بررسی آزمایشگاهی توپوگرافی بستر رسوبی در خم ۹۰ درجه ملایم در حضور صفحات مثلثی متصل به ساحل

پردیس بدری[۱*]، محمود شفاعی بجستان[۲]، سید محمود کاشفی پور[۳] و محمد بهرامی یاراحمدی[۴]

۱*- نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

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

۳- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۴- دانشجوی دکتری سازه های آبی- دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۹۳/۳/۲۴ تاریخ پذیرش: ۹۳/۷/۲۲

چکیده

در مقاله حاضر صفحات متصل به ساحل مثلثی شکل با هدف معرفی روشی جدید برای کمک به افزایش پایداری ساحل و کاهش نرخ فرسایش در ساحل بیرونی خم مورد بررسی قرارگرفته است. آزمایش‌ها در یک خم ۹۰ درجه ملایم با نسبت شعاع قوس به عرض رودخانه برابر چهار انجام پذیرفت. تعداد نه صفحه متصل به ساحل مثلثی شکل در فاصله طولی ثابت ۷۰ سانتی‌متر معادل پنج برابر طول مؤثر صفحه و زاویه ۲۰ درجه نسبت به ساحل بالادست برای انجام آزمایش‌های اصلی و نه عدد صفحه متصل به ساحل مستطیلی شکل برای انجام آزمایش شاهد به کار رفت. آزمایش‌های اصلی با اعداد فرود ۰/۲٤،۰/۲٦،۰/۲۹و۰/۳۲ و آزمایش شاهد با عدد فرود ۰/۲٦ انجام پذیرفت. نتایج نشان داد که با افزایش عدد فرود در هر مرحله عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. از مقایسه آزمایش‌ها در حضور صفحات مثلثی و مستطیلی نیز مشخص شد که عمق آبشستگی صفحات مثلثی۸۰ درصد کمتر از صفحات مستطیلی است.

کلید واژه ها : صفحات متصل به ساحل، قوس ۹۰درجه، عدد فرود، عمق آبشستگی.

Experimental Investigation of Bed Topography of A 90 Degree Mild Bend With Triangular Vane Attached to The Bank

P. Badri[1*], M. Shafai Bejestan[2],S.M. Kashefipoor[3] and M. Bahrami Yarahmadi[4]

1*- M.Sc. Student of Water Structures, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz

2- M.Sc. Student of Water Structures, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz

3- M.Sc. Student of Water Structures, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz

4- Ph.D. Student, Department of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz.

Received:14 June 2014 Accepted:14 October 2014

Abstract

In the present paper the Triangular Shape Vane (TSV) attached to the bank of a flume bend for the purpose of introducing a new measure for reducing bank erosion has been experimentally investigated. Tests carried out at 90-degree mild flume with ratio of radius to width equal to 4. For main tests, nine triangular vanes with fixed distance of 70cm equal to 5 times the effective vane length at angle of 20 degree to the upstream was attached to the outer bank and tested under four different flow conditions of which Froude number was equal to o.24, 0.26, 0.29 and 0.32. Tests also were carried out using regular Rectangular Shape Vanes(RSV) for Froude number equal to 0.26. At the end of each test, bed topography was measured. Plots of bed topography and longitude bed profile show that the scour hole at the noise of both vanes are developed with its maximum depth increases as the flow conditions is increased.

Comparison of the scour depth for both TSV and RSV proved that the scour depth for TSV are 80% less than the scour depth of RSV.

Keywords: Vane attached to the bank , 90° bend, Froude number, Scour depth.

مقدمه

در تمام دوران زندگی بشر رودخانه‌ها نقش مهمی را در جوامع بشری ایفاء نموده‌اند. یکی از مهم‌ترین اهداف مهندسان رودخانه فراهم نمودن شرایطی است که ضمن بهره‌برداری بهینه از منابع رودخانه، حفاظت لازم را در مقابل مخاطرات احتمالی فراهم آورند. نیروی گریز از مرکز ایجاد شده در قوس‌ها باعث جریان ثانویه‌ای می‌شود که به جریان چرخشی عرضی یا حلزونی نیز معروف است. نیروی گریز از مرکز خود در اثر شتاب گریز از مرکز به وجود آمده در طول خط عمودی جریان، به دلیل توزیع غیریکنواخت سرعت جریان در جهت قائم، به وجود می‌آید. بدین ترتیب که نیروی گریز از مرکز باعث می‌شود تا لایه‌های سطحی جریان که سرعت طولی بیشتری دارند به قوس خارجی رانده شوند در حالی‌که لایه‌های پایینی جریان که سرعت طولی کمتری دارند به سمت قوس داخلی رانده می‌شوند افزایش سرعت در قوس خارجی باعث افزایش شدت فرسایش در ساحل خارجی و در نهایت ریزش ساحل می‌شود(شفاعی بجستان،۱۳۹۱). روش‌های حفاظت سواحل به دو دسته کلی تقسیم می‌شود که عبارتند از حفاظت مستقیم که به طور مستقیم بر روی طول مشخصی از کناره رودخانه انجام می‌شود مانند دیواره ساحلی و حفاظت غیرمستقیم که در درون رودخانه‌ها و با هدف کاهش نیروی فرسایشی جریان از طریق اصلاح الگوی جریان در قوس‌ها صورت می‌پذیرد مانند استفاده از انواع آبشکن‌ها، صفحات مستغرق و صفحات متصل به ساحل (جراح زاده و شفاعی بجستان،۱۳۹۱).در تحقیق حاضر صفحات متصل به ساحل مثلثی با هدف کنترل فرسایش دیواره خارجی قوس با استفاده از روش منحرف کردن جریان رودخانه و کاهش سرعت جریان در نزدیکی ساحل مورد بررسی قرارگرفت. صفحات مثلثی، سازه‌های نسبتاً جدید برای کنترل فرسایش قوس خارجی در رودخانه‌های مئاندری هستند، این صفحات مثلثی شکل می‌باشند که معمولا با زاویه کم (۲۰ الی ۳۰ درجه) نسبت به ساحل بالادست نصب می‌شوند. این صفحات به صورت شیبدار از تراز دشت سیلابی در ساحل تا بستر جریان قرار دارند به گونه‌ای که نوک آنها حتی برای جریان‌های کم نیز مستغرق می‌باشند. فرض بر این است که این سازه‌ها جریان‌های ثانوی را کاهش داده و جهت جریان را که از روی آن‌ها می‌گذرد به صورت عمود بر موقعیت سازه تغییر می‌دهند. بدین ترتیب الگوی عمومی جریان در خم را تغییر داده که در نتیجه‌ی آن سرعت جریان در نزدیک ساحل خارجی کاهش می‌یابد و منطقه تجمع خطوط جریان از محل قوس خارجی به سمت مرکز هدایت می‌شود. توزیع مجدد سرعت در نهایت باعث خواهد شد تا خط‌القعر رودخانه از محل پنجه‌ی ساحل به وسط رودخانه منتقل شود. صفحات متصل به ساحل همانند آبشکن‌ها از جمله سازه‌هایی هستند که با اصلاح الگوی جریان در قوس رودخانه‌ها باعث کاهش و کنترل فرسایش در قوس بیرونی رودخانه ها می‌شوند. آبشکن‌ها سازه‌هایی هستند که معمولا به صورت غیر مستغرق، مستقیم و با زاویه ۹۰ درجه نسبت به ساحل بالادست استفاده می‌شوند. این صفحات هم‌چنین مانند آبشکن‌ها جریان را از سواحل به طرف مرکز رودخانه هدایت می‌کنند و با کاهش سرعت جریان در ساحل سبب حفاظت ساحل از فرسایش شده و با افزایش سرعت و قدرت جریان در مرکز رودخانه باعث آبشستگی مرکز خواهند شد(بهرامی‌یاراحمدی و همکاران،۱۳۹۲). در سال‌های اخیر تحقیقات مختلفی پیرامون جریان در قوس به شرح زیر انجام شده است.

