

بررسی آزمایشگاهی توزیع سرعت و تنش برشی جریان در قوس ۹۰ درجه همراه و بدون وجود سری آبشکن‌ها

اسمعیل شاکر^{۱*} و سید محمود کاشفی پور^۲

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۰/۱۰ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۷/۲۷

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

^۲ استاد گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: esmaeil.shaker@yahoo.com

چکیده

آبشکن‌ها از جمله سازه‌های موثر و به صرفه جهت حفاظت سواحل رودخانه‌ها در محل قوس‌ها هستند. تحلیل جریان در قوس محافظت شده توسط سری آبشکن‌ها پیچیده است. دلیل اصلی این مسئله تأثیرات آبشکن‌ها بر الگوی جریان و جریان‌های ثانویه و همچنین تأثیرات متقابل آبشکن‌ها برهم است. در تحقیق حاضر به بررسی آزمایشگاهی تأثیر سری آبشکن‌های غیرمستغرق بر متغیرهایی مانند توزیع سرعت متوسط، جریان‌های ثانویه و تنش برشی پرداخته شده است. آزمایش‌ها در یک فلوم قوسی ۹۰ درجه به عرض ۰/۷ متر و ارتفاع ۰/۸ متر انجام گرفت. نسبت R/B قوس برابر ۴ و عمق جریان ۰/۱۴ متر بود. آبشکن‌ها به شکل غیر مستغرق و با سه طول ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد عرض کانال به کار گرفته شدند همچنین فاصله آبشکن‌ها ۳ برابر طول آن‌ها بود. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که وجود سری آبشکن‌ها سبب یکنواختی سرعت بالادست و انتقال ناحیه پرسرعت از مجاورت دیواره خارجی به سمت میانه کانال تا دیواره داخلی می‌شود، همچنین قرارگیری سری آبشکن‌ها در دیواره خارجی قوس سبب کاهش قدرت جریان ثانویه در کانال می‌گردد. تنش برشی بستر در اثر وجود آبشکن‌ها افزایش یافته و افزایش طول آبشکن‌ها باعث بیشتر شدن آن می‌شود اما تأثیر چندانی بر موقعیت مکانی رخداد تنش برشی بیشینه ندارد بطوری که در تمام حالت‌ها، تنش برشی بیشینه در زاویه ۷۰ تا ۸۰ درجه قوس رخ داده است.

واژه‌های کلیدی: آبشکن، الگوی جریان، تنش برشی، جریان ثانویه، قوس ۹۰ درجه

Experimental Investigation on Velocity and Shear Stress Distributions in a 90-Degree Bend With and Without Series of Groynes

E Shaker^{1*} and SM Kashefipour²

Received: 30 December 2012 Accepted: 19 October 2013

¹⁻ MS.c. Student, Dept. of Hydraulic structures, Shahid Chamran Univ. Iran

²⁻ Prof., Dept. of Hydraulic structures, Shahid Chamran Univ. Iran

* Corresponding Author Email : esmaeil.shaker@yahoo.com

Abstract

Groynes are effective and economical structures for river bank protection along bends. The flow analysis around the constructed groynes along the outer bank is complicated. This is mainly due to the effects of groynes on the flow pattern and secondary currents and also interaction effects between the groynes. In the present paper, the effects of series of groynes along a 90-degree mild bend on the flow variables such as mean flow distribution, secondary currents and shear stresses have been investigated. The experiments were carried out in a bend flume with 0.7 m width and 0.8 m height. The R/B ratio for the channel bend was 4 and depth of flow was 0.14 m. The non-submerged Groynes were used in 3 lengths: 15%, 20% and 25% of the channel width. Also the groyne spacing was 3 times greater than its length. The analysis of data showed that the presence of groynes caused uniformity in the velocity distribution at upstream and the high velocity zone moved toward the center of the channel and inner wall. Groynes also reduced strength of the secondary currents. Due to existence of groynes relative shear stress was increased and by increasing of groynes lengths it was increased but lengths of groynes didn't have significant effect on the location of relative maximum shear stresses and it happened at sections of 70 to 80 degrees of bend in all conditions.

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

مقدمه

در زمینه الگوی جریان در قوسها مطالعات زیادی به صورت آزمایشگاهی و یا عددی انجام شده است که منجر به توسعه روشها و تکنیکهای مختلف ساماندهی رودخانه گردیده که از آن جمله می توان به مطالعه آزمایشگاهی شکری (۱۹۵۰) اشاره کرد. وی مشاهده نمود که برای یک قوس با انحنای ملایم محل وقوع سرعت بیشینه در نیمه اول قوس سمت جداره داخلی و با

از مهمترین اثرات فرسایش و رسوبگذاری در رودخانهها تغییر ریخت شناسی آنها است که این تغییرات هم شامل تغییرات در هندسه بستر مثل تغییرات در شیب بدنه و شیب کف و هم تغییرات در پلان رودخانه و ایجاد پیچ و خمها و یا قوسهای متعدد در رودخانه در اثر گذر زمان است. از سال ۱۹۵۰ تاکنون،

مقایسه‌ی آن‌ها با مدل گسترش یافته حاکی از کارآمدی مدل فوق در نشان دادن توزیع سرعت و شدت تلاطم جریان در لایه‌ی برشی بود. قدسیان و واقفی (۲۰۰۹) با تغییر دادن طول جان و طول بال آبشکن و عدد فرود جریان به بررسی میدان جریان و آبشستگی اطراف آبشکن‌های T شکل در یک قوس ۹۰ درجه ملایم پرداختند و نتیجه گرفتند که با قراردادی آبشکن در موقعیت‌های مختلف یک گردابه در بالادست و یک گردابه در پایین‌دست آبشکن ظاهر می‌شود همچنین افزایش طول بال آبشکن‌ها سبب افزایش طول ناحیه جدایی جریان و افزایش اندازه گردابه‌های ایجاد شده می‌گردد. دوان و همکاران (۲۰۰۹) داده‌های سه بعدی سرعت را در یک کانال مستقیم با وجود یک آبشکن مستطیلی بدست آورده و در دو میدان جریان کف صاف و کف با چاله آبشستگی، الگوی جریان را مورد بررسی قرار دادند. تحقیقات آن‌ها نشان‌دهنده افزایش مؤلفه طولی و عرضی و کاهش مؤلفه عمودی سرعت بعد از تشکیل چاله آبشستگی است، همچنین تنش برشی بستر در اطراف آبشکن ۶ تا ۸ مرتبه بزرگتر از تنش برشی بالادست گزارش شده است. قدسیان و همکاران (۱۳۸۷) به بررسی الگوی جریان دو بعدی 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 همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که در حالت استقرار آبشکن در قوس، گسترش سرعت‌های زیاد، از لایه‌های کف به سمت لایه‌های بالاتر افزایش می‌یابد.

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 هدف از مطالعه حاضر بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان و تنش برشی در قوس به همراه سری آبشکن‌ها با طول‌های متفاوت در کل طول قوس می‌باشد.

