تأثیر سری صفحات مثلثی در قوس ملایم ۹۰ درجه بر الگوی توپوگرافی بستر

محمد بهرامی یاراحمدی ^۱ و محمود شفاعیبجستان ^{*۲} ۱ دانشآموخته دکتری سازههای آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز ۲ استاد گروه سازههای آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

چکیدہ

صفحات مثلثی از جمله سازههای زیست.محیطی هستند که با اصلاح الگوی جریان در قوس رودخانه از بروز آبشستگی در پاشنه ساحل جلوگیری و باعث تثبیت ساحل می شوند علاوه بر این، آنها موجب ترمیم و توسعه زیستگاه آبزیان رودخانه نیز می گردند. از آنجا که در رابطه با فاصله قرار گیری این سازهها از یکدیگر در قوس معیاری ارائه نشده است، این تحقیق جهت بررسی تأثیر قرار گیری صفحات مثلثی در قوس ملایم ۹۰ درجه بر توپوگرافی بستر با فواصل ۴، ۵، ۶ و ۸ برابر طول مؤثر صفحه (Le) انجام گردید. در این پژوهش، زاویه صفحات مثلثی نسبت به ساحل بالادست ۳۰ درجه بوده است. آزمایش ها تحت شرایط مختلف جریان (اعداد فرود ۲۰۲۳، ۲۶۲/۰، ۲۹۲/۰ و ۲۰۳۱) انجام شدند. نتایج نشان دادند که، صفحات مثلثی سبب است. آزمایش ها تحت شرایط مختلف جریان (اعداد فرود ۲۶۳، ۲۰۲۲، ۲۹۲/۰ و ۲۰۳۱) انجام شدند. نتایج نشان دادند که، صفحات مثلثی سبب انحراف جریان از ساحل بیرونی به طرف مرکز و قوس داخلی مجرا و در نتیجه تشکیل خطالقعر در نزدیکی ساحل داخلی شدهاند. با افزایش فاصله صفحات از یکدیگر، مقدار فرسایش خطالقعر کاهش یافت. به طور متوسط حداکثر عمق آبشستگی خطالقعر در فواصل علله و عا5، عاله به ترتیب ۲۳۶، ۲۳۵، ۲۳۰ و ۲۲۶، برابر طول مؤثر اولیه سازه بوده است. در همه آزمایش ها حداکثر عمق آبشستگی، در پنجه صفحات رخ داد. با افزایش فاصله بین صفحات، حداکثر عمق آبشستگی و گسترش آن تا ساحل بیرونی افزایش یافت به طوری که فاصله ۸ برابر طول مؤثر سازه، فاصله مناسبی مؤصله بین صفحات، حداکثر عمق آبشستگی در فواصل عله، عاده مای و عا8 به ترتیب ۲۰/۵، ۲۰/۵، ۲۰/۵، بر ۱۶/۶ برابر طول مؤثر اولیه سازه بود.

واژگان كليدى: سازەھاى زيستمحيطى، زيستگاه أبزيان، فرسايش سواحل، قوس رودخانه، صفحات مثلثى.

۱– مقدمه

فرسایش در ساحل بیرونی قوسها، باعث جابهجائی عرضی رودخانهها و در نتیجه از بین رفتن زمینهای کشاورزی، جادهها و تأسيسات مجاور رودخانهها و همچنين تخريب اكوسيستمهاي ساحلی و زیستگاه آبزیان رودخانه می شود. از طرفی، فرسایش موجب ورود حجم زیادی از رسوبات به داخل رودخانه می شود که می توانند با ورود به مخازن سدها و تأسیسات آبگیری پائین دست مشکلات فراوانی را به وجود آورند. به منظور کنترل و كاهش فرسايش سواحل، معمولاً روشهاى حفاظت مستقيم (مانند ریپ رپ، لحاف بتونی و غیره) و حفاظت غیر مستقیم (استفاده از سازههایی مانند آبشکن، سرریز مستغرق، صفحات مستغرق و غیره) مورد استفاده قرار می گیرند [1]. با توجه به این که فرسایش سواحل باعث از بین رفتن اکوسیستمهای ساحلی و زیستگاه آبزیان رودخانه می شود، بنابر این علاوه بر کنترل و كاهش فرسایش سواحل رودخانه، ترمیم و توسعه زیستگاه آبزیان رودخانه نیز بسیار ضروری است که برای این منظور سازههای زیستمحیطی پیشنهاد شدهاند. صفحات مثلثی شکل از جمله

سازههای زیستمحیطی هستند که معمولاً از سنگ و الوار ساخته می شوند و از تراز دشت سیلابی در ساحل تا بستر رودخانه شیبدار هستند، به گونهای که نوک آن ها حتی برای جریان های کم مستغرق می باشند. آن ها عمدتاً برای کنترل فرسایش سواحل، انحراف جریان از سواحل به طرف مرکز مجرا، بهتر شدن وضعیت انتقال رسوب، توسعه رودخانه جهت قایقرانی، ترمیم و توسعه زیستگاه آبزیان رودخانه استفاده می شوند. صفحات مثلثی با زاویه کم نسبت به ساحل بالادست (۲۰–۳۰ درجه) نصب می گردند [۲–۴].

علی رغم مزایای فراوان صفحات مثلثی شکل، اما تحقیقات اندکی در رابطه با آنها صورت گرفته است. بویان و همکاران [۷، ۸] به بررسی اثر صفحات مثلثی شکل بر کنترل فرسایش سواحل در یک مجرای سینوسی با بستر متحرک پرداختند. نتایج نشان دادند که صفحات باعث پرشدن چاله فرسایشی بستر ساحل بیرونی و انتقال خطالقعر به طرف مرکز رودخانه می شوند که در این رابطه، زاویه ۳۰ درجه نسبت به ۲۰ درجه عملکرد بهتری نشان داد. به سرامی یاراحمدی و شفاعی بجستان [۹، ۱۰] به ۲- مواد و روشها

1-۲- مشخصات تجهیزات و مصالح مورد استفاده

آزمایشها در یک فلوم قوسی با دیواره پلکسی گلاس، به عرض ۷۰ سانتیمتر و با زاویه مرکزی ۹۰ درجه انجام گرفت. نسبت شعاع قوس به عرض فلوم ۴ بوده که در گروه قوسهای ملايم قرار دارد. طول كانال مستقيم در بالادست قوس ۵ متر و در پائیندست قوس ۳ متر بود. در انتهای فلوم یک دریچه كشوئى جهت تنظيم عمق جريان قرار داشت. تنظيم دبى ورودی توسط شیر فلکه ورودی فلوم انجام می گرفت. میزان دبی ورودی توسط دبی سنج اولتراسونیک با دقت ٪t± میزان قرائت شده، اندازه گیری می شد. از ماسه با قطر متوسط (65) معادل ۱/۵ میلیمتر و ضریب انحراف معیار هندسی معادل ۱/۲۲ به عنوان رسوبات بستر ($\sigma=\sqrt{d_{_{84}}/d_{_{16}}}$) استفاده گردید. رسوبات بستر توسط ارابه مخصوصی که در طول فلوم حرکت می کرد متراکم و تسطیح می شد. در تمام آزمایش ها شرایط آب زلال حاکم بوده است. در این مطالعه چون هدف مقایسه تغییرات توپوگرافی بستر در قوس ۹۰ درجه ملایم بوده، بنابر این زمان انجام هر آزمایش ۳ ساعت در نظر گرفته شد [۱۳]. برای انجام آزمایشها از دبیهای ۲۵، ۲۷، ۳۰ و ۳۳ لیتر در ثانیه با عمق ثابت ۱۳ سانتیمتر (اعداد فرود ۲۴۳/۰، ۰/۲۶۲، ۰/۲۹۲ و ۰/۳۲۱) استفاده گردید. عمق آب به گونهای انتخاب شد که بالاترین تراز تاج سازه (که چسبیده به ساحل بیرونی بود) و تراز آب، یکسان باشند.