تائبی و همکاران (۱۳۸۸) ، به شبیه‌سازی عددی جریان در قوس ۹۰ درجه با استفاده از مدل CCHE2D پرداختند. کانال مورد مطالعه شامل یک مسیر مستقیم در بالادست قوس با طول چهار متر و یک مسیر مستقیم در پایین‌دست قوس با طول دو متر می‌باشد. شعاع مرکزی قوس (R) ۸۰ سانتی‌متر، عرض فلوم ۴۰ سانتی‌متر، ارتفاع فلوم ۶۰ سانتی‌متر و مقطع کانال مستطیلی می باشد. با توجه به نسبت ($\frac{R}{W}$) برابر با دو، قوس شبیه سازی شده جزء قوس‌های تند به حساب می‌آید. بررسی تغییرات سرعت در طول کانال نشان داد که با عبور جریان از ورودی قوس، موقعیت حداکثر سرعت در مقاطع عرضی به نزدیک جداره داخلی کشیده می‌شود. مسجدی و همکاران(۲۰۱۱) به بررسی آزمایشگاهی آبشستگی در آبشکن L شکل در قوس ۱۸۰ درجه با شرایط آب زلال پرداختند. آنها آزمایش‌های خود را با اعداد فرود ۰/۲۳، ۰/۲۵، ۰/۲۸ و ۰/۳۵ انجام دادند. آبشکن ها با طولی برابر (۱۰ ،۱۵ ، ۲۰ و ۲۵ درصد) و در ۳۰ ، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه از قوس مستقر شد. نتایج حاصل نشان داد، عمق آبشستگی با افزایش زمان، افزایش می‌یابد. عمق آبشستگی با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد. افزایش طول آبشکن، حداکثر عمق آبشستگی را افزایش می‌دهد. قدسیان و واقفی(۲۰۰۹) با تغییر دادن طول بال آبشکن و عدد فرود جریان به بررسی میدان جریان و آبشستگی اطراف آبشکن‌های L شکل در یک قوس ملایم ۹۰ درجه پرداختند. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که با قراردهی آبشکن در موقعیت‌های مختلف یک گردابه در خلاف جهت عقربه‌های ساعت در بالادست و یکی در پایین‌دست آبشکن ظاهر می‌شود هم‌چنین افزایش طول بال آبشکن‌ها سبب افزایش طول ناحیه‌ی جدایی جریان و افزایش اندازه گردابه‌های ایجاد شده می‌گردد. فان دن هیور[1] (۲۰۱۳) با انجام یک تحقیق آزمایشگاهی و استفاده از مدل CCHE2D به

1 -Van Den Heever

بررسی فرسایش و رسوب‌گذاری و هیدرولیک جریان در مدل آزمایشگاهی ساخته شده از رودخانه‌های مئاندری در آفریقای جنوبی پرداخت. متغیرهای مورد مطالعه وی طول، فاصله و زاویه قرارگیری آبشکن‌ها بود. از نتایج تحقیق وی می‌توان به گزارش ایجاد یک ناحیه‌ی کم سرعت بین آبشکن‌ها اشاره کرد که رسوب‌گذاری در این ناحیه صورت می‌گیرد. با افزایش فاصله‌ی آبشکن‌ها سرعت بین آبشکن‌ها افزایش می‌یابد که این افزایش سرعت سبب تغییر در الگوی رسوب‌گذاری بین آبشکن‌ها می‌شود. واقفی و همکاران (۱۳۸۸) به بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان سه بعدی حول آبشکن T شکل در قوس ۹۰ درجه با بستر صلب و متحرک پرداخت و نتیجه گرفت جریان‌های بازگشتی در بالادست و پایین‌دست آبشکن با بستر صلب و تعادل یافته شکل می‌گیرد و این جریان‌ها در پایین‌دست تا فاصله بیشتری از ساحل خارجی نسبت به بالادست تشکیل می‌شود. فضلی و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی آزمایشگاهی آبشستگی و میدان جریان اطراف آبشکن در قوس ۹۰ درجه ملایم پرداختند. از رسوبات یکنواخت برای کف فلوم استفاده شد. آزمایش‌ها برای محل‌های نصب مختلف و طول‌های متفاوت آبشکن با چندین دبی انجام پذیرفت. نتایج به‌دست آمده از مطالعه میدان جریان سه‌بعدی اطراف آبشکن نشان داد که حداکثر عمق آبشستگی به عدد فرود، طول آبشکن و محل قرارگیری آبشکن وابسته است. با افزایش طول آبشکن عمق آبشستگی نیز افزایش می‌یابد. در زمینه استفاده از صفحات متصل به ساحل مثلثی در قوس رودخانه‌ها تاکنون تحقیقات کمی انجام گرفته‌است. بویان و همکاران[۲] (۲۰۱۰) در یک تحقیق آزمایشگاهی برای کنترل فرسایش انحنای رودخانه از صفحات متصل به ساحل استفاده کردند. آزمایش‌ها در یک فلوم سینوسی به عرض ۱/۶ متر و سینوسیته ۱/۳۸ با بستر متحرک انجام شد شیب‌های جانبی فلوم ۴۵ درجه بودند و به طرف راس قوس شیب جانبی ساحل خارجی به حالت قائم نزدیک می‌شد. آن‌ها از صفحاتی به شکل مثلث در آزمایش‌های خود استفاده کردند. در همه آزمایش‌ها از رسوبات در اندازه‌های ۰/۰۶ میلی‌متر (d_{85} =۳ میلی‌متر و d_{50}=۱/۵ میلی‌متر) استفاده شد. نتایج نشان داد که وقتی یک و یا گروهی از صفحات به ساحل نصب می‌شوند چاله فرسایشی در بستر ساحل خارجی پر می‌شود و خط‌القعر به طرف مرکز رودخانه انتقال داده می‌شود. صفحات یک سلول جریان ثانویه ایجاد می‌کنند که جریان حلزونی در قوس را خنثی می‌کند. صفحاتی که ارتفاع آن‌ها به اندازه تراز لبریز جریان می‌باشند نسبت به صفحاتی که ارتفاع آن‌ها به اندازه نصف تراز لبریز جریان می‌باشند، عملکرد بهتری نشان دادند. این سازه‌ها جریان‌های ثانوی را کاهش می‌دهند و جهت جریانی را که از روی آن‌ها می‌گذرد به صورت عمود بر موقعیت سرریز تغییر می‌دهند. بدین ترتیب الگوی عمومی جریان در خم را تغییر داده، که در نتیجه آن سرعت جریان در نزدیک ساحل خارجی کاهش یافته، منطقه تجمع خطوط جریان از محل قوس خارجی به سمت مرکز هدایت می‌شود. توزیع مجدد سرعت در نهایت باعث خواهد شد تا خط‌القعر رودخانه از محل پنجه ساحل به وسط رودخانه منتقل شود. بهرامی یاراحمدی و همکاران(۱۳۹۲) در یک تحقیق به مقایسه عملکرد آبشکن‌ها و صفحات متصل به ساحل به عنوان سازه‌های اصلاح کننده الگوی جریان در یک فلوم قوسی ۹۰ درجه ملایم به ازای اعداد فرود مختلف پرداختند. نتایج نشان داد که به طور متوسط حداکثر عمق آبشستگی، حجم رسوب فرسایش یافته و سطح تخریب شده‌ی صفحه متصل به ساحل به ترتیب ۵۰، ۴۵ و ۵۱ درصد نسبت به آبشکن‌ها کاهش پیدا کرده‌است. با توجه به اینکه تاکنون تحقیقات محدودی در رابطه با عملکرد این صفحات انجام پذیرفته‌است مطالعه حاضر به بررسی آزمایشگاهی تأثیر شرایط جریان بر وضعیت خط‌القعر در قوس ۹۰ درجه ملایم در این سری آزمایش‌ها می‌پردازد.

