

# بررسی آزمایشگاهی اثر شکاف بر آبخستگی بستر در سری صفحات مثلثی متصل به ساحل در خم ۹۰ درجه ملایم

محسن درستی<sup>۱\*</sup>، احمد فتحی<sup>۲</sup> و محمد محمودیان شوشتری<sup>۳</sup>

<sup>۱\*</sup> - نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

mohsendrosti@yahoo.com

<sup>۲</sup> - استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

<sup>۳</sup> - استاد بازنشسته گروه عمران، دانشکده مهندسی دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۹۵/۶/۲۷

تاریخ دریافت: ۹۵/۴/۹

## چکیده

صفحات مثلثی متصل به ساحل، روشی جدید برای کنترل فرسایش و کمک به حفظ سواحل در رودخانه‌های پیچان‌رودی هستند. این سازه‌ها در معرض فرسایش ناشی از تمرکز جریان در قسمت دماغه خود می‌باشند. به همین دلیل باید با روش‌هایی مانع از تخریب این سازه و صدمه‌های مالی و جانی جبران‌ناپذیر شد. یکی از این روش‌ها استفاده از شکاف است. در تحقیق حاضر ابتدا از سری صفحات مثلثی که یک شکاف مستطیلی به موازات وتر، با سطح بازشدگی ۱۰ درصد مساحت کل صفحه و با نسبت  $a/b=4$  و  $a$  و  $b$  به ترتیب طول و عرض شکاف) در موقعیت نزدیک به بستر در آن‌ها ایجاد شده، استفاده شد. زاویه صفحات نسبت به ساحل بالادست ۳۰ درجه بود. آزمایش‌ها تحت فواصل کارگذاری متفاوت، ۴، ۶ و ۸ برابر طول مؤثر، با شرایط هیدرولیکی متفاوت (اعداد فرود ۰/۲۸۷، ۰/۳۰۴، ۰/۳۲۲) و آب زلال انجام شد. در تمامی آزمایش‌ها عمق جریان ثابت و برابر ۱۴ سانتی‌متر بوده است. سپس نتایج به دست آمده با حالت بدون شکاف مقایسه گردید. نتایج نشان داد که شکاف باعث کاهش اعماق آبخستگی حول دماغه‌ی صفحات می‌شود. درصد کاهش متوسط اعماق آبخستگی حول دماغه‌ی صفحات در فواصل ۴، ۶ و ۸ برابر طول مؤثر به ترتیب ۹ درصد، ۱۷ درصد و ۱۸ درصد به دست آمد. صفحات مثلثی، باعث انحراف جریان از قوس بیرونی به طرف مرکز کانال شدند و تشکیل خط‌القعر دادند. شکاف باعث حداکثر عمق آبخستگی خط‌القعر شد، به طور میانگین، درصد کاهش حداکثر عمق آبخستگی خط‌القعر در فواصل ۴، ۶ و ۸ برابر طول مؤثر به ترتیب ۲۲/۶ درصد، ۴۶ درصد و ۳۰ درصد بود. طول مؤثر اولیه یک پنجم عرض فلوم بود. با شروع آزمایش و فرسایش اطراف سازه‌ها، طول مؤثر اولیه افزایش یافت، همچنین شکاف باعث کاهش تغییرات طول مؤثر صفحات شد. به طور میانگین درصد کاهش متوسط تغییرات طول مؤثر در فواصل ۴Le، ۶Le و ۸Le به ترتیب ۱۵/۵ درصد، ۱۳/۷ درصد و ۱۵/۷ درصد بود.

کلیدواژه‌ها: شکاف، صفحات مثلثی، آبخستگی بستر، خم ۹۰ درجه ملایم.

## Experimental Investigation the effect of slot on bed scouring in Series Triangular of Vane Attached to The Bank in 90 Degree Mild Bend

M. Dorosti<sup>1\*</sup>, A. Fathi<sup>2</sup> and M. Mahmoodian Shoshtari<sup>3</sup>

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

2- Assistant Professor Water Structures Department, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz.

3- Retired Professor, Department of Civil, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz.

Received: 29 June 2016

Accepted: 17 September 2016

## Abstract

Triangular vanes attached to the bank are a new method to control erosion and help protection the bank in meandering rivers. This structure is subjected to scouring due to flow convergence at the tips of the structures. Therefore, countermeasure methods should be employed in order to

prevent financial damages and life hazards. One of these methods is to use a slot. In this study, the series of triangular vanes that a parallel chord rectangular slot, with the opening of the full vane area of 10% and a ratio of  $a/b=4$  ( $a$  and  $b$  are the length and width of the slot) the bed in which they are established position near has been used. The vanes angle is 30 degrees upstream of the bank. Experiments under different installation distances, 4, 6 and 8 times the effective vane length, hydraulic conditions are different (Froude number 0.287, 0.304, 0.322), and the clear water. In all experiments depth of flow is constant and equal to 14 cm. Then the results were compared with no slot. The results showed that the slot reduces the average depths of scour around the tips of vanes. In average, the reduce percent of the average scour depths around the tips of the structure in distances  $4L_e$ ,  $6L_e$  and  $8L_e$  is equal to 9 percent, 17 percent and 18 percent respectively. The triangular vanes caused flow diversion from outer bank towards the center bend and thus the formation of thalweg. The slot reduces the maximum depth of scour thalweg. In average, the reduce percent of the maximum depth of scour thalweg in distances  $4L_e$ ,  $6L_e$  and  $8L_e$  is equal to 22.6 percent, 46 percent and 30 percent respectively. The first of effective length of vanes was 1/5 flume wide. In start tests and erosion around the vanes increased the first of effective length of vanes. The slot reduces the effective length variation of vanes. In average, the reduce percent of average the effective length variation of vanes in distances  $4L_e$ ,  $6L_e$  and  $8L_e$  is equal to 15.5 percent, 13.7 percent and 15.7 percent respectively.

**Keywords:** Slot, Triangular vanes, Bed scouring, 90 degree mild bend.

کنده شده توسط الگوی جریان حلزونی، به صورت ماریچی منتقل می‌شوند. با فرسایش پاشنه ساحل در قوس خارجی توده خاک ساحل ناپایدار شده و تخریب می‌شود. صفحات مثلثی متصل به ساحل، روشی جدید برای کنترل فرسایش و کمک به حفظ سواحل در رودخانه‌های پیچان رودی هستند. صفحات مثلثی شکل از جمله سازه‌هایی است که از جنس چوب، فلز، بتن و یا مواردی نظیر آن ساخته می‌شوند که با زاویه کم (۳۰-۲۰ درجه) نسبت به ساحل بالادست و به صورت شیب‌دار از ساحل تا بستر رودخانه به گونه‌ای که حتی در جریان‌های کم مستغرق می‌باشند احداث می‌شوند (بهرامی یاراحمدی و شفاعی بجستان، ۱۳۹۴، ب). به منظور کاهش فرسایش در قوس خارجی با استفاده از صفحات مثلثی متصل به ساحل تحقیقاتی در داخل و خارج کشور صورت گرفته است. بویان و همکاران (۲۰۰۹ و ۲۰۱۰) در تحقیقی جهت کنترل فرسایش انحنای رودخانه از صفحات متصل به ساحل استفاده نمودند، آن‌ها در آزمایش‌های خود از دو حالت تک صفحه و سری صفحات با طول مؤثر یک‌سوم عرض کانال استفاده کردند، نتایج نشان داد وقتی یک یا گروهی از صفحات متصل به ساحل نصب می‌شوند چاله‌ی فرسایشی در ساحل خارجی پُر می‌شود و خط‌القعر به طرف مرکز رودخانه منتقل می‌شود و تک‌صفحه‌ای که با زاویه‌ی ۳۰ درجه نسبت به ساحل بالادست کارگذاری شد بهترین عملکرد را از خود نشان داد. بهرامی یاراحمدی و شفاعی بجستان (۱۳۹۳ و ۱۳۹۴، الف و ب) به بررسی اثر زاویه تک صفحه مثلثی نسبت به ساحل بالادست و طول مؤثر صفحه مثلثی، بر تغییرات توپوگرافی بستر در اطراف آن‌ها تحت شرایط هیدرولیکی متفاوت پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که، زوایای ۲۳ و ۳۰ درجه نسبت به سایر زوایا کمترین عمق و