صفحات استفاده شده، به شکل مثلث و از جنس پلکسی گلاس و به ضخامت ۵ میلیمتر بودهاند. طول مؤثر (فاصله عرضی نوک صفحه در بستر از ساحل بیرونی) اولیه صفحات قبل از فرسایش، یک پنجم عرض مجرا که معادل ۱۴ سانتی-متر میباشد، بوده است (Le=14 cm). به منظور بررسی تأثیر فاصله بین صفحات مثلثی بر تغییرات توپوگرافی بستر در قوس ملایم ۹۰ درجه از فواصل ۴، ۵، ۶ و ۸ برابر طول مؤثر آزمایشها، زاویه سازه نسبت به ساحل بالادست ۳۰ درجه آزمایشها، زاویه سازه نسبت به ساحل بالادست ۳۰ درجه بود. انتخاب طول مؤثر و زاویه صفحات نسبت به ساحل شده است. در همه آزمایشها، موقعیت نصب اولین سازه در ابتدای قوس قرار داشت. آخرین سازه در فواصل ۹Le، علاه، دادتهای علاه در موقعیت ۲۰ سانتیمتر پائیندست انتهای قوس و در فاصله علام در موقعیت ۱۴ سانتیمتر پائیندست انتهای قوس و در بررسی اثر زاویه تک صفحه مثلثی نسبت به ساحل بالادست و طول مؤثر صفحه مثلثی، بر تغییرات توپوگرافی بستر در اطراف آنها تحت شرايط هيدروليكي متفاوت پرداختند. نتايج تحقيقات آنها نشان داد که، زوایای ۲۳ و ۳۰ درجه نسبت به سایر زوایا کمترین عمق و حجم آبشستگی را داشتند. در ضمن برخلاف ساير زوايا كه آبشستگى پنجه سازه به طرف سواحل بالادست و پائیندست صفحه گسترده می شد، در این زوایا چاله آبشستگی در پائین دست محور سازه و به موازات آن تشکیل می گردید و حداکثر عمق آبشستگی در پشت محور سازه رخ میداد. از دیگر نتايج تحقيق آنها اين بود كه رسوبات حاصل از فرسايش در پائین دست سازه ترسیب یافتند و فاصله پشته رسوبی از ساحل بیرونی در زوایای ۲۳ و ۳۰ درجه از سایر زوایا کمتر بوده است که این امر جهت ساحل سازی در قوس بیرونی رودخانه حائز اهمیت است. از دیگر نتایج تحقیقات آنها، کاهش حداکثر عمق آبشستگی با کاهش طول مؤثر صفحه بود به گونهای که طولهای مؤثر یک پنجم و یک هفتم عرض مجرا دارای کمترین عمق آبشستگی بودهاند. بهرامی یاراحمدی و همکاران [۱۱] تأثیر ترکیب صفحات مثلثی شکل و تیغه افقی بر تغییرات توپوگرافی بستر را مطالعه کردند. نتایج آزمایشها حاکی از آن بودند که استفاده از تیغه افقی در بین صفحات سبب کاهش حداکثر عمق آبشستگی در پنجه صفحات و مانع از گسترش آن تا ساحل بیرونی شده است. به طور متوسط، استفاده از تیغه افقی ۷۰ درصد حداکثر عمق آبشستگی را در پنجه صفحات کاهش داد. بهرامی یاراحمدی و همکاران [۱۲] به بررسی الگوی فرسایش و رسوب گذاری در اطراف تک آبشکن و صفحه مثلثی شکل و مقایسه آنها با یکدیگر پرداختند. نتایج نشان دادند که به طور متوسط حداكثر عمق آبشستگی و حجم رسوب فرسایش یافته صفحه مثلثی به ترتیب ۵۰ و ۴۵ درصد نسبت به آبشکن کاهش ییدا کرده است.

جهت کنترل فرسایش سواحل در قوسها، صفحات مثلثی باید به صورت گروهی مورد استفاده قرار گیرند. اما معیار و اطلاعات دقیقی در رابطه با تعیین فاصله مناسب بین آنها وجود ندارد. با در نظر گرفتن این که در رابطه با تأثیر سری صفحات مثلثی با فواصل مختلف، بر توپوگرافی بستر در قوسها تاکنون تحقیقی صورت نگرفته است این مطالعه انجام شده است.

قوس بود. در شکل (۱) نحوه قرارگیری صفحات مثلثی در فلوم قوسی ۹۰ درجه قبل از آبشستگی، برای فاصله 4Le نشان داده شده است.

۲-۲- نحوه انجام آزمایشها

نحوه انجام هر آزمایش بدین گونه بود که پس از تسطیح بستر، در حالی که دریچه کشوئی انتهای فلوم کاملاً بسته بود با باز کردن شیر فلکه ورودی فلوم، جریان به آرامی وارد فلوم میشد به گونهای که تغییری در توپوگرافی بستر ایجاد نکند. پس از بالا آمدن سطح آب، جریان به صورت تدریجی به دبی مورد نظر افزایش می یافت. سپس توسط دریچه کشوئی، عمق جریان در حد مورد نظر تنظیم می گشت. پس از پایان یافتن مدت زمان آزمایش، ابتدا دریچه کشوئی به آرامی پائین آورده می شد سپس شیر فلکه ورودی فلوم بسته می شد و اجازه داده میشد تا جریان به صورت تدریجی خارج و بستر فلوم زهکشی شود. پس از زهکشی شدن بستر، توپوگرافی بستر شکل گرفته با استفاده از دستگاه bed profiler (با دقت ۴/۰ میلیمتر) برداشت میشد. حرکت سنسور لیزری دستگاه در تمامی مقاطع، عمود بر مقطع طولی فلوم بوده است. سنسور لیزری پس از قرائت توپوگرافی بستر، دادهها را به کامپیوتر دستگاه ارسال کرده و آنها را در فایلهای Excel و Text ذخيره ميكرد.



