

نوع مقاله: علمی - پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی تاثیر ایجاد پرش مستغرق بر کاهش آبستنگی پایین دست حوضچه آرامش (مطالعه موردی: بند سنگی-ملاتی تول بنه)

محمدعلی صلیبی^۱، مهدی مفتاح هلقی^۲، امیراحمد دهقانی^۳ و عبدالرضا ظهیری^۲

۱، ۲ و ۳- به ترتیب: دانشجوی دکتری سازه‌های آبی؛ دانشیار سازه‌های آبی؛ و دانشیار مهندسی عمران آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۶/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۷/۱۱

چکیده

بندهای سنگی-ملاتی به منظور کاهش شیب آبراهه، کاهش سرعت جریان و مهار فرسایش ساخته می‌شوند. برای استهلاک انرژی در پایین دست این سازه‌ها، حوضچه آرامش احداث می‌شود. با وجود حوضچه‌های آرامش، آشفتگی‌های حاصل از پرش هیدرولیکی معمولاً به پایین دست این سازه‌ها منتقل و موجب فرسایش بستر رودخانه می‌شود. عملیاتی که موجب مستغرق شدن پرش هیدرولیکی در درون حوضچه آرامش گردد از راهکارهای موثر کاهش روند آبستنگی است. هدف از تحقیق حاضر، بررسی تاثیر پرش هیدرولیکی مستغرق در پایاب حوضچه آرامش بندهای سنگی-ملاتی در کاهش آبستنگی پایین دست است. برای بررسی این موضوع، مدل فیزیکی بند سنگی-ملاتی زیارت واقع در استان گلستان با مقیاس ۱:۲۰ ساخته شد. برای کنترل آبستنگی پایاب حوضچه آرامش، دو روش افزایش ارتفاع پایاب و افزایش ارتفاع انتهایی حوضچه آرامش به همراه افزایش زبری بستر بررسی شدند. نتایج بررسی‌ها نشان داد چنانچه ارتفاع پایاب ۱/۵ برابر عمق آن گردد، آبستنگی به صفر می‌رسد. همچنین، زمانی که انتهایی حوضچه آرامش به ارتفاع ۲/۵ برابر عمق آب در حوضچه آرامش بالا آورده شود و به اندازه طول حوضچه آرامش در پایاب ادامه یابد و با مصالح زبر پوشانده شود، آبستنگی را در پایاب حوضچه آرامش به صفر می‌رساند.

واژه‌های کلیدی

آبستنگی، استغراق پایاب، بندسنگی ملاتی، حوضچه آرامش

مقدمه

اعتبارات برای احداث این سازه‌ها هزینه شده است. بنابراین بررسی مسائل بهره‌برداری آنها اهمیت زیادی دارد. این سازه‌ها معمولاً در سرشاخه‌های بالادست حوزه‌های آبخیزداری طراحی و اجرا می‌شوند. در مورد نقش این سازه‌ها در کنترل فرسایش، تحقیقاتی تا کنون صورت گرفته است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

بندهای سنگی ملاتی سازه‌هایی هستند برای تنظیم شیب و مهار فرسایش آبراهه‌ها. از آنجا که این سازه‌ها ساختمانی ساده و کارآمد دارند، دستگاه‌های اجرایی در سال‌های اخیر از آنها در طرح‌های حفاظت خاک و آبخیزداری در سطح گسترده‌ای استفاده کرده‌اند و بخش عمده‌ای از

بندها) به ترتیب با احتمال تاثیر ۵۴، ۲۸ و ۱۹ درصد است. لنزی و کومیتی (Comiti, 2003) و Lenzi & آبشستگی در پایین دست بندهای اصلاحی احداث شده در آبراهه‌های کوهستانی ایتالیا را بررسی و اعلام کردند که حداکثر عمق آبشستگی پایین دست بندهای اصلاحی بستگی دارد به ارتفاع بند، عمق جریان روی بند، فاصله بندها و حداکثر شیب اصلاح شده آبراهه.

هنگامی که جریان رواناب از روی سرریز به پایین می‌ریزد، انرژی پتانسیل آن به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. بخشی از این انرژی درون حوضچه آرامش با ایجاد یک پرش هیدرولیکی مستهلک می‌گردد. از آنجا که جریان خروجی از حوضچه آرامش سرعت بالایی دارد، ممکن است مقداری از این انرژی به پایین دست انتقال یابد. انرژی اضافی این جریان می‌تواند باعث فرسایش بستر پایین دست این سازه‌ها گردد و به همین دلیل بررسی آن ضروری است.

جریان خروجی از سازه‌های هیدرولیکی اغلب به صورت جت است که ممکن است تغییرات زیادی در توپوگرافی بستر رودخانه ایجاد کند. جت ریزشی بر اساس عمق پایاب می‌تواند به صورت آزاد یا مستغرق باشد. آبشستگی در جت‌های ریزشی در حالت مستغرق و آزاد اندکی متفاوت است زیرا در جت‌های آزاد، سیال مقداری از مسیر را در هوا و مقداری را در آب طی می‌کند تا به سطح بستر برسد ولی در جت‌های مستغرق، سیال تمام مسیر را در آب طی می‌کند. هرگاه مقدار عمق پایاب از مقدار ارتفاع ریزش بیشتر باشد، جت مستغرق است (نشریه شماره 549، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور (Standard publication: (No. 549. 2011).

زارع بیدکی و قنبری (Zare Bidaki & Ghanbari, 2015) با ارزیابی مجموعه‌ای از سازه‌های سنگی-ملاتی اجرا شده طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۰ در آبراهه‌های استان چهارمحال و بختیاری نشان دادند که معیارهای رعایت فاصله بندها بر اساس شیب حد (تعادلی) رسوبات و انتخاب نوع بند، بیشترین تاثیر را در عملکرد بهینه گروهی بندها دارند. عباسی (Abbasi, 2015) شیب حد (تعادلی) را در چهار حوضه واقع در بالادست سدهای کارده، طرق، شهید یعقوبی و گلستان در خراسان رضوی بررسی کرد و نشان داد به دلیل انتخاب نامناسب شیب حد، در مواردی فاصله بندها کم بوده است، به نحوی که بندهای بالادست در رسوبات پشت بندهای پایین- دست مدفون شده اند. در این تحقیق، با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری شده، روابطی برای محاسبه شیب حد بر اساس شیب اولیه آبراهه پیشنهاد و مشخص شد که اگر فاصله بندهای موجود بر اساس شیب حد اندازه‌گیری شده انتخاب می‌شد هزینه احداث بندها بیش از ۲۵ درصد کاهش می‌یافت. علی‌پور و همکاران (Alipour et al., 2021) هفتاد بند کوتاه سنگی- ملاتی اجرا شده در آبخیز گلستان شیراز را ارزیابی و مسائل بهره برداری و علت اصلی آسیب دیدگی سازه‌ها را بررسی کردند و نتیجه گرفتند اگرچه بندها در برابر نشست، واژگونی و لغزش پایداری نشان داده‌اند، نشانه‌های آسیب دیدگی در آنها دیده می‌شود. علت اصلی آسیب دیدگی بندها، به کار بردن مصالح نامناسب (مصالح سنگی بی کیفیت و شسته شدن ملات ماسه سیمان به کار رفته در بندها)، آبشستگی و اجرا کردن نامناسب (اتصال ناقص دستک‌ها بی در نظر گرفتن وضعیت آبراه و تراز نبودن سرریز

آبشستگی، وابستگی شدیدی به خواص فیزیکی ذرات و ارتباط متقابل بین ذرات و آب دارند. استفاده از زبری به تنهایی در بستر تندآب می تواند روشی کارآمد برای افت انرژی باشد. این روش به دلیل اجرای آسان، صرفه اقتصادی و سازگار بودن با محیط زیست، مورد توجه خاصی قرار گرفته است.

