

مقاله علمی- پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی روش‌های کاهش آبشستگی پایاب حوضچه آرامش (مطالعه موردی: بند سنگی ملاتی و طنا)

فاطمه رایجی یانسری^۱، مهدی مفتاح هلقی^{۲*}، عبدالرضا ظهیری^۳، محمدعلی صلبی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۸

چکیده

استفاده از بندهای اصلاحی برای تثبیت بستر رودخانه‌ها و احداث حوضچه آرامش جهت مستهلک کردن انرژی در پایین دست این سازه‌ها امری متداول است. با این وجود همچنان شاهد فرسایش بستر رودخانه‌ها در پایین دست این سازه‌ها هستیم. از روش‌های تأثیرگذار بر کاهش پدیده آبشستگی، ایجاد پرش هیدرولیکی مستغرق درون حوضچه آرامش است. لذا در تحقیق حاضر، تغییرات عمق آبشستگی در پایین دست سازه بند سنگی ملاتی و طنا واقع در استان گلستان با ساخت مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۱۰ مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. تا بتوان با کاهش آبشستگی پایین دست آن، موجب افزایش عملکرد و طول عمر سازه مورد نظر، جهت حفاظت بستر رودخانه گردد. از دو روش شامل، بالا آوردن انتهای کانال و استفاده از صفحات مستغرق به همراه لایه آرمور بلافاصله پس از حوضچه آرامش استفاده شد. در بررسی انجام شده روش استفاده از صفحات مستغرق با آرایش زیگزاگی، کمترین درصد کاهش عمق آبشستگی برابر ۴۳/۳٪ مقدار مشاهده شده در آزمایش شاهد را نشان داد و روش بالا آوردن انتهای کانال معادل دو برابر عمق پایاب با لایه آرمور ۱/۵ برابر طول حوضچه آرامش، بیشترین درصد کاهش عمق آبشستگی برابر ۸۰٪ مقدار مشاهده شده در آزمایش شاهد را نشان داد، همچنین این روش به جهت ایجاد بیشترین مقدار آبشستگی در فاصله دورتر از حوضچه آرامش، عملکرد بهتری را در کاهش عمق آبشستگی پایاب حوضچه آرامش بند سنگی ملاتی مورد نظر داشت.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، بند سنگی ملاتی، رودخانه طنا، لایه آرمور، مدل فیزیکی - هیدرولیکی

مقدمه

آب و کم شدن شیب انرژی می‌شود، از روش‌های مرسوم در کاهش آبشستگی است (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۹۵). تخریب و یا آسیب سازه‌های آبی در بازه‌های زمانی مختلف در نقاط مختلف دنیا وجود دارد. علی پور و همکاران در بررسی هفتاد بند کوتاه سنگ و ملاتی واقع در آبخیز گلستان شیراز دریافتند احتمال تأثیر آبشستگی در آسیب‌دیدگی سازه‌ها ۲۸ درصد می‌باشد (Alipour et al., 2019). بررسی عوامل موثر بر آبشستگی و ارائه روش‌هایی جهت کنترل و کاهش آبشستگی و شبیه‌سازی کردن آنها، امری حیاتی برای حفاظت از سازه‌های آبی، جلوگیری از اختلال در عملکرد سازه‌ها و صرفه‌جویی در هزینه‌های اجرایی و زمان می‌باشد.

بندهای اصلاحی سازه‌های کوچکی هستند که با مصالحی چون سنگ، چوب، سنگ و ملات، بتن و توریسنگ در بستر آبراهه‌ها و عمود بر جریان با کاهش شیب بستر باعث کاهش سرعت آب و کاهش فرسایش در آبراهه‌ها می‌شود. (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور، ۱۳۸۷). شکل شماره ۱ یک نمونه بند سنگی ملاتی که در حوزه آبخیز طنا استان گلستان واقع شده را نشان می‌دهد.

رودخانه‌ها، نعمت بزرگ خدادادی در تأمین نیازهای اساسی مانند تأمین آب، تغذیه، امکانات رفاهی و روان‌شناختی و غیره می‌باشند که نقش مهمی در زندگی موجودات زنده ایفا می‌کنند. رودخانه‌ها اغلب تحت تأثیر عوامل طبیعی و غیرطبیعی (دخالت‌های انسانی) دچار تغییرات مورفولوژی مانند فرسایش بستر یا کف‌کنی و گودافتادگی ممتد و مستمر می‌شوند. احداث سازه‌هایی که موجب بالا رفتن سطح

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده آب،

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی

گرگان، گرگان، ایران

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی

گرگان، گرگان، ایران

۴- دانش آموخته دکتری سازه‌های آبی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی

گرگان، گرگان، ایران

(* نویسنده مسئول (Email: Meftah@gau.ac.ir)



شکل ۱- تصویر بند سنگی ملاتی وطنا

حاصل برداشت شن و ماسه از بستر و کناره‌های رودخانه است. در تحقیقات آزمایشگاهی حمیدی فر و امید (۱۳۸۹) با بکارگیری دو نوع رس با اندازه‌های ۰/۷۳ و ۱/۸۵ میلی‌متر، اثر آن در آبستتگی پایین‌دست کف‌بند را بررسی نمودند و دریافتند حداکثر عمق آبستتگی در رسوبات ریزدانه‌تر در صورت ثابت بودن میزان رس، افزایش و با افزایش میزان رس، کاهش می‌یابد. معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور (۱۳۹۰) بنا بر این تحقیقات مشخص شد که اندازه و دانه‌بندی رسوبات، عمق پایاب، عدد فرود ذره، هندسه سازه و ... از موارد مؤثر بر آبستتگی در پایین‌دست سازه می‌باشند. مرادی و پریش (۱۳۹۰) بیان کردند در پایاب‌های عمیق نسبت به پایاب‌های کم‌عمق کاهش عمق آبستتگی بیشتر است. کوچک و شفافی بجهستان (۱۳۹۱) دریافتند افزایش عدد فرود باعث افزایش ابعاد آبستتگی می‌شود، اندازه دانه‌بندی رسوبات بستر با ابعاد چاله فرسایشی رابطه‌ی معکوس دارد و افزایش زبری کف‌بند افقی اثر بسزایی در کاهش ابعاد چاله آبستتگی دارد. شفافی بجهستان و امیدی (۱۳۹۴) در بررسی آبستتگی پایین‌دست حوضچه آرامش در شرایط تشکیل پرش هیدرولیکی نوع b نتایج نشان داد، افزایش دبی با عمق و طول آبستتگی رابطه مستقیم دارد و نیز با مقایسه‌ی پروفیل‌ها در ارتفاع‌های مختلف، با حرکت پرش به سمت بالادست شیب، عمق حفره، طول حفره و طول کل آبستتگی کاهش یافته و ارتفاع پشته افزایش می‌یابد. نور محمدی و همکاران (۱۳۹۷) دریافتند افزایش اندازه زبری در دامنه دبی‌ها و عمق‌های پایاب مختلف باعث کاهش حداکثر عمق آبستتگی به میزان ۲۱-۵ درصد در دامنه زبری‌های حداقل و حداکثر می‌شود. بر طبق بررسی مؤیدی و همکاران (۱۳۹۹) بررسی نشان داد ایجاد کف‌بند بر کاهش حداکثر عمق نهایی آبستتگی مؤثر است و با افزایش اندازه زبری از میزان آبستتگی کاسته می‌شود. به طوری که با تغییر زبری، حداکثر عمق نهایی آبستتگی ۳۱/۵ درصد کاهش می‌یابد. وحیدی الوار و همکاران (۱۳۹۹) با ساخت مدل فیزیکی سد انحرافی شهدا در استان خوزستان، بایان دلایل بروز آبستتگی در پایین‌دست حوضچه آرامش به ارائه

تحقیقات زیادی در مورد روش‌های کاهش آبستتگی انجام شده که بررسی تعدادی از آن‌ها به شرح زیر است:

بروزر تحقیقاتی بر روی پدیده آبستتگی در شرایط گوناگونی و متنوع بودن مواد بستر، چگالی و ترکیبات هندسی انجام داد، نتایج نشان داد پروفیل‌های آبستتگی در تمام زمان‌ها برای یک هندسه مشخص مشابه است. همچنین برای تکامل زمان آبستتگی رابطه‌ی را ارائه داد (Breusers., 1965). بروزر نشان داد اندازه ذرات رسوبی بر پیشروی و تعادل عمق آبستتگی اثرگذار است و نیز چگالی مواد رسوبی بستر با عمق آبستتگی رابطه عکس دارد (Breusers., 1966). پیترا نشان داد وجود مانع در مقابل جریان آب به سبب جداشدگی جت ورودی، استهلاک انرژی، تنش برشی و نیروی دراگ روند افزایشی و نسبت اعماق مزدوج روند کاهشی دارد (Peterka., 1958). فرهودی و اسمیت در تحقیقات خود وجود تشابه در پروفیل‌های آبستتگی پایین‌دست پرش هیدرولیکی را بررسی نمودند و در سطح‌های کم، متوسط و زیاد عمق پایاب جهت مشخص کردن حفره آبستتگی نمودارهای بی‌بعدی ارائه کردند (Farhoudi and Smith., 1985). لنزی و کومیتی در پایین‌دست بندهای اصلاحی احداث شده در آبراهه‌های کوهستانی ایتالیا، آبستتگی را بررسی کردند و دریافتند که عواملی مانند بیشترین شیب اصلاح شده آبراهه‌ها، ارتفاع و فاصله بندها، عمق جریان روی بند بر بیشینه عمق آبستتگی پایین‌دست بندهای اصلاحی مؤثر است (Lenzi and Comiti., 2003). درگاهی پس از بررسی توسعه آبستتگی پایین‌دست یک سرریز، دریافت بین پروفیل‌های حفره آبستتگی شباهت و در عرض حفره آبستتگی تقارنی وجود ندارد (Dargahi., 2003). هانگ و همکاران دریافتند ایجاد پرش هیدرولیکی از نوع آزاد در پایین‌دست حوضچه آرامش باعث افزایش آبستتگی می‌شود و رابطه‌ی عکس با عمق پایاب دارد (Hong et al., 2010). نور مهناد و همکاران (۱۳۸۶) در بررسی‌ای که بر روی رودخانه خشکه رود انجام دادند، نتیجه گرفتند که به هم‌خوردگی و فرسایش در پروفیل طولی رودخانه و نیز عمیق شدن بستر رودخانه و انتقال پدیده گودشدگی به بالادست

کاهش می‌دهد. کریمی و همکاران (۱۴۰۰) با بررسی آزمایشگاهی اثر آرایش صفحات مستغرق تخت (یک و دو ردیف موازی و دو ردیف زیگزگی) بر آبخستگی در اطراف پایه‌ها و تکیه‌گاه پل دریافتند، آرایش دو ردیف سه‌تایی به‌صورت زیگزگی اثر بیشتری در کاهش آبخستگی و حفاظت پایه‌ها و تکیه‌گاه دارد.