۹۰ شکل ۱- نحوه قرارگیری صفحات مثلثی در قوس ملایم درجه برای فاصله 4Le

۳- نتایج و بحث

۳-۱- الگوی فرسایش و رسوبگذاری

در تحقیق حاضر، توپوگرافی بستر برداشت شده به وسیله دستگاه bed profiler، با استفاده از نرمافزار Civil3D ترسیم شد. شکل (۲) نمونهای از الگوی توپوگرافی بستر را برای فواصل مختلف به ازای دبی ۳۰ لیتر در ثانیه (عدد فرود ۰/۲۹۲) نشان میدهد. با دقت در شکل ملاحظه می شود که در همه فواصل در اطراف پنجه سازهها آبشستگی رخ داده است. با افزایش فاصله بین صفحات، آبشستگی در پنجه سازهها ازدیاد یافت. در صفحات با فواصل 4Le و 5Le آبشستگی رخ داده در پنجه صفحات تا ساحل بيروني گسترش نيافت. در صفحات با فاصله 6Le به ازاي اعداد فرود ۰/۲۹۲ و ۰/۳۲۱ آبشستگی در پنجه سازه انتهائی (سازه ۷) تا ساحل بیرونی توسعه پیدا کرد. برای صفحات با فاصله 8Le به ازای عدد فرود ۰/۲۶۲ در سازه انتهائی (سازه ۶)، به ازای عدد فرود ۰/۲۹۲ در سازههای ۵ و ۶ (دو سازه آخر) و به ازای عدد فرود ۰/۳۲۱ در سازههای ۲، ۴، ۵ و ۶ (تقریباً همه سازهها) آبشستگی پنجه تا ساحل بیرونی گسترش یافت. آبشستگی بیش از حد در پنجه صفحات و توسعه آن تا ساحل بیرونی علاوه بر این که برای سازه به جهت پایداری خطرناک می-باشد، موجب تخریب ساحل بیرونی نیز می شود. به نظر میرسد فاصله صفحات از یکدیگر به اندازه ۸ برابر طول مؤثر سازه، زیاد بوده است.

مشاهدات بصری (با تزریق ماده رنگی) نشان داد که صفحات مثلثی شکل باعث انحراف جریان از قوس بیرونی به طرف مرکز و قوس داخلی شده است که این، یک مزیت به جهت کنترل فرسایش در ساحل بیرونی و همچنین قایقرانی در قوسها میباشد. انحراف جریان از قوس بیرونی به طرف مرکز و قوس داخلی مجرا باعث آبشستگی بستر مجرا در مرکز و نزدیکی قوس داخلی شده است. با دور شدن از ابتدای قوس این آبشستگی به طرف مرکز و ساحل داخلی نزدیک شد و باعث فرسایش ساحل داخلی گردید. یکی از اهداف مهم در مبحث ساماندهی رودخانه در قوسها، یکی از اهداف مهم در مبحث ساماندهی رودخانه در قوسها، ساحل داخلی و جلوگیری از جابهجائی عرضی رودخانه و بازگرداندن قوس به مسیر اولیه میباشد.

در همه آزمایشها، رسوبات حاصل از فرسایش با حرکت در راستای محور سازه در پاشنه ساحل بیرونی ترسیب یافتهاند و این امر باعث پر شدن چاله فرسایشی ساحل بیرونی و ایجاد ساحل جدید در قوس بیرونی رودخانهها می شود.





۲-۳- حداکثر عمق آبشستگی

در کلیه آزمایشها، حداکثر عمق آبشستگی در اطراف پنجه صفحات اتفاق افتاد. بررسی عوامل مؤثر بر مقدار حداکثر عمق آبشستگی و همچنین فاصله آن از ساحل بیرونی، به جهت پایداری سازه و ساحل بیرونی مجاور آن حائز اهمیت میباشد. به عنوان نمونه در شکلهای (۳) و (۴) پروفیلهای عرضی حداکثر عمق آبشستگی برای فاصله 4Le به ازای دبیهای مختلف جریان و پروفیلهای عرضی حداکثر عمق آبشستگی برای دبی ۲۷ لیتر بر ثانیه به ازای فواصل متفاوت نشان داده شده است. محور

عمودی آنها نشان دهنده اعماق آبشستگی و رسوب گذاری در هر نقطه و محور افقی آنها نشان دهنده فاصله هر نقطه از ساحل بیرونی میباشد. در واقع اعداد صفر و ۷۰ سانتیمتر بر روی محور افقی به ترتیب نشان دهنده سواحل بیرونی و درونی مقطع عرضی میباشند. در شکل (۵) نمودار بیبعد حداکثر عمق آبشستگی برای فواصل مختلف ارائه شده است. محور افقی آن عدد بیبعد فرود جریان و محور عمودی، نسبت بیبعد حداکثر عمق آبشستگی به طول مؤثر اولیه سازه (ds₁/Le) میباشد.



شکل۳- پروفیلهای عرضی مقاطع با حداکثر عمق آبشستگی به ازای دبیهای مختلف جریان برای فاصله 4Le



شکل ۴– پروفیلهای عرضی مقاطع با حداکثر عمق آبشستگی به ازای فواصل مختلف برای دبی ۲۷ لیتر در ثانیه



شکل ۵– نمودار بی بعد تغییرات حداکثر عمق آبشستگی به ازای فواصل و اعداد فرود مختلف

نمودارها نشان میدهند که در هر دبی (عدد فرود جریان) با افزایش فاصله سازهها از یکدیگر، حداکثر عمق آبشستگی ازیاد مییابد. با افزایش فاصله سازهها از یکدیگر، تأثیر سازه بالادستی بر پائیندستی کاسته میشود. به طوری که اگر فاصله بیش از حد لازم گردد الگوی جریان در اطراف هر سازه همانند الگوی جریان اطراف تک سازه خواهد شد بنابر این میزان آبشستگی در اطراف هر سازه افزایش مییابد. در هر عدد فرود جریان،

فواصل 4Le و 4Le به ترتیب دارای کمترین و بیشترین عمق آبشستگی میباشند. علاوه بر این، در هر فاصله با افزایش دبی جریان (عدد فرود جریان) حداکثر عمق آبشستگی افزایش می-یابد که این حاصل افزایش قدرت گردابهها در اطراف صفحات در اثر افزایش عدد فرود جریان است. برای هر فاصله، در دبیهای ۵۲ و ۳۳ لیتر در ثانیه به ترتیب کمترین و بیشترین عمق آبشستگی رخ داده است. به طور متوسط حداکثر عمق آبشستگی در فواصل 6Le، 5Le، 4Le و 8Le به ترتیب ۸/۰، ۶۶/۰، ۲۵/۰

در جدول (۱) نتایج کمّی آزمایشهای مختلف ارائه شده است. در این جدول، ستونهای ۱ تا ۷ از راست به چپ به ترتیب نشان دهنده؛ فاصله سازهها از یکدیگر، دبی جریان (Q)، حداکثر عمق آبشستگی (ds₁)، نسبت بیبعد حداکثر عمق آبشستگی به طول موثر اوليه سازه (ds1/Le)، فاصله حداكثر عمق آبشستگی از ساحل بيرونى (Y)، نسبت بىبعد فاصله حداكثر عمق آبشستگی از ساحل بیرونی به طول مؤثر اولیه سازه (Y/Le) و تغییرات طول موثر سازه (ΔLe) می باشد. جدول (۱) نشان می-دهد که در همه آزمایشها، به غیر از آزمایش 8Le به ازای دبی ۳۳ ليتر در ثانيه، Y/Le>1.29 بود و متوسط فاصله حداكثر عمق آبشستگی از ساحل بیرونی برای فواصل 4Le، 5Le، 4Le و 8Le به ترتیب ۱/۳۶، ۱/۴، ۱/۴۱ و ۱/۴۵ برابر طول موثر اولیه سازه میباشد. در آزمایش 8Le به ازای دبی ۳۳ لیتر در ثانیه حداکثر عمق آبشستگی در بین نوک سازه و ساحل بیرونی رخ داد و فاصله آن از ساحل بیرونی ۰/۳۲ برابر طول مؤثر اولیه سازه بود.

