

## تأثیر قدرت جریان ثانویه بر تنش برشی بستر پیرامون آب‌شکن سرسپری مستقر در موقعیت‌های مختلف قوس ۹۰ درجه با بستر صلب

محمد واقفی<sup>۱\*</sup>، مسعود قدسیان<sup>۲</sup> و مریم اکبری<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۱۵)

### چکیده

در این تحقیق، در قوس ۹۰ درجه ملایم توأم با استقرار آب‌شکن سرسپری در حالت بستر صلب، تأثیر قدرت جریان ثانویه و چرخش بر تغییرات تنش برشی بستر برای موقعیت‌های مختلف نصب آب‌شکن با هم مقایسه شده است. در انجام این آزمایشات برای اندازه‌گیری سرعت از دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی ADV استفاده شده است. مقایسه بین بردارهای سرعت و تغییرات خطوط جریان در طول قوس انجام شده و مقادیر قدرت جریان ثانویه و چرخش برای موقعیت‌های مختلف استقرار آب‌شکن محاسبه و تأثیر آن بر تغییرات تنش برشی بستر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج بیانگر این است که در موقعیت‌های مختلف نصب آب‌شکن، در فاصله حدود ۰/۶ طول آب‌شکن و در بالادست، بیشترین مقدار قدرت جریان ثانویه ایجاد می‌گردد. محل وقوع بیشینه چرخش نیز بر محل وقوع بیشینه قدرت جریان ثانویه در جلو بال آب‌شکن منطبق می‌باشد. با توجه به نتایج ارائه‌شده پیش‌بینی می‌شود که مکان وقوع آبشستگی بیشینه نیز نزدیک به مکان وقوع بیشینه پارامترهای قدرت جریان ثانویه و چرخش باشد. همچنین مسیر حرکت رسوبات نیز بر مکان هندسی نقاطی که تنش برشی بیشتری دارند، منطبق می‌باشد.

واژگان کلیدی: قدرت جریان ثانویه، تنش برشی بستر، آب‌شکن سرسپری، سرعت‌سنج سه‌بعدی

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خلیج فارس

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

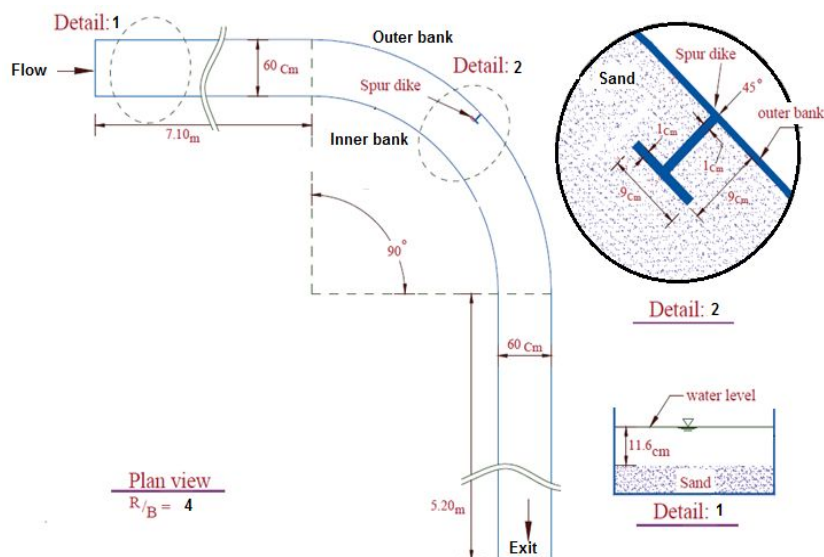
\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: vaghefi@pgu.ac.ir

## مقدمه

قسمت‌های خمیده یک رودخانه از جمله بازه‌های بحرانی در شناسایی رفتار هیدرولیکی رودخانه‌ها می‌باشد. طبیعت سه‌بعدی جریان و آشفتگی‌های موجود در قوس‌ها از یک طرف و تغییرات غیریکنواخت توپوگرافی بستر و عمق جریان از طرف دیگر باعث تشکیل جریان‌های ناشناخته‌ای در قوس رودخانه‌ها می‌شود. در حالت کلی فرض می‌شود که نیروهای حاکم بر یک جریان خمیده نیروهای گریز از مرکز است. در رودخانه‌ها سرعت جریان در نواحی بالایی نزدیک سطح آزاد زیاد می‌باشد که این پدیده منجر به عدم یکنواختی پروفیل سرعت در جهت قائم می‌شود (۵). وجود جریان‌های ثانویه و حلزونی تأثیر زیادی بر مورفولوژی قوس رودخانه‌ها دارد به طوری که باعث حمله شدید به بستر رودخانه و ساحل خارجی و در نتیجه تخریب آن می‌شود. در این بین یکی از راه‌های تثبیت ساحل خارجی قوس رودخانه‌ها استفاده از آب‌شکن می‌باشد. هنگامی که از آب‌شکن‌ها برای محافظت جداره رودخانه در خم‌ها استفاده می‌گردد، تحلیل جریان در اطراف آب‌شکن‌های استفاده شده در قوس خارجی بسیار پیچیده‌تر می‌گردد که علت آن اندرکنش الگوی جریان در قوس و الگوی جریان اطراف آب‌شکن در قوس‌ها می‌باشد (۶).

به دلیل اهمیت موضوع الگوی جریان و آبشستگی در رودخانه‌ها، از زمان‌های گذشته تاکنون مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده‌است. شکری در سال ۱۹۵۰ به تعیین معیاری برای قدرت جریان ثانویه در قوس رودخانه‌ها پرداخت که این معیار در یک مقطع عرضی معین، نسبت انرژی جنبشی جریان جانبی به انرژی جنبشی جریان اصلی تعریف شده است (۱۸). نوح و تانسند در سال ۱۹۷۹ به بررسی تأثیر جریان ثانویه بر روی توزیع تنش برشی بستر و طول تأثیر آن از روی نحوه تغییرات تنش برشی پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که تأثیرات جریان ثانویه تولید شده بعد از خروجی قوس نه تنها از بین نمی‌رود بلکه تا فاصله‌ای در بازه مستقیم پایین‌دست نیز ادامه می‌یابد (۱۷). لیان و همکاران در سال ۱۹۹۹ با استفاده از مدل