مطالعات گرس (Grace, 1970) نشان می دهد که حداکثر عمق حفرة آبشستگی برای ذرات رسوبی یکنواخت در سرعت برشی برابر با سرعت برشی بحرانی ذرات رسوبی حاصل می شود. کلز و همکاران (Kelz *et al.*, 2001) نشان دادند که عمق و مساحت حفرة آبشستگی به شدت وابسته است به اندازه ذرات بستر و عمق پایاب. ولیزادگان و فرهودی (Valizadegan & Farhoudi, 2002) تاثیر قطر سنگچین و عمق پایاب را در میزان پایداری مواد بستر بررسی کردند. سوباسیش و برنهارد (Subhasish & Bernhard, 2003) تنش برشی در پرش مستغرق روی بستر صاف و زبر را مطالعه و نتیجه گیری کردند که سرعت جریان در پرش مستغرق با افزایش زبری کاهش پیدا می کند نتایج آزمایش های کوچک و شفاعی

بجستان (Kochak & Shafaei Bajestan, 2012) نشان می دهد افزایش ارتفاع زبری کف بند و افزایش اندازه دانه بندی بستر تأثیر بسزایی در کاهش طول آبشستگی دارد. دلریان و همکاران (Dilrooban *et al.*, 2014) اثر زبری های مکعبی را بر پرش مستغرق بررسی کردند و نشان دادند که عمق استغراق در حالت زبری ۱۱ درصد نسبت به حالت بدون زبری کاهش یافته است.

افزایش ارتفاع در پایاب منجر به پرش هیدرولیکی مستغرق می شود، انرژی جریان آب کاسته می شود و در نتیجه آبشستگی کاهش

ایجاد پرش هیدرولیکی درون حوضچه آرامش و پایین دست آن، باعث ایجاد گردابه می شود. گردابه های حاصل نقش بسیار مهمی در انتقال رسوبات و تغییر هندسه بستر دارند. لانگ و همکاران (Long *et al.*, 1990) گردابه های به وجود آمده در سطح آب vh در پرش هیدرولیکی مستغرق بررسی کردند و نشان دادند که حرکت این گردابه ها از سطح آب تا مرکز لایه برشی گسترده شده است. این محققان همچنین مشخصات پرش هیدرولیکی مستغرق را بررسی و پرش مستغرق را از نظر توسعه جریان به سه قسمت تقسیم کردند: ناحیه در حال توسعه، ناحیه توسعه یافته و ناحیه بهبود یافته.

نصرآبادی و همکاران (Nasrabadi *et al.*, 2010) با مقایسه خصوصیات پرش آزاد و مستغرق در یک عمق پایاب ثابت در بسترهای صاف و زبر به این نتیجه رسیدند که در اعداد فرود یکسان، طول پرش آزاد همواره بزرگ تر یا مساوی طول پرش مستغرق است و افت انرژی نسبی پرش مستغرق در اعداد فرود کم، همواره بزرگ تر یا مساوی افت انرژی نسبی پرش آزاد است.

بر اساس تحقیقات امید و شفاعی بجستان (Omidy & Shafaei Bajestan, 2014)، در صورتی که پرش هیدرولیکی به صورت آزاد تشکیل شود، با افزایش دبی جریان، عمق و طول حفرة آبشستگی افزایش می یابد. اگر پرش آزاد به پرش مستغرق تبدیل شود، از میزان آبشستگی کاسته می شود. همچنین، هر چه درجه استغراق پرش بیشتر شود جریان در پایین دست پرش قدرت کمتری برای حمل رسوبات خواهد داشت.

آبشستگی پدیده ای است که سازه های آبی تحت تاثیر آن قرار می گیرند. فرآیندهای

آب کاهش و در نتیجه آبشستگی در پایاب حوضچه آرامش کاهش داده شود. برای این منظور دو روش استفاده شده است: یکی تغییر ارتفاع پایاب و دیگری ایجاد یک برآمدگی در انتهای حوضچه آرامش است. استفاده از بستر زبر نیز تاثیرگذاری این دو روش را بهبود بخشیده است.

مواد و روش ها

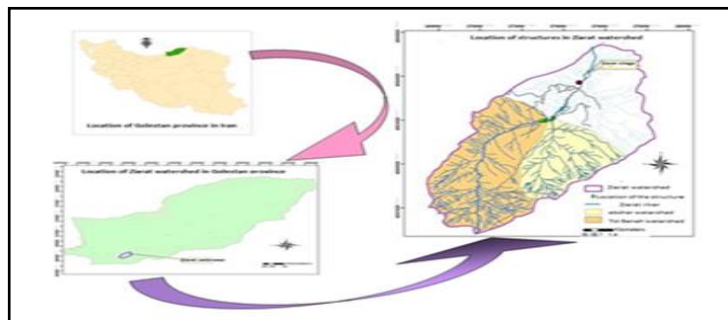
موقعیت بند سنگی ملاتی زیارت

تول بنه رود از شاخه‌های رودخانه زیارت است که از کوه‌های بالاچال، تل انبار و سرلیه واقع در حدود ۲۴ کیلومتری جنوب شهر گرگان سرچشمه می‌گیرد و در جنوب غربی روستای زیارت با رودخانه آبشار به هم می‌پیوندد و رودخانه زیارت را تشکیل می‌دهد.

رودخانه زیارت، پس از شهر گرگان به رودخانه قره‌سو (حوزه آبریز) وارد می‌شود. بندسنگی ملاتی تول بنه با مختصات $X=272090$ و $Y=4062967$ در سه کیلومتری جنوب غربی روستای زیارت روی این سرشاخه قرار دارد. طول تاج این سازه ۱۹/۶، ارتفاع آن ۶ و طول حوضچه آرامش آن ۱۰/۵ متر است. موقعیت بند سنگی ملاتی تول بنه در شکل ۱ نشان داده شده است.

می‌یابد. اد و راجاراتنام (Ead & Rajaratnam, 2002) خصوصیات جت دیواره‌ای در عمق‌های پایاب کم را به صورت تئوری و آزمایشگاهی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که طول جریان برگشتی (ناحیه غلتان) در پرش هیدرولیکی مستغرق به دو پارامتر عمق پایاب و عدد فرود وابسته است. هانگ و همکاران (Hong *et al.*, 2010) نشان دادند در پایین دست حوضچه آرامش، عمق کم پایاب باعث می‌شود تا پرش هیدرولیکی به صورت آزاد تشکیل شود و آبشستگی افزایش یابد. نتایج آزمایش‌های امید و همکاران (Omidi *et al.*, 2014) نشان می‌دهد افزایش عمق پایاب در پایین دست سرریز باعث کاهش در میزان آبشستگی می‌شود. مرادی و پریش (Moradi & Parish, 2016) می‌گویند میزان کاهش فرسایش در پایاب‌های عمیق بیشتر است تا در پایاب‌های کم عمق. زبری بستر می‌تواند تاثیر افزایش ارتفاع پایاب را بر کاهش عمق آبشستگی بیشتر کند.

