

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

مصطفی منصوری^۱

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، سازه های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، ایران، mansuri.m72@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۱

چکیده

حفاظت از پایین دست کالورت‌ها در برابر فرآیند آبستنگی، 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 آبستنگی پایین دست کالورت پرداخته شده است. به این منظور آزمایش بر روی کفبند با طول‌های متفاوت به انجام آزمایش در این زمینه پرداخته شد با توجه به نتایج مشاهده گردید در فرود ذره ۲ به ترتیب ۲۲، ۳۳ و ۶۶ درصد و کفبند در فرود ذره ۲/۵ به ترتیب ۱۵، ۲۰ و ۴۰ درصد و در فرود ذره ۳ به ترتیب ۲۰، ۲۵ و ۳۱ عمق آبستنگی را کاهش داده‌اند. این امر نشان می‌دهد که کفبند بستر در کاهش عمق آبستنگی پایین دست تأثیر مثبت دارد. همچنین عمق آبستنگی برای کفبند با در نظر گرفتن طول لایه نشان داد که با افزایش طول لایه به ازای ثابت بودن عدد فرود ذره عمق آبستنگی کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: آبستنگی، کفبند، فرود ذره، مدل آزمایشگاهی.

مقدمه

ملاحظات برای طراحی کالورت‌ها، برآورد عمق آبستنگی در پایین دست کالورت است. فرآیند آبستنگی در محل‌های خروجی کالورت‌ها به دلیل نقص‌های مختلف در طراحی آن می‌تواند اتفاق بیفتد. آبستنگی در کالورت برای هر دو جریان آزاد و مستغرق مهمترین عاملی است که منجر به خسارات برگشت ناپذیر 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

آبستنگی در حقیقت جابجایی ذرات توسط جریان از محل استقرار اولیه آن‌ها به مکان دیگری است (نشریه، ۳۱۸). بستر طبیعی کالورت در اثر عبور جریان آب دستخوش فرایش می‌شود، به فرسایش موضعی که در اثر جریان ایجاد می‌گردد آبستنگی گفته می‌شود. آبستنگی می‌تواند موجب تخریب و انهدام سازه به ویژه در مواقع سیلابی شده و طرح را با شکست روبرو سازد. تخمین واقع گرایانه آبستنگی می‌تواند در برآورد عمقی که شالوده باید در آن بنا شود تا از آثار فرسایش در امان بماند ضروری می‌باشد (Manafpour & Sheikhloo, 2014). کالورت‌ها ساختارهای هیدرولیکی هستند که جریان آب را کنترل می‌کنند. گاه و بی‌گاه، از کالورت‌ها برای مدیریت بیش از حد رواناب‌ها استفاده می‌شود. یکی از قابل توجه‌ترین

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). طبقه‌بندی 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 پاییندست کالورت می‌باشد (Yoo & Lee, 2012). به منظور جلوگیری از آبشستگی در پاییندست 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 ناحیه پاییندست کالورت پرداخته‌اند از جمله زونبرگ و همکاران با بررسی آبشستگی در ناحیه خروجی کالورت‌ها بیان نمودند که سرعت خروجی شاخص اولیه برای تخمین پتانسیل فرسایش‌پذیری می‌باشد (Zevenbergen *et al.*, 2012). در تجزیه و تحلیل آبشستگی 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،

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 گرداب^۱ (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 این گونه آبشستگی به سمت بالادست حرکت می‌کند و باعث شسته شدن زیر سازه می‌شود و پایداری آن را مختل

¹ Eddy

در نهایت یک روش که با بهره‌گیری از سرعت جریان، قطر ذرات را برای کالورت قوسی با کف فرسایش‌پذیر تعیین می‌کرد، به‌عنوان جایگزین دیاگرام شیلدز ارائه شد. (Zomorodian et al., 2018) در مطالعه‌ای تأثیر دیواره جانبی پایین‌دست کالورت بر ابعاد گودال آبشستگی موضعی با در نظر گرفتن دیواره‌هایی با زوایای ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه نسبت به خط مرکزی جریان، در دو تیپ هیدرولیکی ۱ و ۴ و در دو کالورت با مقطع دایره‌ای و مستطیلی بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده از دیواره با زاویه ۱۵ درجه باعث کاهش عمق و طول گودال آبشستگی و همچنین ارتفاع رسوبگذاری در پایین‌دست می‌شود که میزان کاهش عمق آبشستگی در کالورت مستطیلی با تیپ ۱ هیدرولیکی به‌میزان ۳۵/۳ درصد نسبت به تست شاهد مشاهده شد. همچنین دیواره با زاویه ۳۰ درجه در مقطع مستطیلی با تیپ ۱، با کاهش ۴۶ درصد آبشستگی عملکرد خوبی را نشان داده است. دیواره‌های جانبی با زاویه ۶۰ و ۷۵ درجه، عملکرد مناسبی در کاهش آبشستگی نشان ندادند. همچنین در تیپ ۱، دیواره در همه زوایا باعث کاهش عمق آبشستگی شد. اما در تیپ ۴ فقط در زاویه ۱۵ درجه عمق آبشستگی به‌میزان ۳۰ درصد در مقطع دایره‌ای و ۱۰ درصد در مقطع مستطیلی کاهش پیدا کرد. همچنین ابعاد گودال آبشستگی در پایین‌دست کالورت با مقطع دایره‌ای بیشتر از مقطع مستطیلی مشاهده شد. به‌گونه‌ای که در مقطع دایره‌ای در تیپ ۱ هیدرولیکی، عمق آبشستگی به‌میزان ۳۵ درصد نسبت به مستطیلی افزایش داشته است که این در تیپ ۴ هیدرولیکی به‌میزان ۹۵ درصد مشاهده شد. همچنین ابعاد گودال آبشستگی در تیپ ۱ نسبت به تیپ ۴ در همه زوایا بیشتر می‌باشد و این در حالی است که ارتفاع رسوب‌گذاری در تیپ ۴ نسبت به تیپ ۱ بیشتر می‌باشد. (Najafzadeh & Kargar, 2019) با استفاده از برنامه نویسی (GEP)، مدل درختی (MT) و

