بررسی آزمایشگاهی تأثیر طول سرریزهای مستغرق بر الگوی رسوب و تراز آب در پیچان‌رود

محمد همتی [۱]، سیدمحمود کاشفی‌پور *[۲] و مهدی قمشی [۲]

[۱] دانشجوی دکترای سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

[۲] استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

چکیده

فرایندهای طبیعی مرتبط با سیستم‌های رودخانه‌های پیچان‌رودی محافظت نشده نشان داده است که گود افتادگی بستر آبراهه، فرسایش ساحل آبراهه و جابجایی قوس‌ها در این رودخانه‌ها اتفاق می‌افتد. در بعضی سیستم‌ها، قوس‌ها (مئاندرها) به طور طبیعی و در جهت عرضی به سمت پایین‌دست گسترش می‌یابند. یکی از سازه‌هایی که برای کنترل این جابجایی‌ها به کار برده می‌شود، سرریزهای مستغرق می‌باشد. سرریزهای مستغرق، سازه‌های سنگی شکل هستند که در قسمت قوس خارجی رودخانه احداث می‌گردند تا جهت جریان را از قسمت بیرونی قوس تغییر داده و مانع فرسایش آن گردند. در این تحقیق تأثیر طول سرریزهای مستغرق بر الگوی رسوب و جریان در شرایط بستر زنده (تزریق پیوسته رسوب) مورد بررسی قرار گرفت. متغیرهای مورد استفاده در این تحقیق، از سه نسبت دبی جریان به دبی طراحی سرریزها برابر با ۰/۶۷، ۱ و ۱/۲۷، طول سازه‌ها ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد عرض بالایی کانال در دبی طراحی استفاده شد و سازه‌ها عمود بر قوس نصب شده بودند. ارتفاع و فاصله سازه‌ها در این تحقیق ثابت بودند و قطر متوسط مواد بستر ۱/۶ میلی‌متر می‌باشد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که در اثر احداث سرریزهای مستغرق، نسبت‌های طول برابر با ۰/۴ و ۰/۲ به ترتیب باعث افزایش و کاهش ۱ درصدی تراز آب شده و نسبت طول ۰/۳ تأثیری در افزایش و یا کاهش تراز آب نسبت به حالت بدون سازه نداشتند. نسبت شیب پروفیل عرضی سطح آب در اثر احداث سرریزهای مستغرق به حالت بدون سازه در نسبت طول برابر با ۰/۲ کمتر از ۰/۳ و ۰/۴ می‌باشد. ابعاد طولی و عرضی چاله فرسایشی و نسبت سطح رسوبات در سمت قوس خارجی به سطح اولیه رسوبات، با افزایش نسبت طول، زیاد می‌گردد. تأثیر نسبت طول ۰/۴ در کنترل فرسایش قوس خارجی بیشتر از ۰/۳ و آن هم بیشتر از ۰/۲ می‌باشد.

واژگان کلیدی: سرریزهای مستغرق، پیچان‌رود، تراز آب، بستر زنده، الگوی رسوب، نسبت طول.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر سرریزهای مستغرق یک روش نسبتاً ارزان جهت دستیابی به اهداف بازیابی چندین آبراهه شده و در تمام ایالات متحده به مرحله اجرا در آمده است. این سازه‌ها سرعت‌های نزدیک ساحل را کاهش داده و یک مسیری را برای جریان مطابق خواست مهندس طراح در تمام طول قوس ایجاد می‌نمایند. این سازه‌ها پتانسیل عظیمی در اداره کردن مشکلات مربوط ناپایداری‌های عرضی دارند؛ اما نباید در آبراهه‌هایی که با مشکل گود افتادگی و یا در بازه‌هایی که با کمبود رسوب مواجه‌اند به کار گرفته شوند و همچنین این سازه‌ها برای هر اندازه از شعاع قوس (متوسط تا کوچک) رودخانه‌های پیچان‌رودی مناسب بوده و در محدوده وسیعی از سرعت‌ها و اندازه رسوب مناسب می‌باشند [۱]. طول سرریز، به عنوان طول تصویر شده تاج سرریز به صورت عمود بر جهت جریان تعیین می‌شود. برخی محققان گزارش داده‌اند که طول سرریز دقیقاً همان طول واقعی آن می‌باشد. بنابراین در اکثر موارد، طول سرریز بر حسب درصدی از عرض آبراهه در حالت مقطع پر[۱] گزارش شده است [۲]. به طور کلی هیچ راهنمای طراحی برای نصب طول سرریزهای مستغرق وجود ندارد. در اکثر موارد طول این سازه به کارکرد مطلوب آن بستگی دارد؛ یعنی اگر کشتیرانی یا ثمر بخش بودن (هزینه و بهره‌وری) از اهداف اولیه باشد، باید در صورت امکان کوتاه ساخته شوند و اگر بخش عظیمی از ساحل نیاز به حفاظت داشته باشد باید طول سرریزها طولانی‌تر انتخاب شوند [۳]. طبق گفته Watson [۴] اگر نفوذپذیری سرریزها بین ۰ و ۳۵ درصد باشد طول آن‌ها نباید بیش از ۱۵ درصد عرض آبراهه باشد. اگر نفوذپذیری آن‌ها ۸۰ درصد و یا بیشتر باشد، طول سازه‌ها نباید بیش از ۲۵ درصد عرض آبراهه باشد. در مطالعه‌ای که Kozerski [۵] روی رودخانه Elbe انجام داد تعییـــن کرد که اگـــر سرریـزها به طور قابل ملاحظه‌ای دراز

1- Bankfull

* نویسنده مسئول

دریافت ۹۱/۴/۲۵ پذیرش ۹۱/۱۱/۲۱

(طولانی) باشند یک جریان چرخشی مانندی بین سرریزها ایجاد می‌شود و جریان اصلی هرگز به ساحل خارجی نمی‌رسد، اما اگر سرریزها خیلی کوتاه باشند جریان اصلی آبراهه به ساحل خارجی رسیده و باعث فرسایش قابل توجهی می‌گردد.

در دستورالعمل منتشر شده توسط FHWA، گزارش شده است که برای کاهش شدت جریان و حفاظت ساحل، طول سرریزها باید به ترتیب ۳۳ درصد و ۲۵ درصد عرض آبراهه باشد. همچنین در یک گزارش دیگر از همین سازمان، آمده است طول سرریزها نباید بیش از ۳۳ درصد عرض آبراهه باشد. بنابراین طول سرریز در محدوده ۱۰ الی ۲۵ درصد عرض آبراهه خیلی معمول می‌باشد [۱]. در رودخانه می‌سی‌سی‌پی طول سرریزها ۱۷ درصد عرض آبراهه انتخاب گردید [۶].