در این تحقیق، طول مؤثر اولیه سازه (قبل از فرسایش) یک پنجم عرض مجرا (۱۴ cm) بود. با شروع آزمایش و در نتیجه فرسایش در بستر و اطراف سازهها، بخشی از سازه که درون بستر ماسهای قرار داشت نمایان شد و طول مؤثر اولیه افزایش یافت. بنابر این رابطه بین طول مؤثر نهائی (بعد از فرسایش) و آبشستگی در پنجه سازه یک رابطه مستقیم میباشد. به گونهای که هر چقدر در پنجه سازه آبشستگی بیشتری رخ دهد، طول موثر نهائی آن نیز بیشتر خواهد شد. در ستون هفتم جدول (۱)، تغییرات طول مؤثر سازه (ΔLe) که برابر با اختلاف طول مؤثر نهائی (بعد از فرسایش) و طول مؤثر اولیه (قبل از فرسایش) سازه میباشد ارائه گردیده است.

$\Delta Le (cm)$	Y/Le	Y (cm)	ds ₁ /Le	ds ₁ (cm)	Q(Lit/s)	فاصله سازهها
٣	١/٢٩	۱۸/۱	۰ /۲ ۱	٣	۲۵	4Le
٣/۵	١/٣	۱۸/۳	٠/٢٧	۳/۸۲	۲۷	4Le
۶	1/48	۲ • /۵	٠/۴٨	۶/٨	٣.	4Le
۲/۵	1/41	۱۹/۸	•/۵V	٨	٣٣	4Le
۵	۱/۳۲	۱۸/۶	۳۳/	۴/۷	۲۵	5Le
۵	١/٣٧	۱۹/۲	۰/۳۸	۵/۴	۲۷	5Le
۶	1/41	۱۹/۸	۰/۵۲	٧/٣	٣.	5Le
٨	۱/۵۲	۳ ۱/۳	۰/۶۱	٨/۶	٣٣	5Le
۶	۱/۳۴	۱۸/۸	٠/۴	۵/۶۸	۲۵	6Le
۶	1/47	۲۰	٠/۴٧	8/84	۲۷	6Le
۶/۵	1/41	۱۹/۸	•/۵۵	V/A	٣.	6Le
٨	۱/۴۸	۲۰/۸	•/84	٩	۳۳	6Le
γ	۱/۴۵	۲۰/۳	۰/۵۳	۷/۴۶	۲۵	8Le
γ	1/48	۲ • /۵	•/84	٨/٩۶	۲۷	8Le
Υ/۵	۱/۴۶	۲ • /۵	• /Y 1	١٠	٣.	8Le
٨/۵	• /٣٢	۴/۵	۰/Y۶	۱۰/۶	٣٣	8Le

جدول ۱- نتایج کمّی آزمایش های مختلف

در شکل (۶)، نمودار بیبعد تغییرات طول مؤثر سازه برای فواصل مختلف ارائه شده است. محور افقی آن عدد بیبعد فرود جریان و محور عمودی، نسبت بیبعد تغییرات طول مؤثر سازه به طول مؤثر اولیه سازه (ΔLe/Le) میباشد. نتایج نشان میدهند که با افزایش عدد فرود جریان و همچنین افزایش فاصله بین سازهها، تغییرات طول مؤثر سازه (ΔLe) ازدیاد مییابد. به طور متوسط، تغییرات طول مؤثر سازه برای فواصل ۵Le، باله، 9Le و علاق به ترتیب ۷۳۵۷، ۰/۴۲۸، ۰/۴۷۳ ، ۵۳۵۸ برابر طول مؤثر اولیه سازه میباشد. تغییرات طول مؤثر صفحه در فواصل 4Le



شکل۶ – نمودار بیبعد تغییرات طول مؤثر سازه به ازای فواصل و اعداد فرود مختلف

۳–۳– حداکثر عمق آبشستگی خطالقعر

صفحات مثلثی شکل، باعث انحراف جریان از قوس بیرونی به طرف مركز و قوس داخلي مجرا شده است. انحراف جريان به طرف مرکز باعث افزایش قدرت و تنش برشی جریان در مرکز مجرا شده، بنابر این آبشستگی بستر (خطالقعر) در میانه و نزدیک قوس داخلی مجرا اتفاق افتاده است. در این بخش به بررسی عوامل مؤثر بر حداکثر مقدار آبشستگی خطالقعر و همچنین موقعیت آن در قوس ۹۰ درجه پرداخته شده است. به عنوان نمونه در شکلهای (۷) و (۸) پروفیلهای عرضی حداکثر عمق آبشستگی خطالقعر برای فاصله 4Le به ازای دبیهای مختلف جریان و پروفیل های عرضی حداکثر عمق آبشستگی خطالقعر برای دبی ۲۷ لیتر بر ثانیه به ازای فواصل متفاوت نشان داده شده است. محور عمودی آنها نشان دهنده اعماق آبشستگی و رسوبگذاری در هر نقطه و محور افقی آنها نشان دهنده فاصله هر نقطه از ساحل بیرونی می باشد. در شکل (۹) نمودار بىبعد حداكثر عمق آبشستكى خطالقعر براى فواصل مختلف ارائه شده است. محور افقی آن عدد بیبعد فرود جریان و محور عمودي، نسبت بيبعد حداكثر عمق آبشستگي خطالقعر به طول مؤثر اوليه سازه (ds₂/Le) مى باشد.

های دورتر از سازه، جریان به طرف مرکز انحراف نمییافت و دارای حرکتی در راستای ساحل بیرونی بود. بنابر این با افزایش فاصله سازهها از یکدیگر میزان انحراف جریان از ساحل بیرونی به طرف میانه فلوم و در نتیجه مقدار تنش برشی بستر در میانه فلوم کاهش یافت، بنابر این میزان فرسایش و حداکثر عمق فرسایش خطالقعر میانه فلوم کاهش پیدا کرد. علاوه بر این در هر فاصله با افزایش دبی جریان حداکثر عمق آبشستگی خطالقعر افزایش یافت که این حاصل ازدیاد تنش برشی بستر در اثر افزایش عدد فرود جریان است. به طور متوسط حداکثر عمق آبشستگی خط-القعر در فواصل علکه علاه و علا8 به ترتیب ۳۶/۰، ۳۳/۰ القعر در فواصل ماکه علاق مؤثر اولیه سازه میباشد. در همه آزمایشها حداکثر عمق آبشستگی خطالقعر (ds₂) کمتر از حداکثر عمق آبشستگی در اطراف پنجه سازه (ds₁) بوده است.

به عنوان نمونه در شکلهای (۱۰) و (۱۱) به ترتیب پلان خطالقعر در قوس ۹۰ درجه برای فاصله 4Le به ازای دبیهای مختلف جریان و پلان خطالقعر در قوس ۹۰ درجه برای دبی ۲۷ لیتر در ثانیه به ازای فواصل متفاوت نشان داده شده است.