ساختارهای کنترل درجه در پایین‌دست از پل ممکن است در نظر گرفته شود. با این حال، توجه به این نکته مهم است که آبشستگی 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 آبشستگی 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 ۴۶ سانتی‌متر از سطح مصالح بستر متحرک فاصله دارد. جت‌ها در هر دو حالت زاویه‌ی ۱۰ درجه با افق می‌سازند. 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 غیر مستغرق کاسته می‌شود. به طوری که در حالت مستغرق نزدیک به ۸۰ درصد از عمق نهایی حفره در ۵ دقیقه اول رخ می‌دهد و این میزان در حالت غیرمستغرق حدوداً ۷۰ درصد خواهد بود. (Crookston & Tullis, 2012) به بررسی آستانه حرکت اولیه برای چهارنوع مصالح مختلف در کالورت قوسی با کف فرسایش‌پذیر^۱ در فلوم 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 به‌عنوان تابعی از زبری نسبی مورد بررسی قرار گرفت.

¹ Bottomless Arch Culvert

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 آبشستگی یا عوامل هیدرولیکی وابسته به آن صورت گرفته است. کفبند بستر در پایین دست بیشتری از سازه هیدرولیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند و آبشستگی ایجاد شده در پای کفبند می‌تواند سبب خرابی سازه گردد، پیش‌بینی شکل و ابعاد چاله آبشستگی 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 آب شستگی تحصیل گردیده است، هنوز هم شواهد بیشتری از آبشستگی گسترده در بالادست حوضچه‌های آرامش، دریچه 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

رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی (EPR) برای پیش‌بینی عمق آبشستگی در پایین دست کالورت‌ها پرداختند. متغیرهای ورودی با توجه به پارامترهای مؤثر بر عمق آبشستگی، 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 آبشستگی 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 $RMSE = 0.487$) از نظر صحت، تمام معادلات پیشنهادی استخراج شده از رویکردهای هوش مصنوعی برتری قابل توجهی نسبت به معادلات سنتی داشتند. درنهایت، ثابت شده است که عبارات ریاضی ارائه شده توسط ابزارهای محاسباتی تکاملی، تعمیم کافی برای ارائه پیش‌بینی دقیق از عمق آبشستگی محلی با توجه به حفظ معنای واقعی نتایج دارد.

آبشستگی 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 آبشستگی سعی در رسیدن به این ویژگی تعادل را دارد پدیده آبشستگی 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 آبشستگی چاله‌هایی در اطراف سازه هیدرولیکی و کف بستر رودخانه ایجاد می‌کند که باعث

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 (۲):

$$f_2(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-m}) = 0 \quad (2)$$

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.

حاصل از محاسبات یا اندازه‌گیری‌های انجام شده در سیستم واحدهای متفاوت را نمی‌توان بسهولت به کار برد جدول (۱).

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, \dots دخیل باشند رابطه (۱):

$$f_1(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) = 0 \quad (1)$$

جدول ۱- 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 کف بند	B	L
عمق آبشستگی	d_s	L
لزجت دینامیک	μ	$ML^{-1}T^{-1}L$
قطر ذرات رسوب	d_{50}	L
عمق جریان آب	Y	L
عرض کف	D	L

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 0.33 مترمکعب در ثانیه بود و سطح آب پایین‌دست 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 آبشستگی در دقایق $31, 100$ و 316 از شروع آزمایش اندازه‌گیری شد.

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 آبشستگی (عمق، عرض، طول و حجم) در پایین‌دست کالورت بررسی کردند. آزمایش‌ها در کالورت دایره‌ای به قطر $1/6$ سانتی‌متر و با شیب‌های $0, 2, 5, 7$ و 10 درصد

مشخصات کانال

ابعاد فلوم

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 (۱).