دو بعدی متوسط‌گیری شده در عمق، الگوی جریان در دو قوس ۹۰ و ۱۸۰ درجه را مورد بررسی قرار دادند و هدف خود را تهیه یک مدل دو بعدی که تأثیر جریان ثانویه را در نظر می‌گیرد، عنوان کردند. نتایج تحقیقات آنها بیانگر این است که نیروی غالب در قوس ملایم، نیروی گریز از مرکز می‌باشد (۱۳). بلانکارت و گراف در سال ۲۰۰۱ به بررسی الگوی جریان و آشفتگی در یک کانال ۱۲۰ درجه پرداختند. آنها مشاهده نمودند که بیشینه سرعت جریان در نزدیکی بستر بوده و یک جریان چرخشی مرکزی نیز در این مقطع وجود دارد. علاوه بر این، جریان چرخشی دیگری نیز در خلاف جهت این جریان در نزدیکی قوس بیرونی وجود داشته و بیشینه سرعت نیز در مرز این دو سلول چرخشی است (۹). یانگ در سال ۲۰۰۵ به بررسی اندرکنش تنش برشی مرزی و توزیع سرعت و جریان‌های ثانویه در کانال‌های باز پرداخت و توزیع سرعت و تنش برشی را در حالت جریان یکنواخت و ماندگار و همچنین متلاطم به کار برد و معادلات حاکم برای توزیع تنش برشی رینولدزی و تنش برشی مرزی را ارائه نمودند (۲۹). مارین و زاراملا در سال ۲۰۰۶ به بررسی عددی اثر گرایان سرعت و جریان ثانویه در انتشار آلودگی در رودخانه‌های پیچان‌رودی پرداختند (۱۴). باربوحیا و دی در سال‌های ۲۰۰۴-۲۰۰۶ الگوی جریان سه‌بعدی، تنش‌های رینولدزی، میزان آشفتگی، میدان جریان آشفته و مقدار چرخش در اطراف کوله پل با مقطع نیم دایره، مستطیلی و ذوزنقه‌ای در مسیر مستقیم را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند (۱۰ و ۱۱). تنگ و همکاران در سال ۲۰۰۶ قدرت جریان ثانویه در اطراف آب‌شکن‌های ساده مستقر در مسیر مستقیم با استفاده از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ را بررسی نمودند (۱۹). مسجدی و همکاران به مطالعه پارامترهای موثر بر وقوع آبشستگی در قوس ۱۸۰ درجه ملایم تحت تأثیر استقرار سازه‌های هیدرولیکی مختلف از جمله آب‌شکن، پایه پل و طوقه پرداختند. مشاهدات آنها بیانگر این است که عمق بیشینه آبشستگی با جابه‌جایی آب‌شکن‌ها از نیمه اول قوس به نیمه دوم آن افزایش می‌یابد (۳-۱). اورسیک به



شکل ۱. پلان کانال آزمایشگاهی مورد نظر

توأم با آب‌شکن و با توجه به هندسه خاص آب‌شکن (سرسپری) و همچنین پیش‌بینی نحوه حرکت رسوبات و تغییرات توپوگرافی بستر در طول قوس از نوآوری‌های موجود در این مقاله می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

آزمایشات در کانالی با زاویه مرکزی ۹۰ درجه در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس انجام گرفت. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، این کانال از یک قسمت مستقیم به طول ۷/۱ متر در بالادست و همچنین قسمت مستقیمی به طول ۵/۲ متر در پایین‌دست تشکیل شده که این دو قسمت توسط قوس ۹۰ درجه به شعاع انحنای خارجی ۲/۷ متر به هم متصل گردیده است. ارتفاع آن ۷۰ سانتی‌متر و عرض آن ۶۰ سانتی‌متر می‌باشد. شیب کانال حدود ۰/۰۰۱ و اعداد فرود و رینولدز نیز حدوداً به ترتیب برابر با ۰/۳۵ و ۶۵۰۰۰ در ابتدای قوس ۹۰ درجه می‌باشند، ضمن این‌که در کلیه آزمایشات، شرایط آب تمیز (زالال) حاکم بوده است. کف کانال با رسوباتی به قطر متوسط معادل با ۱/۲۸ میلی‌متر و انحراف معیار ۱/۳ پوشیده شده است. دبی جریان به وسیله یک روزنه کالیبره شده تنظیم شده و در کلیه آزمایشات ثابت و برابر با

بررسی آزمایشگاهی روش‌های مختلف برای محاسبه تنش برشی بستر در پیچان‌رودها پرداخت. وی برای محاسبه تنش برشی رینولدزی از دو روش مختلف یکی با برداشت مولفه‌های سه‌بعدی سرعت در نزدیکی بستر (عمقی معادل ۱۰ درصد عمق جریان از کف) و دیگری محاسبه تنش در اعماق مختلف و برون‌یابی آن در نزدیکی بستر استفاده کرد (۲۰).

در مورد آب‌شکن‌های سرسپری مستقر در قوس ۹۰ درجه، تحقیقات گسترده‌ای توسط قدسیان و واقفی در سال ۲۰۰۹ و همچنین واقفی و همکاران از سال ۲۰۰۹ تاکنون در زمینه الگوی جریان و آبشستگی پیرامون آب‌شکن‌های سرسپری تحت تأثیر پارامترهای مختلفی از جمله عدد فرود، طول آب‌شکن، شرایط هیدرولیکی و ... به صورت آزمایشگاهی و عددی انجام گرفته است (۱۲ و ۲۱-۲۸). با توجه به این‌که در شناسایی هیدرودینامیک جریان‌های موجود در قوس، تعیین مقادیر قدرت جریان ثانویه و چرخش سلول‌ها (Vorticity) در مقاطع عرضی مختلف در اطراف سازه‌های هیدرولیکی نظیر آب‌شکن می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای داشته باشد، در این مقاله به محاسبه قدرت جریان ثانویه و چرخش پیرامون آب‌شکن‌های موجود در قوس ۹۰ درجه و تأثیر آن بر تغییرات تنش برشی بستر پرداخته شده است. محاسبه پارامترهای مذکور در قوس

Vectorino و Explore V متوسط‌گیری شده است.

برای بررسی جریان ثانویه در مسیرهای قوسی دو معیار اصلی وجود دارد که در این مقاله به بررسی این دو معیار در قوس توأم با استقرار آب‌شکن در موقعیت‌های مختلف پرداخته شده است. معیارهای شکری و چرخش (۴، ۱۸ و ۲۲) دو معیار مهم در محاسبه کمی جریان‌های ثانویه می‌باشند که با در دست داشتن مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت جریان قابل محاسبه می‌باشند. برای محاسبه تنش برشی بستر نیز از تنش‌های رینولدزی نقطه‌ای در لایه نزدیک به بستر (۲۲ و ۱۰) استفاده شده است:

