بررسی آزمایشگاهی تأثیر طول و زاویه‌ی قرارگیری آبشکن‌های مستطیلی بر توزیع سرعت و تنش برشی در قوس ۹۰ درجه

اسمعیل شاکر[1*] و سید محمود کاشفی پور[2]

۱*- نویسنده مسئول، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز
۲- استاد گروه سازه های آبی،دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ دریافت: ۹۲/۸/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۲/۴

چکیده

یکی از روش‌های مؤثر و به‌صرفه برای حفاظت سواحل رودخانه‌ها در محل قوس‌ها استفاده از آبشکن‌ها می‌باشد. در تحقیق حاضر به بررسی آزمایشگاهی تأثیر سری آبشکن‌های غیرمستغرق با سه زاویه‌ی قرارگیری ۹۰ (آبشکن‌های قائم)، ٦۰ (آبشکن‌های دافع) و ۱۲۰ درجه (آبشکن‌های جاذب) نسبت به دیواره‌ی خارجی قوس با سه طول ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد عرض کانال و با فاصله سه برابر طول آبشکن‌ها از هم، بر توزیع سرعت متوسط و تنش برشی در قوس ۹۰ درجه ملایم با نسبت $\frac{R}{B} = ٤$، عرض ۰/۷ متر و عمق آب ۰/۱٤ متر پرداخته شد. نتایج مطالعه نشان داد که حضور سری آبشکن‌ها سبب یکنواختی سرعت بالادست و انتقال ناحیه‌ی پرسرعت از مجاورت دیواره‌ی خارجی به سمت میانه‌ی کانال تا دیواره‌ی داخلی می‌شود، تنش برشی بستر در اثر حضور آبشکن‌ها افزایش یافته و افزایش طول آبشکن‌ها باعث بیشتر شدن آن تا حدود شش برابر تنش برشی بالادست قوس می‌شود اما تأثیر چندانی بر موقعیت مکانی رخداد تنش برشی ندارد به‌طوری‌که در تمام حالت‌ها، تنش برشی بیشینه در زاویه‌ی ۷۰ تا ۸۰ درجه قوس رخ داده است.

کلیدواژه‌ها: آبشکن مستطیلی، الگوی جریان، تنش برشی، جریان ثانویه، قوس ۹۰ درجه.

Experimental Investigation on the Effect of Length and Angle of Groynes on Velocity and Shear Stress Distribution in a 90 Degree Bend

E. Shaker[1*] and S.M. Kashefipour[2]

1*- Msc Student in Hydraulic Structures Department of Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran
2- Professor, Hydraulic Structures Department of Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran

Received:7 November 2013 Accepted:23 February 2014

Abstract

Groynes structures are among effective and common hydraulic structures for bank protection along bends. In the present paper, the effects of series of groynes along a 90 degree mild bend on flow characteristics such as flow and shear stresses distribution have been investigated. Tests were carried out in a bend flume having 0.7 m width, the R/B ratio for the channel bend is 4 and depth of flow for all test kept constant 0.14 m. Groynes were non-submerged and they have been used in three different lengths which are 15, 20 and 25% of channel width and three different angles including 60, 90 and 120 degrees. Also the distance between spurs was equal to 3 times of their length. The analysis of data showed that the high velocity zone moves toward center of channel and inner wall. The relative shear stresses were significantly increased by increasing the length of spure dikes and theirs elongation causes the relative shear stress multiplication up to 6 times. However, the length and angle of spurs have not had significant effect on the position of the maximum relative shear stresses along the bend. Nevertheless, the maximum relative shear stresses happened in a cross section between 70 to 80 degrees of the bend (almost end of the bend) for all experiments.

Keywords: Groyne, Flow pattern, Shear stress, Secondary currents,90 Degree bend.

مقدمه

رودخانه‌ها تحت تأثیر پدیده فرسایش و رسوبگذاری دست‌خوش تغییرات گوناگونی می‌شوند که از آن جمله می‌توان تغییر راستا، جابه‌جایی‌های عرضی و طولی، وقوع میان‌برها، تغییر تراز بستر و دگرگونی ویژگی‌های هندسی مسیر را اشاره کرد. تغییرات مقطع به ویژه در قوس رودخانه‌ها مشهودتر است. تغییرات در قوس‌ها امر بسیار مهمی بوده و توجه زیادی را همواره به خود اختصاص داده است. ضرورت بهره‌برداری مستقیم انسان از رودخانه و سرمایه‌های طبیعی و احداثی در دو سمت آن و نیز ضرورت حفاظت پایدار سامانه حیاتی رودخانه برای آینده سبب گردیده تا مساله کنترل و مهار رودخانه‌ها و تعیین حدود و حریم آن مورد توجه قرار گیرد. یکی از روش‌های ساماندهی رودخانه‌ها در محل قوس‌ها استفاده از آبشکن‌ها است. آبشکن‌ها سازه‌های هیدرولیکی هستند که از جنس‌های مختلف از قبیل بتنی، خاکی و سنگی ساخته می‌شوند. پیچیدگی الگوی جریان در قوس رودخانه‌ها که به دلایل متعدد همچون وجود جریان‌های حلزونی به وجود می‌آید به همراه پیچیدگی الگوی جریان حول آبشکن، بررسی شرایط جریان حول آبشکن در قوس را دوچندان پیچیده می‌سازد.