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



شکل ۱- 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 (۲).

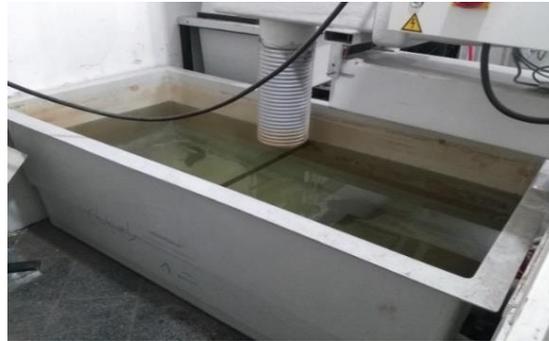


شکل ۲- سرریز مستطیلی انتهایی

مخزن انتهایی

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

انتهایی می شود و بدین ترتیب سیستم گردش آب تکمیل می گردد مخزن آرام کننده جریان در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- مخزن انتهایی و مخزن مکش پمپ

سیستم گردش آب

سیستم گردش آب شامل پمپ، مخازن آب، اتصالات و سیستم برق فلوم می باشد. در آزمایشگاه سه عدد مخزن زمینی هر کدام به حجم ۱۰۰۰ لیتر به یکدیگر متصل و در زیر کانال جهت انتقال آب به درون کانال قرار داده شد و یک پمپ سانتریفیوژ با حداکثر

دبی ۸۰ 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 قسمت ها در شکل های (۴) الی (۹) نشان داده شده است.



شکل ۶- شیر کنارگذر



شکل ۵- دبی سنج دیجیتالی



شکل ۴- پمپ سانتریفیوژ



شکل ۹- سیستم برق فلوم



شکل ۸- جک هیدرولیکی



شکل ۷- سیستم انتقال آب

ابزار برداشت داده‌ها

ابزار برداشت داده‌ها بعد از اتمام آزمایش‌ها و تخلیه آب از درون کانال به منظور تعیین تغییرات طولی و عمق حفزه آبشستگی از متر لیزری استفاده گردید بدین منظور جهت برداشت داده‌ها از یک صفحه مشبک در ابعاد یک در یک سانتی‌متر مربع استفاده شد.

ابزار تسطیح

به منظور تسطیح رسوبات از یک ارابه تسطیح و ابزاری جهت تسطیح استفاده شد (شکل (۱۰)).



شکل ۱۰- ابزار تسطیح رسوبات

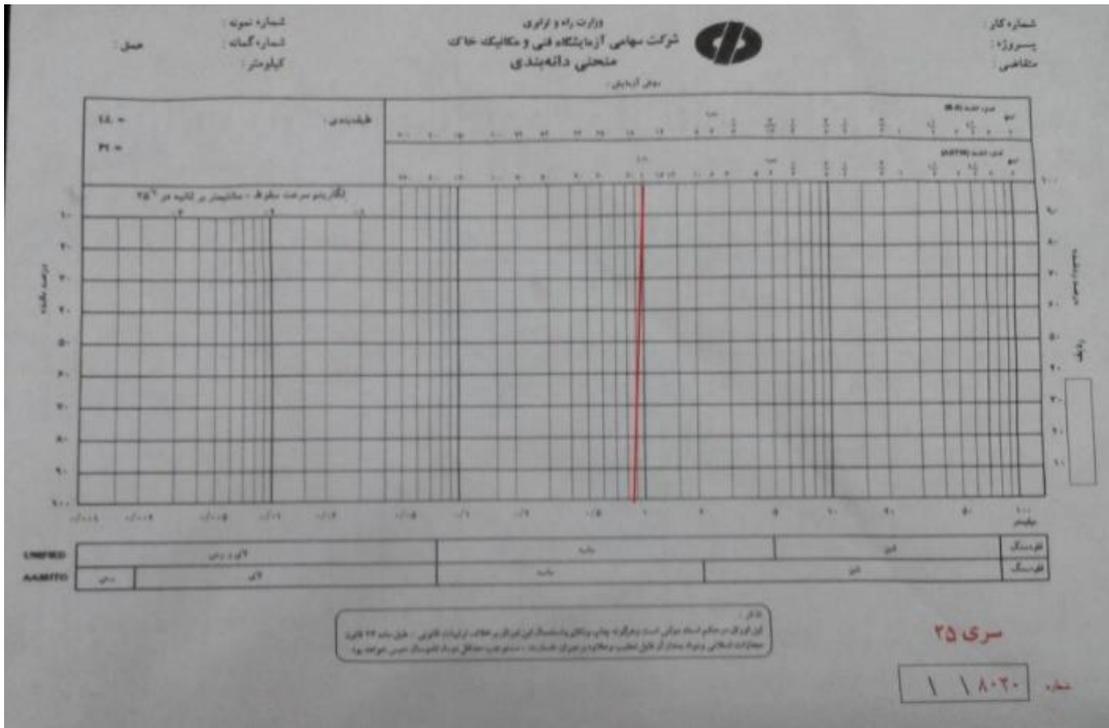
رسوبات بستر

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 ۲۰ استفاده شد و بستر رسوبی در فاصله سه متری از