شکل ۱۰- پلان خطالقعر در قوس ۹۰ درجه برای فاصله 4Le به ازای دبیهای مختلف جریان



شکل ۱۱- پلان خطالقعر در قوس ۹۰ درجه برای دبی ۲۷ لیتر در ثانیه به ازای فواصل مختلف



شکل ۷- پروفیلهای عرضی مقاطع با حداکثر عمق آبشستگی خط القعر به ازای دبیهای مختلف جریان برای فاصله 4Le



شکل ۸- پروفیلهای عرضی مقاطع با حداکثر عمق آبشستگی خط القعر به ازای فواصل مختلف برای دبی ۲۷ لیتر در ثانیه



شکل ۹– نمودار بی بعد تغییرات حداکثر عمق آبشستگی خط القعر به ازای فواصل و اعداد فرود مختلف

نمودارها نشان میدهند که در هر عدد فرود با افزایش فاصله سازهها از یکدیگر، حداکثر عمق آبشستگی خطالقعر کاهش مییابد. مشاهدات بصری (با تزریق ماده رنگی) نشان داد که در صفحات با فاصله 4Le تمام جریان ساحل بیرونی فلوم به طرف مرکز و ساحل داخلی منحرف میشد؛ ولی در صفحات با فاصله 8Le فقط بخشی از جریان ساحل بیرونی که به سازهها نزدیک میشد، به طرف مرکز و ساحل داخلی مجرا منحرف میگردید و در فاصله-

همان گونه که شکلها نشان میدهند، در همه فواصل به ازای دبیهای متفاوت، خطالقعر در نزدیکی قوس داخلی مجرا تشکیل گردیده است که این نشان دهنده توانائی صفحات مثلثی در انحراف جریان از قوس بیرونی به طرف مرکز و قوس داخلی مجرا میباشد. به طور متوسط فاصله خطالقعر از ساحل بیرونی مجرا میباشد. به طور متوسط فاصله خطالقعر از ساحل بیرونی برای فواصل SLe، 5Le، 4Le و SLe به ترتیب ۳/۳۸، ۶۹/۰، و ۳/۳ و ۳/۳ برابر طول مؤثر اولیه سازه (یا ۱/۶۷، ۶۹/۰، ۵/۰ و ۱/۶۴ برابر عرض مجرا) میباشد که این نشان دهنده این است که فاصله خطالقعر از ساحل بیرونی در فواصل SLe و SLe به ترتیب بیشترین و کمترین است.

۳-۴- ترسیب رسوبات

در بحث ساماندهی رودخانهها در قوسها، علاوه برکنترل فرسایش ساحل بیرونی با استفاده از سازههای اصلاح کننده الگوی جریان و انتقال چاله فرسایشی از ساحل بیرونی به طرف مرکز رودخانه، پر کردن چاله فرسایشی ساحل بیرونی و ساحل سازی (ایجاد ساحل جدید) در ساحل بیرونی رودخانهها میتواند بسیار حائز اهمیت باشد. رسوبات حاصل از فرسایش در پنجه سازه و نیز رسوباتی که از بالادست به سازه نزدیک میشوند تحت تأثیر الگوی خاص جریانی که در اطراف سازه تشکیل میشود، در پائین دست آن ترسیب میکنند. بنابر این بررسی نحوه ترسیب رسوبات حاصل از فرسایش توسط صفحات مثلثی و عوامل مؤثر بر آن ضروری میباشد.

به عنوان نمونه در شکلهای (۱۲) و (۱۳) پروفیلهای عرضی حداکثر ارتفاع رسوبگذاری برای فاصله 4Le به ازای دبیهای مختلف جریان و پروفیلهای عرضی حداکثر ارتفاع رسوبگذاری برای دبی ۲۷ لیتر بر ثانیه به ازای فواصل متفاوت ارائه شده است. محور عمودی آنها نشان دهنده اعماق آبشستگی و رسوبگذاری در هر نقطه و محور افقی آنها نشان دهنده فاصله هر نقطه از ساحل بیرونی میباشد. در شکل (۱۴) نمودار بیبعد حداکثر ارتفاع رسوبگذاری برای فواصل مختلف ارائه شده است. محور افقی آن عدد بیبعد فرود جریان و محور ارائه شده است. محور افقی آن عدد بیبعد فرود جریان و محور ارائه شده است. محور افقی آن عدد بیبعد فرود جریان و محور ارائه شده است. محور افقی آن عدد بیبعد فرود جریان و محور ازای شواصل و اعداد فرود مختلف در ساحل بیرونی رسوبات اولیه سازه (3Le) میباشد. نمودارها نشان میدهند که به ترسیب یافتهاند. در هر فاصله با افزایش دبی جریان (عدد فرود جریان) به علت افزایش آبشستگی در پنجه سازهها حداکثر ارتفاع رسوبات ترسیب یافته، افزایش مییابد.



شکل ۱۲- پروفیلهای عرضی مقاطع با حداکثـــر ارتفاع رسوبگذاری به ازای دبیهای مختلف برای فاصله 4Le



شکل ۱۳– پروفیلهای عرضی مقاطع با حداکثر ارتفاع رسوب-گذاری به ازای فواصل مختلف برای دبی ۲۷ لیتر در ثانیه



شکل ۱۴– نمودار بی بعد تغییرات حداکثر ارتفاع رسوبگذاری به ازای فواصل و اعداد فرود مختلف

در ضمن به ازای اعداد فرود یکسان با افزایش فاصله سازهها از یکدیگر حداکثر ارتفاع رسوبگذاری کاهش مییابد. هر چقدر فاصله بین سازهها افزایش یابد، رسوبات حاصل از فرسایش در طول بیشتری از مجرا و در راستای قوس بیرونی، ترسیب میکنند. بنابر این از ارتفاع تاج پشته رسوبگذاری شده کاسته میشود. به طور متوسط حداکثر ارتفاع رسوبات ترسیب یافته در فواصل 6Le ،5Le ،4Le و عا8 به ترتیب ۶/۰، ۶/۰، ۹/۰

۰/۳۷ برابر طول مؤثر اولیه سازه (و یا ۰/۵۷ ۰/۴۷ ۰/۴۰ و ۰/۴ برابر ارتفاع سازه) می باشد.

با دقت در شکلهای (۳)، (۴)، (۷) و (۸) ملاحظه می گردد که در مقاطعی که حداکثر عمق آبشستگی در اطراف سازه و نیز حداکثر عمق آبشستگی خطالقعر رخ داده است، ترسیب رسوب در ساحل بیرونی صورت گرفته است که این نشان دهنده قابلیت ساحل سازی بالای این سازهها است.