در دهه‌های اخیر، در زمینه الگوی جریان در قوس‌ها مطالعات زیادی به صورت آزمایشگاهی و یا عددی انجام شده است که منجر به توسعه روش‌ها و فنون مختلف ساماندهی رودخانه گردیده که از آن جمله می‌توان به مطالعه آزمایشگاهی شکری[1] (۱۹۵۰) اشاره کرد. وی مشاهده نمود که برای یک قوس با انحنای ملایم محل وقوع حداکثر سرعت در نیمه اول قوس به سمت جداره داخلی و با حرکت به سمت خروجی قوس به طرف جداره خارجی متمایل می‌شود. بر پایه‌ی تحقیقات واشنی و گرید[2] (۱۹۷۵) وقتی $\frac{R}{B}$ (نسبت شعاع به عرض قوس) در یک قوس بیش از ۳/۵ باشد، توزیع تنش برشی در مقطع ورودی قوس تقریباً یکنواخت بوده و منطقه بیشینه تنش در قسمت خروجی قوس و دیواره خارجی آن اتفاق می‌افتد (به نقل از قدسیان ۱۳۸۸). تینگسانچالی و ماهسواران[3] (۱۹۹۰) از یک مدل عددی دوبعدی برای بررسی توزیع سرعت متوسط و تنش برشی کف در نزدیکی تک آبشکن واقع در یک کانال مستطیلی استفاده کردند و با توجه به انحنای خطوط جریان اطراف آبشکن یک فاکتور تصحیح به مدل k-ε اضافه کردند که باعث افزایش انطباق خروجی این مدل با داده‌های آزمایشگاهی گردید. گیری و همکاران[4] (۲۰۰۴) به بررسی آزمایشگاهی و عددی الگوی جریان و آشفتگی در فلومی با سه قوس و شبیه به رودخانه‌های مارپیچی پرداختند. آن‌ها به تغییر موقعیت آبشکن‌های غیرمستغرق مورد استفاده پرداخته و تأثیر آن را روی میدان جریان اطراف آبشکن مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته و مقایسه‌ی آن‌ها با مدل گسترش یافته نشان از کارآمدی مدل فوق در نشان دادن توزیع سرعت و شدت تلاطم جریان در لایه‌ی برشی داشت. ابد و روهالدز[5] (۲۰۰۸) از داده‌های سه‌بعدی اندازه‌گیری شده مربوط به سرعت در آبراهه‌های کوچک کشاورزی در منطقه میدوست[6] برای تعیین الگوی جریان در اطراف سرریزهای مستغرق[7] احداث شده در قوس آبراهه استفاده کردند. این محققین مدل ریاضی سه‌بعدی برای شبیه‌سازی الگوی جریان در اطراف سرریزهای مستغرق توسعه داده و از داده‌های واقعی برای واسنجی کردن مدل خود استفاده کردند. دوان و همکاران[8] (۲۰۰۹) داده‌های سه‌بعدی سرعت را در یک کانال مستقیم با حضور یک آبشکن مستطیلی به دست آورده و در دو میدان جریان کف صاف و کف با چاله آبشستگی، الگوی جریان را موردبررسی قراردادند. تحقیقات آن‌ها نشان‌دهنده‌ی افزایش مؤلفه‌ی طولی و عرضی و کاهش مؤلفه عمودی سرعت بعد از تشکیل چاله آبشستگی است، همچنین تنش برشی بستر در اطراف آبشکن شش تا هشت مرتبه بزرگتر از تنش برشی بالادست گزارش شده است. فان–دن هیور[9] (۲۰۱۳) با انجام یک تحقیق آزمایشگاهی به بررسی فرسایش، رسوب‌گذاری و هیدرولیک جریان در مدل آزمایشگاهی ساخته‌شده شبیه رودخانه‌های مارپیچی پرداخت. طول، فاصله و زاویه‌ی قرارگیری آبشکن‌ها متغیرهای مورد مطالعه‌ی وی بودند. از نتایج تحقیق وی می‌توان به گزارش ایجاد یک ناحیه‌ی کم‌سرعت بین آبشکن‌ها اشاره کرد که رسوبگذاری در این ناحیه صورت می‌گیرد. با افزایش فاصله‌ی آبشکن‌ها از یکدیگر سرعت بین آبشکن‌ها افزایش می‌یابد که این افزایش سرعت باعث تغییر در الگوی رسوب‌گذاری بین آبشکن‌ها می‌شود. قدسیان و همکاران (۱۳۸۷) به بررسی الگوی جریان دوبعدی اطراف تک‌آبشکن در موقعیت‌های مختلف در قوس و با تغییر در طول آبشکن و عدد فرود جریان پرداختند، از نتایج این تحقیق افزایش نسبت تنش برشی بیشینه به تنش برشی بالادست در محل آبشکن و به حداکثر رسیدن آن در ۱۰ الی ۲۰ درجه پایین‌دست آبشکن است. فضلی و همکاران (۱۳۸۸) با انجام پژوهشی روش‌های محاسبه‌ی تنش برشی را در کانال‌های قوسی با یکدیگر مقایسه کردند. در این تحقیق آزمایشگاهی تنش‌های محاسباتی با دو روش متوسط گیری سرعت در عمق[10] و استفاده از تنش رینولدز[11] مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد توزیع تنش برشی در قوس که با روش متوسط گیری در عمق به دست می‌آید نسبت به توزیع تنش برشی محاسبه‌شده به روش تنش‌های رینولدز با روند وقوع آبشستگی و رسوب‌گذاری در قوس هم‌خوانی بیشتری نشان می‌دهد همچنین

1- Shukry
2 - Washnei and Gried
3- Tingsanchali and Maheswaran
4- Giri *et al.*

5- Abad and Rhoalds
6- Midwest
7- Bendway
8- Duan *et al.*
9- Van den Heever
10- Depth-Averaged Method
11- Reynolds stress

چگونگی توزیع سرعت متوسط جریان در نزدیکی کف که با تنش برشی بستر مرتبط می‌باشد، با تنش برشی محاسبه‌شده به روش سرعت متوسط گیری شده در عمق تطابق بهتری نشان می‌دهد. قدسیان (۱۳۸۸) به بررسی اثر پارامترهای مختلف بر روی الگوی جریان و آبشستگی در اطراف آبشکن در قوس ۹۰ درجه پرداخت. ازجمله این پارامترها می‌توان به دبی جریان، طول آبشکن، موقعیت قرارگیری آبشکن در قوس، فاصله و تعداد آبشکن‌ها و شعاع انحنای قوس اشاره کرد. از نتایج این تحقیق می‌توان به تغییر نیافتن میزان تنش برشی بالادست تک آبشکن با افزایش طول آن و افزایش تنش برشی در محل آبشکن با افزایش طول آبشکن اشاره کرد. همچنین نتایج حاصل از این تحقیق نشان‌دهنده‌ی انحراف ناحیه‌ی پرسرعت از مجاورت دیواره‌ی خارجی قوس به سمت دیواره‌ی داخلی و میانه‌ی کانال با نصب آبشکن در موقعیت‌های مختلف قوس است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود تاکنون مطالعات زیادی روی آبشکن‌های منفرد و همچنین آبشکن روی خطوط مستقیم جریان صورت گرفته اما مطالعات مربوط به سری آبشکن‌ها و همچنین الگوی جریان اطراف آن‌ها در محل قوس محدود بوده، به همین دلیل مطالعه حاضر به بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان و تنش برشی در قوس به همراه سری آبشکن‌ها با طول‌های متفاوت و به سه شکل قائم، دافع و جاذب در کل طول قوس به کمک اندازه‌گیری سه‌بعدی سرعت می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

هدف از این تحقیق بررسی توزیع سرعت متوسط و بیشینه نسبی تنش برشی در قوس ۹۰ درجه با حضور حالت‌های مختلف طولی و زاویه‌ای سری آبشکن‌ها است. برای این منظور آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی با قوس ۹۰ درجه با نسبت شعاع انحنای مرکزی به عرض فلوم ۴ و مقطع عرضی مستطیلی در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی دانشگاه شهید چمران اهواز انجام گرفت. جداره کانال از جنس پلکسی گلاس و جنس کف گالوانیزه می‌باشد. عرض فلوم ۰/۷ متر و شعاع خارجی قوس ۳/۱۵ متر است. طول راستای مستقیم کانال در بالادست و پایین‌دست به ترتیب ۵ و ۳ متر است. با توجه به نسبت R/B که برابر ۴ است قوس جزء قوس‌های ملایم محسوب می‌شود.