ابتدای کانال بین دو کف کاذب محصور کننده رسوبات به طول $1/5$ متر و ضخامت ۱۴ سانتی‌متر با متوسط قطر ذرات $0/95$ میلی‌متر پوشانده شد (جدول (۲)). شکل (۱۱) 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 (۱۲)).



شکل ۱۱- دانه بندی استفاده شده در آزمایش‌ها



شکل ۱۲- شیت آزمایشگاهی دانه بندی رسوبات بستر کف

جدول ۲- 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#

Abida & Townsend., (1991)

آزمایش‌هایی را برای آبشستگی موضعی در پایین دست از خروجی کالورت جعبه راه‌اندازی کرده‌اند. از مشاهدات آن‌ها، برای شرایط بسیار کم عمق پایاب، حداکثر عمق آبشستگی با کاهش عمق پایاب کاهش می‌یابد. همچنین Lim., (1995) آزمایش‌هایی را برای آبشستگی در مجرای خروجی کالورت‌های مستغرق و پر آب انجام داد. آزمایش‌های انجام گرفته در اعداد فرود ذره مختلف با حداکثر عمق آبشستگی در آزمایشی که در آن حداکثر عمق آبشستگی ایجاد شده به صورت درصد از رابطه (۳) اندازه‌گیری گردید.

$$\%R = \frac{d_{s_1} - d_{s_2}}{d_{s_1}} \quad (۳)$$

در رابطه بالا درصد R حداکثر عمق آبشستگی و d_{s_1} حداکثر عمق آبشستگی در آزمایش‌های مشاهده شده و d_{s_2} حداکثر عمق آبشستگی در آزمایش‌ها می‌باشد. تجزیه و تحلیل داده‌های مشاهده شده نشان داد که عمق آبشستگی موضعی به عنوان تابعی از عدد فرود ذرات (FRD) به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفت جدول (۳) و شکل (۱۳):

جدول ۳- سناریوهای آزمایش‌ها

تعداد آزمایش	ارتفاع آب (سانتی‌متر)	دبی (مترمکعب مترمکعب بر ساعت)	عدد فرود ذره (Frd)	عرض کفبند (سانتی‌متر)
۱	۸	۳۸	۲	۰
۱	۸	۴۶	۲/۵	۰
۱	۸	۵۳	۳	۰
۱	۸	۳۸	۲/۵	۵
۱	۸	۴۶	۳	۵
۱	۸	۵۳	۲	۵
۱	۸	۳۸	۳	۱۰
۱	۸	۴۶	۲	۱۰
۱	۸	۵۳	۲/۵	۱۰
۱	۸	۳۸	۲	۱۵
۱	۸	۴۶	۲/۵	۱۵
۱	۸	۵۳	۳	۱۵



شکل ۱۳- 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 ۱/۶ سانتی‌متر و با شیب‌های ۰، ۲، ۵، ۷ و ۱۰ درصد و در شدت دبی‌های ۱، ۱/۵، ۲

طول آبستتگی: زمانی که شیب آبگذر از ۰ تا ۵ درصد افزایش می‌یابد، حداکثر طول آبستتگی ۲۵ درصد افزایش خواهد یافت. با این حال زمانی که شیب بیش از ۵ درصد افزایش می‌یابد، طول آبستتگی به سطح شیب صفر درصد کاهش خواهد یافت.

حجم آبستتگی: نتایج نشان داد که یک کالورت دارای شیب می‌تواند بیش از ۴۰ درصد یک کالورت افقی با شدت تخلیه $1/5$ ، حجم آبستتگی را افزایش دهد. با این حال تفاوت کمی در حجم آبستتگی بین ۲، ۵، ۷ و ۱۰ درصد وجود دارد. اگرچه عمق، عرض و طول آبستتگی با شیب مجرا تغییر می‌کند اما حداکثر حجم آبستتگی بین شیب ۲ درصد و ۱۰ درصد نسبتاً باقی می‌ماند.

با توجه به نمودار شکل (۱)، برای یک نسبت ثابت فرود ذره $Frd=2$ با افزایش طول کفبند عمق آبستتگی کاهش می‌یابد.