Kinzili و Thoronton [۷] در مطالعه‌ای آزمایشگاهی با عنوان پیش‌بینی سرعت در محدوده سرریزهای مستغرق به بررسی این موضوع پرداختند. مدل مورد استفاده آنان مربوط به بخشی از قوس رودخانه میدل ریوگراند با مقیاس ۱:۱۲ بود. متغیرهای مورد استفاده در این تحقیق شامل دبی (۸، ۱۲ و ۱۶ cfs)، زاویه سرریزها (۹۰ و ۶۰ درجه) و طول سرریز که به صورت درصدی از عرض بالادست کانال انتخاب می‌شد (۱۵، ۲۲ و ۲۸ درصد) می‌باشند. عرض تاج، کف و ارتفاع سرریز، و اندازه ذرات رسوب در این تحقیق ثابت بودند. عرض تاج سرریز ۱ فوت و با شیبی که به سمت پایین داشت عرض کف سرریز ۴ فوت می‌شد. آنان در نهایت با استفاده از این داده‌های آزمایشگاهی چهار معادله را جهت پیش‌بینی سرعت اطراف سرریزهای مستغرق ارائه دادند.

مشکوری‌نیا و همکاران [۸] به بررسی تأثیر طول آبشکن مستغرق بر میزان آبشستگی ساحل خارجی قوس ۹۰ درجه پرداختند. مدل مورد استفاده در آزمایشات آن‌ها با عرض ۰/۴ و شعاع قوس ۹۰ درجه ۰/۸ متر می‌باشد. در آزمایشات آن‌ها تعداد ۷ آبشکن با فاصله ثابت ۳۲ سانتی‌متر از هم و با ارتفاع ثابت ۵ سانتی‌متر و با طول‌های ۶، ۸ و ۱۰ سانتی‌متر برای حالاتی که عدد فرود جریان ورودی ۰/۲۵ و ۰/۳ بود در ساحل خارجی قوس ۹۰ درجه جاگذاری شدند. نتایج مطالعات آنان نشان داد با افزایش عدد فرود، میزان عمق آبشستگی نیز افزایش می‌یابد. همچنین ماکزیمم عمق آبشستگی که در حوالی رأس قوس رخ داده بود در آبشکن مستغرق با طول ۱۰ سانتی‌متر کمترین مقدار را داشته که طول زیاد این سازه موجب دور کردن هرچه بیشتر جریان غالب از ساحل خارجی شده است.

Hemmati و همکاران [۹] به بررسی تأثیر طول و زاویه سرریزهای مستغرق بر عمق آبشستگی و رسوب‌گذاری در رودخانه مئاندری پرداختند. آزمایشات آن‌ها در یک مدل با بستر زنده به همراه تزریق پیوسته رسوب صورت گرفت و از سه زاویه ۶۰°، ۷۵° و ۹۰° و از سه نسبت طول ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ در شرایط مختلف هیدرولیکی برای تحقیق مذکور استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که زاویه ۷۵° و نسبت طول ۰/۳ بیشترین تأثیر را در عمق آبشستگی در دماغه سازه آخری و زاویه ۶۰° و نسبت طول ۰/۴ بیشترین تأثیر را در فرسایش تپه رسوبی در قوس داخلی ایجاد نمودند.

Abad [۱۰] به بررسی ساختار جریان در شرایط مختلف در یک قوس با وجود سرریزهای مستغرق پرداختند. آن‌ها با اندازه‌گیری سه‌بعدی سرعت روی نهر سوقار[1] در مزرعه بروکساید[2]، مدل سه بعدی را برای جریان‌های کم عمق شبیه‌سازی کردند که بعد از تأیید کارایی مدل، آن را برای جریان‌های با عمق متوسط و بیشتر شبیه‌سازی کردند. روی هم رفته نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که همبستگی خوبی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده سرعت و انرژی جریان متلاطم وجود دارد. این مدل دقت کمی در پیش‌بینی سرعت و انرژی جنبشی جریان متلاطم موجود در لایه برشی که بلافاصله در پایین دست نوک سرریز ایجاد می‌شود، دارد. داده‌های میدانی بیانگر وجود سه ناحیه هیدرولیکی عمده در شرایط جریان کم می‌باشد:

۱- منطقه سکون یا عدم چرخش جریان بین سرریزها

۲- یک خط القعر داخلی که در جلوی سرریزها ایجاد می‌شود، وجود یک ناحیه با سرعت بالا در سطح آب و کاهش سرعت در جهت کف و قوس داخلی

۳-وجود یک لایه برشی بلافاصله در پایین‌دست نوک (دماغه) سرریزها بین ناحیه غیر چرخشی و ناحیه با سرعت بالا.

در مطالعه‌ای که مهندسان ارتش آمریکا در ایستگاه آزمایش آبراهه‌ها (WES) بخش سنت لوئیس بر روی سرریزهای مستغرق واقع در قوس رودخانه می‌سی‌سی‌پی بر روی یک مدل فیزیکی با کف متحرک انجام دادند اعلام داشتند که هدف از طرح این مدل، مطالعه و بهبود کشتیرانی در قوس و حل مشکلات زیست محیطی به شرح زیر بود:

- هزینه‌های زیاد تعمیر و نگهداری لایروبی
- لزوم حفاظت از لانه‌های چلچله‌های دریایی کوچک

1- Sugar
2- Brookside

- تنگ کردن کانال کشتیرانی
- سرعت‌های زیاد
- جریان‌های سیلابی مضر
- عرض کم کانال کشتیرانی در گذرگاه مستقیم پایین دست قوس

با توجه به این مدل، مفهوم سرریزهای مستغرق که در ژانویه ۱۹۸۸ توسعه یافته بود برای قوس‌های پرایسیز لندینگ[1] و براون[2] اصلاح شد. این سرریزها در ۱۱ مدل در WES به جهت بهسازی کشتیرانی در عمق‌های کم و زیاد، تنظیم مسیر جریان از پل‌های بزرگراه، انحراف رسوب و حفاظت از ساختمان تعمیر کشتی‌ها آزمایش شد. از سال ۱۹۸۹ تا ۱۹۹۵ به تعداد ۱۲۰ سرریز در ۱۳ خم رودخانه می‌سی‌سی‌پی ساخته شد. تحلیل ۵ عدد از قدیمی‌ترین تأسیسات سرریزها نشان داد که از ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۵ لایروبی به میزان ۸۰ درصد کاسته شده و ۳ میلیون دلار صرفه‌جویی گردید. به علاوه حوادث کشتی‌های یدک‌کش کاهش یافت، تأخیر در زمان یدک‌کشی در خم‌ها کم شد، ساماندهی رسوب و یخ بهبود پیدا کرد، اختلال در مناطق سکونت چلچله‌ها از بین رفت، حوزه زیستگاه آبزیان افزایش یافت و تعداد و اندازه ماهیان در مناطق سرریزها در بعضی موارد تا پنج برابر اضافه شد [۱۱].