#### مقدمه

یکی از اصلی‌ترین مشکلاتی که همواره در پیچ رودخانه‌ها وجود داشته، تغییر نیم‌رخ عرضی سرعت جریان است که تحت تأثیر دبی رودخانه و شرایط کانال موجب فرسایش ساحل خارجی رودخانه می‌شود. با ورود جریان به قوس (خم)، سطح آب در قوس خارجی نسبت به قوس داخلی بالاتر قرار گرفته و گرادیان فشار در جهت شعاعی ایجاد می‌گردد. نیروی ناشی از گرادیان فشار، سعی در انتقال ذرات سیال به سمت قوس داخلی را دارد. از طرف دیگر با ورود جریان به قوس ذرات سیال تحت تأثیر نیروی جانب مرکز قرار می‌گیرند که این نیرو تمایل به انتقال ذرات سیال به طرف قوس خارجی را دارد. با توجه به پروفیل قائم سرعت مماسی و اینکه سرعت جریان در سطح آب بیشتر از کف می‌باشد، بنابراین ذرات در سطح آب نسبت به کف تحت نیروی گریز از مرکز بیشتری قرار می‌گیرند. در نتیجه در سطح آب با توجه به غلبه نیروی ناشی از شتاب جانب مرکز بر نیروی ناشی از گرادیان فشار، ذرات به سمت قوس خارجی رانده می‌شوند و با توجه به پیوستگی جریان و غلبه نیروی ناشی از گرادیان فشار نزدیک کف بر نیروی ناشی از شتاب جانب مرکز، ذرات نزدیک کف به سمت قوس داخلی حرکت می‌نمایند و بنابراین در مقطع عرضی یک جریان دوطرفه که در سطح به سمت قوس خارجی و در کف به سمت قوس داخلی است، ایجاد می‌گردد که به جریان ثانویه معروف است. اندرکش جریان ثانویه با پروفیل غیریکنواخت سرعت طولی، الگوی خاصی از جریان را ایجاد کرده که به جریان حلزونی معروف است. در الگوی جریان ثانویه به دلیل حرکت رو به پایین جریان در محل ساحل خارجی و برخورد آن به بستر در محل پاشنه ساحل و تغییر جهت آن، ذرات رسوبی در این مکان تحت تأثیر نیروهای هیدرودینامیک می‌توانند از جا کنده شوند. ذرات

در پایه پل دوکی شکل را مورد بررسی قرار داد. آزمایش‌ها در شرایط آب زلال و رسوبات با دانه‌بندی غیریکنواخت بوده و شکاف مستطیلی نزدیک بستر با عرض  $0/25$  قطر پایه انتخاب گردیده است. نتایج نشان داده است اعمال شکاف در مقطع دوکی شکل، فرسایش بستر را تا  $28$  درصد کاهش می‌دهد. آقاخانی افشار (۱۳۸۰) با انجام آزمایش‌هایی به بررسی اثر شکاف پایه و ارتفاع آن بر روی آبستنگی موضعی اطراف پایه پل با مقطع دایره‌ای در شرایط آب زلال پرداختند. آزمایش‌ها، عمل کرد مفید شکاف را در کاهش آبستنگی موضعی اطراف پایه نشان دادند. حیدر نژاد و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۰) تأثیر شکاف را در کاهش آبستنگی اطراف پایه‌های پل در قوس  $180$  درجه بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد درصد کاهش آبستنگی به ازای قرارگیری شکاف در ارتفاع‌های مختلف از سطح بستر بین  $12$  تا  $24$  درصد می‌باشد. در زمینه استفاده از شکاف برای کاهش آبستنگی اطراف آبسکن‌ها تحقیقاتی توسط عبدالله پور و همکاران (۱۳۹۲) در زمینه عملکرد مدل‌های مختلف شکاف با تغییرات ارتفاع، عمق، عرض شکاف، همچنین فاصله از دماغه آبسکن مورد ارزیابی قرار گرفته و با حالت آبسکن بدون شکاف مقایسه گردید. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مدل‌های دارای شکافی که شامل ارتفاع شکاف تا زیر بستر و دارای عرض شکاف بیشتر باشند عملکرد بهتری در کاهش عمق و ابعاد حفره آبستنگی داشتند. همچنین درصد کاهش عمق آبستنگی برای مدل‌ها از  $11/8$  تا  $43$  درصد متغیر بود. درستی و همکاران (۱۳۹۵، الف) اخیراً به بررسی اثر شکاف در سری صفحات مثلثی متصل به ساحل بر آبستنگی موضعی در قوس ملایم  $90$  درجه پرداختند، نتایج آن‌ها نشان داد که صفحات شکاف دار عملکرد بهتری نسبت به حالت بدون شکاف در کنترل آبستنگی بستر داشته است به طوری که میزان متوسط عمق آبستنگی پای سازه‌ها را به میزان  $20$  درصد نسبت به حالت بدون شکاف کاهش می‌دهد. با توجه به اینکه در رابطه با عملکرد شکاف در صفحات مثلثی شکل و تأثیر آن بر الگوی آبستنگی بستر در قوس  $90$  درجه تحقیقاتی اندکی صورت گرفته است. لذا در تحقیق حاضر به بررسی اثر شکاف در سری صفحات متصل به ساحل بر آبستنگی بستر در شرایط هیدرولیکی و فواصل متفاوت در قوس ملایم  $90$  درجه پرداخته شده است.

### مواد و روش‌ها

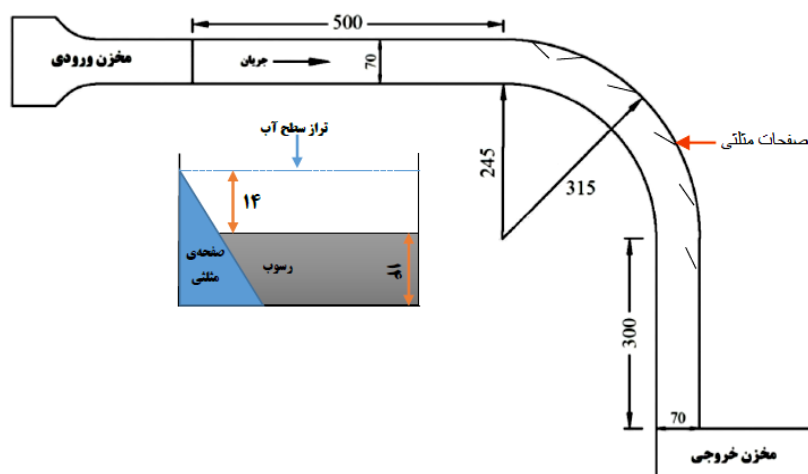
از یک فلوم قوسی با دیواره پلکسی‌گلاس، به عرض  $70$  سانتی‌متر و با زاویه مرکزی  $90$  درجه برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام گرفت. نسبت شعاع قوس به عرض فلوم  $4$  بوده که در گروه قوس‌های ملایم قرار دارد. طول کانال مستقیم در بالادست قوس  $5$  متر و در پائین دست قوس  $3$  متر بوده است. در انتهای فلوم یک درپچه کشویی جهت