با شروع فرسایش در پنجه سازه، رسوبات حاصل از آن در راستای محور سازه به طرف ساحل بیرونی حرکت کرده و در آن-جا ترسیب پیدا کردند. هر چقدر میزان فرسایش بیشتر باشد رسوبات ترسيب يافته در ساحل بيرونى داراى حجم و ارتفاع بیشتری خواهند بود. نحوه ترسیب بدین صورت است که پشته ترسيب يافته در پائيندست هر سازه، در راستاي ساحل بيروني و چسبیده به آن بوده است و با دورتر شدن از سازه بالادستی پشته ترسیبی از ساحل بیرونی فاصله گرفته و به طرف میانه مجرا منحرف می شد و یک مجرایی بین ساحل بیرونی و تاج پشته ترسیبی به وجود میآمد. بررسیها نشان دادند که در فواصل 4Le و 5Le رسوبات حاصل از فرسایش به طور کامل در بین دو سازه متوالی و در پاشنه ساحل بیرونی ترسیب یافتند و در فضای بین نوک صفحه و ساحل بیرونی ترسیب رسوب صورت گرفت به گونهای که باعث پوشیده شدن بخشی از محور صفحه شد (شکل (۱۵-الف)). بنابر این در این فواصل پشتههای ترسیب یافته در راستای ساحل بیرونی و چسبیده به آن هستند. ولی در صفحات با فاصله 8Le پشته ترسیبی قبل از رسیدن به سازه پائیندستی از ساحل بیرونی فاصله گرفته است و این به علت فاصله زیاد بین دو سازه متوالی بود. بنابر این در فضای بین نوک سازه و ساحل بیرونی ترسیب رسوب اتفاق نیفتاد (شکل (۱۵-ب)). مشاهدات بصری نشان داد که جریان در مجرای بین تاج پشته رسوبی و ساحل بیرونی (آزمایش 8Le)، در راستای ساحل بيروني بوده است که اين ميتواند باعث تشديد فرسايش در پنجه صفحات (نسبت به صفحات با فواصل 4Le و 5Le) و گسترش آن تا ساحل بیرونی گردد (شکل (۱۵-ب)). علاوه بر این، به علت ترسیب پشته رسوبی در نزدیکی پنجه صفحه پائیندستی، یک سری گردابههای قائم با محور افقی (عمود بر راستای جریان) در وجه بالادست محور صفحه پائين دستى ايجاد مىشود كه فرسایش در این بخش را تشدید میکند و باعث میشود فرسایش تا ساحل بیرونی پیشروی کند. در شکل (۱۵) ترسیب رسوبات بین دو سازه متوالی برای فواصل 4Le و 8Le نشان داده

4Le شده است. همان طور که ملاحظه می گردد در فاصله 4Le رسوبات بخشی از وجه بالادست محور سازه را پوشانده است و مانع از فرسایش در این قسمت می شود و فقط در وجه پائین دست محور سازه فرسایش، آن هم به صورت یکنواخت، رخ می-دهد. در فاصله 8Le تاج پشته رسوبی از بالادست به صورت زاویهدار نسبت به ساحل بیرونی ترسیب پیدا کرده است و تا نزدیکی پنجه سازه پائین دستی پیشروی کرده است.



(الف) 4Le



(ب) 8Le شکل ۱۵- ترسیب رسوب بین دو سازه متوالی در فواصل 4Le و 8Le

به عنوان نمونه در شکلهای (۱۶) و (۱۷) به ترتیب مقاطع عرضی بین دو سازه متوالی برای دبی ۳۰ لیتر در ثانیه برای فواصل 4Le و 8Le ارائه گردیده است. نمودارها نشان میدهند که در فاصله 4Le تاج همه پشتههای ترسیبی به ساحل بیرونی چسبیدهاند و با دور شدن از سازه بالادستی ارتفاع تاج پشته رسوبگذاری شده افزایش مییابد. شیب پشته ترسیب یافته در همه مقاطع عرضی تقریباً یکسان است. در فاصله 8Le تاج پشته

ترسیبی مقاطع عرضی نزدیک به سازه بالادستی، به ساحل بیرونی چسبیدهاند و با دور شدن از سازه بالادستی ارتفاع تاج پشته رسوبی و نیز فاصله آن از ساحل بیرونی بیشتر می گردد و یک مجرایی بین تاج پشته رسوبی و ساحل بیرونی ایجاد می-شود.



شکل ۱۶- پروفیلهای عرضی مقاطع بین دو سازه متوالی برای فاصله 4Le به ازای دبی ۳۰ لیتر در ثانیه



شکل۱۷- پروفیلهای عرضی مقاطع بین دو سازه متوالی برای فاصله 8Le به ازای دبی ۳۰ لیتر در ثانیه

صفحات مثلثی استفاده شده در این تحقیق دارای تاجی با شیب ۴/۰ میباشند. به طور متوسط شیب تاج پشتههای رسوبی در پاشنه ساحل بیرونی (به طرف میانه مجرا) برای فواصل 4Le، 4Le و 8Le و عالا به ترتیب ۵/۴۳۵، ۰/۴۳۲، ۰/۵۳۲ و ۴/۰۶ بود بنابر این شیب رسوبات ترسیب یافته در ساحل بیرونی تقریباً متناسب با شیب تاج صفحات مثلثی بوده است.

۴- نتیجهگیری

در این تحقیق به بررسی تأثیر فاصله بین صفحات مثلثی بر تغییرات توپوگرافی بستر، تحت شرایط هیدرولیکی متفاوت در فلوم قوسی ملایم ۹۰ درجه پرداخته شد. نتایج نشان دادند که

در همه آزمایشها حداکثر عمق آبشستگی در اطراف پنجه صفحات رخ داده است. با افزایش دبی جریان (عدد فرود جریان) و فاصله بین صفحات میزان آبشستگی در پنجه سازهها افزایش یافته است. در صفحات با فواصل 4Le و 5Le آبشستگی در پنجه سازهها تا ساحل بیرونی پیشروی نکرد؛ ولی در صفحات با فاصله 6Le به ازای اعداد فرود ۰/۲۹۲ و ۰/۳۲۱ آبشستگی در پنجه سازه انتهائی (سازه ۷) تا ساحل بیرونی گسترش یافت. برای صفحات با فاصله 8Le به ازای عدد فرود ۰/۲۶۲ در سازه انتهائی (سازه ۶)، به ازای عدد فرود ۰/۲۹۲ در سازههای ۵ و ۶ (دو سازه آخر) و به ازای عدد فرود ۰/۳۲۱ در سازههای ۲، ۴، ۵ و ۶ (تقریباً همه سازهها) آبشستگی پنجه تا ساحل بیرونی توسعه پیدا کرد. به طور متوسط حداکثر عمق آبشستگی در فواصل 4Le و 5Le و 6Le و 8Le به ترتيب ۰/۳۸، ۴۶/۰، ۵۲/۰ و ۱/۶۶ برابر طول مؤثر اولیه سازه میباشد. در همه آزمایشها به غیر از آزمایش 8Le (برای دبی ۳۳ لیتر در ثانیه)، حداکثر عمق آبشستگی در پشت محور صفحه رخ داده است. در آزمایش 8Le برای دبی ۳۳ لیتر در ثانیه، حداکثر عمق آبشستگی در محدوده بین محور سازه و ساحل بیرونی و با فاصله ۰/۳۲ برابر طول مؤثر اولیه سازه (۴/۵ سانتیمتر) از ساحل بیرونی اتفاق افتاده است و این به جهت پایداری ساحل بیرونی و سازه خطرناک میباشد. به طور متوسط فاصله حداکثر عمق آبشستگی از ساحل بیرونی برای فواصل 4Le، 5Le، 4Le و 8Le به ترتیب ۱/۳۶، ۱/۴، ۱/۴۱ و ۱/۴۵ برابر طول مؤثر اولیه سازه میباشد.