جریان خروجی از حوضچه‌های آرامش عمدتاً دارای سرعت نسبتاً بالایی است و باعث ایجاد آبخستگی در پایین‌دست این نوع سازه‌ها می‌شود. روش‌های متفاوتی برای کاهش آبخستگی پایین‌دست سازه‌ها بکار گرفته شده است. در این تحقیق پایین‌دست بند سنگ و ملات وطنای به دلیل فرسایش بیش‌ازحد، با دو روش بالا آوردن انتهای کانال و استفاده از صفحات مستغرق به همراه لایه‌آرمور بلافاصله پس از حوضچه آرامش موردبررسی قرار گرفته تا بتوان با تدابیری آبخستگی پایین‌دست آن و به‌نوعی تخریب و آسیب سازه موردنظر را به حداقل رساند. این امر موجب افزایش عملکرد و طول عمر سازه موردنظر، جهت تثبیت و حفاظت بستر رودخانه می‌شود.

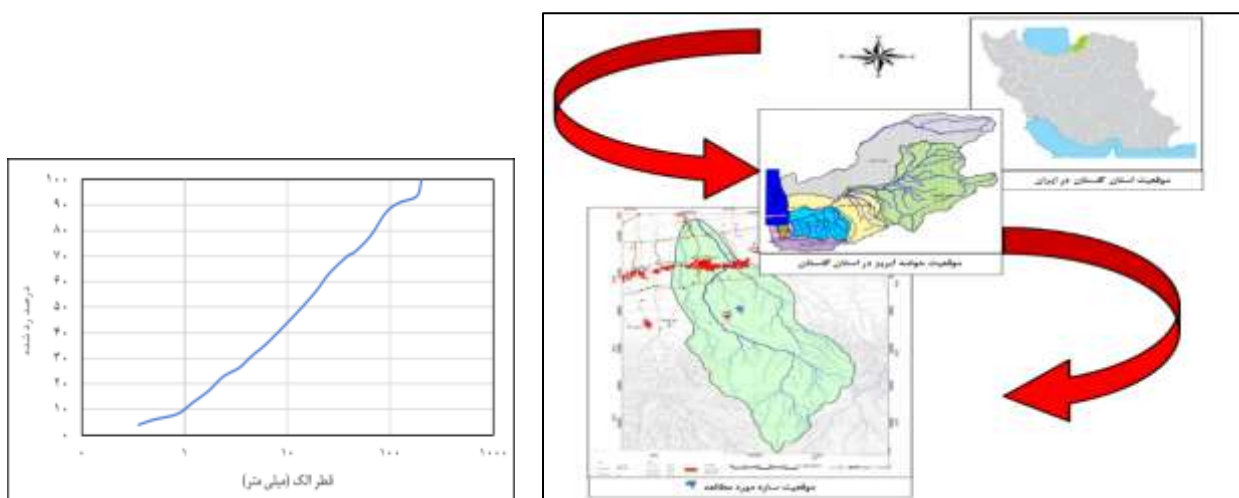
مواد و روش

موقعیت مکانی بند سنگی ملاتی وطنای

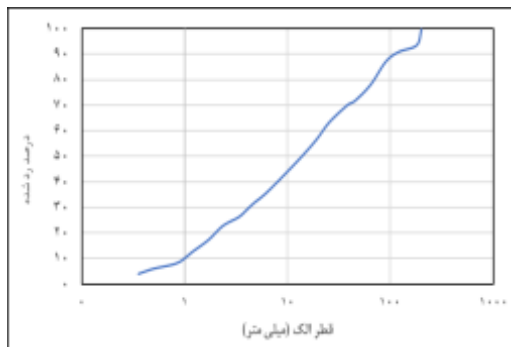
محدوده مورد مطالعه جزئی از حوضه آبریز خلیج گرگان است که در غربی‌ترین بخش استان گلستان واقع شده است. رودخانه وطنای از ارتفاعات البرز شرقی (ارتفاعات انزاجال و جنگل‌های موزی لنگه) سرچشمه گرفته و اراضی غربی، شمالی و جنوبی وطنای را در برمی‌گیرد. این رودخانه پس از گذشتن از مجاورت روستای وطنای از اراضی گز غربی و شرقی گذشته و به سمت بندرگز ادامه مسیر داده و در قسمت دشت به خلیج گرگان و تالاب میانکاله می‌ریزد. بند سنگی ملاتی موردنظر در مختصات جغرافیایی به طول ۷۶۴۵۴۴ و عرض ۴۰۶۷۸۳۳ بر روی این رودخانه قرار دارد. نمونه‌گیری رسوب‌های سطح بستر رودخانه به روش شمارشی با استفاده از یک قالب مربعی شکل به ابعاد ۶۰ سانتی‌متر و رسوب‌های زیرسطحی رودخانه به روش حجمی (طبق پیشنهاد دیپلاس، فریپ، سیمونز و سنتورک به عمق حداقل ۲ برابر بزرگ‌ترین قطعه سنگ) انجام شد (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور، ۱۳۹۰). با توجه به قطر مصالح درشت و ریز به ترتیب با استفاده از روش شمارشگر و دانه‌بندی الک (شیکر)، پس از اندازه‌گیری وزن آن‌ها، منحنی دانه‌بندی مصالح بستر ترسیم شد. شکل شماره ۲ موقعیت مکانی بند سنگی ملاتی وطنای را نشان می‌دهد. شکل شماره ۳ نمودار دانه‌بندی مصالح رودخانه را نشان می‌دهد.

راهکاری پرداختند که نتایج بیانگر استاندارد نبودن طول حوضچه و سرعت بالای جریان در پایین‌دست حوضچه نسبت به سرعت آستانه حرکت ذرات بستر بوده است، همچنین میزان آبخستگی با افزایش دبی و افزایش طول پرش هیدرولیکی با دبی ثابت و با افزایش عمق پایاب به ترتیب روند افزایشی و کاهش‌ی دارند. صلیبی و همکاران (۱۴۰۰) در بررسی آزمایشگاهی تأثیر پرش مستغرق در کاهش آبخستگی پایین‌دست حوضچه آرامش بند سنگی ملاتی زیارت نشان دادند که افزایش ارتفاع پایاب به همراه افزایش زبری بستر باعث کاهش آبخستگی شده، به طوری که با افزایش عمق پایاب به میزان ۱/۵ برابر عمق اولیه، آبخستگی ناچیز می‌شود. بابلی و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از مدل عددی در شبیه‌سازی آبخستگی پایین‌دست کف‌بند افقی نشان دادند که با افزایش ضریب زبری مانینگ، سرعت جریان گذشته و آبخستگی پایین‌دست نیز کاهش می‌یابد و با افزایش عدد فرود، آبخستگی افزایش می‌یابد.

استفاده از صفحات مستغرق یکی دیگر از روش‌های تأثیرگذار بر کاهش آبخستگی در رودخانه‌ها است که برای اولین بار توسط پتاپور و پانچ‌کین در سال ۱۹۴۷ در دانشگاه مسکو، مطرح و با آزمایش‌های مدل هیدرولیکی به‌منظور دور کردن رسوبات بستر در پیچ رودخانه (باقر پور و سیدیان، ۱۳۹۲) و توسط ادگارد و ونگ در سال ۱۹۸۷ جهت کنترل آبخستگی کنار پایه استوانه‌ای استفاده شد (Wang and Odgaard., 1987). عزیززی و همکاران (۱۳۹۰) باهدف پایین آوردن هزینه‌ها و کاهش عمق آبخستگی، به بهینه‌سازی شکل و کاهش ابعاد صفحات پرداختند که در بررسی انجام‌شده از بین صفحات مستطیلی تخت و سه صفحه با بریدگی‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه در لبه ابتدایی صفحه، عمق آبخستگی در لبه صفحات با بریدگی ۶۰ درجه بیشترین کاهش آبخستگی را نشان داد. عزیززی و همکاران (۱۳۹۲) در بررسی تأثیر صفحات مستغرق بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش دریافتند که استفاده از صفحات مستغرق، طول پرش و عمق ثانویه را به ترتیب ۲۵ و ۱۰ درصد کم می‌کند در ارتفاع ۴/۴ سانتی‌متر و زاویه ۹۰ درجه که شرایط بهینه است تنش برشی بستر در حالت با مانع ۱۲ برابر بیشتر از بستر صاف است. نتایج بررسی کریمی و همکاران (۱۳۹۸) نشان می‌دهد عملکرد صفحات مستغرق تحت تأثیر نحوه‌ی قرارگیری و شکل صفحات است. بیشترین درصد کاهش آبخستگی مربوط به قرارگیری صفحات انحنا دار در حالت دو ردیف ۶ تایی به‌صورت متقارن نسبت به خطوط جریان در زاویه برخورد جریان ۲۰ درجه، بافاصله قرارگیری ۳ سانتی‌متر از تکیه‌گاه و فاصله ردیف صفحات از هم ۶ سانتی‌متر که در این حالت موجب کاهش ۴۶ درصد عمق آبخستگی می‌شود. صلیبی و همکاران (۱۳۹۹) در تحقیق آزمایشگاهی روش‌های کاهش آبخستگی پایاب سازه‌های سنگ ملاتی زیارت دریافتند استفاده از صفحات مستغرق ۲۰ و ۴۵ درجه همگرا آبخستگی را نسبت به سطح‌مبنا به ترتیب ۷۴ و ۳۹ درصد



شکل ۲- موقعیت مکانی بند سنگی ملاتی و طنا



شکل ۳- نمودار دانه‌بندی مصالح رودخانه

توجه به نمودار دانه‌بندی رودخانه و مقیاس مورد نظر انتخاب شده است. جدول شماره ۱ ابعاد سازه اصلی و مدل را نشان می‌دهد. همچنین شکل شماره ۴ نمایی از مدل نصب شده در کانال را نشان می‌دهد.