برای بررسی الگوی جریان اطراف آبشکن‌ها از آبشکن‌هایی از جنس ورق‌های پلکسی گلاس به ضخامت ۱ سانتی‌متر و طول‌های ۱۰/۵ ، ۱۴ و ۱۷/۵ سانتی‌متر که به ترتیب برابر با ۱۵ درصد، ۲۰ درصد و ۲۵ درصد عرض کانال هستند استفاده گردید. این آبشکن‌ها به شکل مستطیلی با سه زاویه ۹۰ درجه (آبشکن‌های قائم)، ۱۲۰ درجه، (آبشکن‌های جاذب) و ۶۰ درجه (آبشکن‌های دافع) و به صورت نفوذناپذیر و در شرایط غیر مستغرق در نظر گرفته شدند. پس از نصب آبشکن‌ها در دیواره خارجی قوس با فاصله سه برابر طول آن‌ها و در محدوده فرسایش پذیر که قبلاً از طریق آزمایش‌های طولانی‌مدت مربوطه مشخص گردیده، آزمایش‌ها با دبی ثابت ۳۰ لیتر بر ثانیه و عمق ۱۴ سانتی‌متر که معادل با عدد فرود ۰/۲۵ است انجام گردید. روش انجام آزمایش‌ها به این‌گونه بود که با باز کردن شیر ورودی آب وارد فلوم شده تا سطح آب درون فلوم افزایش یابد سپس با بازکردن دریچه کشویی پایین‌دست سطح آب مورد نظر تنظیم گردید، پس از کنترل سطح آب به وسیله یک دستگاه عمق سنج دیجیتال و اطمینان از حصول عمق موردنظر دریچه ثابت نگه‌داشته می‌شد. همزمان به‌وسیله یک دستگاه دبی‌سنج اولتراسونیک دبی عبوری کنترل می‌گردید. در ابتدا یک آزمایش بدون حضور آبشکن‌ها برای برداشت الگوی جریان در قوس و به‌عنوان آزمایش شاهد صورت گرفت، سپس با نصب آبشکن‌ها با زوایا و طول‌های موردنظر در دیواره خارجی قوس آزمایش‌ها به‌صورت جداگانه تکرار گردید. سرعت‌ها به‌صورت نقطه‌ای و در عمق‌های مختلف در اطراف آبشکن‌ها و مقاطع عرضی معین توسط دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی الکترومغناطیس JEF ALEC برداشت گردید. شکل (۱) نمایی از فلوم مورد استفاده و شکل (۲) نمایی از آبشکن‌های نصب شده در دیواره فلوم به همراه سرعت‌سنج در حال اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.



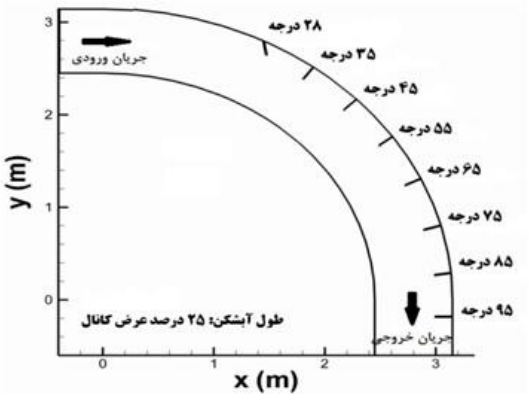
شکل ۱- فلوم قوسی مورد استفاده



شکل۲-نمایی از آبشکن‌ها و سرعت‌سنج



شکل ۳- شبکه‌بندی عرضی نقاط برداشت سرعت



شکل ٤- آرایش آبشکن‌های با طول ۲۵ درصد عرض کانال

برداشت داده‌ها در قوس به صورت قطبی $U(r,\theta)$ انجام گرفت که برای تبدیل مختصات قطبی به دکارتی از روابط زیر استفاده شد:

$$U = U_\theta \cos\theta + U_r \sin\theta \qquad (۱)$$

$$V = U_\theta \sin\theta - U_r \cos\theta \qquad (۲)$$

$$r = r' + \Delta r, \quad x = r\sin\theta, \quad y = r\cos\theta \qquad (۳)$$

که در روابط بالا، Δr: فاصله نقطه اندازه‌گیری از دیواره داخلی (سانتی‌متر)، U_r وU_θ: سرعت‌های دوبعدی در مختصات قطبی (سانتی‌متر بر ثانیه)، U و V: سرعت‌های دوبعدی در مختصات دکارتی(سانتی‌متر بر ثانیه)، θ: زاویه مرکزی قوس وr': شعاع قوس داخلی که معادل ۲/۴۵ متر است.

برای یافتن الگوی جریان نیاز به انتخاب مقاطعی مختلف از طول کانال است که بتواند شاخصه‌های جریان را در حالت‌های مختلف نشان دهد. بدین منظور در طول کانال از ۲۴ مقطع طولی

ثابت و تعداد زیادی مقاطع که با توجه به هر آزمایش و محل قرارگیری آبشکن‌ها محلشان متفاوت بود استفاده شد و هر مقطع به ۱۵ برش عرضی تقسیم گردید. همچنین به منظور بررسی جامع‌تری از الگوی جریان، سرعت‌ها در چهار عمق ۱۱،۷،۳ و ۱۳ سانتی‌متر از کف اندازه‌گیری شد. شکل (۳) نشان‌دهنده نحوه مش بندی نقاط برداشتی در مقاطع عرضی مورد مطالعه و شکل (۴) نمایانگر آرایش آبشکن‌های با طول ۲۵ درصد عرض کانال به عنوان نمونه‌ای از آرایش آبشکن‌هاست.

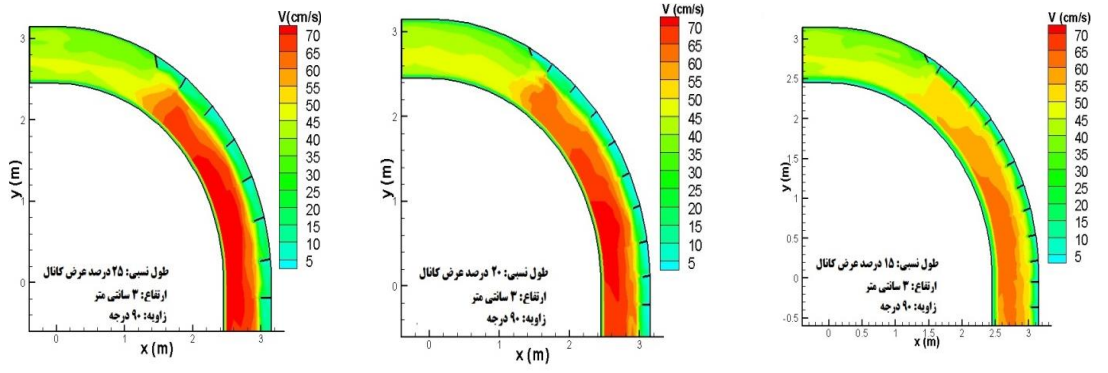
نتایج و بحث

اثر آبشکن‌ها بر الگوی توزیع سرعت متوسط

بعد از استخراج مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت و محاسبه سرعت‌های متوسط نقطه‌ای، الگوی توزیع سرعت برای لایه‌های عمقی مختلف ترسیم گردید که نتایج حاصله در صفحه نزدیک به بستر با فاصله سه سانتی‌متر از بستر در شکل (۵) ارائه گردیده است. در این شکل حالت به‌کارگیری آبشکن‌های قائم به طول‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد عرض کانال بوده است.