و $2/5$ مورد آزمایش قرار گرفت. پارامترهای آبستتگی در دقایق ۳۱، ۱۰۰ و ۳۱۶ از شروع آزمایش اندازه‌گیری شد و نتایج روی پارامترهای آبستتگی به صورت زیر ارائه شد:

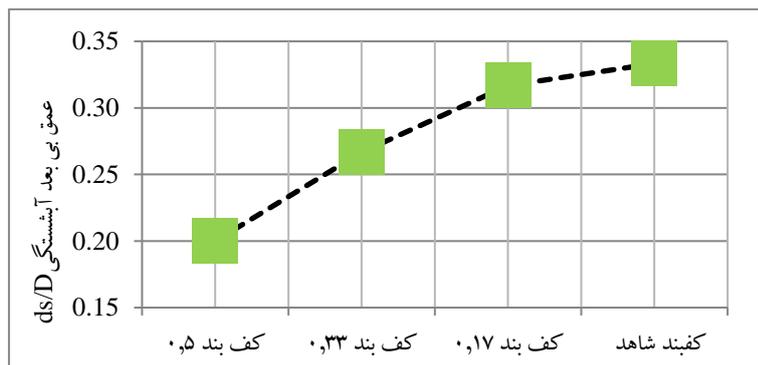
عمق آبستتگی: نمودار شکل‌های (۱۴) و (۱۵) حاصل از نتایج آزمایش نشان داد زمانی که شیب کالورت افزایش می‌یابد، عمق آبستتگی در دامنه شیب مورد آزمایش نیز افزایش می‌یابد، اما حداکثر افزایش عمق آبستتگی در یک نرخ کاهشی است.

عرض آبستتگی: زمانی که شیب کالورت از ۰ تا ۵ درصد افزایش می‌یابد، عرض آبستتگی نزدیک به ۲۶ درصد در شدت تخلیه $1/5(Q/g^{0.5}D^{2.5})$ افزایش خواهد یافت. با این حال زمانی که شیب کالورت بالای ۵ درصد افزایش می‌یابد، حداکثر عرض آبستتگی کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد زمانی که شیب مجرای آبی بیش از ۵ درصد است، جت در استخر متمرکز می‌شود و انرژی به اندازه کافی مستهلک می‌گردد.



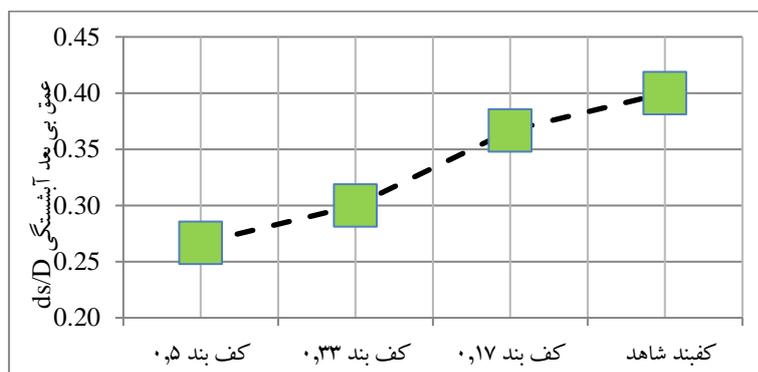
شکل ۱۴- نمودار مقایسه کفبند مختلف (B/D) برای یک نسبت ثابت فرود ذره ۲

با توجه به نمودار شکل (۱۵) برای یک نسبت ثابت فرود ذره $Frd=2/5$ با افزایش طول کفبند عمق آبستتگی کاهش می‌یابد.



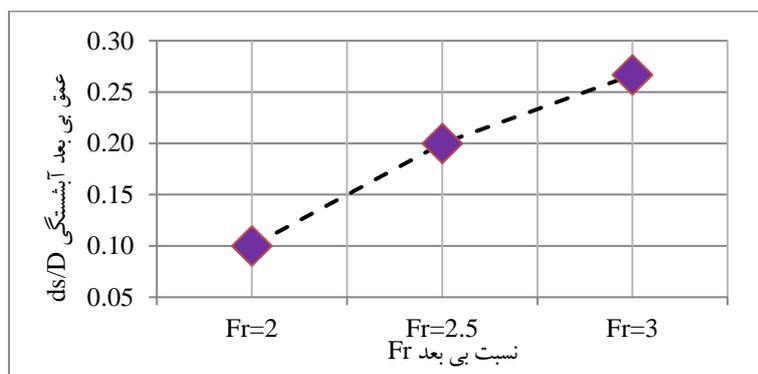
شکل ۱۵- نمودار مقایسه کفبند مختلف (B/D) برای یک نسبت ثابت فرود ذره ۲/۵

با توجه به نمودار شکل (۱۶) برای یک نسبت ثابت فرود ذره $Fr=3$ با افزایش طول کفبند عمق آبشستگی کاهش می‌یابد.