حجم آبستنگی را داشتند. در ضمن برخلاف سایر زوایا که آبستنگی پنجه سازه به طرف سواحل بالادست و پائین دست صفحه گسترده می‌شد، در این زوایا چاله آبستنگی در پائین دست محور سازه و به موازات آن تشکیل می‌گردید و حداکثر عمق آبستنگی در پشت محور سازه رخ می‌داد. از دیگر نتایج تحقیقات آن‌ها، کاهش حداکثر عمق آبستنگی با کاهش طول مؤثر صفحه بود به گونه‌ای که طول‌های مؤثر یک‌پنجم و یک‌هفتم عرض مجرا دارای کمترین عمق آبستنگی بوده‌اند. بدری و شفاعی بجستان (۱۳۹۳) تحقیقاتی جهت مقایسه عملکرد صفحات مستطیلی و مثلثی در کنترل فرسایش در خم رودخانه‌ها در یک فلوم قوسی شکل  $90$  درجه ملایم پرداختند، نتایج نشان داد که حداکثر عمق آبستنگی صفحات مثلثی به طور متوسط  $80$  درصد کمتر از صفحات مستطیلی است. سازه‌های اصلاح الگوی جریان، با اینکه وظیفه حفاظت از ساحل را در مقابل فرسایش بر عهده دارند متأسفانه خود سازه به صورت مانعی در مقابل جریان اصلی هستند که منجر به تشکیل الگوهای پیچیده و مخرب جریان در دماغه و در نتیجه در معرض فرسایش و تخریب می‌باشند. به همین دلیل باید به دنبال روش‌هایی بود تا مانع از تخریب این سازه شد. یکی از این روش‌ها، استفاده از شکاف<sup>۱</sup> است. کاربرد اصلی شکاف، منحرف کردن جریان پایین‌رونده و جریان‌های کناری در وجه بالادست سازه به طرف میانه فلوم و کاهش قدرت گردابه‌های اطراف آبسکن‌ها و صفحات متصل به ساحل می‌باشد. در زمینه استفاده از شکاف برای کاهش آبستنگی اطراف سازه‌ها تحقیقاتی توسط حیدرپور و همکاران (۱۳۸۲) به منظور کنترل و کاهش آبستنگی در پایه پل با مقاطع مستطیلی گرد گوشه صورت گرفت. نتایج نشان داد که حداکثر کاهش آبستنگی برای شکاف‌هایی که نزدیک سطح بستر ایجاد شد اتفاق می‌افتد. چیو<sup>۲</sup> (۱۹۹۲) در مطالعات خود پارامترهایی هم چون عرض، ارتفاع و موقعیت شکاف را بر روی پایه پل بررسی نمود. نتایج نشان داد که با قرارگیری یک شکاف با عرض  $0/25$  برابر قطر پایه پل و ارتفاع شکاف  $2$  برابر قطر پایه  $a/b=8$  و  $a$  و  $b$  به ترتیب طول و عرض شکاف، شکاف نزدیک بستر به میزان  $20$  درصد و نزدیک سطح آب تا  $5$  درصد به کاهش عمق آبستنگی کمک می‌کند. همچنین شکافی به عرض نصف پایه و ارتفاع دو برابر قطر پایه ( $a/b=4$ ) می‌تواند عمق آبستنگی را به میزان  $30$  درصد کاهش دهد. کومار و همکاران<sup>۳</sup> (۱۹۹۹) پژوهشی را به منظور تعیین میزان اثر شکاف با ارتفاع و زوایای مختلف نسبت به جریان، در کاهش عمق آبستنگی موضعی انجام دادند. با بررسی نتایج معلوم شد که با افزایش ارتفاع شکاف، از عمق آبستنگی کاسته می‌شود، همچنین با افزایش زاویه برخورد جریان به پایه پل بر میزان آبستنگی موضعی افزوده می‌شود. کریستین<sup>۴</sup> (۲۰۰۹) تأثیر شکاف مستطیلی

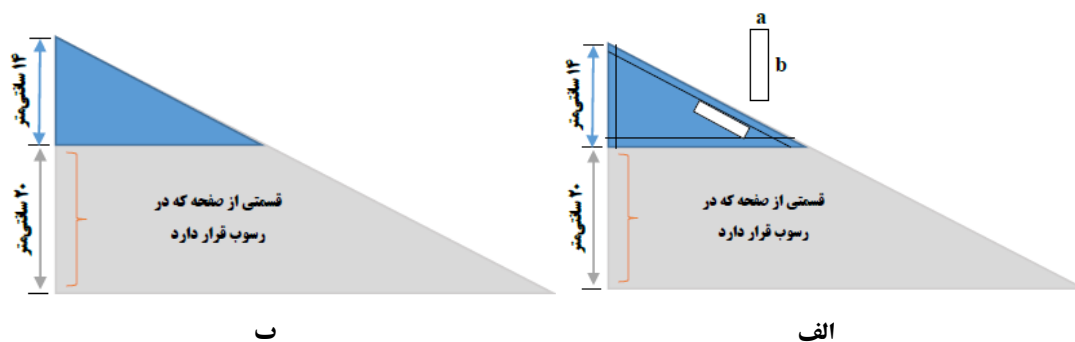
- 1- slot
- 2- Chiew
- 3- Kumar et al.
- 4- Christensen

ارتش آمریکا در قوس تعیین شد. بر این اساس در قسمت ورودی قوس، ساحل داخلی را امتداد داده تا قوس را قطع کند. محل کارگذاری اولین صفحه مثلثی به اندازه عرض فلوم بالاتر از نقطه تقاطع خواهد بود. محدوده محافظت شده تا  $1/5$  برابر عرض فلوم پس از انتهای قوس ادامه می‌یابد (ظهیری و همکاران، ۱۳۹۱). از فواصل  $4Le$ ،  $6Le$ ،  $8Le$  طول مؤثر) به ترتیب معادل  $0/56$ ،  $0/84$  و  $1/12$  متر برای کارگذاری صفحات مثلثی شکافدار و بدون شکاف متصل به ساحل استفاده شد. تعداد سازه‌های استفاده شده در فواصل  $4Le$ ،  $6Le$ ،  $8Le$  به ترتیب ۹، ۶، ۵ عدد بوده است. در همه آزمایش‌ها موقعیت نصب اولین سازه در زاویه ۲۴ درجه از ابتدای قوس قرار داشت و آخرین سازه نیز در فاصله‌های  $4Le$ ،  $8Le$ ،  $80$  سانتی‌متر پایین دست انتهای قوس و در فاصله  $6Le$ ،  $60$  سانتی‌متر پایین دست انتهای قوس کارگذاری شد. در این مطالعه چون هدف مقایسه آبشستگی بستر در دو حالت صفحات مثلثی شکافدار و بدون شکاف در قوس ۹۰ درجه ملازم بوده، بنابراین زمان انجام هر آزمایش سه ساعت در نظر گرفته شد (بهرامی یاراحمدی و شفاعی بجستان، ۱۳۹۴). برای انجام آزمایش‌ها از دبی‌های ۳۳، ۳۵، ۳۷ لیتر بر ثانیه با عمق ثابت ۱۴ سانتی‌متر (اعداد فرود  $0/287$ ،  $0/304$ ،  $0/322$ ) استفاده شد.