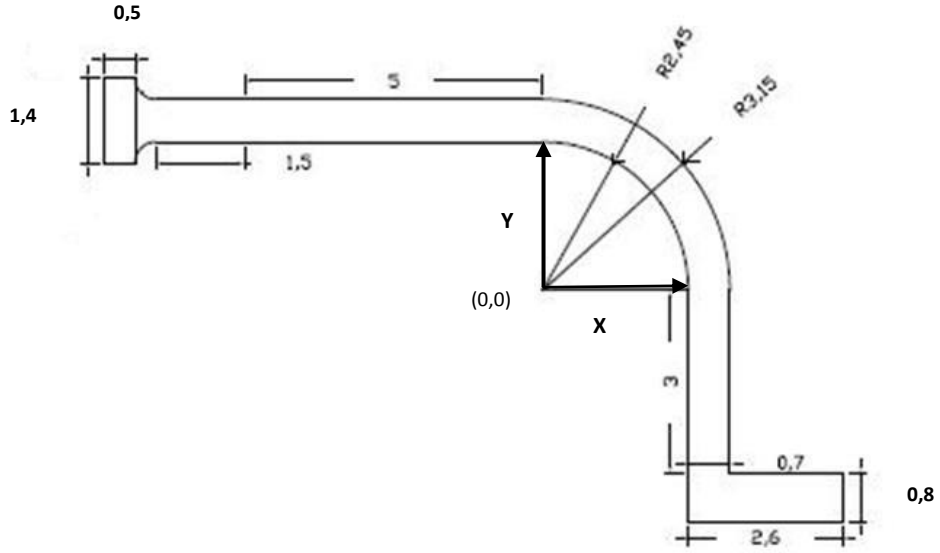
مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مورد نظر برای تحقق اهداف این تحقیق در فلوم آزمایشگاهی با قوس ۹۰ درجه ملایم درآزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز صورت پذیرفت.(شکل۱)

طول مسیر مستقیم ورودی برابر پنج متر و مسیر مستقیم خروجی برابر سه متر می‌باشد. جنس کف آن از آهن گالوانیزه و جداره‌های بخش مستقیم از شیشه به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و قسمت قوس نیز از جنس ورقه‌های پلکسی‌گلاس به ضخامت ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. فلوم مورد نظر دارای قوس ۹۰ درجه ملایم با نسبت شعاع به عرض $\left(R/B=4\right)$ می‌باشد. طول دیواره‌های خارجی و داخلی قوس به ترتیب ۴/۹۵ و ۳/۸۵ متر بوده‌است. عرض فلوم ۷۰ سانتی‌متر بوده که شعاع داخلی و خارجی قوس آن به ترتیب ۲/۴۵ متر و ۳/۱۵ متر می‌باشد. ارتفاع فلوم ۵۰ سانتی‌متر و ضخامت رسوب در کف فلوم ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. از رسوبات یکنواخت به قطر d_{50}=۱/۴۹ میلی‌متر و ضریب انحراف معیار هندسی معادل ۱/۲۲ استفاده شد. در این فلوم برای تنظیم عمق آب ثابت ۱۳ سانتی‌متر از دریچه کشویی در انتهای فلوم و برای تنظیم دبی از دبی‌سنج دیجیتال اولتراسونیک مدل Digi sonic E+ استفاده شد. در این تحقیق از صفحات متصل به ساحل مثلثی شکل از جنس پلکسی‌گلاس به ضخامت چهار میلی‌متر به طول ۱۴۲سانتی‌متر و ارتفاع ۳۳/۵ سانتی‌متر و صفحات مستطیلی شکل از جنس پلکسی‌گلاس به ضخامت چهار میلی‌متر به طول ۵۳ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۵ سانتی‌متر با طول مؤثر ۱۴ سانتی-متر(L) معادل یک پنجم عرض فلوم(w/5) استفاده شد، منظور از طول مؤثر صفحات طول عمود بر ساحل آن‌ها می‌باشد. ارتفاع صفحات مثلثی به‌گونه‌ای انتخاب شد که تراز بالایی صفحه با سطح آب برابر باشد و طول صفحات نیز به‌گونه‌ای در نظر گرفته شد که به ازای زاویه ۲۰ درجه طول مؤثر صفحه ۱۴ سانتی‌متر باشد. فاصله بین صفحات نیز۷۰ سانتی‌متر (5L) و زاویه نصب

2- Bhuiyan *et al.*

نسبت به ساحل بالادست ۲۰ درجه در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها با چهار دبی مختلف ۲۵ ،۲۷، ۳۰ و ۳۳ لیتر بر ثانیه (به ترتیب متناظر با اعداد فرود ۰/۲۴، ۰/۲۶، ۰/۲۹ و ۰/۳۲) انجام شد. اولین صفحه در درون قوس و در فاصله پنج سانتی‌متر از ابتدای قوس نصب شد. محل قرارگیری سایر صفحات نسبت به اولین صفحه به دست آمد. در شکل (۲) نحوه نصب صفحات به دیواره خارجی فلوم نشان داده شده است.



