودال آبستستگی در تیپ 1 نسبت به تیپ 4 در همه زوایا بیشتر می‌باشد و این در حالی است که ارتفاع رسوب‌گذاری در تیپ 4 نسبت به تیپ 1 بیشتر می‌باشد. Najafzadeh & Kargar, (2019) با استفاده از برنامه نویسی (GEP)، مدل درختی (MT) و رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی (EPR) برای پیش‌بینی عمق آبستستگی در پایین دست کالورت‌ها پرداختند. متغیرهای ورودی با توجه به پارامترهای مؤثر بر عمق آبستستگی، اندازه رسوب در پایین دست هندسه کالورت و مشخصات جریان در بالادست و پایین دست تعریف می‌شوند. مجموعه داده‌های تجربی برای توسعه مدل‌ها از ادبیات مختلف جمع‌آوری شد. عملکرد مدل‌های پیشنهادی برای مراحل آموزش و تست با استفاده از چندین اقدامات آماری ارزیابی شد. نتایج عملکردها نشان داد که EPR کمترین سطح دقت را شامل شاخص توافق (IOA 0.958) و خطای میانگین مربعات ریشه (RMSE 0.419) برای پیش‌بینی عمق آبستستگی در محل‌های خروجی کالورت نسبت به موارد به دست آمده با استفاده از MT (IOA = 0.947 and RMSE = 0.471) و GEP (IOA = 0.943 and RMSE = 0.487) است. از نظر صحت، تمام معادلات پیشنهادی استخراج شده از رویکردهای هوش

تحصیل گردیده است، هنوز هم شواهد بیشتری از آبخستگی گسترده در بالادست حوضچه‌های آرامش، دریاچه کشویی، سرریزها، شیب شکن‌ها، کالورت‌ها و مجاورت پایه پل وجود دارد که می‌تواند پایداری سازه‌های هیدرولیکی را با خطر جدی مواجه کنند که این امر مهمی است.

مواد و روش‌ها

با توجه به اینکه مطالعه حاضر، مطالعه تئوری-آزمایشگاهی می‌باشد، در این قسمت به عامل‌های مؤثر مطالعه حاضر، مراحل ساخت مدل فیزیکی، آنالیز ابعادی، وسایل و دستگاه‌های اندازه‌گیری و برنامه آزمایشات به طور جامع پرداخته شده است.

عامل‌های مؤثر و آنالیز ابعادی

انگیزه آنالیز ابعادی از آنجا ناشی می‌شود که برای هیچ یک از مقادیر متداول و مورد استفاده در زندگی روزمره ما مقیاس اندازه‌گیری (یکه) طبیعی وجود ندارد بلکه با توجه به نیاز، سهولت کار و یا دیگر دلایل، واحد مناسب برای آن متغیر تعریف، و آن متغیر با واحد تعریف شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این صورت نتایج حاصل از محاسبات یا اندازه‌گیری‌های انجام شده در سیستم واحدهای متفاوت را نمی‌توان به سهولت به کار برد جدول (1).

تئوری باکینگهام

برای تبدیل رابطه‌ای متشکل از متغیرها به رابطه‌ای متشکل از عامل‌های بدون بعد، می‌توان از قضیه باکینگهام استفاده کرد. مطابق تئوری باکینگهام چنانچه در یک پدیده‌ی هیدرولیکی تعداد n متغیر دخیل باشند و این متغیرها دارای m بعد باشند، در آن صورت می‌توان تعداد $n-m$ عامل بی‌بعد را به وجود آورد. فرض کنید در یک پدیده هیدرولیکی متغیرهایی چون X_1, X_2, X_3 و... دخیل باشند رابطه (1):

(1)

$$f_1(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) = 0$$

حال اگر ابعاد متغیرهای فوق M باشد، در آن صورت مطابق تئوری باکینگهام رابطه‌ی فوق را می‌توان به صورت رابطه‌ی بدون بعد زیر نوشت رابطه (2):

(2)

$$f_2(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-m}) = 0$$

برای به دست آوردن عامل‌های بدون بعد می‌توان به شرح زیر اقدام کرد.

الف) تعداد m متغیر از n متغیر انتخاب می‌شود. این متغیرها را اصطلاحاً متغیرهای تکراری گویند. متغیرهای تکراری طوری انتخاب می‌شوند که دارای ابعاد متفاوتی بوده و m بعد را شامل شود.

ب) با ترکیب m متغیر تکراری و هر یک از متغیرهای باقیمانده، تعداد $n-m$ عامل بدون بعد تشکیل می‌شود.