تحلیل ابعادی

پارامترهای مؤثر بر پدیده آبشستگی که در جدول ۲ به آن‌ها اشاره شده است، در رابطه ۲ آمده است:

$$F(v, \rho, \gamma_t, H, g, \rho_s, \mu, D_s, \gamma_s, q, h_d, s_g) = 0 \quad (2)$$

به علت اثر مشابه از بین پارامترهای دبی و سرعت و همچنین بار آبی بالادست و اختلاف تراز آب بالادست و پایین دست یک پارامتر را در نظر می‌گیریم و به علت ثابت بودن بستر، چگالی ویژه مواد نیز صرف نظر شده است. در نتیجه از ۱۲ پارامتر مؤثر بر پدیده آبشستگی، ۹ پارامتر بر اساس رابطه ۳ در تحلیل ابعادی آمده است:

$$F(v, \rho, \gamma_t, H, g, \rho_s, \mu, D_s, \gamma_s) = 0 \quad (3)$$

بر اساس مبانی شبیه‌سازی فیزیکی بستر متحرک در صورتی که جریان آشفته و زیر بوده و مصالح نیز شن یا ماسه باشند. برای تعیین مقیاس مدل، یالین رابطه شماره (۱) را ارائه نمود (Yalin., 1971). دو شرط جریان زیر و متلاطم در رابطه ۱ نشان داده شده است.

$$\left(\frac{70}{\frac{u_* D_{50}}{v}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

که در آن v , u_* , λ_D به ترتیب مقیاس قائم، سرعت برشی و لزجت سینماتیکی می‌باشند.

بنابراین با توجه به رابطه ذکر شده مقیاس انتخابی باید بزرگ‌تر از $\frac{1}{20}$ باشد. با توجه به شرایط آزمایشگاه و افزایش دقت، مقیاس $\frac{1}{10}$ در نظر گرفته شد که بزرگ‌تر از شرط ذکر شده است. همچنین با توجه به امکانات آزمایشگاه میزان دبی ۳۲ لیتر بر ثانیه انتخاب شد که معادل دبی با دوره بازگشت ۵۰ ساله (۱۰ مترمکعب بر ثانیه) در سازه اصلی بوده است. برای انجام این آزمایش مدل سازه بند سنگ و ملات و طنا با مقیاس $\frac{1}{10}$ ساخته شد. مصالح بستر کانال نیز مانند شرایط مدل با

جدول ۱- ابعاد سازه اصلی و مدل

ردیف	پارامترها	سازه اصلی (متر)	مدل (سانتی‌متر)
۱	طول سرریز	۰/۸	۸
۲	طول	۵/۵	۵۵
۳	عرض	۱۰	۱۰۰
۴	ارتفاع	۱/۳	۱۳
۵	طول حوضچه آرامش	۲/۷۵	۲۷/۵



شکل ۴- نمایی از مدل نصب‌شده در کانال

جدول ۲- پارامترهای مؤثر بر پدیده آبشستگی

نوع مشخصات	نوع عامل	علامت اختصاری	واحد
جریان	سرعت	v	متر بر مجذور ثانیه
	عمق جریان	y	متر
	عمق جریان در پایاب حوضچه	y_t	متر
	بار آبی بالادست	h_d	متر
سیال	دبی جریان	q	مترمکعب بر ثانیه
	چگالی	ρ	کیلوگرم بر مترمکعب
	شتاب ثقل	g	متر بر مجذور ثانیه
مصالح رسوبی	لزجت دینامیکی	μ	پاسکال ثانیه
	اندازه ذرات	D_s	متر
	چگالی ذرات	ρ_s	کیلوگرم بر مترمکعب
	عمق آبشستگی از کف بستر اولیه	y_s	متر
	چگالی ویژه مواد	S_g	کیلوگرم بر مترمکعب

گردش آب را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است آزمایش‌ها در آزمایشگاه آب و رسوب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شد. آزمایش‌ها در کانالی به طول ۹ متر و عرض و ارتفاع یک متر، پس از ساخت و تعبیه مدل سازه از ورق گالوانیزه به قطر یک میلی‌متر، با شرایط آب زلال انجام شد. با استفاده از اشل و دستگاه اندازه‌گیری توپوگرافی بستر با دقت ۱ میلی‌متر، داده‌های موردنیاز ثبت و نقشه‌های دو و سه‌بعدی از بستر ترسیم شد. ضخامت لایه‌آرمور ۱۹ تا ۲۵/۴ میلی‌متر در نظر گرفته شد. که در طبیعت معادل ۱۹ تا ۲۵/۴ سانتی‌متر است. با انجام آزمایش شاهد، ثبت، اندازه‌گیری و برآورد پارامترهای موردنیاز، زمان تعادل ۶ ساعت، عمق پایاب ۴ سانتی‌متر، عمق آب در حوضچه آرامش ۱/۵ سانتی‌متر و ارتفاع لایه‌آرمور ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. اندازه و ارتفاع ذرات رسوبی لایه‌آرمور در تمام مراحل ثابت بوده است. جهت بالا آوردن انتهای کانال از چوب با ارتفاع موردنظر استفاده شد. صفحات مستغرق به تعداد ۳۰ عدد از جنس ورق گالوانیزه به قطر ۱ میلی‌متر، طول ۵ و عرض ۱/۵ سانتی‌متر با آرایش زیگزاگی و پنج پر

با استفاده از روش پی‌باکینگهام و در نظر گرفتن پارامترهای (v, ρ, y_t) به‌عنوان متغیر تکراری و پارامترهای $(H, g, \rho_s, \mu, D_s, y_s)$ به‌عنوان متغیر غیرتکراری رابطه ۴ به دست می‌آید.

$$\mathcal{F}\left(\frac{H}{y_t}, Fr^2, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{\mu}{\rho y_t v}, \frac{D_s}{y_t}, \frac{y_s}{y_t}\right) = 0 \quad (4)$$

به خاطر آشفته بودن جریان از اثر عدد رینولدز و همچنین به دلیل ثابت بودن چگالی ذرات بستر از اثر چگالی نسبی نیز صرف‌نظر شد، پس از ساده کردن رابطه بی‌بعد، رابطه ۵ به دست آمد.

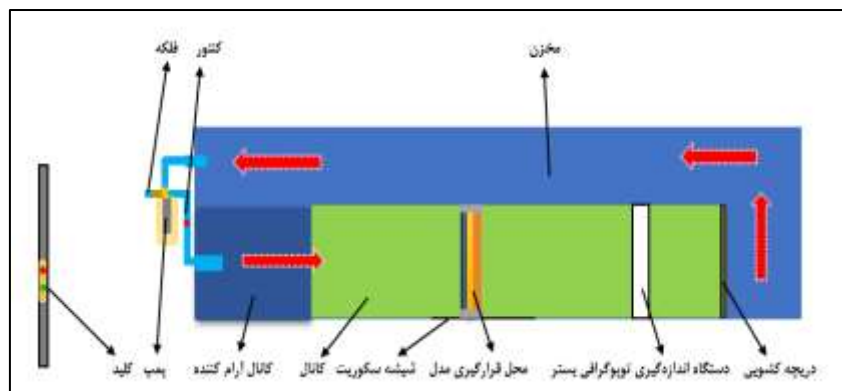
$$\mathcal{F}\left(\frac{H}{y_t}, Fr^2, \frac{D_s}{y_t}, \frac{y_s}{y_t}\right) = 0 \quad (5)$$

در نتیجه گروه‌های بی‌بعد مؤثر بر عمق آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش در رابطه ۶ نشان داده شده است.

$$\frac{y_s}{y_t} = \mathcal{F}\left(\frac{H}{y_t}, Fr^2, \frac{D_s}{y_t}\right) \quad (6)$$

گردش آب در سیستم ذخیره و انتقال، به‌این صورت است که با روشن کردن پمپ، حجم موردنیاز آب توسط کنتور که (در ابتدای کانال آرام‌کننده قرارداد) از مخزن وارد کانال آرام‌کننده و سپس وارد کانال می‌شود. شکل شماره ۵ جانمایی تجهیزات آزمایشگاه و سیستم

با زاویه ۴۵ درجه، استفاده شده است. شکل‌های شماره ۸ و ۹ صفحات مستغرق استفاده شده به ترتیب با آرایش زیگزاگی و پنج پر را نشان می‌دهد. جدول شماره ۳ جزئیات آزمایش‌های ارائه شده است.