حرکت به سمت انتهای قوس به طرف جداره خارجی متمایل می‌شود. بلانکارت و گراف (۲۰۰۱) الگوی جریان در یک قوس را با استفاده از مدل فیزیکی مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس آزمایشات صورت گرفته، سرعت پایین‌دست در نیمه انتهایی بیشتر از سرعت در قسمت مستقیم بوده است و مرکز سرعت‌های بیشینه در نزدیکی ناحیه جدادگی بین سلول‌های گردابه‌ای در زیر سطح آب مشاهده گردید. ابد و روالدز (۲۰۰۸) از داده‌های سه بعدی سرعت، برای تعیین الگوی جریان در اطراف بندوی‌های^۱ احداث شده در قوس آبراهه استفاده کردند. این محققین مدل ریاضی سه‌بعدی جهت شبیه‌سازی الگوی جریان در اطراف سرریز مستغرق توسعه داده و از داده‌های واقعی جهت کالیبره کردن مدل خود استفاده کردند. ناجی ابهری و همکاران (۲۰۱۰) الگوی جریان در یک قوس ۹۰ درجه با بستر صلب را بررسی نموده و خصوصیات جریان از جمله نحوه تأثیر جریان ثانویه بر توزیع سرعت، مسیر حداکثر سرعت و غیره را مورد مطالعه قرار دادند. بر پایه تحقیقات واشنی و گرید در سال ۱۹۷۵، وقتی R/B در یک قوس بیش از $3/5$ 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 (قدسیان ۱۳۸۸).

امروزه روش‌ها و تکنیک‌های مختلف ساماندهی رودخانه توسعه یافته است. یکی از این روش‌ها احداث آبشکن‌های رودخانه‌ای است. آبشکن‌های رودخانه‌ای، از سازه‌های مهم ساماندهی رودخانه به شمار می‌آیند که به صورت منفرد یا به صورت یک سری متوالی، در یک و یا دو سمت رودخانه احداث می‌گردند. گیری و همکاران (۲۰۰۴) به بررسی آزمایشگاهی و عددی الگوی جریان و آشفتگی در فلومی با ۳ قوس و شبیه به رودخانه‌های مئاندری پرداختند. ایشان 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

¹Bendways

مواد و روش‌ها

همان‌گونه که اشاره گردید، در این تحقیق الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه با وجود حالت‌های مختلف سری آبشکن‌ها و بدون وجود آن‌ها بررسی شده است. برای این منظور آزمایشات بر روی یک مدل فیزیکی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز انجام گردید. به منظور انجام آزمایش‌های مورد نظر از یک فلوم آزمایشگاهی با قوس ۹۰ درجه با نسبت شعاع انحنای مرکزی به عرض فلوم ۴ و مقطع عرضی مستطیلی استفاده شد. جداره کانال از جنس پلکسی گلاس و جنس کف گالوانیزه می‌باشد. عرض فلوم ۰/۷ متر، شعاع خارجی قوس ۳/۱۵ متر و طول راستای مستقیم کانال در بالادست و پایین‌دست به ترتیب ۵ و ۳ متر می‌باشد. 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 معادل با ۱۵، ۲۰، و ۲۵ درصد عرض کانال هستند استفاده گردید. این آبشکن‌ها به شکل مستطیلی با زاویه قائم و نفوذناپذیر و در شرایط غیر مستغرق (با ارتفاعی بیشتر از عمق آب) در نظر گرفته شدند. پس از نصب آبشکن‌ها در دیواره خارجی قوس با فاصله ۳ برابر طول آن‌ها و در محدوده فرسایش پذیر که قبلاً از طریق آزمایشات طولانی مدت 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 این گونه بود که با باز کردن شیر ورودی آب وارد فلوم شده تا سطح آب درون فلوم افزایش یابد سپس با باز کردن دریچه کشویی پایین‌دست سطح آب مورد نظر تنظیم گردید، پس از کنترل سطح آب بوسیله یک دستگاه عمق سنج دیجیتال و اطمینان از حصول عمق مورد نظر دریچه ثابت نگه‌داشته می‌شد. همزمان به وسیله یک دستگاه دبی‌سنج اولتراسونیک دبی عبوری کنترل می‌گردید. در این مطالعه در تمام آزمایش‌ها عمق جریان برابر ۱۴ سانتی‌متر بوده

و تراز سطح آب و همچنین میزان دبی ورودی به صورت پیوسته در تمام طول آزمایش کنترل می‌گردید. در ابتدا یک آزمایش بدون حضور آبشکن‌ها جهت برداشت الگوی جریان در قوس و انجام مقایسه صورت گرفت، سپس با نصب آبشکن‌ها با زاویه ۹۰ درجه نسبت به جریان و عمود بر دیواره خارجی قوس آزمایش‌ها بصورت جداگانه تکرار گردید. سرعت‌ها در اطراف آبشکن‌ها و مقاطع عرضی معین توسط دستگاه سرعت‌سنج سه بعدی الکترومغناطیس JEF ALEC برداشت گردید. زمان نمونه برداری بسته به موقعیت نقاط متفاوت بوده و نمونه برداری با فرکانس ۲۰ مگاهرتز صورت گرفته است. برداشت داده‌ها در قوس با مختصات قطبی انجام گرفت و داده‌های بدست آمده از طریق روابط مثلثاتی مربوطه به مختصات دکارتی تبدیل شدند. برای یافتن الگوی جریان نیاز به انتخاب مقاطعی مختلف از طول کانال می‌باشد 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 موقعیت آن‌ها متفاوت بود استفاده شد. هر مقطع به ۱۵ نقطه عرضی با فاصله‌های ۲/۵ سانتی‌متر از دیواره‌ها در ابتدا و انتها و ۵ سانتی‌متر از یکدیگر تقسیم گردید. همچنین به منظور بررسی جامع تری از الگوی جریان، سرعت‌ها در ۳ عمق ۳، ۷ و ۱۱ سانتی‌متر از کف اندازه‌گیری شد. شکل ۱ نمایی از فلوم قوسی مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها و شکل ۲ نمایانگر آرایش آبشکن‌های با طول ۲۵ درصد عرض کانال به عنوان نمونه‌ای از آرایش آبشکن‌ها است.



شکل ۱- فلوم قوسی مورد استفاده برای آزمایش‌ها.

$$\tau_{by} = \frac{\rho g}{c^2} \bar{V} \sqrt{U^2 + \bar{V}^2} \quad [4]$$

$$\tau_b = \sqrt{\tau_{bx}^2 + \tau_{by}^2} \quad [5]$$

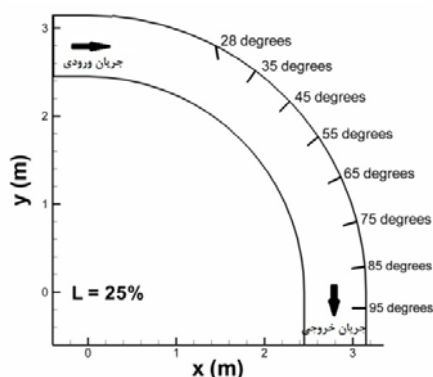
که در آن \bar{U} و \bar{V} به ترتیب متوسط سرعت در جهت‌های x و y (متر بر ثانیه)، τ_{bx} و τ_{by} به ترتیب تنش برشی بستر در جهت‌های x و y (نیوتن بر متر مربع) و ρ و g به ترتیب دانسیته سیال و ضریب گرانش و c ضریب شزی است.

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 سه صفحه نزدیک به بستر با فاصله ۳ سانتی‌متر از بستر، صفحه میانی با فاصله ۷ سانتی‌متر و صفحه نزدیک به سطح آب با فاصله ۱۱ سانتی‌متر از بستر ارائه شده است.