تنظیم عمق جریان قرار داشت. تنظیم دبی ورودی توسط شیرفلکه ورودی فلوم انجام می‌گرفت. میزان دبی ورودی توسط دبی سنج اولتراسونیک اندازه‌گیری می‌شد. از ماسه با قطر متوسط ( $d_{50}$ ) معادل  $1/5$  میلی‌متر و ضریب انحراف معیار هندسی معادل  $1/22$  به‌عنوان رسوبات بستر استفاده گردید و در لایه‌ای به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر در کف فلوم گسترانیده شد. در تمام آزمایش‌ها شرایط آب زلال حاکم بوده است. شکل (۱) پلان فلوم قوسی ۹۰ درجه و موقعیت کارگذاری صفحات مثلثی را نشان می‌دهد. صفحات مورد استفاده در این تحقیق، به شکل مثلث از جنس پلکسی‌گلاس و به ضخامت ۴ میلی‌متر انتخاب شد. زاویه صفحات نسبت به ساحل بالادست ۳۰ درجه، طول مؤثر (فاصله نوک صفحه مثلثی از ساحل بیرونی، که همان طول تصویر شده سازه است) در همه آزمایش‌ها یک‌پنجم عرض فلوم معادل ۱۴ سانتی‌متر انتخاب شد (بهرامی یاراحمدی و شفاعی بجستان، ۱۳۹۴). شکاف مورد استفاده در این تحقیق به صورت مستطیلی و به موازات وتر با نسبت  $a/b=4$  و  $a$  و  $b$  به ترتیب طول و عرض شکاف) با سطح بازدهی ۱۰ درصد مساحت کل سازه، انتخاب شد. شکل (۲) نمایی از صفحات مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. در این تحقیق ابتدا محدوده‌ی فرسایشی بر اساس نظر اداره مهندسی



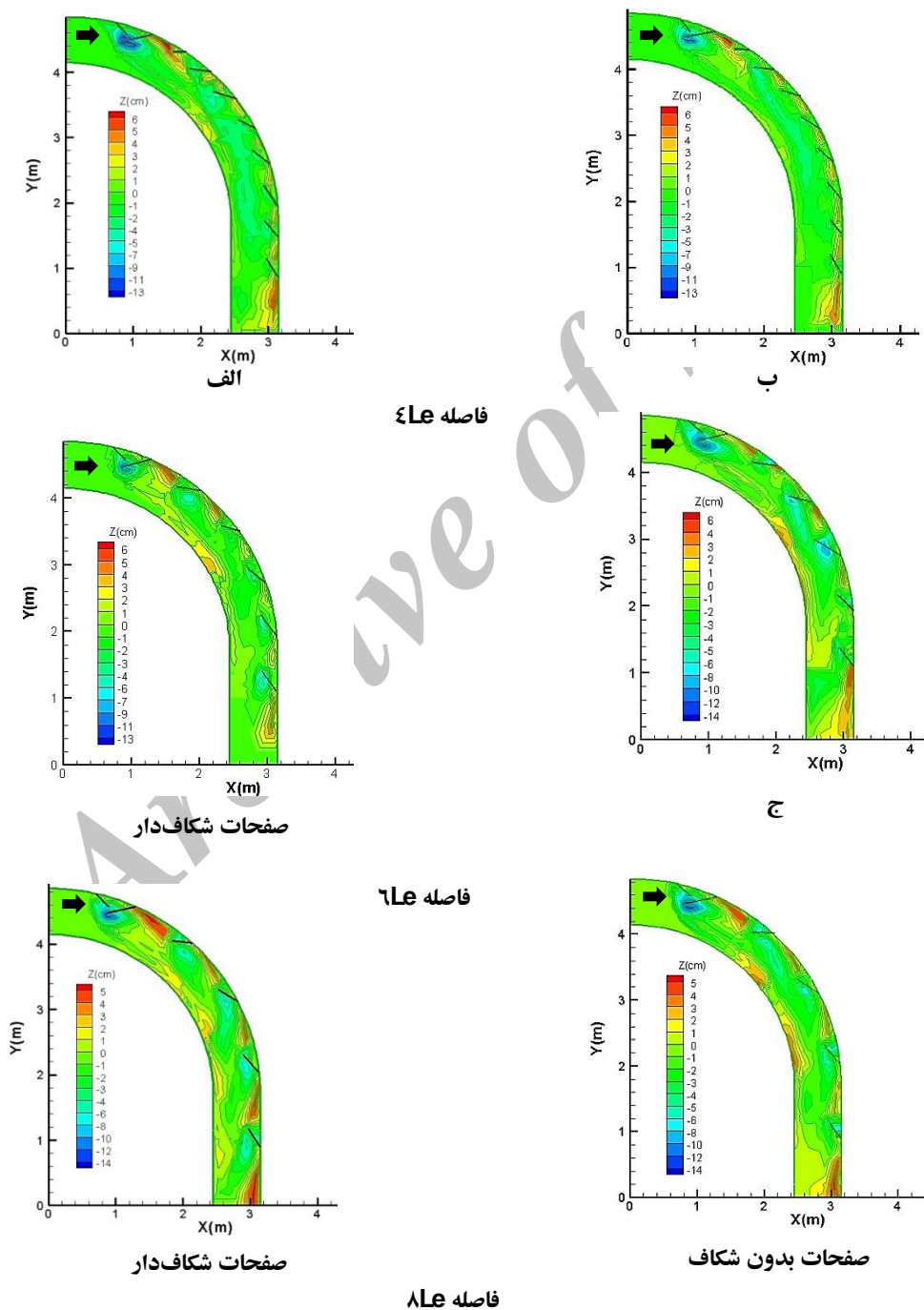
شکل ۱- پلان فلوم قوسی ۹۰ درجه و موقعیت نصب صفحات مثلثی در فاصله  $8Le$  (ابعاد بر حسب سانتی‌متر می‌باشند)



شکل ۲- صفحات مورد استفاده در این تحقیق، الف) صفحات شکافدار، ب) صفحات بدون شکاف

در نتیجه برای کاهش میزان آبستگي صفحه اول از يك صفحه جان پناه مستطیلی به طول ۲۸ سانتی متر و ارتفاع ۱۴ سانتی متر با زاویه ۱۵۰ درجه نسبت به ساحل بالادست، و با فاصله ثابت (۴Le)، معادل ۵۶ سانتی متر در موقعیت زاویه ۱۳ درجه از ابتدای قوس استفاده شده است (درستی و همکاران، ۱۳۹۵).

عمق آب به گونه ای انتخاب شد که بالاترین تراز تاج سازه (که چسبیده به ساحل بیرونی بود) و تراز آب، یکسان باشند. صفحات متصل به ساحل معمولاً به صورت سری استفاده می شوند و پایداری آنها بستگی زیادی به پایداری اولین صفحه دارد. به علت تنگ شدگی مقطع جریان و وجود گردابه های قوی، صفحه اول تحت حمله شدید جریان قرار دارد، به همین دلیل باید با روش هایی مانع از تخریب این سازه و عواقب ناشی از آن شد.



شکل ۳- توپوگرافی بستر در صفحات شکاف دار و بدون شکاف به ازای فواصل مختلف و عدد فرود ۰/۳۲۲

سمت پایین دست منتقل می‌شوند و این فرآیند تا پایین دست صفحه آخر ادامه پیدا می‌کند.