جدول 1- ابعاد عامل‌های مورد استفاده هیدرولیکی

نوع عامل	علامت اختصاری	بعد
سرعت	U	LT^{-1}
شتاب ثقل	G	LT^{-2}
جرم مخصوص سیال	P	ML^{-3}
جرم مخصوص ذرات	ρ_s	ML^{-3}
عرض کفبند	B	L
عمق آبخستگی	d_s	L

$ML^{-1}T^{-1}L$	μ	لزجت دینامیک
L	d_{50}	قطر ذرات رسوب
L	Y	عمق جریان آب
L	D	عرض کف

شیب کالورت

شیب کالورت یکی از پارامترهای تاثیرگذار در تعیین سرعت جریان کالورت، ظرفیت دبی و انتقال رسوب کالورت است. (Abt et al., 1985) در پژوهشی اثر شیب کالورت را روی مشخصات چاله‌ی آبستگي (عمق، عرض، طول و حجم) در پایین دست کالورت بررسی کردند. آزمایش‌ها در کالورت دایره‌ای به قطر 1/6 سانتی‌متر و با شیب‌های 0، 2، 5، 7 و 10 درصد صورت گرفت. کانال با شن یکنواخت d_{50} برابر با 1/86 میلی‌متر و انحراف از معیار 1/33 پوشانده شد. دامنه دبی از 0/01 تا 0/033 مترمکعب در ثانیه بود و سطح آب پایین دست به اندازه 0/45D بالای بستر تنظیم شد. شیب‌های فوق در شدت دبی‌های 1، 1/5، 2 و 2/5 مورد آزمایش قرار گرفت. پارامترهای آبستگي در دقایق 31، 100 و 316 از شروع آزمایش اندازه‌گیری شد.

مشخصات کانال

ابعاد فلوم

آزمایش‌ها در کانال آزمایشگاهی به طول ۱۰ متر عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر انجام گرفت، دیواره‌ها از جنس شیشه پلکسی گلاس شفاف و کف کانال از جنس فولاد می‌باشد.

مخزن آرام کننده جریان در در دهانه ورودی کانال به منظور جلوگیری از ورود تلاطم ناشی از پمپاژ آب حوضچه‌ای در ابتدای فلوم در قسمت ورودی قرار دارد به این صورت که پس از این که لوله تامین دبی به قطر ۸ اینچ که وارد این حوضچه می‌گردد موجب می‌شود که انرژی جریان خروجی از لوله پس از عبور از یک صفحه مشبک و برخورد به صفحه آرام کننده جریان مستهلک گردد و آب ورودی به کانال به آرامی وارد کانال شود شکل (1).



شکل 1- مخزن ورودی و صفحه آرام کننده تلاطم جریان ورودی کانال

سرریز

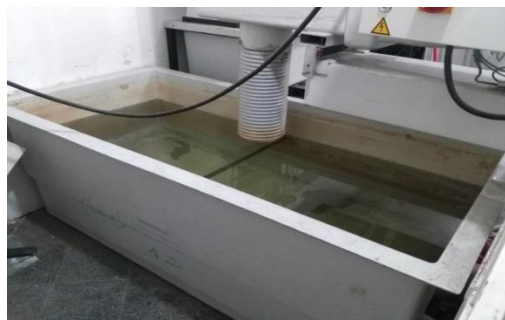
جهت تنظیم ارتفاع آب از یک سرریز مستطیلی در انتهای کانال استفاده شد شکل (2).



شکل 2- سرریز مستطیلی انتهایی

انتهایی می‌شود و بدین ترتیب سیستم گردش آب تکمیل می‌گردد مخزن آرام کننده جریان در شکل (3) نشان داده شده است.

مخزن انتهایی در پایین دست کانال یک مخزن آرام کننده انتهایی قرار دارد جریان پس از عبور از روی سرریز وارد مخزن



شکل 3- مخزن انتهایی و مخزن مکش پمپ

حداکثر دبی 80 لیتر بر ثانیه جهت انتقال آب به درون فلوم در زیر کانال تعبیه شده است، جهت تنظیم دبی از یک دبی سنج الکترومغناطیس استفاده گردید. که به تفکیک این قسمت‌ها در شکل‌های (4) الی (9) نشان داده شده است.

سیستم گردش آب سیستم گردش آب شامل پمپ، مخازن آب، اتصالات و سیستم برق فلوم می‌باشد. در آزمایشگاه سه عدد مخزن زمینی هر کدام به حجم 1000 لیتر به یکدیگر متصل و در زیر کانال جهت انتقال آب به درون کانال قرار داده شد و یک پمپ سانتریفیوژ با



شکل 6- شیر کنار گذر



شکل 5- دبی سنج دیجیتالی



شکل 4- پمپ سانتر فیوژ



شکل 9- سیستم برق فلوم



شکل 8- جک هیدرولیکی



شکل 7- سیستم انتقال آب

ابزار برداشت داده‌ها
ابعاد یک در یک سانتی متر مربع استفاده شد.
ابزار تسطیح
به منظور تسطیح رسوبات از یک ارابه تسطیح و
ابزاری جهت تسطیح استفاده شد (شکل 10).