شکل ۳ الگوی توزیع سرعت متوسط را در پلان برای قوس نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل مشخص است، در صفحه نزدیک به بستر سرعت دارای توزیع تقریباً یکنواختی در طول کانال است. در شروع قوس در دیواره داخلی سرعت افزایش یافته و ناحیه پرسرعت در مجاورت دیواره داخلی و ناحیه کم‌سرعت در مجاورت دیواره خارجی به وجود می‌آید اما با پیشروی در قوس سرعت‌ها در دیواره‌های داخلی و خارجی به یکدیگر نزدیک می‌شود. در عمق دوم و در ابتدای قوس نواحی پرسرعت در مجاورت دیواره داخلی هستند ولی با نزدیک شدن به انتهای قوس و بعد از زاویه حدود ۳۵ درجه به سمت دیواره خارجی متمایل می‌شوند، به گونه‌ای که بیشینه‌ی میزان سرعت در قوس، در یک سوم



شکل ۲- آرایش آبشکن‌های با طول ۲۵٪ عرض کانال.

برای محاسبه سرعت متوسط با استفاده از

داده‌های سه بعدی سرعت از رابطه ۱ استفاده شده است که در آن u ، v و w مؤلفه‌های طولی، عرضی و عمقی سرعت می‌باشند.

$$\bar{V}_r = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad [1]$$

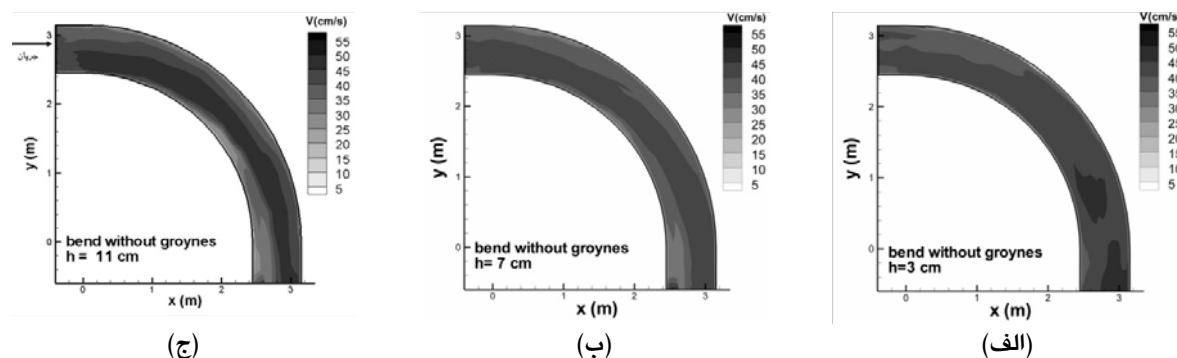
برای بررسی تغییرات جریان ثانویه در طول کانال از رابطه ۲ استفاده شد.

$$i = \frac{\int v^2 dA}{\int u^2 dA} \quad [2]$$

در رابطه ۲، i قدرت جریان ثانویه در هر مقطع و dA سطح مقطع سلول‌های موجود در آن مقطع است (قدسیان ۱۳۸۸). در واقع در رابطه فوق قدرت جریان ثانویه که از اندرکنش مومنوم طولی جریان با جریان ثانویه عرضی شکل می‌گیرد به عنوان معیاری برای رشد و توسعه جریان ثانویه در طول کانال در نظر گرفته شده است.

جهت محاسبه تنش برشی از روابط زیر استفاده شده است.

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g}{c^2} \bar{U} \sqrt{U^2 + \bar{V}^2} \quad [3]$$

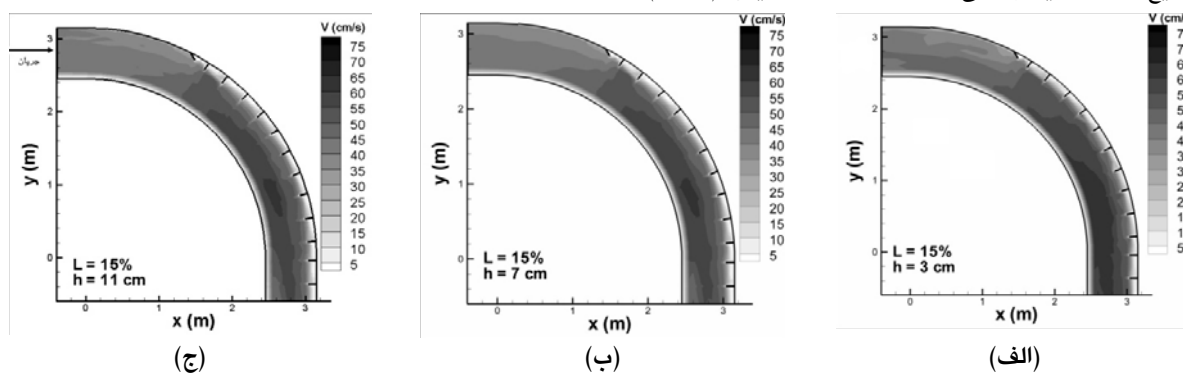


شکل ۳- الگوی توزیع سرعت متوسط در قوس در سه صفحه با فاصله (الف) ۳، (ب) ۷ و (ج) ۱۱ سانتی‌متر از بستر.

یکنواختی توزیع سرعت در صفحه نزدیک بستر و همچنین تشکیل نواحی پر سرعت در نزدیکی دیواره داخلی در ابتدای قوس و در نزدیکی دیواره خارجی در انتهای قوس را گزارش کرده است. همچنین نتایج بدست آمده از شکل‌های فوق، نتایج تحقیق شکری (۱۹۵۰) را در مورد توزیع سرعت در قوس تأیید می‌کند.

شکل ۴ توزیع سرعت را در سه صفحه در حالت بکارگیری آبشکن‌هایی به طول ۱۵ درصد عرض کانال نشان می‌دهد مطابق شکل سرعت در مجاورت قوس خارجی به شدت کاهش یافته و قرار دادن آبشکن‌ها سبب پراکندگی و انتقال ناحیه پرسرعت از دیواره خارجی به سمت میانه کانال و دیواره داخلی می‌شود.