شکل ۵- جانمایی تجهیزات آزمایشگاه و سیستم گردش آب



شکل ۹- صفحات مستغرق پنج‌پر



شکل ۸- صفحات مستغرق زیگزاگی

جدول ۳- جزئیات آزمایش‌های ارائه شده

نماد آزمایش	شرح آزمایش
t0	شاهد (بدون روش اجرایی)
t1	استفاده از لایه آرمور برابر با طول حوضچه آرامش به همراه بالا آوردن انتهای کانال به میزان نصف عمق پایاب
t2	استفاده از لایه آرمور ۱/۵ برابر طول حوضچه آرامش به همراه بالا آوردن انتهای کانال به میزان نصف عمق پایاب
t3	استفاده از لایه آرمور ۲ برابر طول حوضچه آرامش به همراه بالا آوردن انتهای کانال به میزان نصف عمق پایاب
t4	استفاده از لایه آرمور برابر با طول حوضچه آرامش به همراه بالا آوردن انتهای کانال به میزان عمق پایاب
t5	استفاده از لایه آرمور ۱/۵ برابر با طول حوضچه آرامش به همراه بالا آوردن انتهای کانال به میزان عمق پایاب
t6	استفاده از لایه آرمور برابر طول حوضچه آرامش به همراه بالا آوردن انتهای کانال به میزان ۱/۵ برابر عمق پایاب
t7	استفاده از لایه آرمور ۱/۵ برابر طول حوضچه آرامش به همراه بالا آوردن انتهای کانال به میزان ۱/۵ برابر عمق پایاب
t8	استفاده از صفحات مستغرق با آرایش زیگزاگی در حوضچه آرامش
t9	استفاده از صفحات مستغرق با آرایش زیگزاگی در حوضچه آرامش به همراه لایه آرمور برابر با طول حوضچه آرامش
t10	استفاده از صفحات مستغرق با آرایش پنج پر در حوضچه آرامش
t11	استفاده از صفحات مستغرق با آرایش پنج پر در حوضچه آرامش به همراه لایه آرمور برابر با طول حوضچه آرامش

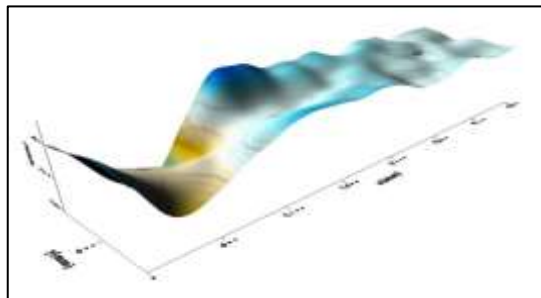
نتایج و بحث

آزمایش شاهد

برای این که آزمایش‌های انجام شده با یک سطح مینا مقایسه شود ابتدا آزمایش در حالتی که بستر کانال پوشیده از مصالح یکسان است

و هیچ گونه سازه‌ای در پایین دست حوضچه آرامش و همچنین پایاب کانال قرار ندارد شبیه‌سازی و به مدت ۱۲ ساعت (آزمایش شاهد) اجرا شد. منحنی زمان تعادل در شکل شماره ۱۰ رسم شد. حداکثر عمق آبشستگی به میزان ۱۵ سانتی‌متر در ۸ ساعت اول و ۹۰٪ آبشستگی

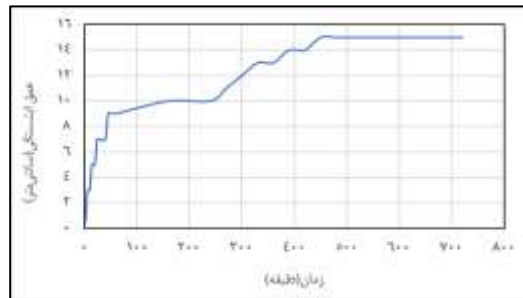
برابر ۱۵ سانتی‌متر، معادل نصف عمق آبستگی ابتدای بستر است. شکل شماره ۱۱ توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش شاهد را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش شاهد

آبستگی به علت متفاوت بودن روش‌های اجرا شده مشاهده شد. شکل شماره ۱۵ توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش t4 را نشان می‌دهد. در آزمایش t5 حداکثر عمق آبستگی ۳/۳ سانتی‌متر در فاصله ۵۰ سانتی‌متری از حوضچه آرامش و عمق آبستگی ابتدای بستر ۳/۵ سانتی‌متر مشاهده شد. درصد کاهش آبستگی در ابتدای بستر و مکانی که حداکثر عمق آبستگی رخ داده به ترتیب ۷۶/۶٪ و ۷۸٪ مقدار مشاهده شده در آزمایش شاهد است. در این روش نسبت به آزمایش قبل ۰/۵ سانتی‌متر، کاهش آبستگی به علت افزایش طول لایه‌آرمور مشاهده شد. شکل شماره ۱۶ توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش t5 را نشان می‌دهد. در آزمایش t6 حداکثر عمق آبستگی ۳ سانتی‌متر در فاصله ۵۰ سانتی‌متری حوضچه آرامش و عمق آبستگی ابتدای بستر ۲/۵ سانتی‌متر مشاهده شد. درصد کاهش آبستگی در ابتدای بستر و مکانی که حداکثر عمق آبستگی رخ داده به ترتیب ۸۳/۳٪ و ۸۰٪ مقدار مشاهده شده در آزمایش شاهد است. در این روش نسبت به روش قبلی ۰/۳ سانتی‌متر، کاهش آبستگی به علت افزایش ارتفاع انتهای کانال مشاهده شد. شکل شماره ۱۷ توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش t6 را نشان می‌دهد. در آزمایش t7 حداکثر عمق آبستگی ۳ سانتی‌متر و در فاصله ۲۷۵ سانتی‌متری از حوضچه آرامش و عمق آبستگی ابتدای بستر ۲/۵ سانتی‌متر مشاهده شد. درصد کاهش آبستگی در ابتدای بستر و مکانی که حداکثر عمق آبستگی رخ داده به ترتیب ۸۳/۳٪ و ۸۰٪ مقدار مشاهده شده در آزمایش شاهد است. در این روش نسبت به روش قبلی تغییر نداشته و تفاوت در محل ایجاد حداکثر عمق آبستگی است. شکل شماره ۱۸ توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش t7 را نشان می‌دهد. جدول شماره ۴ میزان حداکثر عمق آبستگی و درصد کاهش عمق آبستگی (آزمایش‌های بالا آوردن انتهای کانال به همراه لایه‌آرمور) نسبت به شاهد را نشان می‌دهد.

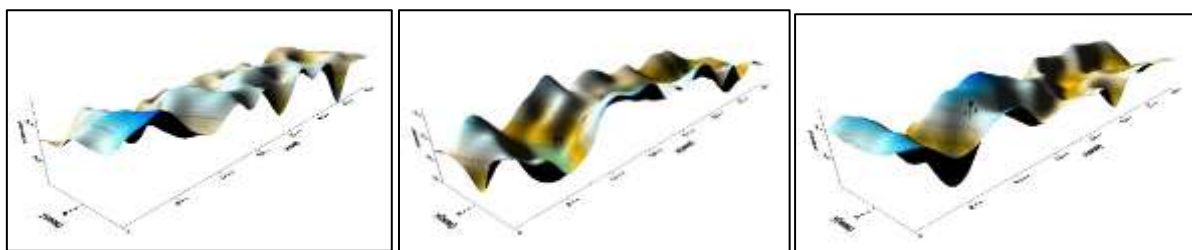
در ۶ ساعت اول مشاهده شد و براین اساس بقیه آزمایش‌ها در مدت‌زمان ۶ ساعت انجام شد. لازم به ذکر است حداکثر عمق آبستگی آزمایش شاهد در فاصله ۵۰ سانتی‌متری از حوضچه آرامش



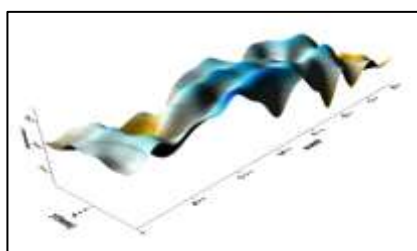
شکل ۱۰- نمودار زمان تعادل

بالا آوردن انتهای کانال به همراه لایه‌آرمور

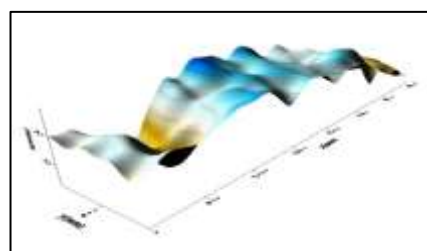
در آزمایش t1 حداکثر عمق آبستگی ۵/۴ سانتی‌متر در فاصله ۵۰ سانتی‌متری از حوضچه آرامش و عمق آبستگی ابتدای بستر ۳ سانتی‌متر مشاهده شد. درصد کاهش آبستگی در ابتدای بستر و مکانی که حداکثر عمق آبستگی رخ داده به ترتیب ۸۰٪ و ۶۴٪ مقدار مشاهده شده در آزمایش شاهد است. شکل شماره ۱۲ توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش t1 را نشان می‌دهد. در آزمایش t2 حداکثر عمق آبستگی ۳/۸ سانتی‌متر در فاصله ۵۰ سانتی‌متری از حوضچه آرامش و عمق آبستگی ابتدای بستر ۳ سانتی‌متر مشاهده شد. درصد کاهش آبستگی در ابتدای بستر و مکانی که حداکثر عمق آبستگی رخ داده به ترتیب ۸۰٪ و ۷۴/۶٪ مقدار مشاهده شده در آزمایش شاهد است. در روش اجرا شده نسبت به روش قبل، ۱/۶ سانتی‌متر کاهش آبستگی به علت افزایش طول لایه‌آرمور مشاهده شد. شکل شماره ۱۳ توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش t2 را نشان می‌دهد. در آزمایش t3 حداکثر عمق آبستگی ۳/۴ سانتی‌متر در فاصله ۷۵ سانتی‌متری از حوضچه آرامش و عمق آبستگی ابتدای بستر ۳/۲ سانتی‌متر مشاهده شد. درصد کاهش آبستگی در ابتدای بستر و مکانی که حداکثر عمق آبستگی رخ داده به ترتیب ۷۸/۶٪ و ۷۷/۳٪ مقدار مشاهده شده در آزمایش شاهد است. در روش اجرا شده نسبت به آزمایش قبلی، ۰/۴ سانتی‌متر کاهش آبستگی به علت افزایش طول لایه‌آرمور مشاهده شد. شکل شماره ۱۴ توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش t3 را نشان می‌دهد. در آزمایش t4 حداکثر عمق آبستگی ۳/۸ سانتی‌متر در فاصله ۵۰ سانتی‌متری از حوضچه آرامش و عمق آبستگی ابتدای بستر ۳/۶ سانتی‌متر مشاهده شد. درصد کاهش آبستگی در ابتدای بستر و مکانی که حداکثر عمق آبستگی رخ داده به ترتیب ۷۶٪ و ۷۴/۶٪ مقدار مشاهده شده در آزمایش شاهد است. در این روش نسبت به روش قبلی، ۰/۴ سانتی‌متر افزایش عمق