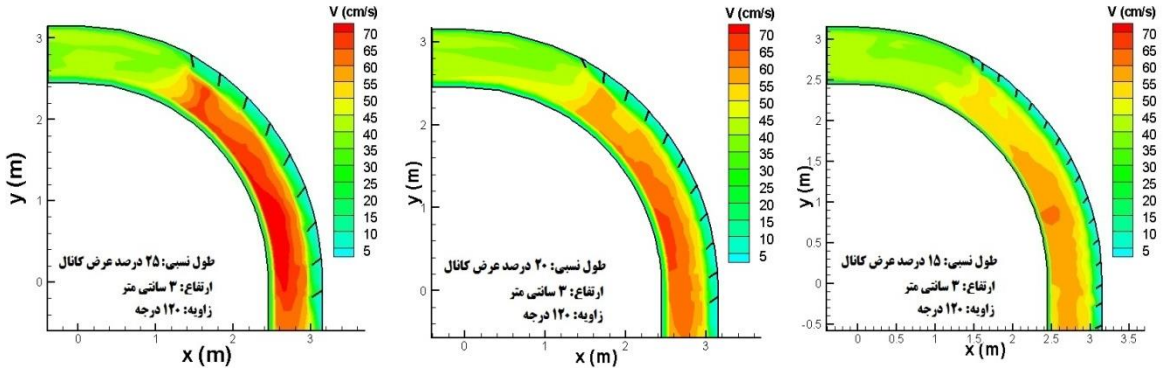
مطابق شکل در هر سه حالت، سرعت در مجاورت ساحل خارجی قوس به‌شدت کاهش‌یافته و قرار دادن آبشکن‌ها سبب پراکندگی و انتقال ناحیه‌ی پرسرعت از دیواره‌ی خارجی به سمت میانه‌ی کانال و ساحل داخلی می‌شود. علت اصلی فرسایش ساحل خارجی قوس تمرکز نواحی با سرعت زیاد در یک‌سوم انتهایی قوس است که همان‌گونه که ملاحظه می‌شود قرار دادن آبشکن‌ها به‌خوبی از شکل‌گیری این نواحی جلوگیری نموده است. با توجه به شکل (۵) تغییرات سرعت در مجاورت دماغه آبشکن‌ها به سرعت تغییر کرده و به فاصله کمی از دماغه آبشکن‌ها سرعت‌های بالا قرار گرفته‌اند. این امر نشان می‌دهد که محافظت دماغه آبشکن‌ها جهت حفظ پایداری سازه‌ی آبشکن امری اجتناب‌ناپذیر است.

با مقایسه‌ی تصاویر (۵الف)، (۵ب) و (۵ج) مشخص می‌شود با افزایش طول آبشکن‌ها از یکنواختی توزیع سرعت در طول قوس کاسته می‌شود همچنین ضمن اینکه با افزایش طول آبشکن‌ها بیشینه سرعت جریان در کل طول قوس به علت کوچک‌تر شدن سطح مقطع عبور جریان بیشتر می‌شود، ناحیه پرسرعت به سمت ابتدای قوس پیشروی می‌کند. تفاوت دیگری که بین سه حالت طولی آبشکن‌ها وجود دارد، توزیع سرعت بین آبشکن‌هاست به‌طوری‌که در حالت طولی ۱۵ و ۲۰ درصد بین دو آبشکن و در مجاورت ساحل خارجی قوس، ناحیه با سرعت کم به‌طور کامل حاکم شده اما در این حالت در فضایی از بین آبشکن‌ها نواحی با سرعت بیشتر به‌وجود آمده که این مسئله هم می‌تواند ناپایداری ساحل خارجی قوس و هم ناپایداری سازه آبشکن را به دنبال داشته باشد. با توجه به توزیع سرعت‌های ارائه شده در شکل (۵) در این حالت در گستره‌ی زیادی از قوس در نزدیکی دیواره‌ی داخلی نواحی با سرعت بالا حاکم شده‌اند. قدسیان (۱۳۸۸) نیز مشاهده نمود که با بیشتر شدن فاصله بین آبشکن‌ها از یک مقدار معین بین دو آبشکن محدوده‌ای به وجود می‌آید که تنش برشی در آن با کاهش قابل‌توجهی همراه است. شکل (۶) نمایانگر توزیع سرعت متوسط در قوس در حضور آبشکن‌های جاذب (با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به دیواره‌ی خارجی قوس) و با سه طول ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد عرض کانال است. با توجه به شکل قرار گرفتن آبشکن‌های جاذب هم در هر سه حالت طولی به کار رفته با دور کردن لایه‌های پرسرعت از نزدیکی دیواره‌ی خارجی قوس سبب محافظت آن می‌شود.



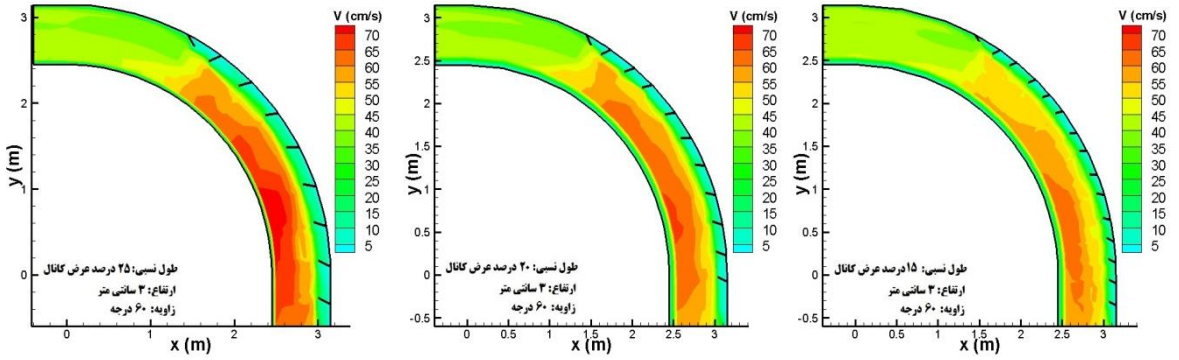
(الف) (ب) (ج)

شکل ۵- الگوی توزیع سرعت متوسط در قوس در حضور آبشکن‌های قائم با سه طول (الف) ۱۵، (ب) ۲۰ و (ج) ۲۵ درصد عرض کانال



(ج) (ب) (الف)

شکل ٦- الگوی توزیع سرعت متوسط در قوس در حضور آبشکن‌های جاذب با سه طول الف) ۱۵، ب) ۲۰ و ج) ۲۵ درصد عرض کانال



(ج) (ب) (الف)

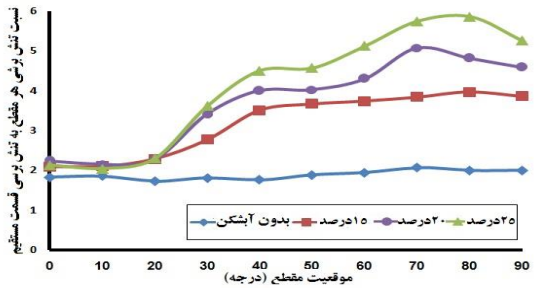
شکل ۷- الگوی توزیع سرعت متوسط در قوس در حضور آبشکن‌های دافع با سه طول الف) ۱۵، ب) ۲۰ و ج) ۲۵ درصد عرض کانال