انتهایی و در مجاورت دیواره خارجی آن مشاهده می‌شود. در یک سوم ابتدای قوس سرعت‌های حداکثر از دیواره خارجی قوس فاصله داشته و این قسمت از قوس نیاز به محافظت ندارد. نکته مهم در این شکل تمرکز نواحی با حداکثر سرعت در پایین دست قوس در مجاورت دیواره خارجی قوس می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که محافظت از قوس باید تا پس از قوس ادامه یابد درحالی‌که یکی از نقایصی که معمولاً در طراحی آبشکن‌ها در قوس وجود دارد، محافظت از قوس بیرونی تنها در محدوده قوس است. توزیع سرعت در صفحه نزدیک به سطح آب همانند صفحه میانی است با این تفاوت که مقادیر عددی سرعت‌ها بیشتر بوده و توزیع سرعت یکنواختی کمتری دارد. قدسیان (۱۳۸۸)



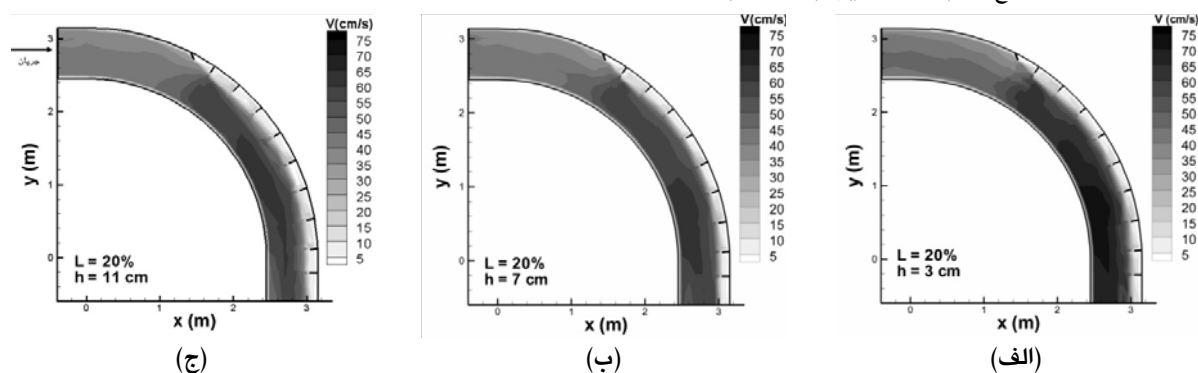
شکل ۴- الگوی توزیع سرعت متوسط در قوس در حالت بکارگیری آبشکن‌هایی به طول ۱۵ درصد عرض کانال در سه صفحه با فاصله (الف) ۳، (ب) ۷ و (ج) ۱۱ سانتی‌متر از بستر.

قوس خارجی نواحی با سرعت کمتر از ۱۰ سانتی‌متر بر ثانیه تشکیل شده است. تغییرات سرعت در مجاورت دماغه آبشکن‌ها به سرعت تغییر کرده و به فاصله کمی از دماغه آبشکن‌ها سرعت‌های بالا قرار گرفته‌اند. این

با مقایسه‌ی شکل ۳ و ۴ مشخص می‌شود در حالی‌که در قوس بدون آبشکن سرعت در مجاورت دیواره خارجی به بیش از ۴۵ سانتی‌متر بر ثانیه رسیده بود با قرار دادن آبشکن‌ها، در کلیه نواحی در مجاورت

بیرونی قوس گردیده‌اند. ناحیه با سرعت‌های حداکثر در یک سوم انتهایی قوس و در مجاورت ساحل داخلی اتفاق افتاده است. قسمت پایین‌دست قوس نیز از تمرکز بردارهای سرعت در امان مانده است. بیشینه سرعت در این حالت نسبت به حالت قبل افزایش یافته که علت این مسئله کاهش یافتن سطح مقطع عبور جریان با افزایش طول آبشکن‌ها است.

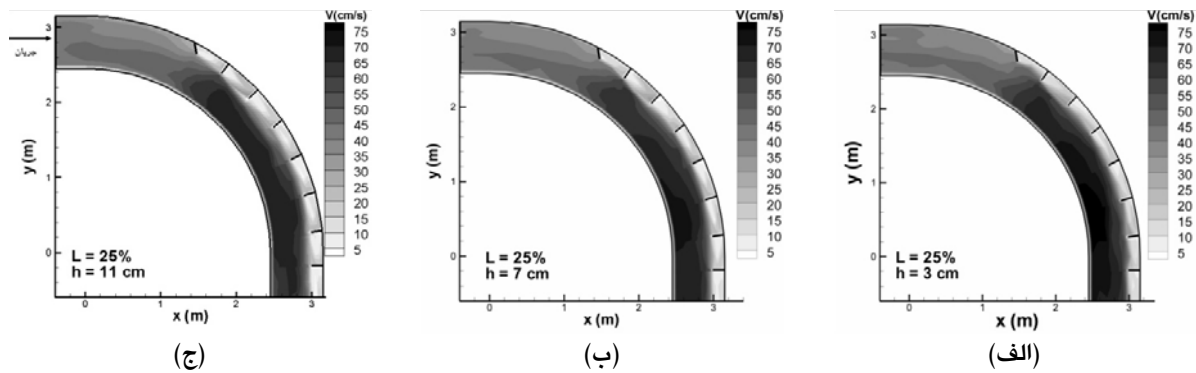
امر نشان می‌دهد که محافظت دماغه آبشکن‌ها جهت حفظ پایداری سازه آبشکن امری اجتناب‌ناپذیر است. توزیع سرعت در سه صفحه نزدیک بستر، میانه و نزدیک به سطح آب برای حالت قرارگیری آبشکن با طول ۲۰ درصد عرض کانال در شکل ۵ نشان داده شده است. در این حالت هم آبشکن‌ها توانسته‌اند بردارهای حداکثر سرعت را از مجاورت ساحل بیرونی قوس منحرف کرده و مانع از برخورد این بردارها با جداره



شکل ۵- الگوی توزیع سرعت متوسط در قوس در حالت بکارگیری آبشکن‌هایی به طول ۲۰ درصد عرض کانال در سه صفحه با فاصله (الف) ۳، (ب) ۷ و (ج) ۱۱ سانتی‌متر از بستر.

با طول ۲۵ درصد عرض کانال باعث ایجاد فاصله زیادی بین آبشکن‌ها شده است، بنابراین از آنجا که به نظر می‌رسد در طراحی برای آبشکن‌های با درصد انسداد بالا باید فاصله‌های کمتری در نظر گرفت، کارگذاری آبشکن‌ها با ۲۵ درصد انسداد و با این فاصله جهت محافظت حالت مناسبی به نظر نمی‌رسد. در صورت استفاده به کاربردن روش‌های حفاظتی مانند استفاده از ریپرپ هم در دماغه و هم در جداره آبشکن‌ها ضروری می‌نماید. به دلیل افزایش طول آبشکن‌ها و کاهش بیشتر سطح مقطع عبور جریان، سرعت‌ها در این حالت هم نسبت به حالت‌های قبل افزایش یافته‌اند.

شکل ۶ توزیع سرعت را در سه صفحه در حالت بکارگیری آبشکن‌هایی به طول ۲۵ درصد عرض کانال نشان می‌دهد. با توجه به این شکل این حالت بکارگیری آبشکن‌ها نیز توانسته ناحیه پرسرعت را تا حدودی از دیواره خارجی قوس دور کند اما تفاوت این حالت با حالت‌های قبل در توزیع سرعت بین آبشکن‌ها است، در دو حالت طولی قبل در دیواره خارجی بین آبشکن‌ها ناحیه با سرعت کم بطور کامل حاکم شده اما در این حالت در فضایی از بین آبشکن‌ها ناحیه‌ای با سرعت بیشتر بوجود آمده که این مسئله می‌تواند ناپایداری سازه آبشکن‌ها را بدنبال داشته باشد. با توجه به ثابت بودن فاصله آبشکن‌ها در این تحقیق، استفاده از آبشکن