شکل ۱- پلان فلوم مورد استفاده در آزمایش‌ها



شکل ۲- نحوه نصب صفحات به ساحل خارجی در عدد فرود ۰/۲٤

پس از نصب صفحات مثلثی به دیواره خارجی فلوم، تسطیح و تراز سطح رسوب صورت گرفت. سپس به منظور تأمین دبی به آرامی شیر کشویی را باز کرده تا آب درون مخزن ورودی فلوم به آرامی بالا بیاید. در ابتدا باید سرعت حرکت آب کم باشد تا قبل از آماده شدن شرایط آزمایش، فرسایشی اتفاق نیفتد. هنگامی که آب به دبی مورد نظر رسید کمی صبر کرده تا ارتفاع آب ثابت گردد. سپس به وسیله دریچه کشویی ارتفاع آب را به ۱۳ سانتی‌متری از سطح رسوب رسانیده (ارتفاع آب ۱۳ سانتی‌متر ثابت برابر با تراز بالایی صفحات در نظر گرفته شد)، و در طی زمان انجام آزمایش(۱۸۰ دقیقه) با استفاده از دریچه کشویی تراز سطح آب به صورت پیوسته کنترل می‌گردید. در این تحقیق چون هدف مقایسه تغییرات توپوگرافی بستر در قوس ۹۰ درجه ملایم بوده‌است بنابراین زمان انجام هر آزمایش ۱۸۰ دقیقه در نظر گرفته شد. بعد از اتمام زمان ۱۸۰ دقیقه، با بستن هم‌زمان شیر ورودی و دریچه کشویی و باز کردن شیر زهکشی تعبیه شده در کف فلوم سطح آب به آرامی افت می‌کند. پس از تخلیه کامل آب از درون فلوم برداشت توپوگرافی بستر با استفاده از دستگاه سنجش توپوگرافی بستر مدل adelan tech، با دقت یک میلی‌متر در طول، یک میلی‌متر در عرض و ۰/۴ میلی‌متر در عمق صورت گرفت. برای افزایش دقت داده‌برداری در اطراف سازه‌ها فاصله مقاطع مورد اندازه‌گیری کم انتخاب شد.

نتایج و بحث

همان‌گونه که پیشتر ذکر شد این پژوهش با هدف بررسی تأثیر شرایط جریان بر توپوگرافی بستر رسوبی در حضور صفحات متصل به ساحل مثلثی و مقایسه نتایج آن با صفحات مستطیلی که در بیشتر تحقیقات گذشته به عنوان آبشکن مورد مطالعه قرار گرفته است انجام پذیرفت. پس از برداشت نزدیک به ۱۰۰ مقطع عرضی توسط دستگاه سنجش توپوگرافی بستر در هر آزمایش اقدام به رسم توپوگرافی بستر رسوبی پس از وقوع آبشستگی در برنامه سورفر شد و سپس نتایج با هم مقایسه گردید.

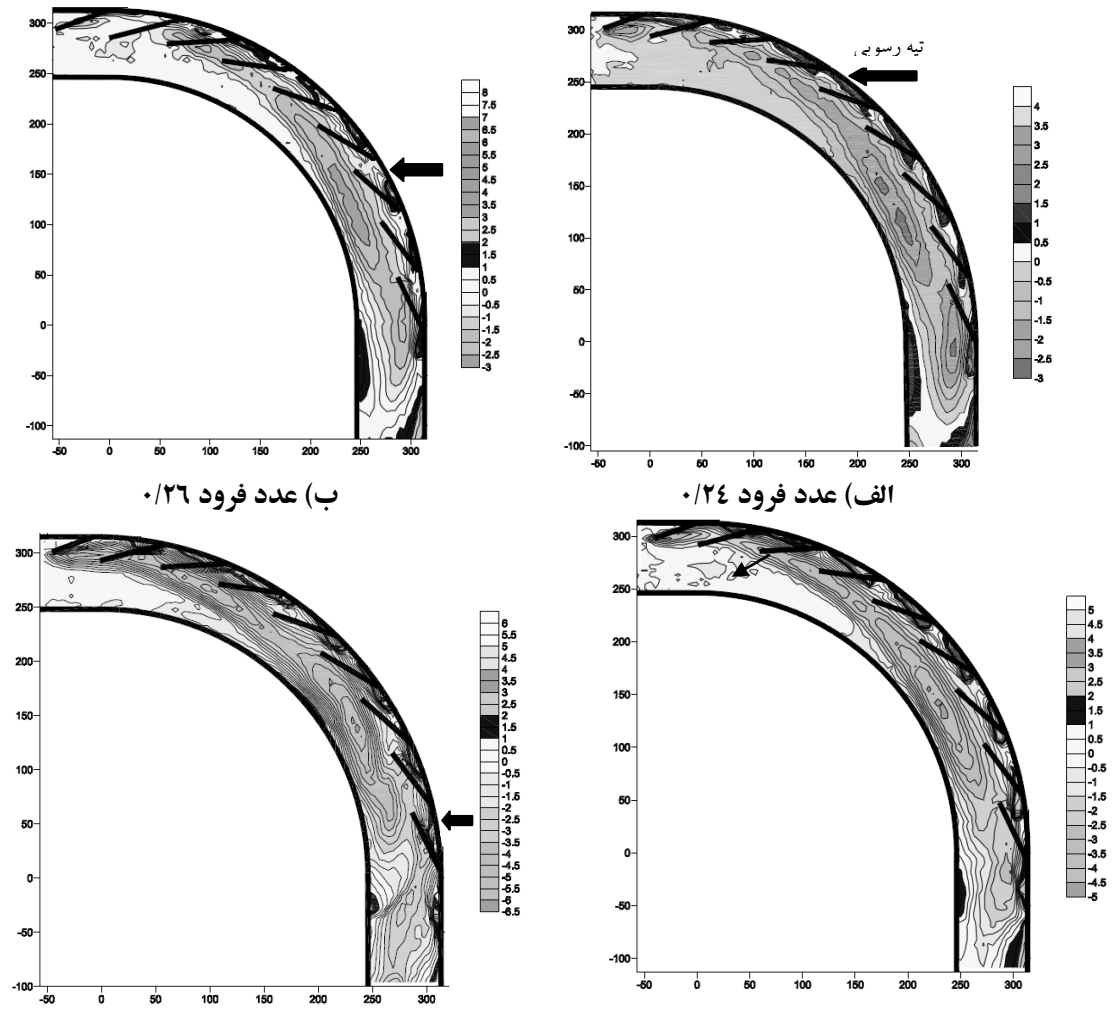
بررسی توپوگرافی بستر

در شکل (۳) توپوگرافی بستر رسوبی پس از وقوع آبشستگی برای چهار عدد فرود مذکور به تفکیک رسم شده است.