### اثر شکاف بر آبخستگی موضعی

بر پایه تجربیات گذشته بیشترین تخریب‌ها از ناحیه دماغه (پنجه) متوجه آبشکن‌ها و صفحات متصل به ساحل می‌شود (آبخستگی موضعی)، که عمده‌ترین دلایل تخریب در این قسمت شامل عدم محاسبه صحیح عمق آبخستگی است، لذا در این بخش به بررسی اثر شکاف بر عمق آبخستگی موضعی در صفحات متصل به ساحل در دو حالت شکاف‌دار و بدون شکاف پرداخته می‌شود. در همه آزمایش‌های مربوط به صفحات شکاف‌دار و بدون شکاف حداکثر عمق آبخستگی موضعی در اولین سازه رخ داده است. با وجود اینکه صفحه جان‌پناه مستطیلی باعث کمتر شدن قدرت گردابه‌های اطراف اولین سازه شد ولی بیشترین عمق آبخستگی در دماغه‌ی اولین سازه رخ داد. این رخداد به دلیل این است که صفحه اول تحت تنگ‌شدگی ناگهانی قرار می‌گیرد. در جدول (۱) نتایج مربوط به اعماق آبخستگی موضعی و درصد بهبود آن را توسط شکاف به صورت کمی بیان شده است. برای مقایسه اعماق آبخستگی موضعی صفحات شکاف‌دار و بدون شکاف در فواصل مختلف شکل (۴)، الف، ب و ج) به ترتیب در اعداد فرود ۰/۲۸۷، ۰/۳۰۴، ۰/۳۲۲، ۰/۳۲۲ ترسیم شد. شکل ۴ تغییرات اعماق آبخستگی موضعی حول دماغه‌ی صفحات در مقابل فواصل و اعداد فرود مختلف را نشان می‌دهد. محور عمودی، نسبت بی‌بعد متوسط اعماق آبخستگی موضعی به عمق جریان ( $ds1/Y$ ) و محور افقی فاصله‌های کارگذاری صفحات می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه اعداد فرود و فواصل مختلف صفحات شکاف‌دار نسبت به صفحات بدون شکاف عملکرد بهتری در کاهش متوسط اعماق آبخستگی موضعی حول صفحات داشته‌اند. این اتفاق به دلیل این است که شکاف با منحرف کردن گردابه‌های اطراف صفحات و همچنین جریان عبوری از روی سازه باعث کاهش تنش برشی اطراف صفحات و در نتیجه کاهش عمق آبخستگی می‌شود. به منظور بررسی اثر شکاف بر روی اعماق آبخستگی موضعی حول دماغه‌ی صفحات در اثر تغییرات فاصله‌ی بین صفحات و عدد فرود به ترتیب شکل (۵)، الف و ب) و ترسیم شده است. شکل (۵)، الف)، محور عمودی درصد کاهش متوسط اعماق آبخستگی حول دماغه صفحات در حالت شکاف‌دار نسبت به حالت بدون شکاف (درصد بهبود) و محور افقی فاصله‌ی کارگذاری بین صفحات را در شرایط هیدرولیکی متفاوت نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۵) و جدول (۱) مشاهده می‌شود در هر فرود با افزایش فاصله بین صفحات شکاف اثر مؤثرتری داشته و متوسط اعماق آبخستگی موضعی حول دماغه‌ی سازه‌ها را کاهش می‌دهد به طوری که بیشترین درصد بهبود در فاصله‌ی  $8Le$  و کمترین درصد بهبود در فاصله‌ی  $4Le$  اتفاق افتاده است. این موضوع عملکرد مناسب شکاف را با بیشتر شدن فواصل بین

نحوه انجام هر آزمایش بدین گونه بود که پس از تسطیح بستر، درحالی‌که دریچه کشویی انتهای فلوم کاملاً بسته بود با باز کردن شیرفلکه ورودی فلوم، جریان به آرامی وارد فلوم می‌شد به گونه‌ای که تغییری در توپوگرافی بستر ایجاد پس از بالا آمدن سطح آب، جریان به صورت تدریجی به دبی مورد نظر افزایش می‌یافت. سپس توسط دریچه کشویی، عمق جریان در حد مورد نظر تنظیم می‌گشت. پس از پایان یافتن مدت زمان آزمایش، ابتدا دریچه کشویی به آرامی پائین آورده می‌شد و سپس شیرفلکه ورودی فلوم بسته می‌شد 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 مترلیزری (BOSH GLM 30) با دقت یک میلی‌متر برداشت شد، سپس توپوگرافی بستر حول چاله فرسایشی به وسیله نرم‌افزار تک‌پلات ترسیم گرد.

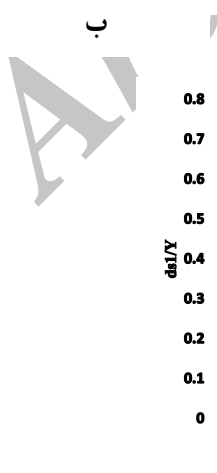
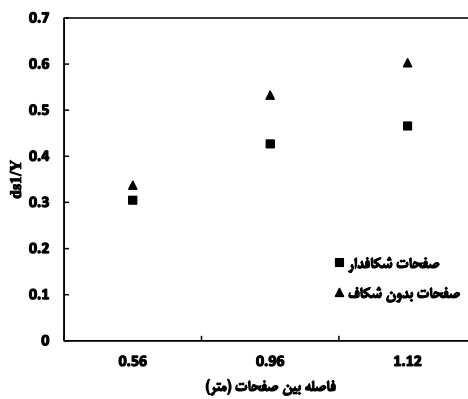
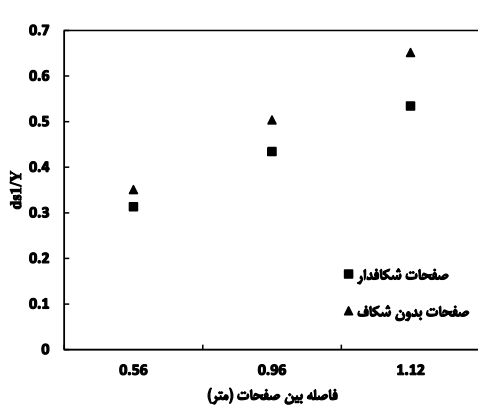
### نتایج و بحث

توپوگرافی برداشت شده به وسیله متر لیزری با استفاده از نرم‌افزار تک‌پلات ترسیم شد. شکل ۳ نمونه‌ای از توپوگرافی بستر در دو حالت صفحات شکاف‌دار و بدون شکاف در فواصل مختلف به ازای عدد فرود ۰/۳۲۲ نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً بیان شد هدف از این تحقیق بررسی اثر شکاف بر آبخستگی بستر در سری صفحات متصل به ساحل در فواصل و شرایط هیدرولیکی متفاوت می‌باشد. مشاهدات بصری (تزیق ماده رنگی و استفاده از خاکاره) نشان داد که در هر دو حالت، صفحات شکاف‌دار و بدون شکاف، جریان نزدیک شونده به صفحات از روی تاج سازه به طرف میانه فلوم منحرف می‌شد. جریان عبوری از روی تاج در پائین دست محور سازه به بستر برخورد می‌کرد و تشکیل جریان ثانویه پادساعتگرد می‌داد. از طرفی به علت تنگ شدن مجرای جریان عبوری، تنش برشی بستر افزایش یافت. برخورد جریان عبوری از روی تاج به بستر و افزایش تنش برشی بستر، باعث آبخستگی در اطراف صفحات و پائین دست محور آن‌ها شد. با ایجاد شکاف در صفحات، بخشی از گردابه‌های مخرب اطراف سازه منحرف شده و از داخل شکاف عبور کرد، این امر باعث کاهش تنش برشی ایجاد شده در بالادست سازه، کاهش قدرت گردابه‌های اطراف صفحات و کاهش مؤثر گرادیان فشار می‌شود و در نتیجه عمق آبخستگی اطراف دماغه‌ی سازه‌ها کاهش یافت. در هر دو صفحات با شکاف و بدون شکاف مواد رسوبی ناشی از آبخستگی جلوی صفحات توسط جریان نزدیک بستر در راستای محور سازه حمل شدند و با توجه به جریان ثانویه پادساعتگرد تشکیل شده پشت صفحات بخشی از رسوبات نزدیک به ساحل خارجی ترسیب یافتند و باعث ایجاد ساحل جدید شدند، بخشی از این مواد رسوبی وارد محدوده‌ی آبخستگی صفحه بعدی شدند. همین‌طور این ذرات نیز توسط گردابه‌های تشکیل شده اطراف این صفحه شسته و به همین ترتیب مواد رسوبی فرسایش یافته به

صفحات نشان می‌دهد، این رخداد به این دلیل است که با افزایش فاصله بین صفحات اثر بالادستی بر سازه‌ی پایین دست خود کاهش می‌یابد و در نتیجه اثر و عملکرد شکاف آشکارتر می‌شود.