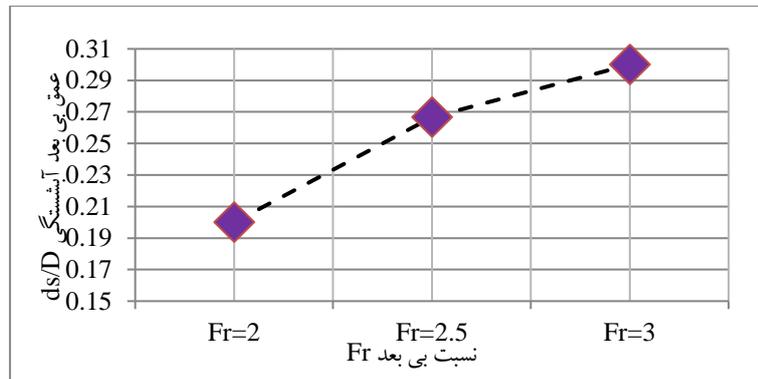
شکل ۱۶- نمودار مقایسه کفبند مختلف (B/D) برای یک نسبت ثابت فرود ذره ۳

با توجه به نمودار شکل (۱۷) برای یک طول ثابت کفبند ۱۵ سانتی‌متر ($B/D=0.5$) با افزایش عدد فرود ذره عمق آبشستگی افزایش یافته است.



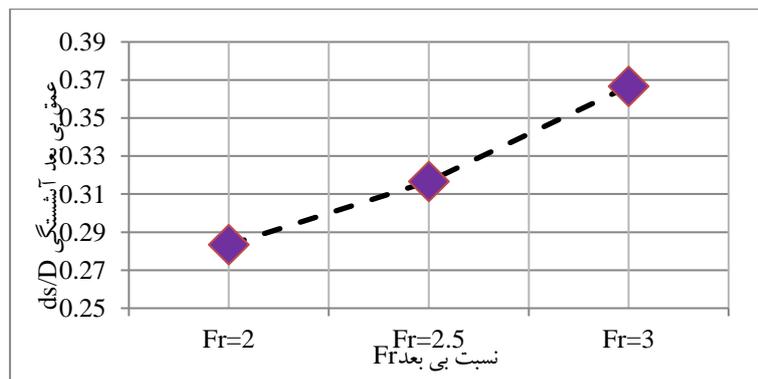
شکل ۱۷- نمودار مقایسه کفبند با طول $B/D=0.5$ برای فرود ذره مختلف

با توجه به نمودار شکل (۱۸) برای یک طول ثابت کفبند ۱۰ سانتی متر ($\frac{B}{D} = 0.33$) با افزایش عدد فرود ذره عمق آبستگي افزایش یافته است.



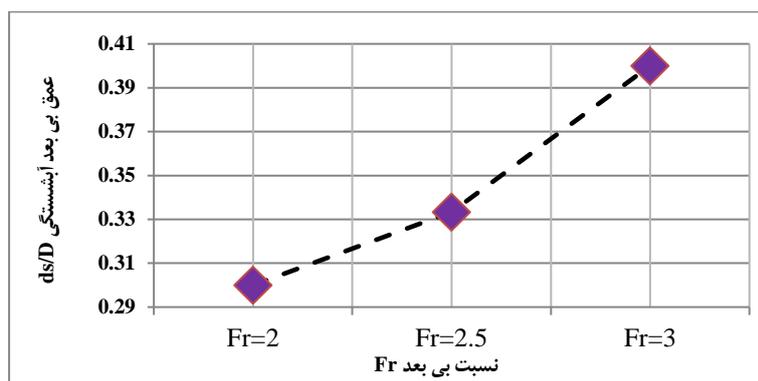
شکل ۱۸- نمودار مقایسه کفبند با طول $B/D=0.33$ برای فرود ذره مختلف

نتایج نمودار شکل (۱۹) نشان می‌دهد برای یک طول ثابت کفبند ۵ سانتی متر ($\frac{B}{D} = 0.17$) با افزایش عدد فرود ذره عمق آبستگي نیز افزایش یافته است.



شکل ۱۹- نمودار مقایسه کفبند با طول $B/D=0.17$ برای فرود ذره مختلف

نتایج نمودار شکل (۲۰) نشان می‌دهد برای یک طول ثابت کفبند شاهد ($\frac{B}{D} = 0$) با افزایش عدد فرود ذره عمق آبستگي نیز افزایش یافته است.



شکل ۲۰- نمودار مقایسه کفبند شاهد $B/D=0$ برای فرود ذره مختلف

ارتفاع برآمدگی رسوبات بیشتر از عمق پایاب تأثیر می پذیرد و می توان بیان کرد که زمانی که عمق پایاب کم باشد رسوبات به صورت یکنواخت جلوی گودال آبستگی پخش و ته نشین می شوند ولی زمانی که عمق پایاب بیشتر باشد رسوبات به صورت تپه ای در پایین دست گودال آبستگی تشکیل می شوند (Najafi & Ghodsian., 2004; Zomorodian *et al.*, 2018).