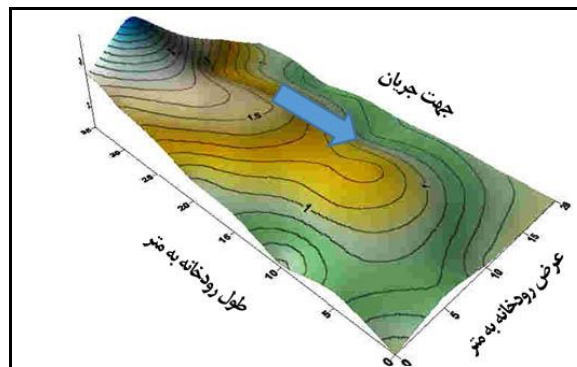
بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد محققان برای کنترل آبشستگی در پایاب حوضچه‌های آرامش، روش‌های مختلفی ارائه داده‌اند. این روش‌ها با وجود اثرگذاری، به دلیل شرایط پیچیده رودخانه و نوع سازه، نتایج متفاوتی از خود نشان می‌دهند. در این مطالعه نیز سعی شده است با ایجاد پرش مستغرق انرژی جریان



شکل ۱- موقعیت بندسنگی ملاتی تول بنه

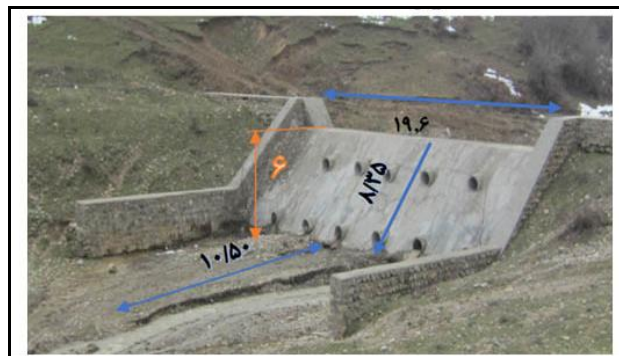
Figure.1 Location of masonry Tule Bene check dam

برای بررسی و شناخت توپوگرافی رودخانه در پایین دست سازه سنگی ملاتی، از بستر آن نقشه برداری شده است. برای این کار، شبکه ای با فاصله های ۵ متر تشکیل شده و نقشه برداری در شبکه ای مستطیلی به ابعاد ۳۵ در ۲۵ متر انجام شد. شکل ۲، توپوگرافی بستر رودخانه و شکل ۳ بند انحرافی تول بنه را نشان می دهد.



شکل ۲- توپوگرافی بستر پایین دست بند سنگی ملاتی

2-Bed river topography downstream of Masonary check dam



شکل ۳- بستر پایین دست بند سنگی ملاتی تول بنه

Fig 3 - Downstream view of Tul Bene masonry check dam Fig

بار بستر از روش نمونه گیری حجمی استفاده شده است. رسوبات زیرسطحی به عمق حداقل دو برابر بزرگ ترین قطعه سنگ: Standard publication: (No. 349. 2005) برداشت شد.

برای دانه بندی مصالح با توجه به قطر مصالح دو روش دنبال شد. با توجه به قطر مصالح سطحی پس از اندازه گیری و تفکیک مصالح به وسیله

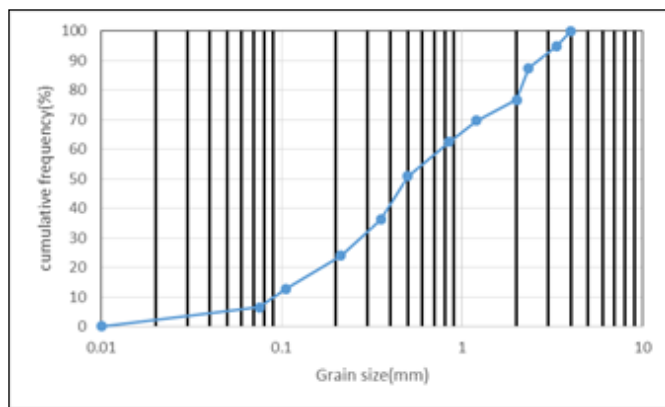
نمونه برداری از مصالح

نمونه برداری از مصالح بستر رودخانه و ساخت

مدل

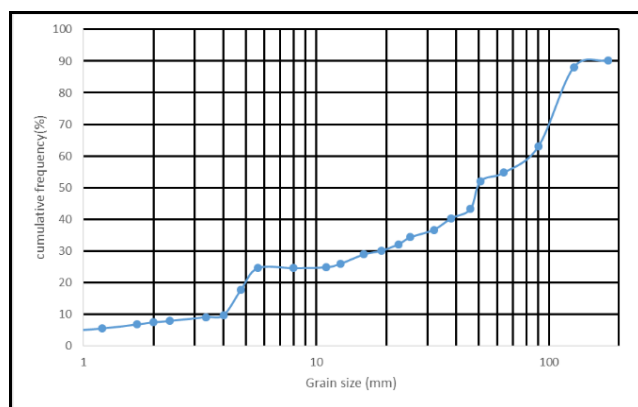
نمونه برداری از ذرات سطحی که معمولاً درشت تر هستند، با استفاده از یک قالب مربعی به ابعاد ۶۰ سانتی متر مربع (روش نمونه برداری سطحی) صورت گرفته است و برای مصالح پایینی

شمارشگر^۱، به‌طور جداگانه وزن و پس از آن نمودار دانه‌بندی آنها رسم شد. برای مصالح ریزتر از روش دانه‌بندی با الک^۱ استفاده گردید. شکل ۴ نمودار دانه‌بندی مصالح موجود در پایین دست سازه و شکل ۵ دانه‌بندی مصالح در کانال آزمایشگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۴ - نمودار دانه‌بندی مصالح موجود در پایین دست سازه

Figure. 4 Size distribution of bed material (Downstream of check dam)



شکل ۵ - نمودار دانه‌بندی مصالح

Figure- 5 Size distribution of material in the laboratory channel

بستر^۳ با دقت ۱ میلی‌متر، استفاده شد. آزمایش‌ها در آزمایشگاه تحقیقات آب و رسوب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان دنبال شد. برای این منظور یک کانال بتنی به طول ۹ متر، عرض و ارتفاع یک متر احداث و مدل سازه سنگی ملاتی زیارت از جنس فلز درون آن تعبیه شد. بررسی آستانه حرکت ذرات برای تعیین قطر ذرات

در کانال آزمایشگاه

رودخانه در آزمایشگاه (بستر کانال) در مقیاس $\frac{1}{20}$ شبیه‌سازی شد. این مقیاس به‌منظور شبیه‌سازی جریان زبر و آشفته و بر اساس دبی حداکثر سیلاب انتخاب شده است. برای اندازه‌گیری سطح آب از دستگاه عمق‌سنج دیجیتالی^۲ با دقت ۰/۱ میلی‌متر و برای اندازه‌گیری، توپوگرافی جدید ایجاد شده بستر، از دستگاه اندازه‌گیری پروفیل

به دست آمد. بنابراین برای اینکه مصالح حرکت نکنند قطر دانه بندی مصالح بین ۲ تا ۳ سانتی متر (بزرگ تر از آستانه حرکت) در نظر گرفته شد. (اندازه واقعی مصالح در طبیعت ۴۰ تا ۶۰ سانتی متر است)

آزمایش مبنا برای مقایسه میزان آبخستگی

هدف از این مطالعه، بررسی روش های کنترل آبخستگی در پایاب حوضچه آرامش است. در اولین مرحله آزمایش، میزان آبخستگی پایاب حوضچه آرامش شناسایی شد. بنابراین، روش های مختلف برای مشخص شدن میزان تاثیر گذاری با آزمایش اولیه مقایسه می شود. لازم است گفته شود در تمامی آزمایش ها دبی آزمایش ۲۵ لیتر بر ثانیه است. با توجه به مقیاس، میزان دبی در مدل واقعی ۴۴/۸ مترمکعب در ثانیه به دست می آید، که معادل دبی ۵۰ ساله سازه اصلی است. پس از بازدیدهای متوالی، مشاهده شد که در شرایط فعلی پشت این بند از مصالح پر شده است. از طرفی، معمولاً پس از وقوع سیلاب های متوالی در طبیعت پشت سازه اصلی عملاً از مصالح پر می شود و لوله ها هم مسدود می شوند. بنابراین برای شبیه سازی شرایط آزمایشگاه، لوله ها در هنگام آزمایش بسته شدند و پشت سازه نیز با مصالح پر گردید. یادآوری می شود از نتایج آزمایش به عنوان آزمایش مبنا برای مقایسه آزمایش های دیگر استفاده شد. شکل ۶ آزمایش مبنا را برای شناسایی میزان آبخستگی و شکل ۷ مشخصات جریان آب و رسوب در سازه سنگی ملاتی را نشان می دهد.