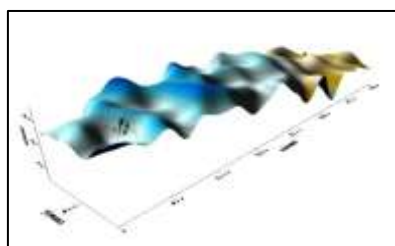
شکل ۱۲- توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش t1، شکل ۱۳- توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش t2، شکل ۱۴- توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش t3



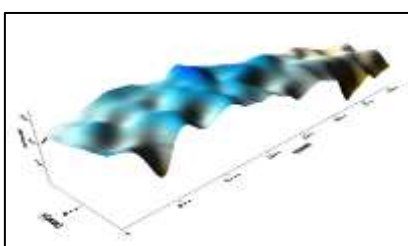
شکل ۱۶- توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش t5



شکل ۱۵- توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش t4



شکل ۱۸- توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش t7



شکل ۱۷- توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش t6

جدول ۴- حداکثر عمق آبشستگی و درصد کاهش عمق آبشستگی (آزمایش‌های بالا آوردن انتهای کانال به همراه لایه‌آرمور) نسبت به شاهد

نماد آزمایش‌ها	حداکثر عمق آبشستگی ابتدای بستر (سانتی‌متر)	درصد کاهش عمق آبشستگی ابتدای بستر نسبت به شاهد	حداکثر عمق آبشستگی بستر (سانتی‌متر)	درصد کاهش حداکثر عمق آبشستگی بستر نسبت به شاهد
t1	۳	٪۸۰	۵/۴	٪۶۴
t2	۳	٪۸۰	۳/۸	٪۷۴/۶
t3	۳/۲	٪۷۸/۶	۳/۴	٪۷۷/۳
t4	۳/۶	٪۷۶	۳/۸	٪۷۴/۶
t5	۳/۵	٪۷۶/۶	۳/۳	٪۷۸
t6	۲/۵	٪۸۳/۳	۳	٪۸۰
t7	۲/۵	٪۸۳/۳	۳	٪۸۰

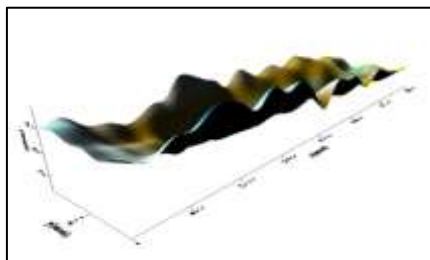
مقدار مشاهده شده در آزمایش شاهد است. شکل شماره ۱۹ توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش t8 را نشان می‌دهد. در آزمایش t9 حداکثر عمق آبشستگی ۶/۵ سانتی‌متر در فاصله ۱۲۵ سانتی‌متری از حوضچه آرامش و عمق آبشستگی ابتدای بستر ۳/۸ سانتی‌متر مشاهده شد. درصد کاهش آبشستگی در ابتدای بستر و مکانی که

صفحات مستغرق و لایه‌آرمور

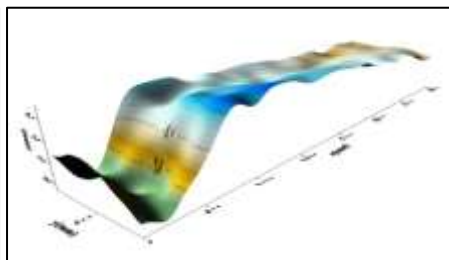
در آزمایش t8 حداکثر عمق آبشستگی ۸/۵ سانتی‌متر در فاصله ۲۵ سانتی‌متری از حوضچه آرامش و عمق آبشستگی ابتدای بستر ۵/۵ سانتی‌متر مشاهده شد. درصد کاهش آبشستگی در ابتدای بستر و مکانی که حداکثر عمق آبشستگی رخ داده به ترتیب ۶۳/۳٪ و ۴۳/۳٪

t10 را نشان می‌دهد. در آزمایش t11 حداکثر عمق آبشستگی ۵ سانتی‌متر در فاصله ۲۰۰ سانتی‌متری از حوضچه آرامش و عمق آبشستگی ابتدای بستر ۳/۴ سانتی‌متر مشاهده شد. درصد کاهش آبشستگی در ابتدای بستر و مکانی که حداکثر عمق آبشستگی رخ داده به ترتیب ۷۷/۳٪ و ۶۶/۶٪ مقدار مشاهده شده در آزمایش شاهد است. در این آزمایش نسبت به آزمایش قبل ۲/۵ سانتی‌متر کاهش آبشستگی به علت استفاده از لایه آرمور مشاهده شد. شکل شماره ۲۲ توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش t11 را نشان می‌دهد. جدول شماره ۵ میزان حداکثر عمق آبشستگی و درصد کاهش عمق آبشستگی (آزمایش‌های صفحات مستغرق و لایه آرمور) نسبت به شاهد را نشان می‌دهد.

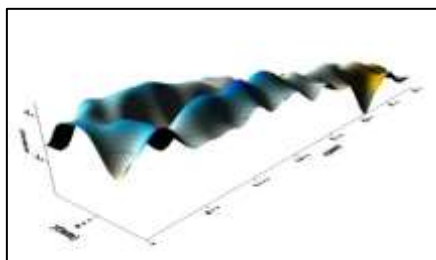
حداکثر عمق آبشستگی رخ داده به ترتیب ۷۴/۶٪ و ۵۶/۶٪ مقدار مشاهده شده در آزمایش شاهد است. در این آزمایش نسبت به آزمایش قبل ۲ سانتی‌متر کاهش آبشستگی به علت استفاده از لایه آرمور مشاهده شد. شکل شماره ۲۰ توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش t9 را نشان می‌دهد. در آزمایش t10 حداکثر عمق آبشستگی ۷ سانتی‌متر در فاصله ۳۵۰ سانتی‌متری از حوضچه آرامش و عمق آبشستگی ابتدای بستر ۵ سانتی‌متر مشاهده شد. درصد کاهش آبشستگی در ابتدای بستر و مکانی که حداکثر عمق آبشستگی رخ داده به ترتیب ۶۶/۶٪ و ۵۰٪ مقدار مشاهده شده در آزمایش شاهد است. در این آزمایش نسبت به آزمایش قبل ۱ سانتی‌متر افزایش آبشستگی به علت عدم استفاده از لایه آرمور و تفاوت آرایش صفحات بکار رفته مشاهده شد. شکل شماره ۲۱ توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش



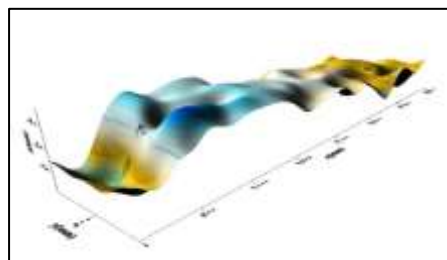
شکل ۲۰- توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش t9



شکل ۱۹- توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش t8



شکل ۲۲- توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش t11



شکل ۲۱- توپوگرافی بستر پس از اجرای آزمایش t10

جدول ۵- حداکثر عمق آبشستگی و درصد کاهش عمق آبشستگی (آزمایش‌های صفحات مستغرق و لایه آرمور) نسبت به شاهد

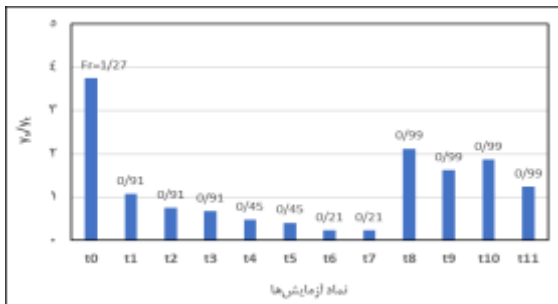
نماد آزمایش‌ها	حداکثر عمق آبشستگی ابتدای بستر (سانتیمتر)	درصد کاهش عمق آبشستگی ابتدای بستر نسبت به شاهد	حداکثر عمق آبشستگی بستر (سانتیمتر)	درصد کاهش عمق آبشستگی بستر نسبت به شاهد
t8	۵/۵	۶۳/۳٪	۸/۵	۴۳/۳٪
t9	۳/۸	۷۴/۶٪	۶/۵	۵۶/۶٪
t10	۵	۶۶/۶٪	۷	۵۰٪
t11	۳/۴	۷۷/۳٪	۵	۶۶/۶٪

می‌دهد با توجه به ثابت بودن دبی و عرض کانال، سرعت رابطه عکس با عمق آب روی حفره آبشستگی و همچنین رابطه مستقیم با عدد فرود جریان دارد، بنابراین عمق آب روی حفره آبشستگی با عدد فرود جریان رابطه عکس دارد. در نتیجه با افزایش عمق آب روی

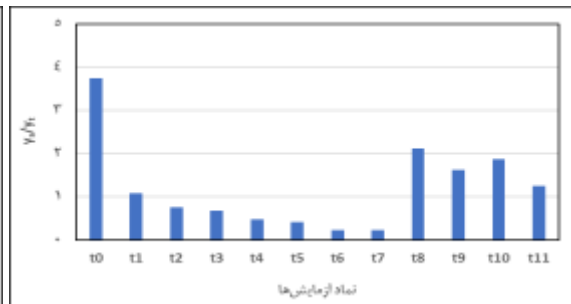
با توجه به انجام آزمایش‌ها، حداقل نسبت y_2/y_1 (نسبت عمق آبشستگی به عمق پایاب) در آزمایش‌های t6 و t7 برابر ۰/۲۳ و حداکثر این نسبت در آزمایش t8 برابر ۲/۱۲۵ مشاهده شده است. شکل شماره ۲۳ تغییرات نسبت y_2/y_1 در آزمایش‌های مختلف را نشان

مقایسه با D_s/y_t در آزمایش‌های t_6 و t_7 برابر $0/19$ و حداکثر نسبت y_s/y_t در مقایسه با D_s/y_t در آزمایش t_8 برابر $0/61$ مشاهده شده است. شکل شماره ۲۵ تغییرات نسبت y_s/y_t در مقایسه با D_s/y_t در آزمایش‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به متفاوت بودن آزمایش‌ها و متغیر بودن عمق پایاب و اختلاف تراز آب بالادست و پایین دست در آزمایش‌ها و در نظر داشتن رابطه عکس بین عمق پایاب و عمق آبستگي، نسبت y_s/y_t با نسبت H/y_t (اختلاف تراز آب بالادست و پایین دست به عمق پایاب) رابطه مستقیم دارد. حداقل نسبت y_s/y_t در مقایسه با H/y_t در آزمایش‌های t_6 و t_7 برابر $0/46$ و حداکثر این نسبت در مقایسه با H/y_t در آزمایش t_8 برابر $3/75$ مشاهده شده است. شکل شماره ۲۶ تغییرات نسبت y_s/y_t در مقایسه با H/y_t در آزمایش‌های مختلف را نشان می‌دهد.