جدول ۱- نتایج حاصل از بررسی اعماق آبستگي موضعي صفحات شكافدار و بدون شكاف

فاصله سازه‌ها (متر)	عدد فرود	عمق آبستگي موضعي صفحات بدون شكاف (سانتي‌متر)	عمق آبستگي موضعي صفحات شكافدار (سانتي‌متر)	پارامتر بي‌بعد عمق آبستگي موضعي (صفحات بدون شكاف)	پارامتر بي‌بعد عمق آبستگي موضعي (صفحات شكافدار)	درصد بهبود
۰/۵۶	۰/۲۸۷	۴/۷	۴/۲	۰/۳۳	۰/۳	۱۰/۶
۰/۸۴	۰/۳۰۴	۷	۶/۱	۰/۵	۰/۴۳	۱۴/۲
۱/۱۲	۰/۳۰۴	۹/۱	۷/۵	۰/۶۵	۰/۵۳	۱۷/۵
	۰/۳۲۲	۹/۴	۸	۰/۶۷	۰/۵۷	۱۴/۸



ج

شکل ۴- پارامتر بی‌بعد متوسط اعماق آبستگي موضعي در فواصل مختلف به ترتيب در اعداد فرود، الف) ۰/۲۸۷،

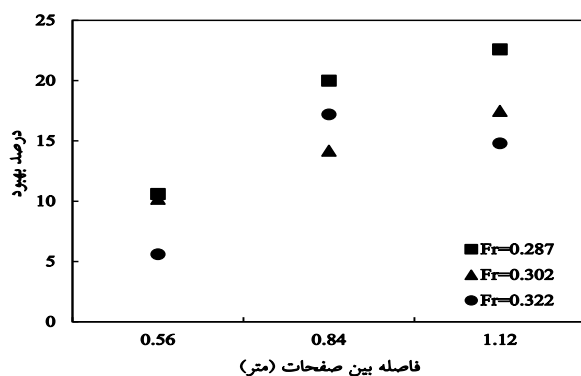
ب) ۰/۳۰۲ و ج) ۰/۳۲۲

فلوم می‌شود. شکل (۶) تغییرات حداکثر عمق آبستگی خطالقعر را در مقابل فواصل مختلف کارگذاری صفحات به ازای اعداد فرود متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمام فواصل و اعداد فرود مختلف شکاف باعث کاهش حداکثر عمق آبستگی خطالقعر می‌شود. به‌طور میانگین، درصد کاهش حداکثر عمق آبستگی خطالقعر در فواصل  $4Le$ ،  $6Le$  و  $8Le$  به ترتیب  $22/6$  درصد،  $46$  درصد و  $30$  درصد به دست آمد. در شکل‌های (۷) و (۸) اثر تغییرات فاصله و عدد فرود جریان بر حداکثر عمق آبستگی خطالقعر برای حالت‌های با شکاف و بدون شکاف نشان داده شده است. در شکل (۷) محور عمودی درصد کاهش حداکثر عمق آبستگی خطالقعر (درصد بهبود) و محور افقی فاصله بین صفحات را در اعداد فرود مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش فاصله‌ی بین صفحات در عدد فرود  $0/287$  و  $0/322$ ، درصد بهبود حداکثر عمق آبستگی خطالقعر افزایش پیدا کرده است ولی در عدد فرود  $0/302$  با افزایش فاصله‌ی بین صفحات درصد بهبود حداکثر عمق آبستگی خطالقعر کاهش پیدا کرده است.

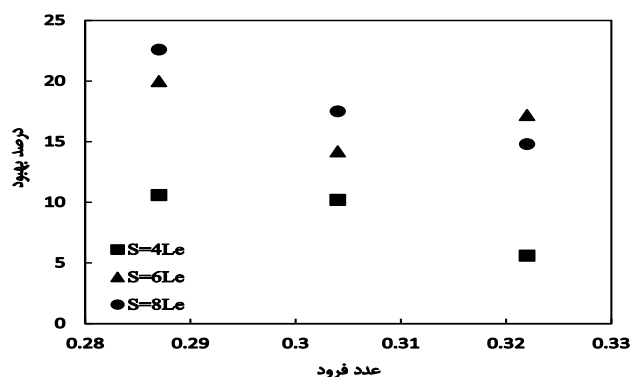
شکل ۵ (ب)، محور عمودی درصد کاهش متوسط اعماق آبستگی حول دماغه‌ی صفحات (درصد بهبود) در حالت شکاف‌دار نسبت به حالت بدون شکاف و محور افقی عدد فرود جریان را فواصل مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در هر فاصله، با افزایش عدد فرود جریان، اثر شکاف در کاهش میزان متوسط اعماق آبستگی موضعی حول دماغه‌ی صفحات کاهش پیدا کرد که این رخداد می‌تواند با توجه به افزایش قدرت گردابه‌های اطراف صفحات و کاهش عملکرد شکاف اتفاق افتاده باشد. به‌طور میانگین، درصد بهبود متوسط اعماق آبستگی موضعی حول دماغه‌ی صفحات در فواصل  $4Le$ ،  $6Le$  و  $8Le$  به ترتیب  $9$  درصد،  $17$  درصد و  $18$  درصد به دست آمد.

#### اثر شکاف بر حداکثر عمق آبستگی خطالقعر

صفحات مثلثی، باعث انحراف جریان از قوس بیرونی به طرف مرکز و باعث به وجود آمدن کانال فرسایشی (خطالقعر) در میانه فلوم می‌شود. با عبور کردن بخشی از جریان از درون شکاف تعبیه شده در صفحات، از قدرت گردابه‌های منحرف شده توسط صفحات به میانه فلوم کاسته می‌شود و این امر باعث کاهش حداکثر عمق آبستگی کانال فرسایشی به وجود آمده در میانه



الف



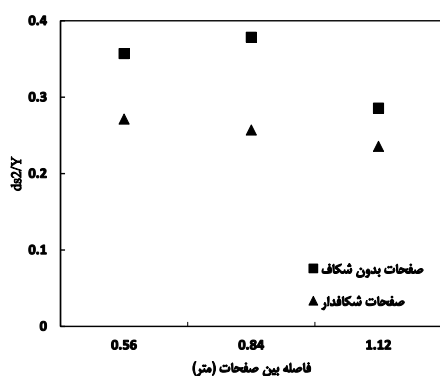
ب

شکل ۵- درصد بهبود متوسط اعماق آبستگی موضعی حول دماغه‌ی صفحات در حالت شکاف‌دار نسبت به حالت بدون شکاف در فواصل و اعداد فرود مختلف

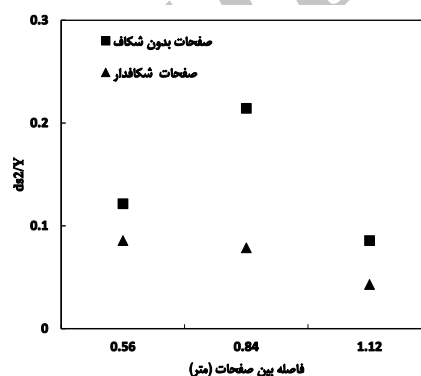


جدول ۲- نتایج حاصل از بررسی حداکثر عمق آبستنگی خط القعر در صفحات شکاف دار و بدون شکاف