از مسائل مهم و کلیدی در بررسی فرسایش و پایداری رودخانه ها، مسئله آغاز حرکت ذرات رسوبی است. وقتی سرعت جریان آب روی بستر افزایش می یابد اثر نیروهای درگ و لیفت از نیروی پایداری در اثر وزن ذرات بیشتر خواهد شد و باعث حرکت آن می شود. چنانچه نیروهای 1-shaker 3-bed profailer هیدرودینامیکی از حدی بحرانی بیشتر شوند، ذرات رسوب شروع به حرکت می کنند. شروع حرکت ذرات رسوبی را اصطلاحاً آستانه حرکت و شرایطی که در آن ذرات در آستانه حرکت قرار می گیرند شرایط آستانه یا بحرانی گویند. از آنجا که قرار است در پایین دست حوضچه آرامش از سنگ های با قطر بیشتر استفاده شود، باید آستانه حرکت مشخص شود تا قطر سنگ ها بیشتر از این مقدار باشد. اساس معادلات شیلدز در تعیین آستانه حرکت ذرات بستر به شرح زیر است (Yalin, 1971).

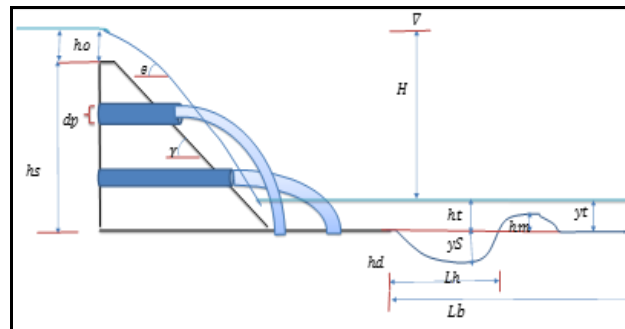
در نمودار شیلدز محور افقی عدد رینولدز برشی و محور قائم آن پارامتر بدون بعد شیلدز است که در رابطه ۱ ارائه شده است.

$$\frac{RS}{(G_s - 1)D_s} = 0.0556 \quad (1)$$

که در آن، G_s چگالی نسبی رسوب (۲/۶۵)، D_s اندازه ذرات رسوب (۴۷ میلی متر)، و S شیب (۰/۰۰۴) است. با قرار دادن مقادیر در نمودار شیلدز می توان محدوده قطر لازم برای آستانه حرکت ذرات و در نتیجه قطر مورد نیاز را تعیین کرد. پس از محاسبات، قطر ۱۷ میلی متر به عنوان آستانه حرکت



شکل ۶- آزمایش مبنا برای تعیین عمق آبشستگی تعادلی
6 - Base test to equilibrium scour depth determination



شکل ۷- مشخصات جریان آب و رسوب در سازه سنگی ملاتی
Fig 7. Water flow and sediment profile in Masonry check dam Fig

انتهای کانال را برای ایجاد پرش مستغرق توسط دریچه چوبی نشان می‌دهد. افزایش زبری بستر نیز می‌تواند موجب کاهش آبشستگی شود. به طور مثال، تشکیل لایه حفاظتی (آرمور) در رودخانه فرآیند آبشستگی را با تاخیر مواجه می‌کند. برای شبیه‌سازی این شرایط نیز در این آزمایش‌ها بستر پایین‌دست حوضچه آرامش با دانه‌بندی ۲/۵ سانتی‌متر (d50) پوشیده شد. پس از آن، با توجه به اینکه عمق آب پایاب ۶ سانتی‌متر است ارتفاع پایاب به ترتیب در چهار مرحله تغییر کرد: در مرحله اول، ارتفاع پایاب کانال ثابت ماند. در مرحله دوم، ارتفاع پایاب به اندازه ۳ سانتی‌متر (۵۰ درصد عمق پایاب) افزایش یافت. در مرحله سوم، ارتفاع پایاب به اندازه ۶ سانتی‌متر (برابر عمق پایاب)

افزایش عمق پایاب با تیرک‌های مسدود کننده به همراه افزایش زبری بستر

یکی از روش‌های کنترل آبشستگی پایاب حوضچه آرامش، در سازه‌های آبی استفاده از کفبند یا استفاده از بندهای متوالی در پایین دست بندسنگی- ملاتی تا رسیدن به نقطه تثبیت سازه است. این روش، با وجود برخی ایرادهای اقتصادی و فنی، توانسته است تا حدودی آبشستگی پایاب را حل کند. در این تحقیق، با اضافه کردن ارتفاع انتهای کانال در پایاب حوضچه آرامش^۱ مکانیزم اثر این روش‌ها بررسی شد. از آنجا که در کانال آزمایشگاه از تخته‌های چوبی به عنوان دریچه استفاده شده است، با استفاده از تخته‌های چوبی، ارتفاع پایاب افزایش داده شد. شکل ۸ بالا آوردن

افزایش یافت. در مرحله چهارم ارتفاع پایاب به اندازه ۹ سانتی متر (۱/۵ برابر عمق پایاب) افزایش یافت. شکل ۹ استغراق در نتیجه افزایش ارتفاع پایاب را نشان می دهد.



شکل ۸- افزایش ارتفاع کانال برای ایجاد پرش مستغرق

Figure 8- Raising the channel bed level to create a submerged jump



شکل ۹- استغراق در نتیجه افزایش ارتفاع پایاب

Figure 9 - Submergence due to raising channel bed level

اول، پایاب حوضچه آرامش از نظر ارتفاع و زبری بستر ثابت در نظر گرفته شد. در مرحله دوم، زبری بستر ثابت بود اما ارتفاع پایاب بستر ۳ سانتی متر افزایش یافت. در مرحله سوم، مصالح بستر پایین دست حوضچه آرامش با دانه بندی ۲/۵ سانتی متر (d50) بدون افزایش ارتفاع در پایاب پوشیده شد. در مرحله چهارم، علاوه بر افزایش زبری مصالح بستر پایاب ارتفاع آن نیز به اندازه ۳ سانتی متر افزایش یافت. شکل ۱۰، پرش مستغرق با قرار دادن یک برآمدگی در انتهای حوضچه آرامش و شکل ۱۱، تعبیه برآمدگی در انتهای حوضچه آرامش را نشان می دهد.

احداث بلوک انتهایی حوضچه آرامش به ارتفاع ۳ سانتی متر

یکی از روش های ایجاد استغراق پرش هیدرولیکی، تعبیه بلوک انتهایی حوضچه آرامش است. این کار موجب می شود تا انرژی آب کاسته شود و در نتیجه ابعاد آبشستگی پایین دست کاهش یابد. در این روش، وجود برآمدگی در انتهای حوضچه آرامش موجب برخورد جریان آب و در نتیجه برگشت آن می شود. در این روش، ابتدا یک تیغه به ضخامت یک و به ارتفاع ۳ سانتی متر (۲/۵ برابر ارتفاع آب در حوضچه آرامش) در انتهای حوضچه آرامش تعبیه شد. پس از آن، در مرحله