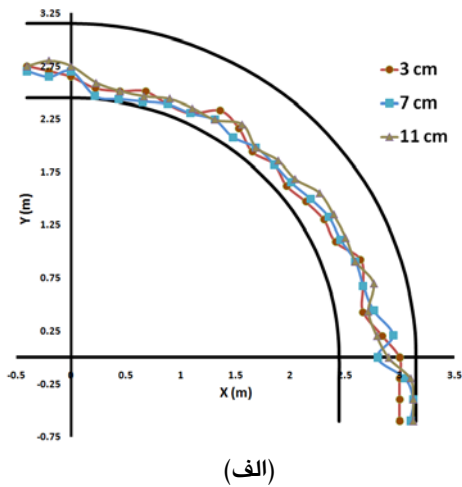
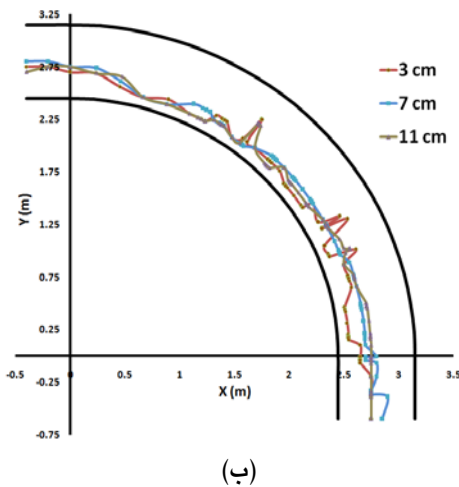


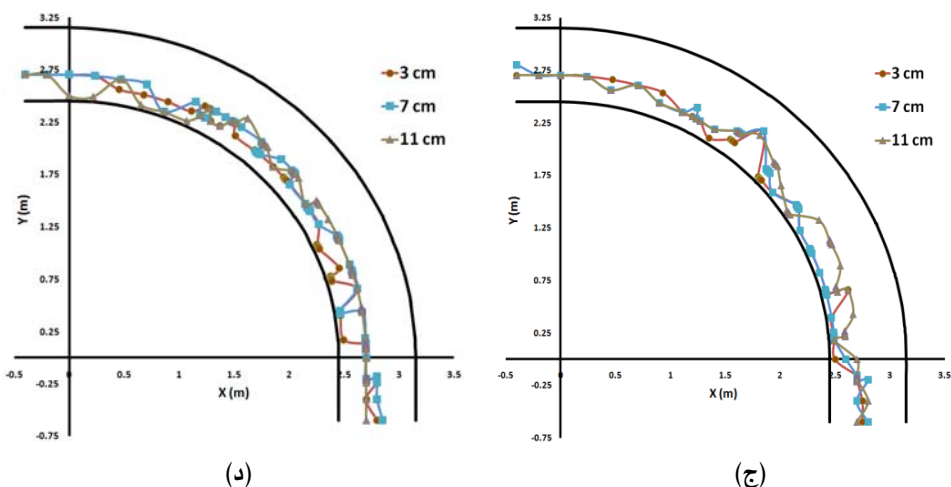
شکل ۶- الگوی توزیع سرعت متوسط در قوس در حالت بکارگیری آبشکن‌هایی به طول ۲۵ درصد عرض کانال در سه صفحه با فاصله (الف) ۳، (ب) ۷ و (ج) ۱۱ سانتی‌متر از بستر.

اثر آبشکن‌ها بر موقعیت سرعت بیشینه

قوس است و بعد از این ناحیه شروع به دور شدن از دیواره داخلی و حرکت در میانه کانال و به سمت دیواره خارجی می‌کند و در انتهای قوس و ابتدای قسمت مستقیم پایین‌دست موقعیت سرعت بیشینه به دیواره خارجی قوس متمایل می‌شود. ناجی ابهری و همکاران (۲۰۱۰) هم در مطالعاتی که روی الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه انجام دادند نتیجه گرفتند که سرعت‌های بیشینه تا زاویه ۳۰ درجه نزدیک به دیواره داخلی هستند و بعد از آن به سمت دیواره خارجی قوس متمایل می‌شوند.

برای بررسی تأثیر آبشکن‌ها بر موقعیت سرعت بیشینه بعد از استخراج مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت و محاسبه سرعت متوسط موقعیت بیشینه سرعت متوسط در سه صفحه نزدیک به بستر با فاصله ۳ سانتی‌متر، صفحه میانی با فاصله ۷ سانتی‌متر و صفحه نزدیک به سطح آب با فاصله ۱۱ سانتی‌متر از بستر در شکل ۷ مشخص گردید. با توجه به شکل ۷-الف در حالت بدون آبشکن موقعیت سرعت بیشینه در هر سه صفحه نزدیک بستر، میانه و نزدیک سطح آب مشابه است. در قسمت مستقیم بالادست سرعت بیشینه در میانه کانال قرار دارد اما بعد از ورود جریان به قوس و تا زاویه نزدیک به ۳۰ درجه سرعت بیشینه نزدیک به دیواره داخلی





شکل ۷- موقعیت سرعت بیشینه (الف) در قوس بدون آبشکن، (ب) در حالت بکارگیری آبشکن‌هایی به طول ۱۵ درصد، (ج) ۲۰ درصد و (د) ۲۵ درصد عرض کانال.

چسبیده و تنها در قسمت مستقیم پایین دست از آن جدا شده و به سمت میانه کانال حرکت می‌کند ولی در عمق سوم از زاویه ۵۵ درجه به بعد هم موقعیت سرعت بیشینه در میانه کانال قرار دارد. در مطالعه‌ای که توسط قدسیان و همکاران (۱۳۸۷) صورت گرفته است هم، قرار دادن آبشکن در قوس خارجی سبب دور شدن سرعت بیشینه از دیواره خارجی قوس می‌شود.

بررسی تأثیر آبشکن بر روند رشد و استهلاک جریان ثانویه در طول کانال

مقدار نسبی قدرت جریان ثانویه در طول قوس برای شرایط بدون آبشکن و همراه با آبشکن‌ها به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. در شکل ۸ محور عمودی نسبت به مقدار بیشینه قدرت جریان ثانویه در طول کانال بی بعد شده است. چنانکه در این شکل مشاهده می‌گردد در حالت قوس بدون آبشکن با ورود جریان به قوس جریان ثانویه شروع به شکل‌گیری می‌کند و در مقطع ۳۵ درجه قدرت جریان ثانویه به حداکثر مقدار خود رسیده و بعد از این مقطع کاهش یافته و از زاویه ۷۰ درجه دوباره افزایش می‌یابد.

با توجه به شکل ۷- ب آبشکن‌های با طول ۱۵ درصد عرض کانال در موقعیت سرعت بیشینه در قسمت مستقیم بالادست تأثیری نداشته و همانند قوس بدون آبشکن سرعت بیشینه در میانه کانال قرار دارد اما با ورود جریان به قوس موقعیت سرعت بیشینه به نزدیکی دیواره داخلی منتقل می‌شود و تا زاویه ۴۰ درجه در این ناحیه قرار دارد اما بعد از زاویه ۴۰ درجه قوس محل اتفاق سرعت بیشینه شروع به حرکت به طرف میانه کانال کرده و تا انتهای قوس و مسیر مستقیم پایین دست در میانه کانال قرار دارد. در این حالت موقعیت سرعت بیشینه در هر سه عمق تقریباً مشابه است بجز انتهای کانال که سرعت بیشینه در عمق نزدیک به بستر برخلاف دو عمق دیگر دوباره به طرف دیواره داخلی منتقل می‌شود.