Shields و همکاران [۱۲] گزارش دادند آب ساکنی که توسط گرداب‌های شکل گرفته پشت سرریزها تشکیل می‌گردد، باعث ایجاد زیستگاه آبزیان می‌شود؛ این زیستگاه بین خط‌القعر رودخانه و منطقه رسوب‌گذار بین سرریزها به وجود می‌آید. همچنین یک چاله فرسایشی در دماغه این سرریزها اتفاق می‌افتد. علاوه بر این، ایشان اشاره داشتند وقتی که این سازه‌ها به طور مناسب احداث گردند باعث کاهش فرسایش سواحل می‌گردند. ایشان گزارش دادند که با احداث این سازه‌ها افزایش معنی‌داری در تعداد ماهیان، اندازه و تنوع گونه‌های مختلف مشاهده گردید.

این تحقیق با چهار ویژگی متمایز از کارهای دیگران شامل تزریق پیوسته‌ی رسوب همراه با جریان، حجم بالای رسوب تزریقی، نسبت کوچک عمق آب به عرض سطح آب و در هندسه‌ای پیچان‌رود انجام شده است. همچنین بررسی منابع مختلف نشان می‌دهد که بررسی تأثیر طول سرریزهای مستغرق بر الگوی رسوب و تراز آب در چنین مدلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است و ضروری است تا مطالعات بیشتری انجام شود.

1- Price’s Landing
2- Brown

۲- مواد و روش‌ها

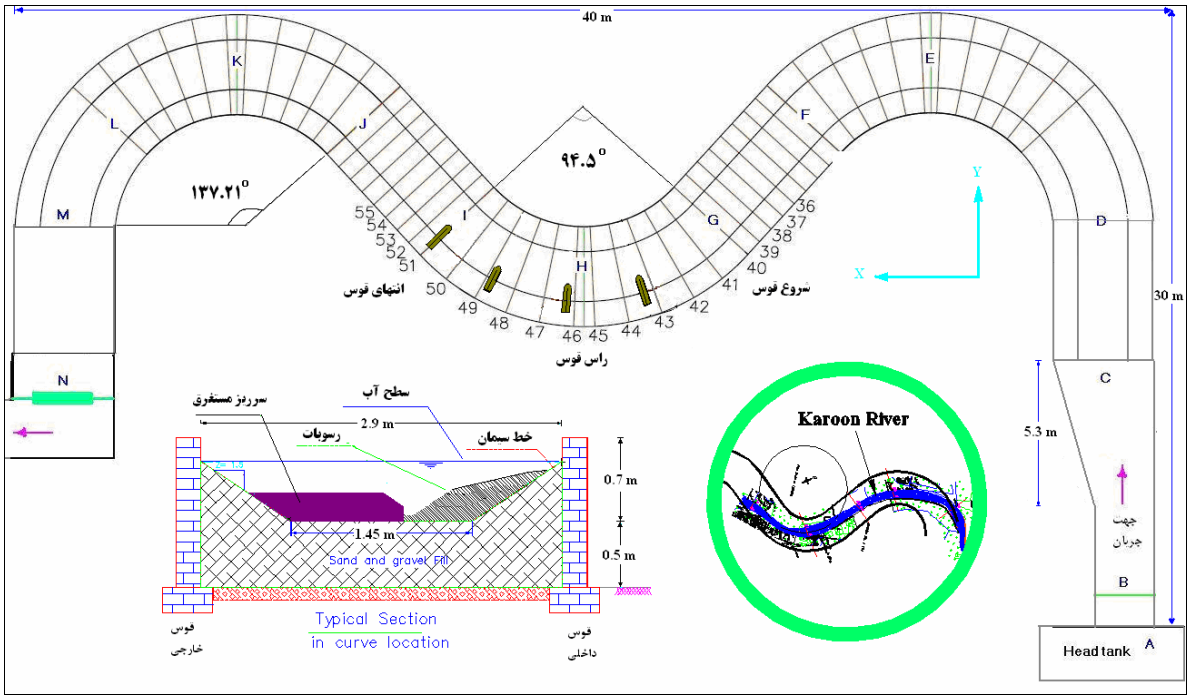
۲-۱- مشخصات مدل

برای انجام آزمایشات مربوطه از مدل موجود در مؤسسه تحقیقات آب در فضائی به ابعاد ۴۰×۳۰ متر مطابق شکل (۱)، استفاده گردید. در مدل مربوطه، ابعاد خم با توجه به روابط رژیم تعادلی رودخانه‌ها در نواحی پیچان‌رودی و هندسه رودخانهٔ کارون در ناحیهٔ پائین‌دست شهر اهواز بدست آمده است. با توجه به روابط تجربی و مشخصات خم‌های رودخانه کارون، ابعاد در پلان و نسبت‌های مربوطهٔ مدل در مقیاس هندسی به دست آمده است [۱۳].

مقطع کانال ذوزنقه‌ای می‌باشد که عرض آن در کف و بالای کانال به ترتیب ۱/۴۵ و ۲/۹ متر می‌باشد. شیب کناره‌ها برای قوس بیرونی و داخلی برابر با ۱/۵ می‌باشد. این مدل از سه قوس تشکیل شده است که زاویه مرکزی قوس‌های اول و سوم ۱۳۷/۲۱ درجه و زاویه قوس مرکزی که مورد مطالعه این تحقیق می‌باشد ۹۴/۵ درجه می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱) مشخص شده است، جریان از ناحیه بالادست در محل A وارد مدل می‌گردد، در محل B جریان ورودی توسط سرریز لبه تیز به عرض ۲ متر اندازه‌گیری می‌شود. بین مقطع A و B از آرام کننده جریان استفاده گردید و مقطع ذوزنقه‌ای آبراهه از C شروع می‌شود. شروع قوس اول D و انتهای این قوس و شروع بازهٔ مستقیم F می‌باشد، شروع قوس دوم G و انتهای آن I می‌باشد. قوس سوم از J شروع و تا L ادامه می‌یابد. دریچه قطاعی جهت کنترل جریان در قسمت انتهایی کانال و در مقطع N قرار گرفته است. جریان عبوری از مدل در انتها به مخزن سالن آزمایشگاه تخلیه و توسط پمپ، آب مجدداً به مدل برگردانده می‌شود. لازم به ذکر می‌باشد که فاصله بین F و G و I و J که مسیر مستقیم در بالادست و پایین دست قوس مرکزی می‌باشند، ۴ متر بوده و طول قوس خارجی ۱۱ متر و طول قوس داخلی ۵/۵ متر می‌باشد.