شکل ۱۰- پرش مستغرق با قرار دادن بلوک در انتهای حوضچه آرامش

Figure 10- Submerged jump by placing blocks at the end of the stilling basin



شکل ۱۱- تعبیه بلوک در انتهای حوضچه

Figure 11- Embedding blocks at the end of the stilling basin

نتایج و بحث

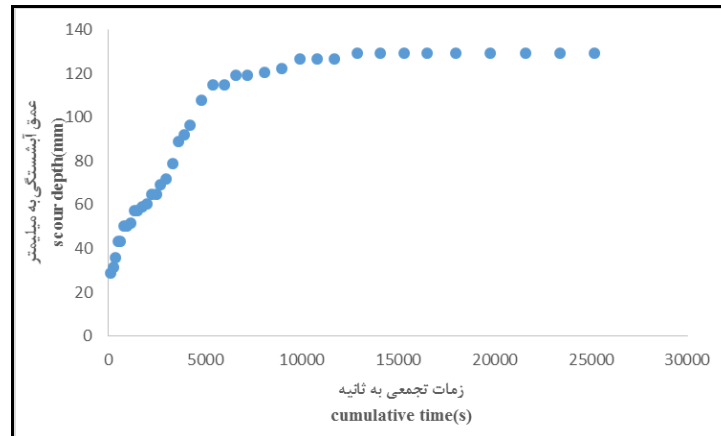
بررسی تغییرات زمانی حداکثر عمق آبشستگی

پیش از آزمایش‌ها لازم است زمان تعادل آزمایش‌ها برآورد شود. برای این منظور، تغییرات حداکثر عمق آبشستگی در حالت مبنای طی زمان بررسی گردید. روند تغییرات آبشستگی طی ۸ ساعت نشان می‌دهد که روند آبشستگی در ساعات اولیه، سریع‌تر است و کم‌کم از سرعت آن کاسته می‌شود. تغییرات زمانی حداکثر عمق آبشستگی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد مقدار آبشستگی در ۴ ساعت اولیه (معادل هفده ساعت و پنجاه و سه دقیقه در مقیاس واقعی)

به بالاترین سطح خود می‌رسد و از آن پس روند آبشستگی ثابت می‌ماند.

نتایج آزمایش نشان می‌دهد در دقیقه اول ۲۰ میلی‌متر آبشستگی معادل ۱۵ درصد و در ۲۵ دقیقه اولیه ۵۷ میلی‌متر آبشستگی معادل ۴۴ درصد صورت گرفته است که نشان دهنده سرعت بسیار زیاد فرآیند فرسایش‌پذیری و تشکیل حفره در ابتدای شروع آزمایش‌ها بوده است. همچنین، میزان آبشستگی در دقیقه ۷۰ به ۹۶ میلی‌متر، معادل ۷۳ درصد، و در دقیقه ۹۰ به ۱۱۴ میلی‌متر، معادل ۸۵ درصد، رسیده است. مقدار آبشستگی در دقیقه ۱۳۵ به میزان ۱۲۶ میلی‌متر رسیده که بیانگر ۹۷ درصد آبشستگی حداکثر بوده است.

بررسی آزمایشگاهی تاثیر ایجاد پرش مستغرق بر کاهش آبشستگی پایین دست...



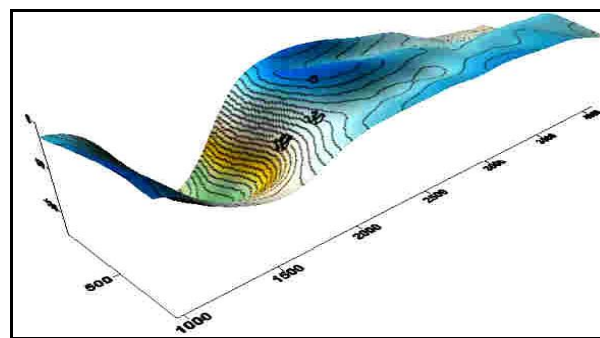
شکل ۱۲- آزمایش تغییرات آبشستگی در ۸ ساعت

Figure 12 – Scour depth variation for for 8 hours test run

پایین دست حوضچه آرامش و نیز در پایاب کانال قرار ندارد. عمق آبشستگی در این روش ۱۳۰ میلی متر شده است. شکل ۱۳، پروفیل بستر ایجاد شده در آزمایش مبنا را برای شناسایی میزان آبشستگی نشان می دهد.

نتایج آزمایش مبنا

همان طور که گفته شد، برای اینکه آزمایش ها با یک سطح مبنا مقایسه شود، ابتدا آزمایش در حالتی شبیه سازی شد که بستر کانال از مصالح یکسان پوشیده است و هیچگونه سازه ای در



شکل ۱۳- پروفیل بستر آزمایش مبنا برای تعیین عمق آبشستگی تعادلی

Fig 13- Base test bed profile for equilibrium scour depth determination

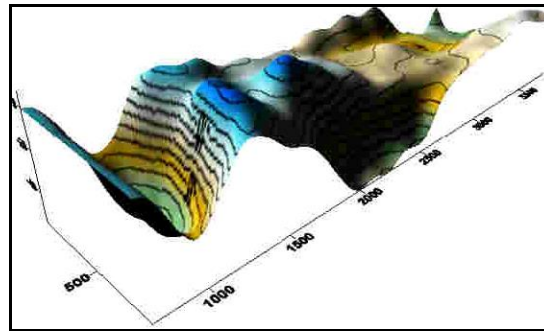
بوده است. در مقایسه با آزمایش مبنا، میزان آبشستگی کاهش ۵۰ درصدی را نشان می دهد. از آنجا که ارتفاع پایاب در این مرحله تغییری نمی کند، این اختلاف تاثیر افزایش زبری ایجاد شده را مشخص می سازد. نکته با اهمیت این است که افزایش زبری موجب می شود تا پرش هیدرولیکی، که در پایاب حوضچه ایجاد می شود،

افزایش ارتفاع پایاب بستر به همراه افزایش زبری

آزمایش ها در چهار مرحله اجرا شده است. آبشستگی در مرحله اول (افزایش زبری پایین دست حوضچه آرامش با مصالحی به قطر ۲ تا ۳ سانتی متر) نسبت به بقیه مراحل بیشتر بوده است. عمق چاله آبشستگی در این شرایط ۶۵ میلی متر

به صورت موجی در حال تغییر و نوسان باشد. به عبارتی، موج پرش هیدرولیکی ابتدا به سمت پایین دست حرکت می‌کند و پس از آن به تدریج از شدت آن کاسته می‌شود و به سمت ابتدای حوضچه آرامش بر می‌گردد. طول موج ایجاد شده از انتهای حوضچه آرامش تا کمی پایین تر از انتهای زبری ایجاد شده ادامه دارد.

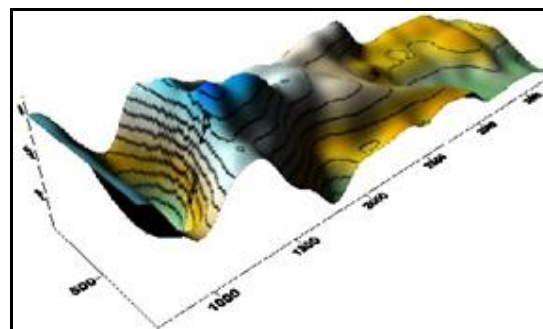
شکل ۱۴، پروفیل بستر کانال و ایجاد زبری را در بستر آن با ارتفاع معمولی نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- پروفیل بستر کانال با ارتفاع ثابت انتهای کانال با افزایش زبری بستر

Figure 14- Channel bed profile with Fixed height at the end of the channel with increasing roughness in the bed

در مرحله دوم (افزایش ارتفاع پایاب بستر کانال به میزان سه سانتی متر به همراه افزایش زبری)، میزان آبشستگی عدد ۵۸ میلی متر را نشان می‌دهد. بنابراین، این روش موجب کاهش ۵۶ درصد از آبشستگی پایاب شده است. از طرفی این عدد نشان دهنده تاثیر کم (به میزان ۷ میلی متر) افزایش ۳ سانتی متری پایاب بستر نسبت به شرایط آزمایش پیشین بر کاهش عمق آبشستگی بوده است. رفت و آمد نوسانی پرش هیدرولیکی نیز همچنان ادامه دارد. شکل ۱۵، پروفیل بستر کانال را با ارتفاع ۳ سانتی متری انتهای کانال نشان می‌دهد.