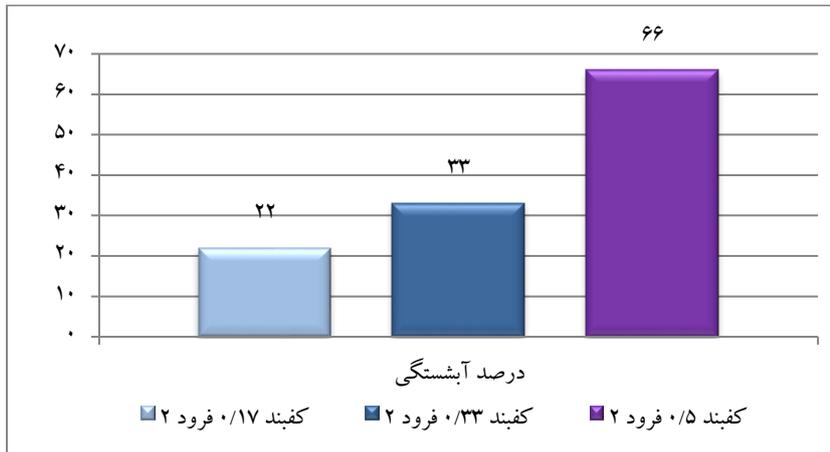
سناریو درصدهای کاهش عمق آبستگی کفبند در فرودهای ذره مختلف

در این مرحله آزمایش های انجام گرفته در اعداد فرود ذره مختلف با حداکثر عمق آبستگی در آزمایشی که در آن حداکثر عمق آبستگی ایجاد شده به صورت درصد از رابطه (۳) اندازه گیری شده و نتایج در جداول و نمودارهای زیر ترسیم گردید جدول (۴)، شکل های (۲۱)، (۲۲) و (۲۳).

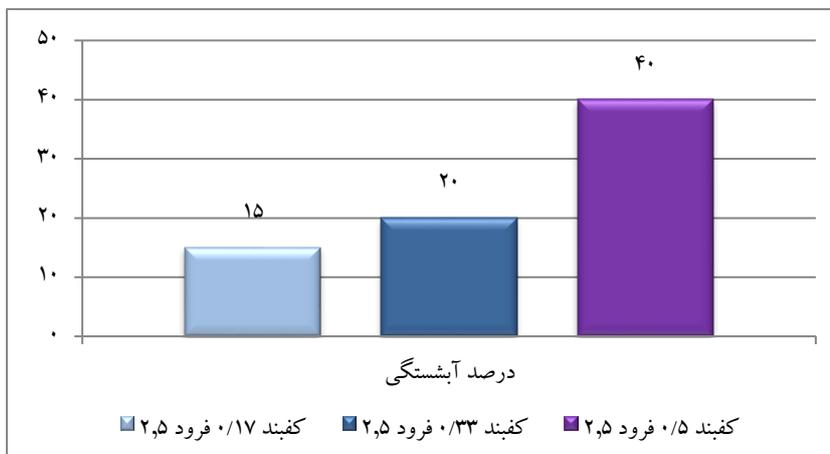
با توجه آزمایش های انجام شده در این تحقیق، مشخص شد که پروفیل آبستگی در کانال متغیر می باشد. متغیر بودن پروفیل آبستگی در کناره و وسط کانال و عدم یکنواختی پروفیل در عرض حفره را طبق مطالعات پیشین به آشفته بودن جریان نسبت داده اند که سبب تقویت جریان های ثانویه و نهایتاً افزایش غیریکنواختی پروفیل در رسوب گذاری می شود. همانگونه که در شکل ها زیر مشاهده می شود حتی بعد از این تغییرات آبستگی در کانال به صورت ثابت باقی می ماند. اما پروفیل در کناره کانال به گونه ای بود که شکل پروفیل و ابعاد حفره هر دو متغیر بودند به گونه ای که در کناره های پروفیل مقدار آبستگی بیشتر و در وسط پروفیل کمتر می باشد که این امر باعث شد که پروفیل های آبستگی کفبند با طول های ۵ و ۱۰ شکل گرفته ماهی به خود گرفته و پروفیل آبستگی کفبند ۱۵ سانتی متر به علت آن که سرعت در این کفبند از توزیع سرعت یکنواخت تری در تمامی جریان آزمایش برخوردار بوده به شکل مسطح تر خود را نشان می دهد.