۲-۲- معرفی پارامترها و متغیرهای مربوط به سرریزهای مستغرق

لازم به توضیح می‌باشد که زاویه سرریز در واقع همان زاویه محور مرکزی تاج سرریز با خط مماس بر قوس در نقطه احداث سرریز می‌باشد که در این تحقیق از زاویه ۹۰ درجه استفاده گردید؛ یعنی در این حالت سازه‌ها عمود بر جریان می‌باشند.



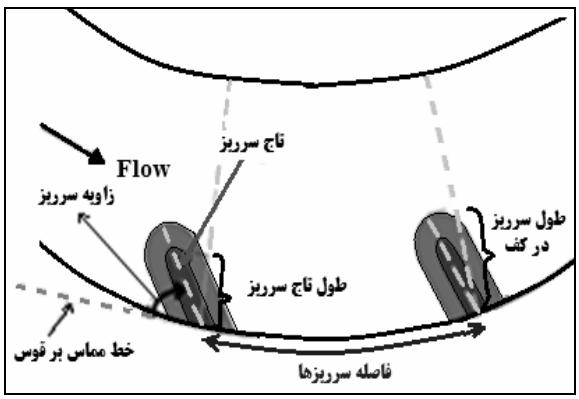
شکل ۱- پلان و مقطع مدل فیزیکی پیچان‌رود

طول سرریزها، همان تصویر واقعی طول تاج در امتداد شعاع قوس می‌باشد که به صورت درصدی از عرض بالایی سطح آب در حالت مقطع پر انتخاب می‌گردد که در این تحقیق طول تاج سرریزها ۲۰، ۳۰ و۴۰ درصد عرض سطح آب در دبی طراحی انتخاب گردید. فاصله سرریزها در تمامی آزمایشات ثابت و سه برابر طول تصویر شده تاج سرریز بود. همچنین ارتفاع سرریزها نیز در تمامی آزمایشات ثابت و برابر با ۳۰ درصد عمق متوسط آب در دبی طراحی انتخاب گردید. شکل (۲) به معرفی مشخصات سرریزهای مستغرق اشاره دارد.

۲-۳- نحوهٔ انجام آزمایشات

در این تحقیق آزمایشات به دو صورت، قبل و بعد از احداث سازه‌ها انجام گرفت. در سری اول که هیچ نوع سازه‌ای در کانال وجود نداشت، رسوبات به ضخامت ۳۵ و در برخی قسمت‌های کانال ۶۰ سانتی‌متر بر روی بستر کانال تسطیح گردید. سپس آب به آرامی از پایین دست وارد مدل گردید و بعد از بالا آمدن آب در مدل، دبی به آرامی از بالادست تنظیم می‌گردید. با توجه به مطالعات قبلی در این مدل و الهام‌گیری از آن، سه نسبت دبی جریان به دبی طراحی سرریزهای مستغرق برابر با ۰/۶۷، ۱ و ۱/۲۷ انتخاب گردید. بعد از تنظیم نسبت دبی ۰/۶۷ و جاگذاری ADV در یک نقطه که ماکزیمم آب‌شستگی اتفاق می‌افتاد، عمق آب‌شستگی با گذشت زمان اندازه‌گیری و ثبت گردید بعد از رسیدن به تعادل نسبی و برداشت داده‌ها، بدون تغییر در بستر تعادلی نسبت دبی ۰/۶۷، نسبت دبی برابر با ۱ اجرا شد و همین طور برای نسبت دبی ۱/۲۷ نیز این روند تکرار گردید. نتایج این روند نشان داد که در این حالت بستر خیلی سریعتر به حالت تعادل می‌رسد.

در سری دوم آزمایشات تعداد سه، چهار و پنج سازه از جنس بتن (برای بتن ریزی از قالب‌های مخصوصی که از جنس ورق آهن به ضخامت ۳ میلی‌متر ساخته شده بود) استفاده گردید. در حالتی که طول سرریزها بیشترین مقدار را داشت تعداد این سازه‌ها، ۳ عدد و در کمترین طول، تعداد سازه‌ها به ۵ عدد می‌رسید.



شکل ۲- معرفی پارامترهای مربوط به سرریزهای مستغرق

پس از جاگذاری سرریزها در کانال و آب‌بندی آن‌ها، رسوبات به ضخامت مورد نظر در کف کانال و اطراف سازه‌ها تسطیح شد و مثل حالات بدون سازه و بدون تغییر در توپوگرافی دبی‌ها، آزمایشات انجام گرفت. البته لازم به ذکر می‌باشد که در کلیه آزمایشات با وجود سازه و بدون سازه، همراه با جریان، تزریق رسوب پیوسته انجام گرفت.

با توجه به این که ماکزیمم عمق آب‌شستگی و یا عمق خط‌القعر در مقطع شماره ۴۸ اتفاق افتاده بود در احداث سازه‌ها سعی گردید این مقطع بین سازه‌ها قرار گیرد. مدت زمان انجام آزمایش برای شکل‌گیری بستر بستگی به میزان دبی و قدرت جریان دارد، در مقادیر بالاتر دبی، قدرت حمل رسوب در طول بازه افزایش یافته و بستر سریعتر شکل مورد نظر خود را پیدا می‌نماید، لذا مدت زمان آزمایش از ۶ تا ۱۸ ساعت وابسته به دبی متغیر است. بعد از حصول نسبی تعادل در آبراهه، پروفیل سطح آب در مقاطع مختلف با حسگر آلتراسونیک به فواصل ۳۰ سانتی‌متری در عرض مقاطع برداشت گردید. بعد از اتمام برداشت‌های هیدرولیکی، دبی جریان قطع می‌شد و روز بعد از اتمام هر آزمایش که بستر کاملاً زهکشی شده و امکان برداشت توپوگرافی حاصل می‌گردید، در یک شبکه ۱۰×۵ سانتی‌متری از متر لیزری مورد استفاده در نقشه‌برداری با دقت ۰/۱ میلی‌متر برای برداشت الگوی رسوب و فرسایش در مقاطع مختلف استفاده گردید.