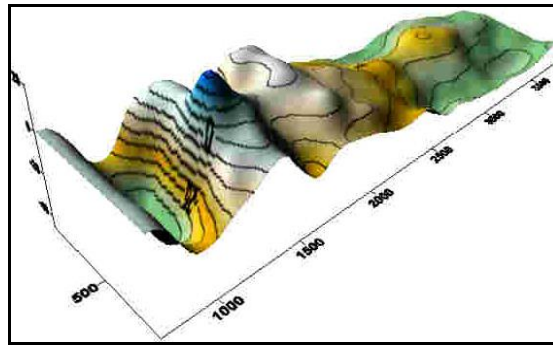


شکل ۱۵- پروفیل بستر کانال با ارتفاع ۳ سانتی متری انتهای کانال و زبری

Figure 15 - Channel bed profile due to both raising channel bed level by 3 cm and bed roughness increasing

در مرحله سوم (افزایش ۶ سانتی متر در ارتفاع پایین دست کانال)، گرچه رفت و آمد نوسانی در داخل حوضچه مستغرق می‌گردد. پرش هیدرولیکی همچنان ادامه دارد اما مقداری از پرش نوسانی در داخل حوضچه مستغرق می‌گردد.

میزان عمق چاله آبشستگی در این حالت ۲۵ میلی متر را نشان می دهد. نشان دهنده تاثیر بیشتر کاهش عمق آبشستگی نسبت به شرایط پیشین (ارتفاع ۳ سانتی متری) بوده است. شکل ۱۶، پروفیل بستر کانال را با افزایش ارتفاع ۶ سانتی متر نشان می دهد. گرچه آبشستگی در این روش کاملا کنترل نشده است اما آبشستگی نسبت به آزمایش مینا ۸۱ درصد کاهش را نشان می دهد. این عدد

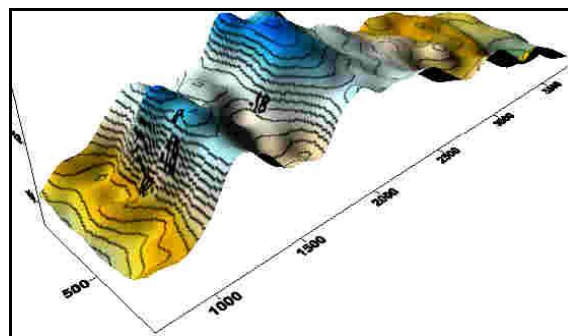


شکل ۱۶- پروفیل بستر کانال با افزایش ارتفاع ۶ سانتی متری

Figure 16 - Channel bed profile due to raising channel bed level by 6 cm

صفر می رسد. گرچه در قسمت های پایین تر آبشستگی جزئی اتفاق می افتد، اما با توجه به فاصله آن از پایاب برای سازه مشکلی ایجاد نمی کند. شکل ۱۷، پروفیل بستر کانال را با افزایش ارتفاع ۹ سانتی متر نشان می دهد. همچنین آزمایش در شرایط مختلف افزایش ارتفاع پایاب در جدول ۱ نشان داده شده است.

در مرحله چهارم (افزایش ارتفاع ۹ سانتی متر پایین دست کانال)، شرایط آبشستگی بستر به علت مستغرق شدن کامل پرش با مراحل پیش متفاوت است. افزایش پایاب موجب برگشت جریان آب می شود. در نتیجه، پرش هیدرولیکی درون حوضچه آرامش تشکیل و مستغرق می شود. در این شرایط، انرژی به شدت مستهلک می شود و در نتیجه آبشستگی در پایاب حوضچه آرامش به



شکل ۱۷- پروفیل بستر کانال با افزایش ارتفاع ۹ سانتی متر

Figure 17 - Channel bed profile due to channel bed level raising by 9

جدول ۱- شرایط آزمایش در مراحل مختلف افزایش ارتفاع پایاب

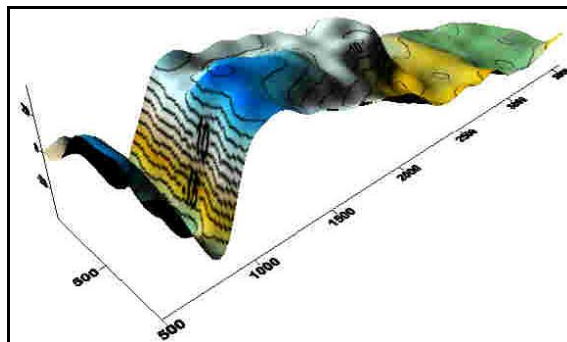
Table 1- Test conditions in different stages of channel bed level raising

حداکثر عمق آبشستگی Maximum scour depth (میلی‌متر) (mm)	ارتفاع سطح آب (میلی‌متر) Water depth of water surface elevation(mm)	شرایط آزمایش Test conditions
-65	55	ارتفاع ثابت انتهای کانال Fixed height of channel end
-58	68	ارتفاع کانال ۳ سانتی‌متر بالاتر آمده است The height of the canal is 3 cm higher
-25	65	ارتفاع کانال ۶ سانتی‌متر بالا تر آمده است The height of the canal is 6 cm higher
0	120	ارتفاع کانال ۹ سانتی‌متر بالا تر آمده است The height of the canal is 9 cm higher

حجمی از آب به داخل مخزن بر می‌گردد و حجمی دیگر پس از تلفات از روی بلوک انتهایی عبور می‌کند و در کانال جریان می‌یابد. برای بررسی تاثیر ایجاد بلوک انتهایی، چهار مرحله اجرا شده است. در مرحله اول، میزان آبشستگی ایجاد شده در شرایط فوق‌الذکر ۵۰ میلی‌متر بوده است. مقایسه آبشستگی ایجاد شده با آبشستگی در شرایط مبنا (۱۳۰ میلی‌متر)، ۶۱/۵ درصد کاهش را نشان می‌دهد. شکل ۱۸، پروفیل بستر را در شرایطی نشان می‌دهد که ارتفاع و زبری بستر ثابت بوده است.

تعبیه بلوک انتهایی حوضچه آرامش به ارتفاع ۳ سانتی‌متر

تعبیه بلوک انتهایی برای حوضچه آرامش باعث کاهش آبشستگی می‌شود. علت این موضوع مستغرق شدن حجم زیادی از جریان آب درون حوضچه است. جریان آب درون حوضچه آرامش حرکت می‌کند و پس از برخورد به بلوک انتهایی آن، برگشت جریان آب رخ می‌دهد و جریان چرخشی ایجاد می‌کند. برخورد جریان آب به این مانع موجب استهلاک زیادی از انرژی آن می‌شود،

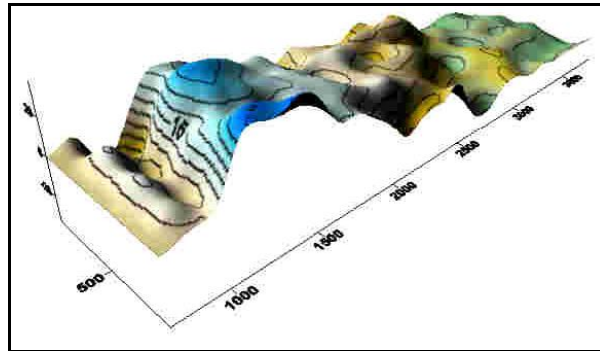


شکل ۱۸- پروفیل بستر در شرایطی که ارتفاع و زبری بستر تغییری نکند

Figure 18- Bed profile in conditions of no change in bed level and bed roughness

بررسی آزمایشگاهی تاثیر ایجاد پرش مستغرق بر کاهش آبشستگی پایین دست...