به کار بردن آبشکن‌های با طول ۱۵ درصد عرض کانال یکنواختی توزیع سرعت مناسبی را در طول قوس به‌وجود آورده به‌طوری‌که به غیر از ناحیه‌ی کوچکی در یک‌سوم پایانی قوس دامنه‌ی تغییرات سرعت چیزی حدود ۱۰ سانتی‌متر بر ثانیه است، اما با افزایش طول آبشکن‌ها علاوه بر افزایش یافتن بیشینه سرعت‌ها، یکنواختی توزیع در قوس کمتر شده به‌طوری‌که در حضور آبشکن‌های با طول ۲۵ درصد عرض کانال در یک‌سوم ابتدای قوس سرعت‌های بین ۳۵ تا ۵۰ سانتی‌متر بر ثانیه، در یک‌سوم میانی بین ۵۵ تا ۶۵ سانتی‌متر بر ثانیه و در یک‌سوم انتهایی بین ۵۵ تا ۷۰ سانتی‌متر بر ثانیه وجود دارد. بنابراین افزایش طول آبشکن‌ها باعث گسترش نواحی با سرعت بیشتر در طول بیشتری از قوس گردیده همچنین یکنواختی توزیع سرعت در بالادست نیز با افزایش طول آبشکن‌ها کاهش یافته است. از مقایسه شکل‌های (۵) و (۶) نتیجه گرفته می‌شود که با تغییر زاویه‌ی قرارگیری آبشکن‌ها از ۹۰ به ۱۲۰ درجه سرعت بیشینه‌ی جریان در طول قوس کاهش یافته است که دلیل این امر کمتر شدن طول مؤثر آبشکن‌ها در حالت زاویه‌دار نسبت به حالت قائم است، همچنین آبشکن‌های جاذب از گسترش نواحی پرسرعتی که در مجاورت ساحل داخلی قوس پدید می‌آید و می‌تواند سبب فرسایش آن شود به شکل مؤثرتری نسبت به آبشکن‌های قائم جلوگیری نموده‌اند. توزیع سرعت اطراف آبشکن‌های دافع (با زاویه ۶۰ درجه نسبت به دیواره‌ی خارجی قوس) در شکل (۷) نشان داده‌شده است. در این حالت نیز، ناحیه‌ی پرسرعت از مجاورت ساحل خارجی قوس فاصله گرفته و به میانه‌ی کانال و ساحل داخلی قوس نزدیک شده اما تفاوت این حالت با حالت‌های قبل در الگوی توزیع سرعت متوسط بین آبشکن‌ها است به‌طوری‌که در این حالت قرار دهی بین تمام آبشکن‌ها سرعت‌های کم حاکم هستند و از به‌وجود آمدن نواحی با سرعت بالا که به‌خصوص در حالت‌های قبل بین آبشکن‌های با طول ۲۵ درصد مشاهده شد و سبب ناپایداری ساحل خارجی می‌گردید جلوگیری شده است. با مقایسه‌ی آبشکن‌های جاذب و دافع مشخص می‌شود که آبشکن‌های جاذب

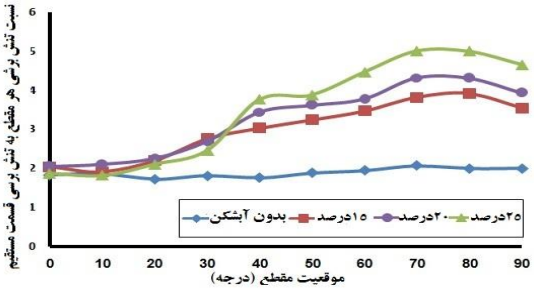
جریان را به طرف میدان میان آبشکن‌ها منحرف می‌کنند درحالی‌که آبشکن‌های دافع جریان را به طرف میانه و دیواره‌ی داخلی کانال هدایت می‌کنند و کمتر جریان به میدان بین آبشکن‌ها راه می‌یابد. فان دن هیور (۲۰۱۳) نیز با بررسی الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری مشاهده نمود رسوب‌گذاری در قوس خارجی بین آبشکن‌های دافع بیشتر از رسوب‌گذاری بین آبشکن‌های جاذب صورت می‌گیرد اما در برخی از آزمایش‌ها استفاده از آبشکن‌های دافع باعث ناپایداری دیواره داخلی قوس گردید درحالی‌که آبشکن‌های جاذب ناپایداری در دیواره داخلی قوس به وجود نیاوردند. با مقایسه‌ی تصاویر موجود در شکل‌های (۵) تا (۷) مشخص می‌شود به‌طورکلی آبشکن‌های جاذب و دافع یکنواختی بیشتری نسبت به آبشکن‌های قائم در توزیع سرعت در قوس به وجود می‌آورند و بین این دو، آبشکن‌های دافع هم از نظر توزیع سرعت بین آبشکن‌ها برای جلوگیری از ناپایداری ساحل خارجی و هم کنترل ناحیه‌ی پرسرعت مجاور ساحل داخلی قوس عملکرد بهتری دارند. از نظر توزیع سرعت نزدیک دماغه آبشکن‌ها که بر پایداری سازه آبشکن تأثیر زیادی دارد مشاهده می‌شود که در طول‌های برابر، دماغه آبشکن‌های دافع نسبت به دو حالت دیگر وضعیت بهتری دارد و از مناطق با سرعت زیاد فاصله‌ی بیشتری دارد درحالی‌که نواحی با سرعت بالا در آبشکن‌های قائم در فاصله‌ی کمتری نسبت به دماغه آبشکن‌ها تشکیل‌شده‌اند. این مسئله نشان‌دهنده‌ی اهمیت بیشتر حفاظت از دماغه‌ی آبشکن‌های قائم نسبت به حالت‌های دیگر است. جدول (۱) نشان‌دهنده‌ی بیشینه و کمینه‌ی سرعت جریان در قوس است. با توجه به جدول، با در نظر گرفتن یک زاویه‌ی ثابت همیشه سرعت بیشینه در حضور آبشکن‌های با طول ۲۵ درصد و سرعت کمینه در حضور آبشکن‌هایی با طول ۱۵ درصد عرض کانال به وقوع می‌پیوندد. همچنین با در نظر گرفتن طول‌های برابر، سرعت‌های بیشینه در حضور آبشکن‌های قائم در قوس رخ می‌دهد. بیشترین سرعت جریان در قوس در بین تمامی آزمایش‌های انجام شده در حضور آبشکن‌ها، ۸۰/۴۲ سانتی‌متر بر ثانیه است که در حضور آبشکن‌های قائم به طول ۲۵ درصد عرض کانال اتفاق افتاده است. کمترین سرعت، در حضور آبشکن‌های جاذب به طول ۲۰ درصد عرض کانال و به مقدار ۱/۰۶ سانتی‌متر بر ثانیه رخ داده است.

جدول ۱- مقادیر سرعت‌های بیشینه و کمینه برای تمام حالت‌ها

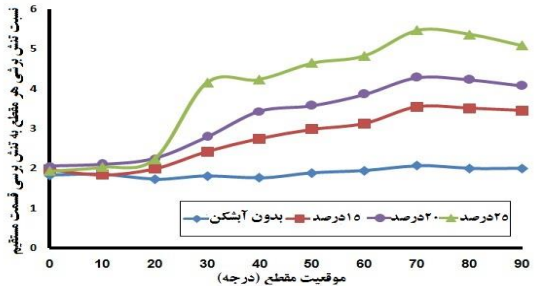
ردیف	زاویه آبشکن (درجه)	طول نسبی آبشکن (درصد)	سرعت بیشینه (سانتی‌متر بر ثانیه)	سرعت کمینه (سانتی‌متر بر ثانیه)	موقعیت وقوع در قوس (درجه)	
					سرعت بیشینه	سرعت کمینه
۱	۰	۰	۴۹/۷۱	۲۳/۵۹	۷۰	۵۱
۲	۹۰	۱۵	۶۵/۸۶	۲/۷۰	۷۹	۴۰
۳	۹۰	۲۰	۷۳/۲۶	۳/۵۷	۷۸	۷۰
۴	۹۰	۲۵	۸۰/۴۲	۲/۰۷	۷۶	۴۶
۵	۱۲۰	۱۵	۶۱/۲۴	۳/۰۸	۷۳	۶۲
۶	۱۲۰	۲۰	۶۷/۴۵	۱/۰۶	۷۳	۴۷
۷	۱۲۰	۲۵	۷۵/۸۴	۳/۰۸	۷۴	۷۸
۸	۶۰	۱۵	۶۵/۰۶	۲/۱۶	۷۲	۵۷
۹	۶۰	۲۰	۶۷/۹۶	۲/۳۹	۷۸	۳۷
۱۰	۶۰	۲۵	۷۲/۶۴	۲/۸۲	۷۶	۳۴



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸- تغییرات بیشینه تنش برشی بی‌بعد شده در طول قوس کانال در حضور آبشکن‌های با سه طول ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد عرض کانال و با حالت زاویه‌ای الف) قائم، ب) دافع و ج) جاذب

اثر آبشکن‌ها بر بیشینه‌ی تنش برشی

بر اساس تحقیقات انجام‌شده، جریان ثانویه در قوس‌ها سبب ایجاد نیروی برشی بزرگی در قوس نسبت به مسیر مستقیم می‌شود. این جریان تحلیل تنش برشی بستر در قوس را نسبت به مسیر مستقیم پیچیده‌تر کرده است(پورنصیری و همکاران ۱۳۸۷). برای محاسبه تنش برشی با استفاده از روش متوسط گیری عمقی از روابط زیر استفاده شد.