ابزار برداشت داده‌ها
ابزار برداشت داده‌ها بعد از اتمام آزمایش‌ها و تخلیه
آب از درون کانال به منظور تعیین تغییرات طولی و
عمق حفره آبستگي از متر ليزري استفاده گردید بدین
منظور جهت برداشت داده‌ها از یک صفحه مشبک در



شکل 10- ابزار تسطیح رسوبات

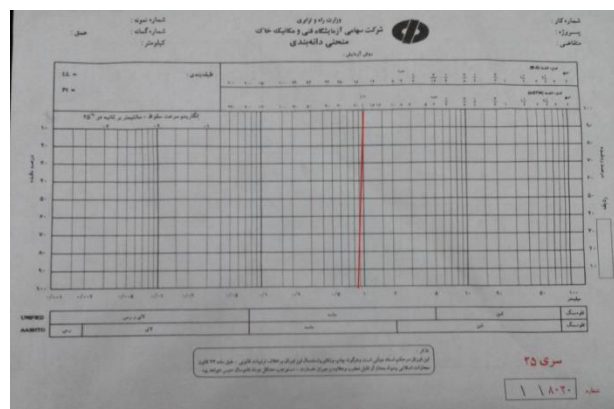
رسوبات بستر

فاصله سه متری از ابتدای کانال بین دو کف کاذب محصور کننده رسوبات به طول 1/5 متر و ضخامت ۱۴ سانتی متر با متوسط قطر ذرات 0/95 میلی متر پوشانده شد جدول (2). شکل (11) رسوبات استفاده شده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شیت آزمایش مشخص است نمونه‌ها فاقد ذرات لای و رس هستند بنابراین نشان دهنده این است که رسوبات کاملاً شسته شده‌اند شکل (12).

جهت انجام آزمایش‌ها و رسیدن به حداکثر عمق آبشستگی به این منظور نیاز بود تا از رسوبات با دانه بندی یکنواخت استفاده گردد. لذا جهت حذف یکنواختی رسوبات بر کاهش آبشستگی موضعی مطابق پیشنهاد (Chiu & Melville., 1987) میزان انحراف معیار هندسی ذرات باید از 1/3 کمتر باشد. با ذکر این مطلب از رسوبات عبوری از الک ۱۸ و مانده روی الک نمره 20 استفاده شد و بستر رسوبی در



شکل 11- دانه بندی استفاده شده در آزمایش‌ها



شکل 12- شیت آزمایشگاهی دانه بندی رسوبات بستر کف

جدول 2- کلاس بندی اندازه ذرات رسوبات

قطر الک (میلی متر)	2	1.18	850 μ	600 μ	425 μ	300 μ	250 μ	150 μ	106 μ	75 μ
شماره الک	10#	16#	20#	30#	40#	50#	60#	100#	140#	200#

$$\%R = \frac{d_{s_1} - d_{s_2}}{d_{s_1}} \quad (3)$$

در رابطه بالا درصد R حداکثر عمق آبستتگی و d_{s_1} حداکثر عمق آبستتگی در آزمایش‌های مشاهده شده و d_{s_2} حداکثر عمق آبستتگی در آزمایش‌ها می‌باشد. تجزیه و تحلیل داده‌های مشاهده شده نشان داد که عمق آبستتگی موضعی به عنوان تابعی از عدد فرود ذرات (FRD) به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفت جدول (3) و شکل (13):

(1991) Abida & Townsend. آزمایش‌هایی را برای آبستتگی موضعی در پایین‌دست از خروجی کالورت جعبه راه‌اندازی کرده‌اند. از مشاهدات آن‌ها، برای شرایط بسیار کم عمق پایاب، حداکثر عمق آبستتگی با کاهش عمق پایاب کاهش می‌یابد. همچنین (1995) Lim. آزمایش‌هایی را برای آبستتگی در مجرای خروجی کالورت‌های مستغرق و پر آب انجام داد. آزمایش‌های انجام گرفته در اعداد فرود ذره مختلف با حداکثر عمق آبستتگی در آزمایشی که در آن حداکثر عمق آبستتگی ایجاد شده به صورت درصد از رابطه (3) اندازه‌گیری گردید.

جدول 3- سناریوهای آزمایش‌ها

عرض کفبند (سانتی‌متر)	عدد فرود ذره (Frd)	دبی (مترمکعب مترمکعب بر ساعت)	ارتفاع آب (سانتی - متر)	تعداد آزمایش
0	2	38	8	1
0	2/5	46	8	1
0	3	53	8	1
5	2/5	38	8	1
5	3	46	8	1
5	2	53	8	1
10	3	38	8	1
10	2	46	8	1
10	2/5	53	8	1
15	2	38	8	1
15	2/5	46	8	1
15	3	53	8	1