جنس مصالح بستر از سفال پخته شده (سرامیک) می‌باشد. برای نزدیکی آزمایشات با طبیعت، مواد بستر انتخابی در محدوده غیریکنواخت انتخاب گردید. در دانه‌بندی‌های غیر یکنواخت امکان ایجاد لایه‌بندی و لایه آرمور یا پدیده آرمورینگ وجود دارد. برای رفع این مشکل که تا حد زیادی در نتایج آزمایشات و میزان حرکت رسوبات اختلاف ایجاد می‌کند، میزان دبی به نحوی انتخاب شد تا از حرکت تمامی دامنه رسوبات اطمینان حاصل شود. تزریق رسوبات به صورت دستی و یکنواخت در عرض کانال، قبل از قوس اول انجام می‌گرفت. مشخصات مواد رسوبی مورد استفاده در آزمایشات این تحقیق در جدول (۱) آمده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی تأثیر نسبت طول سرریزهای مستغرق بر تغییرات تراز آب

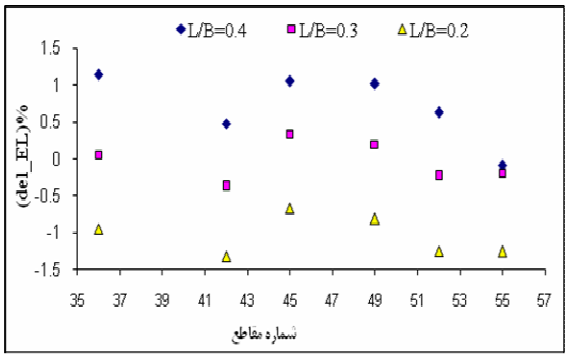
در اثر احداث سرریزهای مستغرق، مقاومت در مقابل جریان زیاد شده که در نتیجه آن سرعت جریان کاهش و عمق جریان افزایش می‌یابد و این امر ممکن است در اثر وقوع سیل باعث آبگرفتگی سواحل و خسارات جانی و مالی گردد. طول، زاویه، فاصله، ارتفاع و غیره از جمله پارامترهای سرریزهای مستغرق می‌باشند که بر پروفیل تراز آب تأثیرگذار می‌باشند که در این بخش به بررسی تأثیر طول سرریزهای مستغرق بر تغییرات تراز آب در طول قوس مرکزی آبراهه پیچان‌رود پرداخته شده است. در این قسمت منظور از درصد اختلاف تراز آب ٪(del_EL)، میزان افزایش و یا کاهش تراز آب در حالت با وجود سرریزهای مستغرق نسبت به حالت بدون سازه بوده و منظور از نسبت طول سرریزهای مستغرق، طول تصویر شده تاج سرریز به عرض سطح آب در دبی طراحی سازه‌ها می‌باشد. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که مقادیر مربوط به درصد اختلاف تراز آب در تمامی مقاطع، در نسبت طول برابر با ۰/۴ بیشتر از نسبت طول ۰/۳ بوده و آن هم بیشتر از نسبت طول ۰/۲ می‌باشد. زیرا با افزایش نسبت طول، هر چند حجم اشغال شده کانال توسط سرریزها با هر نسبت طولی تفاوت چندانی ندارد، اما سرریزهای با نسبت طول زیاد، باعث کاهش بیشتر عرض کانال شده و مقاومت بیشتری در مقابل جریان از خود نشان می‌دهند که باعث افزایش تراز جریان نسبت به حالت بدون سازه می‌شوند. لازم به توضیح می‌باشد که با کاهش نسبت طول، تعداد سازه‌ها افزایش یافته و در کل حجم و یا سطح اشغال شده کانال توسط این سازه‌ها تفاوت چندانی نمی‌کند. همچنین می‌توان گفت که ماکزیمم اختلاف تراز آب بین مقادیر مربوط به نسبت‌های طول ۰/۴ و ۰/۲ در حدود ۲٪ می‌باشد. البته لازم به ذکر می‌باشد که در نسبت طول ۰/۲، اختلاف تراز آب کمتر از ۱٪ می‌باشد و این یعنی تراز آب کمتر از حالت بدون سازه می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات مصالح بستر

شاخص دانه‌بندی مواد رسوبی (میلی‌متر)				ضریب یکنواختی	دانسیته	
D_{10}	D_{30}	D_{50}	D_{60}	C_u	طبیعی	خشک
۰/۸	۱/۴	۱/۶	۱/۸	۲/۲۵	۲/۴	۱/۴۱

زیرا نسبت طول ۰/۲ در قیاس با طول‌های بیشتر، عرض کمتری از کانال را اشغال می‌کند و در مقایسه با حالت بدون سازه باعث پخش جریان در کل عرض کانال می‌شود. لذا به همین دلیل سطح آب نسبت به بدون سازه نیز کاهش می‌یابد.

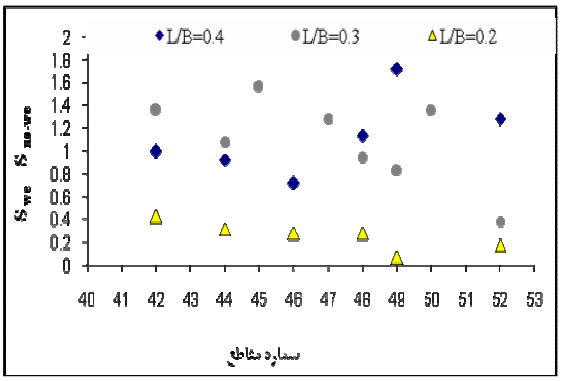
به طور متوسط می‌توان گفت که سرریزهای با نسبت طول برابر با ۰/۴ باعث افزایش ۱ درصدی تراز آب، سرریزهای با نسبت طول برابر با ۰/۳ تأثیری در افزایش و یا کاهش تراز آب نداشته و نسبت طول برابر با ۰/۲ باعث کاهش ۱ درصدی تراز آب نسبت به حالت قبل از احداث سازه‌ها شده‌اند. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که وجود سرریزهای مستغرق تأثیر قابل توجهی در افزایش تراز آب در طول آبراهه نسبت به حالت بدون سازه ندارند. مطالب فوق در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- اختلاف تراز آب در محدوده احداثی سازه‌ها در نسبت‌های مختلف طول

۳-۲- بررسی تأثیر نسبت طول سرریزهای مستغرق بر نسبت شیب عرضی سطح آب

تأثیر نسبت بی‌بعد طول سرریزهای مستغرق بر شیب عرضی سطح آب در مقاطع مختلف قوس مرکزی در شکل (۴) نشان داده شده است. همان طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد در نسبت طول (L/B) برابر با ۰/۲، نسبت شیب عرضی سطح آب در حالت با وجود سرریزهای مستغرق به حالت بدون سازه ($S_{we}/S_{no\text{-}we}$) در تمامی مقاطع کمتر از ۱ می‌باشد؛ یعنی در نسبت طول مذکور، شیب عرضی سطح آب در اثر احداث سرریزهای مستغرق کمتر از حالت بدون سازه می‌باشد.