شکل(۳- الف) توپوگرافی بستر رسوبی را پس از آزمایش در شرایط حداقل جریان (دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه و عدد فرود ۰/۲۴) نشان می‌دهد. فرسایش بستر از ابتدای قوس در فاصله دورتری از ساحل خارجی شروع شده‌است و تا انتهای قوس ادامه دارد در واقع در ساحل خارجی همان‌طور که دیده می‌شود فرسایش رخ نداده‌است. حداکثر گودال فرسایشی در میانه‌ی قوس و در فاصله ۴/۵ متری از ابتدای فلوم (زاویه ۶۸ درجه) قرار دارد که عمیق‌ترین قسمت این گودال از ساحل خارجی ۳/۲ برابر طول مؤثر صفحه (۴۵ سانتی‌متر) فاصله دارد. به طور کلی بیشینه‌ی اعماق آبشستگی حدفاصل صفحات دوم تا نهم در نواحی مرکزی فلوم رخ داده‌است که منجر به ایجاد خط‌القعر شده‌است. هم‌چنین در اطراف دماغه صفحات نیز فرسایش رخ داده‌است که بیشترین آبشستگی در صفحه شماره یک از ابتدای فلوم به میزان ۰/۱۹ عمق جریان بوده‌است. رسوبات فرسایش یافته از بالادست هر صفحه در پشت اکثر صفحات و بین آنها نهشته شده‌است و جزایری را تشکیل داده‌اند به طوری‌که حداکثر ارتفاع تپه رسوبی به میزان ۰/۳۲ عمق جریان و در پایین‌دست صفحه شماره چهار اتفاق افتاده است که این امر منجر به ساحل‌سازی بین صفحات شده‌است.

شکل(۳- ب) توپوگرافی بستر رسوبی را پس از آزمایش در شرایط جریان (دبی ۲۷ لیتر بر ثانیه و عدد فرود ۰/۲۶) نشان می‌دهد. همانند حالت قبل فرسایش بستر از ابتدای قوس با فاصله از ساحل خارجی شروع شده‌است و تا انتهای قوس ادامه دارد در واقع در ساحل خارجی همان‌طور که دیده می‌شود فرسایش رخ نداده‌است. حداکثر گودال فرسایشی در میانه‌ی قوس و در فاصله ۴/۷ متری از ابتدای فلوم (زاویه ۷۱ درجه) قرار دارد که عمیق‌ترین قسمت این گودال از ساحل خارجی ۳/۳ برابر طول مؤثر صفحه (۴۷ سانتی‌متر) فاصله دارد. به طور کلی بیشینه‌ی اعماق آبشستگی حدفاصل صفحات دوم تا نهم در نواحی مرکزی فلوم رخ داده‌است که منجر به ایجاد خط‌القعر شده‌است. هم‌چنین در اطراف دماغه صفحات نیز فرسایش رخ داده‌است که بیشترین آبشستگی در صفحه شماره یک از ابتدای فلوم به میزان ۰/۱۵ عمق جریان بوده است. رسوبات فرسایش یافته از بالادست هر صفحه در پشت اکثر صفحات و بین آنها نهشته شده‌است و جزایری را تشکیل داده‌اند به طوری‌که حداکثر ارتفاع تپه رسوبی به میزان ۰/۳ عمق جریان و در پایین‌دست صفحه شماره شش اتفاق افتاده‌است (روی شکل با فلش مشخص شده است) که این امر منجر به ساحل سازی بین صفحات شده‌است.

شکل(۳- ج) توپوگرافی بستر رسوبی را پس از آزمایش در شرایط جریان (دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و عدد فرود ۰/۲۹) نشان می‌دهد. همانند حالت‌های قبل فرسایش بستر از ابتدای قوس شروع شده‌است و تا انتهای قوس ادامه دارد گرچه محل وقوع این فرسایش به ساحل خارجی نزدیک شده‌است اما وجود صفحات مانع رسیدن فرسایش به ساحل خارجی شده‌است در واقع ساحل خارجی همان‌طور که دیده می‌شود از فرسایش حفظ شده‌است. حداکثر گودال فرسایشی در میانه‌ی قوس و در فاصله ۴/۲ متری از ابتدای فلوم (زاویه ۶۳ درجه) قرار دارد که عمیق‌ترین قسمت این گودال از ساحل خارجی ۳/۵ برابر طول مؤثر صفحه (۴۹ سانتی‌متر) فاصله دارد. به طور کلی بیشینه‌ی اعماق آبشستگی حدفاصل صفحات اول تا نهم در نواحی مرکزی فلوم رخ داده‌است که منجر به ایجاد خط‌القعر شده‌است. هم‌چنین در اطراف دماغه صفحات نیز فرسایش رخ داده‌است که بیشترین آبشستگی در صفحه شماره یک از ابتدای فلوم به میزان ۰/۳ عمق جریان بوده‌است. رسوبات فرسایش یافته از بالادست هر صفحه در پشت اکثر صفحات و بین آنها نهشته شده‌است و جزایری را تشکیل داده‌اند به طوری‌که حداکثر ارتفاع تپه رسوبی به میزان ۰/۴ عمق جریان و در پایین‌دست صفحه شماره یک اتفاق افتاده‌است که این امر منجر به ساحل‌سازی بین صفحات شده است.

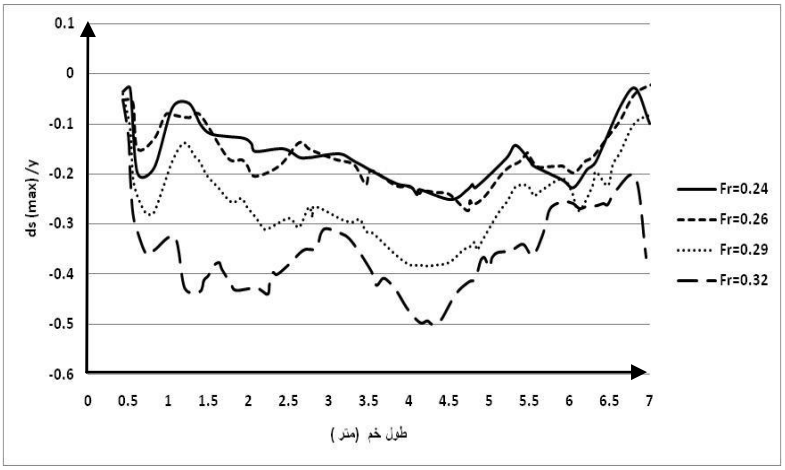


شکل ۳- توپوگرافی بستررسوبی در حضور صفحات مثلثی

شکل(۳- د) توپوگرافی بستر رسوبی را پس از آزمایش در شرایط جریان (دبی ۳۳ لیتر بر ثانیه و عدد فرود ۰/۳۲) نشان می‌دهد. همانند حالت‌های قبل فرسایش بستر از ابتدای قوس شروع شده‌است و تا انتهای قوس ادامه دارد گرچه محل وقوع این فرسایش به ساحل خارجی نزدیک شده‌است اما وجود صفحات مانع رسیدن فرسایش به ساحل خارجی شده است در واقع ساحل خارجی از فرسایش حفظ شده‌است. حداکثر گودال فرسایشی در میانه‌ی قوس و در فاصله ۴/۲۸ متری از ابتدای فلوم (زاویه ۶۴ درجه) قرار دارد که عمیق‌ترین قسمت این گودال از ساحل خارجی ۳/۵ برابر طول مؤثر صفحه (۵۰ سانتی‌متر) فاصله دارد. به طور کلی بیشینه‌ی اعماق آبشستگی حدفاصل صفحات اول تا نهم در نواحی مرکزی فلوم رخ داده‌است که منجر به ایجاد خط‌القعر شده‌است. هم‌چنین در اطراف دماغه صفحات نیز فرسایش رخ داده‌است که بیشترین آبشستگی در صفحه شماره یک از ابتدای فلوم به میزان ۰/۴ عمق جریان بوده‌است. رسوبات فرسایش یافته از بالادست هر صفحه در پشت اکثر صفحات و بین آنها نهشته شده‌است و جزایری را تشکیل داده‌اند به طوری‌که حداکثر ارتفاع تپه رسوبی به میزان ۰/۵۱ عمق جریان و در پایین‌دست صفحه شماره هشت اتفاق افتاده‌است که این امر منجر به ساحل سازی بین صفحات شده است.