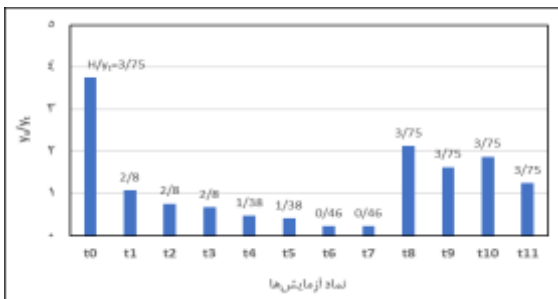
حفره آبستگي و کاهش عدد فرود، حداکثر عمق آبستگي نیز کاهش می‌یابد. نسبت y_s/y_t با عدد فرود جریان رابطه مستقیم دارد. همچنین حداقل نسبت y_s/y_t در مقایسه با Fr (عدد فرود) در آزمایش‌های t_6 و t_7 برابر $0/21$ و حداکثر این نسبت در مقایسه با Fr در آزمایش t_8 برابر $0/99$ مشاهده شده است. شکل شماره ۲۴ تغییرات نسبت y_s/y_t در مقایسه با Fr در آزمایش‌های مختلف را نشان می‌دهد. اندازه ذرات یکی از عوامل مؤثر در عمق آبستگي است به طوری که ذرات کوچک‌تر نسبت به ذرات بزرگ‌تر به علت سطح و وزن کمتر، در صورت شرایط برابر، نیرو و انرژی و سرعت جریان کمتری جهت جابجایی نیاز دارند. با توجه به ثابت بودن اندازه ذرات و متغیر بودن عمق پایاب در آزمایش‌ها و در نظر داشتن رابطه عکس بین عمق پایاب و عمق آبستگي، نسبت y_s/y_t با نسبت D_s/y_t (اندازه ذرات به عمق پایاب) رابطه مستقیم دارد. حداقل نسبت y_s/y_t در



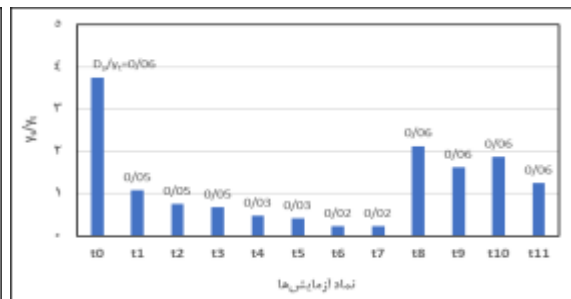
شکل ۲۴- تغییرات نسبت y_s/y_t در مقایسه با Fr



شکل ۲۳- تغییرات نسبت y_s/y_t



شکل ۲۶- تغییرات نسبت y_s/y_t در مقایسه با H/y_t



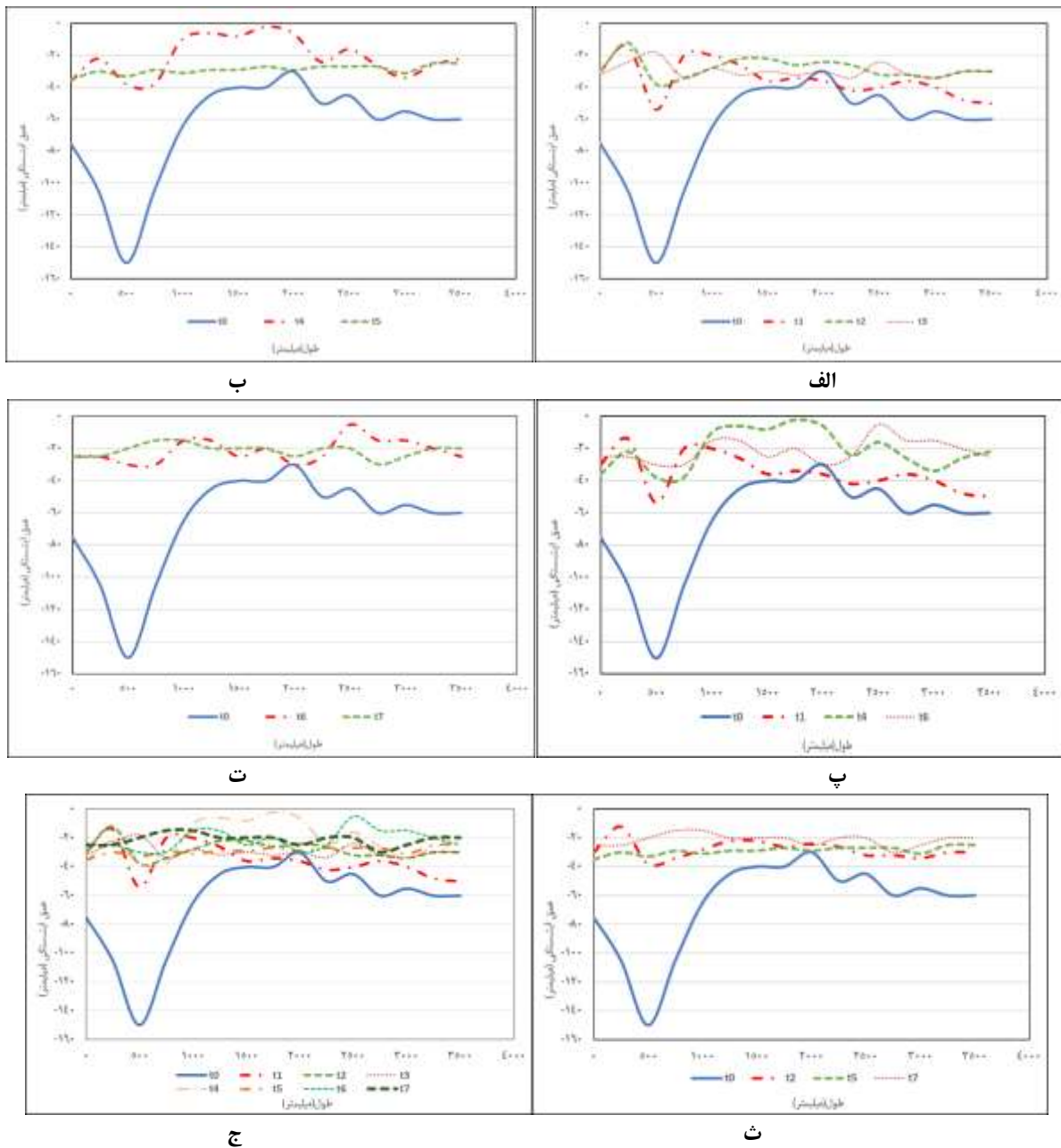
شکل ۲۵- تغییرات نسبت y_s/y_t در مقایسه با D_s/y_t

مقدار و ثابت است. تفاوت در، محل حداکثر عمق آبستگي است. شکل شماره ۲۷ پ نشان می‌دهد، روش استفاده از لایه آرمور $1/5$ برابر طول حوضچه با افزایش ارتفاع انتهایی کانال دو برابر عمق پایاب (t_7) به علت ایجاد آبستگي در فاصله دورتر از پایاب حوضچه آرامش جهت حفاظت از سازه موردنظر بهترین روش است. شکل‌های شماره ۲۷ ت و ث نشان می‌دهد، در صورت ثابت بودن طول لایه آرمور با افزایش ارتفاع انتهایی کانال، عمق آبستگي کاهش می‌یابد. به طوری که روش استفاده از لایه آرمور برابر طول حوضچه با افزایش ارتفاع انتهایی کانال دو برابر عمق پایاب (t_6) و استفاده از