جدول ۴- سناریو درصد‌های کاهش عمق آبستگي کفبند در فرودهای ذره مختلف

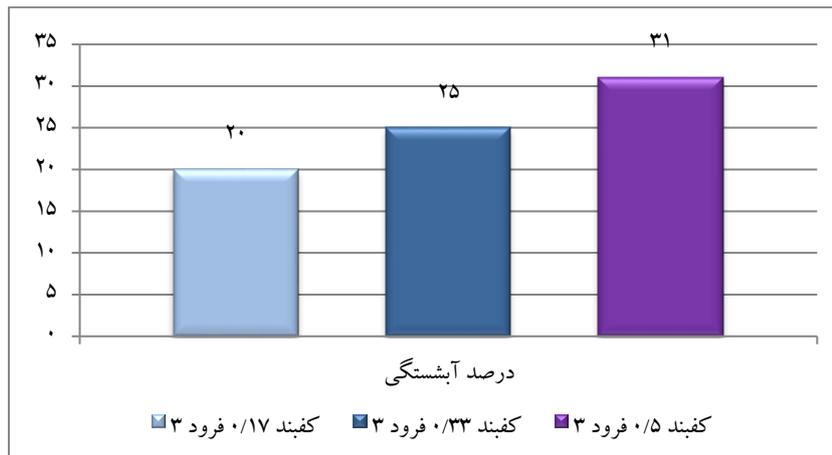
کفبند	طول کفبند (سانتی‌متر)	عرض بی بعد B/D	عدد فرود ذره	درصد آبستگي
کفبند	۵	۰/۱۷	۲	۲۲
کفبند	۱۰	۰/۳۳	۲	۳۳
کفبند	۱۵	۰/۵	۲	۳۳
کفبند	۵	۰/۱۷	۲/۵	۱۵
کفبند	۱۰	۰/۳۳	۲/۵	۲۰
کفبند	۱۵	۰/۵	۲/۵	۴۰
کفبند	۵	۰/۱۷	۳	۲۰
کفبند	۱۰	۰/۳۳	۳	۲۵
کفبند	۱۵	۰/۵	۳	۳۱



شکل ۲۱- نمودار مقایسه درصد‌های آبستگي در کفبند مختلف در فرود ذره ۲



شکل ۲۲- نمودار مقایسه درصد‌های آبستگي در کفبند مختلف در فرود ذره ۲/۵



شکل ۲۳- نمودار مقایسه درصدهای آبستگي در کفبند در فرود ذره ۳

نتیجه گیری

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

۱. همان‌طور 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

۲ به ترتیب ۲۲، ۳۳ و ۶۶ درصد و کفبند در فرود ذره

$2/5$ به ترتیب ۱۵، ۲۰ و ۴۰ درصد و کفبند در فرود ذره

۳ به ترتیب ۲۰ و ۲۵ و ۳۱ درصد عمق آبستگي را

کاهش داده‌اند این امر نشان می‌دهد که استفاده از

کفبند در کاهش عمق آبستگي پايين دست تأثیر مثبت

دارد.

۲. بیشترین کاهش عمق آبستگي برای کفبند

$B=0/5$ در عدد فرود ذره ۳ به میزان ۳۱ درصد می-

باشد.

منابع

- ۱- پیرستانی، م.ر.، رضازاده، م. و کاویانی، م. ۱۳۸۹. مطالعه آزمایشگاهی میزان آبستگي ناشی از برخورد جت‌های مستغرق و ریزشی، مجله مهندسی سازه‌های آبی، سال سوم، شماره: ۴، صفحه: ۵۸-۶۵.
- ۲- راهنمای روش‌های محاسبه آبستگي موضعی، نشریه شماره ۳۱۸ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس-جمهور.

۳. 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 پايين رونده، می‌تواند ابزار مناسبی جهت کاهش و دورتر تشکیل دادن چاله آبستگي در پايين دست سازه‌های هیدرولیکی مورد استفاده قرار گیرد.

پیشنهادات

۱. مدل‌سازی کفبند بستر با استفاده از نرم‌افزارهای عددی و مدل‌های عددی.
۲. استفاده از کفبند بستر با طول‌های مختلف به منظور یافتن عرض بهینه جهت کنترل آبستگي پايين دست سازه‌های هیدرولیکی.
۳. بررسی آزمایشگاهی کفبند بستر به وسیله زبری‌های مصنوعی

۳- یزدی، ع.، منافپور، م. و محمدی، م. ع. ۱۳۸۹. بررسی عملکرد هیدرولیکی کالورت‌ها با مقاطع هندسی مختلف، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران

- 4- 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)).
- 5- 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)).
- 6- 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.
- 7- 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.
- 8- Blaisdel, F. W. (1959). The SAF Stilling Basin, U.S. Government Printing Office.
- 9- 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.
- 10- 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.
- 11- Drainage Design Manual. (2017). Colorado Department of Transportation.
- 12- Federal Highway Administration. (1992). Bottomless culvert scour study, Phase I laboratory Report, FHWA – RD - 02 – 078.
- 13- Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels. (2006). US department of transportation- federal highway transportation, Hydraulic Engineering Circular No. 14, Third Edition.
- 14- Hosseini, S. M. and Abrishami, J. (2019). Open- channel hydraulics. No.35, pp. 613, Ferdowsi university of mashhad press (FUM Press). (In Persian)
- 15- 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>.
- 16- 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)
- 17- 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.
- 18- 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.
- 19- 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.
- 20- 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)