$$\tau_b = (\tau_x^2 + \tau_y^2)^{0.5} \quad [1]$$

$$\tau_x = \rho(\overline{w_i' u_i'} + \overline{v_i' u_i'}) \quad [2]$$

$$\tau_y = \rho(\overline{v_i' u_i'} + \overline{w_i' u_i'}) \quad [3]$$

$$u_i' = u_i - \bar{u} \quad [4]$$

$$v_i' = v_i - \bar{v} \quad [5]$$

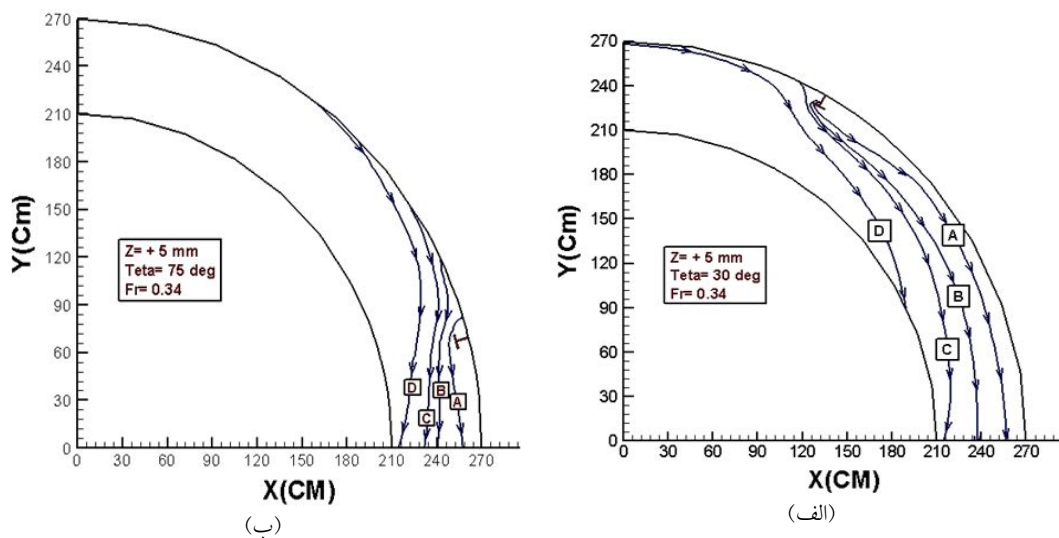
$$w_i' = w_i - \bar{w} \quad [6]$$

در روابط بالا،  $\tau_x$ ،  $\tau_y$  و  $\tau_b$ : به ترتیب مؤلفه تنش برشی در راستای طول کانال، عرض کانال و تنش برشی برآیند،  $u_i'$ ،  $v_i'$  و  $w_i'$ : به ترتیب سرعت‌های لحظه‌ای برداشت شده در سه راستای طول، عرض و ارتفاع کانال،  $\bar{u}$ ،  $\bar{v}$  و  $\bar{w}$ : به ترتیب سرعت‌های متوسط‌گیری شده در سه راستای طول، عرض و ارتفاع کانال می‌باشند.

این روش هنگامی استفاده می‌شود که برداشت سرعت در لایه مرزی آشفته انجام پذیرفته باشد. در تحقیق پیش رو برای محاسبه تنش برشی بستر در کلیه موقعیت‌های استقرار آب‌شکن از روش تنش‌های رینولدز استفاده گردیده است. مقادیر تنش برشی محاسبه شده نسبت به متوسط تنش برشی نزدیک کف در مسیر مستقیم بالادست قوس بی‌بعد گردیده است. برای به دست آوردن تنش برشی نزدیک کف در مسیر مستقیم بالادست قوس با توجه به انجام آزمایشات خاص (برداشت سرعت در فاصله ۵

لیتر بر ثانیه می‌باشد. برای کنترل جریان نیز از یک دریچه قطاعی که در انتهای کانال نصب گردیده استفاده شده است. آب‌شکن‌های مورد استفاده در این آزمایش‌ها، به صورت صفحات مستطیلی با پلان T شکل و از جنس پلکسی گلاس می‌باشند. طول بال و جان همه آب‌شکن‌ها ۹ سانتی‌متر (با توجه به توصیه‌های احمد در سال ۱۹۵۱ (۸))، ضخامت آنها یک سانتی‌متر و ارتفاع آنها نیز ۶۵ سانتی‌متر (برای ایجاد شرایط غیرمستغرق) در نظر گرفته شده است. با توجه به این که طول آب‌شکن باید از کوچکتر از ثلث عرض کانال باشد، با در نظر گرفتن عرض ۶۰ سانتی‌متری کانال آزمایشگاهی بنابراین در این تحقیق از آب‌شکنی با طول ۹ سانتی‌متر که معادل با ۱۵ درصد عرض کانال می‌باشد، استفاده شده است. طول این آب‌شکن با توجه به عمق ۱۲ سانتی‌متری جریان و بنا به توصیه‌های ملویل (۱۵) و یاسی و همکاران (۷) در محدوده آب‌شکن‌های کوتاه قرار می‌گیرد (نسبت طول آب‌شکن به عمق جریان کمتر از ۱).

آزمایشات در سه موقعیت مختلف در طول قوس و در زوایای ۳۰، ۴۵ و ۷۵ درجه و عمود بر دیواره خارجی انجام گرفته و برای برداشت پروفیل سرعت سه‌بعدی جریان نیز در ۲۳ مقطع عرضی در طول قوس، ۵ پلان افقی و همچنین در هر محور عرضی نیز ۱۹ نقطه قرائت شده است. شبکه‌بندی ذکر شده غیریکنواخت بوده و در نزدیکی آب‌شکن ریزتر می‌باشد. برای اندازه‌گیری سرعت از سرعت‌سنج سه‌بعدی (Acoustic ADV Doppler Velocimeter) استفاده شده است. این سرعت‌سنج، از دو حسگر متفاوت تشکیل شده که برای اندازه‌گیری سرعت در نزدیکی سطح جریان از حسگر جانب‌نگر (Side Looking) و در لایه‌های دیگر از حسگر پایین‌نگر (Down Looking) استفاده شده است. این دستگاه برای فرکانس ۵۰ هرتز تنظیم شده و مدت زمان اندازه‌گیری هر نقطه از شبکه‌بندی تعریف شده نیز ۶۰ ثانیه بوده است، بنابراین در هر نقطه و در هر جهت ۳۰۰۰ داده سرعت خروجی این دستگاه بوده که این داده‌ها توسط نرم‌افزارهای جانبی



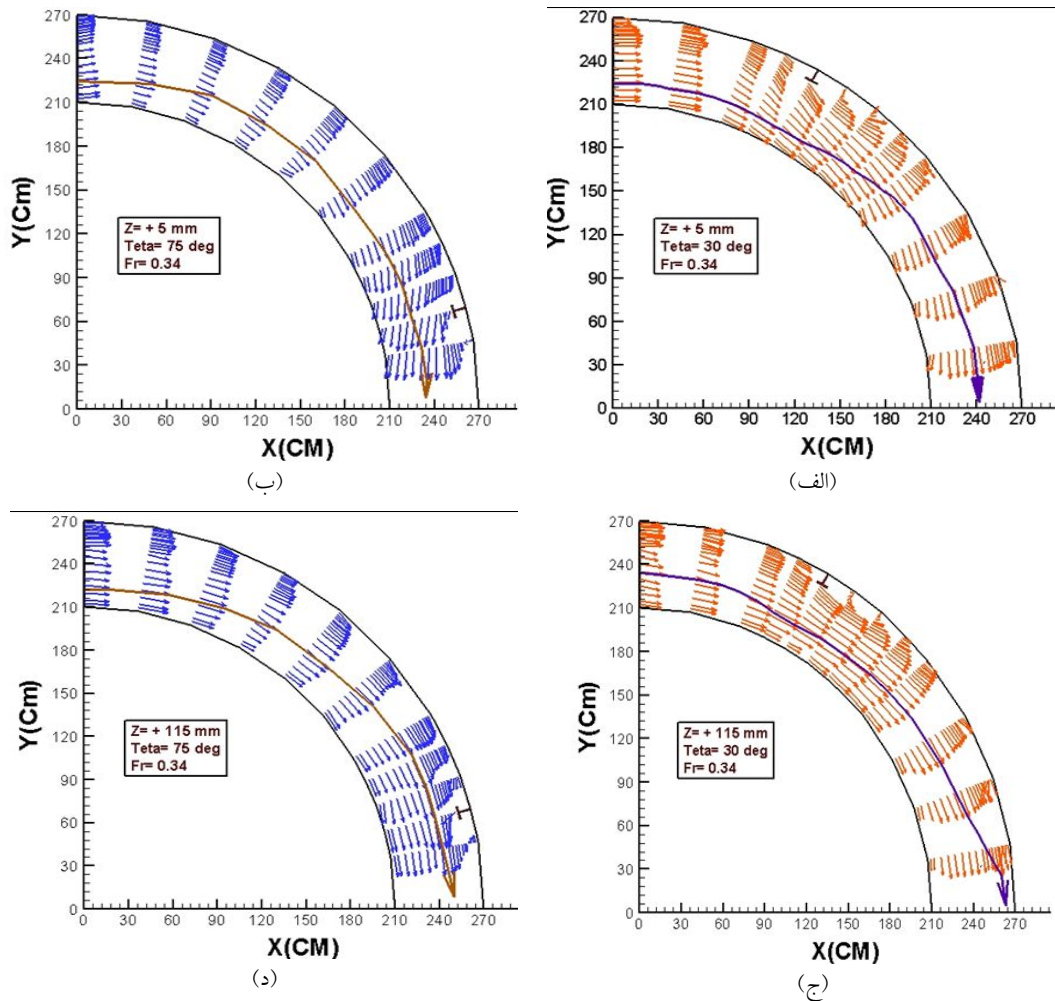
شکل ۲. نمونه‌ای از خطوط جریان در تراز نزدیک به بستر در موقعیت استقرار آب‌شکن در زاویه‌های: الف) ۳۰ و ب) ۷۵ درجه از قوس ۹۰ درجه