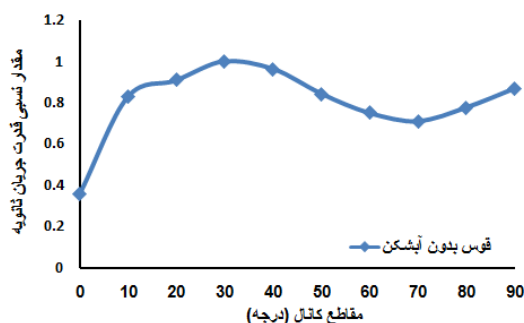
با توجه به شکل ۷- ج قرار دادن آبشکن‌هایی با عرض ۲۰ درصد عرض کانال موقعیت سرعت بیشینه را نسبت به حالت قبل چندان تغییر نمی‌دهد و تنها تفاوت با حالت قبل در تغییر مکان سرعت بیشینه در عمق میانه علاوه بر عمق نزدیک به سطح آب به طرف قوس داخلی است. همانگونه که از شکل ۷- د مشخص است در این حالت طولی آبشکن‌ها سرعت بیشینه تا زاویه ۵۵ درجه در میانه کانال قرار دارد و از این زاویه به بعد سرعت بیشینه در عمق اول و دوم کاملاً به دیواره داخلی

همانگونه که از شکل ۹ ملاحظه می‌گردد در هر سه حالت طولی آبشکن‌ها با ورود جریان به قوس همانند حالت بدون آبشکن قدرت جریان ثانویه شروع به افزایش یافتن می‌کند و قبل از اولین آبشکن به مقدار بیشینه خود می‌رسد اما با رسیدن به اولین آبشکن از سری آبشکن‌ها که در زاویه حدود ۲۸ درجه قرار دارد مقدار آن به شدت کاهش یافته و با مقدار تقریباً ثابت تا انتهای قوس ادامه می‌یابد. این کاهش قدرت جریان به علت کم شدن سرعت عرضی جریان و افزایش سرعت طولی در اثر کوچکتر شدن مجرای عبور جریان با اضافه شدن آبشکن‌ها است که باعث کاهش صورت کسر رابطه ۲ و افزایش مخرج آن و در نتیجه کاهش قدرت جریان ثانویه می‌شود، همچنین با همین استدلال و با توجه به شکل ۹ افزایش طول آبشکن‌ها باعث کاهش بیشتر قدرت جریان ثانویه گردیده است. علت نوساناتی کمی که در میزان قدرت جریان ثانویه بعد از کاهش آن رخ داده موقعیت قرارگیری آبشکن‌ها نسبت به مقاطع است به عنوان مثال علت اینکه مقدار جریان ثانویه در مقطع ۶۰ درجه حالت طولی ۲۵ درصد نسبت به مقاطع قبل و بعد از خود مقداری بیشتر است، فاصله بیشتر این مقطع از آبشکن قبل و بعد از خود نسبت به مقاطع دیگر است بطوری که این مقطع تقریباً وسط دو آبشکن قرار گرفته است.

بطور خلاصه اگر مقدار قدرت جریان ثانویه در مقاطع مختلف در شکل‌های ۸ و ۹ مقایسه شود این نکته آشکار می‌شود که در تمامی مقاطع مقدار قدرت جریان ثانویه با وجود آبشکن‌ها به شکل معنی داری کمتر از حالت قوس بدون آبشکن است که این خود کارایی سازه آبشکن را در مقابله با جریان‌های مخرب ثانویه تأیید می‌کند.

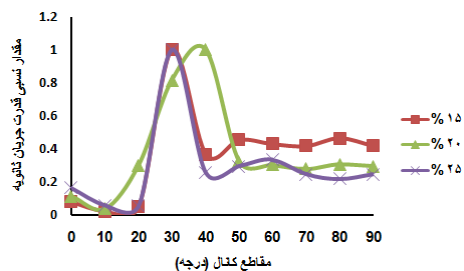
اثر آبشکن‌ها بر بیشینه تنش برشی

بر اساس تحقیقات انجام شده 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). جهت تجزیه و تحلیل تنش‌های برشی بستر، تنش‌های



شکل ۸- تغییرات قدرت جریان ثانویه در طول قوس کانال بدون وجود آبشکن‌ها.

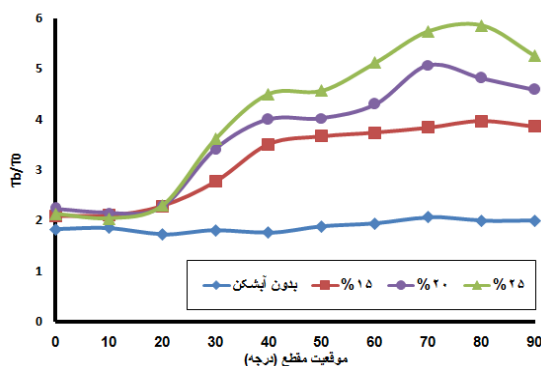
علت افزایش قدرت جریان ثانویه تا زاویه ۳۵ درجه، افزایش خیزایی است که در اثر نیروی گریز از مرکز به وجود آمده و باعث بهم زدن تعادل دینامیکی در قوس می‌شود که برای جبران این عدم تعادل یک گرادیان فشار عرضی بر سطح آب اعمال می‌گردد که این گرادیان فشار عرضی نیرویی در خلاف جهت نیروی گریز از مرکز وارد می‌کند و از اندرکنش این نیرو و نیروی گریز از مرکز جریان ثانویه به وجود می‌آید. از مقطع ۳۵ درجه به بعد به علت به تعادل رسیدن نیروی گرادیان عرضی فشار با نیروی گریز از مرکز قدرت جریان ثانویه کاهش می‌یابد اما از مقطع ۷۰ درجه تا انتهای قوس قدرت جریان ثانویه به خاطر برخورد جریان با دیواره خارجی دوباره افزایش می‌یابد. ناجی ابهری و همکاران (۲۰۱۰) هم مقدار بیشینه قدرت جریان ثانویه در طول قوس را در زاویه ۳۰ درجه گزارش کردند همچنین واقفی و قدسیان (۱۳۸۹) با ارائه نتایج مشابه شکل ۸، علت افزایش قدرت جریان ثانویه را در ابتدای قوس برخورد خطوط جریان مسیر مستقیم بالادست با دیواره خارجی قوس بیان کرده‌اند.



شکل ۹- تغییرات قدرت جریان ثانویه در طول قوس با وجود آبشکن‌ها با طول ۱۵٪، ۲۰٪ و ۲۵٪ عرض کانال.

جریان‌های ثانویه در قوس نسبت به مسیر مستقیم و نیروی برشی بزرگی است که در اثر وجود این جریان‌ها به وجود می‌آید (اسمیت و مکین 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 بدست می‌آید که نشانگر همخوانی یافته‌های تحقیق حاضر با مطالعه ریچاردسون (۲۰۰۲) است.

برشی بیشینه در هر مقطع محاسبه شده و نسبت به تنش برشی متوسط مقطع مستقیم بالادست که از رابطه $\tau = \gamma R S$ محاسبه گردیده بی بعد شده است و نمودار تغییرات تنش برشی بیشینه در طول فلوم ترسیم شده است. شکل ۱۰ نشان‌دهنده نسبت بیشینه تنش برشی در هر مقطع نسبت به تنش برشی قسمت مستقیم قوس در مقاطع مختلف 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 ۲ برابر تنش در قسمت مستقیم را دارا می‌باشد که علت این مساله تأثیر بیشتر



شکل ۱۰- تغییرات بیشینه تنش برشی بی بعد شده در طول قوس کانال با و بدون وجود آبشکن‌ها .