شکل 13- نمونه آزمایش‌های انجام گرفته

نتایج و بحث

سازه‌های هیدرولیکی به واسطه ایجاد مانع بر روی جریان، الگوی جریان را تغییر می‌دهند و با ایجاد الگوی جدید، منجر به تشکیل گردابه‌هایی می‌شوند که این گردابه‌ها آبشستگی موضعی را منجر می‌گردد. در این قسمت کلیه نتایج آزمایشگاهی به دست آمده ارائه شده است. لنگر انداختن در ورودی جریان کالورت با افزایش بار سنگین در انتهای کالورت سبب محافظت در برابر خم شدن و جلوگیری از شیب پر شدن از عمل آبشستگی جریان کمک می‌کند. تهیه دیواره استاندارد یا دیواره بتونی استاندارد به مقابله با بالابر هیدرواستاتیک و جلوگیری از خرابی ناشی از شناور کمک می‌کند. محافظت از پایین دست کالورت‌ها در برابر فرآیند آبشستگی، به عنوان یک ساختار انتقال آب، موضوع بسیار مهم در طراحی کالورت‌ها است (Najafzadeh & kargar, 2019). آزمایش‌ها در کالورت دایره‌ای به قطر 1/6 سانتی‌متر و با شیب‌های 0، 2، 5، 7 و 10 درصد و در شدت دبی‌های 1، 1/5، 2 و 2/5 مورد آزمایش قرار گرفت. پارامترهای آبشستگی در دقایق 31، 100 و 316 از شروع آزمایش اندازه‌گیری شد و نتایج روی پارامترهای آبشستگی به صورت زیر ارائه شد:

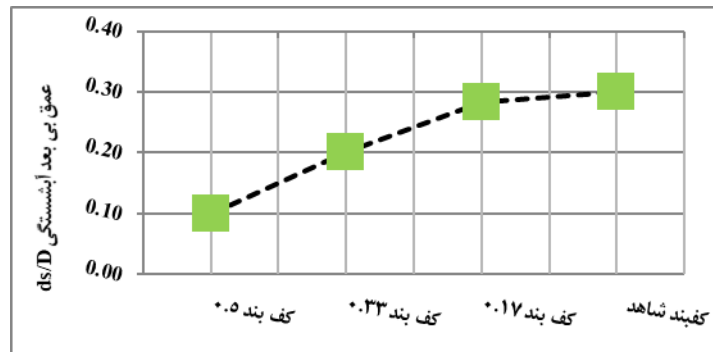
عمق آبشستگی: نمودار شکل‌های (14) و (15) حاصل از نتایج آزمایش نشان داد زمانی که شیب کالورت افزایش می‌یابد، عمق آبشستگی در دامنه شیب مورد آزمایش نیز افزایش می‌یابد، اما حداکثر افزایش عمق آبشستگی در یک نرخ کاهشی است.

عرض آبشستگی: زمانی که شیب کالورت از 0 تا 5 درصد افزایش می‌یابد، عرض آبشستگی نزدیک به 26 درصد در شدت تخلیه $(Q/g^{0.5}D^{2.5})$ 1/5 افزایش خواهد یافت. با این حال زمانی که شیب کالورت بالای 5 درصد افزایش می‌یابد، حداکثر عرض آبشستگی کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد زمانی که شیب مجرای آبی بیش از 5 درصد است، جت در استخر متمرکز می‌شود و انرژی به اندازه کافی مستهلک می‌گردد.

طول آبشستگی: زمانی که شیب آبگذر از 0 تا 5 درصد افزایش می‌یابد، حداکثر طول آبشستگی 25 درصد افزایش خواهد یافت. با این حال زمانی که شیب بیش از 5 درصد افزایش می‌یابد، طول آبشستگی به سطح شیب صفر درصد کاهش خواهد یافت.

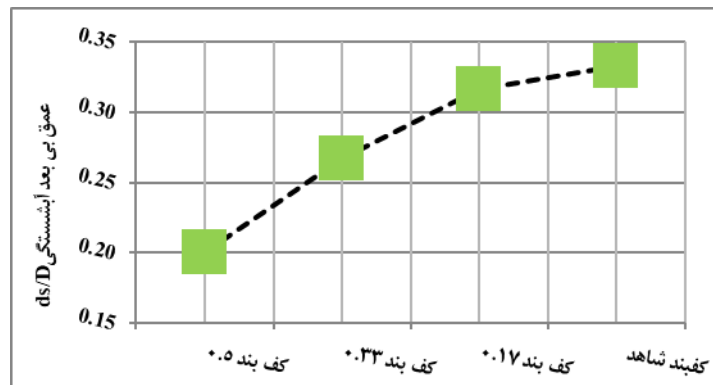
حجم آبشستگی: نتایج نشان داد که یک کالورت دارای شیب می‌تواند بیش از 40 درصد یک کالورت افقی با شدت تخلیه 1/5، حجم آبشستگی را افزایش دهد. با این حال تفاوت کمی در حجم آبشستگی بین 2، 5، 7 و 10 درصد وجود دارد. اگرچه عمق، عرض و طول آبشستگی با شیب مجرا تغییر می‌کند اما حداکثر حجم آبشستگی بین شیب 2 درصد و 10 درصد نسبتاً باقی می‌ماند.

با توجه به نمودار شکل (1)، برای یک نسبت ثابت فرود ذره $Frd=2$ با افزایش طول کفبند عمق آبشستگی کاهش می‌یابد.