پروفیل های طولی

در مرحله بعد برای تعیین محل وقوع بیشترین عمق آبشستگی در هر آزمایش اقدام به رسم پروفیل‌های طولی حداکثر اعماق آبشستگی در طول فلوم به شکل بی‌بعد شده‌است به‌طوری‌که محور افقی طول خم بر حسب متر و محور عمودی نسبت عمق آبشستگی به عمق متوسط جریان (ds/y) است. این نمودارها در شکل (۴) آورده شده است.



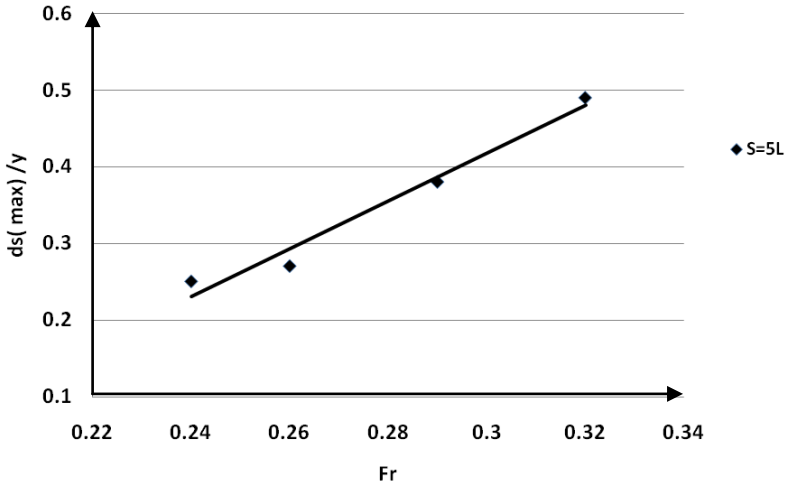
شکل ٤- پروفیل های طولی حداکثر اعماق آبشستگی در طول فلوم (خط‌القعر)

جدول۱- نتایج حاصل از بررسی پروفیل های طولی

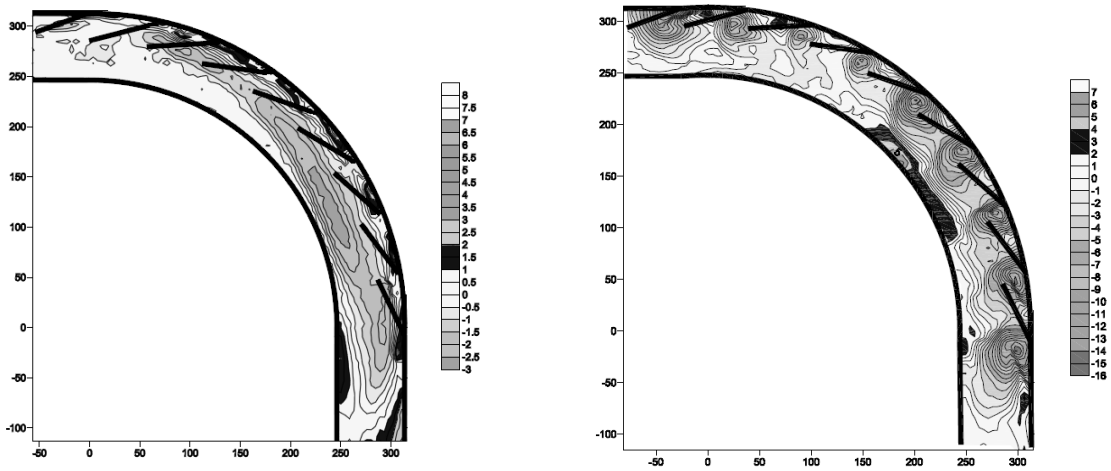
فاصله بین صفحات (cm)	دبی (l/s)	عدد فرود	حداکثر عمق آبشستگی (cm)	نسبت حداکثر عمق آبشستگی به عمق ثابت جریان (ds/y)	محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی نسبت به ابتدای فلوم (m)	نسبت فاصله محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی از ساحل خارجی به طول موثر صفحه (s/l)
۷۰	۲۵	۰,۲۴	۳,۲۶	۰,۲۵	۴,۵	۳,۲
۷۰	۲۷	۰,۲۶	۳,۵۵	۰,۲۷	۴,۷	۳,۳
۷۰	۳۰	۰,۲۹	۴,۹۹	۰,۳۸	۴,۲	۳,۵
۷۰	۳۳	۰,۳۲	۶,۴۹	۰,۴۹	۴,۲۸	۳,۵

در هر چهار نمودار ترسیم شده در شکل (۴) در ابتدای نمودار (فاصله ۰/۵ متری روی محور افقی) یک کاهش ناگهانی شیب وجود دارد که این نقطه مربوط به محل دماغه اولین صفحه است (واقع در مسیر مستقیم ورودی فلوم) که علت این نزول ناگهانی برخورد جریان به اولین صفحه و وقوع ناگهانی آبشستگی در این محل است پس از آن نمودارها یک سیر صعودی تقریباً یکنواخت را دارند. براساس نمودارهای ترسیم شده در شکل (۴) بیشینه‌ی عمق آبشستگی در هر پروفیل طولی بین ۴ تا ۵ متری از ابتدای فلوم (بین زوایای ۶۰/۵ درجه و ۷۵/۶ درجه) اتفاق افتاده‌است و در تمامی حالت‌ها این بیشینه‌ی عمق آبشستگی به طور متوسط در فاصله ۳/۳ برابر طول مؤثر صفحه (۳/۳L) از ساحل خارجی که مربوط به ناحیه مرکزی فلوم می باشد رخ داده‌است. به طور کلی در کلیه پروفیل‌های طولی مربوط به خط‌القعر (به استثنای صفحه‌ی اول که در ابتدای خم نصب شده‌است) با ورود جریان به خم ابتدا نمودار حالت نزولی داشته سپس در زوایای ۶۱ تا ۷۵ درجه به حداقل مقدار خود می‌رسد و سپس از مقطع عرضی مذکور تا پایان خم روند صعودی دارد. نتایج استخراج شده از پروفیل‌های طولی ترسیم شده در شکل (۴) در جدول (۱) آورده شده است.

براساس نتایج مندرج در جدول(۱) با افزایش عدد فرود، حداکثر عمق آبشستگی نیز افزایش یافته‌است که این مسئله در شکل (۵) نشان داده شده‌است. در شکل (۵) محور افقی عدد فرود و محور عمودی نسبت حداکثر عمق آبشستگی به عمق ثابت(ds/y) جریان است.