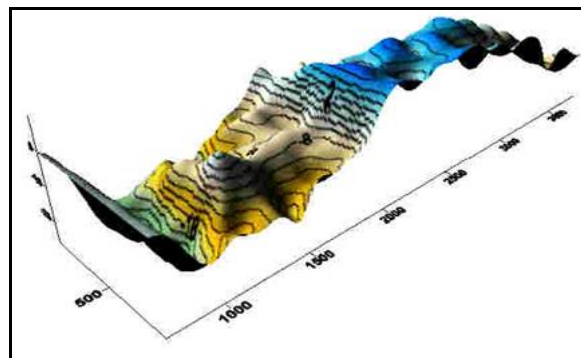
در مرحله دوم (افزایش ۳ سانتی متر در ارتفاع پایاب بستر، در صورتی که زبری تغییر نیابد)، میزان آبشستگی نسبت به حالت قبل ۱۵ میلی متر کمتر شده است و نسبت به آزمایش مبنای ۷۳ درصد کاهش را نشان می دهد. شکل ۱۹، پروفیل بستر را در شرایطی نشان می دهد که زبری ثابت و ارتفاع ۳ سانتی متر افزایش یافته است.



شکل ۱۹- پروفیل بستر در شرایطی که زبری ثابت و ارتفاع ۳ سانتی متر افزایش یابد

Figure 19- Bed profile in conditions of initial bed roughness and bed level raising by 3 cm

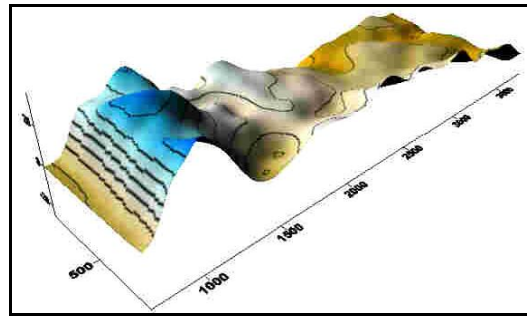
در مرحله سوم (افزایش قطر مصالح پایاب حوضچه آرامش به ۲ تا ۳ سانتی متر)، میزان آبشستگی ۲۵ میلی متر است که نسبت به سطح آزمایش مبنای ۸۱ درصد کاهش می دهد. شکل ۲۰، پروفیل بستر را در شرایطی نشان می دهد که از مصالح درشت دانه همکف بستر استفاده شود.



شکل ۲۰- پروفیل بستر (مصالح درشت دانه همکف بستر)

Figure 20 - Bed profile (in case of coarse-grained sediment on channel bed)

در مرحله چهارم (مصالح با قطر ۲ تا ۳ سانتی متر در ارتفاع ۳ سانتی متر در ادامه سرریز قرار گرفت)، استهلاک انرژی زیاد می شود و در نتیجه نه تنها آبشستگی ایجاد نمی شود بلکه تلماسه به ارتفاع ۳۰ سانتی متر تشکیل می گردد. شکل ۲۱، پروفیل بستر را در شرایطی نشان می دهد که از مصالح درشت دانه در بستر استفاده شده و ارتفاع نیز افزایش یافت است. جدول ۲ نیز شرایط آزمایش را برای بلوک انتهایی ۳ سانتی متری نشان می دهد.



شکل ۲۱- پروفیل بستر (زبری و ارتفاع افزایش می یابد)

Figure 21 - Bed profile (raising bed level and increasing bed roughness)

جدول ۲- شرایط آزمایش در مراحل مختلف برای بلوک انتهایی ۳ سانتی متری

Table 2 - Test conditions in different stages for the 3 cm height of end sill

حداکثر عمق آبشستگی (میلی متر) Maximum scour depth (mm)	ارتفاع سطح آب (میلی متر) Water depth of water surface elevation (mm)	شرایط آزمایش Test conditions
-50	52	ارتفاع و نوع مصالح بستر ثابت no change in bed level and bed roughness
-35	60	ارتفاع بستر ۳ سانتی متر بالاتر آمده و نوع مصالح بستر تغییری نکرد raising bed level by 3 cm and no change in bed roughness
-25	60	ارتفاع ثابت و مصالح درشت دانه شود no change in bed level and increasing bed roughness
+30	60	ارتفاع بستر ۳ سانتی متر افزایش یافته و مصالح درشت دانه شود raising bed level by 3 cm as well as increasing bed roughness

نتیجه گیری

این موج کمتر می شود. افزایش ارتفاع پایاب حوضچه آرامش به ارتفاع ۹ سانتی متر موجب قطع آبشستگی در پایاب حوضچه آرامش می شود و موج نوسانی نیز ایجاد نمی گردد. تعبیه بلوک انتهایی موجب جریان چرخشی درون حوضچه آرامش می شود و برخورد جریان آب به بلوک انتهایی حوضچه و برگشت آب سبب استهلاک انرژی می شود و در نتیجه آبشستگی پایاب را کم می کند. در صورتی که در پایین دست حوضچه آرامش علاوه بر تعبیه بلوک انتهایی از مصالح درشت دانه برای زبری بستر استفاده شود، آبشستگی صورت نمی گیرد.

وجود بلوک انتهایی در انتهای حوضچه آرامش و بالا آوردن انتهای کانال، موجب پرش هیدرولیکی مستغرق در داخل حوضچه آرامش می شود. پرش مستغرق ایجاد شده سبب کاهش جریان آب و در نتیجه موجب کاهش آبشستگی می شود. نتایج بررسی ها نشان می دهد که با افزایش ارتفاع پایاب بستر به همراه افزایش زبری، از حجم فرسایش کاسته خواهد شد. با این همه، تا افزایش ارتفاع به ۶ سانتی متر، آبشستگی همچنان ادامه دارد. در این شرایط موج نوسانی در پایاب صورت می گیرد و هرچه عمق آب بیشتر شود طول

بلوک‌های انتهایی در بعضی سازه‌های آبی احداث شده‌اند، می‌توان با مقایسه بین شرایط آزمایشگاهی و طبیعت در تحقیقات بعدی به نتایج مناسبی رسید.

نتایج آزمایش نشان می‌دهد چنانچه از بلوک انتهایی به ارتفاع ۳ سانتی‌متر (۶۰ سانتی‌متر در طبیعت) به همراه افزایش زبری بستر به اندازه ۲ تا ۳ سانتی‌متر (۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متر در طبیعت) استفاده شود، آبشستگی ایجاد نخواهد شد.

برای حالت افزایش عمق پایاب نیز در صورتی که عمق پایاب به میزان ۹ سانتی‌متر (۱/۵ برابر عمق پایاب اولیه) افزایش یابد، هیچ آبشستگی ایجاد نمی‌شود. این مقدار حدود ۱/۸ متر در طبیعت است.

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد درصد استغراق در روش تعبیه بلوک انتهایی حوضچه آرامش در انتهای حوضچه آرامش نسبت به افزایش ارتفاع پایاب بیشتر است و در نتیجه ضمن اقتصادی بودن عملکرد بهتری را در کاهش آبشستگی از خود نشان می‌دهد.

اگر به همراه افزایش بلوک انتهایی حوضچه آرامش یا افزایش ارتفاع پایاب از مصالح درشت‌دانه برای افزایش زبری بستر استفاده شود، میزان استهلاک انرژی به علت کمک در افزایش اصطکاک در بستر، موجب کاهش میزان آبشستگی خواهد شد.