سبب افزایش تنش برشی می‌شود که علت این مسئله به کاهش سطح مقطع عبور جریان در اثر افزایش طول آبشکن‌ها و در نتیجه افزایش سرعت و به دنبال آن افزایش تنش برشی برمی‌گردد. به عنوان مثال با مقایسه مقادیر بیشینه نمودارها برای هر ۳ حالت طولی مشاهده می‌شود که افزایش طول آبشکن‌ها سبب افزایش میزان بیشینه تنش برشی شده، بطوری‌که در حالت آبشکن با طول ۲۰ درصد عرض کانال مقدار بیشینه تنش برشی ۲۵ درصد نسبت به آبشکن با طول ۱۵ درصد عرض کانال افزایش یافته 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. با مقایسه نمودارها معلوم می‌شود که افزایش طول آبشکن‌ها تأثیر چندانی بر محل وقوع تنش برشی بیشینه نمی‌گذارد و بیشینه تنش برشی در هر

با قرار دادن آبشکن‌ها 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 با نزدیک شدن به آبشکن‌ها در زاویه 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 هر ۳ حالت طولی آبشکن‌ها، از ابتدای قوس تا زاویه حدود ۲۸ درجه میزان تنش‌های برش حداکثر با هم برابر است، فقط در حالت آبشکن‌های با طول ۱۵ درصد، میزان تنش برشی بیشینه بین زاویه ۲۰ تا ۲۸ درجه نسبت به دو حالت طولی دیگر مقداری کاهش یافته‌است. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات طول آبشکن‌ها در کل طول قوس

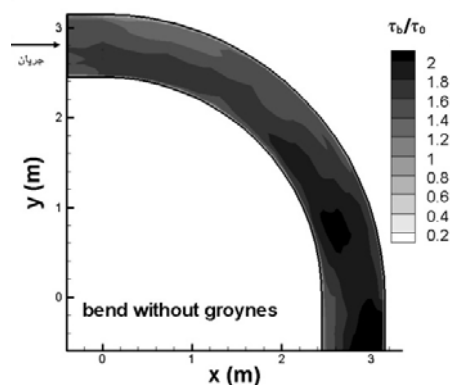
خارجی و ناحیه‌ای با تنش برشی نسبی $1/6$ در دیواره داخلی تشکیل می‌شود که نشان‌دهنده پتانسیل بالای آبشستگی و تخریب دیواره‌ها در دیواره خارجی و همچنین قسمت مستقیم پایین دست است این موضوع علاوه بر تأیید تحقیقات واشنی و گرید (قدسیان ۱۳۸۸) ضرورت اجرای راهکارهای حفاظتی مانند استفاده از آبشکن را در دیواره خارجی و همچنین ادامه آن تا قسمت مستقیم پایین دست نشان می‌دهد.

شکل ۱۲ نشان‌دهنده توزیع تنش برشی بستر برای سه حالت طولی قرارگیری آبشکن‌ها است. بطور کلی قراردادن آبشکن‌ها باعث یکنواختی توزیع تنش برشی در بالادست محل قرارگیری آبشکن‌ها یعنی قسمت مستقیم بالادست و ابتدای قوس تا زاویه حدود 30° درجه شده است اما افزایش طول آبشکن‌ها تا حدودی سبب کاهش میزان تنش برشی در بالادست می‌شود شکل ۱۲ نشان‌دهنده توزیع تنش برشی بستر برای سه حالت طولی قرارگیری آبشکن‌ها است. بطور کلی قراردادن آبشکن‌ها باعث یکنواختی توزیع تنش برشی در بالادست محل قرارگیری آبشکن‌ها یعنی قسمت مستقیم بالادست و ابتدای قوس تا زاویه حدود 30° درجه شده است اما افزایش طول آبشکن‌ها تا حدودی سبب کاهش میزان تنش برشی در بالادست می‌شود بطوریکه در حالت آبشکن با طول 15% درصد تنش برشی نسبی $2/2$ در بیشتر مناطق بالادست، در حالت آبشکن با طول 20% درصد عرض کانال تنش برشی نسبی 2 و در آبشکن با طول 25% درصد عرض کانال تنش برشی نسبی 1 تا $1/5$ تشکیل شده است که این نشانه افزایش پتانسیل رسوب‌گذاری در بالادست با افزایش طول آبشکن‌ها است. با توجه به شکل ۱۲ افزایش طول آبشکن‌ها تا 25% درصد عرض کانال باعث تشکیل یافتن نواحی گسترده‌ای با تنش برشی زیاد در قوس خارجی می‌شود که این مساله پایین آمدن کارایی آبشکن‌های با طول زیاد را در کنترل تنش برشی در قوس خارجی نشان می‌دهد.

سه حالت طولی بین زاویه 70° تا 80° درجه قوس اتفاق می‌افتد. با رسیدن به انتهای قوس و تضعیف اثرات جریان‌های ثانویه نمودارهای هر سه حالت تنش برشی شروع به نزول می‌کنند. نتایج بدست آمده از شکل ۱۰، نتایج مطالعه دوان و همکاران (۲۰۰۹) را که تنش برشی بیشینه را با وجود آبشکن در قوس تا 8 مرتبه بزرگتر گزارش کرده‌اند را تأیید می‌نماید.

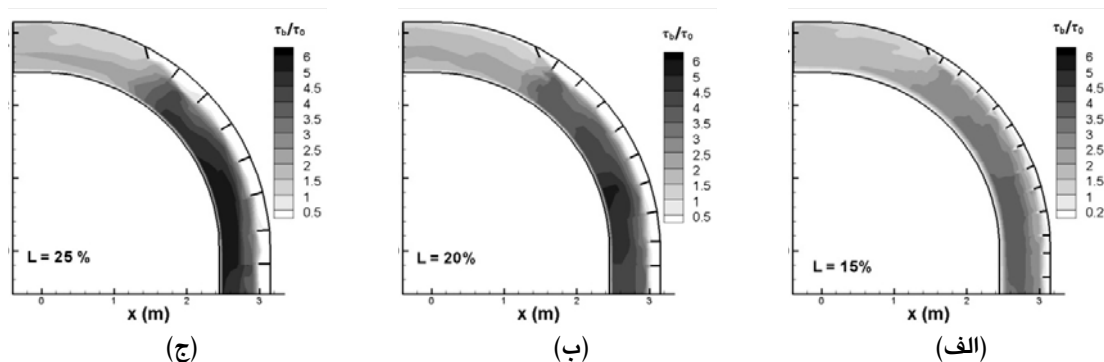
اثر آبشکن‌ها بر الگوی توزیع تنش برشی در کانال

با توجه به اینکه محدوده‌های دارای بیشترین تنش برشی در قوس رودخانه‌ها آسیب پذیرترین مناطق در مقابل فرسایش بستر و نواحی با تنش برشی کم مناسبترین مناطق برای رسوب‌گذاری می‌باشند با بررسی توزیع تنش برشی می‌توان نواحی محتمل آبشستگی را پیش‌بینی نمود. شکل ۱۱ توزیع تنش برشی بستر را برای قوس بدون آبشکن نمایش می‌دهد. با توجه به شکل در حالت کلی در نیمه اول قوس توزیع تنش برشی یکنواخت‌تر از نیمه دوم قوس است و یک ناحیه با تنش برشی نسبی $1/4$ در دیواره خارجی و ناحیه‌ای با تنش برشی نسبی $1/7$ در دیواره داخلی شکل می‌گیرد که نشان‌دهنده پتانسیل بیشتر آبشستگی در دیواره داخلی در نیمه ابتدایی قوس است.