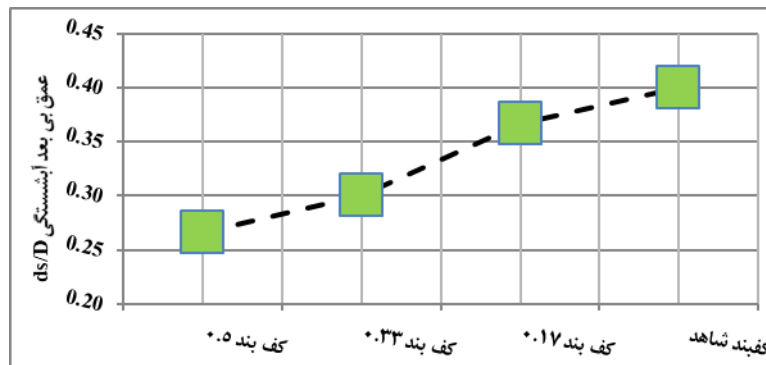
شکل 14- نمودار مقایسه کفبند مختلف (B/D) برای یک نسبت ثابت فرود ذره 2

با توجه به نمودار شکل (15) برای یک نسبت ثابت فرود ذره $Frd=2/5$ با افزایش طول کفبند عمق آبستگي کاهش می‌یابد.



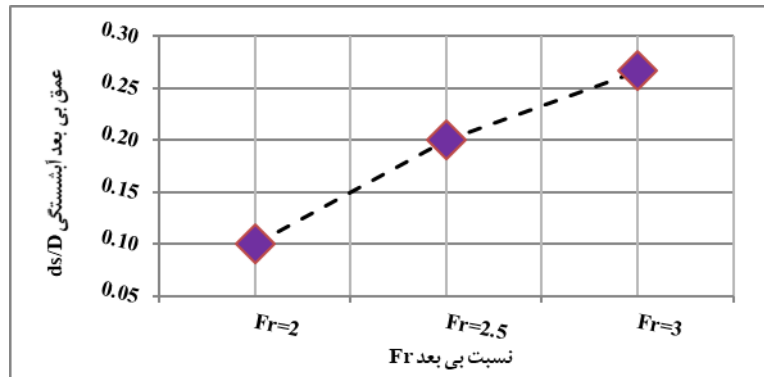
شکل 15- نمودار مقایسه کفبند مختلف (B/D) برای یک نسبت ثابت فرود ذره 2/5

با توجه به نمودار شکل (16) برای یک نسبت ثابت فرود ذره $Frd=3$ با افزایش طول کفبند عمق آبستگي کاهش می‌یابد.



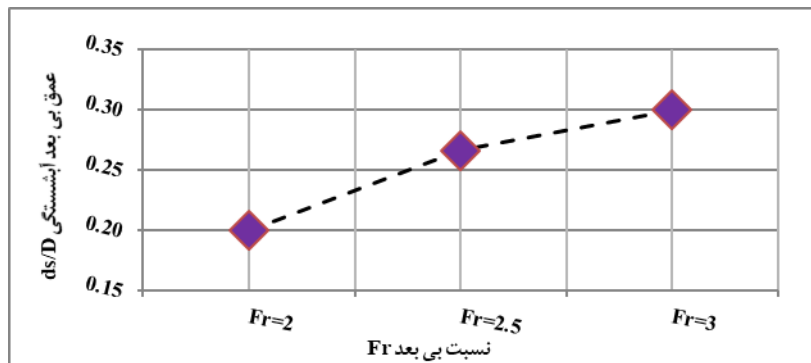
شکل 16- نمودار مقایسه کفبند مختلف (B/D) برای یک نسبت ثابت فرود ذره 3

با توجه به نمودار شکل (17) برای یک طول ثابت کفبند 15 سانتی متر ($\frac{B}{D} = 0.5$) با افزایش عدد فرود ذره عمق آبشستگی افزایش یافته است.



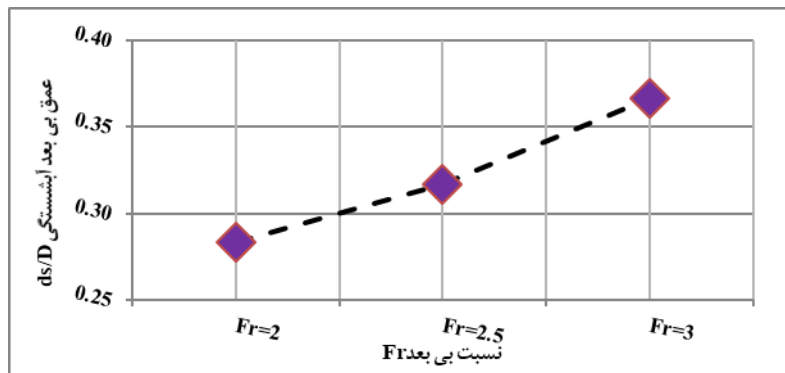
شکل 17- نمودار مقایسه کفبند با طول $B/D=0.5$ برای فرود ذره مختلف

با توجه به نمودار شکل (18) برای یک طول ثابت کفبند 10 سانتی متر ($\frac{B}{D} = 0.33$) با افزایش عدد فرود ذره عمق آبشستگی افزایش یافته است.