از نتایج این روش آزمایشگاهی می‌توان در طبیعت بهره جست. همچنین، از آنجا که کفبند و

مراجع

- Abbasi, A., A., (2015), *Field study of the effect of appropriate choice of slope limit in reducing the cost of construction of breeding dams*, Journal of Watershed Engineering and Management, 7,(1), 109-115. (in Persian)
- Alipour, M, H Ghahari, Gh, R, & Mesbah, S, M, (2019), *Stability analysis of stone-mortar dams of Shiraz Cleist watershed*. Journal of Watershed Management Research, 32(2), 95-110.
- Anon. (2005). Standard publication: No. 34, *Publications of the Management and Planning Organization of the country*, Field Methods for Measurement of Rivers and Dam Reservoirs Sediment
- Anon. (2011). Standard publication: No. 549, *Vice President for Strategic Planning and Supervision*, Guideline for Estimation of Local Scour
- Dilrooban, Y., Imasalan, K., Sujana, K. and Pathirana, K.P.P. (2014). Effect of Bed Roughness on Submerged Hydraulic Jumps. *Engineer*, XLVII(4), 33-39
- Ead, S. A., & Rajaratnam, N. (2002). Plane turbulent wall jets in shallow tailwater. *Journal of engineering mechanics*, 128(2), 143-155.
- Grass, A. J., (1970), *The initial instability of fine sand*. Proc. ASCE. 96(3):619- 632.
- Hong, S. H., Kim, S. J., Sturm, T., & Stoesser, T., 2010, *Effect of low tailwater during drought on scour conditions downstream of an ogee spillway*, River flow, (2014) 1193-1199
- hydraulic jump downstream of sluice gates". *In Proceeding of 9th Iranian Hydraulics Conference, Tehran, Iran*. (in Persian)
- Kells, J.A., Balachandar, R., & Hagel, K.P., 2001, *Effect of grain size on local channel scour below a sluice gate*, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28, (3) 440- 451

- Kouchak, P., Shafaei Bajestan, M., (2012), *Investigation of changes in the length of downstream scouring of rough horizontal floor dam*, 9th International Seminar on River Engineering, February 24, 2013, Shahid Chamran University, Ahvaz. Iran. (in Persian)
- Lenzi, M.A. and F. Comiti, 2003. Local scouring and morphological adjustments in steep channels with check-dam sequences, *Geomorphology*, 55(1-4): 97-109
- Long, D., P. Steffler and N. Rajaratnam 1990 LDA study of flow structure in submerged hydraulic jump, *Journal of Hydraulic Research* 28(4): 437-460.
- Moradi, A., Parish, Y., (2011), Evaluation of scouring phenomenon in the downstream of overflows and strategies to rehabilitate and reduce scouring, Fourth National Conference on Rehabilitation and Preservation of Permanent Buildings, 15, to 16 October, Islamic Azad University, Khomein Branch, Khomein. Iran. (in Persian)
- Nasrabadi, M., Omid, M.H. & Farhoudi, J. (2010). "Comparative study of free and submerged
- Omidi, P., Shafaei Bajestan, M., Shokrian, Manouchehr., (2014), *The effect of jump position on the overflow on the topography of the downstream bed of the type 1 tranquility pond*, 15th Civil Students Conference, September 11-13, Urmia University, Urmia. Iran. (in Persian)
- Omidi, S., Shafaei Bajestan, M., (2014), *Downstream scouring depth of type 1 pond in free and submerged jump conditions*, 13th Iranian Hydraulic Conference, November 12, University of Tabriz, Tabriz. Iran. (in Persian)
- Subhasish, D. and Bernhard, W. (2003). Hydraulics of Submerged Jet Subject to Change in Cohesive bed Geometry. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129, 44 - 53.
- Valizadegan, A. & Farhoudi, J., (2002), Control of scouring downstream of calm ponds using stone cutting, Sixth International Seminar on River Engineering, 8 to 10 February, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz. Iran. (in Persian)
- Yalin M. S. (1971). *Theory of Hydraulic Models*, New York, MacMillan
- YÜKSEL, Y., GÜNAL, M., BOSTAN, T., ÇEVİK, E., and ÇELİKOĞLU, Y. 2004. The Influence of Impinging Jets on Hydraulic Jumps. *Process of the Institution of Civil Engineering, Water Management*. 157: WM2. 63-76.
- Zare Bidaki, & R., Ghanbari, A., (2015), *Evaluation of group efficiency of breeding dams using hierarchical analysis process*, *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 9(28), 1-10. (in Persian)

Laboratory Study of the Effect of Submersible Jumping in Reducing Scouring Downstream of Stilling Basin (Case study: masonry Check Dam of Ziarat)

M. Meftah Halaghi, M. A. Solbi, A. A. Dehghani and A. Zahiri

* Corresponding Author: Associated professor, Water Eng. Department of water and soil Eng., Gorgan university of agricultural science and natural resources, Gorgan, Iran. Email: meftah@gau.ac.ir

Received: 23 August 2021, Accepted: 3 October 2021

Abstract

Introduction

Masonry check dams are small structures that are built to reduce the slope of the canal, reduce the flow velocity as well as control bed erosion. The distinguishing feature of Masonary check dam and other similar structures is the presence of pipes in the body of check dams. This adds to the complexity of the hydraulic conditions of these structures. As the flow overflows through the Masonry check dams, only some of the kinetic energy of the flow is dissipated in the stilling basin and the excess kinetic energy is occurred downstream of the structure. This situation can cause erosion of the riverbed downstream of the structure. Various methods are designed and implemented to control this excess energy. These methods include changing the height of the bottom bed, roughening the bed and creating a protrusion at the end of the stilling basin in order to create a submerged hydraulic jump into the stilling basin. Due to the fact that the stilling basin used in the main structure is USBR type 1 and in this type of basins, no baffles or end sills are used to dissipate the flow kinetic energy, embedding a sill at the end of the stilling basin is one of the innovations of this research. Also, using a physical model of mortar stone dams has not been reported anywhere and hence, this is also one of the innovations of this research. Therefore, using the physical model of "Tol Beneh" mortar rock dam can help to better understand the impact of scour reduction methods in the main structure constructed on the Gorgan Ziarat River and similar structures

Materials and Methods

in order to identify scour in Masonary check dam and its control methods, a physical model with a scale of 1:20 was developed. The flow rate in all tests was 25 l/s At first First, experiments were performed to determine the amount of scouring at the stilling basin. The results of these experiments were used to compare with the remaining test conditions. In the second series of experiments, to create a rough bed, the 54 cm long distance (equal to the length of the stilling basin) was covered with materials with a median diameter of 2.5 cm. three heights of 3, 6 and 9cm were used to model the increase of bed elevation (third series experiments). In the fourth series of experiments, to create a sill at the end of the stilling basin, a plastic blade (blocks)3 cm high was used in four stages. In the first stage, only a 3 cm sill was installed at the end of the stilling basin. In the second stage, the height of the bed bottom increased by 3 cm. It should be noted that the average diameter of bed particles in these two methods was 4.5 mm. In the third stage, the roughness thickness of the bed materials increased to an average diameter of 2.5 m without increasing the bed height. In the fourth stage, in addition to increasing the roughness of the bed material, the height of the bed also increased by 3 cm .

Results and Discussion

In the stilling basin model, the scour depth was 130 mm without any obstacles. In other words, this magnitude represents a scour of 2.60 meter in the prototype. The presence of the end edge at the end of the stilling basin as well as raising the end of the channel causes a submerged hydraulic jump and consequently reduces scouring. If it is used in combination

with these two methods, the effect will be greater. The results show that the presence of the end edge at the end of the calm pool shows a greater scouring reduction than increasing the height of the bottom,

The results of these methods, which have been performed in the laboratory, can be used in the field. Also, since the apron and end blocks have been constructed in some water structures, suitable and proper results can be obtained by comparing the experimental and field conditions in future researches. Experimental results show that if the end block with a height of 3 cm (60 cm in the field) is used along with an increase of 2-3 cm in bed roughness height (40-60 cm in the field), no scouring will occur. For the case of increasing the tailwater depth, if this parameter increases by 9 cm (equivalent to 1.5 times the initial tailwater depth), no scouring will occur. This value is nearly equivalent to 1.8 meters in the field.

Keywords: Scouring, Tailwater submergence, Masonry check dam, stilling basin