افق برای آب‌شکن مستقر در نیمه ابتدایی قوس (شکل ۲-الف) و با زاویه حدود ۹۰ تا ۱۲۰ درجه نسبت به افق برای آب‌شکن مستقر در نیمه دوم قوس (شکل ۲-ب) رسوبات را به پایین دست منتقل می‌کنند. با توجه به شکل ۲-ب، خطوط جریان در نزدیکی بستر تحت تأثیر مسیر مستقیم پایین دست قوس قرار می‌گیرد و بر این مبنای پیش‌بینی می‌شود که رسوبات خروجی از چاله آبشستگی به صورت متقارن تری نسبت به زمانی که آب‌شکن در نیمه اول قوس مستقر است، در پایین دست آب‌شکن انباشته شود. اما خطوط جریانی که با حرف D نشان داده شده است، در واقع مسیر دیگری از حرکت رسوبات و به سمت ساحل داخلی را نشان می‌دهد. این دسته از جریان، رسوباتی که از روی شیب عرضی حفره آبشستگی (به سمت ساحل داخلی) و ناشی از گردابه های افقی شکل گرفته در نزدیک بستر جدا می‌شوند را به سمت پایین دست و ساحل داخلی هدایت می‌کند و بر این اساس می‌توان پیش‌بینی نمود که بیشترین میزان رسوب‌گذاری در نزدیکی ساحل داخلی می‌باشد. نمونه‌ای از تغییرات بردارهای سرعت در بعضی از مقاطع اندازه‌گیری شده و مکان هندسی خط سرعت بیشینه جریان در لایه‌هایی با فواصل ۵ و ۹۵ درصد عمق جریان از کف و برای

درصدی عمق جریان از کف) در مسیر مستقیم بالادست، از همان روش تنش‌های رینولدزی استفاده گردیده است.

## نتایج و بحث

در شکل ۲ نمونه‌ای از خطوط جریان در تراز نزدیک به بستر (۵ درصد عمق جریان از کف) برای دو موقعیت استقرار آب‌شکن در زاویه‌های ۳۰ و ۷۵ درجه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود خطوط جریان در نزدیکی بستر به ۴ دسته کلی تقسیم می‌گردد. در گروه A خطوط جریان نزدیک به آب‌شکن می‌باشد و این دسته از خطوط در پایین دست آب‌شکن پس از محدوده جریان‌های بازگشتی و گردابه‌های پایین دست به ساحل خارجی نزدیک می‌شوند و به همین دلیل پیش‌بینی می‌شود که در پایین دست آب‌شکن سرسپری آبشستگی نسبت به آب‌شکن‌های مستقیم کمتر باشد و این بیانگر تأثیر بال آب‌شکن در دور کردن جریان‌های با سرعت بیشینه از ساحل خارجی می‌باشد. گروه‌های B و C خطوط جریانی را که رسوبات را از داخل محدوده آبشستگی واقع در بالادست آب‌شکن به پایین دست منتقل می‌کند، نشان می‌دهد. این خطوط با زاویه‌ای تقریباً برابر با ۵۰ تا ۶۰ درجه نسبت به



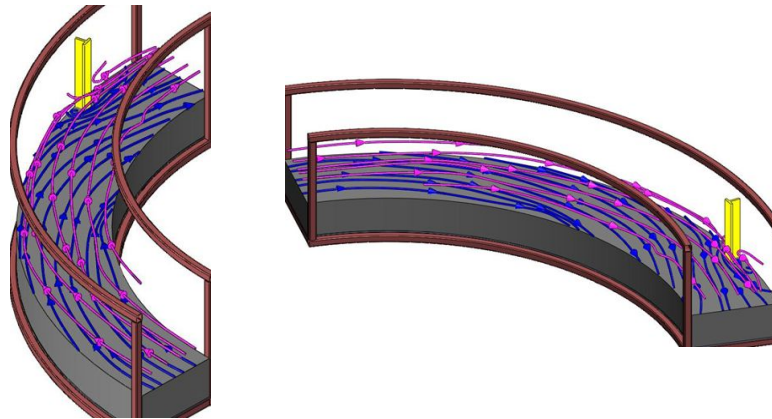
شکل ۳. نمونه‌ای از تغییرات بردارهای سرعت و مکان هندسی خط سرعت بیشینه جریان در: الف) و ج) ترازهایی به فواصل: ۵ و ۹۵

درصد عمق جریان از کف برای آب‌شکن مستقر در موقعیت ۳۰ درجه

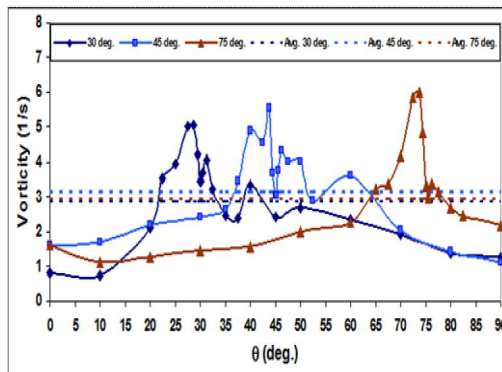
ب) و د) ترازهایی به فواصل: ۵ و ۹۵ درصد عمق جریان از کف برای آب‌شکن مستقر در موقعیت ۷۵ درجه

کف و نزدیک به سطح آزاد به صورت هم‌زمان در حالت آب‌شکن مستقر در موقعیت ۷۵ درجه ارائه شده است. اندازه‌گیری متوسط زاویه خطوط جریان بیانگر این است که اختلاف زاویه بین خطوط جریان در لایه نزدیک بستر و نزدیک سطح آزاد در بالادست محل استقرار آب‌شکن حدود ۱۲ درجه و در پایین دست آن حدود ۲۳ درجه می‌باشد. همچنین میزان متوسط اختلاف زاویه ذکر شده نیز ۱۷/۵ درجه می‌باشد. مقادیر ذکر شده بیانگر تأثیر آب‌شکن سرسپری در انحراف خطوط جریان به خصوص در لایه نزدیک به بستر و در نتیجه پیش‌بینی کاهش پدیده آب‌سنگی در پایین دست این آب‌شکن می‌باشد.