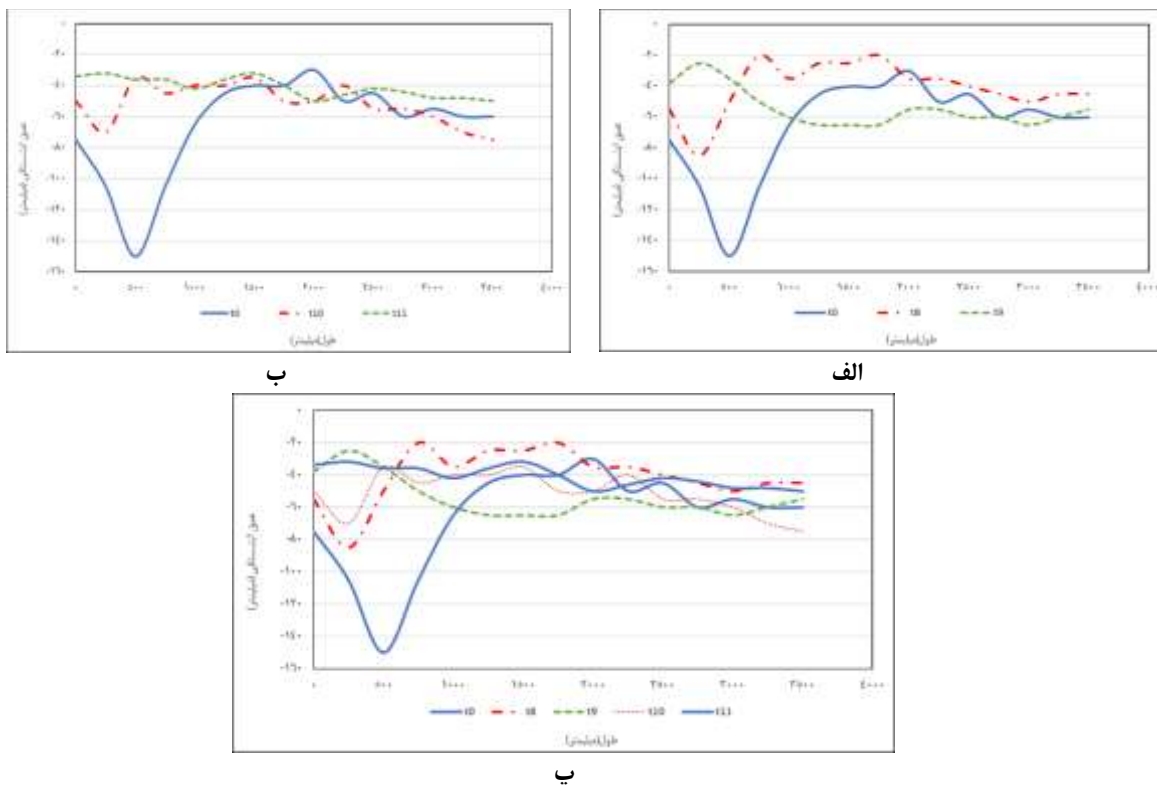
شکل‌های شماره ۲۷ الف و ب نشان می‌دهد، در صورت ثابت بودن افزایش ارتفاع انتهایی کانال با افزایش طول لایه آرمور عمق آبستگي کاهش می‌یابد. به طوری که روش استفاده از لایه آرمور دو برابر طول حوضچه با افزایش انتهایی کانال نصف عمق پایاب (t_3) و روش استفاده از لایه آرمور $1/5$ برابر طول حوضچه با افزایش انتهایی کانال برابر عمق پایاب (t_5) عمق آبستگي کمتری مشاهده شد. شکل شماره ۲۷ پ نشان می‌دهد، در صورت ثابت بودن افزایش انتهایی کانال (دو برابر عمق پایاب) و با افزایش طول لایه آرمور، حداکثر عمق آبستگي نسبت به روش‌های دیگر دارای کمترین

شماره ۲۷ ج کمترین عمق آبستگی در آزمایش t7 و بیشترین عمق آبستگی در آزمایش t1 را نسبت به روش‌های دیگر نشان می‌دهد.

لایه آرمور ۱/۵ برابر طول حوضچه با افزایش ارتفاع انتهایی کانال دو برابر عمق پایاب (t7) عمق آبستگی کمتری مشاهده شد. شکل



شکل ۲۷- الف مقایسه نیمرخ بستر روش‌های افزایش ارتفاع انتهایی کانال نصف عمق پایاب به همراه لایه آرمور شاهد، ب مقایسه نیمرخ بستر روش‌های افزایش ارتفاع انتهایی کانال برابر عمق پایاب به همراه لایه آرمور با شاهد، پ- مقایسه نیمرخ بستر روش‌های افزایش ارتفاع انتهایی کانال دو برابر عمق پایاب به همراه لایه آرمور با شاهد. ت- مقایسه نیمرخ بستر روش‌های استفاده از لایه آرمور برابر طول حوضچه آرامش به همراه افزایش ارتفاع انتهایی کانال با شاهد، ث- مقایسه نیمرخ بستر روش‌های استفاده از لایه آرمور ۱/۵ برابر طول حوضچه آرامش به همراه افزایش ارتفاع انتهایی کانال با شاهد. ج- مقایسه نیمرخ بستر روش‌های استفاده از لایه آرمور به همراه افزایش ارتفاع انتهایی کانال با شاهد

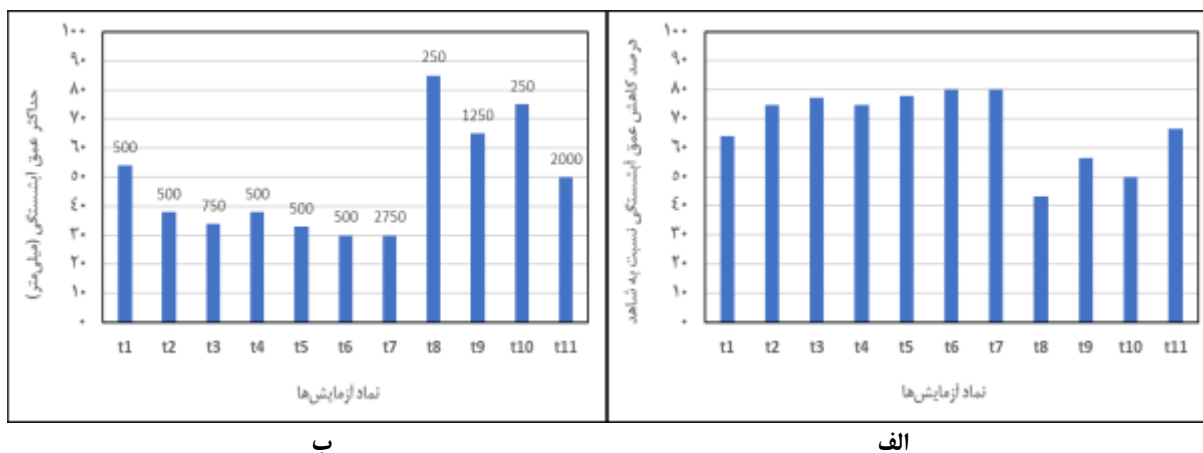


شکل ۲۸- الف- مقایسه نیمرخ بستر روش‌های استفاده از صفحات مستغرق زیگزاگی با شاهد ب- مقایسه نیمرخ بستر روش‌های استفاده از صفحات مستغرق پنج پر با شاهد پ- مقایسه نیمرخ بستر روش‌های استفاده از صفحات مستغرق

درصد کاهش عمق آبخستگی و در آزمایش t8 با مقدار ۴۳/۳٪ دارای کمترین درصد کاهش عمق آبخستگی است. همچنین آزمایش t6 با مقدار ۳۰ میلی‌متر در ۵۰۰ میلی‌متری حوضچه آرامش و آزمایش t7 با مقدار ۳۰ میلی‌متر در ۲۷۵۰ میلی‌متری حوضچه آرامش دارای کمترین عمق آبخستگی و آزمایش t8 با مقدار ۸۵ میلی‌متر در ۲۵۰ میلی‌متری حوضچه آرامش دارای بیشترین عمق آبخستگی است.

شکل‌های ۲۸ الف و ب نشان می‌دهد، استفاده هم‌زمان صفحات مستغرق با لایه آرمور باعث کاهش عمق آبخستگی می‌شود. شکل ۲۸ پ نشان می‌دهد، آزمایش t11 دارای عملکرد بالاتر و آزمایش t8 دارای عملکرد پایین‌تری نسبت به روش‌های دیگر در کاهش عمق آبخستگی پایاب دارد.

با توجه به آزمایش‌های مختلف، شکل‌های ۲۹ الف و ب نشان می‌دهد که در آزمایش‌های t6 و t7 با مقدار ۸۰٪ دارای بیشترین



شکل ۲۹- الف- مقایسه درصد کاهش عمق آبخستگی در آزمایش‌ها، ب- مقایسه موقعیت مکانی بیشترین عمق آبخستگی در آزمایش‌ها

منابع

باقر پور، م.، سیدیان، م. ۱۳۹۲. مروری بر کاربرد صفحات مستغرق در مهندسی رودخانه. همایش ملی مدیریت منابع طبیعی. اسفندماه، دانشگاه گنبدکاووس.

بالبلی، ع.، آرمان، ع. و درویشی، ا. ۱۴۰۲. شبیه‌سازی آبستنگی پایین دست کف بند افقی با استفاده از مدل عددی. فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری. دانشگاه رازی. ۲(۴): ۳۵-۴۹.

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. ۱۳۹۵. ضوابط طراحی بندها و تثبیت‌کننده‌های بستر. نشریه شماره ۷۰۱.

حمیدی فرح، امید، م. ۱۳۸۹. بررسی آزمایشگاهی آبستنگی رسوبات غیر چسبنده در پایین دست کف بند. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۱۱(۲): ۱۷-۲۸.

صلیبی، م. ع.، مفتاح هلقی، م.، دهقانی، ا. و ظهیری، ع. ۱۳۹۹. کنترل فرسایش در پایاب حوضچه آرامش سازه‌های سنگی ملاتی، رساله دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

صلیبی، م. ع.، مفتاح هلقی، م.، دهقانی، ا. و ظهیری، ع. ۱۴۰۰. بررسی آزمایشگاهی تأثیر ایجاد پرش مستغرق در کاهش آبستنگی پایین دست حوضچه آرامش (بند سنگی ملاتی زیارت). فصلنامه تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی. ۲۲(۸۴): ۶۹-۸۸.

شفاهی بجستان، م.، امیدی، ص. ۱۳۹۴. بررسی میزان آبستنگی پایین دست حوضچه آرامش در شرایط تشکیل پرش هیدرولیکی نوع B. فصلنامه علوم و مهندسی آبیاری. ۳۸(۴): ۱۲۵-۱۳۶.