شکل۵- افزایش عمق آبشستگی با افزایش عدد فرود در یک فاصله طولی ثابت



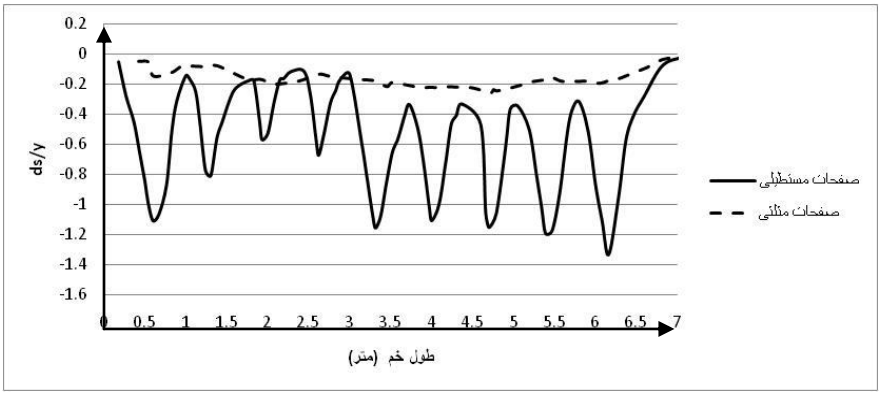
الف) صفحات مستطیلی **ب)صفحات مثلثی**

شکل ٦- مقایسه توپوگرافی بستر رسوبی در حضور صفحات مستطیلی و صفحات مثلثی

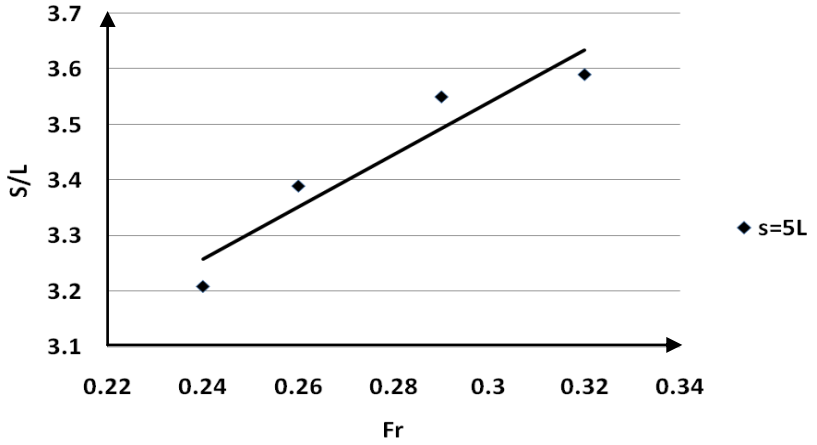
همان‌گونه که پیشتر ذکر شد برای این چهار آزمایش در فاصله ۷۰ سانتی‌متر (5L) یک آزمایش شاهد در حضور صفحات متصل به ساحل مستطیلی شکل با دبی ۲۷ لیتر بر ثانیه متناظر با عدد فرود ۰/۲۶ نیز انجام گرفت که در واقع این صفحات مستطیل شکل نقش آبشکن را ایفاء می‌کنند. در شکل (۶) توپوگرافی بستر رسوبی پس از مدت زمان ۱۸۰ دقیقه در حضور صفحات مستطیلی توسط نرم‌افزار سورفر رسم شده‌است.

از مقایسه توپوگرافی بستر رسوبی در آزمایش شاهد با آزمایش اصلی تفاوت بسیار فاحشی در الگوی آبشستگی و رسوب‌گذاری مشاهده می‌شود. در آزمایش شاهد در حضور صفحات مستطیلی آبشستگی از ساحل خارجی خم شروع شده است و تا نواحی مرکزی فلوم امتداد یافته‌است. در محل دماغه هر صفحه چاله‌های عمیق آبشستگی ایجاد شده‌است و بر خلاف آزمایش اصلی که رسوبات فرسایش یافته از بالادست صفحات در پایین‌دست انباشته شده‌اند و منجر به ساحل‌سازی شده‌اند تنها پدیده‌ی قابل مشاهده برای بستر و دیواره ساحل خارجی آبشستگی بوده و هیچ‌گونه رسوب‌گذاری در پایین‌دست صفحات مستطیلی و بین دو صفحه متوالی مشاهده نمی‌شود. در نیمه اول خم موقعیت قرارگیری صفحه دوم، سوم و چهارم حفره‌های آبشستگی کوچک‌تر است و ساحل کمتر فرسایش یافته‌است اما در نیمه دوم خم این فرسایش شدت یافته‌است و ساحل بیرونی بطور کامل شسته شده‌است که این مسئله در تناقض با هدف صفحات متصل به ساحل (دورکردن فرسایش از ساحل خارجی و انتقال آن به مرکز فلوم) می‌باشد.

در شکل(۷) پروفیل‌های طولی حداکثر اعماق آبشستگی در آزمایش شاهد و اصلی با هم مقایسه شده‌اند. محور افقی طول خم برحسب متر و محور عمودی نسبت حداکثر عمق آبشستگی به عمق ثابت جریان(ds/y) است.



شکل۷- مقایسه پروفیل های طولی در آزمایش شاهد و اصلی



شکل۸- فاصله حداکثر اعماق آبشستگی از ساحل خارجی

همان‌گونه که از شکل (۷) مشخص است در آزمایش در حضور صفحات مستطیلی نمودار با رسیدن به دماغه هر صفحه یک نزول ناگهانی دارد که این امر ناشی از وقوع جریان‌های گردابی در دماغه صفحات می‌باشد. برخلاف آزمایش در حضور صفحات مثلثی که بیشینه‌ی عمق آبشستگی درون خم (زاویه ۷۱ درجه) اتفاق افتاده بود، در آزمایش شاهد حداکثر گودال فرسایشی در فاصله ۶/۱۶ متری از ابتدای فلوم و به میزان ۱/۳ برابر عمق جریان و در مسیر مستقیم خروجی اتفاق افتاده‌است که فاصله عمیق‌ترین قسمت این گودال از ساحل خارجی ۱/۲ برابر طول مؤثر صفحه و مربوط به دماغه صفحه نهم است. در آزمایش اصلی بیشینه‌ی عمق آبشستگی ۰/۲۷ عمق جریان بوده‌است که نشان دهنده کاهش ۸۰ درصدی عمق آبشستگی در حضور صفحات مثلثی نسبت به صفحات مستطیلی است

.فاصله حداکثر اعماق آبشستگی از ساحل خارجی

در شکل (۸) محور افقی عدد فرود و محور عمودی نسبت فاصله حداکثر عمق آبشستگی از ساحل خارجی به طول مؤثر صفحه است. همان‌گونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود در فاصله ثابت 5L با افزایش عدد فرود محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی نیز از ساحل خارجی افزایش یافته‌است و در واقع با افزایش عدد فرود وقوع فرسایش از ساحل خارجی دورتر شده‌است و به نواحی مرکزی فلوم و نزدیک خم داخلی انتقال یافته‌است. با افزایش عدد فرود از ۰/۲۴ در کمترین شرایط جریان به عدد فرود ۰/۳۲ در بیشترین شرایط جریان محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی به میزان ۱۱/۵ درصد از ساحل خارجی فاصله پیدا کرده‌است که این امر مبین دور شدن فرسایش از ساحل خارجی و کمک به حفظ و پایداری ساحل می‌باشد. از مقایسه آزمایش‌ها در حضور صفحات مستطیلی با آزمایش در حضور صفحه مثلثی در عدد فرود ثابت ۰/۲۶ مشخص شد که حداکثر فاصله عمق آبشستگی از ساحل خارجی در حضور صفحه مستطیلی ۱/۲ برابر طول مؤثر صفحات بوده‌است اما این فاصله در حضور صفحه مثلثی ۳/۴ برابر طول مؤثر صفحات بوده‌است که این امر نشان‌دهنده عملکرد بهتر صفحات مثلثی نسبت به صفحات مستطیلی در دور کردن فرسایش و آبشستگی از ساحل خارجی خم بوده است.