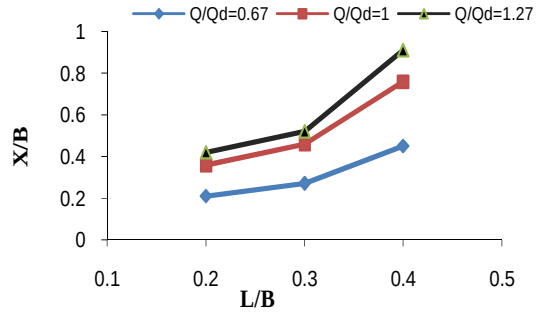
شکل ۴- نسبت شیب عرضی سطح آب در مقاطع و نسبت‌های مختلف طول سازه‌ها

همچنین تغییرات نسبت شیب عرضی سطح آب در نسبت طول ۰/۲ دارای روندی منظم و کاهشی می‌باشد که کمترین مقدار آن در مقطع ۴۹ اتفاق افتاده است. اما اکثر مقادیر نسبت شیب عرضی سطح آب در نسبت‌های طول ۰/۳ و ۰/۴ بیشتر از ۱ بوده و دارای تغییرات نامنظمی می‌باشند که علت بیشتر این نامنظمی‌ها به شدت گردابه‌های ایجاد شده توسط سرریزهای با نسبت طول بیشتر و همچنین مکان احداثی سازه‌ها مربوط می‌شود؛ زیرا تعداد و محل احداث سرریزها در هر نسبت طول متفاوت می‌باشند.

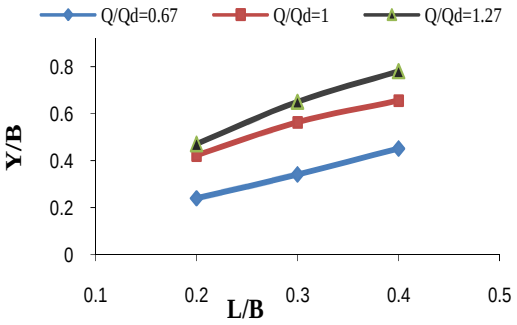
۳-۳-بررسی تأثیر نسبت طول سرریزهای مستغرق بر الگوی رسوب

۳-۳-۱- بررسی ابعاد چاله فرسایشی در اطراف دماغه سرریزهای مستغرق

برای کمی کردن ابعاد چاله فرسایشی، دو بعد طول (در جهت طول کانال) و عرض (در جهت عرضی کانال) چاله فرسایشی اندازه‌گیری شد که نتایج آن در اشکال (۵) و (۶) آمده است. با توجه به این که ماکزیمم ابعاد چاله فرسایشی در تمامی آزمایشات در دماغه سازه آخر اتفاق افتاده بود، به همین جهت نتایج ارائه شده مربوط به سازه آخر می‌باشند. با افزایش نسبت طول سرریزهای مستغرق، بعد طولی چاله فرسایشی افزایش می‌یابد؛ طوری که تغییرات بعد طولی چاله در تمامی نسبت‌های دبی، بین دو نسبت بی‌بعد طول برابر با ۰/۴ و ۰/۳ بیشتر از ۰/۳ و ۰/۲ می‌باشد و این به خاطر تأثیر طول سازه‌ها در ایجاد گردابه‌های قوی است که باعث گسترده شدن بعد طولی چاله فرسایشی می‌شود (شکل (۵)).



شکل ۵- بررسی تأثیر نسبت طول سرریزهای مستغرق بر بعد طولی چاله فرسایشی در دماغه سازه آخری

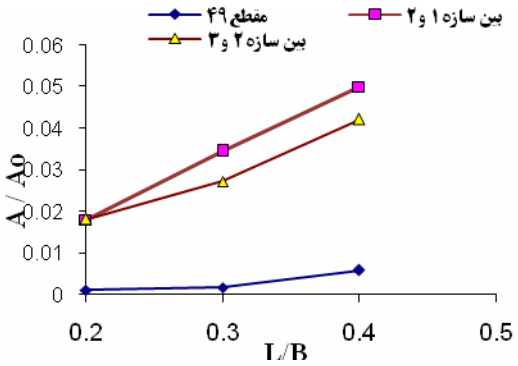


شکل ۶- بررسی تأثیر نسبت طول سرریزهای مستغرق بر بعد عرضی چاله فرسایشی در دماغه سازه آخری

با وجود این که بعد عرضی چاله فرسایشی همانند بعد طولی با افزایش نسبت طول، زیاد می‌گردد اما تغییرات آن به شدت تغییرات بعد طولی نمی‌باشد (شکل (۶)).

۳-۳-۲- بررسی تأثیر نسبت طول سرریزهای مستغرق بر سطح رسوبات موجود در سمت دیواره خارجی قوس

برای بررسی تأثیر نسبت بی‌بعد طول سرریزهای مستغرق بر میزان رسوبات موجود در سمت دیواره خارجی قوس، از سطح رسوبات در مقاطع مختلف استفاده گردید که مقطع شماره ۴۹ و مقاطع بین سازه‌های اول و دوم و سازه‌های دوم و سوم انتخاب و مورد بررسی قرار گرفتند. همان طور که در شکل (۷) نشان داده شده است، با افزایش نسبت بی‌بعد طول سرریزهای مستغرق در هر سه مقطع مذکور نسبت بی‌بعد سطح رسوبات در سمت دیواره خارجی قوس افزایش می‌یابد. اما شیب تغییرات سطح رسوبات در مقطع ۴۹ کمتر از مقاطع دیگر می‌باشد. همچنین میزان رسوبات سمت دیواره خارجی قوس در مقطع مشترک بین سازه‌های اول و دوم بیشتر از مقطع بین سازه‌های دوم و سوم و آن هم بیشتر از مقطع ۴۹ می‌باشد.



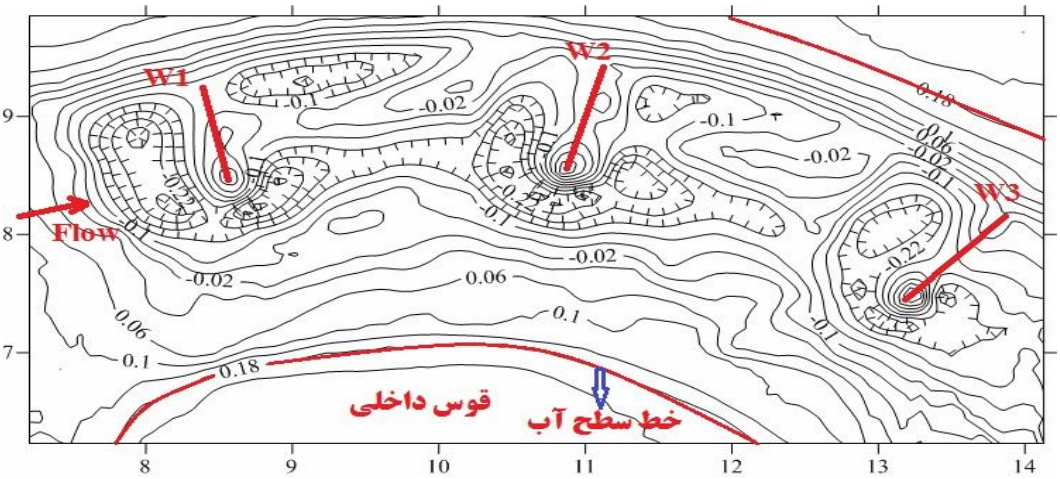
شکل ۷- تأثیر نسبت طول سازه‌ها بر نسبت سطح رسوبات دیواره خارجی قوس در دبی طراحی