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g}{c^2}\overline{U}\sqrt{\overline{U}^2 + \overline{V}^2} \quad (۴)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho g}{c^2}\overline{V}\sqrt{\overline{U}^2 + \overline{V}^2} \quad (۵)$$

$$\tau_b = \sqrt{\tau_{bx}{}^2 + \tau_{by}{}^2} \quad (۶)$$

که در آن $\overline{U}$ و $\overline{V}$: به ترتیب متوسط عمقی سرعت در جهت‌های x و y (متر بر ثانیه)، τ_{bx} و τ_{by}: به ترتیب تنش برشی بستر در جهات x و y (نیوتن بر متر مربع) و ρ و g: به ترتیب جرم مخصوص سیال و ضریب گرانش و c: ضریب شزی است. برای تجزیه و تحلیل تنش‌های برشی بستر تنش‌های بیشینه هر مقطع محاسبه شده و نسبت به تنش برشی متوسط مقطع مستقیم که از رابطه $\tau = \gamma RS$ محاسبه گردیده بی‌بعد شده و نمودار تغییرات تنش برشی بیشینه در طول فلوم ترسیم گردید. شکل (۸) نشان‌دهنده نسبت بیشینه تنش برشی در هر مقطع نسبت به تنش برشی قسمت مستقیم قوس در مقاطع مختلف برای سه حالت زاویه‌ای و طولی است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در حالت قوس بدون آبشکن نسبت بیشینه تنش برشی به تنش در قسمت مستقیم قوس در طول قوس تقریباً ثابت است و مقداری در حدود دو برابر تنش در قسمت مستقیم را دارا می‌باشد که علت این مساله تأثیر بیشتر جریانات ثانویه در قوس نسبت به مسیر مستقیم و

نیروی برشی بزرگی است که در اثر وجود این جریانات به وجود می‌آید(اسمیت و مکلین ۱۹۸۴).

ریچاردسون (۲۰۰۲) با انجام مطالعه‌ای روی مدل قوس رودخانه‌ای رابطه‌ای برای نسبت تنش در قوس نسبت به مسیر مستقیم با متغیرهای شعاع مرکزی قوس و عرض کانال ارائه نمود که با قرار دادن مشخصات کانال قوسی مورد استفاده در تحقیق حاضر این نسبت برابر ۲ به‌دست می‌آید که نشانگر هم‌خوانی یافته‌های تحقیق حاضر با مطالعه ریچاردسون (۲۰۰۲) است.

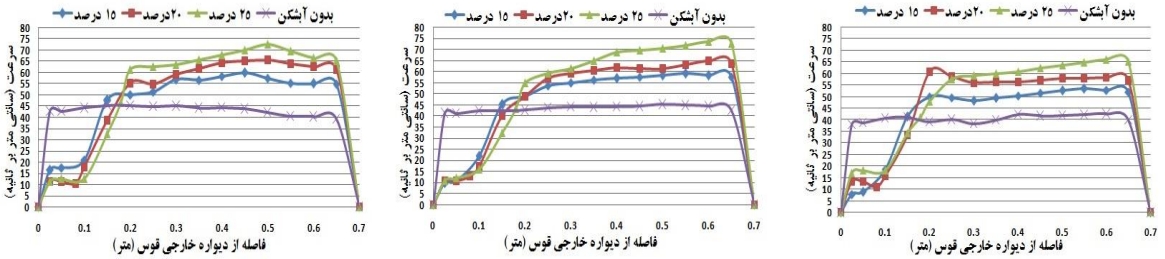
با قرار دادن آبشکن‌های قائم در دیواره خارجی قوس در بالادست آبشکن‌ها، یعنی تا زاویه ۲۰ درجه نسبت تنش برشی بیشینه به تنش برشی قسمت مستقیم مقدار کمی افزایش می‌یابد، اما تغییرات طول آبشکن‌ها تغییری را در مقدار آن ایجاد نمی‌کند اما با نزدیک شدن به آبشکن‌ها در زاویه‌ی حدود ۲۰ درجه تنش برشی بیشینه روند صعودی می‌یابد و از زاویه ۲۸ درجه به بعد که محل نصب اولین آبشکن است افزایش تنش برشی بستر با بیشترین شیب صورت می‌گیرد. در مورد آبشکن‌های دافع و جاذب نیز روند مشابهی وجود دارد با این تفاوت که این آبشکن‌ها تأثیری بر تنش برشی بالادست خود نمی‌گذارند و با توجه به شکل (۸ب) و (۸ج) میزان بیشینه تنش برشی بین زاویه صفر تا ۲۰ درجه چه در آبشکن‌های دافع و چه در آبشکن‌های جاذب معادل با تنش برشی در مسیر مستقیم است. قدسیان و همکاران (۱۳۸۷) نیز مشاهده نمودند با افزایش طول آبشکن مقدار تنش برشی در ابتدای قوس تا محلی که آبشکن نصب شده تغییری نمی‌کند ولی این مقدار از محل نصب آبشکن شروع به افزایش یافتن می‌کند. نتایج نشان داد که در هر سه حالت آبشکن‌های قائم، دافع و جاذب، تغییرات طول آبشکن‌ها در کل طول قوس سبب افزایش تنش برشی می‌شود که علت این مسئله به کاهش سطح مقطع عبور جریان در اثر افزایش طول آبشکن‌ها و درنتیجه افزایش سرعت و به دنبال آن افزایش تنش برشی برمی‌گردد. به‌طور مثال با مقایسه‌ی مقادیر بیشینه نمودارهای واقع در شکل ۸ برای هر ۳ حالت طولی آبشکن‌های قائم مشاهده می‌شود که افزایش طول آبشکن‌ها سبب افزایش میزان بیشینه تنش برشی شده، به‌طوری‌که در حالت آبشکن با طول ۲۰ درصد عرض کانال، مقدار بیشینه تنش برشی ۲۵ درصد نسبت به آبشکن با طول ۱۵ درصد عرض کانال افزایش‌یافته و در حالت آبشکن با طول ۲۵ درصد عرض کانال مقدار تنش برشی، ۲۰ درصد نسبت به حالت آبشکن با طول ۲۰ درصد عرض کانال افزایش پیدا کرده است. البته افزایش طول آبشکن‌های جاذب و دافع به مقدار کمتری نسبت به آبشکن‌های قائم تنش برشی نسبی بیشینه را افزایش می‌دهد زیرا به‌طورکلی آبشکن‌های زاویه‌دار از طول مؤثر کمتری نسبت به آبشکن‌های قائم برخوردارند. با مقایسه نمودارها معلوم می‌شود که افزایش طول آبشکن‌ها تأثیر چندانی بر محل وقوع تنش برشی بیشینه نمی‌گذارد و بیشینه تنش برشی در هر سه حالت طولی و زاویه‌ای آبشکن‌ها بین زاویه۷۰ تا ۸۰ درجه‌ی قوس اتفاق می‌افتد. با رسیدن به انتهای قوس و تضعیف تأثیر جریان‌های ثانویه نمودارهای تمامی حالت‌های تنش برشی (شکل ۸) شروع به نزول می‌کنند. نتایج به‌دست‌آمده از شکل (۸)، نتایج مطالعه‌ی دوان و همکاران (۲۰۰۹) را که تنش برشی بیشینه را با حضور آبشکن در قوس تا هشت مرتبه بزرگ‌تر گزارش کرده‌اند تأیید می‌نماید. جدول (۲) نشان‌دهنده‌ی حداکثر تنش برشی بی‌بعد شده‌ی جریان به همراه محل وقوع آن در قوس برای تمامی آزمایش‌های صورت گرفته است.