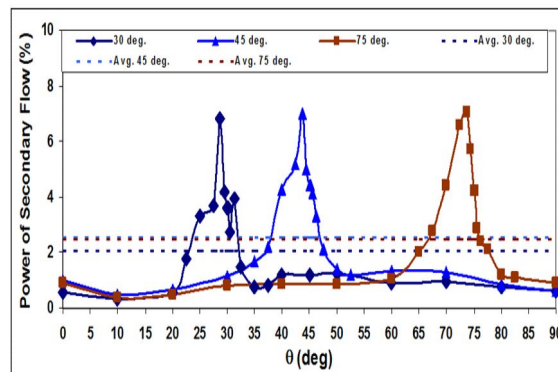
آب‌شکن‌های مستقر در موقعیت‌های ۳۰ و ۷۵ درجه در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در قسمت‌های مختلف شکل ۳ مشاهده می‌شود، در محدوده اطراف آب‌شکن مسیر سرعت بیشینه تحت تأثیر آب‌شکن مستقر در قوس به سمت ساحل داخلی منحرف شده است. مقایسه شکل‌های (۳-الف) با (۳-ج) و همچنین (۳-ب) با (۳-د) بیانگر وجود جریان ثانویه به دلیل تغییر مکان هندسی خط سرعت بیشینه از لایه نزدیک به کف تا لایه نزدیک به سطح، به سمت ساحل خارجی می‌باشد. در شکل ۴ نمونه‌ای از خطوط جریان در لایه نزدیک به



شکل ۴. نمونه‌ای از خطوط جریان در لایه نزدیک به کف و سطح آزاد به صورت هم‌زمان در موقعیت استقرار آب‌شکن در زاویه ۷۵ درجه



(ب)



(الف)

شکل ۵. معیارهای محاسبه جریان ثانویه برای آب‌شکن مستقر در موقعیت‌های مختلف در طول قوس (۹۰ درجه: الف) قدرت جریان ثانویه و (ب) چرخش

باتوجه به شکل ۵، در فاصله حدود ۰/۶ طول آب‌شکن و در بالادست بیشترین مقدار قدرت جریان ثانویه مشاهده می‌گردد. همچنین از فاصله حدود ۰/۶ طول آب‌شکن تا جان آب‌شکن که محدوده بین دیواره بال بالادست و ساحل خارجی می‌باشد، این روند به دلیل ایجاد محدوده کم سرعت و افزایش سرعت طولی در بقیه مقطع، نزولی می‌شود. این روند نزولی تا فاصله‌ای حدود ۷ تا ۸ برابر طول آب‌شکن و در پایین دست ادامه داشته و از آنجا تا انتهای قوس از روند تقریباً یکنواختی برخوردار است. علت افزایش قدرت جریان ثانویه از بالادست تا دماغه بال آب‌شکن، تنگ شدگی مقطع و افزایش مولفه سرعت عرضی و تمایل به ایجاد ناحیه جداشدگی جریان می‌باشد. در محدوده

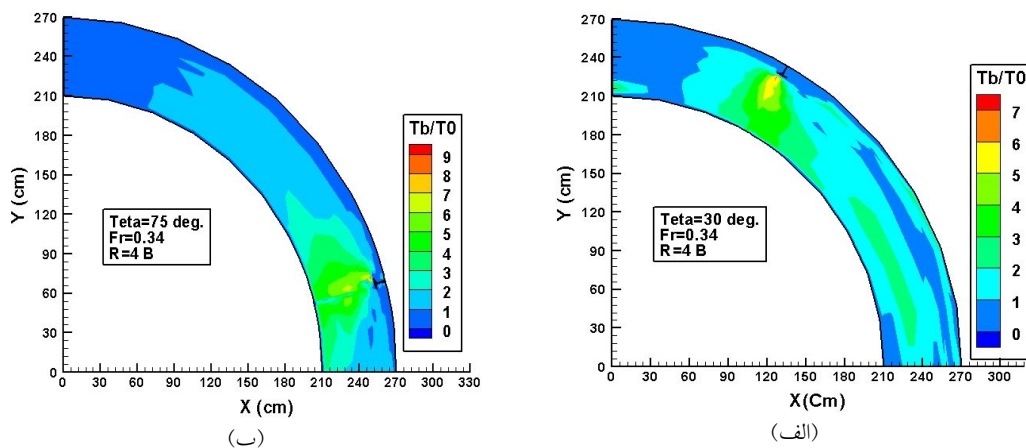
معیارهای ذکر شده در جهت تعیین کمی جریان ثانویه (قدرت جریان ثانویه و چرخش) موجود در طول قوس برای آب‌شکن‌های مستقر در موقعیت‌های ۳۰، ۴۵ و ۷۵ درجه در شکل ۵ ارائه گردیده است. در این شکل مقادیر متوسط قدرت جریان ثانویه و چرخش در هر مقطع به همراه مقادیر متوسط هر یک از این مقادیر در طول قوس ارائه شده است. با توجه به شکل (۵-الف) مشاهده می‌شود که در هر سه حالت، تا حدود ۵/۵ تا ۶/۵ برابر طول آب‌شکن و در بالادست مقادیر قدرت جریان ثانویه از نرخ تقریباً یکنواختی برخوردار بوده و از آن فاصله تا حدود ۰/۶ طول آب‌شکن و در بالادست این روند از نرخ صعودی برخوردار می‌باشد.

محدوده تغییرات صعودی و نزولی منحنی‌ها تقریباً با قدرت جریان ثانویه مشابه است و محل وقوع چرخش بیشینه نیز بر محل وقوع بیشینه قدرت جریان ثانویه (واقع در جلو بال آب‌شکن) منطبق می‌باشد. در نمودارهای تغییر چرخش مربوط به آب‌شکن مستقر در موقعیت‌های ۳۰ و ۴۵ درجه مشاهده می‌شود که در پایین دست آب‌شکن مقدار چرخش از یک روند نزولی - صعودی برخوردار است که قسمت نزولی نمودار مربوط به مقاطع موجود در محدوده بین بال پایین دست آب‌شکن و ساحل خارجی می‌باشد. در این محدوده جریان دارای سرعت کمی بوده و چرخش سلول‌ها کاهش می‌یابد که با خارج شدن از این محدوده به سمت پایین دست روند منحنی صعودی می‌شود. همچنین روند افزایشی چرخش با تغییر موقعیت آب‌شکن به سمت پایین دست قوس مانند تغییرات قدرت جریان ثانویه مشهود می‌باشد. به طور کلی با توجه به شکل ۵ می‌توان پیش‌بینی نمود پدیده آبشستگی موضعی ایجاد شده تا حدود ۵ تا ۶ برابر طول آب‌شکن (یا حدود ۳/۵ تا ۴/۵ برابر عمق جریان در بالادست) و در حدود ۷ تا ۸ برابر طول آب‌شکن (یا حدود ۵ تا ۶ برابر عمق جریان در پایین دست) پیشروی می‌نماید. همچنین با توجه به مقادیر متوسط در طول قوس پارامترهای ذکر شده که بر روی منحنی‌های مربوطه ارائه شده می‌توان پیش‌بینی کرد که در مکان‌هایی که مقادیر پارامترهای ذکر شده از مقدار متوسط ارائه شده بیشتر است، شیب اصلی چاله آبشستگی شکل گرفته است. بر این اساس چاله اصلی تشکیل شده در هنگام ایجاد آبشستگی تا فاصله حدود ۴ تا ۴/۵ برابر طول آب‌شکن در بالادست و ۵ تا ۶ برابر طول آب‌شکن در پایین دست مشهود می‌باشد. علاوه بر این، پیش‌بینی می‌شود مکان وقوع بیشینه آبشستگی نزدیک به مکان وقوع بیشینه پارامترهای قدرت جریان ثانویه و چرخش سلول‌ها یعنی در نزدیکی دماغه بال بالادست آب‌شکن باشد. واقفی و همکاران (۲۳) مقادیر قدرت جریان ثانویه، چرخش سلول‌ها و تنش برشی بستر را با استفاده از روش‌های مختلف مبتنی بر جریان آشفتة در قوس ۱۸۰ درجه تند بدون استقرار سازه