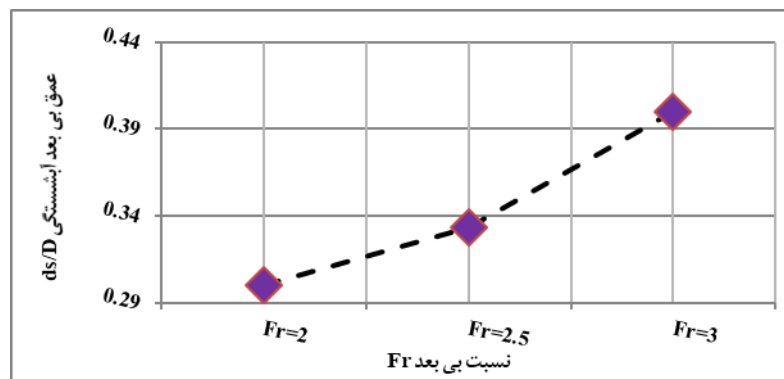
شکل 18- نمودار مقایسه کفبند با طول $B/D=0.33$ برای فرود ذره مختلف

نتایج نمودار شکل (19) نشان می دهد برای یک طول ثابت کفبند 5 سانتی متر ($\frac{B}{D} = 0.17$) با افزایش عدد فرود ذره عمق آبشستگی نیز افزایش یافته است.



شکل 19- نمودار مقایسه کفبند با طول $B/D=0/17$ برای فرود ذره مختلف

نتایج نمودار شکل (20) نشان می‌دهد برای یک طول ثابت کفبند شاهد $(\frac{B}{D} = 0)$ با افزایش عدد فرود ذره عمق آبستنگی نیز افزایش یافته است.



شکل 20- نمودار مقایسه کفبند شاهد $B/D=0$ برای فرود ذره مختلف

ای که در کناره‌های پروفیل مقدار آبستنگی بیشتر و در وسط پروفیل کمتر می‌باشد که این امر باعث شد که پروفیل‌های آبستنگی کفبند با طول‌های 5 و 10 شکل گرده ماهی به خود گرفته و پروفیل آبستنگی کفبند 15 سانتی‌متر به علت آن که سرعت در این کفبند از توزیع سرعت یکنواخت‌تری در تمامی جریان آزمایش برخوردار بوده به شکل مسطح‌تر خود را نشان می‌دهد. ارتفاع برآمدگی رسوبات بیشتر از عمق پایاب تأثیر می‌پذیرد و می‌توان بیان کرد که زمانی که عمق پایاب کم باشد رسوبات به صورت یکنواخت جلوی گودال آبستنگی پخش و ته‌نشین می‌شوند ولی زمانی

با توجه آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، مشخص شد که پروفیل آبستنگی در کانال متغیر می‌باشد. متغیر بودن پروفیل آبستنگی در کناره و وسط کانال و عدم یکنواختی پروفیل در عرض حفره را طبق مطالعات پیشین به آشفته بودن جریان نسبت داده‌اند که سبب تقویت جریان‌های ثانویه و نهایتاً افزایش غیریکنواختی پروفیل در رسوب‌گذاری می‌شود. همان‌گونه که در شکل‌ها زیر مشاهده می‌شود حتی بعد از این تغییرات آبستنگی در کانال به صورت ثابت باقی می‌ماند. اما پروفیل در کناره کانال به گونه‌ای بود که شکل پروفیل و ابعاد حفره هر دو متغیر بودند به گونه

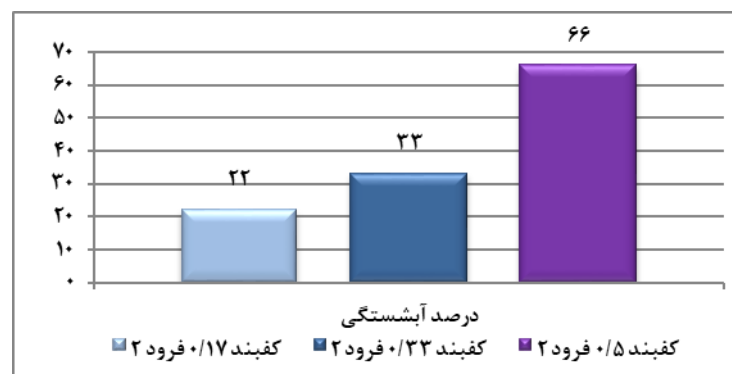
در این مرحله آزمایش های انجام گرفته در اعداد فرود ذره مختلف با حداکثر عمق آبستگي در آزمایشی که در آن حداکثر عمق آبستگي ایجاد شده به صورت درصد از رابطه (3) اندازه گیری شده و نتایج در جداول و نمودارهای زیر ترسیم گردید جدول (4)، شکل های (21)، (22) و (23).