صفحات مثلثی با انحراف جریان از ساحل بیرونی به طرف میانه مجرا باعث آبشستگی بستر (خطالقعر) در مرکز و قوس داخلی مجرا گردید. با افزایش دبی جریان (عدد فرود جریان) و فاصله صفحات از یکدیگر، حداکثر عمق آبشستگی خطالقعر به ترتیب افزایش و کاهش یافت. به طور متوسط حداکثر عمق آبشستگی خطالقعر در فواصل ALe، SLe، موا و ALe به ترتیب آبشستگی خطالقعر در فواصل ALe، SLe، او یا 4 به ترتیب ممن به طور متوسط فاصله خطالقعر از ساحل بیرونی برای فواصل ALe، SLe، 4Le و ASe به ترتیب ۳/۳۳، ۳/۳۴ و

رسوبات حاصل از فرسایش توسط جریان نزدیک بستر و به موازات محور سازه به طرف ساحل بیرونی منتقل شدند و به صورت پشته رسوبی در پائین دست سازه ترسیب یافتند. نتایج نشان دادند که در هر فاصله با افزایش دبی جریان (یا عدد فرود جریان) به علت افزایش آبشستگی در پنجه سازهها حداکثر ارتفاع

- [5] Hey, R. D., "Environmentally Sensitive River Engineering", River Restoration, G. Petts and P. Calow, eds., Blackwell Science, Oxford, UK, 1996, 80-105.
- [6] Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG), "Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices", National Technical Information Services, US Department of Commerce, Springfield, VA, 1998.
- Bhuiyan, F., Hey, R. D., Wormleaton, P. R., "Effects of Vanes and Weirs on Sediment Transport in Meandering Channels", Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 135 (5), 339-349.
- [8] Bhuiyan, F., Hey, R. D., Wormleaton, P. R., "Bank-Attached Vanes for Bank Erosion Control and Restoration of River Meanders", Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 136 (9), 583-596.

[۹] بهرامی یاراحمدی، م.، شفاعی بجستان، م.، "تغییرات توپوگرافی بستر در قوس ملایم ۹۰ درجه با نصب آبشکن مثلثی شکل"، مجله علمی پژوهشی عمران مدرس، ۱۳۹۳، ۱۴ (۳)، ۱۶۵–۲۰۳.

- [۱۰] بهرامی یاراحمدی، م.، شفاعی بجستان، م.، "بررسی تغییرات طول مؤثر صفحات مثلثی شکل بر الگوی فرسایش و رسوبگذاری در قوس ملایم ۹۰ درجه"، نشریه مهندسی عمران فردوسی، ۱۳۹۴، ۲۷ (۱).
- [۱۱] بهرامی یاراحمدی، م.، شفاعی بجستان، م.، موسوی جهرمی، س. ح.، "تاثیر ترکیب تیغه افقی و سرریزهای مثلثی شکل بر تغییرات توپوگرافی بستر در قوس ملایم
 ۹۰ درجه"، مجله علوم و مهندسی آبیاری، ۱۳۹۳ (پذیرفته شده برای چاپ).
- [۱۲] بهرامی یاراحمدی، م.، شفاعی بجستان، م.، موسوی جهرمی، س. ح.، "مقایسه عملکرد سازههای اصلاح کننده الگوی جریان در قوسها"، کنفرانس بینالمللی عمران معماری و توسعه پایداری شهری، تبریز، ایران، ۲۸–۲۷ آذر، ۱۳۹۲.
- [13] Johnson, P. A., Hey, R. D., Tessier, M., Rosgen, D. L., "Use of Vanes for Control of Scour at Vertical Wall Abutments", Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127 (9), 772-778.

رسوبات ترسیبی، افزایش یافت در ضمن به ازای اعداد فرود یکسان با افزایش فاصله سازهها از یکدیگر حداکثر ارتفاع رسوب-گذاری کاهش پیدا کرد. به طور متوسط حداکثر ارتفاع رسوبات ترسیب یافته در فواصل 4Le، 5Le، 5Le و 8L8 به ترتیب ۱۹۶۰، ۳۹/۰۰ و ۲۹/۰ و ۲۰/۳ برابر طول مؤثر اولیه سازه میباشد. به طور متوسط شیب پشتههای رسوبی در ساحل بیرونی مجرا برای فواصل 4Le، 5Le، و 8L8 به ترتیب ۲۰/۴۳۰، ۲۴۳۰، ۲۵۳۲ و ۱۹۶۶ بود که تقریباً متناسب با شیب تاج صفحات مثلثی میباشد.

نتیجه کلی که میتوان از این تحقیق گرفت این است که استفاده از صفحات مثلثی در قوسها باعث کنترل فرسایش در قوس بیرونی، تشکیل ساحل جدید در ساحل بیرونی، انحراف جریان از قوس بیرونی به طرف مرکز و قوس داخلی مجرا، تخریب ساحل داخلی و بهبود شرایط قایقرانی در قوسها می-شود. در واقع این سازه مزایای سازههای آبشکن و سرریزهای مستغرق را به صورت یکجا دارا میباشد.

۵- تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی از محل پژوهانه نویسنده دوم انجام شده است. بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی میشود.

8- مراجع

- [1] Julien, P. Y., "River Mechanics", Cambridge University Press, 2002.
- [2] Shields, F. D., "Design of Habitat Structures for Open Channels", Journal of Water Resources Planning and Management, 1983, 109 (4), 331-344.
- [3] Hey, R. D., "River Mechanics and Habitat Creation", Fisheries in the year 2000, K. T. O'Gardy, A. J. B. Butterworth, R. P. Spillett, J. C. J. Domaniewski, eds., Institute of Fisheries Management, Nottingham, UK, 1992, pp 271-285.
- [4] Hey, R. D., "Restoration of Gravel Bed Rivers: Principles and Practice", In Natural Channel Design: Perspective and Practice, D. Shrubsole, ed., Canadian Water Resources Association, Cambridge, Ont., Canada, 1994, pp 157-173.

EXTENDED ABSTRACT

The Effect of Triangular Vanes in a 90 Degree Mild Bend on Bed Topography

Mohammad Bahrami Yarahmadi, Mahmood Shafai Bejestan *

College of Water Science Engineering, Shahid Chamran University, Ahwaz

Received: 29 August 2014; Accepted: 13 April 2015

Keywords:

Triangular vanes, River restoration, Banks erosion, River bend, In-stream structures

1. Introduction

Human interferences in rivers such as sand mining, infrastructure building, artificial cutoffs, etc., lead to the destruction of their dynamic equilibrium. This can cause banks erosion and lateral migration of the river. Bank erosion causes disturbance of private and public lands, damages aquatic and riparian ecosystems, and degrades water quality [1].

In-stream structures are proposed in order to enhance and restore habitat for fish and other aquatic organisms, protect stream banks; in this regard few studies have been conducted about them. Triangular vanes are in-stream structures oriented upstream at an angle of 20° – 30° to the flow and inclined into the stream bed such that the vane tips are submerged even during low flow [2-6]. Although the structure has been mentioned in many documents, the first systematic study on the effects of the vanes was published by Bhuiyan et al. [7]. In their experimental tests, both single and multiple vanes with an effective length of one-third of the channel's width were tested. The results demonstrated that when a single or an array of such vanes is installed, the scour hole at the base of the outer bank is infilled and the thalweg is relocated towards the center of the river. Among the different types of vanes, installed vanes with an angle of 30° were found to have the best performance. They concluded that more research and studies must be conducted to determine the appropriate space between the triangular vanes because of shortage of precise criteria and information about the appropriate space between them. Therefore, the present study expands on the experimental works of Bhuiyan et al. [7] to resolve some shortcomings in the design of triangular vanes attached to the banks as a new and efficient countermeasure against bank erosion.