بین بال بالادست آب‌شکن و ساحل خارجی به دلیل برخورد جریان با جان آب‌شکن و توقف جریان یک محدوده جریان بازگشتی با سرعت کم ایجاد می‌شود و باعث کاهش قدرت جریان ثانویه می‌گردد. در پایین دست نیز جریان تحت اثر باز شدگی مقطع قرار می‌گیرد و مؤلفه سرعت عرضی جریان کاهش می‌یابد و قدرت جریان ثانویه کمتر می‌گردد. پس از طی فاصله‌ای حدود ۷ تا ۸ برابر طول آب‌شکن و در پایین دست، جریان تقریباً به صورت جریان موجود در قوس بدون آب‌شکن تبدیل می‌شود و قدرت جریان ثانویه تا انتهای قوس تقریباً یکنواخت می‌شود. به طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری نمود که شکل (۵-الف) بیانگر این است که با تغییر موقعیت استقرار آب‌شکن به سمت پایین دست قوس مقادیر قدرت جریان ثانویه در فواصل مشخص از آب‌شکن در مقایسه با هم از روند افزایشی برخوردار است. به عنوان مثال مقدار بیشینه قدرت جریان ثانویه برای آب‌شکن در موقعیت استقرار ۷۵ درجه در حدود ۱/۱۵ مقدار بیشینه این پارامتر در موقعیت استقرار آب‌شکن در زاویه ۳۰ درجه می‌باشد.

باتوجه به مطلب عنوان شده می‌توان پیش‌بینی نمود که آبشستگی پیرامون آب‌شکن مستقر در موقعیت ۷۵ درجه و همچنین مقدار بیشینه آن از مقادیر مشابه پیرامون آب‌شکن ۳۰ درجه بیشتر است. ناجی ابهری و همکاران (۱۶) با استفاده از نرم‌افزار SSIM به محاسبه قدرت جریان ثانویه تحت تأثیر اعداد فرود مختلف در قوس ۹۰ درجه ملایم با بستر صلب و بدون وجود آب‌شکن پرداختند و بیشینه مقدار قدرت جریان ثانویه را در مقطع عرضی ۳۰ درجه گزارش نمودند؛ درحالی‌که واقفی و همکاران (۲۲) بیشینه مقدار قدرت جریان ثانویه در حالت بستر متحرک قوس ۹۰ درجه را در مقطع عرضی ۴۰ درجه مشاهده نمودند. شکل (۵-ب) مقادیر چرخش سلول‌ها در طول قوس و برای سه حالت استقرار آب‌شکن در موقعیت‌های ۳۰، ۴۵ و ۷۵ درجه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است روند تغییرات این پارامتر نیز تقریباً مشابه تغییرات قدرت جریان ثانویه در شکل (۵-الف) می‌باشد.





شکل ۶. کانتورهای تنش برشی بی‌بعد شده بستر نسبت به تنش برشی متوسط بستر در مسیر مستقیم بالادست با استفاده از تنش‌های رینولدزی برای آب‌شکن‌های مستقر در موقعیت‌های: الف) ۳۰° و ب) ۷۵° درجه

ساحل داخلی و با توجه به تنش برشی زیادی (تا حدود چند برابر متوسط مسیر مستقیم بالادست) که ایجاد می‌کنند، باعث حرکت پرتاب‌گونه رسوبات به سمت پایین دست در طول آزمایش و به‌خصوص در شروع آزمایشات می‌شود. با توجه به شکل ۶ ملاحظه می‌گردد که در ساحل خارجی و در پایین دست آب‌شکن، تنش برشی نسبت به نقاط دیگر کمتر بوده که می‌تواند عاملی در جهت کاهش آبشستگی در ساحل خارجی پایین دست باشد. همچنین پیش‌بینی می‌شود که مسیر حرکت رسوبات بر مکان هندسی نقاطی که تنش برشی بیشتری دارند، منطبق باشد.

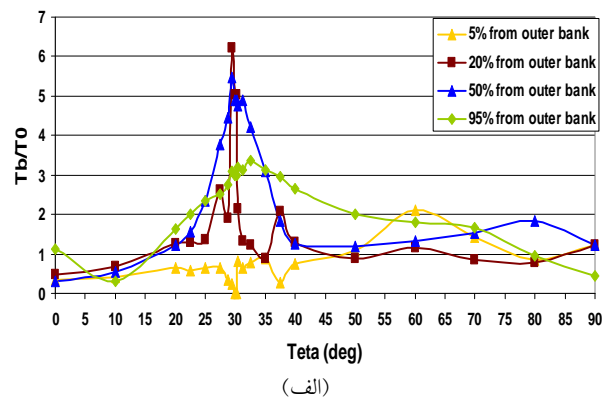
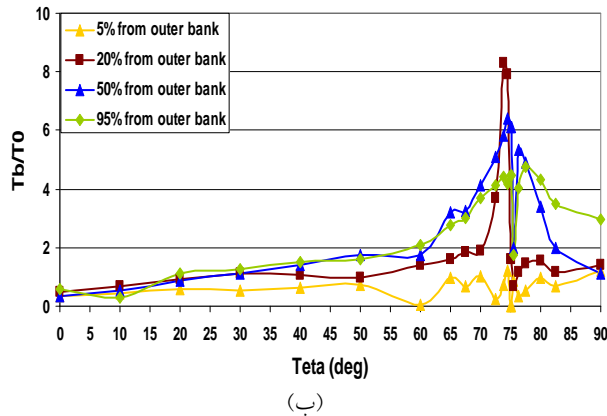
مقایسه شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب) بیانگر افزایش مقدار تنش برشی با تغییر موقعیت آب‌شکن به سمت پایین دست قوس می‌باشد و بر این اساس می‌توان پیش‌بینی نمود که با تغییر موقعیت آب‌شکن به سمت پایین دست قوس مقدار آبشستگی بیشتر می‌شود.

شکل ۷ نمودار تنش برشی بی‌بعد شده نزدیک به بستر در فواصل مختلف از ساحل خارجی و برای آب‌شکن در موقعیت‌های ۳۰° و ۷۵° درجه را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در موقعیت ۳۰° درجه و در فاصله معادل ۵ درصد عرض کانال از ساحل خارجی (شکل ۷-الف) تا موقعیت ۵۰° درجه، تنش برشی بستر از تنش برشی

هیدرولیکی را نیز به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که روند تغییرات چرخش و قدرت جریان ثانویه تقریباً بر هم منطبق بوده و بیشینه تنش رینولدزی نیز در محدوده افزایش این دو پارامتر می‌باشد.