که عمق پایاب بیشتر باشد رسوبات به صورت تپه ای در پایین دست گودال آبستگي تشکیل می شوند (Najafi & Ghodsian., 2004; Zomorodian *et al.*, 2018)

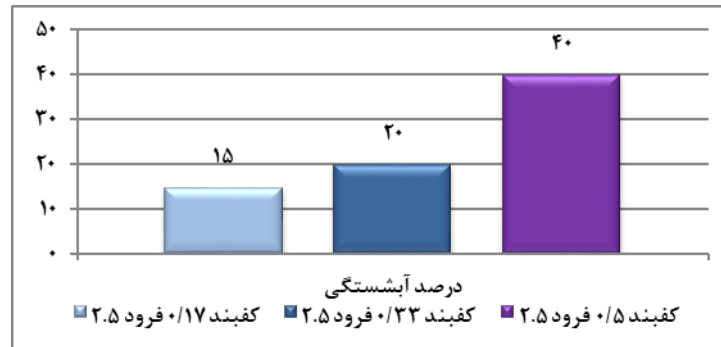
سناریو درصد های کاهش عمق آبستگي کفبند در فرود های ذره مختلف

جدول 4- سناریو درصد های کاهش عمق آبستگي کفبند در فرود های ذره مختلف

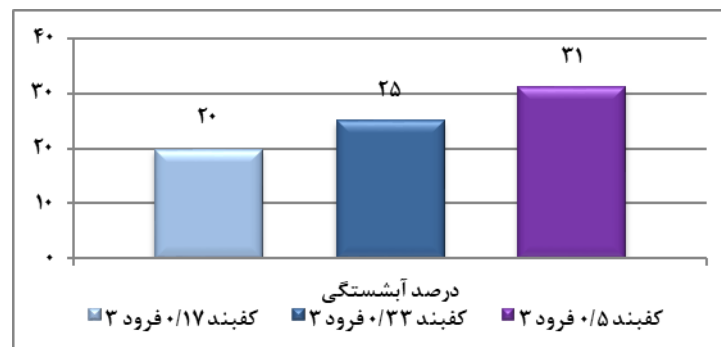
کفبند	طول کفبند (سانتی متر)	عرض بی بعد B/D	عدد فرود ذره	درصد آبستگي
کفبند	5	0/17	2	22
کفبند	10	0/33	2	33
کفبند	15	0/5	2	33
کفبند	5	0/17	2/5	15
کفبند	10	0/33	2/5	20
کفبند	15	0/5	2/5	40
کفبند	5	0/17	3	20
کفبند	10	0/33	3	25
کفبند	15	0/5	3	31



شکل 21- نمودار مقایسه درصد های آبستگي در کفبند مختلف در فرود ذره 2



شکل 22- نمودار مقایسه درصدهای آبشستگی در کفبند مختلف در فرود ذره 2/5



شکل 23- نمودار مقایسه درصدهای آبشستگی در کفبند در فرود ذره 3

نتیجه گیری

با بررسی جامع و انجام آنالیز ابعادی، پارامترهای بدون بعد موثر بر پدیده آبشستگی شناسایی و آزمایش -ها بر مبنای آن‌ها طرح ریزی شد. در زیر نتایج تحقیق به صورت خلاصه آورده شده است.

1. همان طور که از مقایسه نمودار آزمایش‌ها در طول‌های (0/17 و 0/33 و 0/5) در عدد فرود ذره مختلف (2، 2/5، 3) مشاهده شد که کفبند در فرود ذره 2 به ترتیب 22، 33 و 66 درصد و کفبند در فرود ذره 2/5 به ترتیب 15، 20 و 40 درصد و کفبند در فرود ذره 3 به ترتیب 20 و 25 و 31 درصد عمق آبشستگی را کاهش داده‌اند این امر نشان می‌دهد که استفاده از کفبند در کاهش عمق آبشستگی پایین - دست تأثیر مثبت دارد.

2. بیشترین کاهش عمق آبشستگی برای کفبند $B=0/5$ در عدد فرود ذره 3 به میزان 31 درصد می‌باشد.

3. با توجه به مشاهدات می‌توان نتیجه گرفت که افزایش طول کفبند با تأثیر بر روی خطوط جریان و پروفیل سرعت به علت کاهش دادن سرعت هجوم آورنده به بستر در مقابل امواج پایین رونده، می‌تواند ابزار مناسبی جهت کاهش و دورتر تشکیل دادن چاله آبشستگی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی مورد استفاده قرار گیرد.

پیشنهادات

1. مدل سازی کفبند بستر با استفاده از نرم افزارهای عددی و مدل های عددی.

3. بررسی آزمایشگاهی کفبند بستر به وسیله
زبری‌های مصنوعی

2. استفاده از کفبند بستر با طول‌های مختلف به
منظور یافتن عرض بهینه جهت کنترل آبشستگی
پایین دست سازه‌های هیدرولیکی.