جدول ۲- مقادیر تنش‌های برشی بیشینه و محل وقوع آن‌ها در قوس برای تمام حالت‌ها

ردیف	زاویه‌ی آبشکن (درجه)	طول نسبی آبشکن (درصد)	عدد فرود جریان	تنش برشی بی‌بعد بیشینه	محل وقوع در قوس (درجه)
۱	۰	۰	۰/۲۶	۲/۰۶	۷۰
۲	۹۰	۱۵	۰/۲۶	۳/۹۷	۸۰
۳	۹۰	۲۰	۰/۲۶	۵/۰۷	۷۰
۴	۹۰	۲۵	۰/۲۶	۵/۸۶	۸۰
۵	۱۲۰	۱۵	۰/۲۶	۳/۵۴	۷۰
۶	۱۲۰	۲۰	۰/۲۶	۴/۲۷	۷۰
۷	۱۲۰	۲۵	۰/۲۶	۵/۴۶	۷۰
۸	۶۰	۱۵	۰/۲۶	۲/۹۱	۸۰
۹	۶۰	۲۰	۰/۲۶	۴/۲۶	۸۰
۱۰	۶۰	۲۵	۰/۲۶	۵/۰۱	۷۰

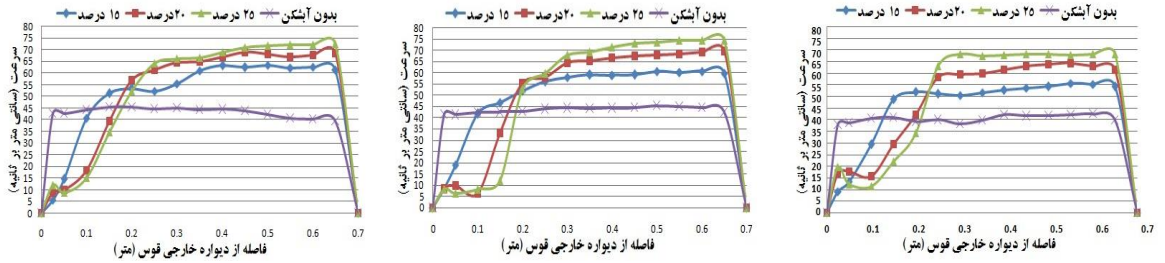
اثر آبشکن‌ها بر پروفیل عرضی سرعت جریان

شکل‌های (۹) تا (۱۱) نشان‌دهنده‌ی پروفیل عرضی سرعت جریان در حضور آبشکن‌های جاذب، قائم و دافع در سه مقطع ۴۰، ۶۵ و ۹۰ درجه و با سه طول ۱۵ درصد، ۲۰ درصد و ۲۵ درصد عرض کانال است. مطابق شکل‌ها در هر سه مقطع موردبررسی سرعت‌های متوسط در مجاورت دیواره‌ی خارجی نسبت به حالت قوس بدون آبشکن به‌شدت کاهش یافته است به‌طوری‌که از مقادیر بین ۳۵ تا ۴۰ سانتی‌متر بر ثانیه در قوس بدون آبشکن به مقادیر بین ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر بر ثانیه در حالت‌های مختلف حضور آبشکن‌ها کاهش یافته است. همچنین سرعت در مجاورت دیواره‌ی خارجی قوس بسیار کمتر از سرعت متوسط در مقاطع میانی و نزدیک به دیواره‌ی داخلی قوس است و از مقادیر بین ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر بر ثانیه در مجاورت دیواره‌ی خارجی تا مقادیر بین ۵۵ تا ۷۵ سانتی‌متر بر ثانیه در مجاورت قوس داخلی متغیر است. مقایسه‌ی تأثیر آبشکن‌های دافع و جاذب بر پروفیل عرضی سرعت نشان می‌دهد سرعت در نزدیکی دیواره‌ی خارجی در حضور آبشکن‌های جاذب بیشتر از سرعت در حضور آبشکن‌های دافع است. علت وقوع این تفاوت به زاویه‌ی برخورد خطوط جریان به آبشکن برمی‌گردد، ازآنجاکه زاویه‌ی برخورد خطوط جریان به آبشکن‌های دافع بزرگ‌تر از آبشکن‌های جاذب است انحراف بیشتر سبب میل خطوط جریان به سمت دیواره‌ی داخلی کانال می‌گردد درحالی‌که آبشکن‌های جاذب بیشتر جریان را به میدان بین خود وارد می‌کنند. در محدوده‌ی طول مؤثر آبشکن‌ها، بیشترین سرعت‌ها در حضور آبشکن‌های ۱۵ درصد و کمترین سرعت‌ها در حضور آبشکن‌های با طول ۲۵ درصد عرض کانال رخ داده است اما بعد از محدوده‌ی طول مؤثر آبشکن‌ها بیشترین سرعت‌ها در حضور آبشکن‌های ۲۵ درصد و کمترین سرعت‌ها در حضور آبشکن‌های ۱۵ درصد عرض کانال رخ داده است. با توجه به شکل‌های (۹) تا (۱۱) در آبشکن‌های قائم افزایش طول آبشکن باعث افزایش طول ناحیه‌ی کم‌سرعت در مجاورت قوس خارجی می‌شود ولی افزایش طول آبشکن‌های جاذب و دافع تأثیر چندانی بر افزایش طول ناحیه‌ی کم‌سرعت مجاور دیواره خارجی ندارد.



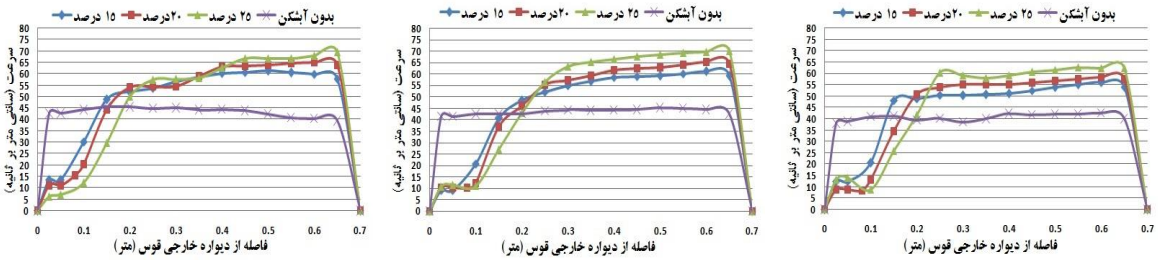
(ج) (ب) (الف)