شکل ۱۱- الگوی توزیع تنش برشی بستر.

در نیمه دوم قوس و با حرکت به سمت انتهای قوس ناحیه پرتنش در عرض قوس گسترش یافته و در انتها به سمت دیواره خارجی پیشروی می‌کند بطوریکه در خروجی ناحیه‌ای با تنش برشی نسبی 2 در دیواره



شکل ۱۲- توزیع تنش برشی بستر با بکارگیری آبشکن‌هایی به طول (الف) ۱۵٪، (ب) ۲۰٪ و (ج) ۲۵٪ عرض کانال.

قوس رخ داده است. افزایش طول آبشکن‌ها نیز خود حداکثر سرعت‌ها در کانال را افزایش داده است. قرار دادن سری آبشکن‌ها در دیواره خارجی قوس سبب می‌شود سرعت بیشینه که در نواحی انتهایی قوس به سمت دیواره خارجی متمایل گردیده، در تمامی طول کانال در میانه و نزدیک به دیواره داخلی قوس قرار گیرد.

وجود سری آبشکن‌ها در قوس سبب کاهش چشمگیر قدرت جریان ثانویه از محل نصب آبشکن‌ها تا انتهای قوس نسبت به حالت بدون حفاظت گردیده، همچنین افزایش طول آبشکن‌ها نیز خود سبب کاهش بیشتر قدرت جریان ثانویه در طول قوس گردیده است. مقدار تنش برشی بدون بعد (تنش برشی موضعی نسبت به تنش برشی بالادست) در طول قوس بین ۱/۷ تا ۲/۱ متغیر است. قرارگیری سری آبشکن‌ها در قوس تا قبل از زاویه ۲۰ درجه و نزدیک به محل نصب آبشکن‌ها تأثیر چندانی بر میزان تنش برشی ندارد اما بعد از این موقعیت تنش برشی نسبت به حالت قوس بدون وجود آبشکن‌ها افزایش یافته است. افزایش طول آبشکن‌ها خود باعث افزایش میزان تنش برشی بیشینه گشته و بیشترین میزان تنش برشی بی بعد با وجود آبشکن‌های با طول ۲۵ درصد عرض کانال و به میزان ۵/۸۶ برابر تنش برشی بالادست است. وجود آبشکن‌ها بر موقعیت مکانی رخداد تنش برشی بیشینه تأثیر چندانی ندارد بطوری‌که در کلیه حالت‌ها تنش برشی بین زاویه ۷۰ تا ۸۰ درجه قوس رخ داده است. وجود سری آبشکن‌ها در قوس باعث یکنواختی توزیع

مهمترین اثر قراردادن آبشکن‌ها در قوس، انتقال ناحیه پرتنش که سبب تخریب دیواره‌ها می‌شود از دیواره خارجی قوس به میانه کانال و دیواره داخلی است که علت این مسئله برخورد جریان با آبشکن‌ها و انحراف آن به سمت دیواره‌ی داخلی است که سبب افزایش تنش در محل دیواره‌ی داخلی است که سبب افزایش تنش برشی می‌شود اما نواحی با تنش برشی کم در بین آبشکن‌ها وجود دارد که این موقعیت‌ها محل‌های مستعد برای رسوب‌گذاری است.

نتیجه‌گیری کلی

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 سه بعدی سرعت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج کلی این تحقیق آزمایشگاهی را به این صورت می‌توان بیان داشت که به کار بردن آبشکن‌ها در هر سه حالت طولی توزیع سرعت بالادست آبشکن‌ها را یکنواخت کرده است همچنین در هر سه حالت قراردادن آبشکن‌ها سبب انتقال ناحیه پرسرعت به سمت میانه کانال و دیواره داخلی گردیده، اما در تمامی حالت‌ها قرار دادن آبشکن‌ها باعث افزایش سرعت جریان در کانال نسبت به حالت قوس بدون آبشکن می‌شود، بطوری‌که بیشینه سرعت که در قوس بدون وجود آبشکن‌ها ۴۹ سانتی‌متر بر ثانیه بوده و در زاویه ۷۰ درجه قوس رخ داده بود با وجود آبشکن‌ها به ۸۰/۴۲ سانتی‌متر بر ثانیه رسیده که در زاویه ۷۶ درجه

تنش‌ها در قسمت مستقیم بالادست و ابتدای قوس گردیده و ناحیه پرتنش را از دیواره خارجی قوس به سمت میانه و دیواره داخلی قوس متمایل کرده است.

منابع مورد استفاده

- پورنصیری م، پیرستانی م و مجدزاده طباطبائی م، ۱۳۸۷. بررسی تغییرات جریان حلزونی در کانال‌های قوسی U شکل. مجموعه مقالات هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، تهران.
- قدسیان م، ۱۳۸۸. بررسی آبشستگی، رسوبگذاری و الگوی جریان اطراف آبشکن در قوس ۹۰ درجه. گزارش نهایی، طرح تحقیقاتی شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران.
- قدسیان م، واقفی م و پناه‌پور ن، ۱۳۸۷. بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان دو بعدی اطراف آبشکن در قوس ۹۰ درجه. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۱۵، شماره ۴. صفحه‌های ۲۶۹ تا ۲۸۲.
- واقفی م و قدسیان م، ۱۳۸۹. مطالعه آزمایشگاهی قدرت جریان ثانویه و مقدار رتیسیتی در قوس ۹۰ درجه با آبشکن T شکل منفرد. نشریه مهندسی عمران، سال ۲۱، شماره ۲. صفحه‌های ۱۱۲ تا ۱۳۰.
- Abad JD and Rhoalds BL, 2008. Flow structure at different stages in a meander-bend with bendway weirs. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 134: 1052-1063.
- Blanckaert K and Graf WH, 2001. Mean flow and turbulence in open-channel bend. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 127: 835-847.
- Duan J, Li H, Xudong F and Quangqian W, 2009. Mean flow and turbulence around experimental spur dike. Advances in Water Resources 32: 1717-1725.
- Ghodsian M and Vaghefi M, 2009. Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a t-shape spur dike in a 90° bend. International Journal of Sediment Research 24: 145-158.
- Giri S, Shimizu Y and 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.
- Naji Abhari M, Ghodsian M, Vaghefi M and Panahpur N, 2010. Experimental and numerical simulation of flow in a 90 degrees bend. Flow Measurement and Instrumentation 21: 292-298.
- Richardson W, 2002. Simplified model for assessing meander bend migration rates. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 128: 1094-1097.
- Shukry A, 1950. Flow around bends in an open flume. Transactions, ASCE 115: 751-788.
- Smith JD and Mclean SR, 1984. A model for flow in meandering streams. Water Resources Research 20: 1301-1315.