منابع

- پیرستانی، م.ر.، رضازاده، م. و کاویانی، م. 1389. مطالعه آزمایشگاهی میزان آبشستگی ناشی از برخورد جت‌های مستغرق و ریزشی، مجله مهندسی سازه‌های آبی، سال سوم، شماره: 4، صفحه: 58-65. راهنمای روش‌های محاسبه آبشستگی موضعی، نشریه شماره 318 معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس-جمهور.
- یزدی، ع.، منافپور، م. و محمدی، م. ع. 1389. بررسی عملکرد هیدرولیکی کالورت‌ها با مقاطع هندسی مختلف، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران

Abida, H., and Townsend, R. D. (1991). Local scour downstream of boxculvert outlets, *J. Irrig. Drain. Eng.* Vol. 117, No. 3, pp. 425-440. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1991\)117:3\(425\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1991)117:3(425)).

Abt, S. R., J. F. Ruff, and Doehring, F. K. (1985). Culvert slope and shape effects on outlet scour, *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 111, No. 10, pp. 1363-1367. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1985\)111:10\(1363\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1985)111:10(1363)).

Abt, S. R., Ruff, J. F., Doehring, F. K. and Donnell, C. A. (1987). Influence of Culvert Shape on Outlet Scour, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 113, No. 3, pp. 393-400.

Abt, S. R., Kolberdanz, R. L. and Mendoza, C. (1984). Unified Culvert Scour Determination", *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 110, No. 10, pp. 1475-1479.

Blaisdel, F. W. (1959). *The SAF Stilling Basin*, U.S. Government Printing Office.

Crookston, B. M. and Tullis, B. P. M. (2012). Scour Prevention in Bottomless Arch Culvert", *International Journal of Sediment Research*, Vol. 27, No. 2, pp. 213-225.

Crookston, B.M. Tullis, B.P. (2008). Scour prevention in bottomless arch culverts, *International Journal of Sediment Research*, Vol. 27, No. 2, pp. 213-225.

Drainage Design Manual. (2017). Colorado Department of Transportation.

Federal Highway Administration. (1992). Bottomless culvert scour study, Phase I laboratory Report, FHWA – RD - 02 – 078.

Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels. (2006). US department of transportation- federal highway transportation, Hydraulic Engineering Circular No. 14, Third Edition.

Hosseini, S. M. and Abrishami, J. (2019). Open- channel hydraulics. No.35, pp. 613, Ferdowsi university of mashhad press (FUM Press). (In Persian)

Lim, S. Y. (1995). "Scour below unsubmerged full flowing culvert outlets."

Proc. Inst. Civ. Eng. Marit. Eng. 112 (2): 136-149. <https://doi.org/10.1680/iwtme.1995.27659>.

Manafpour, M. and Sheikhlou, S. (2014). Study of the effect of longitudinal slope of river bed on the method of leaching and sedimentation of currents in Culverts with mobile bed. 8th National Congress on Civil Engineering Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, pp.8. (In Persian)

Najafzadeh, M. and Kargar, A. (2019). Gene-Expression Programming, Evolutionary Polynomial Regression, and Model Tree to Evaluate Local Scour Depth at Culvert Outlets. American Society of Civil Engineers. J. Pipeline Syst. Eng. Pract., 10(3): 04019013, PP:12. DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000376.

Yoo, D. H. and Lee, S. (2012). Direct Determination of the Width or Height for a Box Culvert Applying Dimensionless Equations, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 1302-1307.

Zevenbergen, L. W., Arneson, L. A., Hunt, J. H. and Miller, A. C. (2012). "Hydraulic Design of Safe Bridge", U.S. Department of Transportation, FHWA-HIF-12-018.

Zomorodian, S.M.A., Ghaffari, H. and Sadati, F. (2018). Experimental Investigation on the Effect of Wing Walls on Scour Hole's Dimensions Downstream of Culvert. Journal of Ferdowsi Civil Engineering, Vol.31, No.3, pp.19-32. DOI: 10.22067/civil.v32i1.58064. (In Persian)

Laboratory study of reducing the scour depth downstream of Calvert with a square cross section adjacent to the floor. (Calvet Shape)

Abstract

Protection of the downstream of culvert outlets against scour process, as a water conveyance structure, is a highly significant issue in design of culverts. In this study, the effect of bed litter length on downstream scour depth is investigated. For this purpose, experiments were carried out on the laminate with different lengths. According to the results, the particle landing at 22%, 33% and 66%, respectively, and the landing at particle landing of 2.5%, respectively. 15%, 20%, and 40% decreased particle depth by 20%, 25%, and 31%, respectively, indicating that bedding has a positive effect on decreasing downstream scour depth. The scour for the flooring considering the length of the layer showed that the scour depth decreases with the increase of the layer length due to the constant landing number.

Keywords: Scouring, Capping, Particle Landing, Laboratory Model.