عزیزی، ر.، شفاعی بجستان، م.، قمشی، م. و موسوی جهرمی، ح. ۱۳۹۰. تأثیر شکل صفحات مستغرق بر آبستنگی موضعی و الگوی رسوب گذاری در کانال‌های آبرفتی. نشریه آب‌و خاک.

عزیزی، آ.، قربانی، ب.، تبریزی، ه. و صمدی بروجنی، ح. ۱۳۹۲. ارزیابی اثر صفحات مستغرق بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش. مجله علمی و پژوهشی. ۸(۱): ۷۳-۸۱.

کوچک، م.، شفاعی بجستان، م. ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی اثر زبری کف بند افقی بر آبستنگی پایین دست آن. دانشکده مهندسی علوم آب. دانشگاه شهید چمران اهواز.

کریمی، م.، قادری، ک.، رحیم‌پور، م. و احمدی، م. ۱۳۹۸. کاربرد صفحات مستغرق انحنادار بر کاهش آبستنگی تکیه‌گاه. هجدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. تهران.

نتایج به دست آمده نشان داد استفاده از لایه‌آرمور و بالا آوردن انتهای کانال، اثر مثبتی بر کاهش عمق آبستنگی دارد که با تحقیقات کوچک و شفاعی بجستان (۱۳۹۱)، مؤیدی و همکاران (۱۳۹۹)، وحیدی الوار و همکاران (۱۳۹۹)، صلیبی و همکاران (۱۴۰۰) و (۱۳۹۹)، بالبلی و همکاران (۱۴۰۲) مطابقت دارد. به عنوان نمونه (در تحقیق صلیبی و همکاران (۱۴۰۰) اگر ارتفاع بستر معادل عمق پایاب افزایش یافته و از مصالح درشت‌دانه استفاده شده باشد بیشترین عمق آبستنگی ۳ سانتی‌متر و اگر ارتفاع بستر معادل ۱/۵ عمق پایاب افزایش یافته و از مصالح درشت‌دانه استفاده شده باشد عمق آبستنگی ناچیز می‌شود). همچنین استفاده از صفحات مستغرق، اثر کاهشی بر عمق آبستنگی دارد که با تحقیقات عزیزی و همکاران (۱۳۹۰) و عزیزی و همکاران (۱۳۹۲) و صلیبی و همکاران (۱۳۹۹) مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

پس از بررسی روش‌های مختلف نتایج کلی زیر به دست آمد. استفاده از لایه‌آرمور با طول بزرگ‌تر، بیشترین کاهش در عمق آبستنگی را نشان داد. همچنین بالا آوردن انتهای کانال اثر مثبتی بر کاهش عمق آبستنگی پایاب حوضچه آرامش دارد.

صفحات مستغرق در حالت پنج پر نسبت به صفحات با آرایش زیگزاگی پراکنش انرژی بیشتری نتیجه داده و در نتیجه عمق آبستنگی کمتری را موجب شده است.

استفاده از لایه‌آرمور با صفحات مستغرق، کاهش بیشتری در عمق آبستنگی پایاب حوضچه آرامش را نتیجه می‌دهد.

استفاده از صفحات مستغرق با آرایش زیگزاگی نسبت به روش‌های دیگر با عمق آبستنگی (معادل ۸/۵ سانتی‌متر) با مقدار ۴۳٪/۳ دارای کمترین درصد کاهش عمق آبستنگی نسبت به آزمایش شاهد است.

استفاده از روش‌های بالا آوردن انتهای کانال و لایه‌آرمور عملکرد بهتری در کاهش عمق آبستنگی نسبت به روش‌های صفحات مستغرق و لایه‌آرمور دارد.

استفاده از لایه‌آرمور ۱/۵ برابر طول حوضچه آرامش با افزایش ارتفاع انتهای کانال دو برابر عمق پایاب به جهت ایجاد کمترین عمق آبستنگی (معادل ۳ سانتی‌متر) و بیشترین درصد کاهش عمق آبستنگی نسبت به آزمایش شاهد (معادل ۸۰٪) در فاصله دورتر از حوضچه آرامش، روش برتر در کاهش عمق آبستنگی پایاب حوضچه آرامش است. نتایج به دست آمده با نتایج تحقیق (صلیبی و همکاران، ۱۴۰۰) همخوانی داشته و تأییدی بر نتایج حاصل است.

۱۳۹۹. بررسی علل بروز آبستگي در پايين دست حوضچه آرامش سد انحرافي شهدا و ارائه راهکار مناسب برای کنترل آن. دانشگاه اهواز. ۴۳(۱): ۱-۱۴.

Alipour, M. H., Ghahari, Gh. R. and Mesbah, S. M. 2019. Stability analysis of stone-mortar dams of Shiraz Cleist watershed. *Journal of Watershed Management Research*. 32(2): 95- 110.

Breusers, H.N.C. 1965. Conformity and time scale in two dimentional local scour. Publication 40. Delft Hydraulic Laboratory, Delft, the Netherlands.

Breusers, N.H.C. 1966. Conformity and time scale in two- dimensional local scour, Proc. Symposium on model and prototype conformity: 1- 8, Hydraulic research Laboratory. Poona (also Delft Hydraulics, Delft, publication 40).

Dargahi, B. 2003. Scour development downstream of a spillway, *Journal of Hydraulic Research*, vol. 41(4).

Farhoudi, J. and Smith, K. 1985. Local scour profiles downstream of hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research*. 23(4): 343-359.

Hong, S. H., Kim, S. J., Sturm, T. and Stoesser, T. 2010. Effect of low tailwater during drought on scour conditions downstream of an ogee spillway, *River flow*, (2014) 1193- 1199.

Lenzi, M.A. and Comiti, F. 2003. Local scouring and morphological adjustments in steep channels with checkdam sequences *Geomorphology*. 55 (1-4): 97-109.

Peterka, A.J. 1958. Hydraulic design of Stilling Basins and Energy Dissipaters. Engineering Monograph No. 25, USBR, Denver, Colorado, USA.

Wang, Y., Odgaard, J., Melvhiie, B.W. and Jain, S. 1987. sediment control at nater hntake.

Yalin, M. S. 1971. Theory of Hydraulic Models. New York. MacMillan.

کریمی، م.، قادری، ک.، رحیمپور، م. و احمدی، م.م. ۱۴۰۰. بررسی آزمایشگاهی تأثیر آرایش قرارگیری صفحات مستغرق تخت بر آبستگي در اطراف پایه‌ها و تکیه‌گاه پل. نشریه مهندسی امیرکبیر. ۵۳ (۷): ۳۱۴۹-۳۱۶۶.

مرادی، ا.، پریش، ی. ۱۳۹۰. ارزیابی پدیده‌ی آبستگي در پایاب سرریزها و راه‌کارهایی جهت مقاومت سازی و کاهش آبستگي. چهارمین همایش ملی مقاوم‌سازی و حفظ بناهای ماندگار. مهرماه، دانشگاه آزاد اسلامی خمین.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور. ۱۳۸۷. دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری سازه‌های کنترل سیل و رسوب (بندهای اصلاحی) نشریه شماره ۴۱۶.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور. ۱۳۹۰. راهنمای روش‌های محاسبه آبستگي موضعی. نشریه شماره ۵۴۹.

مؤیدی مشکاپشتی، م.، اسمعیلی ورکی، م.، شفيعی ثابت، ب. و محمودی کردستانی، س. ۱۳۹۹. مطالعه‌ی آزمایشگاهی اثر حضور کفیند بر کاهش آبستگي موضعی در پايين دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار با شیب ۱:۳. نوزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران.

نور محمدی، گ.، اسمعیلی ورکی، م.، رادیکاء، و شفيعی ثابت، ب. ۱۳۹۷. بررسی آزمایشگاهی آبستگي موضعی در پايين دست سازه کنترل تراز بستر سطح شیب‌دار. نشریه تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی. ۹(۷۲): ۵۱-۶۸.

نور مهندادن، صمدی بروجنی، ح. موسوی، م. و زمانی، ع. ۱۳۸۶. بررسی رودخانه خشکه‌رود از سرشاخه‌های کارون علیا در زمان قبل و بعد از برداشت شن و ماسه از بستر آن. ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه شهرکرد.

وحیدی الوار، م.، اصغری پری، س. اشفاعی بجستان، م. و آرمان، ن.

Laboratory Investigation of Methods to Reduce the Scouring of the Downstream stilling basin (Case study: Masonary Check Dam of Vatana)

F. Rayeji Yanesari¹, M. Meftah Halaghi^{2*}, A. Zahiri³, M. A. Solbi⁴

Received: Apr.07, 2024

Accepted: Aug.08, 2024

Abstract

It is common to use correction dams to stabilize riverbeds and build stilling basin to deplete energy downstream of these structures. However, we still see the erosion of riverbeds downstream of these structures. One of the effective ways to reduce scouring phenomenon is to create a submerged hydraulic jump inside the stilling basin. Therefore, in the current research, the changes in scour depth in the downstream masonry check dam of Vatana structure located in Golestan province were investigated and evaluated by building a physical model with a scale of 1:10. so that by reducing its downstream erosion, it can increase the performance and lifespan of the structure in order to protect the river bed. Two methods were used, including raising the end of the channel and using Submerged Vanes along with layer armor immediately after the stilling basin. In the investigation of the method of using Submerged Vanes with a zigzag arrangement, the lowest percentage of scouring depth reduction was 43.3% of the value observed in the control test. And the method of raising the end of the channel equal to twice the tailwater depth of the abutment with an armor layer 1.5 times the length of the stilling basin showed the highest percentage of reduction in scour depth equal to 80% of the value observed in the control test. Also, this method had a better performance in reducing the scouring depth of the tailwater stilling basin of the masonry check dam in order to create the greatest amount of erosion at a distance far from the stilling basin.

Keywords: Armor layer, Masonary check dam, Physical-hydraulic model, Scouring, Vatana river

1- Masters student of Water Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Water, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

4- Graduated with a PhD in water structures, Gorgan Agricultural and Natural Resources Research Center, Gorgan, Iran.

(*-Corresponding Author Email: Meftah@gau.ac.ir)