به طور کلی می‌توان چنین نتیجه گرفت که سطح بی‌بعد رسوبات در سمت دیواره در نسبت بی‌بعد طول برابر با ۰/۴ بیشتر از ۰/۳ و آن هم بیشتر از ۰/۲ می‌باشد؛ زیرا با افزایش طول سرریزهای مستغرق، جریان غالب از سمت دیواره خارجی قوس دورتر می‌گردد و این امر باعث می‌گردد که سطح بیشتری از سمت دیواره خارجی قوس محافظت گردد.

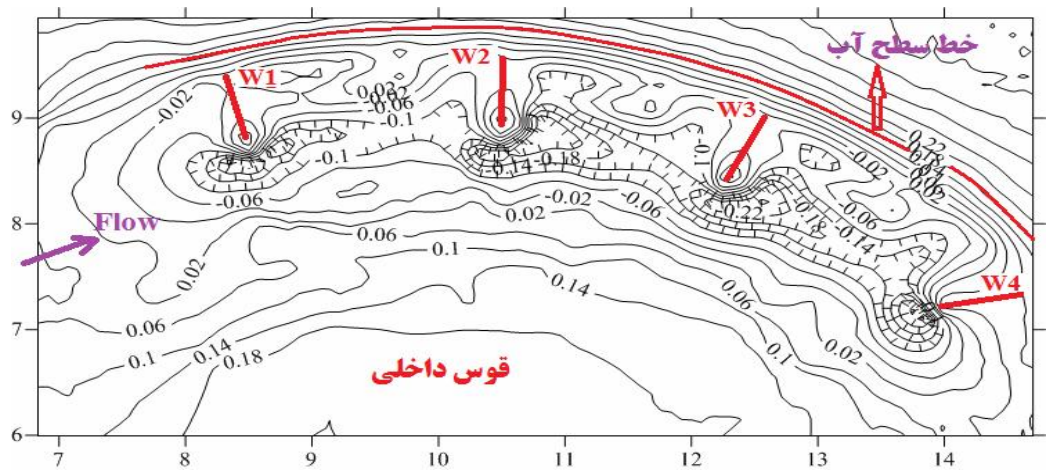
۳-۴- بررسی تأثیر طول سرریزهای مستغرق بر الگوی رسوب‌گذاری و فرسایش قوس مرکزی پیچان‌رود

با توجه به موارد اشاره شده در مطالب بالا، سه سری سازه در نسبت طول‌های متفاوت ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ به ترتیب به تعداد ۵، ۴ و ۳ سازه با زاویه ۹۰ درجه در قوس خارجی احداث گردیدند که نتایج مربوط به برداشت‌های توپوگرافی بستر در دبی طراحی در اشکال (۸) تا (۱۰) ارائه شده است. خط‌القعر آبراهه در این حالت در وسط کانال و در امتداد دماغه سازه‌ها شکل گرفته است. دور شدن خط‌القعر از سمت دیواره قوس خارجی و رسوبات موجود بین سازه‌ها بیانگر تأثیر این نسبت طول در کنترل فرسایش رسوبات سمت قوس خارجی می‌باشد (شکل (۸)). در نسبت بی‌بعد طول برابر با ۰/۳، ۴ عدد سازه در طول قوس خارجی احداث گردیدند. مقایسه نتایج نسبت طول ۰/۳ و ۰/۴ نشان می‌دهد که گستردگی آبشستگی در بالادست و اطراف دماغه سازه‌ها در نسبت طول ۰/۳ کمتر از حالت ۰/۴ می‌باشد.

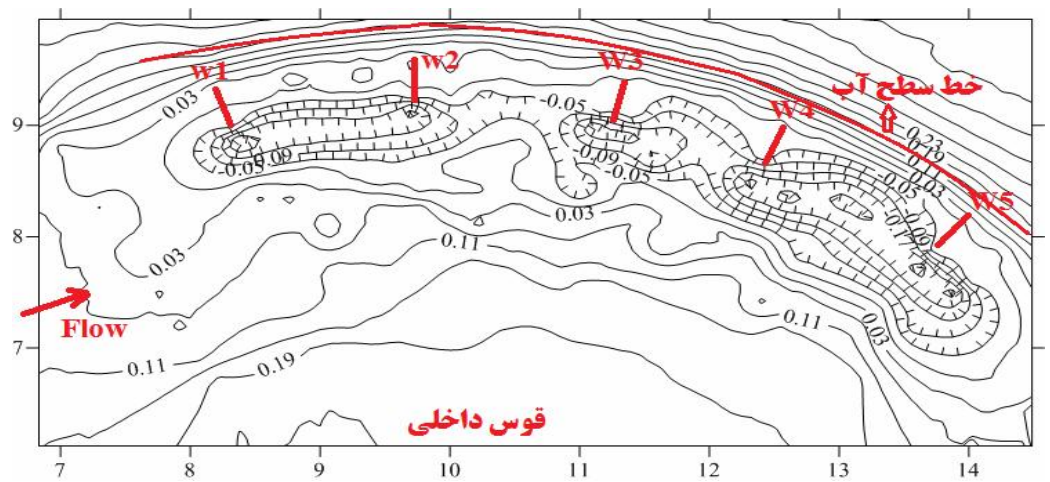
در اثر احداث سه سازه با نسبت طول برابر با ۰/۴ آب‌شستگی در بالادست و اطراف دماغه سازه‌ها اتفاق افتاده است که شدت فرسایش در بالادست سازه‌ها بیشتر از دماغه سازه‌ها می‌باشد.