2. Experimental setup

The experiments were carried out in a single-bend laboratory flume of constant width, B=70 cm, and central angle 90°. The bend is connected to an upstream straight reach 5 m long and a downstream straight reach 3 m long. Also, the ratio of the curvature's radius to the flume's width (*R/B*) equals 4. The flow discharge was measured by an ultrasonic flowmeter model of Digi Sonic E+ (accuracy of ± 0.01 L/s). The flume's bed was covered by uniform sand with the mean diameter of $d_{50}=1.5$ mm and the geometric standard deviation ($\sigma = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$) equal to 1.22 in all

of the experiments. To investigate the effect of the space between triangular vanes series of multiple-vanes were installed at four different spaces (4Le, 5Le, 6Le and 8Le in which Le is the vane's effective length measured from the vane's tip to the outer bank). In this research, one-fifth of flume width (Le=14 cm) is used for the effective length of the vanes. Triangular vanes were installed at angle of 30° to the upstream bank. The experiments were conducted under different flow conditions (Froude numbers 0.243, 0.262, 0.292 and 0.321). In all tests, flow depth (*h*) was kept constant equal to 13 cm. The flow depth was chosen such that the vane crest level at the outer bank and the water surface are identical. The experiments were carried out in clear water conditions. Totally, 16 tests were carried out. Each test was last for 3 hours. At the end of each test once the bed was drained, bed topography was measured using a bed profiler instrument.

* Corresponding Author

E-mail addresses: m_bahrami_1085@yahoo.com (Mohammad Bahrami Yarahmadi), m_shafai@yahoo.com (Mahmood Shafai Bejestan).

3. Results and discussion

3.1. Scour at the tip of vane

The scour hole was observed at the tip of vanes for whole spaces. In addition, more spaces between vanes, more scouring at tips. In vanes with spaces of 4Le and 5Le the scour hole was not developed to the outer bank. In space of 6Le for Froude numbers of 0.292 and 0.321, the scour hole at the tip of the last vane developed towards the outer bank. Whilst for vane's space of 8Le the scour hole for Fr=0.262 at the tip of the last vane (structure 6), for Fr=0.292 at the tip of the structures 5 and 6 (two last vanes) and for Fr=0.321 at the tip of all vanes were developed towards the outer bank which is not favorite from an engineering point of view. The eroded sediments were transported by the near-bed flow towards outer bank and were deposited in the outer bank toe. In practice, when the vanes are installed for bank protection, sediment deposition between vanes causes filling previous outer bank scour hole and creating new bank.

In all tests, the maximum scour depth occurred around the vanes' toes. In Fig. 1, the normalized diagram of maximum scour depth for different tests has been illustrated. As seen from the figure, maximum scour depth increases with increasing the vanes' space. For Fr=0.321 the maximum scour depth at the tip of vanes with space of 4Le was found to be 0.615*h*; The maximum scour depth for spaces of 5Le, 6Le and 8Le was measured to be equal to 0.661, 0.692, and 0.815 times *h* respectively, which shows an increase of 7.5%, 12.5% and 32.5% compare to the vane's space of 4Le.



Fig. 1. Normalized diagram of maximum scour depth for different tests

In all tests, except the space of 8*Le* for Fr=0.321, maximum scour depth occurred at $d/B \ge 0.25$ (*d* and *B* are distance of maximum scour depth from the outer bank and flume's width, respectively). In average, the distance of maximum scour depth from the outer bank for vane's spaces of 4*Le*, 5*Le*, 6*Le* and 8*Le* is equal to 0.27, 0.28, 0.28 and 0.29 times *B*, respectively. In vane's space of 8*Le* for Fr=0.321, the maximum scour depth occurred between the vane's tip and the outer bank and its distance from the outer bank was equal to 0.064*B*.

3.2 Thalweg

Installation of vanes at outer bank will shift the thalweg towards the channel midway. In Fig. 2, the normalized diagram of maximum scour depth of thalweg (ds_2/h) for various tests is depicted. The diagram displays that increasing the vanes' space decreases the maximum scour depth of thalweg. For Fr=0.321, the maximum scour depth of thalweg for spaces of 4*Le*, 5*Le*, 6*Le* and 8*Le* is 0.57, 0.54, 0.51 and 0.47 times the flow depth, respectively. The maximum scour depth of thalweg for the vanes with spaces of 5*Le*, 6*Le* and 8*Le* decreased 5%, 11% and 19% compare to the vane's space of 4*Le*.



Fig. 2. Normalized diagram of maximum scour depth of thalweg for various tests

In all of the experiments, the maximum scour depth at the tip of vane (ds_1) was found to be greater than maximum scour depth of thalweg (ds_2) . For Fr=0.321, the maximum scour depth of thalweg for spaces of 4*Le*, 5*Le*, 6*Le* and 8*Le* is 94%, 83%, 74% and 58% of the maximum scour depth at the vane's toe, respectively. Moreover, in all of the tests, the thalweg is formed in the inner half of the bend. In average, the distance of thalweg from the outer bank for the vanes with spaces of 4*Le*, 5*Le*, 6*Le* and 8*Le* is 0.67, 0.69, 0.65 and 0.64 times *B*.

4. Conclusions

The results showed that the triangular vanes caused flow diversion from outer bank towards the center and inner bend and thus the formation of thalweg near inner bank. By increasing the vane spaces, the eroded thalweg decreased. On average, the maximum scour depth of thalweg in 4Le, 5Le, 6Le and 8Le space was found to be equal to 0.36, 0.33, 0.3 and 0.26 times Le, respectively. In all tests, the maximum scour depth was observed at the toe of all vanes. By increasing the space between the triangular vanes, the scour around the vane's tip and its development to the outer bank increased. On average, the maximum scour depth for spaces of 4Le, 5Le, 6Le and 8Le was calculated to be 0.38, 0.46, 0.52 and 0.66 times Le, respectively. Based on the analyzed scouring and deposition patterns, it is recommended that the spacing between the vanes should not exceed 5Le.

5. References

- Bhuiyan, F., Hey, R. D., Wormleaton, P. R., "Bank-Attached Vanes for Bank Erosion Control and Restoration of River Meanders", Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 136 (9), 583-596.
- [2] Hey, R. D., "River Mechanics and Habitat Creation", Fisheries in the year 2000, K. T. O'Gardy, A. J. B. Butterworth, R. P. Spillett, J. C. J. Domaniewski, eds., Institute of Fisheries Management, Nottingham, UK, 1992, PP 271-285.
- [3] Hey, R. D., "Restoration of Gravel Bed Rivers: Principles and Practice", In Natural Channel Design: Perspective and Practice, D. Shrubsole, ed., Canadian Water Resources Association, Cambridge, Ont., Canada, 1994, PP 157-173.
- [4] Hey, R. D., "Environmentally Sensitive River Engineering", River Restoration, G. Petts and P. Calow, eds., Blackwell Science, Oxford, UK, 1996, 80-105.
- [5] Julien, P. Y., "River Mechanics", Cambridge University Press, 2002.
- [6] Rosgen, D. L., "Applied River Morphology", Wildland Hydrology, Pagosa Spring, Colo, 1996.
- [7] Rosgen, D. L., "The Cross Vane, W-weir and J-hook Structures: Description, Design and Application for Stream Stabilization and River Restoration", Wildland Hydrology, Inc. 11210 N. County Road 19 Ft. Collins, Colorado, 2006.