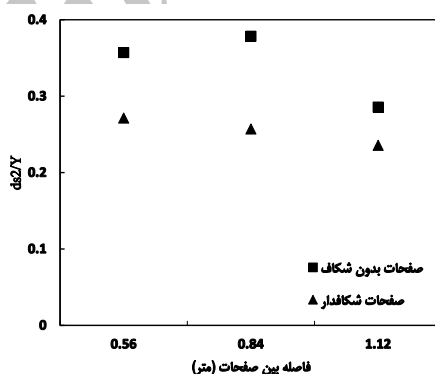
فاصله سازه ها (متر)	عدد فرود	حداکثر عمق آبستنگی خط القعر صفحات بدون شکاف (سانتی متر)	حداکثر عمق آبستنگی خط القعر صفحات شکاف دار (سانتی متر)	پارامتر بی بعد عمق آبستنگی موضعی (صفحات شکاف دار)	پارامتر بی بعد عمق آبستنگی موضعی (صفحات شکاف دار)	درصد بهبود
۰/۵۶	۰/۲۸۷	۱/۷	۱/۲	۰/۱۲	۰/۰۸	۳۰
۰/۸۴	۰/۳۰۴	۳/۳	۲/۸	۰/۲۳	۰/۲	۱۵
۱/۱۲	۰/۳۲۲	۵	۳/۸	۰/۳۵	۰/۲۷	۲۴
۰/۸۴	۰/۲۸۷	۳	۱/۱	۰/۲۱	۰/۰۸	۶۳
۰/۵۶	۰/۳۰۴	۴/۶	۲/۶	۰/۳۳	۰/۱۸	۴۳
۰/۸۴	۰/۳۲۲	۵/۳	۳/۶	۰/۳۸	۰/۲۵	۳۲
۱/۱۲	۰/۲۸۷	۱/۲	۰/۶	۰/۰۸	۰/۰۴	۵۰
۰/۵۶	۰/۳۰۴	۳	۲/۴	۰/۲۱	۰/۱۷	۲۰
۰/۸۴	۰/۳۲۲	۴	۳/۳	۰/۲۸	۰/۲۳	۱۷/۵



ب



الف



ج

شکل ۶- پارامتر بی بعد حداکثر عمق آبستنگی خط القعر در فواصل مختلف به ترتیب در اعداد فرود، الف) ۰/۲۸۷، ب) ۰/۳۰۴ و ج) ۰/۳۲۲

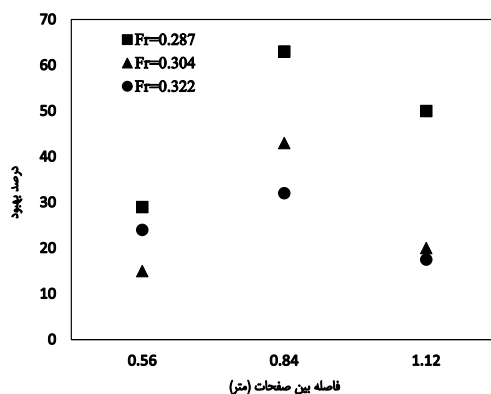
افزایش پیدا کرد. نتایج مربوط به حداکثر عمق آبستنگی خط القعر به صورت کمی در جدول شماره ی (۲) بیان شده است.

**اثر شکاف بر تغییرات طول مؤثر**

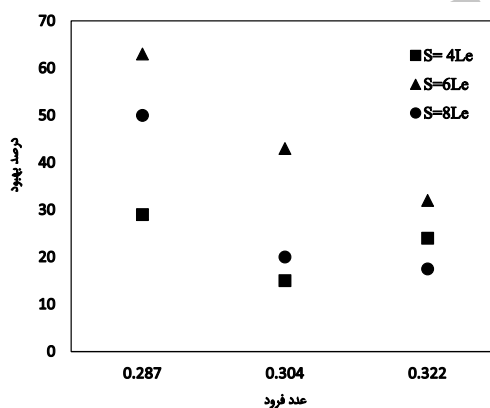
در این پژوهش، طول مؤثر اولیه سازه (قبل از فرسایش) یک پنجم عرض فلوم (۱۴ سانتی متر) بود. با شروع آزمایش و در نتیجه

شکل (۸) محور عمودی درصد کاهش حداکثر عمق آبستنگی خط القعر (درصد بهبود) و محور افقی عدد فرود جریان را در فواصل مختلف نشان می دهد. همان طور که در شکل مشاهده می شود در هر فاصله ی ثابت با افزایش عدد فرود جریان قدرت گردابه های منحرف شده به وسیله صفحات در میانه فلوم افزایش یافت و در نتیجه حداکثر عمق آبستنگی خط القعر در میانه فلوم

درستی و همکاران: بررسی آزمایشگاهی اثر شکاف بر آبشستگی بستر...



شکل ۷- درصد بهبود حداکثر عمق آبشستگی خط القعر در حالت شکاف دار نسبت به حالت بدون شکاف با افزایش فاصله در اعداد فرود مختلف



شکل ۸- درصد بهبود حداکثر عمق آبشستگی خط القعر در حالت شکاف دار نسبت به حالت بدون شکاف با افزایش عدد فرود در فواصل مختلف

جدول ۳- نتایج حاصل از بررسی تغییرات طول مؤثر صفحات شکاف دار و بدون شکاف

درصد بهبود	$\Delta L_e / L_e$		$\Delta L_e$		عدد فرود	فاصله سازه‌ها (متر)
	صفحات شکاف دار	صفحات بدون شکاف	صفحات شکاف دار (سانتی‌متر)	صفحات بدون شکاف (سانتی‌متر)		
۱۷	۰/۲۳	-۰/۲۸	۳/۳	۴	-۰/۲۸۷	
۱۵/۶	۰/۲۴	-۰/۲۹	۳/۴	۴/۱	-۰/۳۰۴	۰/۵۶
۱۴	۰/۲۶	-۰/۳	۳/۶	۴/۲	-۰/۳۲۲	
۱۸/۵	۰/۲۹	-۰/۳۵	۴	۴/۹	-۰/۲۸۷	
۷/۳	۰/۳۶	-۰/۳۹	۵/۱	۵/۵	-۰/۳۰۴	۰/۸۴
۱۵/۳	۰/۳۸	-۰/۴۴	۵/۲	۶/۲	-۰/۳۲۲	
۱۶/۹	۰/۳۹	-۰/۴۶	۵/۴	۶/۵	-۰/۲۸۷	
۱۴/۹	۰/۴۵	-۰/۵۳	۶/۳	۷/۴	-۰/۳۰۴	۱/۱۲
۱۵/۴	۰/۴۷	-۰/۵۶	۶/۶	۷/۸	-۰/۳۲۲	

بنابراین رابطه بین طول مؤثر نهائی (بعد از فرسایش) و آبشستگی در پنجه سازه یک رابطه مستقیم می‌باشد. به گونه‌ای که هر چقدر

فرسایش در بستر و اطراف سازه‌ها، بخشی از سازه که درون بستر ماسه‌ای قرار داشت نمایان شد و طول مؤثر اولیه افزایش یافت.

صفحات مثلثی، باعث انحراف جریان از قوس بیرونی به طرف مرکز و قوس داخلی و یک کانال فرسایشی را در میانه فلوم تشکیل دادند، در تمام فواصل و اعداد فرود مختلف شکاف باعث کاهش حداکثر عمق آبستنگی خطالقعر می‌شود. با افزایش فاصله‌ی بین صفحات در عدد فرود ۰/۲۸۷ و ۰/۳۲۲، درصد بهبود حداکثر عمق آبستنگی خطالقعر افزایش پیدا کرده است ولی در عدد فرود ۰/۳۰۴ با افزایش فاصله‌ی بین صفحات درصد بهبود حداکثر عمق آبستنگی خطالقعر کاهش پیدا کرده است، در هر فاصله‌ی ثابت با افزایش عدد فرود جریان حداکثر عمق آبستنگی خطالقعر در میانه فلوم افزایش پیدا کرد. به‌طور میانگین، درصد بهبود حداکثر عمق آبستنگی خطالقعر در فواصل ۰/۴Le، ۰/۶Le و ۰/۸Le به ترتیب ۲۲/۶ درصد، ۴۶ درصد و ۳۰ درصد به دست آمد.