کانتورهای تنش برشی بی‌بعد شده در نزدیکی بستر با استفاده از روش تنش‌های رینولدزی برای آب‌شکن‌های مستقر در موقعیت‌های ۳۰° و ۷۵° درجه در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بالادست آب‌شکن و از حدود فواصلی که قدرت جریان ثانویه و چرخش سلول‌ها روند صعودی خود را آغاز نمودند (مطابق شکل ۵) تنش برشی بستر نیز از متوسط تنش برشی در مسیر مستقیم بالادست بیشتر شده و پیش‌بینی می‌شود که شروع پدیده آبشستگی از این قسمت انجام شود. در اطراف بال آب‌شکن مقدار تنش برشی بستر به دلیل تمرکز به‌وجود آمده ناشی از تنگ‌شدگی مقطع به چندین برابر متوسط تنش برشی در مسیر مستقیم بالادست می‌رسد و پیش‌بینی می‌شود که حرکت رسوبات از این منطقه و به‌طور مشخص از دماغه بال آب‌شکن آغاز گردد. در منطقه بین بال بالادست و ساحل خارجی مقادیر تنش برشی در حدود تنش برشی متوسط در مسیر مستقیم بالادست می‌باشد که احتمالاً رسوبات در این منطقه به‌واسطه گردابه‌های قائم تشکیل شده از بستر جدا می‌شوند و جریان در دماغه بال آب‌شکن و به سمت



شکل ۷. مقادیر تنش برشی بی بعد شده بستر در فواصل مختلف از ساحل خارجی و برای آبشکن‌های مستقر در موقعیت‌های: الف) ۳۰ و ب) ۷۵ درجه

تنش برشی بستر در محدوده آبشکن بیشترین مقدار را دارد و در موقعیت استقرار آبشکن در زاویه ۳۰ درجه، در محدوده بین ۵۰ تا ۷۰ درجه نیز روند صعودی و نزولی دارد ولی این روند در موقعیت استقرار آبشکن در زاویه ۷۵ درجه به دلیل تأثیر مسیر مستقیم پایین دست قوس مشاهده نمی‌شود. همچنین مقایسه مقادیر عددی شکل‌های (الف-۷) و (ب-۷) بیانگر تنش برشی بیشتر در هنگام استقرار آبشکن در موقعیت ۷۵ درجه می‌باشد که این مطلب بیانگر احتمال وقوع آبشستگی بیشتر پیرامون آبشکن مستقر در موقعیت‌های انتهایی قوس در صورت متحرک بودن بستر می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی نحوه تغییرات قدرت جریان ثانویه و چرخش و تأثیر آنها بر تنش برشی بستر پیرامون آبشکن سرسپری مستقر در موقعیت‌های مختلف قوس ۹۰ درجه پرداخته شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که با تغییر موقعیت استقرار آبشکن به سمت پایین دست قوس مقادیر قدرت جریان ثانویه، چرخش، تنش برشی بستر و در نتیجه آبشستگی در فواصل مشخص از آبشکن در مقایسه با هم از روند افزایشی برخوردار است. به گونه‌ای که بیشینه قدرت جریان ثانویه برای آبشکن در موقعیت استقرار ۷۵

متوسط مسیر مستقیم بالادست ( $\tau_0$ ) کمتر است و بین موقعیت ۵۰ تا ۷۵ درجه نرخ صعودی تا سه برابر داشته و در نهایت به صورت نزولی مشاهده می‌شود. بر این اساس می‌توان احتمال تشکیل چاله آبشستگی دوم در پایین دست آبشکن مستقر در موقعیت ۳۰ درجه و در فاصله‌ای حدود ۱۱ تا ۱۳ برابر طول آبشکن نزدیک به ساحل خارجی را انتظار داشت. این تغییر برای آبشکن مستقر در موقعیت ۷۵ درجه و به فاصله ۵ درصدی عرض کانال از ساحل خارجی (شکل ۷-ب) مشاهده نمی‌شود که دلیل آن تأثیرگذاری مسیر مستقیم پایین دست قوس بر جریان شکل گرفته در پایین دست آبشکن می‌باشد. در فاصله معادل ۲۰ درصد عرض کانال و از ساحل خارجی همان‌طور که از شکل ۷ مشاهده می‌شود، تنش برشی بستر بیشترین مقدار (حدود ۶/۴ برابر) را در محدوده استقرار آبشکن دارا است که دلیل آن عبور مقطع طولی محاسبه شده از کنار بال آبشکن می‌باشد اما بعد از عبور از محدوده آبشکن مقدار تنش برشی بستر نزولی و سپس یکنواخت است. در مقطع عبوری از وسط کانال نیز روند تغییرات مانند مقطع قبل بوده فقط مقدار بیشینه آن که در محل استقرار آبشکن است به دلیل دور شدن از بال آبشکن از مقدار بیشینه در مقطع نزدیک به بال کمتر است. در مقطع نزدیک به ساحل داخلی و به فاصله ۹۵ درصد عرض کانال از ساحل خارجی نیز

همچنین بیشترین مقدار بی‌بعد تنش برشی بستر نیز در محدوده استقرار آب‌شکن (حدود  $6/4$  و  $8/5$  برابر مقدار تنش برشی بستر در مسیر مستقیم بالادست به ترتیب برای موقعیت‌های  $30^\circ$  و  $75^\circ$  درجه) می‌باشد اما بعد از عبور از محدوده استقرار آب‌شکن مقدار تنش برشی بستر نزولی و سپس یکنواخت می‌گردد.

درجه در حدود  $1/15$  مقدار بیشینه آن در موقعیت  $30^\circ$  درجه می‌باشد. با توجه به مقادیر متوسط پارامترهای قدرت جریان ثانویه و چرخش می‌توان پیش‌بینی نمود که در مکان‌هایی که مقادیر پارامترهای مذکور از مقادیر متوسط بیشتر است، شیب اصلی چاله آبشستگی شکل گرفته و بر این اساس امکان تشکیل چاله اصلی تا فاصله حدود  $4$  تا  $4/5$  برابر طول آب‌شکن در بالادست و  $5$  تا  $6$  برابر طول آن در پایین‌دست وجود دارد.