شکل ۸- توپوگرافی الگوی رسوب و فرسایش بستر در اثر احداث سرریزهای مستغرق با نسبت طول برابر با ۰/۴ در دبی طراحی



شکل ۹- توپوگرافی الگوی رسوب و فرسایش بستر در اثر احداث سرریزهای مستغرق با نسبت طول برابر با ۰/۳ در دبی طراحی



شکل ۱۰- توپوگرافی الگوی رسوب و فرسایش بستر در اثر احداث سرریزهای مستغرق با نسبت طول برابر با ۰/۲ در دبی طراحی

علاوه بر آن، یک نوع آب‌شستگی دیگر نیز در پشت سازه‌ها و سمت دیواره قوس خارجی اتفاق افتاده است که آب‌شستگی پشت سازه اول بیشتر از سازه دومی می‌باشد. اما یک آب‌شستگی جزئی در سطح رسوبات بین سازه‌ها در نسبت ۰/۳ دیده می‌شود که ناچیز می‌باشد (شکل (۹)). اما در نسبت طول بی‌بعد برابر با ۰/۴، طول بیشتری از ساحل خارجی حفاظت می‌گردد و به همان نسبت از میزان تپه رسوبی در قوس داخلی شسته می‌شود. در حالتی که طول سازه‌ها ۲۰ درصد عرض سطح آب می‌باشد (تعداد ۵ عدد سازه)، از سازه سوم به بعد فرسایش بین سازه‌ها به دیواره خارجی قوس رسیده است و این نسبت طول عملکرد خوبی در کنترل فرسایش قوس خارجی نداشت (شکل (۱۰)). همچنین ابعاد تپه رسوبی موجود در قوس داخلی در این حالت بیشتر از حالت‌های ۴ و ۳ سازه‌ای می‌باشد. در این اشکال خطوط هاشور خورده مربوط به آبشستگی می‌باشند. در شکل (۸) سازه‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب در مقاطع ۴۳/۵، ۴۷/۵ و ۵۱/۱، در شکل (۹) سازه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب در مقاطع ۴۳/۵، ۴۶/۳، ۴۸/۷ و ۵۱/۱ و در شکل (۱۰) سازه‌های ۱ تا ۵ به ترتیب در مقاطع ۴۳/۵، ۴۵/۱، ۴۷/۴، ۴۸/۹ و ۵۰/۶ احداث گردیده‌اند. فاصله خطوط هم‌تراز ۰/۰۴ متر می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که:

- احداث سرریزهای مستغرق باعث افزایش قابل توجه تراز آب نمی‌گردند؛ به طوری که نسبت طول‌های ۰/۲ و ۰/۴ به ترتیب باعث کاهش و افزایش ۱ درصدی، تراز آب نسبت به حالت بدون سازه گردیدند و نسبت طول ۰/۳ تأثیری در افزایش یا کاهش تراز آب نداشت
- با افزایش نسبت طول سرریزها، نسبت شیب پروفیل عرضی سطح آب کاهش می‌یابد.
- با افزایش نسبت طول سرریزهای مستغرق، ابعاد طولی و عرضی چاله فرسایشی زیاد می‌گردند؛ به طوری که بیشترین مقدار طول و عرض چاله فرسایشی در نسبت طول ۰/۴ به ترتیب برابر با ۹۵ و ۸۰ درصد عرض سطح آب می‌باشند.
- نسبت سطح رسوبات در سمت قوس خارجی به سطح اولیه رسوبات، با افزایش نسبت طول، زیاد می‌گردد.
- تأثیر نسبت طول ۰/۴ در کنترل فرسایش قوس خارجی بیشتر از ۰/۳ و آن هم بیشتر از ۰/۲ می‌باشد.

۵- تشکر و قدردانی

بدین وسیله از دفتر تحقیقات و استاندارد شبکه‌های آبیاری و زهکشی سازمان آب و برق خوزستان به خاطر حمایت مالی و از مؤسسه تحقیقات آب تهران به خاطر فراهم آوردن شرایط انجام آزمایشات تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶- علائم و نمادها

A_o: سطح رسوب در مقطع صاف

A: سطح رسوبات موجود در سمت دیواره قوس خارجی در اثر احداث سرریزهای مستغرق

B: عرض سطح آب در دبی طراحی

S_{we}: شیب عرضی سطح آب با وجود سرریزهای مستغرق

$S_{no\text{-}we}$: شیب عرضی سطح آب بدون وجود سرریزهای مستغرق

del_EL: اختلاف تراز آب با وجود سازه‌ها و بدون وجود آن‌ها (مقادیر مثبت، افزایش تراز آب و مقادیر منفی، کاهش تراز آب را نسبت به حالت بدون سازه نشان می‌دهند).

X: طول چاله فرسایشی

Y: عرض چاله فرسایشی

۷- مراجع

[1] LaGasse, P. F., Byars, M. S., Zevenbergen, L. W., Clopper, P. E., "Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures: Experience, Selection, and Design Guidance". FHWA Hydraulic Engineering Circular No. 23, FHWA HI-97-030 HEC-23, 1997.

[2] Darrow, J.," Effects of Bendway Weir Characteristics on Resulting Flow Conditions", MSc Thesis, Colorado State University, 2004.

[3] Przedwojski, B., Blazejweske, R., Pilarczyd, K. W., "River Training Techniques", Rotterdam, Netherlands, A. A., Balkema, 1995, 625p.

[4] Watson, C. C., "Dikes, Dikes, Dikes. CE 610 Stream Restoration-Class Notes", Spring 2003, Colorado State University, Fort Collins, CO.

[5] Kozerski, H. P., Schwartz, R., "Tracerversuche in Den Buhnenfeldern Der Elbe", Leibnitz Institut fur Gewasserokologie und Binnenfisherei, Berlin, 2002.

[6] LaGrone, D. L., Remus II, J. I., "Nontraditional Erosion Control Projects Constructed on the Missouri River". International Water Resources Engineering

Conference, Part 1 of 2, Memphis, USA, 3-7 August, 1998, pp 399-404.

[7] Kinzli, K. Thornton, C., "Predicting Velocity in Bendway Weir Eddy Fields", River Research and Applications, 2009, Article in Press, DOI: 10.1002/rra. 1289.

[۸] مشکوری‌نیا، هـ، جراح‌زاده، ف.، رامش، س.، شفاعی بجستان، م.، "بررسی آزمایشگاهی تأثیر طول آبشکن مستغرق بر میزان آبشستگی بستر در خم ۹۰ درجه"، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۳۸۹.

[9] Hemmati, M., Ghomeshi, M., Kashefipour, S. M., Shafai Bejestan, M., Lanzoni, S., "Experimental Investigation of the Effects of Angle and Length of Bendway Weirs on Scouring and Sedimentation in a Meander River", Journal of American Science 2012, 8 (9), 912-917.

[10] Abad, J. D., Rhoads, B. L., Guneralp, I., Garcia, M. H. "Flow Structure at Different Stages in a Meander-Bend with Bendway Weirs", ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 2008, (8), 1052-1063.

[۱۱] جعفرزاده، م. ر.، "کتاب مکانیک رودخانه"، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۷.

[12] Shields F. D., Jr, Knight S. S., Cooper C. M., "Addition of Spurs to Stone Toe Protection for Warm Water Fish Habitat", Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34, 1427-1436.

[۱۳] ابوالقاسمی، م.، "کنترل رسوب ورودی به آبگیر در پیچان‌رود"، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۵.