شکل ۹- پروفیل عرضی سرعت جریان در حضور آبشکن‌های جاذب با سه طول ۱۵ درصد، ۲۰ درصد و ۲۵ درصد عرض کانال در سه مقطع الف) ۴۰ درجه، ب) ۶۵ درجه و ج) ۹۰ درجه قوس



(ج) (ب) (الف)

شکل ۱۰- پروفیل عرضی سرعت جریان در حضور آبشکن‌های قائم با سه طول ۱۵ درصد، ۲۰ درصد و ۲۵ درصد عرض کانال در سه مقطع (الف) ۴۰ درجه، (ب) ۶۵ درجه و (ج) ۹۰ درجه قوس



(ج) (ب) (الف)

شکل ۱۱- پروفیل عرضی سرعت جریان در حضور آبشکن‌های دافع با سه طول ۱۵ درصد، ۲۰ درصد و ۲۵ درصد عرض کانال در سه مقطع الف) ٤٠ درجه، ب) ٦٥ درجه و ج) ۹۰ درجه قوس

نتیجه‌گیری

همان‌گونه که پیش از این نیز ذکر شد هدف از مطالعه حاضر بررسی تأثیر حضور آبشکن‌ها در قوس بر الگوی جریان است. بدین منظور داده‌های حاصل از برداشت سه‌بعدی سرعت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج کلی این تحقیق آزمایشگاهی را به این صورت می‌توان بیان داشت که الگوی توزیع سرعت در قوس نشان‌دهنده‌ی تمرکز نواحی با حداکثر سرعت در پایین‌دست قوس و در مجاورت دیواره‌ی خارجی است که این مسئله نشان‌دهنده اهمیت محافظت از این نواحی توسط آبشکن‌هاست. به کار بردن آبشکن‌ها در تمامی حالت‌های طولی و زاویه‌ای توزیع سرعت بالادست آبشکن‌ها را یکنواخت کرده است، همچنین سبب انتقال ناحیه پرسرعت به سمت میانه‌ی کانال و دیواره داخلی گردیده، اما قرار دادن آبشکن‌ها باعث افزایش سرعت جریان در کانال نسبت به حالت قوس بدون آبشکن می‌شود که افزایش طول آبشکن‌ها نیز خود حداکثر سرعت‌ها در کانال را افزایش داده است.

تغییر زاویه‌ی آبشکن‌ها باعث تغییر در پیشروی نواحی پرسرعت به طرف ابتدای قوس می‌شود به عنوان نمونه در طول ثابت ۲۵ درصد عرض کانال، ناحیه‌ی پرسرعت که در آبشکن‌های قائم و دافع در نیمه‌ی دوم قوس تشکیل شده در آبشکن‌های جاذب در تمام طول قوس تشکیل شده است.

بیشترین سرعت جریان در قوس در بین تمامی آزمایش‌های انجام شده در حضور آبشکن‌ها، ۸۰/۴۲ سانتی‌متر بر ثانیه است که در حضور آبشکن‌های قائم به طول ۲۵ درصد عرض کانال اتفاق افتاده است. کمترین سرعت، در حضور آبشکن‌های جاذب به طول ۲۰ درصد عرض کانال و به مقدار ۱/۰۶ سانتی‌متر بر ثانیه رخ داده است.

تحت تأثیر حضور آبشکن‌ها، تنش برشی جریان نسبت به حالت قوس بدون حضور آبشکن‌ها تا حدود شش برابر افزایش یافته است. افزایش طول آبشکن‌ها باعث افزایش میزان تنش برشی بیشینه گشته اما بر موقعیت مکانی رخداد تنش برشی بیشینه تأثیر چندانی ندارد به‌طوری‌که در کلیه‌ی حالات تنش برشی بین زاویه ۷۰ تا ۸۰ درجه قوس رخ داده است.

حضور سری آبشکن‌ها در قوس باعث یکنواختی توزیع تنش‌ها در قسمت مستقیم بالادست و ابتدای قوس گردیده و ناحیه پرتنش را از دیواره‌ی خارجی قوس به سمت میانه و دیواره داخلی قوس متمایل کرده است. تغییر طول آبشکن‌های جاذب بیشترین تأثیر و در آبشکن‌های دافع کمترین تأثیر را روی بیشینه تنش برشی می‌گذارد.

به‌طورکلی حضور آبشکن‌ها باعث افزایش تنش برشی بیشینه در طول قوس می‌شود. در بین حالت‌های طولی مورد بررسی قرار گرفته، در هر سه زاویه‌ی آبشکن‌ها بیشترین تنش برشی در حضور آبشکن‌های ۲۵ درصد عرض کانال به مقدار ۵/۸۶ برابر تنش برشی بالادست و کمترین تنش برشی در حضور آبشکن‌های به طول ۱۵ درصد عرض کانال و به میزان ۲/۹۱ برابر تنش برشی بالادست به وقوع پیوسته است. در بین حالت‌های زاویه‌ای در تمام طول‌ها بیشترین تنش برشی در حضور آبشکن‌های قائم رخ داده است.

به‌طورکلی استفاده از آبشکن‌های با طول کمتر در حفاظت از قوس تأثیر بیشتر و مفیدتری دارد اما به علت زیاد شدن تعداد آبشکن‌ها با کاهش طول آن‌ها، برای انتخاب طول آبشکن مورد استفاده باید عوامل اقتصادی هم مدنظر قرار گیرند.

منابع

۱- پورنصیری، م. ،پیرستانی، م.ر. و م.ر. مجدزاده طباطبائی ۱۳۸۷. بررسی تغییرات جریان حلزونی در کانال‌های قوسی U شکل. مجموعه مقالات هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه صنعت آب و برق(شهید عباسپور)، تهران.

۲- فضلی، م. واقفی، م. و م. قدسیان ۱۳۸۸. بررسی و مقایسه روش‌های محاسبه تنش برشی در کانال‌های قوسی شکل. مجموعه مقالات هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، شیراز.

۳- قدسیان، م. ۱۳۸۸. گزارش نهایی بررسی آبشستگی، رسوب‌گذاری و الگوی جریان اطراف آبشکن در قوس ۹۰ درجه. شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران.

۴- قدسیان،م، واقفی، م. ون. پناه‌پور۱۳۸۷. بررسیآزمایشگاهی الگوی جریان دوبعدی اطراف آب‌شکن در قوس ۹۰ درجه.مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۵(۴):۲۸۲ –۲۶۹.

5- Abad, J. D. and B. L Rhoalds, 2008. Flow structure at different stages in a meander-bend with bend way weirs. Journal of Hydraulic Engineering. 134(8): 1052-1063.

6- Duan, J. He, Li. Fu, X. and Q Wang, 2009. Mean flow and turbulence around experimental spur dike. Advances in Water Resources, 32(12): 1717-1725.

7- Giri, S. Shimizu, Y. and B Surajata, B. 2004. Laboratory measurement and numerical simulation of flow and turbulence in a meandering-like flume with spurs. Flow Measurement and Instrumentation, 15: 301-309.

8- Richardson, W. 2002. Simplified model for assessing meander bend migration rates. Journal of Hydraulic Engineering, 128(12): 1094-1097.

9- Shukry, A. 1950. Flow around bends in an open flume. Transactions, American Society of Civil Engineers, 115: 751-788

10- Smith, J.D. and S.R Mclean, 1984. A model for flow in meandering streams. Water Resources Research, 20(9): 1301-1315

11- Tingsanchali, T. and S Maheswaran, 1990. 2-d depth-averaged flow computation near groyne. Journal of Hydraulic Engineering, 116(1): 71-86.

12- 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, South Africa.