### منابع مورد استفاده

۱. مسجدی، ع.ر.، ح. کاظمی و ا. مرادی. ۱۳۹۰. اثر موقعیت پایه پل استوانه‌ای بر عمق آبشستگی در قوس  $180^\circ$  درجه رودخانه‌ها. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک ۱۵ (۵۷): ۹-۱.
۲. مسجدی، ع.ر. و م. غلام زاده محمودی. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی اثر طوقه در کنترل آبشستگی اطراف پایه پل استوانه‌ای در قوس  $180^\circ$  درجه رودخانه. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک ۱۵ (۵۵): ۲۷-۳۸.
۳. مسجدی، ع.ر. و ا. مرادی. ۱۳۸۸. بررسی آزمایشگاهی اثر موقعیت تک آبشکن بر عمق آبشستگی اطراف آن در خم  $180^\circ$  درجه. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک ۱۳ (۵۰): ۴۳-۵۰.
۴. واقفی، م. و م. قدسیان. ۱۳۸۹. مطالعه آزمایشگاهی قدرت جریان ثانویه و ورتیستی در قوس  $90^\circ$  درجه با آب‌شکن T شکل منفرد. نشریه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد ۲۱ (۱): ۱۱۱-۱۲۸.
۵. واقفی، م.، م. قدسیان و س. ع. ا. صالحی نیشابوری. ۱۳۸۸. مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان سه بعدی پیرامون آب‌شکن T شکل مستقر در قوس  $90^\circ$  درجه. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک ۲۰ (۲): ۱۰۵-۱۲۹.
۶. واقفی، م.، م. قدسیان و س. ع. ا. صالحی نیشابوری. ۱۳۸۹. مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان پیرامون آب‌شکن T شکل در قوس  $90^\circ$  درجه با بستر متحرک. مجله علمی و پژوهشی مهندسی عمران و نقشه برداری دانشکده فنی دانشگاه تهران ۴۴ (۲): ۲۷۶-۲۶۵.
۷. یاسی، م.، ن. طالب بیدختی، م. جوان و م. بینا. ۱۳۸۶. راهنمای طراحی، ساخت و نگهداری آبشکن‌های رودخانه‌ای، نشریه شماره الف - ۳۱۱. وزارت نیرو، تهران.

8. Ahmad, M. 1951. Spacing and protection of spurs for bank protection. Civil Eng. and Public. Rev. 46: 3-7.
9. Blanckaert, K. and W. H. Graf. 2001. Mean flow and turbulence in open-channel bend, J. of Hydraulic Eng. 127(10): 126-138.
10. Barbhuiya, A. K. and S. Dey. 2004. Turbulent flow measurement by the ADV in the vicinity of a rectangular cross-section cylinder placed at a channel side wall. Flow. Measur. and Instrum. 15 (4): 221-237.
11. Dey, S. and A. K. Barbhuiya. 2005. Turbulent flow field in a scour hole at a semi-circular abutment. Canadian. J. Civil. Eng. 32(1): 213-232.
12. Ghodsian, M. and M. Vaghefi. 2009. Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T-shaped spur dike in a  $90^\circ$  bend. Int. J. Sediment. Res. 24(2): 145-158.
13. Lian, H. C., T. Y. Hsied and J. C. Yang. 1999. Bend-flow simulation using 2D depth-averaged mode. J. Hydraul. Eng. 125(10): 1097-1108.
14. Marion, A. and M. Zaramella. 2006. Effects of velocity gradients and secondary flow on the dispersion of solutes in a meandering channel. J. Hydraul. Eng. 132(12): 1295-1302.
15. Melville, B. W. 1992. Local scour at bridge abutment. J. Hydraul. Eng. 118(4): 615-631.

16. Naji Abhari, M., M. Ghodsian, M. Vaghefi and N. Panahpur. 2010. Experimental and numerical simulation of flow in a 90° bend. *Flow. Measur. and Instrum.* 21(3): 292-298.
17. Nouh M. A. and R. D. Townsend. 1979. Shear-stress distribution in stable channel bends. *J. Hydraul. Div.* 105(10): 1233-1245.
18. Shukry, A. 1950. Flow around bends in an open flume. *Trans. American. Soc. Civil. Eng.* 115(1): 751-779.
19. Tang, X. L., Z. C. Chen and F. Yang. 2006. Dynamic large eddy simulation of secondary flow near a groyne. *Int. J. Nonlinear. Sci. and Num. Simul.* 7(3): 257-262.
20. Ursic, M. C. 2011. Quantification of shear stress in a meandering native topographic channel using a physical hydraulic model. Master degree Thesis, Water Engineering, Faculty of Hydraulic Engineering, Colorado State University.
21. Vaghefi, M., A. Ahmadi and B. Faraji. 2015. The effect of support structure on flow patterns around T-shape spur dike in 90° bend channel. *Arab. J. Sci. and Eng.* 40(5): 1299-1307.
22. Vaghefi, M., M. Akbari and A. R. Fiouz. 2015. An experimental study of mean and turbulent flow in a 180 degree sharp open channel bend: secondary flow and bed shear stress. *KSCE J. Civil. Eng.* 20 (4):1582-1593
23. Vaghefi, M., M. Ghodsian and A. Adib. 2012. Experimental study on the effect of Froude Number on temporal variation of scour around a T-shaped spur dike in a 90 degree bend. *App. Mech. and Material* 147: 75-79.
24. Vaghefi, M., M. Ghodsian and S. A. A. Salehi Neyshaboori. 2009. Experimental study on the effect of a T-shaped spur dike length on scour in a 90° channel bend. *Arab. J. Sci. and Eng.* 34(2B): 337-348.
25. Vaghefi, M., M. Ghodsian and S. A. A. Salehi Neyshaboori. 2012. Experimental study on scour around a T-Shaped spur dike in a channel bend. *J. Hydraul. Eng.* 138(5): 471-474.
26. Vaghefi, M., V. A. Mohsenimehr and M. Akbari. 2014. Numerical investigation of wing to web length ratios parameter of T-shaped spur dike in a 90 degree bend on scour pattern. *J. River. Eng.* 2(3): 45-52.
27. Vaghefi, M., Y. Safarpour, S. S. Hashemi. 2015. Effects of relative curvature on the scour pattern in a 90° bend with a T-shaped spur dike using a numerical method. *Int. J. River. Basin. Manag.* 13(4): 501-514.
28. Vaghefi, M., M. Shakerdargah and M. Akbari. 2014. Numerical investigation of the effect of Froude number on flow pattern around a submerged T-shaped spur dike in a 90° bend. *Turk. J. Eng. and Env. Sci.* 38(2): 266-277.
29. Yang, S. Q. 2005. Interactions of boundary shear stress, secondary currents and velocity. *Fluid. Dynamic. Res.* 36: 121-136.

## The Effect of Secondary Flow Strength on Bed Shear Stress around T-Shaped Spur Dike Locating in Various Positions of a 90 Degree Bend with Rigid Bed

M. Vaghefi<sup>1\*</sup>, M. Ghodsian<sup>2</sup> and M. Akbari<sup>1</sup>

(Received: Aug. 25-2015 ; Accepted: Dec. 6-2015)

### Abstract

In this study, the effect of the secondary flow strength and vorticity on variations of bed shear stress for different positions of spur dike are compared through a mild 90° bend along with a T-shaped spur dike in a rigid bed. To carry out these experiments, three dimensional velocimeters (ADV) have been used for measuring velocity. Moreover, a comparison has been made between velocity vectors and variations of streamlines along the bend; the secondary flow strength and vorticity values are estimated for various positions of spur dike, and their effects on bed shear stress variations have been analyzed. It is concluded that the maximum secondary flow strength is evident in a distance of 0.6 of spur dike's length at upstream under all these different positions of spur dike. Also the maximum vorticity position corresponds to the position of the maximum secondary flow strength, in front of spur dike's wing. According to these results, it is predicted that the maximum scour occurs near the position of maximum secondary flow strength and maximum vorticity. Besides, the path of sediments motion coincides with the maximum shear stress points locus.

**Keywords:** Secondary flow strength, Bed shear stress, T-shaped spur dike, 3-D velocimeter.

---

1. Dept. of Civil Eng., Technical and Eng. Faculty, Persian Gulf Univ., Bushehr, Iran.

2. Dept. of Water Eng., Civil Eng. Faculty, Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: vaghefi@pgu.ac.ir