طول مؤثر اولیه یک پنجم عرض فلوم (۱۴ سانتی‌متر) بود. با شروع آزمایش و در نتیجه فرسایش در بستر و اطراف سازه‌ها، طول مؤثر اولیه افزایش یافت. در همه آزمایش‌ها شکاف باعث کاهش تغییرات طول مؤثر سازه‌ها شد. به‌طور میانگین درصد کاهش متوسط تغییرات طول مؤثر در فواصل ۰/۴Le، ۰/۶Le و ۰/۸Le به ترتیب ۱۵/۵، ۱۳/۷ و ۱۵/۷ به دست آمد.

### تشکر و قدردانی

هزینه این طرح تحقیقاتی از محل پژوهانه تأمین شده است و بدینوسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه تقدیر و تشکر می‌گردد.

### منابع

- ۱- آقاخانی افشار، ح. ۱۳۸۰. کنترل و کاهش آب شستگی موضعی در پایه‌های پل با استفاده از شکاف. سومین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران.
- ۲- بدری، پ. و م. شفاعی بجستان. ۱۳۹۳. مقایسه عملکرد صفحات مثلثی مستطیلی متصل به ساحل در کنترل فرسایش در قوس ملایم ۹۰ درجه. پانزدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، دانشگاه ارومیه.
- ۳- بهرامی یاراحمدی، م. و م. شفاعی بجستان. ۱۳۹۳. تغییرات توپوگرافی بستر در قوس ملایم ۹۰ درجه با نصب آبشکن مثلثی شکل. مجله علمی پژوهشی عمران مدرس، ۱۴(۳): ۲۰۳-۱۶۵.
- ۴- بهرامی یاراحمدی، م. و م. شفاعی بجستان. ۱۳۹۴. الف. بررسی تغییرات طول مؤثر صفحات مثلثی شکل بر الگوی فرسایش و رسوبگذاری در قوس ملایم ۹۰ درجه. نشریه مهندسی عمران فردوسی، ۲۷(۱): ۱۰۰-۸۷.
- ۵- بهرامی یاراحمدی، م. و م. شفاعی بجستان. ۱۳۹۴. ب. تأثیر سری صفحات مثلثی در قوس ملایم ۹۰ درجه بر الگوی توپوگرافی بستر. نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست، ۴۵(۳): ۱-۱۴.
- ۶- حیدر پور، م.، افضلی مهر، ح. و م. نادری. ۱۳۸۲. کنترل و کاهش آبستنگی موضعی در پایه‌های پل با مقاطع مستطیلی گرد گوشه با استفاده از شکاف، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۷(۳): ۲۷-۱۳.

در پنجه سازه آبستنگی بیشتری رخ دهد، طول مؤثر نهائی آن نیز بیشتر خواهد شد (بهرامی یاراحمدی و شفاعی بجستان، ۱۳۹۴). جدول (۳) نتایج مربوط به تغییرات طول مؤثر صفحات ( $\Delta L_e$ ) در دو حالت صفحات شکاف‌دار و بدون شکاف را به صورت کمی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده در جدول (۱) در همه اعداد فرود و فواصل مختلف عمق آبستنگی در صفحات شکاف‌دار کمتر از حالت صفحات بدون شکاف بوده است در نتیجه با توجه به این رخداد همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود متوسط تغییرات طول مؤثر در صفحات شکاف‌دار نیز در اعداد فرود و فواصل مختلف کمتر از صفحات بدون شکاف به دست آمد. به‌طور میانگین درصد کاهش متوسط تغییرات طول مؤثر در فواصل ۰/۴Le، ۰/۶Le و ۰/۸Le به ترتیب ۱۵/۵ درصد، ۱۳/۷ درصد و ۱۵/۷ درصد به دست آمد.

### نتیجه‌گیری

به‌طور خلاصه نتایج تحقیق نشان می‌دهد که: در همه آزمایش‌ها صفحات شکاف‌دار نسبت به صفحات بدون شکاف عملکرد بهتری در کاهش متوسط اعماق آبستنگی موضعی حول صفحات داشته‌اند. در هر عدد فرود با افزایش فاصله بین صفحات شکاف اثر مؤثرتری داشته و متوسط اعماق آبستنگی موضعی حول دماغه‌ی سازه‌ها را کاهش داد. همچنین در هر فاصله، با افزایش عدد فرود جریان، اثر شکاف در کاهش میزان متوسط اعماق آبستنگی موضعی حول دماغه‌ی صفحات کاهش پیدا کرد. درصد بهبود متوسط اعماق آبستنگی حول دماغه صفحات در فواصل ۰/۴Le، ۰/۶Le و ۰/۸Le به ترتیب ۹ درصد، ۱۷ درصد و ۱۸ درصد به دست آمد.

درستی و همکاران: بررسی آزمایشگاهی اثر شکاف بر آبستگي بستر...

۷- درستی، م.، امیرسالاری، ف.، فتحی، ا. و م. محمودیان شوشتری. ۱۳۹۵، الف. اثر شکاف در سری صفحات مثلثی متصل به ساحل بر آبستگي موضعی در قوس ملایم ۹۰ درجه. ششمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب، با رویکرد پیوند اکولوژیکی و با چرخه آب برای پایداری سرزمین. دانشگاه کردستان. یکم تا سوم اردیبهشت.

۸- درستی، م.، امیرسالاری، ف.، فتحی، ا. و م. محمودیان شوشتری. ۱۳۹۵، ب. اثر صفحه جان‌پناه بر توپوگرافی بستر حول صفحه اول درتری صفحات مثلثی متصل به ساحل در قوس ملایم ۹۰ درجه. دومین کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در عمران، معماری و مدیریت شهری.

۹- ظهیری، ج.، کاشفی‌پور، س. م.، شفاعی بجستان، م. و م. قمشی. ۱۳۹۱. تأثیر پارامترهای هندسی ریپرپ بر محافظت آبشکن‌ها در قوس ۹۰ درجه. علوم و مهندسی آبیاری، ۳۵ (۴): ۴۹-۵۸.

۱۰- عبدالله پور، م.، حسین زاده دلیر، ع.، حسن‌پور، ن. و پ. خسروی‌نیا. ۱۳۹۲. اثر شکاف در کاهش آبستگي آبشکن با دیواره عمودی. نشریه دانش آب و خاک، ۲۳ (۳): ۱۹۳-۲۰۶.

11-Bhuiyan, F., Hey, R.D. and P.R. Wormleaton. 2009. Effects of vanes and W-weir on sediment transport in meandering channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135 (5): 339-349.

12-Bhuiyan, F., Hey, R.D. 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.

13-Chiew, Y.M. 1992. Scour protection at bridge Piers. *Hydraul Engineering Journal*, 118(9): 1260-1269.

14-Christensen, Z. M. 2009. Reduction of Local Scour around Bridge Piers; Combined System of Aerofoil and Slot. BS Thesis, Department of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland.

15-Heidarnejad, M., Shafai Bajestan, M. and A. Masjedi. 2010. The effect of slots on scouring around piers in different positions of 180-degrees bends. *World Applied Sciences Journal*, 8 (7): 892-899.

16-Kumar, V., Rango Raju, K. G. and N. Vittal. 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slots and Collars. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(12): 1302-1305.