نتیجه گیری

در مطالعه حاضر به بررسی آزمایشگاهی تأثیر شرایط جریان بر توپوگرافی بستر رسوبی در خم ۹۰ درجه ملایم در حضور صفحات

متصل به ساحل مثلثی پرداخته شد. از مقایسه توپوگرافی بستر برداشت شده مشخص شد که با افزایش عدد فرود در هر مرحله حداکثر عمق آبشستگی نیز افزایش می‌یابد به‌طوری‌که حداکثر عمق آبشستگی در کمترین شرایط جریان در حضور عدد فرود ۰/۲۴ نسبت به سه عدد فرود دیگر ۰/۲۶،۰/۲۹ و ۰/۳۲ به ترتیب ۹درصد،۵۳درصد و۹۰ درصد کمتر بوده‌است. به تناسب افزایش حداکثر عمق آبشستگی در هر مرحله ارتفاع تپه‌های رسوبی نیز افزایش یافته‌است به‌طوری‌که با افزایش عدد فرود از ۰/۲۴ به ۰/۳۲ به میزان ۶۰ درصد افزایش رسوب‌گذاری مشاهده شد. در تمامی اعداد فرود محل وقوع حداکثر گودال فرسایشی در درون قوس و در نیمه دوم قوس بین زوایای ۶۰ تا ۷۵ درجه اتفاق افتاده است. با افزایش عدد فرود محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی از ساحل خارجی نیز افزایش یافته‌است به‌طوری‌که در سه عدد فرود ۰/۳۲و۰/۲۹،۰/۲۶ نسبت به عدد فرود ۰/۲۴ به ترتیب ۵درصد،۱۰/۶ درصد و ۱۱/۵ درصد افزایش فاصله رخ داده‌است. از مقایسه آزمایش در حضور صفحات مثلثی با آزمایش در حضور صفحات مستطیلی مشاهده شد که حداکثر عمق آبشستگی در محل پاشنه صفحات مثلثی به‌طور متوسط ۸۰ درصد کمتر از صفحات مستطیلی است. محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی از ساحل خارجی در حضور صفحات مثلثی ۳/۴ برابر طول مؤثر صفحه و مربوط به ناحیه مرکزی فلوم بوده‌است در حالی‌که در حضور صفحات مستطیلی این فاصله ۱/۲ برابر طول مؤثر صفحه و مربوط به نواحی دماغه صفحات بوده است که این امر نشان‌دهنده این است که در حضور صفحات مثلثی خط‌القعر از نواحی مرکزی فلوم عبور کرده‌است و در واقع فرسایش و آبشستگی از ساحل خارجی دور و به مرکز فلوم منتقل شده‌است اما در حضور صفحات مستطیلی این خط‌القعر از دماغه صفحات عبور کرده‌است. این امر نشان دهنده عملکرد بهتر صفحات مثلثی نسبت به مستطیلی در دور کردن آبشستگی از ساحل خارجی و کمک به کاهش فرسایش در ساحل خارجی و حفظ و پایداری ساحل بوده است. نتایج حاصل از تحقیق حاضر بر نتایج سایر محقیقن از جمله بهرامی یاراحمدی و همکاران(۱۳۹۲) منطبق است. بهرامی‌یاراحمدی و همکاران (۱۳۹۲) به مقایسه عملکرد سازه‌های اصلاح‌کننده الگوی جریان در قوس‌ها پرداختند. نتایج آزمایشگاهی حاصل از تحقیق بهرامی یاراحمدی و همکاران(۱۳۹۲) نشان داد که با افزایش عدد فرود، بیشینه‌ی عمق آبشستگی و حجم رسوب فرسایش یافته افزایش می‌یابد و به‌طور متوسط بیشینه‌ی عمق آبشستگی صفحه متصل به ساحل نسبت به آبشکن ۵۰ درصد کاهش پیدا کرده‌است.

منابع

۱- بهرامی یاراحمدی، م. ، شفاعی بجستان، م. و س.ح. موسوی جهرمی. ۱۳۹۲ . مقایسه عملکرد سازه های اصلاح کننده الگوی جریان در قوس ها، مجموعه مقالات همایش بین المللی مهندسی عمران معماری و سازه های شهری، دانشگاه آزاد اسلامی تبریز، ایران.

۲- تائبی، ح. ، شفاعی بجستان، م. و م.کاهه. ۱۳۸۸. شبیه سازی عددی جریان در قوس ۹۰ درجه با استفاده از مدلCCHE 2D ، مجموعه مقالات هشتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهیدچمران اهواز، ایران.

۳- جراح زاده، ف. وم. شفاعی بجستان. ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی وضعیت خط القعر تحت تاثیر وجود سرریز مستغرق درخم ۹۰ درجه تند، فصلنامه پژوهش‌های آبخیزداری(پژوهش و سازندگی)، ۹۷ :۲۹-۱۷.

۴- شفاعی بجستان، م.۱۳۹۱. اصلاح رودخانه و مدیریت رسوب توسط صفحات مستغرق، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ۳۱۳ص.

۵- واقفی، م. ، قدسیان، م. وس. ع. ا.صالحی نیشابوری. ۱۳۸۸. مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان سه بعدی پیرامون آبشکن T شکل مستقر در قوس ۹۰ درجه ، مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک ، ۱۶(۲) : ۱۳۰-۱۰۵.

6- Bhuiyan, F., Hey, R. and P.R. Wormleaton.2010. Bank-attached vanes for bank erosion control and restoration of river meanders . Journal of Hydraulic Engineering, 136(9): 583-596.

7- Fazli, M., Ghodsian, M.and S.a.a Salehi. 2008 . Scour and flow field around a spur dike in a 90° bend. International Journal of Sediment Research,23(1):56-68.

8- Ghodsian, M., and M. Vaghefi. 2009. Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T-shape spur dike in a 90° bend. International Journal of Sediment Research, 24(2): 145-158.

9- Masjedi, A., Akbari, I. and H. Abyar.2011. Evaluating scour at L-shape spur dike In a 180 degree bend.World Applied Sciences Journal,15(12):1740-1745.

10-Van Den Heever, A. 2013. An investigation of the use of groynes as a means of riverbank erosion protection. M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, Stellenbosch University.